

เอกสารประกอบการสอน

รายวิชา เคมี 2

นิภัทร เปี่ยมอรุณ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

2557

เอกสารประกอบการสอน

รายวิชา เคมี 2

นิภัทร เปี่ยมอรุณ

ปร.ด. (เคมีประยุกต์)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

2557

## คำนำ

จากประสบการณ์สอนวิชาเคมี 2 ของผู้เรียบเรียงที่ผ่านมา พบว่านักศึกษาที่เรียนวิชานี้ มีปัญหาเกี่ยวกับการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อหาหลักที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในเรื่อง อุณหพลศาสตร์ (หรือเทอร์โมไดนามิกส์) สมดุลเคมี จลนพลศาสตร์ กรด-เบส เคมีไฟฟ้า และ เคมีนิวเคลียร์ ประกอบกับทัศนคติของนักศึกษาที่มองวิชาบังคับนี้ว่ายาก จึงไม่ค่อยใส่ใจ ไม่สนใจเรียน ไม่ฝึกทำโจทย์และแบบฝึกหัด ทำข้อสอบไม่ได้ และสอบตกในที่สุด

ผู้เรียบเรียงจึงเขียนเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 นี้ขึ้น เพื่อให้วิชานี้ถูกมองว่า ง่าย โดยแสดงทฤษฎีและตัวอย่างที่เน้นการคำนวณอย่างเป็นระบบจากง่ายไปหายากทีละ ขั้นตอนจนได้คำตอบที่ถูกต้อง อีกทั้งในบางเนื้อหา มีการแทรกวิธีการคำนวณโดยใช้กราฟและ รูปภาพ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ พร้อมทั้งมีแบบฝึกหัดท้ายบทสำหรับทบทวนทักษะการ คำนวณของนักศึกษา ส่วนเนื้อหาเกี่ยวกับเคมีสิ่งแวดล้อม และเคมีสีเขียว จะเป็น 2 บทสุดท้าย ที่มีเนื้อหาภาคบรรยายให้กระชับและครอบคลุมความรู้พื้นฐานสำหรับการเรียนวิชาเคมีขั้นสูง ต่อไป

ด้วยกิจกรรมกลุ่มที่จัดให้นักศึกษาได้รวมกลุ่มในระหว่างฟังผู้สอนบรรยายในชั้นเรียน เพื่อศึกษาปัญหาความไม่เข้าใจในเนื้อหาของกันและกัน และแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ช่วยกัน คิดคำนวณแก้ปัญหาโจทย์จนได้คำตอบที่ถูกต้องด้วยตนเอง ซึ่งจากผลการประเมินที่ผ่านมา พบว่าประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดี มีจำนวนนักศึกษาสอบผ่านวิชาเคมี 2 มากขึ้น เป็นที่ ประจักษ์ว่าเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 นี้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนของนักศึกษาอย่าง แท้จริง

ผู้เรียบเรียงจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่นักศึกษาไม่เฉพาะ สำหรับประกอบการเรียนวิชาเคมี 2 แต่นักศึกษายังสามารถเก็บไว้ใช้เป็นเอกสารสำหรับสืบค้น เกี่ยวกับความรู้พื้นฐานด้านเคมีได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษาเอก วท.บ.เคมี และ ค.บ.เคมี ที่จะจบการศึกษาไปเป็นบุคลากรทางด้านเคมีและครูสอนวิชาเคมีที่มีศักยภาพและมีคุณภาพ ของประเทศต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่สนับสนุนและได้จัดโครงการอบรมการ เขียนผลงานทางวิชาการ อันเป็นจุดเริ่มต้นของการเขียนเอกสารฉบับนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

นิภัทร เปี่ยมอรุณ

มกราคม 2557

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	(1)
สารบัญ.....	(2)
สารบัญภาพ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(10)
แผนบริหารการสอนประจำวิชา.....	(11)
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1.....	1
<b>บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์.....</b>	<b>3</b>
1.1 การคำนวณมวลโมเลกุลโดยข้อมูลจากตารางธาตุ.....	3
1.2 การคำนวณหาจำนวนโมลของสาร.....	6
1.3 การดุลสมการเคมีอย่างง่าย.....	8
1.4 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมี.....	10
1.5 สรุป.....	21
แบบฝึกหัดบทที่ 1.....	22
เอกสารอ้างอิง.....	24
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2.....	25
<b>บทที่ 2 อุณหพลศาสตร์.....</b>	<b>27</b>
2.1 นิยามศัพท์ทางอุณหพลศาสตร์.....	27
2.2 งาน ความร้อน และการกำหนดเครื่องหมาย.....	31
2.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์.....	33
2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	34
2.5 อุณหพลศาสตร์เคมี.....	39
2.6 การหาค่าความร้อนของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี.....	41
2.7 สรุป.....	53
แบบฝึกหัดบทที่ 2.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	56



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3.....	57
<b>บทที่ 3 เอนโทรปีและสมดุลเคมี.....</b>	<b>59</b>
3.1 นิยามของเอนโทรปี.....	59
3.2 การคำนวณหาค่า $\Delta S$ และ $\Delta G$ ของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี.....	63
3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์กับสมดุลเคมี.....	65
3.4 สมดุลเคมี.....	68
3.5 สรุป.....	89
แบบฝึกหัดบทที่ 3.....	90
เอกสารอ้างอิง.....	92
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4.....	93
<b>บทที่ 4 จลนพลศาสตร์เคมี.....</b>	<b>95</b>
4.1 ปริมาณสารสัมพันธ์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	95
4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา.....	98
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	102
4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	106
4.5 สมการอัตราแบบเอมพิริคัล.....	107
4.6 หน่วยของค่าคงที่อัตรา.....	110
4.7 การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์.....	110
4.8 เทคนิคที่ใช้ในการทดลอง.....	120
4.9 ปฏิกิริยामูลฐาน.....	121
4.10 ทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์.....	123
4.11 วิธีการค้นหากลไกการเกิดปฏิกิริยา.....	123
4.12 การเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	125
4.13 สรุป.....	127
แบบฝึกหัดบทที่ 4.....	128
เอกสารอ้างอิง.....	130

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5.....	131
<b>บทที่ 5 กรดและเบส.....</b>	<b>133</b>
5.1 การแตกตัวของน้ำ.....	133
5.2 นิยามของกรดและเบส.....	134
5.3 ค่า pH.....	137
5.4 อินดิเคเตอร์กรด-เบส.....	138
5.5 สารละลายกรดแก่และเบสแก่.....	140
5.6 สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อน.....	144
5.7 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง pH และค่า $K_w$ .....	150
5.8 ปฏิกริยาระหว่างกรดและเบส.....	151
5.9 กราฟของการไทเทรต.....	154
5.10 กรดพอลิโปรติก.....	156
5.11 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส.....	161
5.12 สารละลายบัฟเฟอร์.....	165
5.13 สรุป.....	170
แบบฝึกหัดบทที่ 5.....	171
เอกสารอ้างอิง.....	172
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6.....	173
<b>บทที่ 6 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า.....</b>	<b>175</b>
6.1 ลักษณะของปฏิกริยารีดอกซ์.....	175
6.2 เลขออกซิเดชัน.....	176
6.3 หลักเกณฑ์ในการกำหนดค่าเลขออกซิเดชัน.....	178
6.4 การพิจารณาปฏิกริยว่าเป็นปฏิกริยารีดอกซ์หรือไม่.....	179
6.5 การดุลสมการรีดอกซ์.....	180
6.6 เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	183
6.7 สรุป.....	211
แบบฝึกหัดบทที่ 6.....	212

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	214
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7.....	215
<b>บทที่ 7 เคมีนิวเคลียร์.....</b>	<b>217</b>
7.1 นิวเคลียสของอะตอม.....	217
7.2 สัญลักษณ์ของนิวไคลด์.....	218
7.3 นิวไคลด์เสถียรและนิวไคลด์ไม่เสถียร.....	219
7.4 รัังสีนิวเคลียร์.....	219
7.5 พลังงานยึดเหนี่ยว.....	222
7.6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์.....	226
7.7 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี.....	233
7.8 อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี.....	235
7.9 การวัดกัมมันตรังสี.....	238
7.10 หน่วยที่ใช้วัดเมื่อวัดกัมมันตรังสี.....	241
7.11 การป้องกันอันตรายจากกัมมันตรังสี.....	242
7.12 ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี.....	244
7.13 สรุป.....	252
แบบฝึกหัดบทที่ 7.....	253
เอกสารอ้างอิง.....	255
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 8.....	257
<b>บทที่ 8 เคมีสิ่งแวดล้อม.....</b>	<b>259</b>
8.1 ความหมายของสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ.....	259
8.2 เคมีของบรรยากาศ.....	260
8.3 เคมีของน้ำ.....	278
8.4 เคมีของดิน.....	287
8.5 สรุป.....	291
แบบฝึกหัดบทที่ 8.....	292
เอกสารอ้างอิง.....	293

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 9.....	295
<b>บทที่ 9 เคมีสีเขียว.....</b>	<b>297</b>
9.1 ที่มาของเคมีสีเขียว.....	298
9.2 หลักการของเคมีสีเขียว.....	298
9.3 ปฏิกริยาเคมีสีเขียว.....	300
9.4 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตที่นำหลักการของเคมีสีเขียว ไปประยุกต์ใช้.....	302
9.5 สรุป.....	311
แบบฝึกหัดบทที่ 9.....	312
เอกสารอ้างอิง.....	313
บรรณานุกรม.....	315
ภาคผนวก ก.....	323
ภาคผนวก ข.....	324
เฉลยแบบฝึกหัด.....	331

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตารางธาตุ.....	4
2.1 ลักษณะของระบบ (ก) ระบบเปิด (ข) ระบบปิด (ค) ระบบโดดเดี่ยว.....	28
2.2 ลักษณะของกระบวนการการขยายตัวของแก๊สภายในลูกสูบ.....	30
2.3 ลักษณะของวัฏจักร.....	30
2.4 งานจากการขยายตัวแบบผันกลับได้ (ก) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรน้อย ๆ (ข) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมาก ๆ.....	31
2.5 งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักร.....	32
2.6 การกำหนดเครื่องหมายของงานและความร้อน.....	33
3.1 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีรวมของกระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้.....	61
3.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้.....	62
3.3 สภาวะสมดุลเคมี.....	68
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ กับเวลา.....	99
4.2 การแจกแจงพลังงานของโมเลกุลสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ $T_1$ และ $T_2$ .....	102
4.3 การเปลี่ยนแปลงจาก A+B ไปเป็น P ตามทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์.....	123
4.4 พลังงานกับความก้าวหน้าของปฏิกิริยา (ก) ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (C คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา).....	125
5.1 ช่วงการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์กรด-เบสชนิดต่าง ๆ.....	139
5.2 วิธีการไทเทรต.....	151
5.3 การไทเทรตกรดด้วยเบสแก่.....	155
5.4 การไทเทรตเบสด้วยกรดแก่.....	155
6.1 ปฏิกิริยาระหว่างโลหะ Cu กับสารละลาย $Ag^+$ .....	184
6.2 การเชื่อมต่อเครื่องเซลล์ออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	184
6.3 การต่อขั้วทองแดงกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน.....	186
6.4 การต่อขั้วทองแดงกับขั้วสังกะสีที่สภาวะมาตรฐาน.....	188

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.5 ถ่านไฟฉายชนิดสังกะสีคาร์บอน.....	200
6.6 ถ่านกระดุม.....	202
6.7 เซลล์เชื้อเพลิง $H_2-O_2$ .....	203
6.8 แบตเตอรี่สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว.....	204
6.9 เซลล์อิเล็กโทรไลติก.....	206
6.10 การชุบชั้นบนสแตนเลสด้วยโลหะเงิน.....	210
7.1 อัจฉริยะโลหะของรังสีนิวเคลียร์ต่าง ๆ.....	222
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนกับเลขมวล.....	225
7.3 การสลายตัวของธาตุในอนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และอนุกรม แอกทิเนียม.....	234
7.4 จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเทียบกับเวลา.....	238
7.5 เครื่องนับจำนวนไกเกอร์มูลเลอร์.....	239
7.6 หลอดโฟโตมัลติพลีเออร์.....	240
7.7 เครื่องคราวด์แชมเบอร์.....	241
7.8 เครื่องหมายเตือนทางรังสี.....	244
7.9 ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์.....	245
7.10 สัญลักษณ์ดอกไม้อายรังสี.....	249
8.1 การแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกตามแนวตั้ง.....	262
8.2 การทำงานของฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง.....	265
8.3 การเกิดฝนกรด.....	269
8.4 การสั่นของโมเลกุล $H_2O$ และ $CO_2$ ที่ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่เกิดการ เปลี่ยนแปลง.....	270
8.5 การเกิดหมอกควันเคมี.....	271
8.6 ห้องดับฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วง.....	272
8.7 อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิด (ก) ไชโคลน และ (ข) เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก.....	273

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
8.8	เครื่องกรองใย.....	274
8.9	เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต.....	275
8.10	หลอดดูดซึมแก๊ส.....	276
8.11	ตำแหน่งของการติดตั้ง (ซ้าย) และลักษณะภายในของคະຕາໄລດິກ คอนเวอเตอร์ (ขวา).....	277
8.12	กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน.....	284
8.13	ระบบปล่อยออกซิเดชัน (ซ้าย) และระบบเติมอากาศด้วยกังหันน้ำชัยพัฒนา (ขวา).....	285
8.14	ค่า BOD ของน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ.....	286
9.1	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดอะดีพิคจากเบนซีน.....	301
9.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดอะดีพิคจากกลูโคส.....	301
9.3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน.....	302
9.4	วงจรชีวิตตั้งแต่การผลิตจนถึงการย่อยสลายของกรดพอลิแลคติก.....	304
9.5	โครงสร้างของซีโอไลต์บางชนิด.....	307
9.6	คุณสมบัติด้านการดูดซับของซีโอไลต์.....	308
9.7	Scanning Electron Micrograph (SEM) ของซีโอไลต์ชนิด SUZ-4.....	309
ก.1	ตารางธาตุ.....	323



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พลังงานพันธะ; E(A-B) หน่วย kJ/mol.....	48
3.1	ค่า $K_{sp}$ ของเกลือไอออนิกบางชนิดที่ 25 องศาเซลเซียส.....	86
4.1	กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลและกฎอัตราอินทิเกรตของปฏิกิริยาอันดับต่าง ๆ.....	116
5.1	กรดแก่และเบสแก่บางชนิด.....	141
5.2	ความแรงของคู่กรด-เบสบางชนิด.....	145
5.3	ค่าคงที่การแตกตัวของกรดบางชนิดในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส.....	157
6.1	เลขออกซิเดชันของธาตุบางชนิด.....	177
6.2	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของสารบางชนิด.....	189
6.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันมาตรฐานของสารบางชนิด.....	190
6.4	ผลของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสารละลายไอออนิกบางชนิด.....	209
7.1	สมบัติพื้นฐานของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม.....	217
8.1	องค์ประกอบของบรรยากาศ.....	261
8.2	สมบัติทางกายภาพที่นิยมใช้ออกคุณภาพน้ำ.....	279
8.3	สมบัติทางเคมีและชีววิทยาที่นิยมใช้ออกคุณภาพน้ำ.....	280
ข.1	ตารางแสดงสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบบางชนิด.....	324



## แผนบริหารการสอนประจำวิชา

รหัสวิชา 4021105

รายวิชา เคมี 2

3(3-0-6)

(Chemistry 2)

### คำอธิบายรายวิชา

สมดุลเคมี กรด-เบส เทอร์โมไดนามิกส์ จลนพลศาสตร์ เคมีไฟฟ้า เคมีนิวเคลียร์  
เคมีสิ่งแวดล้อม

### ความมุ่งหมายรายวิชา

1. เพื่อให้ผู้ศึกษาเกิดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์ สมดุลเคมี จลนพลศาสตร์เคมี กรดและเบส ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เคมีนิวเคลียร์ เคมีสิ่งแวดล้อม และเคมีสีเขียว
2. เพื่อให้ผู้ศึกษาได้คำนวณในหัวข้อเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์ สมดุลเคมี จลนพลศาสตร์ กรดและเบส ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และเคมีนิวเคลียร์ได้
3. เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถวิเคราะห์และนำความรู้ไปใช้เป็นพื้นฐานสำหรับเรียนวิชาเคมีขั้นสูงต่อไป

### เนื้อหา

บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์

3 ชั่วโมง

- 1.1 การคำนวณมวลโมเลกุลโดยดูข้อมูลจากตารางธาตุ
- 1.2 การคำนวณหาจำนวนโมลของสาร
- 1.3 การดุลสมการเคมีอย่างง่าย
- 1.4 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมี
- 1.5 สรุป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**บทที่ 2 อุณหพลศาสตร์**

6 ชั่วโมง

- 2.1 นิยามศัพท์ทางอุณหพลศาสตร์
- 2.2 งาน ความร้อน และการกำหนดเครื่องหมาย
- 2.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์
- 2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ
- 2.5 อุณหพลศาสตร์เคมี
- 2.6 การหาค่าความร้อนของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี
- 2.7 สรุป

**บทที่ 3 เอนโทรปีและสมดุลเคมี**

6 ชั่วโมง

- 3.1 นิยามของเอนโทรปี
- 3.2 การคำนวณหาค่า  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  ของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี
- 3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์กับสมดุลเคมี
- 3.4 สมดุลเคมี
- 3.5 สรุป

**บทที่ 4 จลนพลศาสตร์เคมี**

6 ชั่วโมง

- 4.1 ปริมาณสารสัมพันธ์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา
- 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.5 สมการอัตราแบบเอมพิริคัล
- 4.6 หน่วยของค่าคงที่อัตรา
- 4.7 การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์
- 4.8 เทคนิคที่ใช้ในการทดลอง
- 4.9 ปฏิกิริยามูลฐาน
- 4.10 ทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์
- 4.11 วิธีการค้นหากลไกการเกิดปฏิกิริยา
- 4.12 การเร่งปฏิกิริยาเคมี
- 4.13 สรุป

**บทที่ 5 กรดและเบส**

6 ชั่วโมง

- 5.1 การแตกตัวของน้ำ
- 5.2 นิยามของกรดและเบส
- 5.3 ค่า pH
- 5.4 อินดิเคเตอร์กรด-เบส
- 5.5 สารละลายกรดแก่และเบสแก่
- 5.6 สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อน
- 5.7 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง pH และค่า  $K_w$
- 5.8 ปฏิกริยาระหว่างกรดและเบส
- 5.9 กราฟของการไทเทรต
- 5.10 กรดพอลิโปรติก
- 5.11 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส
- 5.12 สารละลายบัฟเฟอร์
- 5.13 สรุป

**บทที่ 6 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า**

6 ชั่วโมง

- 6.1 ลักษณะของปฏิกริยารีดอกซ์
- 6.2 เลขออกซิเดชัน
- 6.3 การดุลสมการรีดอกซ์
- 6.4 เซลล์เคมีไฟฟ้า
- 6.5 สรุป

**บทที่ 7 เคมีนิวเคลียร์**

6 ชั่วโมง

- 7.1 นิวเคลียสของอะตอม
- 7.2 สัญลักษณ์ของนิวไคลด์
- 7.3 นิวไคลด์เสถียรและนิวไคลด์ไม่เสถียร
- 7.4 รังสีนิวเคลียร์
- 7.5 พลังงานยึดเหนี่ยว
- 7.6 ปฏิกริยานิวเคลียร์
- 7.7 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี
- 7.8 อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี
- 7.9 การวัดกัมมันตรังสี

- 7.10 หน่วยที่ใช้วัดเมื่อวัดอุณหภูมิในรังสี
- 7.11 การป้องกันอันตรายจากแก๊สมันตรังสี
- 7.12 ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และแก๊สมันตภาพรังสี
- 7.13 สรุป

**บทที่ 8 เคมีสิ่งแวดล้อม**

**3 ชั่วโมง**

- 8.1 ความหมายของสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ
- 8.2 เคมีของบรรยากาศ
- 8.3 เคมีของน้ำ
- 8.4 เคมีของดิน
- 8.5 สรุป

**บทที่ 9 เคมีสีเขียว**

**3 ชั่วโมง**

- 9.1 ที่มาของเคมีสีเขียว
- 9.2 หลักการของเคมีสีเขียว
- 9.3 ปฏิกริยาเคมีสีเขียว
- 9.4 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตที่นำหลักการของเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้
- 9.5 สรุป

**กิจกรรมการเรียนการสอน**

- 1. มอบหมายให้นักศึกษาได้อ่านเอกสารประกอบการสอนมาก่อนล่วงหน้า
- 2. ผู้สอนบรรยายเนื้อหา ทฤษฎี และยกตัวอย่างการคำนวณโดยอธิบายทีละขั้นตอนบนกระดาน
- 3. ให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
- 4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มและทำแบบฝึกหัดร่วมกัน
- 5. ให้นักศึกษาหาและทำแบบฝึกหัดจากหนังสือ ตำราอื่น ๆ เพิ่มเติม

**สื่อการเรียนการสอน**

- 1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมี 2
- 2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อ

## การวัดผลและการประเมินผล

### การวัดผล

<b>1. คะแนนระหว่างภาคเรียน</b>	<b>65%</b>
1.1 ความมีวินัยหรือความรับผิดชอบ	10%
1.2 แบบฝึกหัดและการบ้าน	20%
1.3 คะแนนสอบกลางภาค	35%
<b>2. คะแนนสอบปลายภาค</b>	<b>35%</b>

### การประเมินผล

คะแนนระดับ A	ช่วงคะแนน	80-100
คะแนนระดับ B <sup>+</sup>	ช่วงคะแนน	75-79
คะแนนระดับ B	ช่วงคะแนน	70-74
คะแนนระดับ C <sup>+</sup>	ช่วงคะแนน	65-69
คะแนนระดับ C	ช่วงคะแนน	60-64
คะแนนระดับ D <sup>+</sup>	ช่วงคะแนน	55-59
คะแนนระดับ D	ช่วงคะแนน	50-54
คะแนนระดับ F	ช่วงคะแนน	0-49

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์

- 1.1 การคำนวณมวลโมเลกุลโดยดูข้อมูลจากตารางธาตุ
- 1.2 การคำนวณหาจำนวนโมลของสาร
  - 1.2.1 กรณีที่ทราบสูตรโมเลกุลและทราบน้ำหนักของสารนั้น
  - 1.2.2 กรณีที่ทราบจำนวนอนุภาคของสารนั้น
  - 1.2.3 กรณีสารที่เป็นแก๊ส ณ สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน
  - 1.2.4 กรณีสารละลายที่ทราบความเข้มข้นและปริมาตร
- 1.3 การดุลสมการเคมีอย่างง่าย
- 1.4 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมี
- 1.5 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. คำนวณหาจำนวนโมลของสารจากข้อมูลที่ให้ได้
2. ดุลสมการเคมีอย่างง่ายได้
3. คำนวณเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมีได้

### กิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณทีละขั้นตอนบนกระดาน
2. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
3. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
4. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 1 เรื่องความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 1

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลทดสอบของนักศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



## บทที่ 1

### ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์

ปริมาณสารสัมพันธ์เป็นการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณสารในปฏิกิริยาเคมี ทั้งสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาหายไป และสารผลิตภัณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยานั้น ซึ่งโดยปกติสารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยากันในสัดส่วนที่แน่นอน และเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีสูตรโมเลกุลและมีสูตรโครงสร้างที่จำเพาะเจาะจง ดังนั้นการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์จึงมีความจำเป็นอันดับแรกที่นักเคมีจะต้องทราบและทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้

ในบทที่ 1 นี้จะกล่าวถึงการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารสัมพันธ์ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่นักศึกษาเคยได้เรียนมาแล้วในวิชาเคมี 1 แต่เนื่องจากเนื้อหาวิชาส่วนนี้มีความสำคัญสำหรับบูรณาการความรู้ไปยังเนื้อหาของวิชาเคมี 2 ได้แก่ อุณหพลศาสตร์ สมดุลเคมี จลนพลศาสตร์ กรด-เบส ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เคมีนิวเคลียร์ และเคมีสิ่งแวดล้อม ดังนั้นก่อนที่จะเข้าเนื้อหาหลักของวิชาเคมี 2 จึงจะกล่าวถึงปริมาณสารสัมพันธ์อีกครั้ง โดยเลือกเฉพาะหัวข้อที่จำเป็น ได้แก่ การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลโดยดูข้อมูลจากตารางธาตุ การคำนวณหาจำนวนโมลของสาร การดุลสมการเคมีอย่างง่าย และการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

#### 1.1 การคำนวณมวลโมเลกุลโดยดูข้อมูลจากตารางธาตุ

วิธีการคำนวณหามวลโมเลกุลของสารที่ง่ายที่สุดคืออาศัยการดูข้อมูลจากตารางธาตุ โดยตารางธาตุ (periodic table) คือ ตารางที่รวบรวมธาตุทั้งหมดเข้าไว้เป็นหมวดหมู่ ในปัจจุบันแบ่งแยกธาตุออกตามคาบและหมู่ โดยในตารางธาตุจะจัดเรียงธาตุตามลำดับเลขอะตอม (atomic number) ซึ่งก็คือจำนวนโปรตอน จากน้อยไปมาก ตั้งแต่ธาตุไฮโดรเจน (H; Hydrogen) ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 1 ไปจนถึงธาตุอุนูออกเทียม (Uno; Ununoctium) ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 118 ดังแสดงใน ภาพที่ 1.1 (ภาพที่ขยายใหญ่ขึ้นให้ดูในภาคผนวก ก)



**PERIODIC TABLE**  
**Atomic Properties of the Elements**

NIST  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

**Frequently used fundamental physical constants**  
For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

speed of light in vacuum  $c$  299 792 458 m s<sup>-1</sup> (exact)  
Planck constant  $h$  6.626 07 × 10<sup>-34</sup> J s  
 $(h = h/2\pi)$   
elementary charge  $e$  1.602 177 × 10<sup>-19</sup> C  
electron mass  $m_e$  9.109 38 × 10<sup>-31</sup> kg  
 $m_e c^2$  0.510 999 MeV  
proton mass  $m_p$  1.672 622 × 10<sup>-27</sup> kg  
 $\alpha$  1/137.035 999  
 $R_\infty$  10 973 731 569 m<sup>-1</sup>  
 $R_\infty c$  3.289 841 960 × 10<sup>16</sup> Hz  
 $R_\infty hc$  13.605 69 eV  
Boltzmann constant  $k$  1.380 6 × 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>

**Physical Measurement Laboratory**  
[www.nist.gov/pml](http://www.nist.gov/pml)

**Standard Reference Data**  
[www.nist.gov/srd](http://www.nist.gov/srd)

Solids  
 Liquids  
 Gases  
 Artificially Prepared

Group	1 IA	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA					
1	<b>H</b> Hydrogen 1.008 1s																	<b>He</b> Helium 4.002602 1s <sup>2</sup>					
2	<b>Li</b> Lithium 6.94 1s <sup>2</sup> 2s	<b>Be</b> Beryllium 9.012182 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup>																<b>B</b> Boron 10.81 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>	<b>C</b> Carbon 12.011 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	<b>N</b> Nitrogen 14.007 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	<b>O</b> Oxygen 15.999 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	<b>F</b> Fluorine 18.9984032 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	<b>Ne</b> Neon 20.1797 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>
3	<b>Na</b> Sodium 22.98976928 [Ne]3s	<b>Mg</b> Magnesium 24.3050 [Ne]3s <sup>2</sup>																<b>Al</b> Aluminum 26.9815386 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	<b>Si</b> Silicon 28.0855 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	<b>P</b> Phosphorus 30.973762 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	<b>S</b> Sulfur 32.06 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	<b>Cl</b> Chlorine 35.45 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	<b>Ar</b> Argon 39.948 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>
4	<b>K</b> Potassium 39.0983 [Ar]4s	<b>Ca</b> Calcium 40.078 [Ar]4s	<b>Sc</b> Scandium 44.955912 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ti</b> Titanium 47.88 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>V</b> Vanadium 50.9415 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Cr</b> Chromium 51.9961 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	<b>Mn</b> Manganese 54.938045 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Fe</b> Iron 55.845 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Co</b> Cobalt 58.933195 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ni</b> Nickel 58.9334 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Cu</b> Copper 63.546 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	<b>Zn</b> Zinc 65.38 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ga</b> Gallium 69.723 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	<b>Ge</b> Germanium 72.63 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	<b>As</b> Arsenic 74.92160 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	<b>Se</b> Selenium 78.96 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	<b>Br</b> Bromine 79.904 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	<b>Kr</b> Krypton 83.798 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>					
5	<b>Rb</b> Rubidium 85.4678 [Kr]5s	<b>Sr</b> Strontium 87.62 [Kr]5s	<b>Y</b> Yttrium 88.90585 [Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Zr</b> Zirconium 91.224 [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Nb</b> Niobium 92.90638 [Kr]4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Mo</b> Molybdenum 95.96 [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Tc</b> Technetium (98) [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Ru</b> Ruthenium 101.07 [Kr]4d <sup>6</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Rh</b> Rhodium 102.90550 [Kr]4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Pd</b> Palladium 106.42 [Kr]4d <sup>10</sup>	<b>Ag</b> Silver 107.8682 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Cd</b> Cadmium 112.411 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>In</b> Indium 114.818 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	<b>Sn</b> Tin 118.710 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	<b>Sb</b> Antimony 121.760 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	<b>Te</b> Tellurium 127.60 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	<b>I</b> Iodine 126.90447 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	<b>Xe</b> Xenon 131.293 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>					
6	<b>Cs</b> Cesium 132.9054519 [Xe]6s	<b>Ba</b> Barium 137.327 [Xe]6s	<b>Hf</b> Hafnium 178.49 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ta</b> Tantalum 180.94788 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>W</b> Tungsten 183.84 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Re</b> Rhenium 186.207 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Os</b> Osmium 190.23 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ir</b> Iridium 192.22 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Pt</b> Platinum 195.084 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	<b>Au</b> Gold 196.966569 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	<b>Hg</b> Mercury 200.59 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Tl</b> Thallium 204.38 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>	<b>Pb</b> Lead 207.2 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	<b>Bi</b> Bismuth 208.98040 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	<b>Po</b> Polonium (209) [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	<b>At</b> Astatine (210) [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	<b>Rn</b> Radon (222) [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>						
7	<b>Fr</b> Francium (223) [Rn]7s	<b>Ra</b> Radium (226) [Rn]7s <sup>2</sup>	<b>Rf</b> Rutherfordium (261) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Db</b> Dubnium (262) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Sg</b> Seaborgium (263) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Bh</b> Bohrium (264) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Hs</b> Hassium (265) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Mt</b> Meitnerium (266) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Ds</b> Darmstadtium (267) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Rg</b> Roentgenium (268) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Cn</b> Copernicium (285) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Uut</b> Ununtrium (284) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>1</sup>	<b>Fl</b> Flerovium (286) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>2</sup>	<b>Uup</b> Ununpentium (288) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>3</sup>	<b>Lv</b> Livermorium (293) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>4</sup>	<b>Uus</b> Ununseptium (294) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>5</sup>	<b>Uuo</b> Ununoctium (294) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>6</sup>						
			<b>57</b> Lanthanum 138.90547 [Xe]5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>58</b> Cerium 140.116 [Xe]4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>59</b> Praseodymium 140.90765 [Xe]4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>60</b> Neodymium 144.242 [Xe]4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>61</b> Promethium (145) [Xe]4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>62</b> Samarium 150.36 [Xe]4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>63</b> Europium 151.964 [Xe]4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>64</b> Gadolinium 157.25 [Xe]4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>65</b> Terbium 158.92535 [Xe]4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>66</b> Dysprosium 162.500 [Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>67</b> Holmium 164.93032 [Xe]4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>68</b> Erbium 167.259 [Xe]4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>69</b> Thulium 168.93421 [Xe]4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>70</b> Ytterbium 173.054 [Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>71</b> Lutetium 174.968 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>						
			<b>89</b> Actinium (227) [Rn]5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>90</b> Thorium 232.03806 [Rn]6s <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>91</b> Protactinium 231.03688 [Rn]5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>92</b> Uranium 238.02891 [Rn]5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>93</b> Neptunium (237) [Rn]5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>94</b> Plutonium (244) [Rn]5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>95</b> Americium (243) [Rn]5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>96</b> Curium (247) [Rn]5f <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>97</b> Berkelium (247) [Rn]5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>98</b> Californium (251) [Rn]5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>99</b> Einsteinium (252) [Rn]5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>100</b> Fermium (257) [Rn]5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>101</b> Mendelevium (258) [Rn]5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>102</b> Nobelium (259) [Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>103</b> Lawrencium (260) [Rn]5f <sup>14</sup> 7p <sup>1</sup>						

**Atomic Number**    **Ground-state Level**

**Symbol**    **58**    **Ce**    **G<sub>4</sub>**

**Name**    **Cerium**

**Standard Atomic Weight**    140.116

**Ground-state Configuration**    [Xe]4f<sup>15</sup>6s<sup>2</sup>

**Ionization Energy (eV)**    5.5386

ภาพที่ 1.1 ตารางธาตุ  
(ที่มา: National Institute of Standard and Technology, 2013)

ข้อมูลสำคัญที่ได้จากตารางธาตุ นอกจากคาบและหมู่ที่เชื่อมโยงไปถึงการจัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอมธาตุชนิดนั้น ๆ แล้ว ยังแสดงมวลอะตอม (atomic mass) ของธาตุนั้นด้วย (ดูการกำหนดสัญลักษณ์ที่มุมล่างซ้ายของตารางธาตุ) เช่น ธาตุโบรอน (B; Boron) มีมวลอะตอมเท่ากับ 10.81 หมายความว่า ธาตุโบรอน 1 โมลอะตอม มีมวล (น้ำหนัก) 10.81 กรัม หรือธาตุซีเรียม (Ce; Cerium) มีมวลอะตอมเท่ากับ 140.116 หมายความว่า ธาตุซีเรียม 1 โมลอะตอม มีมวล (น้ำหนัก) 140.116 กรัม เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจกล่าวได้ว่าธาตุโบรอนมีมวล 10.81 กรัม/โมล หรือธาตุซีเรียมมีมวล 140.116 กรัม/โมล

อะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไปรวมตัวกันจะได้สารประกอบ การหามวลโมเลกุลของสารประกอบโควาเลนต์ (covalent compound) หรือมวลสูตรของสารประกอบไอออนิก (ionic compound) สามารถคำนวณได้จากผลรวมของมวลอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบนั้น ๆ เช่น สารประกอบต่อไปนี้ (1) แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) (2) อะลูมิเนียมออกไซด์

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ (4) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub>) มีวิธีการคำนวณหามวลโมเลกุล (ในเอกสารฉบับนี้จะใช้คำว่ามวลโมเลกุลแทนมวลสูตรสำหรับสารประกอบไอออนิก) โดยดูข้อมูลมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบจากตารางธาตุ ดังนี้

(1) NH<sub>3</sub> 1 โมลโมเลกุล\* ประกอบด้วยอะตอม N 1 โมลอะตอม\* คิดเป็นมวล 14.007×1 กรัม H 3 โมลอะตอม คิดเป็นมวล 1.008×3 กรัม

มวลโมเลกุลของ NH<sub>3</sub> 1 โมลโมเลกุล = (14.007×1) + (1.008×3) = 17.031 กรัม

หรือมวลโมเลกุลของ NH<sub>3</sub> = 17.031 กรัม/โมล

(2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล ประกอบด้วยอะตอม Al 2 โมล คิดเป็นมวล 26.9815×2 กรัม O 3 โมล คิดเป็นมวล 15.999×3 กรัม

มวลโมเลกุลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล = (26.9815×2) + (15.999×3) = 101.96 กรัม

หรือมวลโมเลกุลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 101.96 กรัม/โมล

(3) NaOH 1 โมล ประกอบด้วยอะตอม Na 1 โมล คิดเป็นมวล 22.9898×1 กรัม O 1 โมล คิดเป็นมวล 15.999×1 กรัม H 1 โมล คิดเป็นมวล 1.008×1 กรัม

มวลโมเลกุลของ NaOH 1 โมล = (22.9898×1) + (15.999×1) + (1.008×1) = 39.997 กรัม

หรือมวลโมเลกุลของ NaOH = 39.997 กรัม/โมล

(4) KMnO<sub>4</sub> 1 โมล ประกอบด้วยอะตอม K 1 โมล คิดเป็นมวล 39.0983×1 กรัม Mn 1 โมล คิดเป็นมวล 54.9380×1 กรัม O 4 โมล คิดเป็นมวล 15.999×4 กรัม

มวลโมเลกุลของ KMnO<sub>4</sub> 1 โมล = (39.0983×1) + (54.9380×1) + (15.999×4) = 158.032

กรัม หรือมวลโมเลกุลของ KMnO<sub>4</sub> = 158.032 กรัม/โมล

\*หมายเหตุ หน่วย โมล ใช้ได้กับสารทุกประเภท โดยขึ้นอยู่กับว่าสารนั้นเป็นสารประเภทใด เช่น ถ้าพิจารณาสารประกอบ จะใช้หน่วยโมลโมเลกุล แต่ถ้าพิจารณาอะตอมหรือไอออน จะใช้หน่วยโมลอะตอมหรือโมลไอออน ตามลำดับ แต่เพื่อการเขียนที่ยาวเกินไป อาจเขียนสั้น ๆ เพียง “โมล” อย่างเดียว โดยต้องทราบว่ากำลังพิจารณาสารประเภทใด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## 1.2 การคำนวณหาจำนวนโมลของสาร

ปริมาณสารในหน่วยโมล (mole) มีความสำคัญอย่างมากต่อการคำนวณด้านปริมาณสารสัมพันธ์ในปฏิกิริยาเคมี โดยในปฏิกิริยาเคมีที่ดุลแล้ว เช่น  $3A + 2B \rightarrow C$  การทำปฏิกิริยาให้ได้สาร C จำนวน 1 โมล จะต้องใช้สาร A จำนวน 3 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับสาร B จำนวน 2 โมล เท่านั้น หากปริมาณสาร C ที่ต้องการระบุเป็นหน่วยน้ำหนัก ปริมาตร หรือจำนวนโมเลกุล จะต้องแปลงเป็นหน่วยโมลก่อน แล้วจึงเทียบหาปริมาณสาร A และ B ที่ต้องใช้ในหน่วยโมลต่อไป ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาจำนวนโมลของสาร โดยแบ่งเป็นกรณี ๆ ดังนี้

### 1.2.1 กรณีที่ทราบสูตรโมเลกุลและทราบน้ำหนักของสารนั้น

คำนวณหาจำนวนโมลจาก

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{น้ำหนัก (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)}} \quad (1.1)$$

โดยสามารถคำนวณหามวลโมเลกุลได้โดยดูข้อมูลจากตารางธาตุ (หัวข้อ 1.1)

**ตัวอย่างที่ 1.1** ผลึกโซเดียมไฮดรอกไซด์หนัก 40 กรัม คิดเป็นกี่โมล

วิธีทำ จากสมการ (1.1) ต้องคำนวณหามวลโมเลกุลของ NaOH ก่อน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ NaOH} &= (22.9898 \times 1) + (15.999 \times 1) + (1.008 \times 1) \\ &= 39.997 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น จำนวนโมล NaOH} = \frac{40}{39.997} = 1.00007 \text{ โมล หรือ } 1.0 \text{ โมล}$$

### 1.2.2 กรณีที่ทราบจำนวนอนุภาคของสารนั้น โดยอาศัยหลักการที่ว่า สารใด ๆ

จำนวน 1 โมล จะมีจำนวนอนุภาค  $6.02214 \times 10^{23}$  อนุภาค เรียกตัวเลข  $6.02214 \times 10^{23}$  นี้ว่า เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number) หรืออาจใช้ตัวเลขเพียง  $6.02 \times 10^{23}$  เพื่อให้ง่ายแก่การจดจำ และคำนวณหาจำนวนโมลได้จาก

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{จำนวนอนุภาค}}{6.02 \times 10^{23} \text{ (อนุภาค/โมล)}} \quad (1.2)$$

**ตัวอย่างที่ 1.2** คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ( $\text{CCl}_4$ ) จำนวน  $5.65 \times 10^{20}$  โมเลกุล คิดเป็นกี่โมล  
วิธีทำ จากสมการ (1.2)

$$\text{จำนวนโมล } \text{CCl}_4 = \frac{5.65 \times 10^{20} \text{ โมเลกุล}}{6.02 \times 10^{23} \text{ (โมเลกุล/โมล)}} = 9.38 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

**1.2.3 กรณีสารที่เป็นแก๊ส ณ สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน** โดยอาศัยหลักการที่ว่า แก๊สใด ๆ จำนวน 1 โมล จะมีปริมาตร 22.4 ลิตร ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (standard temperature and pressure; STP) คือที่สภาวะอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ คำนวณหาจำนวนโมลได้จาก

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{ปริมาตรของแก๊ส (ลิตร)}}{22.4 \text{ (ลิตร/โมล)}} \quad (1.3)$$

**ตัวอย่างที่ 1.3** แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ปริมาตร 20.2 ลิตรที่ STP คิดเป็นกี่โมล  
วิธีทำ จากสมการ (1.3)

$$\text{จำนวนโมล } \text{CH}_4 = \frac{20.2 \text{ ลิตร}}{22.4 \text{ (ลิตร/โมล)}} = 0.902 \text{ โมล}$$

**1.2.4 กรณีสารละลายที่ทราบความเข้มข้นและปริมาตร** คำนวณหาปริมาณเนื้อสารได้จากผลคูณของความเข้มข้นและปริมาตร ซึ่งปริมาณเนื้อสารที่ได้ อาจจะอยู่ในรูปโมลหรือมวล (น้ำหนัก) ขึ้นอยู่กับหน่วยของความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร มิลลิกรัม/ลิตร หรือกรัม/ลิตร เป็นต้น ดังนั้นหากปริมาณเนื้อสารที่คำนวณออกมาได้อยู่ในหน่วยมวลจะต้องเปลี่ยนเป็นโมล โดยใช้สมการ (1.1)



**ตัวอย่างที่ 1.4** สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะมีการดไฮโดรคลอริกกี่โมล

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{จำนวนโมล HCl} &= \text{ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)} \times \text{ปริมาตร (ลิตร)} \\ &= 0.05 \text{ (โมล/ลิตร)} \times 50 \times 10^{-3} \text{ (ลิตร)} \\ &= 0.0025 \text{ โมล} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 1.5** แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) ละลายในน้ำ มีความเข้มข้น 5 ppm จะมีปริมาณออกซิเจนกี่โมลในน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร (ข้อมูลเพิ่มเติม ความเข้มข้น 1 ppm = ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร)

วิธีทำ แก๊ส  $O_2$  มีความเข้มข้น 5 ppm = ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร

$$\text{น้ำ } 1 \text{ m}^3 = \text{น้ำ } 1000 \text{ ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น มวลของแก๊ส } O_2 \text{ ที่ละลายน้ำ} &= 5 \text{ (mg/L)} \times 1000 \text{ (L)} \\ &= 5000 \text{ mg} \\ &= 5000 \times 10^{-3} \text{ g} \\ &= 5 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากสมการ (1.1)

$$\text{จำนวนโมล } O_2 = \frac{\text{น้ำหนักของ } O_2 \text{ (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลของ } O_2 \text{ (กรัม/โมล)}}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } O_2 = 15.999 \times 2 = 31.998 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ดังนั้น จำนวนโมล } O_2 = \frac{5 \text{ (กรัม)}}{31.998 \text{ (กรัม/โมล)}} = 0.156 \text{ โมล}$$

### 1.3 การดุลสมการเคมีอย่างง่าย

ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จะต้องเป็นสมการเคมีที่ดุลแล้วเท่านั้น ดังนั้นการดุลสมการเคมีจึงเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรก ก่อนที่จะมีการคำนวณใด ๆ เกิดขึ้น การทำให้สมการเคมีอย่างง่าย (รวมทั้งสมการรีดอกซ์อย่างง่าย) ให้ดุล คือ การทำให้จำนวนอะตอมของธาตุทุกธาตุทางซ้ายมือมีจำนวนเท่ากับจำนวนอะตอมของธาตุเดียวกันนั้น

ซึ่งอยู่ทางขวามือ อีกทั้งยังต้องทำให้ผลรวมของประจุทางซ้ายเท่ากับผลรวมของประจุทางขวามือด้วย ซึ่งโดยปกติไม่มีวิธีการเฉพาะใด ๆ ที่จะอำนวยความสะดวกและรวดเร็วได้ ส่วนใหญ่ต้องใช้วิธีการสังเกตและลองผิดลองถูก แต่อย่างไรก็ตามมีขั้นตอนที่พอจะถือปฏิบัติได้ดังนี้ (ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์, 2531, หน้า 50)

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากโมเลกุลที่ใหญ่ที่สุดหรือโมเลกุลที่ประกอบด้วยธาตุมากที่สุดก่อน

ขั้นตอนที่ 2 ทำโลหะให้ดุล

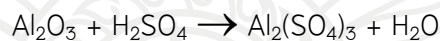
ขั้นตอนที่ 3 ทำอโลหะให้ดุล (ยกเว้น H และ O)

ขั้นตอนที่ 4 ทำ H และตามมาด้วย O ให้ดุล

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบจำนวนของทุกธาตุในสมการ

ขั้นตอนที่ 6 ถ้ายังไม่ดุลทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 อีกครั้ง

**ตัวอย่างที่ 1.6** จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล



วิธีทำ เมื่อทำตามขั้นตอนจะได้สมการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 และ 2 ได้  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$  (เริ่มจาก  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )

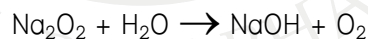
ขั้นตอนที่ 3  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$  (ทำ S ให้ดุล)

ขั้นตอนที่ 4  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$  (ทำ H และ O ให้ดุล)

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อตรวจสอบจำนวนอะตอมฝั่งซ้าย-ขวาในสมการจะพบว่าดุลแล้ว

ดังนั้นสมการที่ดุลแล้ว คือ  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$

**ตัวอย่างที่ 1.7** จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล

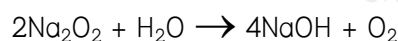


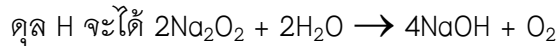
วิธีทำ เมื่อทำตามขั้นตอนจะได้สมการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 และ 2 ได้  $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{O}_2$  (เริ่มจาก  $\text{Na}_2\text{O}_2$ )

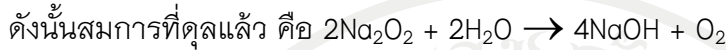
ขั้นตอนที่ 3 ไม่ต้องใช้

ขั้นตอนที่ 4 H ดุลแล้ว แต่ O ทางซ้ายมือเป็นเลขคี่ ส่วน O ทางขวามือเป็นเลขคู่ จึงคูณสารประกอบซึ่งธาตุโลหะดุลแล้วด้วย 2 จะได้





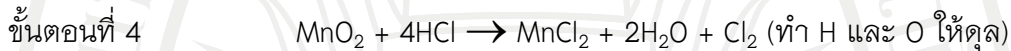
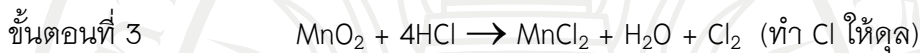
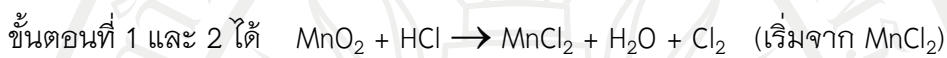
คูล O เรียบร้อยแล้ว



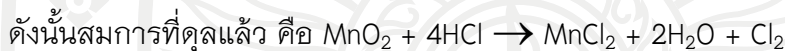
**ตัวอย่างที่ 1.8** จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล



วิธีทำ เมื่อทำตามขั้นตอนจะได้สมการดังนี้



ขั้นตอนที่ 5 เมื่อตรวจดูจำนวนอะตอมฝั่งซ้าย-ขวาในสมการจะพบว่า  
ดุลแล้ว



#### 1.4 การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์จากปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีของสารต่าง ๆ จะเขียนอยู่ในรูปของสมการ โดยเขียนสารที่ทำปฏิกิริยากัน (เรียกว่า สารตั้งต้น) ไว้ทางด้านซ้ายมือ และเขียนลูกศรระหว่างกลาง ซึ่งไปยังสารที่ได้จากปฏิกิริยา (เรียกว่า สารผลิตภัณฑ์) โดยการเขียนสมการเคมีนั้นต้องทราบว่าทั้งสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีนั้นมีสูตรโมเลกุลเป็นอย่างไร ก็ให้เขียนสมการเป็นโครงลงไปก่อน แล้วจึงค่อยดุลสมการนั้น ๆ ที่หลังสุด

การคำนวณหาปริมาณสารจากปฏิกิริยาเคมีจะต้องอาศัยสมการเคมีที่ดุลแล้วเท่านั้น โดยในการคำนวณจะใช้การเทียบสัดส่วนของจำนวนโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ (จากสมการที่ดุลแล้ว) หรือเรียกว่าการเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ เช่น ปฏิกิริยา  $3\text{A} + 2\text{B} \rightarrow \text{C}$  ซึ่งดุลสมการเรียบร้อยแล้วเมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมลของ A}}{3} = \frac{\text{จำนวนโมลของ B}}{2} = \frac{\text{จำนวนโมลของ C}}{1}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

โดยตัวเลข 3, 2 และ 1 คือ ตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ มาจากสัมประสิทธิ์ที่ดุลแล้วหน้าสาร A, B และ C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการคำนวณจะใช้จำนวนโมลของสารเป็นหลัก (วิธีการคำนวณหาจำนวนโมล ได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 1.2) และเป็นที่น่าสังเกตว่าการคำนวณลักษณะนี้ใช้เมื่อกำหนดปริมาณสารหนึ่ง เพื่อหาปริมาณของสารตัวอื่น ๆ ที่อาจจะอยู่ในรูปของจำนวนโมล น้ำหนัก จำนวนอนุภาค และปริมาตรที่ STP (สำหรับแก๊ส)

**ตัวอย่างที่ 1.9** ปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เกิดขึ้นดังนี้



ถ้าเผาไหม้มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 2 โมล จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กี่โมล คิดเป็นกี่กรัม และมีปริมาตรเท่าใดที่ STP

วิธีทำ เนื่องจากสมการเคมีที่ให้มาดุลเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ได้เลย โดยจับคู่ความสัมพันธ์โมลสารที่โจทย์ให้กับโมลสารที่โจทย์ถาม ดังนี้

$$\frac{\text{จำนวนโมล CH}_4}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล CO}_2}{1}$$

$$\frac{2}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล CO}_2}{1}$$

ดังนั้น จำนวนโมล  $\text{CO}_2 = 2$  โมล

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ  $\text{CO}_2 = (\text{จำนวนโมล CO}_2) \times (\text{มวลโมเลกุลของ CO}_2)$

มวลโมเลกุลของ  $\text{CO}_2 = (12.011 \times 1) + (15.999 \times 2) = 44.009$  กรัม/โมล

ดังนั้น น้ำหนักของ  $\text{CO}_2 = (2 \text{ โมล}) \times (44.009 \text{ กรัม/โมล}) = 88.018$  กรัม

จากสมการ (1.3) ปริมาตรของ  $\text{CO}_2$  ที่ STP = (จำนวนโมล  $\text{CO}_2$ )  $\times$  (22.4 ลิตร/โมล)

ดังนั้นปริมาตรของ  $\text{CO}_2$  ที่ STP = (2 โมล)  $\times$  (22.4 ลิตร/โมล) = 44.8 ลิตร

**ตัวอย่างที่ 1.10** เมื่อเผาโพแทสเซียมคลอเรต ( $\text{KClO}_3$ ) พบว่าสารดังกล่าวจะสลายตัวเป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $\text{KCl}$ ) และแก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ถ้าเผา  $\text{KClO}_3$  3.5 กรัม จะได้  $\text{KCl}$  กี่กรัม และได้แก๊ส  $\text{O}_2$  กี่กรัม คิดเป็นกี่ลิตรที่ STP

วิธีทำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  $\text{KClO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{KCl}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$  (สมการยังไม่ดุล)



ดุลสมการจะได้  $2\text{KClO}_3(\text{s}) \rightarrow 2\text{KCl}(\text{s}) + 3\text{O}_2(\text{g})$

เทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล KClO}_3}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล KCl}}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล O}_2}{3}$$

จากข้อมูลโจทย์ ใช้สมการ (1.1) คำนวณหาจำนวนโมลของ  $\text{KClO}_3$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล KClO}_3 &= \frac{\text{มวลของ KClO}_3 \text{ (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลของ KClO}_3 \text{ (กรัม/โมล)}} \\ &= \frac{3.5 \text{ (กรัม)}}{39.0983 + 35.45 + (15.999 \times 3) \text{ (กรัม/โมล)}} \\ &= 0.0286 \text{ โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\frac{\text{จำนวนโมล KClO}_3}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล KCl}}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล O}_2}{3}$$

จะได้ จำนวนโมล  $\text{KCl} = 0.0286$  โมล

จำนวนโมล  $\text{O}_2 = 0.0429$  โมล

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ  $\text{KCl} = (\text{จำนวนโมล KCl}) \times (\text{มวลโมเลกุลของ KCl})$

มวลโมเลกุลของ  $\text{KCl} = 39.0983 + 35.45 = 74.5483$  กรัม/โมล

ดังนั้น น้ำหนักของ  $\text{KCl} = (0.0286 \text{ โมล}) \times (74.5483 \text{ กรัม/โมล})$

$$= 2.1321 \text{ กรัม}$$

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ  $\text{O}_2 = (\text{จำนวนโมล O}_2) \times (\text{มวลโมเลกุลของ O}_2)$

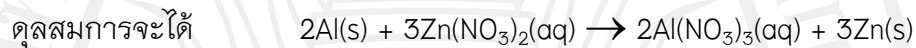
มวลโมเลกุลของ  $\text{O}_2 = 15.999 \times 2 = 31.998$  กรัม/โมล

ดังนั้น น้ำหนักของ  $O_2 = (0.0429 \text{ โมล}) \times (31.998 \text{ กรัม/โมล}) = 1.3727 \text{ กรัม}$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.3) ปริมาตรของ } O_2 \text{ ที่ STP} &= (\text{จำนวนโมล } O_2) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= (0.0429 \text{ โมล}) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= 0.961 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 1.11** จะต้องใช้อะลูมิเนียมหนักกี่กรัม จึงจะทำปฏิกิริยาพอดีกับ 50 มิลลิลิตรของ สารละลายซิงค์ไนเตรต ( $Zn(NO_3)_2$ ) เข้มข้น 1.5 โมล/ลิตร

วิธีทำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  $Al(s) + Zn(NO_3)_2(aq) \rightarrow Al(NO_3)_3(aq) + Zn(s)$  (สมการยังไม่ดุล)



เทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล } Zn(NO_3)_2}{3} = \frac{\text{จำนวนโมล } Al}{2}$$

จากข้อมูลโจทย์ คำนวณหาจำนวนโมลของ  $Zn(NO_3)_2$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล } Zn(NO_3)_2 &= \text{ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)} \times \text{ปริมาตร (ลิตร)} \\ &= (1.5 \text{ โมล/ลิตร}) \times (50 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) \\ &= 0.075 \text{ โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\frac{\text{จำนวนโมล } Zn(NO_3)_2}{3} = \frac{\text{จำนวนโมล } Al}{2}$$

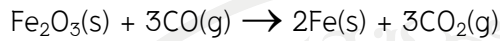
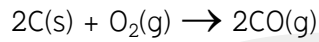
จะได้ จำนวนโมล  $Al = 0.05 \text{ โมล}$

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ  $Al = (\text{จำนวนโมล } Al) \times (\text{มวลอะตอมของ } Al)$

$$= (0.05 \text{ โมล}) \times (26.9815 \text{ กรัม/โมล})$$

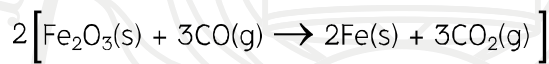
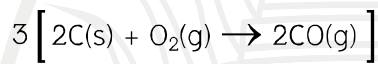
$$= 1.3491 \text{ กรัม}$$

ตัวอย่างที่ 1.12 จากปฏิกิริยา

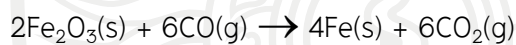
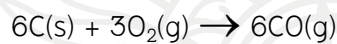


จะต้องใช้คาร์บอนกี่กรัม ในการรีดิวส์  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จำนวน 50 กรัม

วิธีทำ เนื่องจากโจทย์ให้สมการเคมีมากกว่า 1 สมการ และมีความสัมพันธ์กัน จะต้องทำให้สมการเคมีที่มีความสัมพันธ์กันนั้นดุลกันก่อน โดยจะเห็นว่าสมการบนมี  $\text{CO}(\text{g})$  เกิดขึ้น 2 โมล ส่วนสมการล่างจะต้องใช้  $\text{CO}(\text{g})$  3 โมล ดังนั้นจึงคูณสมการบนด้วย 3 และคูณสมการล่างด้วย 2 ดังนี้



จะได้



เทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์

$$\frac{\text{จำนวนโมล } \text{Fe}_2\text{O}_3}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล C}}{6}$$

จากข้อมูลโจทย์ ใช้สมการ (1.1) คำนวณหาจำนวนโมลของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ดังนี้

$$\text{จำนวนโมล } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\text{มวลของ } \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลของ } \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (กรัม/โมล)}}$$

$$= \frac{50 \text{ (กรัม)}}{(55.845 \times 2) + (15.999 \times 3) \text{ (กรัม/โมล)}}$$

$$= 0.3131 \text{ โมล}$$

ดังนั้น

$$\frac{\text{จำนวนโมล Fe}_2\text{O}_3}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล C}}{6}$$

จะได้ จำนวนโมล C = 0.9393 โมล

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ C = (จำนวนโมล C) × (มวลอะตอมของ C)

มวลอะตอมของ C =  $12.011 \times 1 = 12.011$  กรัม/โมล

ดังนั้น น้ำหนักของ C =  $(0.9393 \text{ โมล}) \times (12.011 \text{ กรัม/โมล}) = 11.2819$  กรัม

ในกรณีจำกัดปริมาณของสารตั้งต้นมาให้มากกว่า 1 ชนิด ปัญหาคือจะใช้สารตั้งต้นชนิดใดมาเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจะต้องหาว่าสารตั้งต้นชนิดใดทำปฏิกิริยาหมดก่อน (เรียกว่า สารกำหนดปริมาณ (limiting agent)) โดยพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างจำนวนโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ (จากสมเคมีที่ดุลแล้ว) ถ้าตัวเลขใดมีค่าน้อยกว่า แสดงว่าสารชนิดนั้นทำปฏิกิริยาหมดก่อน และใช้สารชนิดนั้นมาเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ เพื่อหาปริมาณของสารชนิดอื่น ๆ ต่อไป ดังวิธีการที่จะแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 1.13** ถ้านำแก๊ส  $\text{H}_2$  และ  $\text{O}_2$  อย่างละ 100 กรัม มาทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นไอน้ำ

ตั้งสมการ  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$  (สมการยังไม่ดุล)

ถามว่า 1. สารตั้งต้นชนิดใดทำปฏิกิริยาหมดก่อน

2. สารใดเหลือ และเหลือกี่กรัม

3. เกิดไอน้ำกี่โมล คิดเป็นกี่กรัม และมีปริมาตรเท่าใดที่ STP

วิธีทำ ดุลสมการจะได้  $2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

จากข้อมูลโจทย์ ใช้สมการ (1.1) หาจำนวนโมลของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดจะได้

$$\text{จำนวนโมล H}_2 = \frac{100 \text{ (กรัม)}}{1.008 \times 2 \text{ (กรัม/โมล)}} = 49.603 \text{ โมล}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

$$\text{จำนวนโมล O}_2 = \frac{100 \text{ (กรัม)}}{15.999 \times 2 \text{ (กรัม/โมล)}} = 3.125 \text{ โมล}$$

เทียบสัดส่วนระหว่างจำนวนโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละตัวจะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล H}_2}{2} > \frac{\text{จำนวนโมล O}_2}{1}$$

$$24.801 > 3.125$$

แสดงว่า O<sub>2</sub> ทำปฏิกิริยาหมดก่อน

และ H<sub>2</sub> เป็นสารที่เหลือ โดย H<sub>2</sub> ที่หายไปจากปฏิกิริยาคำนวณหาจากการเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์กับ O<sub>2</sub> ดังนี้

$$\frac{\text{จำนวนโมล H}_2}{2} = \frac{3.125}{1}$$

ดังนั้น จำนวนโมล H<sub>2</sub> ที่หายไปจากปฏิกิริยา = 6.25 โมล

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล H}_2 \text{ ที่เหลือจากปฏิกิริยา} &= (\text{จำนวนโมล H}_2 \text{ ที่มีตอนเริ่มต้น}) - \\ &\quad (\text{จำนวนโมล H}_2 \text{ ที่หายไปจากปฏิกิริยา}) \\ &= 49.603 - 6.25 \text{ โมล} \\ &= 43.353 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ H}_2 \text{ ที่เหลือ} &= (\text{จำนวนโมล H}_2) \times (\text{มวลโมเลกุลของ H}_2) \\ &= (43.353 \text{ โมล}) \times (1.008 \times 2 \text{ กรัม/โมล}) \\ &= 87.399 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

หาปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้น โดยเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์กับ  $O_2$  ดังนี้

$$\frac{\overset{3.125}{\text{จำนวนโมล } O_2}}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล } H_2O}{2}$$

ดังนั้นจะได้ จำนวนโมล  $H_2O = 6.25$  โมล

จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ  $H_2O = (\text{จำนวนโมล } H_2O) \times (\text{มวลโมเลกุลของ } H_2O)$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } H_2O = (1.008 \times 2) + (15.999 \times 1) = 18.015 \text{ กรัม/โมล}$$

ดังนั้น น้ำหนักของ  $H_2O = (6.25 \text{ โมล}) \times (18.015 \text{ กรัม/โมล}) = 112.594 \text{ กรัม}$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.3) ปริมาตรของ } H_2O \text{ ที่ STP} &= (\text{จำนวนโมล } H_2O) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= (6.25 \text{ โมล}) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= 140 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 1.14** กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 2 โมล/ลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับผงสังกะสี (Zn) 3 กรัม ตามสมการ  $2HCl(aq) + Zn(s) \rightarrow ZnCl_2(aq) + H_2(g)$  จงหาว่า

- สารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ
- ได้แก๊สไฮโดรเจนกี่โมล และคิดเป็นปริมาตรเท่าใดที่ STP

วิธีทำ เนื่องจากสมการเคมีที่โจทย์ให้มาเป็นสมการที่ดุลแล้ว ดังนั้นจึงนำมาใช้คำนวณได้เลย จากข้อมูลโจทย์ ใช้สมการ (1.1) หาจำนวนโมลของสารตั้งต้น Zn จะได้

$$\text{จำนวนโมล Zn} = \frac{3 \text{ (กรัม)}}{65.38 \text{ (กรัม/โมล)}} = 0.046 \text{ โมล}$$

ในการทำงานเดียวกัน หาจำนวนโมลของสารตั้งต้น HCl

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล HCl} &= \text{ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)} \times \text{ปริมาตร (ลิตร)} \\ &= (2 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = 0.02 \text{ โมล} \end{aligned}$$

เทียบสัดส่วนระหว่างโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละตัวจะได้

$$\frac{0.02}{2} < \frac{0.046}{1}$$

จำนวนโมล HCl < จำนวนโมล Zn

$$0.01 < 0.046$$

แสดงว่า HCl เป็นสารกำหนดปริมาณ (ทำปฏิกิริยาหมดก่อน)

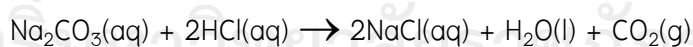
หาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น โดยเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์กับ HCl ดังนี้

$$\frac{0.02}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล H}_2}{1}$$

ดังนั้นจะได้ จำนวนโมล H<sub>2</sub> = 0.01 โมล

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.3) ปริมาตรของ H}_2 \text{ ที่ STP} &= (\text{จำนวนโมล H}_2) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= (0.01 \text{ โมล}) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= 0.224 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 1.15** ถ้านำสารละลาย Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาตร 0.55 ลิตร เติมลงในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาตร 0.2 ลิตร เกิดปฏิกิริยาดังนี้



จะได้แก๊ส CO<sub>2</sub> ปริมาตรเท่าใดที่ STP

วิธีทำ เนื่องจากสมการเคมีที่โจทย์ให้มาเป็นสมการที่ดุลแล้ว ดังนั้นจึงนำมาใช้คำนวณได้เลย



จากข้อมูลโจทย์ หาจำนวนโมลของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดจะได้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล Na}_2\text{CO}_3 &= \text{ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)} \times \text{ปริมาตร (ลิตร)} \\ &= (0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.55 \text{ ลิตร}) = 0.055 \text{ โมล} \\ \text{จำนวนโมล HCl} &= \text{ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)} \times \text{ปริมาตร (ลิตร)} \\ &= (0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.2 \text{ ลิตร}) \\ &= 0.02 \text{ โมล} \end{aligned}$$

เทียบสัดส่วนระหว่างจำนวนโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละตัวจะได้

$$\frac{0.055}{\text{จำนวนโมล Na}_2\text{CO}_3} > \frac{0.02}{\text{จำนวนโมล HCl}}$$

$$1 > 2$$

$$0.055 > 0.01$$

แสดงว่า HCl เป็นสารกำหนดปริมาณ (ทำปฏิกิริยาหมดก่อน)

หาปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้น โดยเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์กับ HCl ดังนี้

$$\frac{0.02}{\text{จำนวนโมล HCl}} = \frac{\text{จำนวนโมล CO}_2}{1}$$

$$2 = 1$$

ดังนั้นจะได้ จำนวนโมล CO<sub>2</sub> = 0.01 โมล

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.3) ปริมาตรของ CO}_2 \text{ ที่ STP} &= (\text{จำนวนโมล CO}_2) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= (0.01 \text{ โมล}) \times (22.4 \text{ ลิตร/โมล}) \\ &= 0.224 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



**ตัวอย่างที่ 1.16** จากปฏิกิริยา  $6\text{ClO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 5\text{HClO}_3(\text{g}) + \text{HCl}(\text{g})$

ถ้าผสมแก๊ส  $\text{ClO}_2$  4.25 กรัม กับไอน้ำ 0.853 กรัม จะได้  $\text{HClO}_3$  และ  $\text{HCl}$  อย่างละกี่กรัม

วิธีทำ เนื่องจากสมการเคมีที่โจทย์ให้มาเป็นสมการที่ดุลแล้ว ดังนั้นจึงนำมาใช้คำนวณได้เลย

จากข้อมูลโจทย์ ใช้สมการ (1.1) หาจำนวนโมลของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดจะได้

$$\text{จำนวนโมล } \text{ClO}_2 = \frac{4.25 \text{ (กรัม)}}{(35.45 \times 1) + (15.999 \times 2) \text{ (กรัม/โมล)}} = 0.063 \text{ โมล}$$

$$\text{จำนวนโมล } \text{H}_2\text{O} = \frac{0.853 \text{ (กรัม)}}{(1.008 \times 2) + (15.999 \times 1) \text{ (กรัม/โมล)}} = 0.047 \text{ โมล}$$

เทียบสัดส่วนระหว่างจำนวนโมลต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละตัวจะได้

$$\frac{\begin{array}{c} 0.063 \\ \nearrow \\ \text{จำนวนโมล } \text{ClO}_2 \end{array}}{6} < \frac{\begin{array}{c} 0.047 \\ \nearrow \\ \text{จำนวนโมล } \text{H}_2\text{O} \end{array}}{3}$$

$$0.0105 < 0.0156$$

แสดงว่า  $\text{ClO}_2$  เป็นสารกำหนดปริมาณ (ทำปฏิกิริยาหมดก่อน)

หาปริมาณ  $\text{HClO}_3$  และ  $\text{HCl}$  ที่เกิดขึ้น โดยเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์กับ  $\text{ClO}_2$  ดังนี้

$$\frac{\begin{array}{c} 0.063 \\ \nearrow \\ \text{จำนวนโมล } \text{ClO}_2 \end{array}}{6} = \frac{\text{จำนวนโมล } \text{HClO}_3}{5} = \frac{\text{จำนวนโมล } \text{HCl}}{1}$$

ดังนั้นจะได้ จำนวนโมล  $\text{HClO}_3 = 0.0525$  โมล

จากสมการ (1.1)

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของ HClO}_3 &= (\text{จำนวนโมล HClO}_3) \times (\text{มวลโมเลกุลของ HClO}_3) \\ &= (0.0525 \text{ โมล}) \times [(1.008 \times 1) + (35.45 \times 1) + (15.999 \times 3) \text{ กรัม/โมล}] \\ &= 4.434 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน จำนวนโมล HCl = 0.0105 โมล

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.1) น้ำหนักของ HCl} &= (\text{จำนวนโมล HCl}) \times (\text{มวลโมเลกุลของ HCl}) \\ &= (0.0105 \text{ โมล}) \times [(1.008 \times 1) + (35.45 \times 1) \text{ กรัม/โมล}] \\ &= 0.3752 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

## 1.5 สรุป

การคำนวณเกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์ในปฏิกิริยาเคมี ต้องใช้ความรู้เรื่องโมล ซึ่งเป็นหน่วยวัดปริมาณสารมาคิดคำนวณ ในการคำนวณหาจำนวนโมลสาร ขึ้นกับข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับสารนั้น เช่น เมื่อทราบน้ำหนัก จะคำนวณหาจำนวนโมลได้จากสัดส่วนระหว่างน้ำหนัก (กรัม) กับมวลโมเลกุลของสาร ซึ่งหาได้จากผลรวมของมวลอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารนั้น เมื่อทราบจำนวนอนุภาค จะคำนวณหาจำนวนโมลได้จากสัดส่วนระหว่างจำนวนอนุภาคกับเลขอาโวกาโดร เมื่อสารนั้นอยู่ในสภาพแก๊สและทราบปริมาตรที่ STP จะคำนวณหาจำนวนโมลได้จากสัดส่วนระหว่างปริมาตรที่ STP ในหน่วยลิตรกับ 22.4 ลิตร สำหรับกรณีสารละลายจะสามารถหาปริมาณของตัวถูกละลายได้จากผลคูณระหว่างความเข้มข้นกับปริมาตรของสารนั้น ซึ่งปริมาณเนื้อสารที่ได้ อาจจะอยู่ในรูปโมลหรือมวล (น้ำหนัก) ขึ้นอยู่กับหน่วยของความเข้มข้น และหากปริมาณสารที่คำนวณออกมาได้อยู่ในหน่วยมวล (กรัม) ก็จะเปลี่ยนเป็นจำนวนโมลของสารได้โดยนำไปหารด้วยมวลโมเลกุลของสารนั้น เมื่อทราบจำนวนโมลของสารแล้วจึงนำมาเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ เพื่อคำนวณหาปริมาณสารอื่น ๆ ในปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยการเทียบสัดส่วนระหว่างจำนวนโมลของสารต่อตัวเลขมวลสารสัมพันธ์จากสมการเคมีที่ดุลแล้วเป็นหลัก การดุลสมการเคมีต้องทำให้จำนวนอะตอมของธาตุและผลรวมของประจุทางฝั่งซ้ายเท่ากับทางฝั่งขวาของสมการ โดยเริ่มดุลสมการจากโมเลกุลที่ใหญ่ที่สุด จากนั้นทำโลหะและอโลหะให้ดุล ตามลำดับ นอกจากนี้สำหรับกรณีที่มีสารตั้งต้นมากกว่า 1 ชนิดจะต้องทราบว่าสารชนิดใดทำปฏิกิริยาหมดก่อน (เรียกว่า สารกำหนดปริมาณ) แล้วคิดเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์เพื่อคำนวณหาปริมาณสารอื่น ๆ ในปฏิกิริยาเคมี จากสารกำหนดปริมาณนั้นเป็นหลัก

## แบบฝึกหัดบทที่ 1

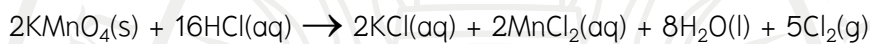
1. จากสมการต่อไปนี้  $2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{SiO}_2 + 10\text{C} \rightarrow 6\text{CaSiO}_3 + 10\text{CO} + \text{P}_4$  ถามว่า

1.1 ถ้าใช้  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  1 โมล จะเกิด  $\text{P}_4$  ขึ้นกี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

1.2 ถ้าใช้  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  1 กรัม จะเกิด  $\text{P}_4$  ขึ้นกี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

1.3 ถ้า  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  ทำปฏิกิริยาไป 1 โมล แล้ว  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{C}$  จะทำปฏิกิริยาไปอย่างละ กี่โมล

2. ปฏิกิริยาการเตรียมแก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) ในห้องปฏิบัติการ เขียนแทนด้วยสมการดังนี้



ถ้าต้องการแก๊สคลอรีน 5.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ STP ถามว่า

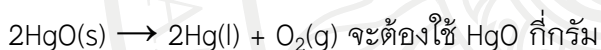
2.1 จะต้องใช้  $\text{KMnO}_4$  กี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

2.2 จะต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกกี่โมล

2.3 ถ้ากรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมล/ลิตร จะต้องใช้ปริมาตรเท่าใด

2.4 จะได้  $\text{MnCl}_2$  กี่กรัม คิดเป็นกี่โมล

3. เมื่อเผา  $\text{HgO}$  จนสลายหมด จะได้แก๊สออกซิเจน  $1.204 \times 10^{24}$  โมเลกุล ตั้งปฏิกิริยา



4. จากสมการที่กำหนดให้  $\text{HgO} + 4\text{KI} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{HgI}_4 + 2\text{KOH}$  จะต้องใช้  $\text{HgO}$  กี่กรัมจึงจะ

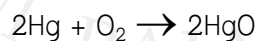
ทำปฏิกิริยาพอดีกับ  $\text{KI}$  1.66 กรัม ในที่ที่มีน้ำมากเกินไป

5.  $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$  ถ้าต้องการ  $\text{H}_2\text{O}$  170 กรัม จะต้องใช้  $\text{O}_2$  กี่กรัม

6. สมการต่อไปนี้ (สมการยังไม่ดุล)  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$  จำนวนโมลของ

$\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.5 โมล คือเท่าใด

7. ถ้านำโลหะปรอทและแก๊สออกซิเจนอย่างละ 10 กรัม ทำปฏิกิริยากันได้  $\text{HgO}$  ตามสมการ



7.1 สารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ

7.2 จะได้  $\text{HgO}$  เกิดขึ้นกี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

7.3 สารใดเหลือ และเหลือกี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

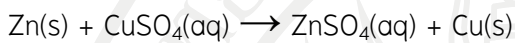
8. เมื่อเผาโลหะเงิน 4.32 กรัม กับผงกำมะถัน (S<sub>8</sub>) 0.64 กรัม จะได้สารประกอบ Ag<sub>2</sub>S

8.1 จงเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพร้อมดุลสมการ

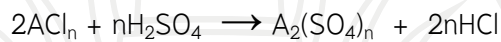
8.2 มีสารตั้งต้นชนิดใดเหลือจากปฏิกิริยาหรือไม่

8.3 ได้ Ag<sub>2</sub>S กี่โมล คิดเป็นกี่กรัม

9. จะต้องใช้โลหะสังกะสีหนักกี่กรัม จึงจะทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลาย CuSO<sub>4</sub> เข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



10. จากสมการเคมีที่กำหนดให้ (A คือโลหะมีมวลอะตอมเท่ากับ 30)



พบว่าถ้าใช้ ACl<sub>n</sub> หนัก 3.44 กรัม ทำปฏิกิริยา จะได้ HCl 2.92 กรัม ถ้ามูลค่า n จะมีค่าเป็นเท่าใด

## เอกสารอ้างอิง

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2531). **เคมีคำนวณและเทคนิคการทำโจทย์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์  
ไอเดียนสโตร์.

National Institute of Standard and Technology. (2013). **Periodic Table Atomic**

**Properties of the elements**. [online] Available :

[http://www.nist.gov/pml/data/upload/periodic\\_table\\_composite\\_2013\\_nocrops.pdf](http://www.nist.gov/pml/data/upload/periodic_table_composite_2013_nocrops.pdf)

[30 July 2013].

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2

### เนื้อหาประจำบท

#### บทที่ 2 อุณหพลศาสตร์

- 2.1 นิยามศัพท์ทางอุณหพลศาสตร์
- 2.2 งาน ความร้อน และการกำหนดเครื่องหมาย
- 2.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์
- 2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ
  - 2.4.1 กระบวนการปริมาตรคงที่
  - 2.4.2 กระบวนการความดันคงที่
  - 2.4.3 กระบวนการอุณหภูมิกคงที่
  - 2.4.4 กระบวนการอะเดียแบติก
- 2.5 อุณหพลศาสตร์เคมี
  - 2.5.1 ความร้อนของการเผาไหม้
  - 2.5.2 ความร้อนของการก่อเกิด
  - 2.5.3 ความร้อนของสารละลาย
  - 2.5.4 ความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะ
- 2.6 การหาค่าความร้อนของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี
  - 2.6.1 การพิจารณาประเภทของปฏิกิริยาแล้วเปิดดูค่าจากตาราง
  - 2.6.2 การคำนวณโดยใช้กฎของเฮสส์
  - 2.6.3 การคำนวณโดยใช้สูตร
  - 2.6.4 การคำนวณโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานพันธะ
- 2.7 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายและคำนวณเกี่ยวกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ได้
2. คำนวณและวิเคราะห์หาความร้อนของปฏิกิริยาเคมีได้
3. คำนวณเกี่ยวกับพลังงานพันธะได้



### กิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 2 เรื่อง อุณหพลศาสตร์มาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณที่ละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนรู้การสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 2 เรื่องอุณหพลศาสตร์
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 2

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

## บทที่ 2

### อุณหพลศาสตร์

“อุณหพลศาสตร์” เป็นคำศัพท์บัญญัติที่ใช้แทนคำทับศัพท์ “เทอร์โมไดนามิกส์” (thermodynamics) โดยคำทั้งสองมีความหมายเดียวกันคือเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรือเปลี่ยนรูปพลังงานที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการดำเนินไปของกระบวนการทางเคมี และทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าพลังงาน คือ ความสามารถในการทำงานได้ และพลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายโอนจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ที่กล่าวว่า พลังงานทั้งหมดของระบบจะมีค่าคงที่ เนื่องจากพลังงานไม่สามารถถูกทำลายหรือถูกสร้างขึ้นมาได้ เช่น เมื่อก้อนหินหล่นจากหน้าผาจะพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของก้อนหินจะสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานศักย์ของก้อนหินถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เป็นต้น

ด้วยหลักการของอุณหพลศาสตร์สามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันได้มากมาย เช่น การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารเมื่อได้รับพลังงาน น้ำไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำเสมอ ความร้อนถูกถ่ายโอนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ และการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ในด้านการประยุกต์ใช้งาน สามารถนำความรู้ด้านอุณหพลศาสตร์มาใช้สร้างอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น เครื่องทำความเย็น เครื่องอบแห้ง เครื่องทำน้ำอุ่น เต้าไฟฟ้า รถยนต์ เครื่องบิน และโรงจักรผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.1 นิยามศัพท์ทางอุณหพลศาสตร์

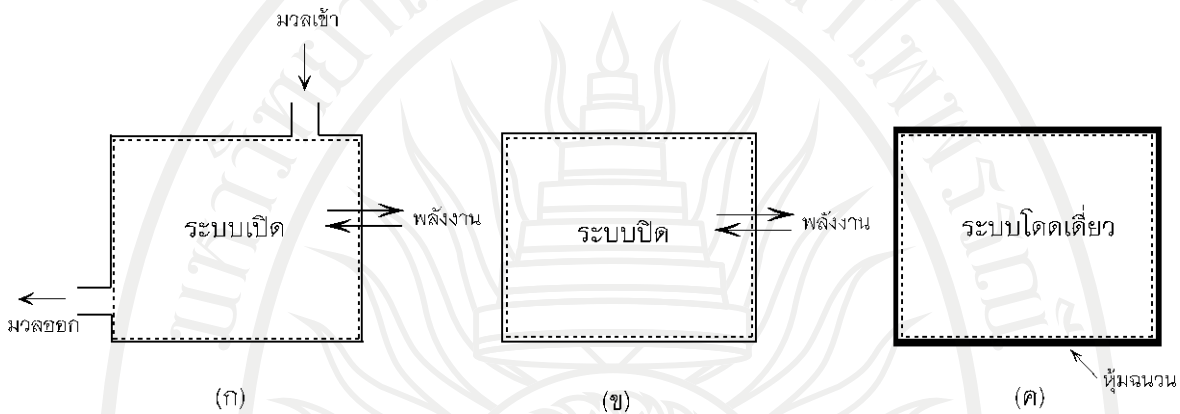
เพื่อให้เข้าใจความหมายที่ตรงกัน เมื่อเรากล่าวถึงระบบ (system) จะหมายถึงส่วนของสารที่เรากำลังสนใจและมีขอบเขตของระบบ (boundary) ที่ชัดเจน ในส่วนของเทอมอื่น ๆ ที่มักจะถูกกล่าวถึง ได้แก่ (Socrates, 1971, P. 1)

2.1.1 สิ่งแวดล้อม (environment) คือ สิ่งต่าง ๆ ที่ถูกกั้นด้วยขอบเขต ให้อยู่ภายนอก ระบบ ซึ่งสิ่งแวดล้อมอาจจะมีผลหรือไม่มีผลใด ๆ ต่อระบบก็ได้

2.1.2 ระบบเปิด (opened system) คือ ระบบที่อาจมีการถ่ายเทมวลสารและพลังงานผ่านขอบเขตของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.1(ก)

2.1.3 ระบบปิด (closed system) คือ ระบบที่มวลสารภายในระบบคงที่ แต่อาจมีการถ่ายเทพลังงานผ่านขอบเขตของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.1(ข)

2.1.4 ระบบโดดเดี่ยว (isolated system) คือ ระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวลสารและพลังงาน ผ่านขอบเขตของระบบ เช่น ระบบปิดที่มีการหุ้มฉนวน ดังแสดงในภาพที่ 2.1(ค)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของระบบ (ก) ระบบเปิด (ข) ระบบปิด (ค) ระบบโดดเดี่ยว

2.1.5 สมบัติ คือ ลักษณะใด ๆ ที่วัดหรือคำนวณค่าได้ โดยสมบัติจะขึ้นกับสถานะของระบบ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.1.5.1 สมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลของระบบ (intensive properties) เช่น ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น

2.1.5.2 สมบัติที่ขึ้นกับมวลของระบบ (extensive properties) เช่น น้ำหนัก ปริมาตร เอนทัลปี พลังงานภายในระบบ เป็นต้น

2.1.6 ฟังก์ชันสถานะ (state function) หรือตัวแปรสถานะ (state variable) คือ สถานภาพของระบบที่ถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของระบบ เช่น มวลสาร อุณหภูมิ ความดัน ปริมาตร และพลังงานของระบบ โดยที่สถานะหนึ่ง ๆ สมบัติของระบบจะคงที่ หากมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งจะถือว่าระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะใหม่ที่ ลักษณะที่สำคัญของฟังก์ชันสถานะ คือ (ปริญญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 42)

(1) เมื่อกำหนดฟังก์ชันสถานะ 2 ค่าหรือมากกว่า จะเป็นผลให้ฟังก์ชันสถานะอื่น ๆ ของระบบที่สถานะนั้นถูกกำหนดตามทันที

(2) การเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันสถานะขึ้นกับสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายของระบบเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับเส้นทางของกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น ดังนั้นจะได้

$$\Delta X = X_{\text{สุดท้าย}} - X_{\text{เริ่มต้น}}$$

เมื่อ  $X$  คือฟังก์ชันสภาวะ

(3) ถ้าการเปลี่ยนแปลงของระบบเกิดขึ้นครบรอบวัฏจักร (ดูหัวข้อ 2.1.10) จะได้ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันสภาวะมีค่าเท่ากับศูนย์

2.1.7 สภาวะสมดุล (equilibrium state) คือ สภาวะที่ไม่มีแรงผลักดันใด ๆ ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ (ระบบจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ) ระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข ได้แก่ สมดุลความร้อน สมดุลกล สมดุลเคมี และ สมดุลเฟส ซึ่งมีนิยามดังนี้ (สมชัย อัครทิวา และชวัญจิต วงษ์ชาติ, 2546, หน้า 5)

2.1.7.1 สมดุลความร้อน (thermal equilibrium) คือ สภาวะที่ภายในระบบมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งระบบ

2.1.7.2 สมดุลกล (mechanical equilibrium) คือ สภาวะที่ภายในระบบมีความดันเท่ากันทั่วทั้งระบบและไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน

2.1.7.3 สมดุลเคมี (chemical equilibrium) คือ สภาวะที่องค์ประกอบทางเคมีของระบบคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

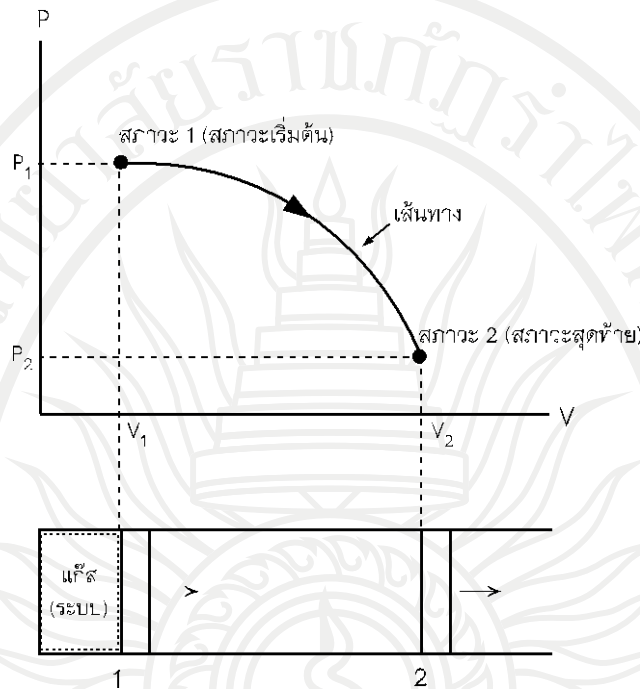
2.1.7.4 สมดุลเฟส (phase equilibrium) คือ สภาวะที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารในระบบและไม่มีความผลักดันที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส

2.1.8 กระบวนการ (process) คือ การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบ จากสภาวะที่ 1 ไปยังสภาวะใด ๆ เมื่อเวลาผ่านไป โดยอาจมีการถ่ายเทความร้อนและงาน (ดูหัวข้อ 2.2) เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการได้ เช่น การขยายตัวของลูกสูบแก๊สภายในลูกสูบ ที่แสดงในภาพที่ 2.2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ 1 (สภาวะที่มี  $P_1$  และ  $V_1$ ) ไปเป็นสภาวะ 2 (สภาวะที่มี  $P_2$  และ  $V_2$ ) กระบวนการแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (ปริญญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 44)

2.1.8.1 กระบวนการผันกลับได้ (reversible process) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงที่สมบัตินภายในระบบ รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิของระบบเหมือนกันทั่วทุกส่วนตลอดการเปลี่ยนแปลงนั้น หรือระบบอยู่ในสภาวะสมดุลตลอดการเปลี่ยนแปลง และมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ละเอียดละอออย่างช้า ๆ

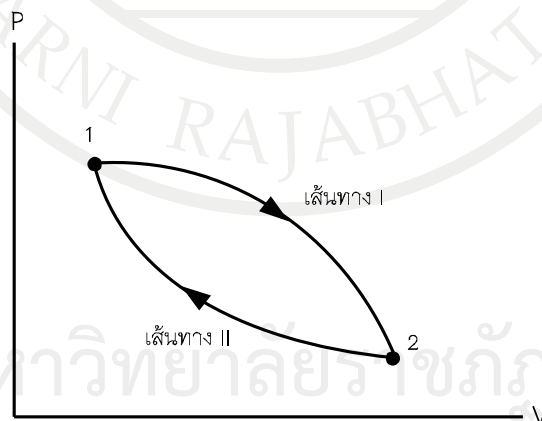
2.1.8.2 กระบวนการผันกลับไม่ได้ (irreversible process) คือ การเปลี่ยนแปลงที่สมบัตินภายในระบบ รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิของระบบ ไม่เหมือนกันทั่วทุกส่วน (ตรงข้ามกับกระบวนการผันกลับได้) มักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีการสูญเสียพลังงานและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.1.9 เส้นทาง (path) คือ เส้นทางแสดงสภาวะอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เกิดกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของกระบวนการการขยายตัวของแก๊สภายในลูกสูบ

2.1.10 วัฏจักร (cycle) คือ การเกิดกระบวนการจากสภาวะเริ่มต้น โดยระบบดำเนินผ่านสภาวะต่าง ๆ แล้วกลับสู่สภาวะเริ่มต้นได้อีก และเมื่อระบบกลับสู่สภาวะเริ่มต้นแล้วสมบัติของระบบจะเหมือนกับสมบัติที่สภาวะเริ่มต้นเดิมทุกประการ (สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาวี, 2546, หน้า 7) ดังแสดงในภาพที่ 2.3

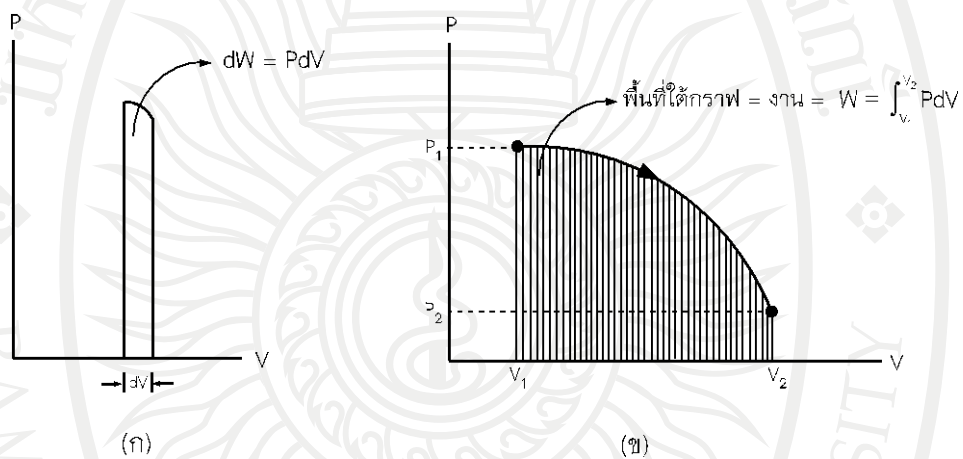


ภาพที่ 2.3 ลักษณะของวัฏจักร

## 2.2. งาน ความร้อน และการกำหนดเครื่องหมาย

งาน (work;  $W$ ) คือ พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ เนื่องจากมีแรงขับเคลื่อน หรือความต่างศักย์ของพลังงาน (ที่ไม่ใช่ความแตกต่างของอุณหภูมิ) เช่น ความต่างศักย์ของความดันทำให้เกิดงานทางกล ความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดงานทางไฟฟ้า เป็นต้น (เกริกชัย สุภาจันท์, 2538, หน้า 3-11)

งานทางกลจากระบวนการผันกลับได้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง ความดัน ( $P$ )– ปริมาตร ( $V$ ) เช่น งานจากการขยายตัวของแก๊สภายในลูกสูบ (ภาพที่ 2.2) แสดงในภาพที่ 2.4 ดังนี้



ภาพที่ 2.4 งานจากการขยายตัวแบบผันกลับได้ (ก) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย ๆ (ข) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมาก ๆ

จากภาพที่ 2.4(ก) และ 2.4(ข) จะได้สูตรของงาน คือ

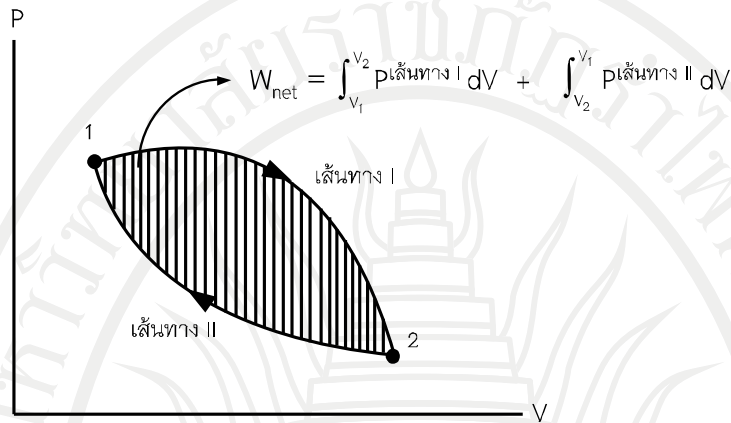
$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (2.1)$$

จากสมการ (2.1) งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักร ( $W_{\text{net}}$ ) ของกระบวนการผันกลับได้ ในภาพที่ 2.3 จึงมีค่าเท่ากับ

$$W_{\text{net}} = \int_{V_1}^{V_2} P^{\text{เส้นทาง I}} dV + \int_{V_2}^{V_1} P^{\text{เส้นทาง II}} dV$$



ซึ่งก็คือผลต่างระหว่างงานที่ได้จากระบบกับงานที่ป้อนแก่ระบบ และมีค่าเท่ากับพื้นที่ที่ถูกปิดล้อมดังแสดงในภาพที่ 2.5 ดังนี้



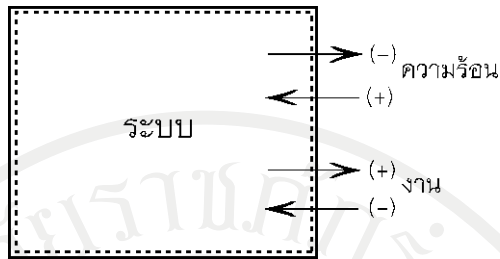
ภาพที่ 2.5 งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักร

ความร้อน (heat;  $Q$ ) คือ พลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านของเขตของระบบได้ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม โดยมีทิศทางในการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (สมชัย อัครทิวา และชวีญจิต วงษ์ชารี, 2546, หน้า 71)

เนื่องจากความร้อนและงานเป็นพลังงานที่มีการถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ ซึ่งปริมาณความร้อนและงานจะขึ้นอยู่กับเส้นทางของกระบวนการ ดังนั้นความร้อนและงานจึงไม่ใช่ฟังก์ชันสถานะ

การกำหนดเครื่องหมายของงานถือหลักการว่าการได้งานที่ผลิตโดยระบบเป็นผลที่ต้องการให้เกิดขึ้น จึงกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นบวก (+) ส่วนการป้อนงานให้แก่ระบบเป็นผลที่ไม่ต้องการ จึงกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นลบ (-) ในทำนองเดียวกัน สำหรับการกำหนดเครื่องหมายของ ความร้อนถือหลักการว่าการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบมีพลังงานเพิ่มขึ้น จึงกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นบวก (+) ส่วนการถ่ายโอนความร้อนออกจากระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบมีพลังงานลดลง จึงกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นลบ (-) การกำหนดเครื่องหมายของงานและความร้อนดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2.6 ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 2.6 การกำหนดเครื่องหมายของงานและความร้อน

หน่วยของงานและความร้อนในระบบ SI (system international unit) ได้แก่ จูล (joule; J) และอาจมีการใช้คำอุปสรรค (prefixes) เพื่อความสะดวกในการบอกค่าตัวเลขในกรณีที่ค่าในหน่วยดังกล่าวมีค่าสูงหรือต่ำมาก ๆ เช่น kJ มีค่าเทียบเท่า  $\times 1000$  J เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจใช้หน่วย J/mol หรือ J/g ซึ่งเป็นการเทียบงานหรือพลังงานต่อ 1 หน่วยมวลสารที่อยู่ในระบบได้

### 2.3 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ คือ กฎอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมีหลักการว่า พลังงานสามารถเกิดการถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ และเกิดการเปลี่ยนรูปได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายได้ หรือกล่าวสั้น ๆ ได้ว่าพลังงานรวมจะมีค่าคงที่ (สมชาย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาวี, 2546, หน้า 87)

ในระบบปิดพลังงานที่ถูกถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบมี 2 รูปแบบ คือ พลังงานความร้อน (Q) และงาน (W) ดังนั้นจะได้

$$Q - W = \Delta E \quad (2.2)$$

เมื่อ Q คือ ความร้อนสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ  $= \sum Q_{in} - \sum Q_{out}$

W คือ งานสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ  $= \sum W_{out} - \sum W_{in}$

$\Delta E$  คือ พลังงานรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป  $= E_{สุดท้าย} - E_{เริ่มต้น} = E_2 - E_1$

เนื่องจากพลังงานรวมของระบบ (E) คือ ผลรวมของพลังงานภายใน (internal energy; U) ซึ่งเป็นพลังงานของโมเลกุลของสารในระบบที่หมุน สั่น และย้ายตำแหน่งอยู่ตลอดเวลา กับ

พลังงานจลน์ (kinetics energy; KE) และพลังงานศักย์ (potential energy; PE) ของทั้งระบบ (สมชัย อัครทิวา และชวีญจิต วงษ์ชารี, 2551, หน้า 148)

จึงเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$E = U + KE + PE \quad (2.3)$$

ดังนั้น  $\Delta E$  จึงมีค่าดังนี้

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.4)$$

ถ้าทั้งระบบไม่มีการเคลื่อนที่ จะมีค่า  $\Delta KE$  และ  $\Delta PE = 0$   
ในกรณีนี้จึงได้สมการกฎข้อที่หนึ่งของระบบเป็นดังนี้

$$Q - W = \Delta U \quad (2.5)$$

หรือเขียนในรูปผลต่างอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$dQ - dW = dU \quad (2.6)$$

สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับความดันและปริมาตร เขียนสมการ (2.6) ใหม่ได้เป็น

$$dQ - PdV = dU \quad (2.7)$$

## 2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ มักจะควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างน้อยหนึ่งค่าให้คงที่ จึงเกิดกระบวนการต่าง ๆ ขึ้นดังต่อไปนี้ คือ

**2.4.1 กระบวนการปริมาตรคงที่ (isometric process)** คือ กระบวนการที่ควบคุมให้ปริมาตรของระบบคงที่ เช่น แก๊สที่บรรจุอยู่ในถังโลหะปิดสนิท เป็นต้น จากสมการ (2.7) เมื่อ  $dV = 0$  จะได้

$$PdV = 0$$

ดังนั้น จึงได้

$$dQ = dU \quad (2.8)$$

หรือ 
$$Q_V = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q_V$  คือ ความร้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการปริมาตรคงที่ จะมีค่าเท่ากับการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของระบบ

กำหนดความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (specific heat capacity at constant volume;  $C_V$ ) คือ ปริมาณความร้อนตามกระบวนการปริมาตรคงที่ ที่ทำให้สาร (ในระบบ) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 K (Laidler and Meiser, 1999, P. 62) ซึ่งนิยามโดย

$$C_V = \frac{dQ_V}{dT} \quad \text{หน่วย J/K หรือ kJ/K} \quad (2.10)$$

ดังนั้น 
$$dQ_V = C_V dT$$

ถ้า  $C_V$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และรวมความสัมพันธ์กับสมการ (2.9) จะได้

$$Q_V = C_V \Delta T = C_V (T_2 - T_1) = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (2.11)$$

บางครั้งในการคำนวณอาจใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) ซึ่งก็คือความจุความร้อนต่อมวลสาร (C/m) หรือค่าความจุความร้อนโมลาร์ (molar heat capacity) ซึ่งก็คือ ความจุความร้อนต่อจำนวนโมลของสาร (C/mol) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 2.1** ถังโลหะบรรจุอากาศมวล 1 กิโลกรัม ไว้ที่ความดัน 3 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เมื่อมีการถ่ายโอนความร้อนออกจากถังอย่างช้า ๆ ทำให้ความดันและอุณหภูมิของถังลดลงเป็น 1 บาร์ และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากข้อมูลที่กำหนดให้ จงคำนวณหา  $Q$ ,  $\Delta U$  และ  $W$  (กำหนดค่า  $C_V/m$  ของอากาศ = 0.716 กิโลจูล/กิโลกรัม·เคลวิน)

วิธีทำ

ถังโลหะไม่สามารถหดตัวหรือขยายตัวได้ในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ จากสมการ (2.11) จึงได้

$$\begin{aligned}
 Q_V &= m (C_V/m) \Delta T = m (C_V/m) (T_2 - T_1) \\
 &= (1 \text{ kg}) \times (0.716 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \times (333 - 473 \text{ K}) \\
 &= -100.24 \text{ kJ} \text{ (เครื่องหมายเป็น - แสดงว่าระบบสูญเสียความร้อน)}
 \end{aligned}$$

$$\Delta U = Q_V = -100.24 \text{ kJ}$$

$$W = 0 \text{ (ดูสมการ (2.1) เนื่องจาก } dV = 0)$$

**2.4.2 กระบวนการความดันคงที่ (isobaric process)** คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันของระบบคงที่ เช่น ปฏิิกิริยาเคมี กระบวนการย่อยอาหารในร่างกาย เป็นต้น จากสมการ (2.7) จะได้

$$dQ = dU + PdV$$

$$\text{หรือ} \quad Q_p = \Delta U + P\Delta V \quad (2.12)$$

$$Q_p = (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1)$$

$$Q_p = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1)$$

เมื่อ  $Q_p$  คือ ความร้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการความดันคงที่ กำหนดให้  $U + PV = H$  และเรียก  $H$  ว่า เอนทัลปี (enthalpy) ซึ่งเป็นฟังก์ชันสถานะที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง (Laidler and Meiser, 1999, P. 61-62) ดังนั้นจึงได้

$$Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H \quad (2.13)$$

ถ้ากระบวนการที่เกิดขึ้นมีค่า  $Q_p$  (หรือ  $\Delta H$ ) เป็นบวก แสดงว่าระบบดูดความร้อนเข้าไป เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการดูดความร้อน (endothermic process) แต่ถ้ากระบวนการที่เกิดขึ้นให้ค่า  $Q_p$  (หรือ  $\Delta H$ ) เป็นลบ แสดงว่าระบบปลดปล่อยความร้อนออกมา จะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการคายความร้อน (exothermic process) (Socrates, 1971, P. 52) ซึ่งทั้งสอง กระบวนการดังกล่าวยังคงสอดคล้องกับการกำหนดเครื่องหมายที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ (ดูภาพที่ 2.6)

กำหนดความจุความร้อนที่ความดันคงที่ ( $C_p$ ) คือ ปริมาณความร้อนตามกระบวนการ ความดันคงที่ ที่ทำให้สาร (ในระบบ) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 K (Laidler and Meiser, 1999, P. 62) ซึ่งนิยามโดย

$$C_p = \frac{dQ_p}{dT} \quad \text{หน่วย J/K หรือ kJ/K} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$dQ_p = C_p dT$$

ถ้า  $C_p$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และรวมความสัมพันธ์กับสมการ (2.13) จะได้

$$Q_p = C_p \Delta T = C_p (T_2 - T_1) = \Delta H = H_2 - H_1 \quad (2.15)$$

**ตัวอย่างที่ 2.2** ในชุดอุปกรณ์กระบอกสูบ-ลูกสูบที่ไม่มีความเสียดทานกับแก๊สไนโตรเจนปริมาณ 71.5 โมล ใต้ที่สภาวะ 100 กิโลพาสคัล (มีค่าเท่ากับ 100 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร) และ 300 เคลวิน เมื่อแก๊สไนโตรเจนได้รับความร้อน และขยายตัวตามกระบวนการความดันคงที่แบบผันกลับได้ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้นเป็น 360 เคลวิน จงคำนวณหา  $\Delta H$ ,  $W$  และ  $\Delta U$  (กำหนด  $C_p/m$  ของ  $N_2$  เท่ากับ 1.039 กิโลจูล/กิโลกรัม·เคลวิน และมวลโมเลกุลของ  $N_2$  เท่ากับ 28.014 กรัม/โมล)

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{มวลของ } N_2 &= (\text{จำนวนโมล } N_2) \times (\text{มวลโมเลกุลของ } N_2) \\ &= (71.5 \text{ mol}) \times (28.014 \text{ g/mol}) \\ &= 2003.001 \text{ g} \\ &= 2.003 \text{ kg} \end{aligned}$$

จากสมการ (2.15) จะได้

$$\begin{aligned} Q_p = \Delta H &= C_p \Delta T = m (C_p/m) (T_2 - T_1) \\ &= (2.003 \text{ kg}) \times (1.039 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \times (360 - 300 \text{ K}) \end{aligned}$$

$$= 124.867 \text{ kJ} \quad (\text{เครื่องหมายเป็น + แสดงว่าระบบได้รับความร้อน})$$



จากสมการ (2.1) เนื่องจากเป็นกระบวนการ P คงที่ จะได้

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P\Delta V = P(V_2 - V_1)$$

$$V_2 = \frac{nRT_2}{P} = \frac{(71.5 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}) \times (360 \text{ K})}{(100 \times 10^3 \text{ N/m}^2)} = 2.14 \text{ m}^3$$

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P} = \frac{(71.5 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}) \times (300 \text{ K})}{(100 \times 10^3 \text{ N/m}^2)} = 1.783 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W &= P(V_2 - V_1) = (100 \times 10^3 \text{ N/m}^2) \times (2.14 - 1.783 \text{ m}^3) = 35700 \text{ J} \\ &= 35.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการ (2.5) จะได้ } \Delta U = Q - W = 124.867 - 35.7 = 89.167 \text{ kJ}$$

**2.4.3 กระบวนการอุณหภูมิกคงที่ (isothermal process)** คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิกของระบบคงที่ เช่น การเปลี่ยนสถานะของสาร กระบวนการของแก๊สอุดมคติที่มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของบอยล์ ( $PV = \text{ค่าคงที่}$ ) เป็นต้น เนื่องจากเป็นกระบวนการอุณหภูมิกคงที่ ดังนั้น  $dT = 0$

**ตัวอย่างที่ 2.3** จงคำนวณหา Q, W และ  $\Delta U$  ของกระบวนการที่แก๊สอุดมคติ 5 โมลถูกกดอัดแบบผันกลับได้ที่อุณหภูมิกคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส จากปริมาตร 15 ลิตร เป็น 5 ลิตร  
วิธีทำ

จากสมการ (2.1) เนื่องจากเป็นกระบวนการ T คงที่ จะได้

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \\ &= (5 \text{ mol}) \times (8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}) \times (273 + 25 \text{ K}) \times \ln \left( \frac{5}{15} \right) \\ &= -13609.455 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการ (2.11) } \Delta U = C_V \Delta T = 0 \quad (\text{เพราะ } dT = 0 \text{ หรือ } \Delta T = 0)$$

$$\text{จากสมการ (2.5) จะได้ } Q = \Delta U + W = 0 + (-13609.455) = -13609.455 \text{ J}$$

(เครื่องหมายเป็น - แสดงว่าระบบสูญเสียความร้อน)

**2.4.4 กระบวนการอะเดียแบติก (adiabatic process)** คือ กระบวนการที่เกิดขึ้น โดยไม่มีความร้อนถ่ายโอนเข้าหรือออกจากระบบ หรือเป็นระบบที่มี  $Q = 0$  เช่น กระบวนการที่เกิดขึ้นกับแก๊สภายในกระบอกสูบที่หุ้มฉนวน เป็นต้น

ดังนั้นจากสมการ (2.5) จะได้  $W = -\Delta U$  นั้นหมายความว่างานที่ได้ออกมาจากระบบ มีค่าเท่ากับพลังงานภายในที่หายไปจากระบบ

## 2.5 อุณหพลศาสตร์เคมี

อุณหพลศาสตร์เคมี (thermochemistry) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความร้อน (การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี;  $\Delta H$ ) ในระบบที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเกิดขึ้น ณ สภาวะความดันคงที่ โดยการวัดความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี

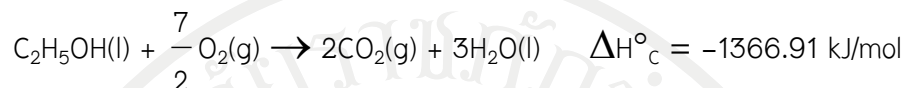
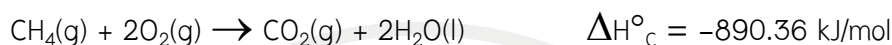
การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีหนึ่ง ๆ ขึ้นกับสภาวะของสารตั้งต้น ( $H_1$ ) และสภาวะของสารผลิตภัณฑ์ ( $H_2$ ) ดังนั้นในการกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี จึงจำเป็นต้องระบุข้อมูลต่อไปนี้ (ปริญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 67)

- (1) สถานะของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ว่าเป็นแก๊ส (g) ของเหลว (l) ของแข็ง (s) หรือสารละลาย (aq)
- (2) ความดัน (P) ของแก๊ส ในกรณีที่เป็นสารละลายต้องระบุความเข้มข้นด้วย
- (3) อุณหภูมิ (T)

เพื่อความสะดวกจึงมีการกำหนดสภาวะมาตรฐาน (standard states) ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีความดัน 1 บรรยากาศ (760 มิลลิเมตรปรอท หรือ 101.325 กิโลพาสคัล) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (หรือ 298.15 เคลวิน) ถ้าเป็นสารละลายใช้ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (molar; mol/l) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 โมลของตัวถูกละลายต่อ 1 ลิตรของตัวทำละลาย และใช้สัญลักษณ์  $^\circ$  แทนสภาวะมาตรฐาน เช่น  $\Delta H^\circ$  แทนการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

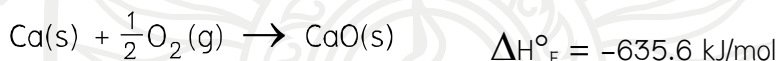
ความร้อนจากระบบที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีหรือจากปฏิกิริยาเคมี ( $\Delta H$ ) มักจะเรียกเป็นชื่อเฉพาะตามชนิดของปฏิกิริยา ซึ่งแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

**2.5.1 ความร้อนของการเผาไหม้ (heat of combustion;  $\Delta H_C$ )** คือ ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาที่สาร 1 โมลทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) แล้วได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และ/หรือน้ำ ( $H_2O(l)$ ) เป็นสารผลิตภัณฑ์ เรียกปฏิกิริยาลักษณะนี้ว่า ปฏิกิริยาการเผาไหม้ เช่น ปฏิกิริยาต่อไปนี้



สัญลักษณ์  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{c}}$  แทนความร้อนของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน และสังเกตว่าปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ( $\Delta\text{H}$  ติดลบ) เสมอ

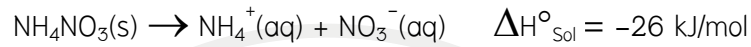
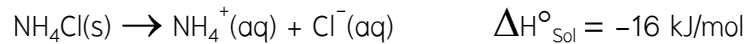
**2.5.2 ความร้อนของการก่อเกิด (heat of formation)** คือ ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบ 1 โมลจากธาตุมูลฐานในธรรมชาติ (เช่น  $\text{H}_2(\text{g})$   $\text{O}_2(\text{g})$   $\text{N}_2(\text{g})$   $\text{Cl}_2(\text{s})$   $\text{C}(\text{s})$   $\text{S}_8(\text{s})$   $\text{P}_4(\text{s})$   $\text{Fe}(\text{s})$   $\text{Zn}(\text{s})$  เป็นต้น) ที่รวมตัวกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เรียกปฏิกิริยาลักษณะนี้ว่าปฏิกิริยาการก่อเกิด เช่น ปฏิกิริยาต่อไปนี้



สัญลักษณ์  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{f}}$  แทนความร้อนของการเกิดสารประกอบที่สภาวะมาตรฐาน ข้อสังเกตสำหรับปฏิกิริยาการเกิด  $\text{CO}_2(\text{g})$  มีพลังงานความร้อนเท่ากับปฏิกิริยาการเผาไหม้  $\text{C}(\text{s})$  เพราะการเผาไหม้  $\text{C}(\text{s})$  1 โมล กับ  $\text{O}_2(\text{g})$  ซึ่งเป็นธาตุมูลฐานในธรรมชาติ จะทำให้เกิด  $\text{CO}_2(\text{g})$  1 โมล ปฏิกิริยานี้จึงเป็นปฏิกิริยาเดียวกัน เพียงแต่พิจารณาในคนละแง่มุมเท่านั้น

**2.5.3 ความร้อนของสารละลาย (heat of solution)** คือ ความร้อนที่ระบบดูดเข้าไปหรือคายออกมา เมื่อสาร (ตัวถูกละลาย) 1 โมล ละลายน้ำปริมาณมาก ๆ (infinite dilution) และใช้สัญลักษณ์  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{sol}}$  แทนความร้อนของการละลายที่สภาวะมาตรฐาน สารบางชนิดละลายน้ำแล้วคายความร้อนออกมา ทำให้  $\Delta\text{H}_{\text{sol}}$  มีค่าติดลบ และก็มีสารบางชนิดที่ละลายน้ำแล้วดูดความร้อน ซึ่งให้ค่า  $\Delta\text{H}_{\text{sol}}$  เป็นบวก เช่น ปฏิกิริยาต่อไปนี้ (ลัดดา มีสุข, 2545, หน้า 190)





**2.5.4 ความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะ (latent heat)** กระบวนการเปลี่ยนสถานะไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพราะไม่มีสารใหม่เกิดขึ้น แต่มักจะเป็นกระบวนการที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาเคมีด้วย เช่น ปฏิกิริยาระหว่างน้ำ (ของเหลว) กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิสูง น้ำจะต้องมีการเปลี่ยนสถานะเป็นไอก่อนเข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งโดยปกติกระบวนการเปลี่ยนสถานะเกี่ยวข้อง ข้องกับความร้อน หากมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง  $\rightarrow$  ของเหลว  $\rightarrow$  แก๊ส จะเป็นกระบวนการดูดความร้อน แต่หากเป็นกระบวนการที่เกิดตรงกันข้าม จากแก๊ส  $\rightarrow$  ของเหลว  $\rightarrow$  ของแข็งจะเป็นกระบวนการคายความร้อน

กระบวนการเปลี่ยนสถานะถือเป็นกระบวนการอุณหภูมิตงที่ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ณ จุดเดือด (boiling point) หรือจุดหลอมเหลว (melting point) ของสารนั้น และสามารถเขียนกระบวนการในลักษณะที่คล้ายกับสมการเคมีได้ โดยสังเกตจากสถานะของสารตั้งต้น (ฝั่งซ้าย) ว่าเปลี่ยนสถานะไปอยู่รูปใด (Felder and Rousseau, 1986, P. 615) เช่น



สัญลักษณ์  $\Delta H_V$  และ  $\Delta H_M$  แทนความร้อนของกระบวนการกลายเป็นไอ (heat of vaporization) และความร้อนของกระบวนการหลอมเหลว (heat of fusion) ของสาร ณ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลว ตามลำดับ

## 2.6 การหาค่าความร้อนของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยา ( $\Delta H$ ) มีวิธีการหาค่าตอบหลายวิธี ดังนี้

### 2.6.1 การพิจารณาประเภทของปฏิกิริยาแล้วเปิดดูค่าจากตาราง

วิธีการนี้ใช้ได้กับปฏิกิริยาเฉพาะบางปฏิกิริยาเท่านั้น โดยพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นปฏิกิริยาเผาไหม้ (พิจารณาว่าสารเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2(\text{g})$  แล้วได้สารผลิตภัณฑ์เป็น  $\text{CO}_2(\text{g})$  และ  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ ) ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบ (พิจารณาว่าสารตั้งต้นเป็น

ธาตุมูลฐานในธรรมชาติแล้วเกิดเป็นสารประกอบ 1 ชนิด) ปฏิบัติการละลายน้ำ (พิจารณาว่าเป็นสารไอออนิก 1 ชนิดละลายน้ำปริมาณมาก ๆ แล้วแตกตัวเป็นไอออน) หรือเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสาร แล้วจึงเปิดดูค่าความร้อนของกระบวนการดังกล่าวจากตารางสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบ ซึ่งอยู่ในภาคผนวก ข ดังตัวอย่างต่อไปนี้

#### ตัวอย่างที่ 2.4 จงหาค่าความร้อนของปฏิกิริยาต่อไปนี้

1)  $6\text{C}(\text{s}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$  เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ, 25 องศาเซลเซียส)  
 วิธีทำ พิจารณาสารตั้งต้นพบว่าเป็นธาตุมูลฐานในธรรมชาติทำปฏิกิริยากัน แล้วเกิดเป็นสารประกอบ  $\text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$  ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงเป็นปฏิกิริยาการก่อเกิด  $\text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$  จึงเปิดตาราง ดูค่า  $\Delta H^\circ_f$  ของ  $\text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$  ได้ค่าเท่ากับ  $+82.93 \text{ kJ/mol}$  (ภาคผนวก ข)

คำตอบที่ได้คือ  $6\text{C}(\text{s}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6(\text{g}) \quad \Delta H^\circ = +82.93 \text{ kJ/mol}$

2)  $2\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g}) + 5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ, 25 องศาเซลเซียส)

วิธีทำ พิจารณาสารตั้งต้นพบว่าเป็นสารประกอบ  $\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g})$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2(\text{g})$  แล้วได้  $\text{CO}_2(\text{g})$  และ  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้  $\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g})$  จึงเปิดตาราง ดูค่า  $\Delta H^\circ_c$  ของ  $\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g})$  ได้ค่าเท่ากับ  $-1192.4 \text{ kJ/mol}$  (ภาคผนวก ข) แต่โจทย์กำหนด  $\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g})$  2 โมล ดังนั้น ค่า  $\Delta H^\circ_c$  ต้องเป็น 2 เท่าคือมีค่าเท่ากับ  $2 \times (-1192.4) = -2384.8 \text{ kJ}$

คำตอบที่ได้คือ  $2\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g}) + 5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \quad \Delta H^\circ = -2384.8 \text{ kJ}$

3)  $\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{l})$  เกิดขึ้นที่สภาวะ 1 บรรยากาศ,  $-33.43$  องศาเซลเซียส

วิธีทำ พิจารณาสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์พบว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน แต่อยู่คนละสถานะเกิดการเปลี่ยนสถานะที่ความดัน 1 atm และอุณหภูมิ  $-33.43^\circ\text{C}$  (จุดเดือดของ  $\text{NH}_3$ ) จากแก๊สเป็นของเหลว ซึ่งเป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส จึงเปิดตาราง ดูค่า  $\Delta H_v$  ของ  $\text{NH}_3$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $+23.351 \text{ kJ/mol}$  (ภาคผนวก ข) ดังนั้นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของ  $\text{NH}_3$  จากแก๊สเป็นของเหลวจึงมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ  $-23.351 \text{ kJ/mol}$

คำตอบที่ได้คือ  $\text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{l}) \quad \Delta H = -23.351 \text{ kJ/mol}$



## ข้อสังเกต

- (1) ค่า  $\Delta H^\circ_f$  ของธาตุมูลฐานในธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0
- (2) เครื่องหมายของ  $\Delta H$  จะบอกว่าปฏิกิริยานั้นดูด (+) หรือคายความร้อน (-)
- (3) ถ้ากลับข้างของสมการเครื่องหมายของ  $\Delta H$  จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม
- (4) ถ้าเอาตัวเลขใดมาคูณหรือหารทั้งสมการเคมี ต้องทำกับค่า  $\Delta H$  ด้วย
- (5) ค่า  $\Delta H$  อาจมีหน่วยเป็น kJ/mol หรือ kJ ได้ โดยต้องเข้าใจว่าเป็นความร้อนของปฏิกิริยาที่เทียบต่อ 1 หน่วยโมลของสารใด เช่น ถ้าเป็นค่า  $\Delta H^\circ_f$  จะเทียบต่อ 1 โมลสารประกอบที่เกิดขึ้น ถ้าเป็นค่า  $\Delta H^\circ_c$  จะเทียบต่อ 1 โมลสารประกอบที่ถูกเผาไหม้ เป็นต้น
- (6) ค่าที่ได้จากตารางเป็น  $\Delta H^\circ$  ที่สภาวะมาตรฐาน ถ้าต้องการหา  $\Delta H$  ณ สภาวะอุณหภูมิอื่น ให้ดูวิธีการคำนวณได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 2 (ปริญญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 70)

## 2.6.2 การคำนวณโดยใช้กฎของเฮสส์

กฎของเฮส (Hess's law) กล่าวว่า “การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่เสมอไม่ว่าปฏิกิริยานั้นจะเกิดเพียงขั้นตอนเดียว หรือเกิดผ่านขั้นตอนต่าง ๆ หลายขั้นตอนก็ตาม” (ปริญญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 66) ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยา ( $\Delta H$ ) เป็นฟังก์ชันสภาวะ จึงไม่ขึ้นกับเส้นทางหรือขั้นตอน/กลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นไม่ว่าปฏิกิริยาจะเกิดผ่านขั้นตอนใดก็ตาม ผลสุดท้ายจะมีค่า  $\Delta H$  เท่าเดิม

เช่น ปฏิกิริยา  $A+B \rightarrow 2C; \Delta H = -20 \text{ kJ/mol}$

เกิดผ่านขั้นตอนดังนี้ (1)  $A+B \rightarrow X; \Delta H_1 = -5 \text{ kJ/mol}$

(2)  $X \rightarrow 2C; \Delta H_2 = -15 \text{ kJ/mol}$

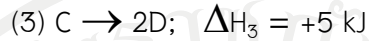
เมื่อรวมทุกขั้นตอนเข้าด้วยกัน โดยนำ (1)+(2) จะได้

$A+B \rightarrow 2C; \Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2 = -20 \text{ kJ/mol}$

จะเห็นว่าค่า  $\Delta H$  ที่ได้จากการคำนวณผ่านหลาย ๆ ขั้นตอนมีค่าเท่ากับค่า  $\Delta H$  ของปฏิกิริยา

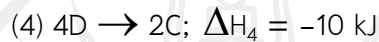


ตัวอย่างที่ 2.5 กำหนดปฏิกิริยา (1)  $A \rightarrow B$ ;  $\Delta H_1 = -10 \text{ kJ}$



จงใช้กฎของเฮสส์หา  $\Delta H$  ของปฏิกิริยา  $4D \rightarrow A$

วิธีทำ เพื่อให้สาร 4D อยู่ทางซ้าย จึงกลับข้างสมการ (3) แล้วคูณ 2 จะได้



กลับข้างสมการ (2) จะได้



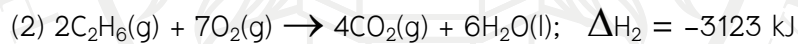
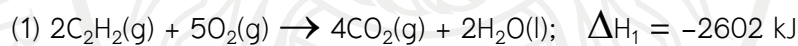
กลับข้างสมการ (1) จะได้



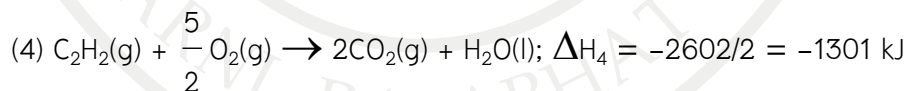
รวมทุกขั้นตอน โดยนำสมการ (4)+(5)+(6) จะได้



ตัวอย่างที่ 2.6 จงหาค่าความร้อนของปฏิกิริยา  $C_2H_2(g) + 2H_2(g) \rightarrow C_2H_6(g)$  จากสมการเคมีที่กำหนดให้ต่อไปนี้



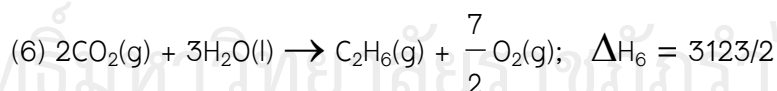
วิธีทำ นำสมการ (1) มาคูณด้วย  $\frac{1}{2}$  จะได้



นำสมการ (3) มาคูณด้วย 2 จะได้

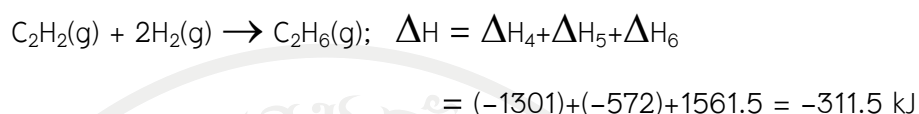


กลับข้างสมการ (2) แล้วคูณด้วย  $\frac{1}{2}$  จะได้



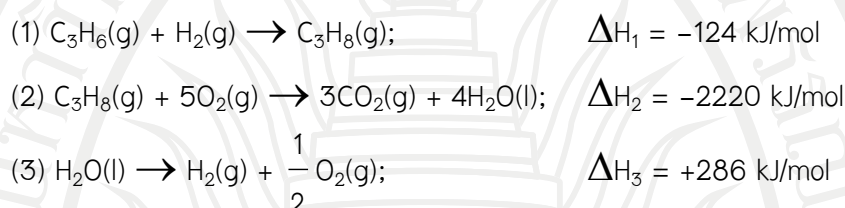
$$= +1561.5 \text{ kJ}$$

รวมทุกขั้นตอน โดยนำสมการ (4)+(5)+(6) จะได้

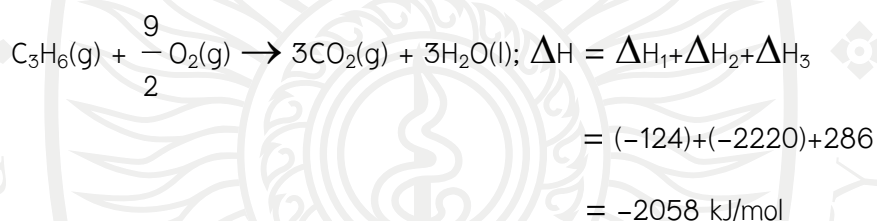


**ตัวอย่างที่ 2.7** จงหาค่าความร้อนของปฏิกิริยา  $\text{C}_3\text{H}_6(\text{g}) + \frac{9}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

จากสมการเคมีที่กำหนดให้ต่อไปนี้



วิธีทำ นำสมการ (1)+(2)+(3) จะได้



### 2.6.3 การคำนวณโดยใช้สูตร

ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ สามารถคำนวณหาค่า  $\Delta\text{H}^\circ$  ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}$  ของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ดังนี้

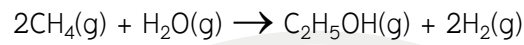
$$\Delta\text{H}^\circ = \sum \Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}(\text{Products}) - \sum \Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}(\text{Reactants}) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\sum \Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}(\text{Products}) =$  ผลรวมของ  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}$  ของสารผลิตภัณฑ์ทุกตัวในปฏิกิริยา

$\sum \Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}(\text{Reactants}) =$  ผลรวมของ  $\Delta\text{H}^\circ_{\text{F}}$  ของสารตั้งต้นทุกตัวในปฏิกิริยา

การคำนวณหาค่า  $\Delta\text{H}^\circ$  โดยใช้สมการ (2.16) ต้องนำตัวเลขมวลสารสัมพันธ์จากสมการเคมีที่ดุลแล้วมารวมคำนวณด้วย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 2.8 จงหาค่า  $\Delta H^\circ$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



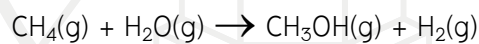
วิธีทำ จากตารางสมบัตินิทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบ (ภาคผนวก ข) ได้ข้อมูลดังนี้

สาร	$\Delta H^\circ_f$ (kJ/mol)
$\text{CH}_4(\text{g})$	-74.85
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241.83
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})$	-235.31
$\text{H}_2(\text{g})$	0

จากสมการ (2.16) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta H^\circ &= \sum \Delta H^\circ_f(\text{Products}) - \sum \Delta H^\circ_f(\text{Reactants}) \\ &= [\Delta H^\circ_f(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})) + 2\Delta H^\circ_f(\text{H}_2(\text{g}))] - [2\Delta H^\circ_f(\text{CH}_4(\text{g})) + \Delta H^\circ_f(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] \\ &= [(-235.31) + (2 \times 0)] - [(2 \times -74.85) + (-241.83)] \\ &= +156.22 \text{ kJ/mol (เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน)} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.9 จงหาค่า  $\Delta H^\circ$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



วิธีทำ จากตารางสมบัตินิทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบ (ภาคผนวก ข) ได้ข้อมูลดังนี้

สาร	$\Delta H^\circ_f$ (kJ/mol)
$\text{CH}_4(\text{g})$	-74.85
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241.83
$\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})$	-201.2
$\text{H}_2(\text{g})$	0

จากสมการ (2.16) จะได้

$$\begin{aligned}
 \Delta H^\circ &= \sum \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{Products}) - \sum \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{Reactants}) \\
 &= [\Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})) + \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{H}_2(\text{g}))] - [\Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{CH}_4(\text{g})) + \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] \\
 &= [(-201.2) + 0] - [(-74.85) + (-241.83)] \\
 &= +115.48 \text{ kJ/mol (เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน)}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.10 จงหาค่า  $\Delta H^\circ$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



วิธีทำ จากตารางสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบ (ภาคผนวก ข) ได้ข้อมูลดังนี้

สาร	$\Delta H^\circ_{\text{F}}$ (kJ/mol)
H <sub>2</sub> O(l)	-285.84
H <sub>2</sub> O(g)	-241.83

จากสมการ (2.16) จะได้

$$\begin{aligned}
 \Delta H^\circ &= \sum \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{Products}) - \sum \Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{Reactants}) \\
 &= [\Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] - [\Delta H^\circ_{\text{F}}(\text{H}_2\text{O}(\text{l}))] \\
 &= [-241.83] - [-285.84] = +44.01 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

(คำตอบที่ได้ คือ ความร้อนของการกลายเป็นไอของน้ำที่สภาวะมาตรฐาน)

#### 2.6.4 การคำนวณโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานพันธะ

การอาศัยความรู้เกี่ยวกับพลังงานพันธะสามารถนำมาใช้หาค่า  $\Delta H$  ของปฏิกิริยาได้ โดยเมื่ออะตอม (ในสถานะแก๊ส) สร้างพันธะ จะคายพลังงาน แต่ถ้าพันธะนั้นถูกสลายจนได้อะตอมในสภาพแก๊ส จะดูดพลังงาน (Lewis and Evans, 2006, P. 236)

พลังงานพันธะ;  $E(\text{A-B})$  หรือเรียกว่า เอนทัลปีพันธะ (bond enthalpy) ที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างอะตอมคู่หนึ่ง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโมเลกุลชนิดใดก็ตาม (ปริญญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 73) ซึ่งค่าพลังงานพันธะของพันธะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 พลังงานพันธะ; E(A-B) หน่วย kJ/mol

	H	C	N	O	F	Cl	Br	I	S	P	Si
H	436										
C	412	348(I) 612(II) 838(III) 518(a)									
N	388	305(I) 613(II) 890(III)	163(I) 409(II) 946(III)								
O	463	360(I) 743(II)	157	146(I) 497(II)							
F	565	484	270	185	155						
Cl	431	338	200	203	254	242					
Br	366	276				219	193				
I	299	238				210	178	151			
S	338	259			496	250	212		264		
P	322									201	
Si	318		374	466							226

หมายเหตุ (I) = พันธะเดี่ยว, (II) = พันธะคู่, (III) = พันธะสาม, (a) = อะโรมาติก

(ที่มา : Atkins, 1994, P. C7)

การคำนวณเกี่ยวกับค่าพลังงานพันธะร่วมกับกฎของเฮสส์ สามารถนำมาใช้หาค่า  $\Delta H$  ของปฏิกิริยาได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

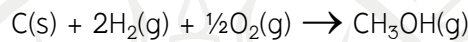
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ตัวอย่างที่ 2.11 จงคำนวณหาค่าเอนทัลปีของการเกิด  $\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})$  เมื่อกำหนด  $\text{C}(\text{s}) \rightarrow \text{C}(\text{g})$ ;

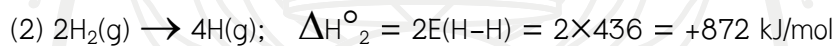
$\Delta H^\circ_{\text{v}} = 717.7$  กิโลจูล/โมล และใช้ค่าต่าง ๆ จากตารางที่ 2.1

วิธีทำ

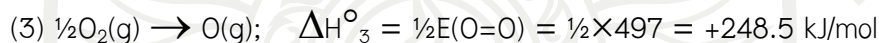
โจทย์ให้หาเอนทัลปีของการเกิด  $\text{CH}_3\text{OH}$  ซึ่งเกิดจากธาตุมูลฐาน  $\text{C}(\text{s})$ ,  $\text{H}_2(\text{g})$  และ  $\text{O}_2(\text{g})$  เกิดปฏิกิริยาดังนี้



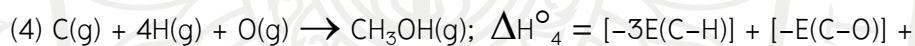
โดยอาศัยการคำนวณเกี่ยวกับค่าพลังงานพันธะ สารตั้งต้นจะต้องอยู่ในสภาพของอะตอมที่เป็นแก๊ส แล้วจึงเกิดการสร้างพันธะพร้อมกับคายพลังงานจนได้  $\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})$  ซึ่งมีขั้นตอนและเอนทัลปีที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้น ดังนี้



(ดูคพลังงานเพื่อสลายพันธะ H-H 2 โมล)



(ดูคพลังงานเพื่อสลายพันธะ O=O ½ โมล)



$$[-E(\text{O}-\text{H})]$$

$$= (-3 \times 412) + (-360) + (-463)$$

$$= -2059 \text{ kJ/mol}$$

(คายพลังงานเพื่อเกิดสารประกอบ  $\text{CH}_3\text{OH}$ )

จากกฎของเฮส เมื่อรวมทุกขั้นตอนจะได้



$$= 717.7 + 872 + 248.5 + (-2059)$$

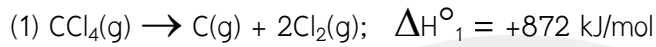
$$= -220.8 \text{ kJ/mol}$$

(เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



**ตัวอย่างที่ 2.12** จงคำนวณหาพลังงานพันธะของ C-Cl จากข้อมูลต่อไปนี้



วิธีทำ นำ 2 คูณสมการ (2) จะได้



จากกฎของเฮสส์ เมื่อรวมสมการ (1) และ (3) จะได้

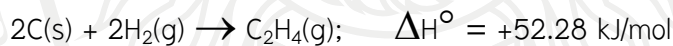


สมการที่ได้คือการสลายพันธะ C-Cl จำนวน 4 พันธะ เป็นอะตอม C และ Cl ในสภาพแก๊ส ซึ่งพลังงานที่ใช้เท่ากับค่าพลังงานพันธะ C-Cl จำนวน 4 พันธะ

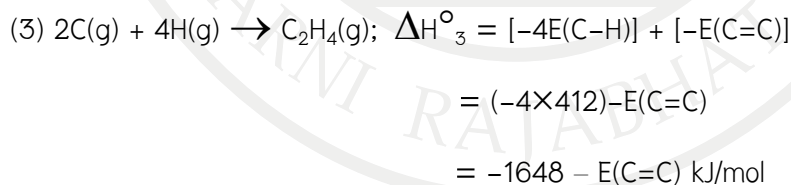
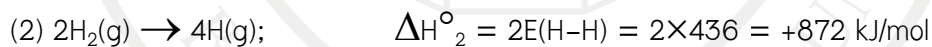
$$\text{ดังนั้น } E(\text{C}-\text{Cl}) = \frac{1356}{4} = +339 \text{ kJ/mol}$$

**ตัวอย่างที่ 2.13** ถ้าพลังงานในการก่อเกิดเอทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) เท่ากับ 52.28 กิโลจูล/โมล เมื่อกำหนด  $\text{C}(\text{s}) \rightarrow \text{C}(\text{g}); \Delta H^\circ_v = 717.7$  กิโลจูล/โมล และค่าพลังงานพันธะ C-H เท่ากับ 412 กิโลจูล/โมล จงหาพลังงานพันธะ C=C

วิธีทำ ปฏิกิริยาการเกิดเอทิลีนจากธาตุมูลฐาน  $\text{C}(\text{s})$  และ  $\text{H}_2(\text{g})$  คือ



มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



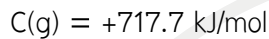
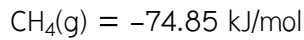
จากกฎของเฮสส์ เมื่อรวมทุกขั้นตอนจะได้

$$\Delta H^\circ = \Delta H^\circ_1 + \Delta H^\circ_2 + \Delta H^\circ_3$$

$$52.28 = 1435.4 + 872 - 1648 - E(\text{C}=\text{C})$$

แก้สมการ หาค่า  $E(\text{C}=\text{C})$  จะได้  $E(\text{C}=\text{C}) = +607.12 \text{ kJ/mol}$

**ตัวอย่างที่ 2.14** จงคำนวณพลังงานพันธะ C-H ใน  $\text{CH}_4$  เมื่อกำหนดค่า  $\Delta H^\circ_f$  ดังนี้



วิธีทำ ปฏิบัติการสลายพันธะ C-H จำนวน 4 พันธะ เป็นอะตอม C และ H ในสภาพแก๊ส คือ



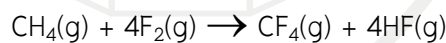
คำนวณหาค่า  $\Delta H$  ของปฏิกิริยานี้ โดยใช้สมการ (2.16) ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta H^\circ &= \sum \Delta H^\circ_f(\text{Products}) - \sum \Delta H^\circ_f(\text{Reactants}) \\ &= [\Delta H^\circ_f(\text{C}(\text{g})) + 4\Delta H^\circ_f(\text{H}(\text{g}))] - [\Delta H^\circ_f(\text{CH}_4(\text{g}))] \\ &= [717.7 + (4 \times 218)] - [-74.85] \\ &= +1664.55 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

ดังนั้นปฏิบัติการสลายพันธะ C-H จำนวน 4 พันธะ เป็นอะตอม C และ H ในสภาพแก๊ส ต้องใช้พลังงานเท่ากับ 1664.55 kJ/mol

$$\text{จึงได้ว่า } E(\text{C}-\text{H}) = \frac{1664.55}{4} = +416.14 \text{ kJ/mol}$$

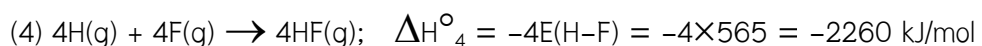
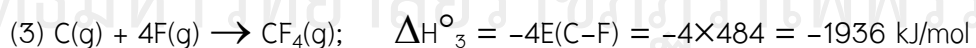
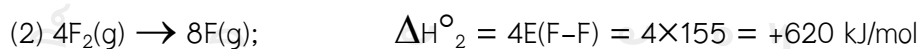
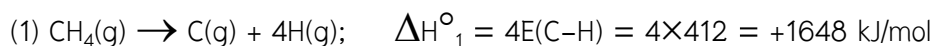
**ตัวอย่างที่ 2.15** จงหาค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อน (เอนทัลปี) ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



กำหนดค่าพลังงานพันธะ ตามข้อมูลในตารางที่ 2.1

วิธีทำ

สารตั้งต้นจะต้องอยู่ในสภาพของอะตอมที่เป็นแก๊ส แล้วจึงเกิดการสร้างพันธะพร้อมกับคายพลังงานจนได้สารผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขั้นตอนและเอนทัลปีที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้น ดังนี้



จากกฎของเฮสส์ เมื่อรวมทุกขั้นตอนจะได้

$$\begin{aligned}\Delta H^\circ &= \Delta H^\circ_1 + \Delta H^\circ_2 + \Delta H^\circ_3 + \Delta H^\circ_4 \\ &= 1648 + 620 + (-1935) + (-2260) \\ &= -1927 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 2.16** จงหาค่าพลังงานการก่อเกิด  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$  เมื่อกำหนดค่า  $\Delta H_v = 38.58$  กิโลจูล/โมล และดูค่าพลังงานพันธะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในตารางที่ 2.1

วิธีทำ ปฏิริยาการเกิด  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$  จากธาตุมูลฐาน

คือ  $2\text{C}(\text{s}) + 3\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$  เกิดผ่านกระบวนการดังนี้

- (1)  $2\text{C}(\text{s}) \rightarrow 2\text{C}(\text{g}); \quad \Delta H_1 = 717.7 \times 2 = +1435.4 \text{ kJ/mol}$
- (2)  $3\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{H}(\text{g}); \quad \Delta H_2 = 3E(\text{H-H}) = 3 \times 436 = +1308 \text{ kJ/mol}$
- (3)  $\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{O}(\text{g}); \quad \Delta H_3 = \frac{1}{2}E(\text{O=O}) = \frac{1}{2} \times 497 = +248.5 \text{ kJ/mol}$
- (4)  $2\text{C}(\text{g}) + 6\text{H}(\text{g}) + \text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g}); \quad \Delta H_4 = [-5E(\text{C-H})] + [-E(\text{C-C})] + [-E(\text{C-O})] + [-E(\text{O-H})]$   
 $= (-5 \times 412) + (-348) + (-360) + (-463)$   
 $= -3231 \text{ kJ/mol}$
- (5)  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l}); \quad \Delta H_5 = -38.58 \text{ kJ/mol}$

จากกฎของเฮสส์ เมื่อรวมทุกขั้นตอนจะได้

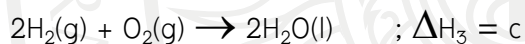
$$\begin{aligned}\Delta H^\circ &= \Delta H^\circ_1 + \Delta H^\circ_2 + \Delta H^\circ_3 + \Delta H^\circ_4 + \Delta H^\circ_5 \\ &= 1435.4 + 1308 + 248.5 + (-3231) + (-38.58) \\ &= -277.68 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

## 2.7 สรุป

อุณหพลศาสตร์ศึกษาการเปลี่ยนรูปพลังงาน จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ พลังงานที่เข้าสู่ระบบ (Q) จะเปลี่ยนรูปเป็นงาน (W) และพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta U$ ) กระบวนการที่เกิดขึ้นอาจเป็นได้ทั้งกระบวนการปริมาตรคงที่ ความดันคงที่ อุณหภูมิคงที่ หรือกระบวนการอะเดียแบติก สำหรับกระบวนการปริมาตรคงที่ยังสามารถใช้ค่าความจุความร้อนตามกระบวนการปริมาตรคงที่ ( $C_V$ ) มาใช้คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนได้ และในทำนองเดียวกันสามารถใช้ค่าความจุความร้อนตามกระบวนการความดันคงที่ ( $C_p$ ) มาใช้คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของกระบวนการความดันคงที่ได้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้น ณ สภาวะความดันคงที่ เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ซึ่งสำหรับปฏิกิริยาคายความร้อน ค่า  $\Delta H$  จะมีเครื่องหมายลบ (-) ส่วนปฏิกิริยาดูดความร้อน ค่า  $\Delta H$  จะมีเครื่องหมายบวก (+) การคำนวณหาค่า  $\Delta H$  ทำได้หลายวิธี ได้แก่ การจำแนกประเภทปฏิกิริยาแล้วดูค่าจากตารางแสดงสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบ ซึ่งใช้ได้เฉพาะที่สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียสและ 1 บรรยากาศ) เท่านั้น การคำนวณโดยใช้กฎของเฮสส์ ซึ่งจะต้องทราบค่า  $\Delta H$  ของขั้นตอนย่อย ๆ ของปฏิกิริยา แล้วนำมารวมกันแบบพีชคณิต การคำนวณโดยใช้สูตร ซึ่งต้องอาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาการก่อเกิดที่สภาวะมาตรฐานของสารประกอบทุกชนิดในปฏิกิริยา และการคำนวณโดยอาศัยค่าพลังงานพันธะ โดยใช้หลักการที่ว่าสารตั้งต้นต้องแตกพันธะ (ปฏิกิริยาดูดพลังงาน) จนอยู่ในสภาวะอะตอมที่เป็นแก๊ส แล้วจึงเกิดการสร้างพันธะ (ปฏิกิริยาคายพลังงาน) จนได้สารผลิตภัณฑ์

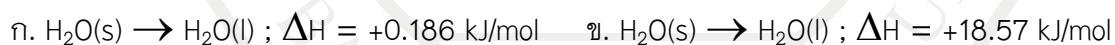
## แบบฝึกหัดบทที่ 2

1. การทำให้น้ำแข็ง 1 โมล หลอมเหลวที่ 0 องศาเซลเซียส ณ ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ (หรือ 101325 นิวตัน/ตารางเมตร) ต้องให้ความร้อนแก่น้ำแข็ง 5000 จูล จงคำนวณหา  $W$ ,  $\Delta H$  และ  $\Delta U$  ถ้าปริมาตรต่อโมลของน้ำแข็งและน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0196 และ 0.0180 ลิตร ตามลำดับ
2. ถ้าเผาไหม้มีเทนอย่างสมบูรณ์ให้ค่า  $\Delta H_c = -890$  กิโลจูล แล้วถ้าเผาไหม้มีเทน 1 กิโลกรัม จะได้รับความร้อนเท่าใด (กำหนดมวลอะตอม  $C = 12$ ,  $H = 1$ )
3. กำหนดให้พลังงานพันธะ  $(H-H) = 430$  kJ/mol,  $(F-F) = 160$  kJ/mol,  $(H-F) = 560$  kJ/mol ปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยา  $H_2(g) + F_2(g) \rightarrow 2HF(g)$  เป็นอย่างไรและมีค่าเท่าใด
4. กำหนดปฏิกิริยาและพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาดังนี้



พลังงานพันธะ O-H ของน้ำมีค่าเท่าใด จากปฏิกิริยา  $2H(g) + O(g) \rightarrow H_2O(g)$

5. น้ำแข็ง 1 กรัม หลอมเหลวต้องใช้พลังงาน 334.4 จูล ข้อใดต่อไปนี้เป็นถูกต้อง (กำหนดมวลอะตอม  $H = 1$ ,  $O = 16$ )



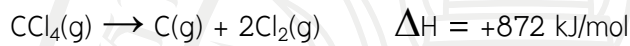
6. พลังงานสุทธิที่ได้จากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล มีค่าเท่าใด กำหนด



7. กำหนดค่าพลังงานพันธะให้ดังต่อไปนี้ (C-H) = 413 kJ/mol, (C-C) = 348 kJ/mol, (C=C) = 614 kJ/mol, (C≡C) = 839 kJ/mol ถ้าปฏิกิริยา  $C_4H_{10}(g) \rightarrow C_4H_6(g) + 2H_2(g)$  ดูดพลังงาน 289 kJ จงคำนวณพลังงานพันธะ H-H ของโมเลกุล  $H_2$

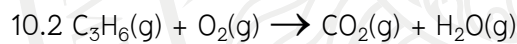
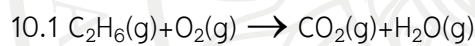


8. จงคำนวณหาพลังงานพันธะของ C-Cl จากข้อมูลต่อไปนี้



9. ถ้าพลังงานในการก่อเกิดไพโรเพน เท่ากับ  $-103.85 \text{ kJ/mol}$  ถ้าพลังงานพันธะ C-H เท่ากับ  $415 \text{ kJ/mol}$  จงหาพลังงานพันธะ C-C กำหนด  $\Delta H_f$  ของ  $C(g) = 717.7 \text{ kJ/mol}$  และ  $\Delta H_f$  ของ  $H(g) = 218 \text{ kJ/mol}$

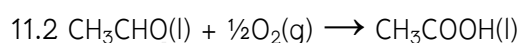
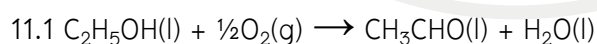
10. จงหาค่า  $\Delta H$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้ โดยอาศัยค่าพลังงานพันธะ



11. จากข้อมูลต่อไปนี้

Substance	$\Delta H_c$ (kJ/mol)
$C_2H_5OH$ (l)	-1370.7
$CH_3CHO$ (l)	-1167.3
$CH_3COOH$ (l)	-876.1

จงหาค่าความร้อนของปฏิกิริยา





## เอกสารอ้างอิง

- เกริกชัย สุภาบุญจันจี้. (2538). **เทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับอุตสาหกรรมซีพีไอ**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริญญา อรุณวิสุทธิ. (2553). **เทอร์โมไดนามิกส์เคมีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลัดดา มีคูข. (2545). **เคมีทั่วไป 1**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชารี. (2546). **เทอร์โมไดนามิกส์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชารี. (2551). **เทอร์โมไดนามิกส์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- Atkins, P.W. (1994). **Physical Chemistry**. 5<sup>th</sup> Ed. Oxford : Oxford University Press.
- Felder, R. M. and Rousseau, R. W. (1986). **Elementary Principles of Chemical Processes**. 2<sup>nd</sup> Ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Laidler, K. J. and Meiser, J. H. (1999). **Physical Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. Boston : Houghton Mifflin Company.
- Lewis, R. and Evans, W. (2006). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Palgrave Macmillan.
- Socrates, G. (1971). **Thermodynamics and Statistical Mechanics**. 1<sup>st</sup> Ed. London : Butterworths & Co.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 3 เอนโทรปีและสมดุลเคมี

3.1 นิยามของเอนโทรปี

3.2 การคำนวณหาค่า  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  ของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี

3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์กับสมดุลเคมี

3.4 สมดุลเคมี

3.4.1 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุล

3.4.2 หลักการของเลอชาเตอลิเยร์

3.4.3 สมดุลเคมีของปฏิกิริยาการละลายน้ำ

3.5 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายสภาวะสมดุลและคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีได้
2. คำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาจากความเข้มข้นของสาร ณ สภาวะสมดุลได้
3. คำนวณเกี่ยวกับการรบกวนสมดุลตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์ได้
4. ตรวจสอบการตกตะกอนของสารโดยอาศัยค่าคงที่สมดุลได้

### กิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 3 เรื่องเอนโทรปีและสมดุลเคมีมาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณทีละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดทำขบในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 3 เรื่องเอนโทรปีและสมดุลเคมี
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 3

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทที่ 3

### เอนโทรปีและสมดุลเคมี

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์บอกแต่เพียงการเปลี่ยนรูปของพลังงาน โดยพลังงานรวมของระบบก่อนและหลังการเกิดกระบวนการจะต้องเท่ากัน แต่ไม่ได้บอกว่ากระบวนการที่แท้จริงจะเกิดในทิศทางใด ดังนั้นจึงต้องมีกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์เพื่อตอบข้อสงสัยดังกล่าว โดยกล่าวว่า กระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ (spontaneous process) ทุกกระบวนการจะมีการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี (entropy) เสมอ ดังนั้นจากข้อมูลเกี่ยวกับเอนโทรปีจึงใช้บอกทิศทางการดำเนินไปของกระบวนการได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ทำนายสภาวะสมดุลของกระบวนการนั้น ๆ ได้ด้วย

ในบทนี้จะกล่าวถึงเอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ ที่เชื่อมโยงไปถึงสมดุลเคมี การคำนวณเกี่ยวกับค่าคงที่สมดุล หลักการของเลอชาเตอลิเยร์ การรบกวนสมดุลและสมดุลเคมีของปฏิกิริยาการละลายน้ำ ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

#### 3.1 นิยามของเอนโทรปี

เอนโทรปี (S) คือ ฟังก์ชันสภาวะชนิดหนึ่ง (คำนวณจากสูตร  $q/T$ ) ซึ่งถือว่าเป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางของกระบวนการ (Socrates, 1971, P. 88) การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีหรือการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S$ ) จึงคำนวณได้จาก  $S_2 - S_1$  (ดูบทที่ 2 หัวข้อ 2.1.6)

การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปีรวม ( $\Delta S_{\text{total}}$ ) คิดจากผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของทั้งระบบ ( $\Delta S_{\text{system}}$ ) และสิ่งแวดล้อม ( $\Delta S_{\text{surrounding}}$ ) ดังนี้

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surrounding}} \quad (3.1)$$

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในสิ่งแวดล้อม เกิดจากความร้อนที่ระบบให้แก่สิ่งแวดล้อม (หรือสิ่งแวดล้อมรับความร้อนจากระบบ;  $q_{\text{surrounding}}$ ) ต่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมนั้น (T) ในหน่วย เคลวิน คือ

$$\Delta S_{\text{surrounding}} = \frac{q_{\text{surrounding}}}{T} \quad \text{หน่วย kJ/K หรือ J/K} \quad (3.2)$$

แต่สำหรับกระบวนการที่อุณหภูมิตั้งเดิมและความดันคงที่ เช่น ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ พบว่า ความร้อนที่ให้แก่สิ่งแวดล้อม เท่ากับความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาเคมี ( $-\Delta H_{\text{reaction}}$ ) ดังนั้นจึงได้

$$q_{\text{surrounding}} = -\Delta H_{\text{reaction}} \quad (3.3)$$

ดังนั้น

$$\Delta S_{\text{surrounding}} = \frac{-\Delta H_{\text{reaction}}}{T} \quad (3.4)$$

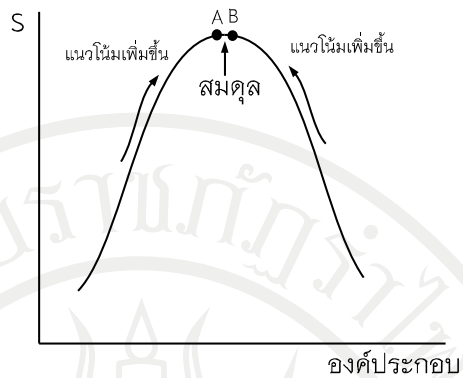
จะได้ว่า

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{system}} - \frac{\Delta H_{\text{reaction}}}{T} \quad (3.5)$$

จากการพิสูจน์ด้วยคณิตศาสตร์พบว่าเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีที่เป็นประโยชน์ในการทำนายหรือระบุทิศทางของกระบวนการมีดังนี้คือ (ปริญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 98)

- (1) ถ้า  $\Delta S_{\text{total}} > 0$  แสดงว่า กระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองได้และดำเนินไปในทิศทางที่ระบุ
- (2) ถ้า  $\Delta S_{\text{total}} = 0$  แสดงว่า ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล
- (3) ถ้า  $\Delta S_{\text{total}} < 0$  แสดงว่า กระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่ระบุ

โดยปกติกระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติจะมีค่าเอนโทรปีรวม (ทั้งเอนโทรปีของระบบและสิ่งแวดล้อม) เพิ่มขึ้น (Laidler and Meiser, 1999, P. 123) ดังนั้นจากภาพที่ 3.1 พบว่าถ้าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล A แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปสู่สภาวะสมดุล B จะไม่ทำให้เอนโทรปีรวมเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ดังนั้นเงื่อนไขที่สภาวะสมดุลคือ  $\Delta S_{\text{total}} = 0$  และตำแหน่งที่เกิดสภาวะสมดุล คือตำแหน่งที่เอนโทรปีรวมมีค่าสูงสุด



ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีรวมของกระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้

ในทางปฏิบัติแล้วไม่สะดวกนักที่จะพิจารณาเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อม ในขณะที่สนใจระบบเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงต้องหาเงื่อนไขใหม่สำหรับพิจารณาสถานะสมดุล ซึ่งเกี่ยวข้องกับเฉพาะระบบอย่างเดียว

สำหรับระบบที่อยู่ในสถานะสมดุล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบที่อุณหภูมิและความดันคงที่ คำนวณจาก

$$\Delta S_{\text{system}} = \frac{q}{T} = \frac{\Delta H_{\text{reaction}}}{T} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $T$  = อุณหภูมิของระบบ (K)

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta H_{\text{reaction}} - T\Delta S_{\text{system}} = 0 \quad (3.7)$$

หรือเมื่อพิจารณาเฉพาะระบบที่สมดุล

$$\Delta H - T\Delta S = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{หรือ} \quad H_2 - H_1 - T(S_2 - S_1) = 0$$

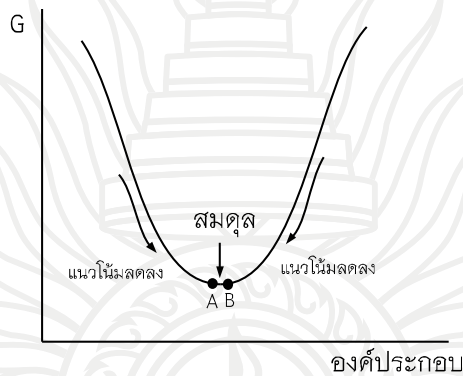
$$(H_2 - TS_2) - (H_1 - TS_1) = 0$$

ฟังก์ชัน  $H-TS$  กำหนดให้เป็นฟังก์ชันใหม่ เรียกว่า พลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) ใช้สัญลักษณ์  $G$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันสถานะ (Socrates, 1971, P.150) ดังนั้นที่สถานะสมดุล



$$\Delta G = G_2 - G_1 = 0 \quad (3.9)$$

เงื่อนไขสำหรับสภาวะสมดุลนี้ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งพบว่าระบบจะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุลที่สภาวะพลังงานอิสระกิบส์มีค่าต่ำที่สุด (Laidler and Meiser, 1999, P. 123) และการที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล A แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปสู่สภาวะสมดุล B จะไม่ทำให้พลังงานอิสระกิบส์เกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้

การใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ในการทำนายหรือระบุทิศทางของกระบวนการ มีเงื่อนไขดังนี้ (Panchenkov, 1978, P. 159)

- (1) ถ้า  $\Delta G < 0$  แสดงว่า กระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองได้และดำเนินไปในทิศทางที่ระบุ
- (2) ถ้า  $\Delta G = 0$  แสดงว่า ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล
- (3) ถ้า  $\Delta G > 0$  แสดงว่า กระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่ระบุ

### 3.2 การคำนวณหาค่า $\Delta S$ และ $\Delta G$ ของระบบที่เป็นปฏิกิริยาเคมี

เนื่องจากทั้งเอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์เป็นฟังก์ชันสถานะ ซึ่งไม่ขึ้นกับเส้นทางของกระบวนการ ดังนั้นในการคำนวณหาค่า  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  ของปฏิกิริยาเคมี เมื่อทราบ  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  ของขั้นตอนย่อย ๆ ของปฏิกิริยาเคมีนั้น จึงนำมารวมกันเช่นเดียวกับกฎของเฮสส์ได้อีกทั้งยังสามารถใช้สูตร (เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่า  $\Delta H$ ) เพื่อหาค่า  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  สำหรับค่าที่สถานะมาตรฐานได้ดังนี้

$$\Delta S^\circ = \sum S^\circ(\text{Products}) - \sum S^\circ(\text{Reactants}) \quad (3.10)$$

$$\Delta G^\circ = \sum \Delta G^\circ_f(\text{Products}) - \sum \Delta G^\circ_f(\text{Reactants}) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $S^\circ(\text{products})$  คือ เอนโทรปีของสารผลิตภัณฑ์ ณ สถานะมาตรฐาน (ดูตารางภาคผนวก ข)

$S^\circ(\text{reactants})$  คือ เอนโทรปีของสารตั้งต้น ณ สถานะมาตรฐาน (ดูตารางภาคผนวก ข)

$\Delta S^\circ$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของปฏิกิริยาเคมี ณ สถานะมาตรฐาน

$\Delta G^\circ_f(\text{products})$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มาตรฐานของการก่อเกิดของสารผลิตภัณฑ์ (ดูตารางภาคผนวก ข)

$\Delta G^\circ_f(\text{reactants})$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มาตรฐานของการก่อเกิดของสารตั้งต้น (ดูตารางภาคผนวก ข)

$\Delta G^\circ$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มาตรฐานของปฏิกิริยาเคมี

การคำนวณเกี่ยวกับ  $\Delta S$  และ  $\Delta G$  ของปฏิกิริยาเคมี สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 3.1** จงคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) ของปฏิกิริยาต่อไปนี้ ที่เกิดขึ้นที่สถานะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ, 25 องศาเซลเซียส)  $2\text{CH}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g}) + 2\text{H}_2(\text{g})$

วิธีทำ จากตารางในภาคผนวก ข ได้ข้อมูลดังนี้

สารประกอบ	$S^\circ$ (จูล/โมล·เคลวิน)	$\Delta G^\circ_F$ (กิโลจูล/โมล)
$\text{CH}_4(\text{g})$	186.26	-50.72
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	188.83	-228.57
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})$	282.7	-168.49
$\text{H}_2(\text{g})$	130.684	0

จากสมการ (3.10)

$$\begin{aligned}\Delta S^\circ &= \sum S^\circ(\text{products}) - \sum S^\circ(\text{reactants}) \\ &= [S^\circ(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})) + 2S^\circ(\text{H}_2(\text{g}))] - [2S^\circ(\text{CH}_4(\text{g})) + S^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] \\ &= [(282.7) + (2 \times 130.684)] - [(2 \times 186.26) + (188.83)] \\ &= -17.282 \text{ จูล/โมล·เคลวิน} \\ &= -0.017282 \text{ กิโลจูล/โมล·เคลวิน}\end{aligned}$$

จากสมการ (3.11)

$$\begin{aligned}\Delta G^\circ &= \sum \Delta G^\circ_F(\text{products}) - \sum \Delta G^\circ_F(\text{reactants}) \\ &= [\Delta G^\circ_F(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})) + 2\Delta G^\circ_F(\text{H}_2(\text{g}))] - [2\Delta G^\circ_F(\text{CH}_4(\text{g})) + \Delta G^\circ_F(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] \\ &= [(-168.49) + (2 \times 0)] - [(2 \times -50.72) + (-228.57)] \\ &= 161.52 \text{ กิโลจูล/โมล}\end{aligned}$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่า  $\Delta G^\circ$  ได้จากสมการ  $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$  โดยจะต้องทราบค่า  $\Delta H^\circ$  ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.16) (ดูตัวอย่างที่ 2.8) ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta H^\circ &= \sum \Delta H^\circ_F(\text{products}) - \sum \Delta H^\circ_F(\text{reactants}) \\ &= [\Delta H^\circ_F(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})) + 2\Delta H^\circ_F(\text{H}_2(\text{g}))] - [2\Delta H^\circ_F(\text{CH}_4(\text{g})) + \Delta H^\circ_F(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))] \\ &= [(-235.31) + (2 \times 0)] - [(2 \times -74.85) + (-241.83)] \\ &= 156.22 \text{ กิโลจูล/โมล}\end{aligned}$$

ณ สภาวะมาตรฐาน  $T = 25^{\circ}\text{C} = 273+25 = 298 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \Delta G^{\circ} &= \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \\ &= (156.22 \text{ กิโลจูล/โมล}) - (298 \text{ เคลวิน})(-0.017282 \text{ กิโลจูล/โมล}\cdot\text{เคลวิน}) \\ &= 161.37 \text{ กิโลจูล/โมล} \end{aligned}$$

ค่า  $\Delta G^{\circ}$  ที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน (ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีใดก็ได้ในการคำนวณ ขึ้นอยู่กับความสะดวกและข้อมูลที่มีอยู่) เนื่องจาก  $\Delta G^{\circ} > 0$  แสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นไม่ได้ในทิศทางที่กำหนด แต่จะเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงข้าม ณ สภาวะมาตรฐาน

### 3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์กับสมดุลเคมี

ค่า  $\Delta G$  ของปฏิกิริยาในสภาวะแก๊ส ณ สภาวะความดันใด ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น  $aA(g) + bB(g) \rightarrow cC(g)$  โดย a, b, และ c คือ ตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสมการเคมีที่ดุลแล้ว เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln \frac{(P_C)^c}{(P_A)^a (P_B)^b} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $P_A$ ,  $P_B$  และ  $P_C$  คือ ความดันไอย่อยของแก๊ส A, B และ C (ในระบบปิด) ณ สมดุล ตามลำดับ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิ 298 เคลวิน

ที่สภาวะสมดุล  $\Delta G = 0$  ดังนั้น

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln \frac{(P_C)^c}{(P_A)^a (P_B)^b} = -RT \ln K_p \quad (3.13)$$

เมื่อ  $K_p = \frac{(P_C)^c}{(P_A)^a (P_B)^b}$  และเรียก  $K_p$  ว่าค่าคงที่สมดุล (ที่เขียนในรูปของความดัน) ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อ 3.4 และเมื่อหน่วยของ  $\Delta G^\circ$  เป็นจูล (J) จะต้องใช้ค่า  $R = 8.314$  จูล/โมล·เคลวิน ( $J/mol \cdot K$ ) ในกรณีที่ใช้ความเข้มข้น หน่วย โมล/ลิตร (C) แทนความดันไอย่อยของแก๊สอุดมคติ จะใช้ค่า  $R = 0.08205$  ลิตร·บรรยากาศ/โมล·เคลวิน ( $L \cdot atm/mol \cdot K$ ) ตามสมการกฎของแก๊สอุดมคติ ดังนี้

จาก 
$$P = \frac{nRT}{V} = CRT$$

ดังนั้น 
$$K_p = \frac{(P_C)^c}{(P_A)^a (P_B)^b} = \frac{[C]^c}{[A]^a [B]^b} (RT)^{c-a-b} = K_c (RT)^{\Delta n}$$

หรือ 
$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $K_c = \frac{[C]^c}{[A]^a [B]^b}$  และเรียก  $K_c$  ว่าค่าคงที่สมดุล (ที่เขียนในรูปของความเข้มข้น)

[A], [B], และ [C] คือ ความเข้มข้นของแก๊ส A, B และ C (ในระบบปิด) ณ สมดุล ตามลำดับ

$\Delta n$  คือ จำนวนโมลของสารผลิตภัณฑ์ - จำนวนโมลของสารตั้งต้น

**ตัวอย่างที่ 3.2** จงหาค่า  $K_p$  และ  $K_c$  จากปฏิกิริยา  $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$  ที่ 298 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ

วิธีทำ หาค่า  $\Delta G^\circ$  จากสมการ (3.11) ดังนี้ 
$$\Delta G^\circ = 2\Delta G^\circ_f(NO_2(g)) - \Delta G^\circ_f(N_2O_4(g))$$

$$= (2 \times 51.31) - (97.89)$$

$$= 4.73 \text{ กิโลจูล/โมล}$$

ดังนั้น  $\Delta G^\circ = 4730 \text{ J}$  ต่อ 1 โมล  $N_2O_4(g)$  ที่เข้าทำปฏิกิริยา

จากสมการ (3.13) จะได้  $\ln K_p = \frac{-4730}{8.314 \times 298}$

$$K_p = 0.15$$

จากสมการ (3.14) เมื่อ  $\Delta n = 2-1 = 1$  จะได้

$$K_c = \frac{K_p}{RT} = \frac{0.15}{(0.08205 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}) \times (298 \text{ K})} = 6.13 \times 10^{-3}$$

สำหรับปฏิกิริยาในสารละลาย ยังสามารถใช้สมการ (3.12) โดยเขียนในภาพที่คล้าย ๆ กันได้ดังนี้ (Walas, 1985, P.466)

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{(a_C)^c}{(a_A)^a (a_B)^b} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $a_A$ ,  $a_B$  และ  $a_C$  คือ ค่าแอกติวิตี (activity) ของสาร A, B และ C ซึ่งแปรผันโดยตรงกับ [A], [B] และ [C] ตามลำดับ

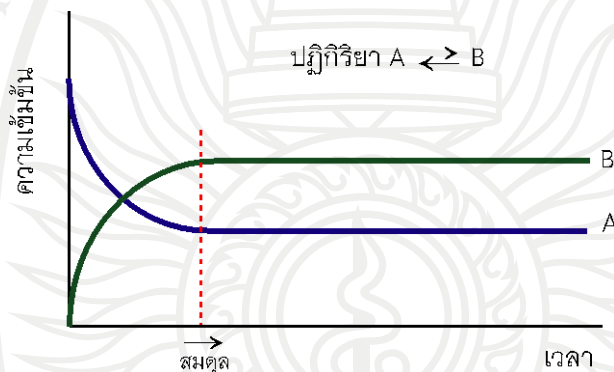
ในกรณีสารละลายเจือจาง ที่สภาวะสมดุล  $\Delta G = 0$  (Socrates, 1971, P. 299) ดังนั้นจะได้

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \frac{(a_C)^c}{(a_A)^a (a_B)^b} \approx -RT \ln \frac{[C]^c}{[A]^a [B]^b} = -RT \ln K_c \quad (3.16)$$



### 3.4 สมดุลเคมี

เมื่อปฏิกิริยาเคมีดำเนินไป จากสารตั้งต้นที่มีอยู่ในปริมาณมาก เริ่มทำปฏิกิริยากัน ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง และความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ปริมาณสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลงอีก (ดังแสดงในภาพที่ 3.3) เรียกว่า ระบบ (ปฏิกิริยา) อยู่ในสภาวะสมดุลเคมี ณ สภาวะนี้จะพบว่า สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ที่แต่ละสารยกกำลังด้วย ตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเสมอ และเรียกค่าคงที่นั้นว่า ค่าคงที่สมดุล ( $K$ ; equilibrium constant) ซึ่งเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย



ภาพที่ 3.3 สภาวะสมดุลเคมี

การระบุความเข้มข้นของสารสามารถเขียนได้หลายลักษณะ เช่น เมื่อสารผสมอยู่ในสภาวะแก๊ส สามารถระบุความเข้มข้นได้ทั้งในรูปของความดันย่อย และในหน่วยโมลต่อปริมาตร ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่า  $K$  ได้ทั้งในรูปของค่า  $K_p$  และ  $K_c$  (ดูหัวข้อ 3.3) แต่สำหรับสารละลายของเหลวและของแข็ง การคำนวณหาค่า  $K$  จะคำนวณในรูปของค่า  $K_c$  (หรือเขียนสั้น ๆ ว่าค่า  $K$ )

โดยสรุป สมการรูปทั่วไปสำหรับการคำนวณหาค่า  $K$  ของปฏิกิริยาใด ๆ ต่อไปนี้



มีค่าเท่ากับ

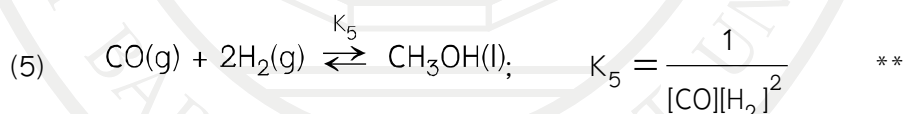
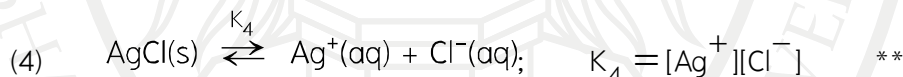
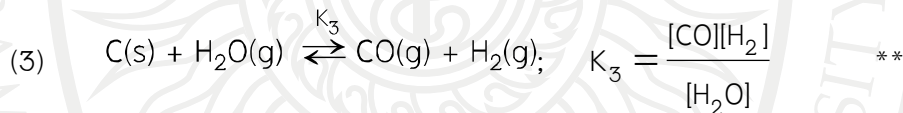
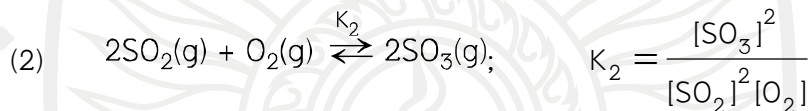
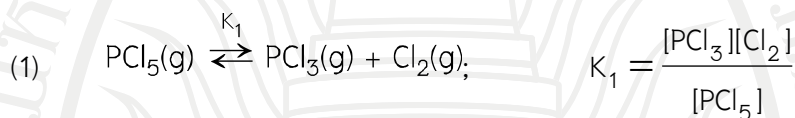
$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่สมดุล

[A], [B], และ [C] คือ ความเข้มข้นของสาร A, B และ C (ในระบบปิด) ณ สมดุล ตามลำดับ

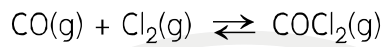
ค่า K จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเท่านั้น โดยถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่า K จะลดลง แต่ถ้าลดอุณหภูมิ ค่า K จะเพิ่มขึ้น สำหรับปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่า K จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าลดอุณหภูมิ ค่า K จะลดลง (Socrates, 1971, P. 302)

**ตัวอย่างที่ 3.3** จงเขียนสมการแสดงค่าคงที่สมดุล ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



\*\*หมายเหตุ เนื่องจากสารบริสุทธิ์ในสถานะของแข็ง (s) และของเหลว (l) มีความหนาแน่นคงที่ ส่งผลให้สารเหล่านี้มีความเข้มข้นคงที่ ดังนั้นจึงสามารถรวมความเข้มข้นคงที่นี้ไว้กับค่า K ทำให้สารบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็งและของเหลวไม่ปรากฏในสมการค่าคงที่สมดุล (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2531, หน้า 115)

**ตัวอย่างที่ 3.4** แก๊ส CO ทำปฏิกิริยากับแก๊ส Cl<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิหนึ่ง ดังสมการต่อไปนี้



ณ สภาวะสมดุลพบความเข้มข้นของ CO = 1.5 โมล, Cl<sub>2</sub> = 1.0 โมล และ COCl<sub>2</sub> = 4.0 โมล ถ้าภาชนะมีความจุ 5 ลิตร จงคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้

วิธีทำ

$$[\text{CO}] = \frac{1.5}{5} = 0.3 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{Cl}_2] = \frac{1.0}{5} = 0.2 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{COCl}_2] = \frac{4.0}{5} = 0.8 \text{ โมล/ลิตร}$$

ดังนั้น

$$K = \frac{[\text{COCl}_2]}{[\text{CO}][\text{Cl}_2]} = \frac{0.8}{0.3 \times 0.2} = 13.33$$

**ตัวอย่างที่ 3.5** ปฏิกิริยาต่อไปนี้  $\text{PCl}_5\text{(g)} \rightleftharpoons \text{PCl}_3\text{(g)} + \text{Cl}_2\text{(g)}$  ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่สภาวะสมดุล พบความเข้มข้นของ PCl<sub>5</sub> เท่ากับ 0.2 โมล/ลิตร และ PCl<sub>3</sub> เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร จงคำนวณหาจำนวนโมลของ Cl<sub>2</sub> เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นในภาชนะ 2 ลิตร (กำหนดให้  $K = 4.0 \times 10^{-2}$ )

วิธีทำ จาก 
$$K = \frac{[\text{PCl}_3][\text{Cl}_2]}{[\text{PCl}_5]}$$

$$[\text{Cl}_2] = K \times \frac{[\text{PCl}_5]}{[\text{PCl}_3]} = (4 \times 10^{-2}) \times \frac{0.2}{0.01} = 0.8 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{จำนวนโมลของ Cl}_2 = (0.8 \text{ โมล/ลิตร}) \times (2 \text{ ลิตร})$$

$$= 1.6 \text{ โมล}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 3.6** ปฏิกิริยา  $2\text{HI}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g})$  ถ้าในเวลาเริ่มต้นใส่ HI 4 โมล ในภาชนะปิดขนาด 10 ลิตร ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส จงคำนวณหาความเข้มข้นของ HI,  $\text{H}_2$  และ  $\text{I}_2$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมินี้ กำหนด  $K = 0.016$

วิธีทำ

ความเข้มข้นของ HI ตอนเริ่มต้น =  $4/10 = 0.4$  โมล/ลิตร

สมมติให้  $x$  = ความเข้มข้นของ HI ที่เปลี่ยนไปจากตอนเริ่มต้น

ตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์เมื่อ HI หายไป  $x$  จึงเกิด  $\text{H}_2$  และ  $\text{I}_2$  อย่างละ  $\frac{x}{2}$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$2\text{HI}(\text{g})$	$\rightleftharpoons$	$\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g})$	$K = 0.016$
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, (โมล/ลิตร)	0.4		0    0	
ความเข้มข้น ณ สมดุล, (โมล/ลิตร)	$0.4-x$		$\frac{x}{2}$ $\frac{x}{2}$	

จากค่าคงที่สมดุล  $K = \frac{[\text{H}_2][\text{I}_2]}{[\text{HI}]^2}$

$$0.016 = \frac{\left(\frac{x}{2}\right)\left(\frac{x}{2}\right)}{(0.4-x)^2}$$

เมื่อแก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ค่า  $x = 0.089$  โมล/ลิตร

ดังนั้น ณ สมดุล  $[\text{HI}] = 0.4-x = 0.311$  โมล/ลิตร

$$[\text{H}_2] = \frac{x}{2} = 0.0445 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{I}_2] = \frac{x}{2} = 0.0445 \text{ โมล/ลิตร}$$

**ตัวอย่างที่ 3.7** ปฏิกิริยา  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$  ถ้าในเวลาเริ่มต้นนำ  $\text{H}_2$  และ  $\text{CO}_2$  อย่างละ 6 โมล ใส่ในภาชนะปิดขนาด 10 ลิตร ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จงคำนวณหาความเข้มข้นของแต่ละสาร เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมินี้ กำหนด  $K = 0.77$  วิธีทำ

ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2$  และ  $\text{CO}_2$  ตอนเริ่มต้น =  $6/10 = 0.6$  โมล/ลิตร

สมมติให้  $x$  = ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2$  ที่เปลี่ยนไปจากตอนเริ่มต้น

ตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์เมื่อ  $\text{H}_2$  หายไป  $x$  ( $\text{CO}_2$  จึงหายไป  $x$  ด้วย) เกิด  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CO}$  อย่างละ  $x$

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$\text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g}); K = 0.77$			
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, (โมล/ลิตร)	0.6	0.6	0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, (โมล/ลิตร)	$0.6-x$	$0.6-x$	$x$	$x$

จากค่าคงที่สมดุล  $K = \frac{[\text{H}_2\text{O}][\text{CO}]}{[\text{H}_2][\text{CO}_2]}$

$$0.77 = \frac{x^2}{(0.6-x)^2}$$

เมื่อแก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ค่า  $x = 0.28$  โมล/ลิตร

ดังนั้น ณ สมดุล  $[\text{H}_2] = 0.6-x = 0.32$  โมล/ลิตร

$[\text{CO}_2] = 0.6-x = 0.32$  โมล/ลิตร

$[\text{H}_2\text{O}] = x = 0.28$  โมล/ลิตร

$[\text{CO}] = x = 0.28$  โมล/ลิตร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 3.8** ที่อุณหภูมิห้อง  $\text{N}_2\text{O}_4$  สลายตัวเป็น  $\text{NO}_2$  ดังสมการ  $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NO}_2(\text{g})$  มีค่า  $K = 5 \times 10^{-3}$  ถ้าในเวลาเริ่มต้นใส่  $\text{N}_2\text{O}_4$  1 โมล ในภาชนะปิดขนาด 1 ลิตร เมื่อถึงสภาวะสมดุลจะมี  $\text{NO}_2$  อยู่กี่โมล

วิธีทำ

ความเข้มข้นของ  $\text{N}_2\text{O}_4$  ตอนเริ่มต้น =  $1/1 = 1$  โมล/ลิตร

สมมติให้  $x$  = ความเข้มข้นของ  $\text{N}_2\text{O}_4$  ที่เปลี่ยนไปจากตอนเริ่มต้น

ตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์เมื่อ  $\text{N}_2\text{O}_4$  หายไป  $x$  จะเกิด  $\text{NO}_2$  เท่ากับ  $2x$

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$	$\rightleftharpoons$	$2\text{NO}_2(\text{g});$	$K = 5 \times 10^{-3}$
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, (โมล/ลิตร)	1		0	
ความเข้มข้น ณ สมดุล, (โมล/ลิตร)	$1-x$		$2x$	

$$\text{จากค่าคงที่สมดุล } K = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]}$$

$$5 \times 10^{-3} = \frac{(2x)^2}{(1-x)}$$

เมื่อแก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ค่า  $x = 0.0347$  โมล/ลิตร (ค่า  $x$  มี 2 ค่า แต่เลือกค่าบวก)

ดังนั้น ณ สมดุล  $[\text{NO}_2] = 2x = 2 \times 0.0347 = 0.0694$  โมล/ลิตร

ในระบบ ณ สมดุล จึงมี  $\text{NO}_2 = (0.0694 \text{ โมล/ลิตร}) \times (1 \text{ ลิตร})$

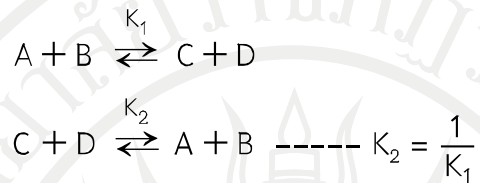
$$= 0.0694 \text{ โมล}$$



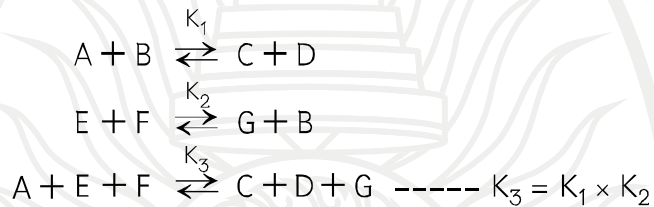
### 3.4.1 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุล

ค่าคงที่สมดุลจากสมการสมดุลเคมีลักษณะต่าง ๆ มีความสัมพันธ์ดังนี้

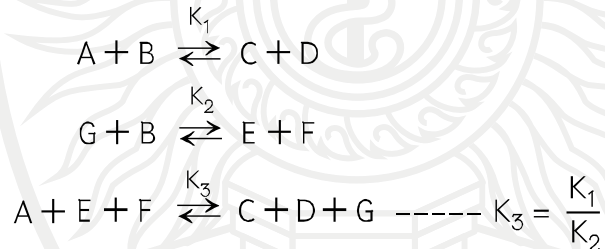
(1) ถ้ากลับข้างสมการ ค่า  $K$  จะกลับเศษเป็นส่วน เช่น



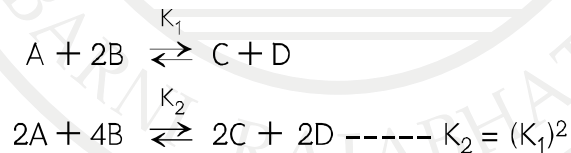
(2) ถ้านำสมการมารวมกัน จะนำค่า  $K$  มาคูณกัน เช่น



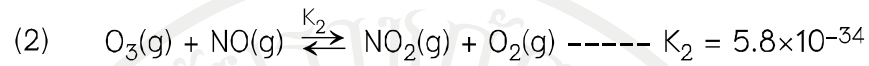
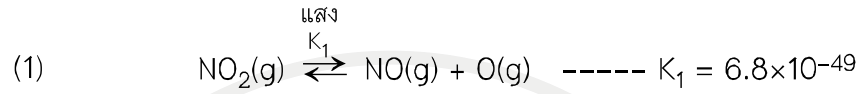
(3) ถ้ากลับข้างสมการ แล้วนำสมการมารวมกัน จะนำค่า  $K$  มาหารกัน เช่น



(4) ถ้านำตัวเลข (จำนวนเต็มบวก) ใด ๆ เข้ามาคูณในสมการ ค่า  $K$  จะต้องยกกำลังด้วยเลขนั้น



ตัวอย่างที่ 3.9 กำหนดให้



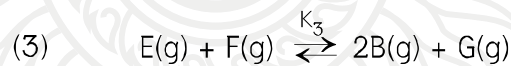
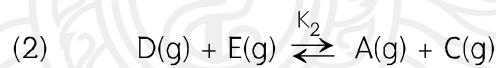
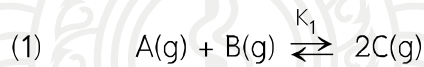
ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา  $\text{O}_3(\text{g}) \rightleftharpoons \text{O}_2(\text{g}) + \text{O}(\text{g})$  มีค่าเท่าใด

วิธีทำ

นำสมการ (1)+(2) จะได้  $\text{O}_2(\text{g}) + \text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{O}_3(\text{g}) \quad \text{-----} \quad K = K_1 \times K_2$

$$\begin{aligned} \text{กลับข้างสมการ จะได้ } \text{O}_3(\text{g}) \rightleftharpoons \text{O}_2(\text{g}) + \text{O}(\text{g}) \quad \text{-----} \quad K &= \frac{1}{K_1 \times K_2} = \frac{1}{(6.8 \times 10^{-49}) \times (5.8 \times 10^{-34})} \\ &= 2.53 \times 10^{81} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 3.10 จากค่า K ของปฏิกิริยาดังนี้

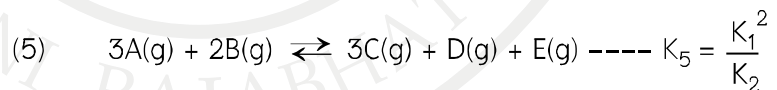


ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาต่อไปนี้เป็น  $3\text{A}(\text{g}) + \text{F}(\text{g}) \rightleftharpoons 3\text{C}(\text{g}) + \text{D}(\text{g}) + \text{G}(\text{g})$  มีค่าเท่าใด

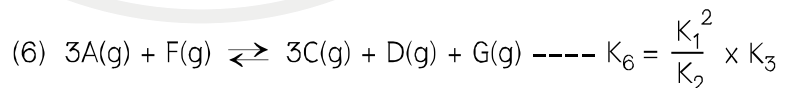
วิธีทำ

นำสมการ (1) $\times$ 2 จะได้ (4)  $2\text{A}(\text{g}) + 2\text{B}(\text{g}) \rightleftharpoons 4\text{C}(\text{g}) \quad \text{-----} \quad K_4 = K_1^2$

กลับข้างสมการ (2) แล้วนำมาบวกกับสมการ (4) จะได้



นำสมการ (5) รวมกับสมการ (3) จะได้



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### 3.4.2 หลักการของเลอชาเตอลิเยร์

หลักการของเลอชาเตอลิเยร์กล่าวว่า “สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่อยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อสมดุลนั้นถูกรบกวน ระบบจะพยายามปรับตัวเพื่อเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้ง ในทิศทางที่ลดอิทธิพลของสิ่งรบกวนนั้น” เช่น ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น สมดุลเดิมจะถูกรบกวนและระบบจะปรับตัวเพื่อลดปริมาณสารตั้งต้นส่วนที่เกินนั้น โดยเคลื่อนไปในทิศทางที่เกิดสารผลิตภัณฑ์มากขึ้นและเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ลดลงหรือถูกดึงออกจากระบบ ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง(หรือถูกดึงออกจากระบบ) หรือความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ระบบจะลดผลกระทบจากการรบกวนนั้น โดยเคลื่อนไปในทิศทางที่เพิ่มสารตั้งต้นหรือลดสารผลิตภัณฑ์ และเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง (พรพรรณ อุตมกาญจนนันท์ และคณะ, 2546, หน้า 81)

การทำนายทิศทางแนวโน้มของสมดุล หลังจากที่มีการรบกวนสมดุลเดิม ด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 3.11** ปฏิกิริยาสลายตัวของ  $\text{PCl}_5(\text{g})$  ที่อุณหภูมิหนึ่งเป็นดังนี้



ถ้าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จงอธิบายแนวโน้มของสมดุล เมื่อรบกวนสมดุลเดิม ดังนี้

- (1) เพิ่มอุณหภูมิ
- (2) เพิ่มความดันจากภายนอก
- (3) เพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{Cl}_2$
- (4) เพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$
- (5) ลดความเข้มข้นของ  $\text{Cl}_2$
- (6) เติมตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีทำ (1) เนื่องจากความร้อนเสมือนเป็นสารตั้งต้นตัวหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์แล้ว ระบบจะพยายามปรับตัว โดยเลื่อนสมดุลไปทางขวา (เกิดสารผลิตภัณฑ์มากขึ้น) และความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$  ลดลง

(2) เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์มีจำนวนโมลมากกว่าสารตั้งต้น (แก๊ส 2 โมลต่อแก๊ส 1 โมล) การเพิ่มความดันจึงมีผลต่อข้างที่มีจำนวนโมลมากกว่า ทำให้สารผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นสมดุลจะเลื่อนไปทางซ้าย (ความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_3$  และ  $\text{Cl}_2$  จะลดลง และความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$  จะเพิ่มขึ้น)

(3) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{Cl}_2$  ระบบจะปรับลดความเข้มข้นของ  $\text{Cl}_2$  ที่เพิ่มเข้าไป โดยสมดุลจะเลื่อนไปทางซ้าย ทำให้ความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_3$  ลดลง และความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$  เพิ่มขึ้น

(4) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$  ระบบจะปรับลดความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_5$  ที่เพิ่มเข้าไป โดยสมดุลจะเลื่อนไปทางขวา ทำให้ ความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_3$  และ  $\text{Cl}_2$  เพิ่มขึ้น

(5) เมื่อลดความเข้มข้นของ  $\text{Cl}_2$  ระบบจะเพิ่ม  $\text{Cl}_2$  เพื่อชดเชย  $\text{Cl}_2$  ที่หายไป โดยสมดุลจะเลื่อนไปทางขวา ทำให้ ความเข้มข้นของ  $\text{PCl}_3$  และ  $\text{Cl}_2$  เพิ่มขึ้น

(6) การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อสมดุล เพราะไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสาร แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ระบบถึงสภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น

จากหลักการของเลอชาเตอลิเยร์สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณสาร เมื่อมีการรบกวนสมดุลเดิม แล้วระบบปรับสู่สมดุลใหม่ โดยการระบุทิศทางการเลื่อนของสมดุลให้ถูกต้องแล้วคำนวณโดยอาศัยค่าคงที่สมดุล ดังตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 3.12** ปฏิกิริยา  $C(s) + CO_2(g) \rightleftharpoons 2CO(g)$  อยู่ในสภาวะสมดุล พบว่าที่สภาวะดังกล่าวมี  $CO_2$  และ  $CO$  อย่างละ 0.4 โมล/ลิตร ถ้ารบกวนสมดุลโดยเติม  $CO_2$  0.6 โมล/ลิตร ลงไปในระบบ (ณ อุณหภูมิคงที่) จงหาความเข้มข้นของ  $CO_2$  และ  $CO$  ที่สภาวะสมดุลใหม่  
วิธีทำ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$C(s) + CO_2(g) \rightleftharpoons 2CO(g)$		
ที่สมดุล 1, (โมล/ลิตร)	-	0.4	0.4
รบกวนสมดุล, (โมล/ลิตร)	-	+0.6	
สมมติให้ $x$ = ความเข้มข้นของ $CO_2$ ที่เปลี่ยนไปจากสมดุล 1 เมื่อมีการรบกวนสมดุลตามหลักการของเลอชาเตอริเยร์แล้วสมดุลจะเลื่อนไปทางขวา จึงได้			
ที่สมดุล 2, (โมล/ลิตร)	-	$1-x$	$0.4+2x$

ที่สมดุล 1; 
$$K = \frac{[CO]^2}{[CO_2]} = \frac{0.4^2}{0.4} = 0.4$$

ที่สมดุล 2;  $K$  เท่าเดิม (เพราะอุณหภูมิคงที่) ดังนั้นจึงได้

$$0.4 = \frac{(0.4+2x)^2}{(1-x)}$$

เมื่อแก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ค่า  $x = 0.1$  โมล/ลิตร (ค่า  $x$  มี 2 ค่า แต่เลือกค่าบวก)

ดังนั้น ณ สมดุล  $[CO] = 0.4+2x = 0.4+(2 \times 0.1) = 0.6$  โมล/ลิตร

$$[CO_2] = 1-x = 1-0.1 = 0.9 \text{ โมล/ลิตร}$$

**ตัวอย่างที่ 3.13** ปฏิกิริยา  $\text{CO(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} \rightleftharpoons \text{CO}_2\text{(g)} + \text{H}_2\text{(g)}$  พบว่าเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ความเข้มข้นของสารภายในระบบเป็นดังนี้  $[\text{CO}_2] = 0.9$  โมล/ลิตร  $[\text{H}_2] = 0.9$  โมล/ลิตร และ  $[\text{CO}] = [\text{H}_2\text{O}] = 4.0$  โมล/ลิตร ต่อจากนั้นมีการเติม CO และ  $\text{H}_2\text{O}$  อย่างละ 1 โมล/ลิตร เข้าไปในภาชนะ จะพบความเข้มข้นของสารทุกชนิดเป็นเท่าใด เมื่อระบบปรับเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้ง

วิธีทำ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	CO(g)	H <sub>2</sub> O(g)	CO <sub>2</sub> (g)	H <sub>2</sub> (g)
ที่สมดุล 1, (โมล/ลิตร)	4	4	0.9	0.9
รบกวนสมดุล, (โมล/ลิตร)	+1	+1		
สมมติให้ x = ความเข้มข้นของ CO ที่เปลี่ยนไปจากสมดุล 1 เมื่อมีการรบกวนสมดุลตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์แล้วสมดุลจะเลื่อนไปทางขวา จึงได้				
ที่สมดุล 2, (โมล/ลิตร)	5-x	5-x	0.9+x	0.9+x

$$\text{ที่สมดุล 1; } K = \frac{[\text{CO}_2][\text{H}_2]}{[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]} = \frac{0.9^2}{4^2} = 0.050625$$

ที่สมดุล 2; K เท่าเดิม (เพราะอุณหภูมิคงที่) ดังนั้นจึงได้

$$0.050625 = \frac{(0.9+x)^2}{(5-x)^2}$$

เมื่อแก้สมการหาค่า x จะได้ค่า  $x = 0.2$  โมล/ลิตร

ดังนั้น ณ สมดุล  $[\text{CO}] = [\text{H}_2\text{O}] = 5-x = 5-0.2 = 4.8$  โมล/ลิตร

$[\text{CO}_2] = [\text{H}_2] = 0.9+x = 0.9+0.2 = 1.1$  โมล/ลิตร



**ตัวอย่างที่ 3.14** เมื่อปฏิกิริยา  $\text{CO(g)} + \text{Cl}_2\text{(g)} \rightleftharpoons \text{COCl}_2\text{(g)}$  พบ  $[\text{CO}] = 0.3$  โมล/ลิตร  $[\text{Cl}_2] = 0.2$  โมล/ลิตร และ  $[\text{COCl}_2] = 0.8$  โมล/ลิตร ถ้าต้องการให้  $\text{Cl}_2$  ที่สภาวะสมดุลใหม่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร จะต้องเติม  $\text{COCl}_2$  เข้าไปในระบบเท่าใด (อุณหภูมิคงที่)  
วิธีทำ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$\text{CO(g)}$	$+$	$\text{Cl}_2\text{(g)}$	$\rightleftharpoons$	$\text{COCl}_2\text{(g)}$
ที่สมดุล 1, (โมล/ลิตร)	0.3		0.2		0.8
รบกวนสมดุล, (โมล/ลิตร)					+x
สมมติให้ $x = [\text{COCl}_2]$ ที่เติมลงไป					
สมมติให้ $y = [\text{COCl}_2]$ ที่ลดลงจากการเลื่อนไปสู่สมดุลใหม่					
ตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์แล้วสมดุลจะเลื่อนไปทางซ้าย จึงได้					
ที่สมดุล 2, (โมล/ลิตร)	$0.3+y$		$0.2+y$		$(0.8+x)-y$

จากข้อมูลโจทย์ ที่สมดุล 2;  $[\text{Cl}_2] = 0.2+y = 0.3$

ดังนั้น  $y = 0.1$  โมล/ลิตร

ที่สมดุล 1;  $K = \frac{[\text{COCl}_2]}{[\text{CO}][\text{Cl}_2]} = \frac{0.8}{0.3 \times 0.2} = 13.33$

ที่สมดุล 2;  $K$  เท่าเดิม (เพราะอุณหภูมิคงที่) ดังนั้นจึงได้

$$13.33 = \frac{(0.8+x)-y}{(0.3+y)(0.2+y)}$$

แทนค่า  $y = 0.1$  โมล/ลิตร

เมื่อแก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ค่า  $x = 0.8996$  โมล/ลิตร

ดังนั้นจะต้องเติม  $\text{COCl}_2$  เข้าไป 0.8996 โมล/ลิตร

**ตัวอย่างที่ 3.15** ณ อุณหภูมิหนึ่ง สมดุลของปฏิกิริยาต่อไปนี้  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$  ในภาชนะปิดขนาด 1 ลิตร พบว่ามีปริมาณ  $\text{H}_2 = \text{I}_2 = 0.5$  โมล และ  $\text{HI} = 1.23$  โมล ถ้าตั้ง  $\text{HI}$  ออกไป 0.6 โมล ที่อุณหภูมิเดิม จงหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่สมดุลใหม่  
วิธีทำ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$		
ที่สมดุล 1, (โมล/ลิตร)	0.5	0.5	1.23
รบกวนสมดุล, (โมล/ลิตร)			-0.6
สมมติให้ $2x = [\text{HI}]$ ที่เพิ่มขึ้นมาจากการเลื่อนสมดุลไปทางซ้าย ตามหลักการของเลอชาเตอริเยร์ จึงได้			
ที่สมดุล 2, (โมล/ลิตร)	$0.5-x$	$0.5-x$	$(1.23-0.6)+2x$

ที่สมดุล 1; 
$$K = \frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2][\text{I}_2]} = \frac{1.23^2}{0.5 \times 0.5} = 6.0516$$

ที่สมดุล 2;  $K$  เท่าเดิม (เพราะอุณหภูมิคงที่) ดังนั้นจึงได้

$$6.0516 = \frac{[(1.23-0.6)+2x]^2}{(0.5-x)(0.5-x)}$$

เมื่อแก้สมการจะได้ค่า  $x = 0.1345$  โมล/ลิตร

ดังนั้น ณ สมดุล 2  $[\text{H}_2] = [\text{I}_2] = 0.5-x = 0.5-0.1345 = 0.3655$  โมล/ลิตร

$[\text{HI}] = (1.23-0.6)+2x = (1.23-0.6)+(2 \times 0.1345) = 0.899$  โมล/ลิตร

**ตัวอย่างที่ 3.16** ณ อุณหภูมิหนึ่ง สมดุลของปฏิกิริยาต่อไปนี้  $S_2Cl_4(g) \rightleftharpoons 2SCl_2(g)$  พบว่าที่สภาวะสมดุลมี  $[SCl_2] = 5$  โมล/ลิตร และ  $[S_2Cl_4] = 1$  โมล/ลิตร ในภาชนะปิด 1 ลิตร ถ้าวัดความจุของภาชนะให้เหลือเพียง 0.5 ลิตร ที่อุณหภูมิเดิม จงหาความเข้มข้นของ  $SCl_2$  และ  $S_2Cl_4$  ณ สมดุลใหม่

วิธีทำ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารทุกชนิดในระบบ จึงได้ดังนี้

	$S_2Cl_4(g)$	$\rightleftharpoons$	$2SCl_2(g)$
ที่สมดุล 1, (โมล/ลิตร)	1		5
รบกวนสมดุลโดยลดปริมาตรครึ่งหนึ่ง ความเข้มข้นจึงเพิ่มขึ้น 2 เท่า สมมติให้ $x = [SCl_2]$ ที่ลดลงจากการเลื่อนสมดุลไปทางซ้าย ตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์ จึงได้			
ที่สมดุล 2, (โมล/ลิตร)	$2 + \frac{x}{2}$		$10 - x$

ที่สมดุล 1; 
$$K = \frac{[SCl_2]^2}{[S_2Cl_4]} = \frac{5^2}{1} = 25$$

ที่สมดุล 2; K เท่าเดิม (เพราะอุณหภูมิคงที่) ดังนั้นจึงได้

$$25 = \frac{(10-x)^2}{\left(2 + \frac{x}{2}\right)}$$

เมื่อแก้สมการจะได้ค่า  $x = 30.88$  และ  $1.619$  โมล/ลิตร

เลือกค่า  $x = 1.619$  โมล/ลิตร (เพราะให้ค่าความเข้มข้นของสารเป็นค่าบวก)

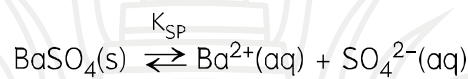
ดังนั้น ณ สมดุล 2  $[S_2Cl_4] = 2 + \frac{x}{2} = 2 + \frac{1.619}{2} = 2.8095$  โมล/ลิตร

$$[SCl_2] = 10 - x = 10 - 1.619 = 8.381 \text{ โมล/ลิตร}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### 3.4.3 สมดุลเคมีของปฏิกิริยาการละลายน้ำ

การละลายน้ำของเกลือไอออนิกทุกชนิด มีขีดจำกัดในการละลาย และการละลายของเกลือแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน เกลือบางชนิดละลายน้ำได้ในปริมาณมาก เช่น NaCl, CH<sub>3</sub>COONa, NaNO<sub>3</sub> และ KCl เป็นต้น (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2531, หน้า 184) และเกลือบางชนิดละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น BaSO<sub>4</sub>(s) จะละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย เกิดเป็นไอออน Ba<sup>2+</sup> กับ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ซึ่งเมื่อทิ้งเวลาไว้นานพอ จะเกิดสภาวะสมดุลระหว่างไอออนส่วนที่ละลายได้ในสารละลาย (ซึ่งจะมีความเข้มข้นสูงสุดเท่าที่จะมีได้ในสารละลาย) กับเกลือส่วนที่ไม่ละลายของ BaSO<sub>4</sub>(s) ดังนี้



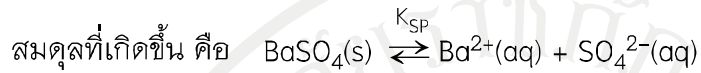
ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาลักษณะนี้ เรียกว่า ค่าคงที่ผลคูณความสามารถในการละลาย (solubility product constant) ใช้สัญลักษณ์ K<sub>SP</sub> ดังนั้นสำหรับ BaSO<sub>4</sub> จึงได้

$$K_{\text{SP}} = [\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$$

ค่า K<sub>SP</sub> จะมีลักษณะเหมือนกับค่าคงที่สมดุลโดยทั่วไปที่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การคำนวณหาค่า K<sub>SP</sub> จากข้อมูลการทดลองและการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับค่า K<sub>SP</sub> สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

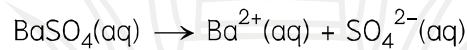
ตัวอย่างที่ 3.17 ณ อุณหภูมิหนึ่ง เมื่อละลาย  $\text{BaSO}_4(\text{s})$  ในน้ำ พบว่า  $\text{BaSO}_4(\text{s})$  สามารถละลายได้เพียง 0.0017 กรัม ในน้ำ 187 ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่านั้น จงหา  $K_{\text{SP}}$  ของ  $\text{BaSO}_4$

วิธีทำ



$$K_{\text{SP}} = [\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$$

พิจารณา  $\text{BaSO}_4$  ส่วนที่ละลาย ดังนี้



เทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ จะได้

$$\frac{\text{โมล Ba}^{2+}}{1} = \frac{\text{โมล SO}_4^{2-}}{1} = \frac{\text{โมล BaSO}_4}{1} = \frac{0.0017 \text{ กรัม}}{233.383 \text{ กรัม/โมล}} = 7.3 \times 10^{-6} \text{ โมล}$$

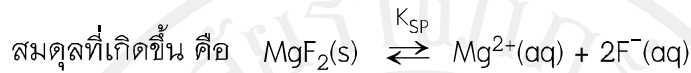
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } [\text{Ba}^{2+}] &= \frac{\text{โมล Ba}^{2+}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{7.3 \times 10^{-6} \text{ โมล}}{187 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}} \\ &= 3.9 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{SO}_4^{2-}] &= \frac{\text{โมล SO}_4^{2-}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{7.3 \times 10^{-6} \text{ โมล}}{187 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}} \\ &= 3.9 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

$$K_{\text{SP}} = [\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] = (3.9 \times 10^{-5})^2 = 1.5 \times 10^{-9}$$

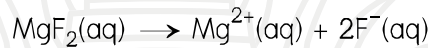
**ตัวอย่างที่ 3.18** กำหนด  $K_{SP}$  ของ  $MgF_2 = 8 \times 10^{-8}$  ถ้าจะหาว่าจะสามารถละลาย  $MgF_2$  อย่างมาก  
ที่สุดกี่กรัมในน้ำ 250 มิลลิลิตร

วิธีทำ



$$K_{SP} = [Mg^{2+}][F^{-}]^2$$

พิจารณา  $MgF_2$  ส่วนที่ละลาย ดังนี้



ดังนั้นหากในสารละลายมี  $[Mg^{2+}]$  จำนวน  $X$  จะมี  $[F^{-}]$  จำนวน  $2X$

จากค่า  $K_{SP}$  จึงได้

$$8 \times 10^{-8} = X(2X)^2 = 4X^3$$

เมื่อแก้สมการหาค่า  $X$  จะได้

$$X = 2.714 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

จากอัตราส่วนมวลสารสัมพันธ์

$$\begin{aligned} &= (2.714 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}) \times (250 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) \\ &= 0.6785 \times 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{โมล } MgF_2}{1} = \frac{\text{โมล } Mg^{2+}}{1}$$

ดังนั้น โมล  $MgF_2 = 0.6785 \times 10^{-3}$  โมล คิดเป็นน้ำหนัก

$$= (0.6785 \times 10^{-3} \text{ โมล}) \times (62.301 \text{ กรัม/โมล})$$

$$= 0.0423 \text{ กรัม}$$

ค่า  $K_{SP}$  ของเกลือไอออนิกที่ละลายน้ำได้น้อยบางชนิด ที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงใน  
ตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่ามักจะมีค่าน้อย ๆ เพราะเกิดจากผลคูณของความเข้มข้นของไอออนที่  
ละลายน้ำได้น้อย



ตารางที่ 3.1 ค่า  $K_{SP}$  ของเกลือไอออนิกบางชนิดที่ 25 องศาเซลเซียส

สารประกอบ	สูตร	$K_{SP}$
Aluminium hydroxide	$Al(OH)_3$	$3 \times 10^{-34}$
Barium carbonate	$BaCO_3$	$2.58 \times 10^{-9}$
Barium fluoride	$BaF_2$	$1.84 \times 10^{-7}$
Barium sulfate	$BaSO_4$	$1.08 \times 10^{-10}$
Calcium sulfate	$CaSO_4$	$4.93 \times 10^{-5}$
Calcium carbonate	$CaCO_3$	$3.36 \times 10^{-9}$
Calcium phosphate	$Ca_3(PO_4)_2$	$2.07 \times 10^{-33}$
Iron(II) carbonate	$FeCO_3$	$3.13 \times 10^{-11}$
Iron(II) hydroxide	$Fe(OH)_2$	$4.87 \times 10^{-17}$
Lead(II) chloride	$PbCl_2$	$1.7 \times 10^{-5}$
Lead(II) iodide	$PbI_2$	$9.8 \times 10^{-9}$
Silver chloride	$AgCl$	$1.77 \times 10^{-10}$
Silver sulfide	$Ag_2S$	$8 \times 10^{-51}$
Zinc hydroxide	$Zn(OH)_2$	$3 \times 10^{-17}$

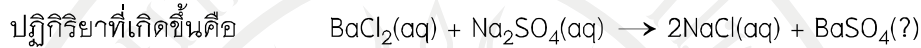
(ที่มา: Faculty of Chemical Technology, SVEUCILISTE U SPLITU, Croatia, 2013)

นอกจากนี้ประโยชน์จากค่า  $K_{SP}$  ยังสามารถใช้ในการทำนายการตกตะกอนของปฏิกิริยาระหว่างไอออนได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 3.19** ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ้าผสมสารละลาย  $\text{BaCl}_2$  เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เข้มข้น 0.005 โมล/ลิตร จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร เข้ากันจะเกิดตะกอนของ  $\text{BaSO}_4$  หรือไม่ (กำหนดค่า  $K_{\text{SP}}$  ของ  $\text{BaSO}_4$  เท่ากับ  $1.08 \times 10^{-10}$ )

วิธีทำ



เนื่องจาก  $\text{NaCl}$  เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ดีจึงไม่เกิดตะกอนอย่างแน่นอน

แต่  $\text{BaSO}_4$  เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยจึงต้องตรวจสอบว่าจะเกิดตะกอนหรือไม่ด้วย

วิธีการต่อไปนี้

(1) หา  $[\text{Ba}^{2+}]$  และ  $[\text{SO}_4^{2-}]$  หลังผสม

$$\text{ปริมาตรหลังผสม} = (10 \times 10^{-3}) + (30 \times 10^{-3}) = 40 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}$$

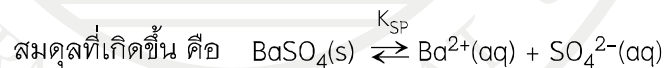
$$[\text{Ba}^{2+}] = \frac{\text{โมล } \text{Ba}^{2+}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{(0.01 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{40 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$$

$$= 2.5 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{\text{โมล } \text{SO}_4^{2-}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{(0.005 \text{ โมล/ลิตร}) \times (30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{40 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$$

$$= 3.75 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

(2) ตรวจสอบกับค่า  $K_{\text{SP}}$



$$[\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] = (2.5 \times 10^{-3})(3.75 \times 10^{-3}) > K_{\text{SP}}$$

$$9.375 \times 10^{-6}$$

$$(2.5 \times 10^{-3})(3.75 \times 10^{-3}) > K_{\text{SP}}$$

$$9.375 \times 10^{-6} > 1.08 \times 10^{-10}$$

ดังนั้นผลคูณของไอออนมีค่ามากกว่า  $K_{\text{SP}}$  จึงสรุปว่าจะเกิดตะกอน  $\text{BaSO}_4(\text{s})$

**ตัวอย่างที่ 3.20** สาร  $\text{BaF}_2(\text{s})$  จะตกตะกอนหรือไม่ ถ้าผสม  $\text{BaCl}_2$  เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จำนวน 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เข้ากับสารละลาย  $\text{NaF}$  เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กำหนด ค่า  $K_{\text{SP}}$  ของ  $\text{BaF}_2$  เท่ากับ  $1.84 \times 10^{-7}$ )

วิธีทำ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ  $\text{BaCl}_2(\text{aq}) + 2\text{NaF}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{NaCl}(\text{aq}) + \text{BaF}_2(?)$

เนื่องจาก  $\text{NaCl}$  เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ดีจึงไม่เกิดตะกอนอย่างแน่นอน

ตรวจสอบว่าจะเกิดตะกอน  $\text{BaF}_2$  หรือไม่

(1) หา  $[\text{Ba}^{2+}]$  และ  $[\text{F}^-]$  หลังผสม

$$\text{ปริมาตรหลังผสม} = (20 \times 10^{-3}) + (30 \times 10^{-3}) = 50 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}$$

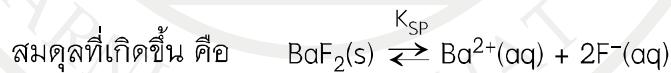
$$[\text{Ba}^{2+}] = \frac{\text{โมล } \text{Ba}^{2+}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{(0.01 \text{ โมล/ลิตร}) \times (20 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{50 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$$

$$= 4 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{F}^-] = \frac{\text{โมล } \text{F}^-}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} = \frac{(0.01 \text{ โมล/ลิตร}) \times (30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{50 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$$

$$= 6 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

(2) ตรวจสอบกับค่า  $K_{\text{SP}}$



$$[\text{Ba}^{2+}][\text{F}^{-}]^2 < K_{\text{SP}}$$

$$(4 \times 10^{-3}) \times (6 \times 10^{-3})^2 < K_{\text{SP}}$$

$$1.44 \times 10^{-7} < 1.84 \times 10^{-7}$$

ดังนั้นผลคูณของไอออนมีค่าน้อยกว่า  $K_{\text{SP}}$  จึงสรุปว่าไม่เกิดตะกอนของ  $\text{BaF}_2(\text{s})$

### 3.5 สรุป

อุณหพลศาสตร์กล่าวถึงสภาวะสมดุลเคมีไว้ว่าเป็นสภาวะที่ระบบมี  $\Delta S_{\text{total}} = 0$  หรือสภาวะที่มี  $\Delta G = 0$  ซึ่ง ณ สภาวะสมดุลเคมี (สภาวะที่ภายในระบบมีความเข้มข้นของสารทุกชนิดคงที่) จะพบว่าค่า  $\Delta G^\circ$  มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ที่แต่ละสารยกกำลังด้วยตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ของสารนั้น (เรียกว่าค่าคงที่สมดุล;  $K$ ) ตามสมการ  $\Delta G^\circ = -RT \ln K$  นอกจากนี้เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล แล้วมีการรบกวนสมดุลเดิม อาจจะทำด้วยวิธีการเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของสารในระบบ เช่น เติมสารเข้าไปในระบบ ดึงสารออกจากระบบ เพิ่มหรือลดความดัน เป็นต้น สิ่งที่เกิดขึ้นตามมาคือระบบจะพยายามปรับตัวเพื่อลดผลของการรบกวนนั้นตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์ แล้วเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยค่าคงที่สมดุลยังคงเท่าเดิม ค่าคงที่สมดุลจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเท่านั้น เกลือไอออนิกที่ละลายน้ำได้น้อยจะเกิดสมดุลเคมีของปฏิกิริยาการละลายน้ำ โดยค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาลักษณะนี้คิดจากผลคูณของความเข้มข้นของไอออนที่ละลายน้ำ ( $K_{\text{sp}}$ ) ซึ่งหากในระบบมีผลคูณความเข้มข้นของไอออนมากกว่า  $K_{\text{sp}}$  จะเกิดการตกตะกอน แต่หากในระบบมีผลคูณความเข้มข้นของไอออนน้อยกว่า  $K_{\text{sp}}$  จะไม่เกิดการตกตะกอน

### แบบฝึกหัดบทที่ 3

- กำหนดปฏิกิริยาต่อไปนี้  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$  ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิหนึ่ง พบความเข้มข้นของแต่ละสารดังนี้  
 $[\text{HI}] = 1.5 \times 10^{-2}$  โมล/ลิตร,  $[\text{H}_2] = 4.6 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร,  $[\text{I}_2] = 1.0 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร  
จงคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้
- กำหนดปฏิกิริยา  $2\text{HCl}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$  เกิดขึ้นในภาชนะ 2 ลิตร โดยเริ่มต้นจาก HCl 2.86 โมล และ  $\text{H}_2$  1 โมล เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว พบว่ามี HCl เหลือ 1.3 โมล ถ้ามหาที่ สภาวะสมดุลจะมี  $\text{H}_2$  และ  $\text{Cl}_2$  เข้มข้นเท่าใด
- กำหนดปฏิกิริยา  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{S}(\text{s}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}(\text{g})$  มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ  $5 \times 10^{-2}$  ร้อยละการแตกตัวของ  $\text{H}_2\text{S}$  มีค่าเท่าใด (ร้อยละการแตกตัวของ  $\text{H}_2\text{S}$  หมายถึง ถ้ามี  $\text{H}_2\text{S}$  อยู่ 100 โมล/ลิตร จะแตกตัวให้  $\text{H}_2$  เท่าใด)
- เผา  $\text{CaCO}_3$  ที่ 273 เคลวิน ในภาชนะปิดขนาด 20 ลิตร ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา  $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$  ที่ 273 เคลวิน มีค่าเท่ากับ 0.05 ที่สภาวะนี้จะเกิดแก๊ส  $\text{CO}_2$  เข้มข้นเท่าใด
- ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยา  $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$  มีค่า 2.0 ที่ 300 องศาเซลเซียส ถ้าใส่  $\text{NH}_3$  จำนวนหนึ่งในภาชนะ 1 ลิตร ที่ 300 องศาเซลเซียส นี้ หากที่สภาวะ สมดุลพบ  $\text{N}_2$  2 โมล แล้วปริมาณ  $\text{NH}_3$  ที่ใส่ ณ เวลาเริ่มต้นคือกี่โมล
- ปฏิกิริยา  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$  ที่สภาวะสมดุลพบว่า  $[\text{H}_2] = [\text{I}_2] = 2.0$  โมล/ลิตร และ  $[\text{HI}] = 4.9$  โมล/ลิตร ถ้าต้องการเพิ่ม  $[\text{I}_2]$  ให้เป็น 2.5 โมล/ลิตร ที่สมดุลใหม่ จะต้องกำจัด  $\text{H}_2$  ออกไปกี่โมล/ลิตร
- ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา  $2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{SO}_3(\text{g})$  ในสภาวะสมดุล พบความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดดังนี้  $[\text{SO}_2] = 3.0$  โมล/ลิตร,  $[\text{SO}_3] = 10.0$  โมล/ลิตร และ  $[\text{O}_2] = 0.02$  โมล/ลิตร ถ้าต้องการให้ได้  $\text{O}_2$  (ที่สมดุลใหม่) เข้มข้น 1.02 โมล/ลิตร จะต้องเติม  $\text{SO}_3$  เข้าไปกี่โมล/ลิตร

8. ปฏิกิริยา  $C_2H_2(g) + H_2(g) \rightleftharpoons C_2H_4(g)$  ที่สมดุลพบความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด ดังนี้  $[C_2H_2] = [H_2] = 1.0$  โมล/ลิตร และ  $[C_2H_4] = 4.0$  โมล/ลิตร ถ้าลดความเข้มข้นของ  $C_2H_4$  ลงทันทีให้เหลือเพียง 2.0 โมล/ลิตร จงหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดเมื่อระบบปรับเข้าสู่สมดุลใหม่
9. ถ้าค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา  $PbSO_4(s) \rightleftharpoons Pb^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq)$  มีค่าเท่ากับ  $1.44 \times 10^{-8}$  ในสารละลายอิ่มตัวของ  $PbSO_4$  100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะมี  $Pb^{2+}$  และ  $SO_4^{2-}$  อย่างละกี่โมล
10. ถ้าเติม  $Na_2C_2O_4$  จำนวน  $2 \times 10^{-5}$  โมล ลงในสารละลาย  $Pb(NO_3)_2$  เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร จะเกิดตะกอนของ  $PbC_2O_4$  หรือไม่ (กำหนด  $K_{sp}$  ของ  $PbC_2O_4 = 2.7 \times 10^{-11}$ )



## เอกสารอ้างอิง

- ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. (2531). **เคมีคำนวณและเทคนิคการทำโจทย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ไอเดียสโตร์.
- ปริญญา อรุณวิสุทธิ. (2553). **เทอร์โมไดนามิกส์เคมีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรพรรณ อุดมกาญจนันท์ และคณะ. (2546). **เปิดโลกเคมี**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาวี. (2546). **เทอร์โมไดนามิกส์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- Faculty of Chemical Technology, SVEUCILISTE U SPLITU, Croatia. (2013).  **$K_{sp}$  of Some Hardly Dissolved Inorganic Salts**. [online] Available : <http://www.ktf-split.hr/periodni/en/abc/kpt.html> [8 September 2013].
- Laidler, K. J. and Meiser, J. H. (1999). **Physical Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. Boston : Houghton Mifflin Company.
- Panchenkov, G. M. (1978). **Calculations of Chemical Equilibria Examples and Problems**. English translation from Russian : Mir Publishers.
- Socrates, G. (1971). **Thermodynamics and Statistical Mechanics**. 1<sup>st</sup> Ed. London : Butterworths & Co.
- Walas, S. M. (1985). **Phase Equilibria in Chemical Engineering**. USA : Butterworths.

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 4 จลนพลศาสตร์เคมี

- 4.1 ปริมาณสารสัมพันธ์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา
- 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 4.5 สมการอัตราแบบเอมพิริคัล
- 4.6 หน่วยของค่าคงที่อัตรา
- 4.7 การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์
- 4.8 เทคนิคที่ใช้ในการทดลอง
- 4.9 ปฏิกิริยामูลฐาน
- 4.10 ทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์
- 4.11 วิธีการค้นหากลไกการเกิดปฏิกิริยา
- 4.12 การเร่งปฏิกิริยาเคมี
- 4.13 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. บอกและอธิบายปัจจัยที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้
2. คำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลาได้
3. คำนวณหาค่าคงที่อัตราและอันดับของปฏิกิริยาจากผลการทดลองได้
4. คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาจากผลของอุณหภูมิได้
5. วิเคราะห์และคำนวณผลทางจลนพลศาสตร์ได้

### กิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 4 เรื่อง จลนพลศาสตร์มาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณทีละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนรู้การสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 4 เรื่องจลนพลศาสตร์เคมี
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 4

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

## บทที่ 4

### จลนพลศาสตร์เคมี

จลนพลศาสตร์เคมีเป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีว่าเกิดขึ้นช้าหรือเร็วเพียงใดก่อนที่จะถึงสภาวะสมดุล และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาลำดับขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาหรือกลไกการเกิดปฏิกิริยา (mechanism) เพื่อให้ทราบทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นจนกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ในการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยา ต้องเป็นอัตราเร็วที่ถูกกำหนดโดยปฏิกิริยาอย่างแท้จริง ไม่ใช่ถูกควบคุมด้วยอัตราการผสมสาร การแพร่ หรือกลไกการขัดขวางสารตั้งต้นไม่ให้มาสัมผัสกัน

จลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์มีความเกี่ยวข้องกัน โดยอุณหพลศาสตร์เป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นได้หรือไม่ และถ้าเกิดปฏิกิริยาได้ จะเกิดในระดับสูงสุดเท่าใด (ปริมาณสาร ณ สภาวะสมดุล) เมื่อใดก็ตามที่ระบบถูกรบกวนสมดุล เช่น ความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหรือความดันของระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นต้น ระบบจะปรับเปลี่ยนจากสภาวะสมดุลหนึ่งไปสู่อีกสภาวะสมดุลหนึ่ง ในช่วงการเปลี่ยนแปลงตามเวลานี้ จลนพลศาสตร์จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงนั้นว่าช้าหรือเร็ว และเมื่อระบบดำเนินสู่สภาวะสมดุลใหม่เมื่อใด สภาวะทุกอย่างจะถูกกำหนดโดยอุณหพลศาสตร์

ประโยชน์ของการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์คือสามารถทราบกลไกการเกิดปฏิกิริยาพร้อม ๆ กับสมการกฏอัตรา ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงการทำนายปริมาณสารตั้งต้นที่หายไป หรือสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา และการคำนวณหาสมการกฏอัตรา

#### 4.1 ปริมาณสารสัมพันธ์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีอยู่ในรูปทั่วไปคือ  $aA + bB + \dots \rightarrow eE + fF + \dots$

โดย  $a, b, \dots, e, f, \dots$  คือ ตัวเลขมวลสารสัมพันธ์ การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction) สามารถคิดได้ทั้งจากอัตราการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์และอัตราการหายไปของสารตั้งต้น โดยเป็นสัดส่วนที่สัมพันธ์กันดังนี้ (Levenspiel, 1999, P.13)

$$\text{Rate}' = -\frac{1}{a} \frac{dn_A}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{dn_B}{dt} = \dots = +\frac{1}{e} \frac{dn_E}{dt} = +\frac{1}{f} \frac{dn_F}{dt} = \dots \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\text{Rate}'$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา ในหน่วย โมล/เวลา  
 $n$  คือ จำนวนโมลของสาร  
 $t$  คือ เวลา

ข้อสังเกต เครื่องหมายลบ (-) แสดงการหายไปของสารตั้งต้นหรือสารตั้งต้นจะมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และเครื่องหมายบวก (+) แสดงการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หรือสารผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (บางครั้งก็ไม่นิยมเขียนเครื่องหมาย +)

นอกจากนี้การระบุปริมาณสารยังสามารถใช้รูปของความเข้มข้นได้ ดังนั้นหากนำสมการ (4.1) หารถลอดด้วยปริมาตรของภาชนะในการทำปฏิกิริยา ( $V$ ) จะได้

$$\begin{aligned} \text{Rate} &= \frac{\text{Rate}'}{V} \\ &= -\frac{1}{aV} \frac{dn_A}{dt} = -\frac{1}{bV} \frac{dn_B}{dt} = \dots = \frac{1}{eV} \frac{dn_E}{dt} = \frac{1}{fV} \frac{dn_F}{dt} = \dots \\ &= -\frac{1}{a} \left( \frac{dn_A}{V} \right) \frac{1}{dt} = -\frac{1}{b} \left( \frac{dn_B}{V} \right) \frac{1}{dt} = \dots = \frac{1}{e} \left( \frac{dn_E}{V} \right) \frac{1}{dt} = \frac{1}{f} \left( \frac{dn_F}{V} \right) \frac{1}{dt} = \dots \\ &= -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \dots = \frac{1}{e} \frac{d[E]}{dt} = \frac{1}{f} \frac{d[F]}{dt} = \dots \quad (4.2) \end{aligned}$$

$$= -\frac{v_A}{a} = -\frac{v_B}{b} = \dots = \frac{v_E}{e} = \frac{v_F}{f} = \dots \quad (4.3)$$

เมื่อ  $\text{Rate}$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา ในหน่วย โมล/ปริมาตร/เวลา หรือความเข้มข้น/เวลา

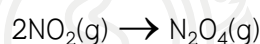
$[A], [B], \dots, [F], \dots$  คือ ความเข้มข้นของสาร A, B, ..., F, ... ในหน่วย โมล/ปริมาตร

$U_A, U_B, \dots, U_F, \dots$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A, B, ..., F ในหน่วย โมล/ปริมาตร/เวลา หรือความเข้มข้น/เวลา ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา จึงนิยามได้อีกอย่างหนึ่งว่า คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในหนึ่งหน่วยเวลา ส่วนในกรณีของแก๊สยังสามารถเขียนอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความดันในหนึ่งหน่วยเวลาได้ด้วย

**ตัวอย่างที่ 4.1** ปฏิกิริยา  $2\text{N}_2\text{O}_5(\text{g}) \rightarrow 4\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  สามารถเขียนอัตราของปฏิกิริยาได้ เป็น  $\frac{d[\text{O}_2]}{dt}$  จงเขียนอัตราของปฏิกิริยาในรูปของสารอื่น ๆ ในปฏิกิริยานี้

วิธีทำ 
$$\frac{d[\text{O}_2]}{dt} = \frac{1}{4} \frac{d[\text{NO}_2]}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{d[\text{N}_2\text{O}_5]}{dt}$$

**ตัวอย่างที่ 4.2** จงคำนวณหาอัตราของการเกิด  $\text{N}_2\text{O}_4$  ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



กำหนดให้อัตราการลดลงของ  $\text{NO}_2$  เท่ากับ  $0.0592 \text{ mol/l}\cdot\text{s}$

วิธีทำ

จาก 
$$-\frac{1}{2} \frac{d[\text{NO}_2]}{dt} = \frac{d[\text{N}_2\text{O}_4]}{dt}$$

$$\frac{1}{2} \left( -\frac{d[\text{NO}_2]}{dt} \right) = \frac{d[\text{N}_2\text{O}_4]}{dt}$$

0.0592 โมล/ลิตร·วินาที

$$\frac{0.0592}{2} = \frac{d[\text{N}_2\text{O}_4]}{dt}$$

ดังนั้น 
$$\frac{d[\text{N}_2\text{O}_4]}{dt} = \frac{0.0592}{2} = 0.0296 \text{ โมล/ลิตร}\cdot\text{วินาที}$$

**ตัวอย่างที่ 4.3** ปฏิกิริยาต่อไปนี้  $\text{Zn(s)} + 2\text{HCl(aq)} \rightarrow \text{ZnCl}_2\text{(aq)} + \text{H}_2\text{(g)}$

ถ้า Zn(s) จำนวน 0.5 โมล ถูกใช้ไปในเวลา 5 วินาที และปริมาตรของสารละลายทั้งหมด 1 ลิตร ให้หาอัตราของปฏิกิริยาและอัตราการลดลงของ HCl

วิธีทำ

$$\text{จาก } -\frac{dn_{\text{Zn}}}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{dn_{\text{HCl}}}{dt}$$

$$\left(-\frac{dn_{\text{Zn}}}{dt}\right) = \frac{1}{2} \left(-\frac{dn_{\text{HCl}}}{dt}\right)$$

$$\frac{0.5 \text{ โมล}}{5 \text{ วินาที}} = \frac{1}{2} \left(-\frac{dn_{\text{HCl}}}{dt}\right)$$

$$\text{ดังนั้น } -\frac{dn_{\text{HCl}}}{dt} = 2 \times 0.1 = 0.2 \text{ โมล/วินาที}$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ } -\left(\frac{dn_{\text{HCl}}}{dt}\right) / V &= -\frac{d[\text{HCl}]}{dt} = \frac{0.2 \text{ โมล/วินาที}}{1 \text{ ลิตร}} \\ &= 0.2 \text{ โมล/ลิตร·วินาที} \end{aligned}$$

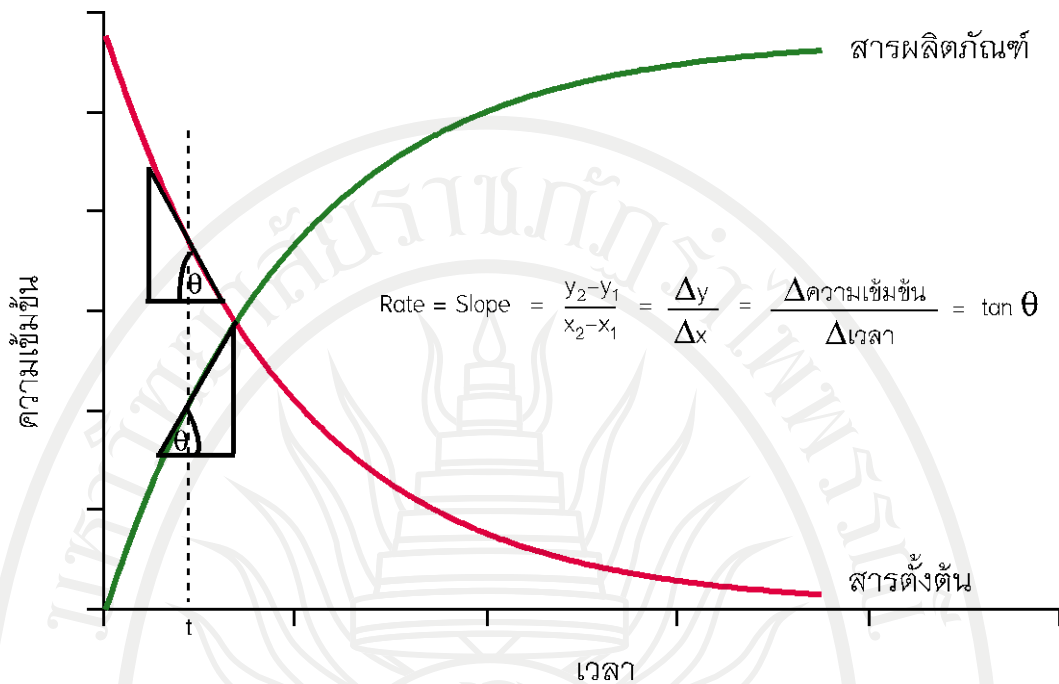
ดังนั้นอัตราการลดลงของ HCl เท่ากับ 0.2 โมล/ลิตร·วินาที

#### 4.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในภาชนะปิดสนิทจะพบว่าสารตั้งต้นมีความเข้มข้นลดลง (มีปริมาณลดลง) เมื่อเวลาผ่านไป ส่วนสารผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (ปริมาณเพิ่มขึ้น) เมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี





ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์กับเวลา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้จากความชันของกราฟ ซึ่งมีข้อสังเกตที่น่าสนใจดังนี้

- (1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นเสมอ
- (2) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป และมีแนวโน้มเข้า

ใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปนานมาก ๆ

- (3) จากข้อ (2) ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน
- (4) ณ จุดที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์ (ความชันเท่ากับศูนย์) คือจุดที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาจนหมด (สำหรับปฏิกิริยาแบบสมบูรณ) หรือจุดที่เกิดสภาพสมดุลเคมี (สำหรับปฏิกิริยาแบบผันกลับได้)

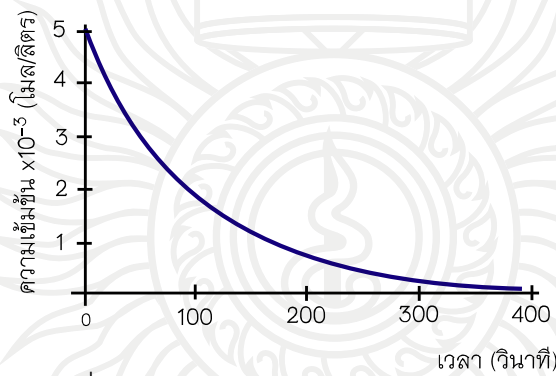
- (5) ที่เวลาเดียวกัน  $t$  ถ้าสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์เป็น  $1 : 1$  แล้วมุม  $\theta$  ที่ได้จากกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลาและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์กับเวลาจะมีค่าเท่ากัน (ดูภาพที่ 4.1)

การคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นกับเวลา ที่เวลา  $t$  ต่าง ๆ ทำได้โดยการลากเส้นสัมผัสที่นำเชื่อถือ ซึ่งสร้างโดยการนำกระดาษมาวางบนเส้นโค้ง ณ จุดบนกราฟที่เวลา  $t$  ที่ต้องการลากเส้นสัมผัส ขยับกระดาษจนเส้นโค้งจริงกับเงาเส้นโค้งในกระจกประสานต่อเป็นเส้นโค้งเดียวกันที่ไม่หักงอ ลากเส้นที่วาง

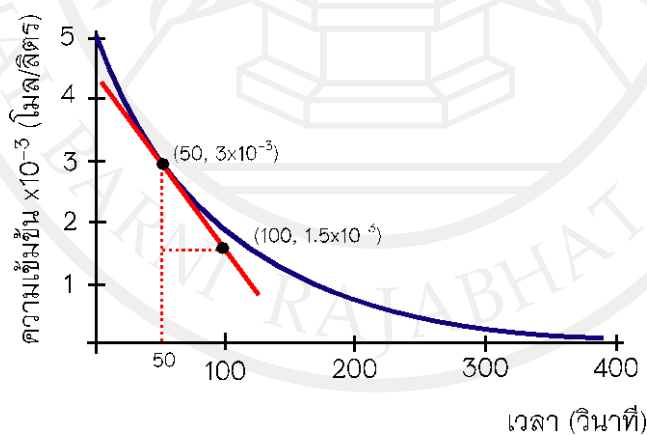
กระจกเงาตัดกับเส้นโค้ง ดึงกระจกเงาออกแล้วจึงลากเส้นตั้งฉากกับเส้นวางกระจกเงา ณ จุดตัดกับเส้นโค้ง จะได้เส้นสัมผัสเส้นโค้งที่ต้องการ (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544, หน้า 95)

ความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลาจะมีค่าลบ และความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์กับเวลาจะมีค่าบวกเสมอ สอดคล้องกับสมการ (4.1) เนื่องจากสารตั้งต้นจะมีปริมาณลดลงในขณะที่สารผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

**ตัวอย่างที่ 4.4** จากกราฟที่กำหนดให้แสดงการลดลงของสารตั้งต้นของปฏิกิริยา จงคำนวณหาอัตราของปฏิกิริยาที่เวลา 50 วินาที และอัตราตอนเริ่มต้น



วิธีทำ หาอัตราของปฏิกิริยาที่ 50 วินาที



- (1) ลากเส้นตรงสัมผัสกราฟที่เวลา 50 วินาที
- (2) กำหนดจุดบนเส้นตรงนั้น 2 จุด โดยต้องเป็นจุดที่อ่านค่าได้ง่ายจากสเกลของกราฟ จุดที่ได้คือ  $(50, 3 \times 10^{-3})$  และ  $(100, 1.5 \times 10^{-3})$

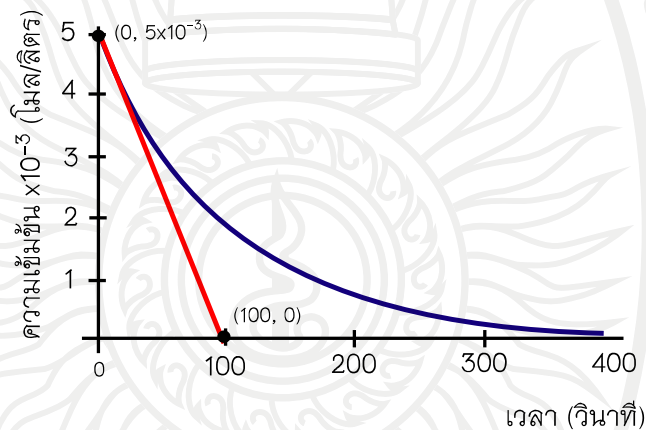
- (3) หาค่าความชัน

$$\text{slope} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(3 \times 10^{-3}) - (1.5 \times 10^{-3})}{50 - 100}$$

$$= -3 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร·วินาที}$$

ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 50 วินาที มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร·วินาที  
(เครื่องหมายลบ แสดงว่าเป็นอัตราการลดลง)

หาอัตราของปฏิกิริยาที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ )



- (1) ลากเส้นตรงสัมผัสกราฟที่เวลา 0 วินาที
- (2) กำหนดจุดบนเส้นตรงนั้น 2 จุด โดยต้องเป็นจุดที่อ่านค่าได้ง่ายจากสเกลของกราฟ จุดที่ได้คือ  $(0, 5 \times 10^{-3})$  และ  $(100, 0)$

(3) หาค่าความชัน

$$\text{slope} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(5 \times 10^{-3}) - 0}{0 - 100}$$

$$= -5 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร·วินาที}$$

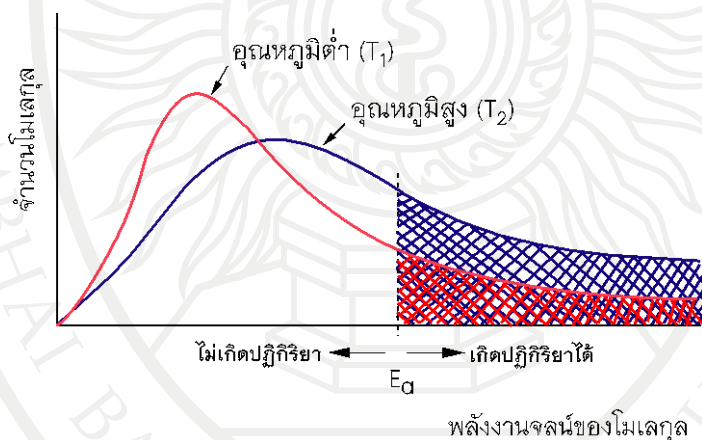
ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ  $5 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร·วินาที  
(เครื่องหมายลบ แสดงว่าเป็นอัตราการลดลง)

ลิขสิทธิ์ © วิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีเกือบทุกปฏิกิริยาจะมีอัตราของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลสารตั้งต้นตั้งแต่ 2 โมเลกุลขึ้นไป ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีการชนกัน (หรือสัมผัสกัน) จนมีพลังงานเพียงพอ คือต้องมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น (activation energy;  $E_a$ ) ของปฏิกิริยานั้น จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (Laidler and Meiser, 1999, P. 386–388) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้น โมเลกุลสารจึงเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และโอกาสที่โมเลกุลชนกันแล้วมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้นก็มีมากขึ้น (Lewis and Evans, 2006, P. 247)

ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ( $T_2$ ) จะได้จำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) มากกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า ( $T_1$ ) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 4.2 การแจกแจงพลังงานของโมเลกุลสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$

นอกจากนี้การชนกันแต่ละครั้งอาจจะไม่ได้เกิดปฏิกิริยาทุกครั้ง และการชนกันต้องชนในทิศทางที่เหมาะสม จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นจึงอาจพิจารณาได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาใด ๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ของการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยานั้น และอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอาร์เรเนียส (Arrhenius, ค.ศ. 1859–1927) นักเคมีชาวสวีเดน ได้เสนอความสัมพันธ์ตามสมการของอาร์เรเนียสไว้ดังนี้

$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $k =$  ค่าคงที่อัตรา

$A =$  แฟคเตอร์ความถี่ (เกี่ยวข้องกับจำนวนครั้งของการชนและทิศทางของการชน)

$E_a =$  พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ในหน่วย จูล/โมล (J/mol)

$R =$  ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 จูล/โมล·เคลวิน (J/mol·K)

$T =$  อุณหภูมิ ในหน่วย เคลวิน (K)

**ตัวอย่างที่ 4.5** สำหรับปฏิกิริยา  $C_2H_5I + OH^- \rightarrow C_2H_5OH + I^-$  มีค่าคงที่อัตรา ที่อุณหภูมิ 289 เคลวิน เท่ากับ  $5.03 \times 10^{-2}$  (โมล/ลิตร) $^{-1}$  วินาที $^{-1}$  และที่ อุณหภูมิ 333 เคลวิน เท่ากับ  $6.71$  (โมล/ลิตร) $^{-1}$  วินาที $^{-1}$  จงคำนวณพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาที่ 305 เคลวิน

วิธีทำ

จากสมการ (4.4) เมื่อใส่  $\ln$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\ln k = \ln \left( Ae^{\frac{E_a}{RT}} \right)$$

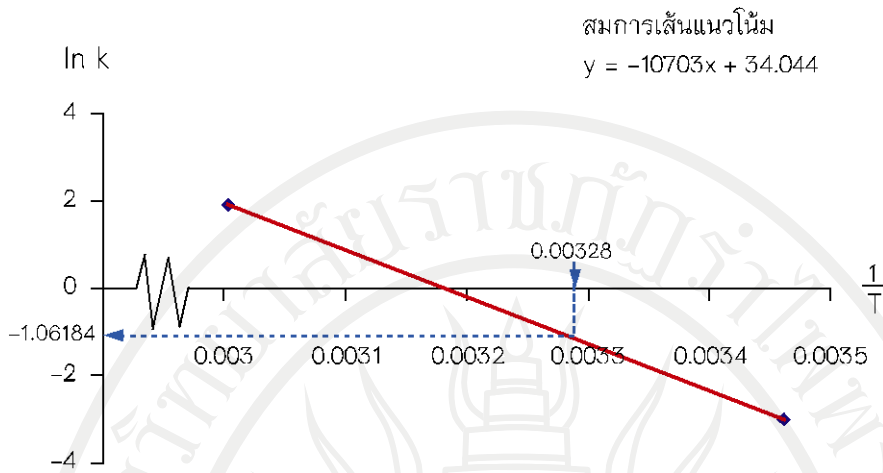
$$\ln k = \ln A + \left( \frac{-E_a}{RT} \right)$$

ดังนั้นเมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรง

จากข้อมูลโจทย์ จึงได้

	T	k	1/T	ln k
	289	0.0503	0.00346	-2.9898
ต้องการทราบค่า k →	305	??	0.00328	??
	333	6.71	0.003	1.9036

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



จากกราฟจะได้

$$\text{ความชัน} = \frac{-E_a}{R}$$

$$-10703 = \frac{-E_a}{8.314}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } E_a &= 10703 \times 8.314 = 88984.742 \text{ จูล/โมล} \\ &= 88.984 \text{ กิโลจูล/โมล} \end{aligned}$$

หาค่า  $k$  ที่อุณหภูมิ 305 เคลวิน

จากสมการเส้นแนวโน้ม  $y = -10703x + 34.044$

หรือ  $\ln k = -10703\left(\frac{1}{T}\right) + 34.044$

$$= -10703 \times 0.00328 + 34.044$$

$$= -1.06184$$

$$k = e^{-1.06184} = 0.3458 \text{ (โมล/ลิตร)}^{-1} \text{วินาที}^{-1}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 4.6** ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา  $2\text{NO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  เท่ากับ 27,200 แคลอรี จงคำนวณหาค่าคงที่อัตราที่ 700 เคลวิน เมื่อทราบ  $k = 0.75$  ลิตร/โมล·วินาที ที่ 600 เคลวิน (กำหนดให้ 1 แคลอรี = 4.18 จูล)

วิธีทำ

จากโจทย์ พลังงานกระตุ้น;  $E_a = 27200$  แคลอรี =  $27200 \times 4.18 = 113696$  จูล

จากสมการ (4.4) เมื่อใส่  $\ln$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\ln k = \ln \left( A e^{-\frac{E_a}{RT}} \right)$$

$$\ln k = \ln A + \left( \frac{-E_a}{RT} \right)$$

$$\text{ดังนั้น ที่ } 700 \text{ K; } \ln k = \ln A + \left( \frac{-113696}{8.314 \times 700} \right) \text{-----(1)}$$

$$\text{ที่ } 600 \text{ K; } \ln 0.75 = \ln A + \left( \frac{-113696}{8.314 \times 600} \right) \text{-----(2)}$$

นำสมการ (1) - (2) จะได้

$$\ln k - \ln 0.75 = \left( \frac{-113696}{8.314 \times 700} \right) - \left( \frac{-113696}{8.314 \times 600} \right)$$

$$\ln \left( \frac{k}{0.75} \right) = \frac{-113696}{8.314} \left( \frac{1}{700} - \frac{1}{600} \right)$$

$$= 3.256$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{k}{0.75} = e^{3.256} = 25.9455$$

$$k = 25.9455 \times 0.75 = 19.459$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี  
ค่าคงที่อัตราที่ 700 เคลวิน มีค่าเท่ากับ 19.459 ลิตร/โมล·วินาที



#### 4.4 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากการชนกันของโมเลกุลสารตั้งต้นเป็นสิ่งจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น สิ่งใดก็ตามที่สามารถเพิ่มพลังงานในการชน หรือเพิ่มอัตราการชนของโมเลกุล ย่อมทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้นตามไปด้วย ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่ (Lewis and Evans, 2006, P. 245–250)

##### 4.4.1 ชนิดของสารตั้งต้น

สารตั้งต้นต่างชนิดกัน มีพันธะเคมีที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดการสลายหรือสลายพันธะได้ยากง่ายไม่เท่ากัน สารตั้งต้นบางชนิดทำปฏิกิริยาได้ง่ายและบางชนิดทำปฏิกิริยาได้ยาก เช่น โลหะ Mg, Zn ทำปฏิกิริยากับ HCl ได้แก๊ส  $H_2$  เร็วกว่า โลหะ Fe หรือ Cu นอกจากนี้ สารชนิดเดียวกันแต่มีโครงสร้างต่างกันก็เกิดปฏิกิริยาได้ยากง่ายต่างกัน เช่น ฟอสฟอรัสขาวติดไฟได้ง่าย แต่ฟอสฟอรัสแดงติดไฟได้ยาก

##### 4.4.2 ความสามารถของสารตั้งต้นที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาหรือมาอยู่ใกล้กัน

ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ จะสามารถเกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากสารตั้งต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปเข้ามาใกล้กันและสัมผัสกัน สารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊สจะทำปฏิกิริยากันได้ดีกว่าของแข็ง สารตั้งต้นที่อยู่คนละภาชนะจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีเมื่อสารทั้งสองมาสัมผัสกันที่บริเวณพื้นผิว ขนาดของพื้นที่ผิวจึงเป็นตัวกำหนดอัตราของปฏิกิริยา และขนาดของพื้นที่ผิวขึ้นกับขนาดของอนุภาค ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก

##### 4.4.3 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับการเพิ่มจำนวนอนุภาคในระบบ เมื่อจำนวนอนุภาคมากขึ้นโอกาสที่อนุภาคจะชนกันก็มีมากขึ้น และโมเลกุลส่วนที่มีพลังงานสูงพอจะเกิดปฏิกิริยาได้ (โมเลกุลที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )) จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ก็มีมากขึ้น ปฏิกิริยาเคมีก็เกิดได้มากขึ้น

##### 4.4.4 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิมีผลต่อพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารตั้งต้นที่จะต้องชนกันหรือสัมผัสกันก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นเคลื่อนที่เร็วขึ้นโอกาสที่โมเลกุลจะชนกัน แล้วมีพลังงานมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาจึงมีมากขึ้น

##### 4.4.5 ชนิดของตัวทำละลาย

ในสภาพสารละลายที่มีสารตั้งต้นกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งปริมาตรของสารละลายนั้น โมเลกุลของตัวทำละลายจะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น และตัวทำละลาย

บางชนิดมีผลให้เกิดการเบียดบังหรือกีดกันไม่ให้สารตั้งต้นมาสัมผัสกัน ในขณะที่ตัวทำละลายบางชนิดส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นด้วยการช่วยให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้กันได้ง่ายขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย จะช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ง่ายและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว (Gates, 1992, P. 16–17)

#### 4.4.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้นและเร็วขึ้นได้ โดยตัวมันเองเข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาผ่านเส้นทางใหม่ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าค่าพลังงานกระตุ้นตามเส้นทางเดิม และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมาในลักษณะเดิม และปริมาณเท่าเดิม トラバเท่าที่ยังไม่มีการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547, หน้า 209)

#### 4.5 สมการอัตราแบบเอมพิริกัล

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับค่าคงที่อัตรา (ตามสมการของอาร์เรเนียส) และยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทุกชนิด สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว เรียกว่า สมการอัตราแบบเอมพิริกัล (empirical rate equation) ซึ่งก็คือ สมการที่แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับผลคูณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังด้วยตัวเลขใด ๆ ที่ได้จากการทดลองเท่านั้น (Pilling and Seakins, 1995, P. 7) ดังตัวอย่างปฏิกิริยาต่อไปนี้



มีสมการอัตราแบบเอมพิริกัล (หรือเรียกสั้น ๆ ว่าสมการอัตราหรือ กฎอัตรา) ดังนี้

$$\text{Rate} \propto [A]^m [B]^n \quad (4.5)$$

$$\text{Rate} = k[A]^m [B]^n \quad (4.6)$$

เมื่อ  $m, n$  คือ ตัวเลขใด ๆ ที่ได้จากการทดลอง อาจเป็นจำนวนเต็มหรือเศษส่วน เพื่อแสดงอันดับของปฏิกิริยาที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น A และ B

$m+n$  คือ อันดับรวมของปฏิกิริยา

$k$  คือ ค่าคงที่อัตราที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ( $k$  ขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส)

เช่น ปฏิกิริยา  $2\text{N}_2\text{O}_5(\text{g}) \rightarrow 4\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  มีสมการอัตรา,  $\text{Rate} = k[\text{N}_2\text{O}_5]$  ดังนั้นจึงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

**ตัวอย่างที่ 4.7** จากข้อมูลของการวัดอัตราเริ่มต้นของปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นของปฏิกิริยา  $2\text{NO}(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NOCl}(\text{g})$  ที่ 300 เคลวิน แสดงในตารางข้างล่าง

การทดลองที่	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)		อัตราเริ่มต้น (โมล/ลิตร·วินาที)
	[NO]	[Cl <sub>2</sub> ]	
1	0.01	0.01	$1.2 \times 10^{-4}$
2	0.01	0.02	$2.3 \times 10^{-4}$
3	0.02	0.02	$9.6 \times 10^{-4}$

จงเขียนสมการกฎอัตรา และหาค่าคงที่อัตรา จากข้อมูลวิธีทำ

สมมติ ให้  $m$  คือ อันดับของปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ [NO]

$n$  คือ อันดับของปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ [Cl<sub>2</sub>]

จากสมการ (4.6) เมื่อแทนค่าข้อมูลโจทย์ลงไปจะได้

$$1.2 \times 10^{-4} = k(0.01)^m(0.01)^n \quad \text{..... (1)}$$

$$2.3 \times 10^{-4} = k(0.01)^m(0.02)^n \quad \text{..... (2)}$$

$$9.6 \times 10^{-4} = k(0.02)^m(0.02)^n \quad \text{..... (3)}$$

นำสมการ  $\frac{(1)}{(2)}$  จะได้

$$\frac{1.2 \times 10^{-4}}{2.3 \times 10^{-4}} = \frac{k(0.01)^m(0.01)^n}{k(0.01)^m(0.02)^n}$$

$$= \frac{(0.01)^n}{(0.02)^n} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$\sim \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^1 = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

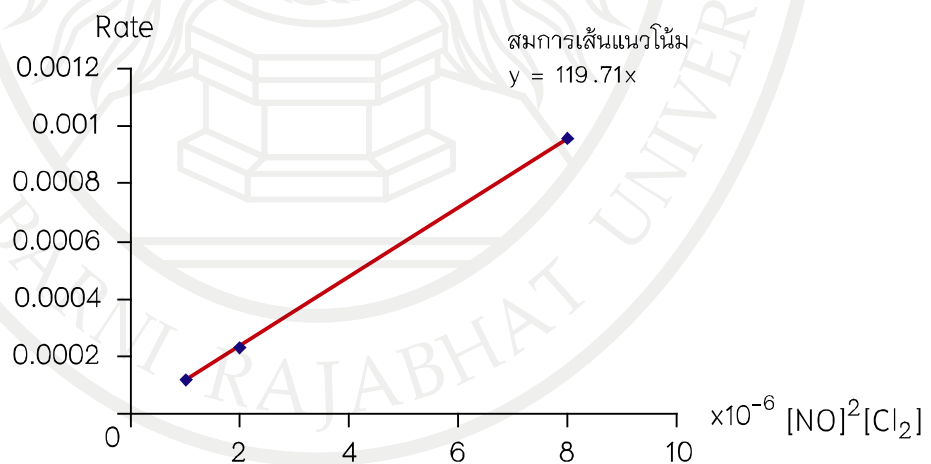
ลึขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี  $n = 1$

$$\begin{aligned} \text{นำสมการ } \frac{(2)}{(3)} \text{ จะได้ } \frac{2.3 \times 10^{-4}}{9.6 \times 10^{-4}} &= \frac{k(0.01)^m(0.02)^n}{k(0.02)^m(0.02)^n} \\ &= \frac{(0.01)^m}{(0.02)^m} = \left(\frac{1}{2}\right)^m \\ \sim \frac{1}{4} &= \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^m \\ m &= 2 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น Rate} = k[\text{NO}]^2[\text{Cl}_2]$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง Rate (แกน y) และ  $[\text{NO}]^2[\text{Cl}_2]$  (แกน x) จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูป

การทดลองที่	[NO]	[Cl <sub>2</sub> ]	[NO] <sup>2</sup> [Cl <sub>2</sub> ]	Rate
1	0.01	0.01	0.000001	0.00012
2	0.01	0.02	0.000002	0.00023
3	0.02	0.02	0.000008	0.00096



จากกราฟจะได้

$$\text{ความชัน} = k = 119.71 \text{ (โมล/ลิตร)}^{-2} \text{ วินาที}^{-1}$$

$$\text{สมการกฎอัตราที่ได้คือ Rate} = 119.71 [\text{NO}]^2[\text{Cl}_2]$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

#### 4.6 หน่วยของค่าคงที่อัตรา

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาต้องมีหน่วยเป็น [ความเข้มข้น] · เวลา<sup>-1</sup> ดังนั้นจึงเป็นการบังคับโดยปริยายว่าค่าคงที่อัตรา (k) จะต้องมีหน่วยเปลี่ยนไปตามอันดับรวมของปฏิกิริยา คือ

$$[\text{ความเข้มข้น}]^{1-n} \cdot \text{เวลา}^{-1}$$

แสดงว่า ถ้าอันดับของปฏิกิริยาเป็น 1; k มีหน่วยเป็น เวลา<sup>-1</sup>

ถ้าอันดับของปฏิกิริยาเป็น 2; k มีหน่วยเป็น [ความเข้มข้น]<sup>-1</sup> · เวลา<sup>-1</sup>

ถ้าอันดับของปฏิกิริยาเป็น 3; k มีหน่วยเป็น [ความเข้มข้น]<sup>-2</sup> · เวลา<sup>-1</sup>

#### 4.7 การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นในรูปของกฎอัตรา ซึ่งได้มาจากการทดลองเท่านั้น การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์ มีจุดประสงค์ดังนี้

- (1) เพื่อทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือความเข้มข้นของสารที่เวลาต่าง ๆ
- (2) เพื่อทำนายกลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยกฎอัตราจะสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่ช้าที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าคงที่อัตราน้อยที่สุด (มีค่าพลังงานกระตุ้นสูงที่สุด)
- (3) เพื่อให้ได้สมการกฎอัตราที่ถูกต้องทั้งค่าคงที่อัตราและอันดับของปฏิกิริยา เพื่อเอาไปใช้ในการผลิตทางอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์ด้วยกฎอัตรามี 2 แบบ คือ กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล (differential rate law) และกฎอัตราอินทิเกรต (integration rate law) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**4.7.1 กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล** เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น เช่น ปฏิกิริยา

$$aA + bB \rightarrow eE + fF$$

จากกฎอัตราคือ

$$R = k[A]^m[B]^n$$

เมื่อ R = อัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปดิฟเฟอเรนเชียลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือสารผลิตภัณฑ์

$$R = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{e} \frac{d[E]}{dt} = \frac{1}{f} \frac{d[F]}{dt}$$

ดังนั้นกฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลในรูปการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งต่อเวลา เช่น สาร B คือ

$$-\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = k[A]^m [B]^n \quad (4.7)$$

**4.7.2 กฎอัตราอินทิเกรต** เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลา ซึ่งได้มาจากการอินทิเกรตกฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล ด้วยวิธีการอินทิเกรตโดยตรงตามหลักทฤษฎีทางคณิตศาสตร์หรืออาจใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ สำหรับปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว เช่น ปฏิกิริยาต่อไปนี้



หลังจากทำการทดลองแล้วและทราบอันดับของปฏิกิริยาเป็นที่เรียบร้อยแล้วการวิเคราะห์จะแยกตามชนิดของอันดับของปฏิกิริยา ดังนี้

(1) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order reaction)

$$-\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = k'[A]^0 = k'$$

$$-d[A] = (ak')dt = kdt$$

$$d[A] = -kdt$$

ใส่ขอบเขตของการอินทิเกรต ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$ ,

$$\text{ความเข้มข้นของ A} = [A]_0$$

$$\text{ที่เวลา } t \text{ ใดๆ } = t, \text{ ความเข้มข้นของ A} = [A]$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \int_{[A]_0}^{[A]} d[A] = -k \int_0^t dt$$

$$\begin{aligned} [A] \Big|_{[A]_0}^{[A]} &= -kt \Big|_0^t \\ ([A] - [A]_0) &= -k(t - 0) \end{aligned}$$



$$\text{หรือ} \quad [A] - [A]_0 = -kt \quad (4.8)$$

นิยาม เวลาครึ่งชีวิต (half life,  $t_{1/2}$ ) คือ เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น

ดังนั้นจากสมการ (4.8) เมื่อแทนค่า  $t$  ด้วย  $t_{1/2}$  และแทนค่า  $[A]$  ด้วย  $[A]_0/2$  จะได้

$$t_{1/2} = \frac{[A]_0}{2k} \quad (4.9)$$

(2) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction)

$$-\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = k'[A]^1 = k'[A]$$

$$-\frac{d[A]}{[A]} = (ak')dt = kdt$$

$$\frac{d[A]}{[A]} = -kdt \quad (4.10)$$

ใส่ขอบเขตของการอินทิเกรต ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$ ,

ความเข้มข้นของ A =  $[A]_0$

ที่เวลา  $t$  ใดๆ =  $t$ , ความเข้มข้นของ A =  $[A]$

$$\text{ดังนั้น} \quad \int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt$$

$$\ln [A] \Big|_{[A]_0}^{[A]} = -kt \Big|_0^t$$

$$(\ln [A] - \ln [A]_0) = -k(t - 0)$$

$$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (4.11)$$

$$\text{จากนิยามของเวลาครึ่งชีวิตจะได้} \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (4.12)$$



(3) ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction)

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} &= k'[A]^2 \\
 -\frac{d[A]}{[A]^2} &= (ak')dt = kdt \\
 \frac{d[A]}{[A]^2} &= -kdt
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

ใส่ขอบเขตของการอินทิเกรต ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$ ,

ความเข้มข้นของ A =  $[A]_0$

ที่เวลา  $t$  ใดๆ  $= t$ , ความเข้มข้นของ A =  $[A]$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^2} &= -k \int_0^t dt \\
 -\frac{1}{[A]} \Big|_{[A]_0}^{[A]} &= -kt \Big|_0^t \\
 \frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} &= kt
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

จากนิยามของเวลาครึ่งชีวิตจะได้  $t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0}$  (4.15)

(4) ปฏิกิริยาอันดับสาม (third order reaction)

$$-\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = k'[A]^3$$

$$-\frac{d[A]}{[A]^3} = (ak')dt = kdt$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

$$\frac{d[A]}{[A]^3} = -kdt \quad (4.16)$$

ใส่ขอบเขตของการอินทิเกรต ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$ ,

ความเข้มข้นของ  $A = [A]_0$

ที่เวลา  $t$  ใด ๆ  $= t$ , ความเข้มข้นของ  $A = [A]$

ดังนั้น

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^3} = -k \int_0^t dt$$

$$-\frac{1}{2[A]^2} \Big|_{[A]_0}^{[A]} = -kt \Big|_0^t$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{[A]^2} - \frac{1}{[A]_0^2} \right) = kt \quad (4.17)$$

จากนิยามของเวลาครึ่งชีวิตจะได้  $t_{1/2} = \frac{3}{2k[A]_0^2}$  (4.18)

(5) ปฏิกิริยาอันดับ  $n$  ( $n^{\text{th}}$  order reaction)

$$-\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = k'[A]^n$$

$$-\frac{d[A]}{[A]^n} = (ak')dt = kdt$$

ลิสต์ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

$$\frac{d[A]}{[A]^n} = -kdt \quad (4.19)$$

ใส่ขอบเขตของการอินทิเกรต ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$ ,

ความเข้มข้นของ A =  $[A]_0$

ที่เวลา  $t$  ใด ๆ  $= t$ , ความเข้มข้นของ A =  $[A]$

ดังนั้น

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^n} = -k \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{(-n+1)[A]^{-n+1}} \Big|_{[A]_0}^{[A]} = -kt \Big|_0^t$$

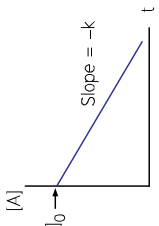
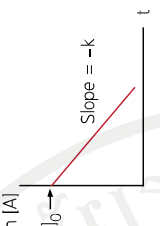
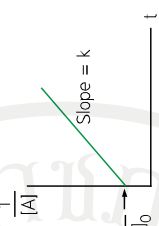
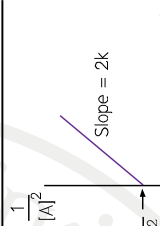
$$\frac{1}{(1-n)} \left( \frac{1}{[A]^{1-n}} - \frac{1}{[A]_0^{1-n}} \right) = -kt \quad (\text{เมื่อ } n \neq 1) \quad (4.20)$$

จากนิยามของเวลาครึ่งชีวิตจะได้

$$t_{1/2} = \frac{(0.5)^{1-n} - 1}{k(n-1)} [A]_0^{1-n} \quad (4.21)$$

จากกฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลและกฎอัตราอินทิเกรตของปฏิกิริยาอันดับต่าง ๆ สามารถสรุปความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลและกฎอัตราอินทิเกรตของปฏิกิริยาอันดับต่าง ๆ

ปฏิกิริยา	อันดับ (n)	กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล	กฎอัตราอินทิเกรต	เวลาครึ่งชีวิต ( $t_{1/2}$ )	กราฟเส้นตรงที่เกี่ยวข้อง
$aA \rightarrow \text{Products}$	0	$-\frac{d[A]}{dt} = k$	$[A] - [A]_0 = -kt$	$\frac{[A]_0}{2k}$	
	1	$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]$	$\ln [A] - \ln [A]_0 = -kt$ หรือ $\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt$	$\frac{0.693}{k}$	
	2	$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2$	$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt$	$\frac{1}{k[A]_0}$	
	3	$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^3$	$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{[A]^2} - \frac{1}{[A]_0^2} \right) = kt$	$\frac{3}{2k[A]_0^2}$	
	n	$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^n$	$\frac{1}{(1-n)} \left( \frac{1}{[A]^{1-n}} - \frac{1}{[A]_0^{1-n}} \right) = kt$ (หมายถึงเหตุ n≠1)	$\frac{(0.5)^{1-n} - 1}{k(n-1)} [A]_0^{1-n}$	

**ตัวอย่างที่ 4.8** การสลายตัวของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{O}_2$  เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง



(1) ถ้า  $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0.5$  โมล/ลิตร ให้คำนวณหา  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  หลังจากเวลา 10 นาที

วิธีทำ จากโจทย์ต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา ดังนั้นจึงวิเคราะห์โดยใช้ กฎอัตราอินทิเกรตของปฏิกิริยาอันดับสองตามสมการ (4.14) ดังนี้

$$\frac{1}{[\text{A}]} - \frac{1}{[\text{A}]_0} = kt$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]} - \frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]_0} = kt$$

$$\frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]} - \frac{1}{0.5} = 0.041 \times 10$$

เมื่อแก้สมการ จะได้  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.4149$  โมล/ลิตร

(2) จะใช้เวลานานเท่าใดที่จะทำให้  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  ลดลงจาก 0.5 โมล/ลิตร เป็น 0.1 โมล/ลิตร

วิธีทำ

$$\frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]} - \frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]_0} = kt$$

$$\frac{1}{0.1} - \frac{1}{0.5} = 0.041 \times t$$

เมื่อแก้สมการ จะได้  $t = 195.12$  นาที

(3) จะใช้เวลานานเท่าใดที่จะทำให้  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  จำนวน 40% แยกสลายไป

วิธีทำ

$[\text{H}_2\text{O}_2]$  หายไป 40% แสดงว่าเหลือ  $[\text{H}_2\text{O}_2]$  ที่ปรากฏอยู่อีก 60%

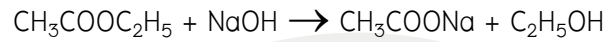
ดังนั้น  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.6[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0.6 \times 0.5 = 0.3$  โมล/ลิตร

$$\frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]} - \frac{1}{[\text{H}_2\text{O}_2]_0} = kt$$

$$\frac{1}{0.3} - \frac{1}{0.5} = 0.041 \times t$$

เมื่อแก้สมการ จะได้  $t = 32.52$  นาที

ตัวอย่างที่ 4.9 ปฏิกิริยาของเอทิลอะซิเตตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

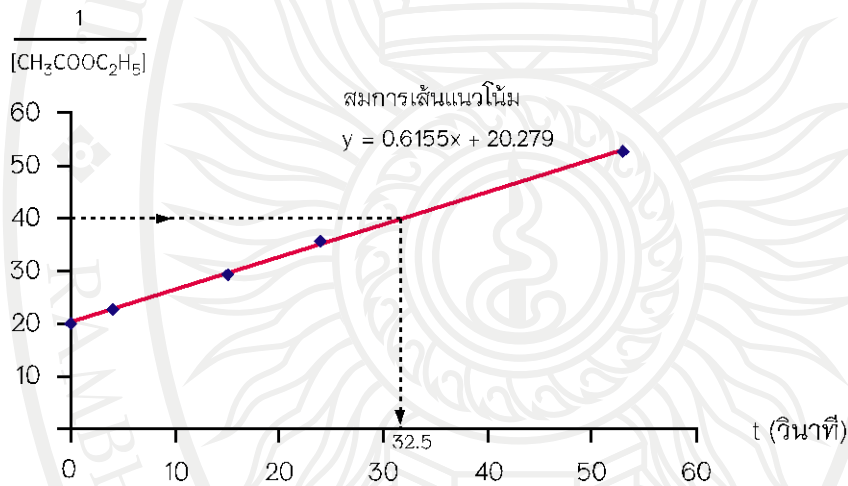


เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเมื่อเทียบกับเอทิลอะซิเตต ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทิลอะซิเตตเท่ากับ 0.05 โมล/ลิตร และข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังนี้

$[\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5]$ (โมล/ลิตร)	0.044	0.034	0.028	0.019
เวลา (วินาที)	4	15	24	53

จงหาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา และค่าครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทราบชุดข้อมูลระหว่างความเข้มข้นกับเวลา ของปฏิกิริยาอันดับสอง นำมาสร้างกราฟเพื่อหาค่าคงที่อัตราได้ดังนี้



จากกราฟ Slope = 0.6155 ลิตร/โมล·วินาที

เวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยานี้ คือ เวลาที่  $[\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5] = \frac{0.05}{2} = 0.025$  โมล/ลิตร

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{1}{[\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5]} = \frac{1}{0.025} = 40$$

อ่านค่าจากกราฟที่  $y = 40$  จะได้  $x = 32.5$

ดังนั้น  $t_{1/2} = 32.5$  วินาที

หรือคำนวณจากสมการ (4.15) ได้

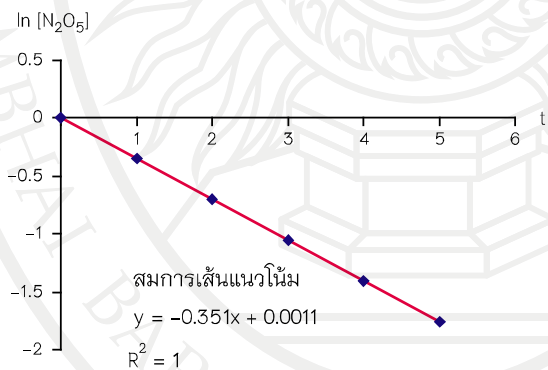
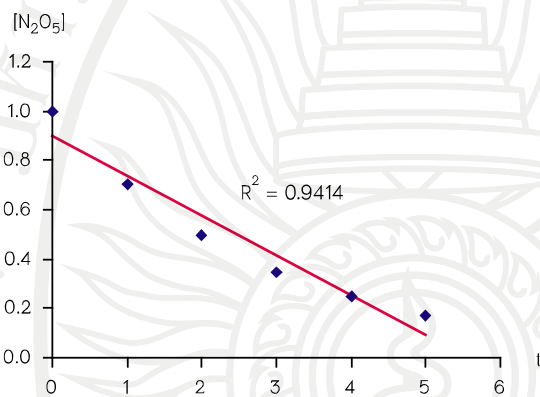
$$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} = \frac{1}{0.6155 \times 0.05} = 32.493 \text{ วินาที}$$

ตัวอย่างที่ 4.10 จากปฏิกิริยา  $2\text{N}_2\text{O}_5(\text{g}) \rightarrow 4\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$

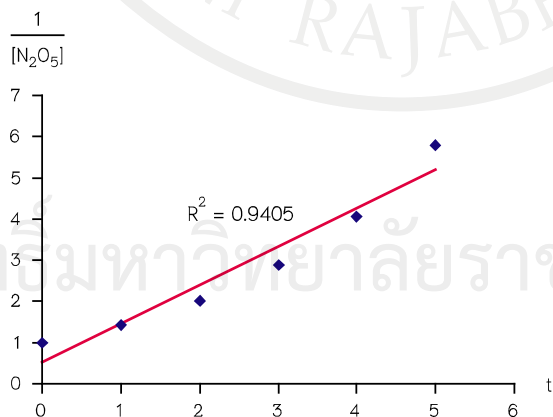
ให้หาอันดับของปฏิกิริยา และค่าคงที่อัตรา จากข้อมูลต่อไปนี้

$[\text{N}_2\text{O}_5]$ (โมล/ลิตร)	1.000	0.705	0.497	0.349	0.246	0.173
เวลา (วินาที)	0	1	2	3	4	5

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันของความเข้มข้นกับเวลา เพื่อทดสอบว่าความสัมพันธ์ใดสอดคล้องกับสมการเส้นตรง ได้ผลดังนี้



ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln [\text{N}_2\text{O}_5]$  กับ  $t$  มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด จากค่า  $R^2 = 1$  จึงสรุปว่า ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อเทียบข้อมูลที่ได้อัตราที่ 4.1 จะได้ Slope =  $-k = -0.351$  ดังนั้น  $k = 0.351$  วินาที<sup>-1</sup>





## 4.8 เทคนิคที่ใช้ในการทดลอง

ในการติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งของสารตั้งต้นที่หายไปและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาที่เวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลระหว่างความเข้มข้นกับเวลาหรืออัตราเร็วกับเวลา (เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์) จำเป็นต้องใช้เทคนิคต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของสารและลักษณะของระบบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

**4.8.1 วัดจากการเปลี่ยนแปลงความดัน** ใช้ได้กับกรณีที่มีองค์ประกอบอย่างน้อย 1 ชนิดอยู่ในวัฏภาคแก๊ส ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป จึงสามารถวัดความก้าวหน้าของปฏิกิริยาได้จากการวัดความดันที่เวลาต่าง ๆ

**4.8.2 ใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี** ใช้ได้ในกรณีที่สารมีการตอบสนองกับคลื่นแสง เช่น การดูดกลืนแสงของสาร  $\text{Br}_2$  ดังนั้นจึงสามารถติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยา  $\text{H}_2 + \text{Br}_2 \rightarrow 2\text{HBr}$  ได้จากการลดลงของค่าการดูดกลืนแสง นอกจากนี้ยังมีเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีอื่น ๆ เช่น อินฟราเรด รามาน เอ็กรีย์ และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ที่ใช้ติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยาได้

**4.8.3 วัดจากค่าสภาพการนำไฟฟ้า** ใช้ได้กับปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนไอออน หรือวัดจากค่า pH ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตอน  $[\text{H}^+]$

**4.8.4 ใช้เทคนิคทางด้านเคมีวิเคราะห์อื่น ๆ** ได้แก่ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารจากเวลาจริงด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี ลึควิดโครมาโตกราฟี แมสสเปกโทรเมทรี และโพลาไรเมทรี (ใช้กับสารที่สามารถหมุนระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ หรือเรียกว่า optically active) และ/หรือร่วมกับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารด้วยวิธีดังกล่าว หลังจากปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยเวลาที่แน่นอน แล้วหยุดปฏิกิริยา (อาจจะด้วยการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว การเพิ่มตัวทำละลาย การสะเทินอย่างรวดเร็วหรือการใช้แสงเลเซอร์) เป็นต้น

## 4.9 ปฏิกิริยามูลฐาน

ปฏิกิริยามูลฐาน (elementary reaction) คือ ปฏิกิริยาขั้นพื้นฐานที่เล็กที่สุดที่โมเลกุลของสารตั้งต้นเพียง 1 หรือ 2 ตัวชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาได้ โดยทั่วไปปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการประกอบกันของปฏิกิริยามูลฐานหลาย ๆ ปฏิกิริยา (Laidler and Meiser, 1999, P. 420)

จำนวนโมเลกุลของสารตั้งต้นที่เกี่ยวข้องในการชนกันแต่ละครั้งในปฏิกิริยามูลฐาน ซึ่งใช้เสนอเป็นขั้นตอนหนึ่ง ๆ ในกลไกของปฏิกิริยา เรียกว่า โมเลกุลาริตี (molecularity) ดังนั้น โมเลกุลาริตีจึงเป็นหัวใจสำคัญของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Pilling and Seakins, 1995, P. 7-8) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

**4.9.1 ปฏิกิริยามูลฐาน 1 โมเลกุล (elementary unimolecular reaction)** ซึ่งเกิดจากการสั่นของหนึ่งโมเลกุล เพื่อแตกตัวหรือจัดเรียงตัวใหม่ และปฏิกิริยามูลฐาน 1 โมเลกุลนี้จะมีอันดับของปฏิกิริยาเป็นหนึ่งเสมอ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา  $A \rightarrow \text{Products}$

**4.9.2 ปฏิกิริยามูลฐาน 2 โมเลกุล (elementary bimolecular reaction)** เกิดจากคู่ของโมเลกุลมาชนกัน และมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน ปฏิกิริยามูลฐาน 2 โมเลกุลนี้จะมีอันดับของปฏิกิริยาเป็นสองเสมอ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา  $2A \rightarrow \text{Products}$  หรือ  $A + B \rightarrow \text{Products}$

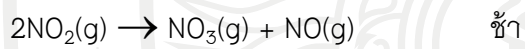
**4.9.3 ปฏิกิริยามูลฐาน 3 โมเลกุล (elementary termolecular reaction)** เกิดจากการชนกันของ 3 โมเลกุลพร้อมกัน (เป็นปฏิกิริยาที่พบน้อยมาก) และปฏิกิริยามูลฐาน 3 โมเลกุลนี้จะมีอันดับของปฏิกิริยาเป็นสามเสมอ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา  $A + B + C \rightarrow \text{Products}$  หรือ  $3A \rightarrow \text{Products}$  หรือ  $2A + B \rightarrow \text{Products}$

ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว (ด้วยปฏิกิริยามูลฐานใด ๆ) อันดับของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองจะเท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นนั้น แต่ถ้าอันดับของปฏิกิริยาไม่เท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นนั้น แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอน (ด้วยปฏิกิริยามูลฐานหลายปฏิกิริยาประกอบกัน) และอันดับของปฏิกิริยานั้นจะเท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ช้าที่สุด (Laidler and Meiser, 1999, P. 430) เรียกขั้นตอนดังกล่าวนี้ว่า ขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate-determining step) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา  $2A \rightarrow B$  มีขั้นตอนดังนี้



เมื่อ C, D เป็นสารกัมมันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา (activated complex or intermediate) เช่น อนุมูล (radical), ไอออน, หรือเป็นโมเลกุลของสารเชิงซ้อน เหล่านี้เป็นสารที่มีพลังงานสูง ดังนั้นจึงไม่เสถียรและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก ซึ่งโดยปกติถ้าขั้นตอนใดมีสารตั้งต้นที่เป็นสารกัมมันต์ร่วมเกิดปฏิกิริยาด้วย มักจะเป็นขั้นตอนที่เร็วเสมอ (สมการ (4.23)–(4.24)) การเกิดปฏิกิริยาให้ได้สารผลิตภัณฑ์ B จะต้องรอขั้นตอนช้าที่สุดให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ก่อน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับขั้นตอนช้าที่สุด (สมการ (4.22)) ซึ่งเป็นปฏิกิริยามูลฐาน และเขียน สมการอัตราได้จากจำนวนโมเลกุลารัติของขั้นมูลฐานนั้นได้คือ  $\text{Rate} = k[A]$

**ตัวอย่างที่ 4.11** จากกลไกการเกิดปฏิกิริยา (แต่ละขั้นเป็นปฏิกิริยามูลฐาน) ดังนี้

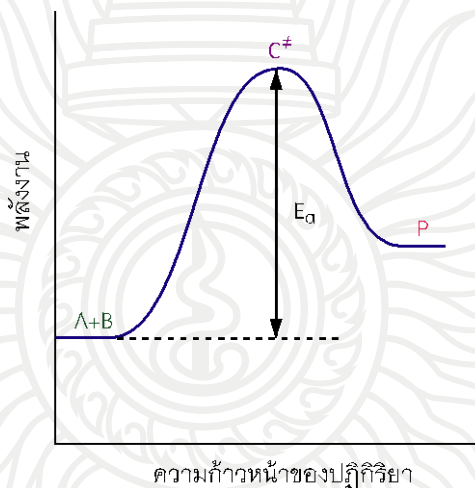


จะสามารถเขียนสมการกฎอัตราได้อย่างไร

ตอบ  $\text{Rate} = k[\text{NO}_2]^2$

#### 4.10 ทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์

เมื่อสารตั้งต้น A และ B ชนกัน จะมีการจัดเรียงตัวโดยบิดรูปหรือปรับโครงสร้าง ในขณะเดียวกันก็มีพลังงานสูงขึ้นจนกลายเป็นสารที่มีพลังงานค่าสูงสุด (ดังแสดงในภาพที่ 4.3) เรียกว่า สารกัมมันต์ (activated complex) ใช้สัญลักษณ์  $C^\ddagger$  (Pilling and Seakins, 1995, P. 2) ซึ่งสารดังกล่าวจะเริ่มสลายพันธะเก่า (พันธะยึดออก) และสร้างพันธะใหม่ (พันธะหดลงและแข็งแรงขึ้น) เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะแทรนซิชัน (transition state) โดยอาจเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ P หรือกลับไปเป็นสารตั้งต้น A และ B ขึ้นกับพลังงานของสารเชิงซ้อนกัมมันต์ ยังคงมีมากกว่า  $E_0$  หรือไม่



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงจาก A+B ไปเป็น P ตามทฤษฎีสารเชิงซ้อนกัมมันต์

#### 4.11 วิธีการค้นหากลไกการเกิดปฏิกิริยา

ในการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเริ่มจากการหาสัดส่วนการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อหาสมการเคมีที่ดุลแล้วอย่างถูกต้อง (Levenspiel, 1999, P.29–30) จากนั้นวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ (ด้วยกฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลหรือกฎอัตราอินทิเกรต) เพื่อหาค่าคงที่อัตราและอันดับของปฏิกิริยาให้ได้ สมการกฎอัตราที่ถูกต้อง แล้วจึงเสนอกลไกของปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในรูปของปฏิกิริยาอนุมูลฐานหรือปฏิกิริยาย่อยโดยยึดหลักการ ดังนี้

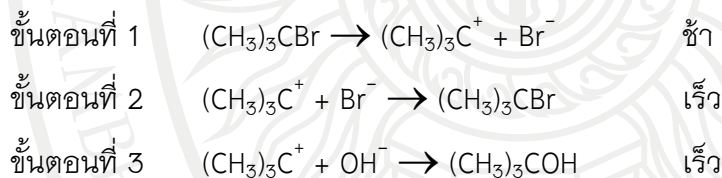
- (1) เมื่อรวมปฏิกิริยาย่อยทั้งหมดแล้วต้องได้เป็นสมการแสดงปฏิกิริยารวมตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ที่ทราบอย่างถูกต้องแล้ว

(2) ปฏิกริยาย่อยที่เกิดขึ้นช้าที่สุดในกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นขั้นกำหนดอัตรา และต้องให้สมการกฏอัตราเหมือนกับสมการกฏอัตราที่ได้จากการทดลอง

(3) ต้องมีการตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าสารกัมมันต์ในปฏิกิริยาย่อยแต่ละขั้นเกิดขึ้นจริง ซึ่งโดยปกติมักจะใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี (เช่น in-situ infrared spectroscopy, in-situ ultraviolet spectroscopy, in-situ X-ray absorption spectroscopy เป็นต้น) ทั้งนี้เพราะแม้ว่าการเกิดขึ้นหรือหายไปของสารกัมมันต์จะเกิดขึ้นรวดเร็วเพียงใดก็ยังไม่เร็วไปกว่าความเร็วของแสงหรือความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสารกัมมันต์จะถูกติดตามได้ทันทีทั้งหมด

ตัวอย่างเช่น ปฏิกริยาระหว่างสารตั้งต้น  $(\text{CH}_3)_3\text{CBr}$  และ  $\text{OH}^-$  ได้  $(\text{CH}_3)_3\text{COH}$  และ  $\text{Br}^-$  เป็นสารผลิตภัณฑ์ เมื่อทำการทดลองตรวจสอบสัดส่วนการทำปฏิกิริยา พบว่าสมการเคมีที่เกิดขึ้นคือ  $(\text{CH}_3)_3\text{CBr} + \text{OH}^- \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{COH} + \text{Br}^-$

เมื่อสร้างสมการกฏอัตราพบว่า  $\text{Rate} = k[(\text{CH}_3)_3\text{CBr}]$  ดังนั้นอันดับของปฏิกิริยาไม่เท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์โมลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นนั้น แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอน การเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ ต้องอาศัยความรู้ทางด้านเคมี เกี่ยวกับการสร้าง-สลายพันธะ และความมีเสถียรภาพของสารกัมมันต์ที่เกิดขึ้น เช่น

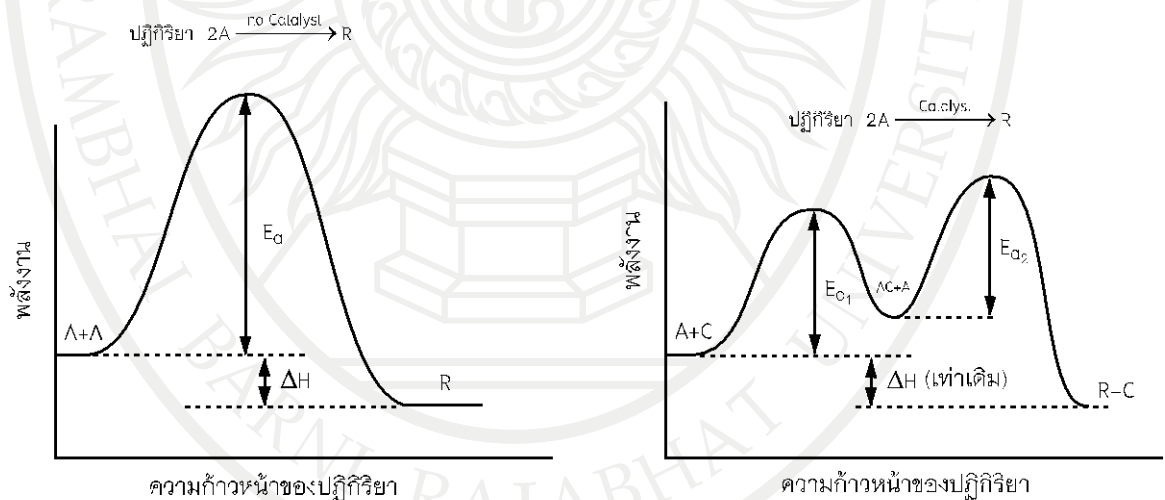


สาร  $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+$  ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา เป็นกลุ่มสารกัมมันต์ที่เรียกว่า คาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) ซึ่งถูกตรวจพบด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีแล้ว ปฏิกิริยาขั้นแรกเป็นขั้นที่เกิดขึ้นช้า เพราะค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิด  $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+$  มีค่าสูง (Gates, 1992, P. 43) จึงทำให้  $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+$  เกิดขึ้นได้ช้า ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองนั้นจะเร็วกว่ามาก ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยารวมที่วัดได้จึงมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาย่อยในขั้นตอนที่ 1 สมการกฏอัตราที่ได้จึงสอดคล้องสมการกฏอัตราที่ได้จากการทดลอง กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เสนอขึ้นนี้จึงมีแนวโน้มว่ามีความถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามกลไกที่เสนอขึ้นนี้อาจถูกเปลี่ยนแปลงได้ หากมีการตรวจสอบพบสารกัมมันต์ชนิดใหม่ เพิ่มเติม ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีสมัยใหม่ มายืนยัน



## 4.12 การเร่งปฏิกิริยาเคมี

การเร่งปฏิกิริยา (catalysis) คือ การทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งเป็นสารที่เข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดผ่านกลไกใหม่ที่เกิดง่ายขึ้นกว่ากลไกเดิม คือเป็นกลไกใหม่มีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยกว่ากลไกเดิม (Steinfeld, Francisco and Hase, 1999, P. 149) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดิมกลับมาในปริมาณเท่าเดิม หรืออาจกล่าวได้ว่าบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาคือเปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยาไปเป็นกลไกที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด ฉะนั้นความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะคงที่ และจะไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยานั้น (Laidler and Meiser, 1999, P. 455) เช่น ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H$ ), ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S$ ), ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G$ ) รวมทั้งค่าคงที่สมดุล ( $K$ ) ของปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่สมดุล (Gates, 1992, P. 2)



(ก) ปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่ง

(ข) ปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่ง

ภาพที่ 4.4 พลังงานกับความก้าวหน้าของปฏิกิริยา (ก) ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (C คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา)

การเร่งปฏิกิริยา แบ่งตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เป็น 2 ประเภท คือ การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalysis) และการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysis) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

**4.12.1 การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์** คือ การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (phase) เดียวกับสารตั้งต้นหรือสารละลายของสารตั้งต้น เช่น ใช้สารประกอบโคออดิเนชันของโลหะแทรนซิชัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนในอัลคีน เป็นต้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นได้ดี ทำให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพดี เกิดสารผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือตัวเร่งมักจะสลายตัวหรือเสถียรภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนสูง และบางครั้งต้องมีกระบวนการแยกตัวเร่งออกจากสารผลิตภัณฑ์ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น (Hagen, 2006, P. 11)

**4.12.2 การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์** คือ การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคต่างจากสารตั้งต้นหรือสารละลายของสารตั้งต้น เช่น ใช้พื้นผิวโลหะแพลทินัมในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของสารกลุ่มอัลคีน การใช้สารกลุ่มซีโอไลต์เร่งปฏิกิริยาแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน การใช้สารกลุ่มโลหะออกไซด์เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น จึงมักจะมีปัญหาเรื่องการแพร่ของสารเข้า-ออกจากรูที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา ทำให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพไม่ดีนัก เกิดสารผลิตภัณฑ์ในปริมาณน้อย แต่ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาหรือออกแบบกระบวนการให้เหมาะสม ข้อดีของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ คือ ไม่ต้องมีกระบวนการแยกสารผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่ง และตัวเร่งปฏิกิริยามีความคงทนต่อสภาวะความร้อนสูง จึงมักจะสามารถนำตัวเร่งกลับมาใช้เร่งปฏิกิริยาได้หลาย ๆ รอบ (Hagen, 2006, P. 12-13)



#### 4.13 สรุป

ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ จะเกิดช้าหรือเร็วขึ้นขึ้นกับการสัมผัสกันและชนกันของโมเลกุลสารตั้งต้นจนมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_0$ ) จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ การเพิ่มพลังงานในการชน หรือเพิ่มอัตราการชนของโมเลกุล เช่น เพิ่มอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของสารตั้งต้น เพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดผ่านกลไกใหม่ที่มีพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าเดิม ปฏิกิริยาจึงเกิดง่ายขึ้นและเร็วขึ้น อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับค่าคงที่อัตราตามสมการของอาร์เรเนียส ซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเขียนในรูปสมการกฎอัตราเอมพิริคัล หรือสมการที่แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับผลคูณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังด้วยตัวเลขใด ๆ ที่ได้จากการทดลองเท่านั้น ถ้าอันดับของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองเท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นนั้นแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว แต่ถ้าอันดับของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองไม่เท่ากับตัวเลขสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นนั้นแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอน ซึ่งต้องสอดคล้องกับปฏิกิริยามูลฐานของขั้นตอนที่ช้าที่สุดของปฏิกิริยานั้น การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์ด้วยกฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียลจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้น แต่ถ้าวิเคราะห์โดยใช้กฎอัตราอินทิเกรตจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา การวิเคราะห์เหล่านี้มีประโยชน์สำหรับทำนายปริมาณสารที่ทำให้ปฏิกิริยาหายไปหรือเกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่มีความเหมาะสม และใช้ในการผลิตจริงทางอุตสาหกรรม

## แบบฝึกหัดบทที่ 4

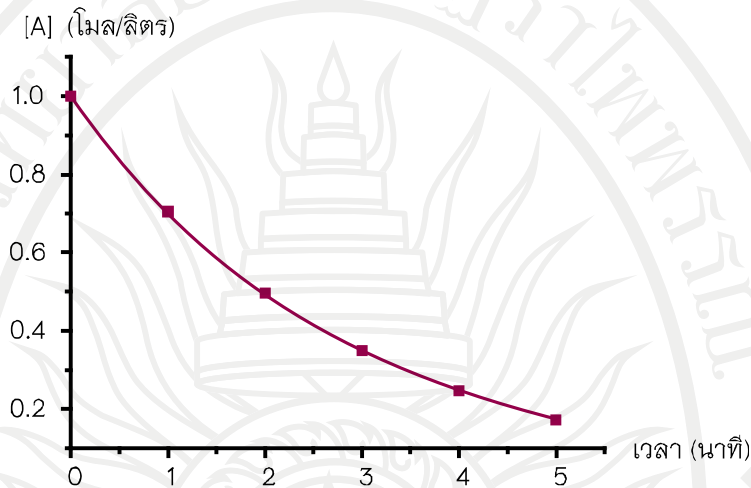
1. จากปฏิกิริยา  $\text{HCl(aq)} + \text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O(l)} + \text{CO}_2(\text{g})$  ในเวลา 5 วินาที มีน้ำเกิดขึ้น 13.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จงหาอัตราการเกิดขึ้นของ  $\text{CO}_2$  เป็นกรัมต่อวินาที (กำหนดความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
2. แก๊ส  $\text{AB}_2$  สลายตัวได้ตามสมการ  $2\text{AB}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{AB}(\text{g}) + \text{B}_2(\text{g})$  ถ้าอัตราการสลายตัวของ  $\text{AB}_2$  เท่ากับ  $X$  โมล/ลิตร·วินาที หมายความว่าอัตราการเกิด  $\text{B}_2$  จะเป็นเท่าใด
3. หยดสารละลาย  $\text{NaOH}$  0.1 โมล/ลิตร ลงในสารละลายกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.25 โมล/ลิตร ปริมาตร 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยอัตรา 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที หมายความว่าอัตราการหายไปของกรดมีค่าเท่าใด
4. ผลการทดลองสำหรับปฏิกิริยา  $2\text{NO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{N}_2\text{O}(\text{g})$  เป็นดังนี้

[NO] (โมล/ลิตร)	[H <sub>2</sub> ] (โมล/ลิตร)	Rate (โมล/ลิตร·วินาที)
1	1	$3.5 \times 10^{-5}$
1.2	1.2	$5.0 \times 10^{-5}$
0.8	0.8	$1.8 \times 10^{-5}$
1	2	$7.0 \times 10^{-5}$
2	1	$14.0 \times 10^{-5}$

จงหาสมการกฎอัตราของปฏิกิริยานี้

5. ค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นกี่เท่าถ้าค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 50 กิโลจูล/โมล และอุณหภูมิเพิ่มจาก 300 เคลวิน เป็น 320 เคลวิน
6. ปฏิกิริยา  $2\text{NO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  จะมีค่าพลังงานกระตุ้นเป็นเท่าใด ถ้าค่าคงที่อัตราเพิ่มเป็นสองเท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 27 องศาเซลเซียส เป็น 37 องศาเซลเซียส
7. ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา  $\text{A} \rightarrow \text{B}$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าเท่าใด ถ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่อัตรา  $2.46 \times 10^{-3}$  (โมล/ลิตร)<sup>-1</sup>·วินาที<sup>-1</sup> และที่ 60 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่อัตรา 0.134 (โมล/ลิตร)<sup>-1</sup>·วินาที<sup>-1</sup>

8. ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาหนึ่งมีค่า 80 กิโลจูล/โมล จงคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่จะทำให้อัตราของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 เท่าเมื่อเทียบกับอัตราของปฏิกิริยาที่ 0 องศาเซลเซียส (เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นคงที่)
9. จงใช้รูปต่อไปนี้ตอบคำถาม



- 9.1) จากกราฟ  $t_{1/2}$  ของปฏิกิริยานี้เป็นเท่าใด
- 9.2) อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 0.5 นาที เป็นเท่าใด
- 9.3) ถ้าปฏิกิริยาเป็นอันดับสองเมื่อเทียบกับสาร A แล้วค่าคงที่อัตราเป็นค่าเท่าใด
10. ในปฏิกิริยาอันดับสอง ถ้าสารตั้งต้น A ลดลง 30% ของความเข้มข้นเริ่มต้นในเวลา 10 นาที ถ้า  $[A]_0 = 2$  โมล/ลิตร จงตอบคำถามต่อไปนี้
- 10.1) ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยานี้มีค่าเท่าใด
- 10.2) ที่เวลาใด สารตั้งต้นจะมีปริมาณเหลือครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น
- 10.3) หลังจากผ่านไป 15 นาที สารตั้งต้นจะมีปริมาณเหลืออยู่เท่าใด

## เอกสารอ้างอิง

- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. (2547). **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. (2544). **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- Gates, B. C. (1992). **Catalytic Chemistry**. John Wiley & Sons.
- Hagen, J. (2006). **Industrial Catalysis**. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Laidler, K. J. and Meiser, J. H. (1999). **Physical Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. Boston : Houghton Mifflin Company.
- Levenspiel, O. (1999). **Chemical Reaction Engineering**. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons.
- Lewis, R. and Evans, W. (2006). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Palgrave Macmillan.
- Pilling, M. J. and Seakins, P. W. (1995). **Reaction Kinetics**. New York : Oxford University Press.
- Steinfeld, J. I., Francisco, J. S., and Hase, W. L. (1999). **Chemical Kinetics and Dynamics**. New Jersey : Prentice Hall International.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5

### เนื้อหาประจำบท

#### บทที่ 5 กรดและเบส

- 5.1 การแตกตัวของน้ำ
- 5.2 นิยามของกรดและเบส
  - 5.2.1 ทฤษฎีกรด-เบสของอาร์รีเนียส
  - 5.2.2 ทฤษฎีกรด-เบสของบรอนสเตด-ลาวรี
  - 5.2.3 ทฤษฎีกรด-เบสของลิวอิส
- 5.3 ค่า pH
- 5.4 อินดิเคเตอร์กรด-เบส
- 5.5 สารละลายกรดแก่และเบสแก่
- 5.6 สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อน
- 5.7 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง pH และค่า  $K_w$
- 5.8 ปฏิกิริยาระหว่างกรดและเบส
- 5.9 กราฟของการไทเทรต
- 5.10 กรดพอลิโปรติก
- 5.11 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
  - 5.11.1 เกลือที่เกิดจากกรดแก่-เบสแก่
  - 5.11.2 เกลือที่เกิดจากกรดอ่อน-เบสแก่
  - 5.11.3 เกลือที่เกิดจากกรดแก่เบสอ่อน
- 5.12 สารละลายบัฟเฟอร์
  - 5.12.1 สารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นกรด
  - 5.12.2 สารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นเบส
- 5.13 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. บอกและสรุปนิยามของกรดและเบสได้
2. คำนวณหาความเข้มข้นหรือปริมาตรของสารที่เกี่ยวข้องกับการไทเทรตได้
3. คำนวณเกี่ยวกับการแตกตัวของกรดอ่อนและเบสอ่อนได้
4. คำนวณค่า pH ของสารละลายกรดและเบส และของสารละลายเกลือที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้
5. คำนวณและวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ได้

### กิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 5 เรื่องกรดและเบสมาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณทีละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 5 เรื่องกรดและเบส
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 5

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา



## บทที่ 5

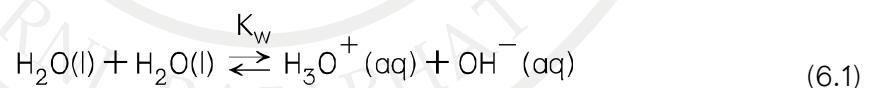
### กรดและเบส

กรดและเบสเป็นเกณฑ์อย่างหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกประเภทของสารที่พบได้บ่อยในชีวิตประจำวัน โดยลักษณะเด่นของสารประเภทกรดคือมีรสเปรี้ยว เปลี่ยนสีกระดาษลิตมัสจากน้ำเงินเป็นแดง และทำปฏิกิริยากับโลหะบางชนิด เช่น สังกะสี แล้วให้แก๊สไฮโดรเจน ส่วนสารประเภทเบสมีรสขม เปลี่ยนสีกระดาษลิตมัสจากแดงเป็นน้ำเงิน และมีลักษณะลื่นมือเมื่อถูบนผิวหนัง สารประเภทกรดและเบสเป็นกลุ่มสารที่มีลักษณะเฉพาะตัว ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง เพราะเป็นกลุ่มสารที่มีความขาดหรือเกินของประจุไฟฟ้า จึงนิยมใช้เป็นสารตั้งต้นหรือตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีบางชนิด เช่น สารในกลุ่มยารักษาโรค พอลิเมอร์ และปิโตรเคมี เป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของสารประเภทกรดและเบสที่ละลายน้ำ ทั้งนิยามของกรดและเบส สารละลายกรดแก่และเบสแก่ สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อน กรดพอลิโปรติก รวมถึงการคำนวณเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างกรดและเบส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งเนื้อหาส่วนแรกจะกล่าวถึงสมบัติของน้ำ ในฐานะตัวทำละลาย ก่อนที่จะเติมกรดหรือเบสดังต่อไปนี้

#### 5.1 การแตกตัวของน้ำ

น้ำบริสุทธิ์มีสมบัติเป็นกลาง เนื่องจากสามารถแตกตัวด้วยตัวเอง (autoionization) ให้ไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในปริมาณที่เท่ากัน (Lovett and Chang, 2005, P. 160–161) เกิดสมดุลขึ้นดังสมการ (6.1) ดังนี้



ซึ่งทั้ง  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$  และ  $\text{OH}^-(\text{aq})$  เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้สารละลายมีสภาพเป็นกรดและเบส (จะกล่าวถึงในหัวข้อ 5.2) และเรียกค่า  $K_w$  ว่าค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่า  $K_w = 10^{-14}$  ดังนั้นจึงได้ว่า

$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

แต่จากสมการ (6.1) พบว่า  $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-]$  จึงเป็นที่มาว่าน้ำบริสุทธิ์มีสภาพเป็นกลาง



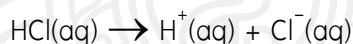
ดังนั้นน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมี  $[H_3O^+] = [OH^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}$  โมล/ลิตร ซึ่งหากมีสิ่งแปลกปลอมใดที่ละลายน้ำแล้วทำให้ความเข้มข้นของ  $H_3O^+$  เพิ่มขึ้นเกินกว่า  $10^{-7}$  โมล/ลิตร จะเท่ากับว่าลดความเข้มข้นของ  $OH^-$  ให้น้อยกว่า  $10^{-7}$  โดยอัตโนมัติ เพราะ  $[H_3O^+][OH^-]$  ต้องเท่ากับ  $10^{-14}$  เสมอ (Oxtoby, Nachtrieb, and Freeman, 1994, P. 316)

## 5.2 นิยามของกรดและเบส

คำจำกัดความของสารที่มีสมบัติเป็นกรดและเบส อ้างอิงตามคำจำกัดความหรือทฤษฎีกรด-เบสของนักเคมีที่สำคัญในอดีต ได้แก่

**5.2.1 ทฤษฎีกรด-เบสของอาร์เรเนียส** สเวนเต อาร์เรเนียส (Svante Arrhenius) นักเคมีชาวสวีเดน (มีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 1859–1927) ได้ให้นิยามของกรดและเบสไว้ในปี ค.ศ. 1884 (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 580) ดังนี้

**กรด** คือ สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวทำให้ความเข้มข้นของโปรตอน ( $H^+$ ) หรือไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เพิ่มขึ้น เช่น HCl เป็นกรดตามนิยามของอาร์เรเนียส เพราะเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้  $H^+$  ได้ตั้งสมการ



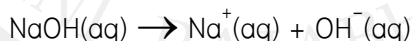
ทันทีที่โปรตอนสัมผัสกับกับน้ำจะเกิดไฮโดรเนียมไอออน ดังสมการ (6.2) ดังนี้



ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการการแตกตัวของ HCl เมื่อละลายน้ำได้คือ



**เบส** คือ สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เพิ่มขึ้น เช่น NaOH เป็นเบสตามนิยามของอาร์เรเนียส เพราะเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้  $OH^-$  ได้ตั้งสมการ



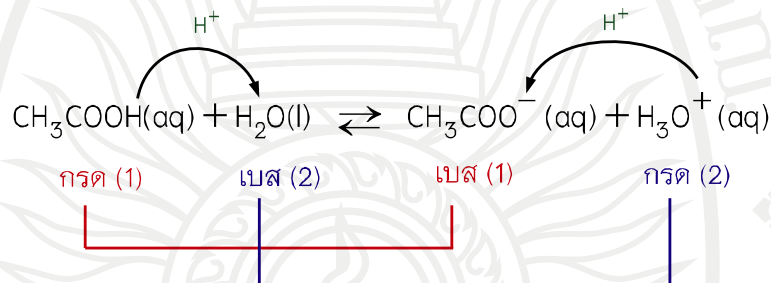
ปัญหาที่สำคัญของทฤษฎีกรด-เบสของอาร์เรเนียส คือ ครอบคลุมเฉพาะกรด-เบสที่ละลายน้ำได้เท่านั้น ไม่สามารถระบุความเป็นกรด-เบสของสารที่ไม่ละลายน้ำ และไม่สามารถระบุความเป็นกรดของสารที่ไม่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบได้ เช่น  $AlCl_3$  หรือเบสที่ไม่มีไฮดรอกไซด์ไอออน เช่น  $NH_3$  หรือ  $N(CH_3)_3$  ได้ (McMurry and Fay, 2001, P. 609) จึงมีการนิยามขึ้นใหม่โดยนักเคมีรุ่นต่อมา คือ บรอนสเตด-ลาวรี (Brønsted-Lowry) และลิวอิส (Lewis)

**5.2.2 ทฤษฎีกรด-เบสของบรอนสเตด-ลาวรี** โยฮันเนส นิโคลัส บรอนสเตด (Johannes Nicolaus Brønsted) และ ทอมัส มาร์ติน ลาวรี (Thomas Martin Lowry) นักเคมีสองคนได้ให้คำจำกัดความของกรด-เบสใหม่ ในปี ค.ศ. 1923 โดยเกี่ยวข้องกับกาถ่ายโอนโปรตอน (proton transferring) และเป็นทฤษฎีที่ครอบคลุมและอธิบายสมบัติของกรด-เบสได้ดีกว่าทฤษฎีของอาร์รีเนียส (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 581) โดยกล่าวว่า

**กรด** คือ สารที่ให้โปรตอน (proton donor) แก่เบส

**เบส** คือ สารที่รับโปรตอน (proton acceptor) จากกรด

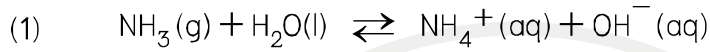
ตัวอย่างเช่น พิจารณาการแตกตัวในน้ำของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกิดสมดุลขึ้นดังสมการ



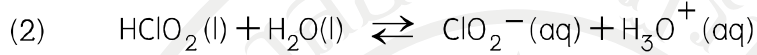
ในทิศทางไปข้างหน้า น้ำทำหน้าที่เป็นเบส เนื่องจากรับโปรตอน มาจากกรดอะซิติก และกรดอะซิติกทำหน้าที่เป็นกรด เพื่อเกิดปฏิกิริยาให้ได้อะซิเตตไอออน ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) และไฮโดรเนียมไอออน และเมื่อพิจารณาในทิศทางย้อนกลับอะซิเตตไอออนทำหน้าที่เป็นเบส เนื่องจากรับโปรตอน มาจากไฮโดรเนียมไอออนที่ทำหน้าที่เป็นกรด เพื่อเกิดปฏิกิริยาให้ได้กรดอะซิติกและน้ำ

จากตัวอย่างข้างต้น ทำให้เกิดคู่กรด-เบสขึ้น โดยกรดอะซิติกเป็นคู่กรด (1) ของอะซิเตตไอออน (เบส (1)) หรืออะซิเตตไอออนเป็นคู่เบส (1) ของกรดอะซิติก (กรด (1)) และในทำนองเดียวกัน น้ำเป็นคู่เบส (2) ของไฮโดรเนียมไอออน (กรด (2)) หรือไฮโดรเนียมไอออนเป็นคู่กรด (2) ของน้ำ (เบส (2)) โดยมีข้อสังเกตคู่กรด-เบสที่น่าสนใจคือคู่กรดจะมีไฮโดรเจนอะตอมมากกว่าคู่เบสอยู่ 1 เสมอ

ตัวอย่างที่ 5.1 จงระบุว่าสารใดมีสภาพเป็นกรดหรือเบสจากปฏิกิริยาที่กำหนดให้ต่อไปนี้



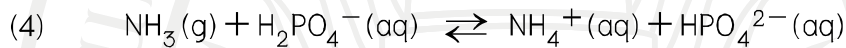
เบส (1)    กรด (2)            กรด (1)    เบส (2)



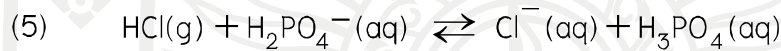
กรด (1)    เบส (2)            เบส (1)    กรด (2)



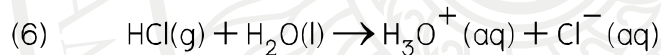
เบส (1)    กรด (2)            กรด (1)    เบส (2)



เบส (1)    กรด (2)            กรด (1)    เบส (2)



กรด (1)    เบส (2)            เบส (1)    กรด (2)



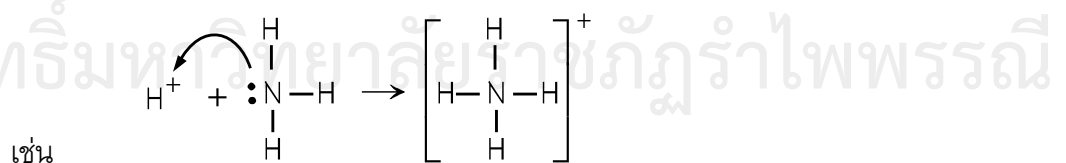
กรด (1)    เบส (2)            กรด (2)    เบส (1)

จากตัวอย่างที่ 5.1 ข้อ (1) และ ข้อ (2) จะเห็นว่าน้ำสามารถทำหน้าที่ให้และรับโปรตอนได้หรือเป็นได้ทั้งกรดและเบส เรียกสารที่มีสมบัติลักษณะนี้ว่า แอมโฟเทอริก (amphoteric) (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 581)

**5.2.3 ทฤษฎีกรด-เบสของลิวอิส** กิลเบิร์ต นิวตัน ลิวอิส (Gilbert Newton Lewis) นักเคมีชาวอเมริกัน ได้เสนอนิยามของกรด-เบสในปี ค.ศ. 1923 โดยพิจารณาการให้และการรับคู่อิเล็กตรอน (electron pair) (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 611) ซึ่งกล่าวว่า

**กรด** คือ สารที่รับคู่อิเล็กตรอน (electron pair acceptor)

**เบส** คือ สารที่ให้คู่อิเล็กตรอน (electron pair donor)



โดย  $\text{NH}_3$  เป็นเบส เนื่องจากให้คู่อิเล็กตรอนแก่  $\text{H}^+$  และ  $\text{H}^+$  เป็นกรด เนื่องจาก  
รับคู่อิเล็กตรอนมาจาก  $\text{NH}_3$

จากนิยามกรด-เบสที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปความให้ได้ความหมาย  
ครอบคลุม ดังนี้

**กรด** คือ สารที่สามารถให้โปรตอนหรือมีความสามารถที่จะสร้างพันธะโคเวเลนต์โดย  
รับคู่อิเล็กตรอนได้

**เบส** คือ สารที่สามารถสร้างพันธะโคเวเลนต์กับโปรตอนหรือให้อิเล็กตรอนแก่สารที่มี  
ออร์บิทัลว่างได้

### 5.3 ค่า pH

โดยปกติในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ความเข้มข้นของ  $\text{H}_3\text{O}^+$  มีค่าอยู่ได้ในช่วง  
10 โมล/ลิตร ถึง  $10^{-15}$  โมล/ลิตร (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 674) ซึ่งเป็นช่วง  
ที่กว้างมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงลดช่วงที่กว้างนี้ด้วยฟังก์ชันลอการิทึม และกำหนดเป็น  
ค่า pH (potential of hydrogen ion) ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] \quad (6.3)$$

สำหรับน้ำบริสุทธิ์ ที่ 25 องศาเซลเซียส ที่มีสภาพเป็นกลาง จะมี  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7}$   
โมล/ลิตร ดังนั้น  $\text{pH} = -\log (10^{-7}) = -(-7) = 7$  หรืออาจกล่าวได้ว่า น้ำบริสุทธิ์ ที่ 25 องศา  
เซลเซียส จะมีค่า  $\text{pH} = 7$

สำหรับสารละลายที่มีความเป็นกรดจะมี  $[\text{H}_3\text{O}^+] > 10^{-7}$  โมล/ลิตร เพราะด้วยอิทธิพล  
ของกรดจะทำให้  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าที่สภาวะสมดุล ดังนั้นจากสมการ (6.3) จะได้

$$-\log [\text{H}_3\text{O}^+] < -\log (10^{-7})$$

$$\text{pH} < -(-7)$$

$$\text{pH} < 7$$

สำหรับสารละลายที่มีความเป็นเบสจะมี  $[\text{OH}^-] > 10^{-7}$  โมล/ลิตร ซึ่งส่งผลให้  
 $[\text{H}_3\text{O}^+] < 10^{-7}$  โมล/ลิตร ดังนั้นจากสมการ (6.3) จะได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

$$-\log [\text{H}_3\text{O}^+] > -\log (10^{-7})$$

$$\text{pH} > -(-7)$$

$$\text{pH} > 7$$

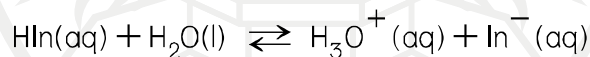
ดังนั้นสามารถสรุปความเป็นกรด-เบสของสารละลายตามค่า pH แยกเป็นกรณีได้ดังนี้

- (1) ถ้าสารละลายมีค่า pH น้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นกรด
- (2) ถ้าสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นกลาง
- (3) ถ้าสารละลายมีค่า pH มากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นเบส

ในทางปฏิบัติการวัดค่า pH ของสารละลายทำได้หลายวิธี เช่น วัดโดยการใช้พีเอชมิเตอร์ (pH meter) หรือวัดโดยการใช้อินดิเคเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 5.4 ดังนี้

#### 5.4 อินดิเคเตอร์กรด-เบส

อินดิเคเตอร์กรด-เบส (acid-base indicator) คือ สารที่ใช้บอกความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยปกติ อินดิเคเตอร์สำหรับทดสอบกรด-เบสเป็นสารอินทรีย์ (อาจเป็นกรดหรือเบสอ่อน) ซึ่งสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่ง (ที่มีสีหนึ่ง) ไปเป็นอีกรูปหนึ่ง (ที่มีสีต่างออกไป) เมื่อ pH ของสารละลายเปลี่ยน (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 579-580) เช่น ฟีนอล์ฟทาลีนจะไม่มีสีเมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH < 8.3 และจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่ออยู่ในสารละลายเบสที่มี pH > 8.3 เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์สามารถพิจารณาได้จากสมดุต่อไปนี้



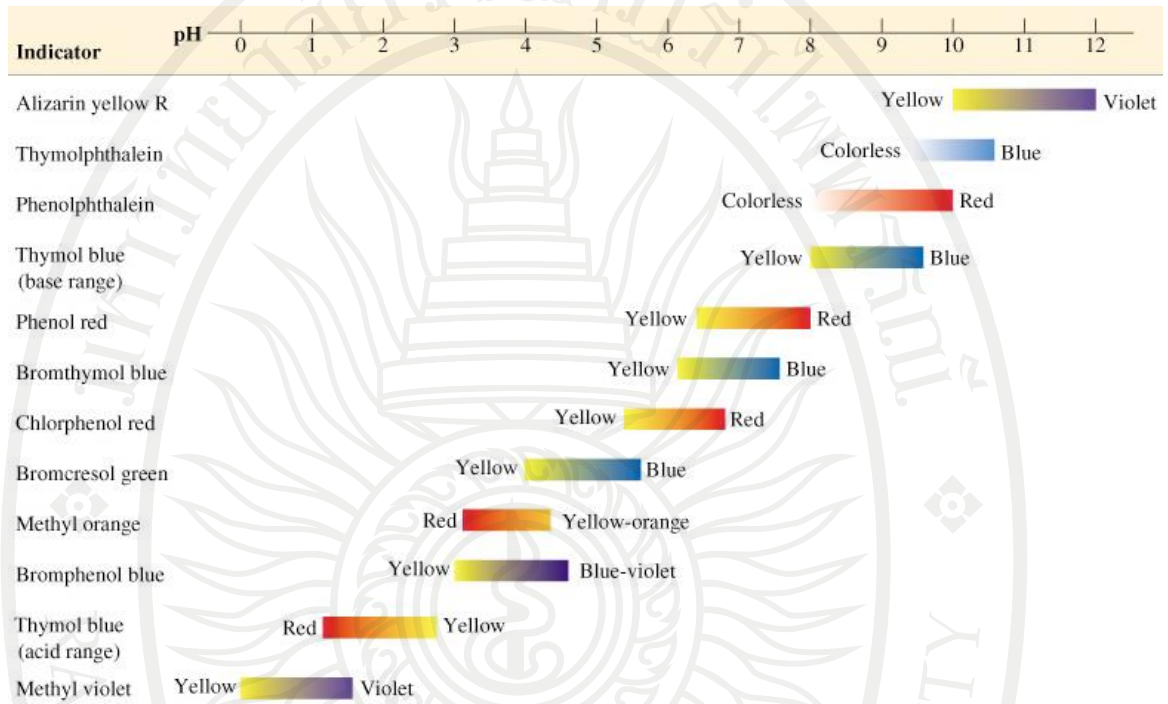
เมื่อ HIn คือ สัญลักษณ์ของอินดิเคเตอร์ที่อยู่ในรูปกรด

In<sup>-</sup> คือ สัญลักษณ์ของอินดิเคเตอร์ที่อยู่ในรูปเบส

HIn และ In<sup>-</sup> มีสีต่างกันและปริมาณต่างกัน จึงทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าปริมาณ HIn มากก็จะมีสีของรูปกรด ถ้ามีปริมาณ In<sup>-</sup> มากก็จะมีสีของรูปเบส การที่จะมีปริมาณ HIn หรือ In<sup>-</sup> มากกว่าหรือน้อยกว่านั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ในสารละลาย ในกรณีของ ฟีนอล์ฟทาลีน ถ้ามี H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> มาก (สารละลายเป็นกรด) ก็จะรวมกับ In<sup>-</sup> ได้เป็น HIn (สีไม่มีสี) ได้มาก จึงเห็นสารละลายสีไม่มีสี แต่ถ้าอยู่ในสารละลายที่มี OH<sup>-</sup> มาก (สารละลายเป็นเบส) OH<sup>-</sup> จะทำปฏิกิริยากับ H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ทำให้ H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ In<sup>-</sup> มากขึ้น จึงเห็นสารละลายในรูปของ In<sup>-</sup> คือเห็นเป็นสีชมพู



ช่วง pH ที่อินดิเคเตอร์เปลี่ยนสีจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง สารละลายจะมีสีผสมระหว่างรูปกรดและรูปเบส เรียกว่า ช่วง pH ของอินดิเคเตอร์ (pH range หรือ pH interval) ซึ่งอินดิเคเตอร์แต่ละชนิดจะมีช่วงการเปลี่ยนสีต่าง ๆ กันดังนี้



ภาพที่ 5.1 ช่วงการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์กรด-เบสชนิดต่าง ๆ (ที่มา : Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 725)

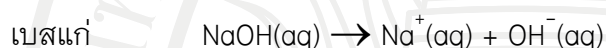
อย่างไรก็ตามอินดิเคเตอร์ชนิดหนึ่ง ๆ จะใช้หาค่า pH ของสารละลายได้อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น เช่น เมื่อนำสารละลายมาเติมเมทิลออเรนจ์ลงไป (ช่วง pH ของเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 3.0 - 4.4 และสีที่เปลี่ยนอยู่ในช่วงสีแดง-เหลือง) ถ้าสารละลายมีสีเหลืองหลังจากหยดเมทิลออเรนจ์ แสดงว่าสารละลายนี้มี pH ตั้งแต่ 4.4 ขึ้นไป ซึ่งอาจมีสมบัติเป็นกรด กลางหรือเบสก็ได้ ดังนั้น การหาค่า pH ของสารละลายหนึ่ง ๆ อาจจะต้องใช้อินดิเคเตอร์หลาย ๆ ชนิด แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ pH ของสารละลายร่วมกัน

การหา pH ของสารละลายโดยใช้อินดิเคเตอร์หลาย ๆ ชนิดนี้ ไม่สะดวกในการใช้ จึงมีการคิดที่จะนำอินดิเคเตอร์หลาย ๆ ชนิด ซึ่งเปลี่ยนสีในช่วง pH ต่าง ๆ กันมาผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม จะสามารถใช้บอกค่า pH ของสารละลายได้ละเอียดขึ้น อินดิเคเตอร์ผสมนี้ถูกเรียกว่า ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (universal indicator) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสีได้ในสารละลายที่

มี pH ต่าง ๆ กันเกือบทุกค่า การใช้ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์จะหาค่าของยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ลงในสารละลายที่ต้องการหาค่า pH ประมาณ 3 หยดต่อสารละลาย 3 cm<sup>3</sup> สังเกตสีของสารละลายแล้วเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานของยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ที่ pH ต่าง ๆ ว่าสีของสารละลายตรงกับสีมาตรฐานที่ pH ใด ก็จะมีค่าเท่ากับ pH นั้น

## 5.5 สารละลายกรดแก่และเบสแก่

สารละลายกรดแก่และสารละลายเบสแก่จะแตกตัวเป็นไอออนให้ H<sup>+</sup> และ OH<sup>-</sup> ได้หมดหรือแตกตัวเป็นไอออน 100% (ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์, 2531, หน้า 136) เช่น



ดังนั้นหากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 โมล/ลิตร จะมี H<sup>+</sup> และ Cl<sup>-</sup> เข้มข้นอย่างละ 1 โมล/ลิตรด้วย (H<sup>+</sup> จะอยู่ในรูป H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ดังสมการ (6.2)) หรือถ้าเป็นสารละลายปริมาตร 1 ลิตร จะมี H<sup>+</sup> และ Cl<sup>-</sup> อย่างละ 1 โมล และจะไม่มีกรด HCl ที่อยู่ในรูปโมเลกุล HCl ปรากฏอยู่ในสารละลาย

ในทำนองเดียวกัน หากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 โมล/ลิตร จะมี Na<sup>+</sup> และ Cl<sup>-</sup> เข้มข้นอย่างละ 1 โมล/ลิตรด้วย หรือถ้าเป็นสารละลายปริมาตร 1 ลิตร จะมี Na<sup>+</sup> และ Cl<sup>-</sup> อย่างละ 1 โมล และจะไม่มีเบส NaOH ที่อยู่ในรูปโมเลกุล NaOH ปรากฏอยู่ในสารละลาย กรดแก่และเบสแก่ที่สำคัญที่ควรรู้จัก แสดงในตารางที่ 5.1 ดังนี้

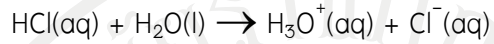
ตารางที่ 5.1 กรดแก่และเบสแก่บางชนิด

กรดแก่		เบสแก่	
สูตร	ชื่อ	สูตร	ชื่อ
HClO <sub>4</sub>	กรดเปอร์คลอริก	LiOH	ลิเทียมไฮดรอกไซด์
HCl	กรดไฮโดรคลอริก	NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	กรดซัลฟูริก	KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
HNO <sub>3</sub>	กรดไนตริก	RbOH	รูบิเดียมไฮดรอกไซด์
HI	กรดไฮโดรไอโอดิก	CsOH	ซีเซียมไฮดรอกไซด์
HBr	กรดไฮโดรโบรมิก	Ca(OH) <sub>2</sub>	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
		Sr(OH) <sub>2</sub>	สตรอนเทียมไฮดรอกไซด์
		Ba(OH) <sub>2</sub>	แบเรียมไฮดรอกไซด์



**ตัวอย่างที่ 5.2** จงหาความเข้มข้นของ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ที่อยู่ในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร และหากสารละลายมีปริมาตร 5 ลิตร จะมี  $\text{H}_3\text{O}^+$  อยู่กี่โมล

วิธีทำ HCl เป็นกรดแก่จึงแตกตัวในน้ำ 100% ดังปฏิกิริยา



เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล HCl}}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล H}_3\text{O}^+}{1}$$

(0.5 โมล/ลิตร) × (5 ลิตร)

ดังนั้น จำนวนโมล  $\text{H}_3\text{O}^+ = 2.5$  โมล

**ตัวอย่างที่ 5.3** ที่ 25 องศาเซลเซียส สารละลายที่มี  $\text{H}_3\text{O}^+$  เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จะมีความเข้มข้นของ  $\text{OH}^-$  เท่าใด และสารละลายนี้มีสมบัติเป็นกรดหรือไม่

วิธีทำ จากข้อมูลที่โจทย์ให้มา คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 0.01$  โมล/ลิตร

และ  $[\text{H}_3\text{O}^+] > 10^{-7}$  แสดงว่าสารละลายนี้มีสมบัติเป็นกรด

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ,  $K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$

ดังนั้น

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

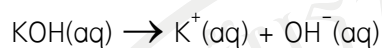
0.01 โมล/ลิตร

$$[\text{OH}^-] = 10^{-12} \text{ โมล/ลิตร}$$

**ตัวอย่างที่ 5.4** ที่ 25 องศาเซลเซียส สารละลาย KOH เข้มข้น  $2 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร ปริมาตร 0.5

ลูกบาศก์เมตร จะมี  $H^+$  อยู่กี่กรัม และคิดเป็นค่า pH เท่าใด

วิธีทำ KOH เป็นเบสแก่จึงแตกตัวในน้ำ 100% ดังปฏิกิริยา



ดังนั้น  $[OH^-] = [KOH] = 2 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ,  $K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$

ดังนั้น

$$[H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$$

$2 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

$$[H_3O^+] = \frac{10^{-14}}{2 \times 10^{-5}} = 5 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}$$

จากสมการ (6.2)  $[H_3O^+] = [H^+] = 5 \times 10^{-10}$  โมล/ลิตร

จากสมการ (6.3)  $pH = -\log [H_3O^+] = -\log (5 \times 10^{-10}) = 9.301$

ปริมาตรสารละลาย 0.5 ลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 500 ลิตร ดังนั้น

จำนวนโมลของ  $H^+$  =  $(5 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}) \times (500 \text{ ลิตร}) = 0.25 \times 10^{-6}$  โมล

น้ำหนักของ  $H^+$  =  $(0.25 \times 10^{-6} \text{ โมล}) \times (1.008 \text{ กรัม/โมล}) = 0.25 \times 10^{-6}$  กรัม

ข้อสังเกต มวลไอออนของ  $H^+$   $\approx$  มวลอะตอมของ H เพราะ อิเล็กตรอนมีมวลน้อยมาก (ประมาณ  $9.109 \times 10^{-31}$  กิโลกรัม) ดังนั้นเมื่อ H อะตอม สูญเสียอิเล็กตรอน 1 ตัว เกิดเป็น  $H^+$  จึงแทบจะไม่ทำให้มวลเดิมเปลี่ยนไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 5.5** ที่ 25 องศาเซลเซียส แก๊ส HCl 3.65 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 10 ลิตร จะมี  $[H_3O^+]$ ,  $[H^+]$ ,  $[Cl^-]$ ,  $[OH^-]$  และค่า pH เท่าใด

วิธีทำ HCl เป็นกรดแก่จึงแตกตัวในน้ำ 100% ดังปฏิกิริยา



เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\frac{3.65 \text{ กรัม}}{(1.008+35.45 \text{ กรัม/โมล})}}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล } H_3O^+}{1}$$

ดังนั้น จำนวนโมล  $H_3O^+ = 0.1$  โมล

$$[H_3O^+] = (0.1 \text{ โมล}) / (10 \text{ ลิตร}) = 0.01 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[Cl^-] = [H_3O^+] = 0.01 \text{ โมล/ลิตร}$$

จากสมการ (6.2) จะได้  $[H^+] = [H_3O^+] = 0.01$  โมล/ลิตร

จากสมการ (6.3) จะได้  $pH = -\log [H_3O^+] = -\log 0.01 = 2$

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ,  $K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$

$$\frac{0.01 \text{ โมล/ลิตร}}{[H_3O^+]} [OH^-] = 10^{-14}$$

$$[OH^-] = 10^{-12} \text{ โมล/ลิตร}$$

**ตัวอย่างที่ 5.6** สารละลาย  $HNO_3$  เข้มข้น  $2 \times 10^{-2}$  โมล/ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร มี  $NO_3^-$  อยู่กี่กรัม

วิธีทำ  $HNO_3$  เป็นกรดแก่จึงแตกตัวในน้ำ 100% ดังปฏิกิริยา



เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{(2 \times 10^{-2} \text{ โมล/ลิตร}) \times (500 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล } NO_3^-}{1}$$

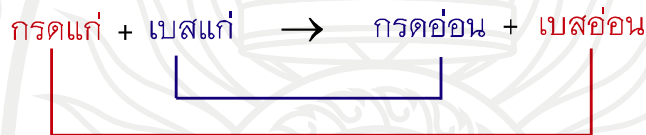
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ดังนั้น จำนวนโมล  $\text{NO}_3^- = 0.01$  โมล

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นน้ำหนัก } \text{NO}_3^- &= (0.01 \text{ โมล}) \times \{14.007 + (3 \times 15.999) \text{ กรัม/โมล}\} \\ &= 0.62 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

## 5.6 สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อน

จากทฤษฎีกรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรี พบว่าโดยปกติกรดแก่จะคู่กับเบสอ่อน และกรดอ่อนจะคู่กับเบสแก่ ทั้งนี้เนื่องจากโปรตอนจะเคลื่อนที่ไปหาเบสแก่เท่านั้น นั่นคือทิศทางของปฏิกิริยาที่จะเกิดคือทิศทางที่โปรตอนจากกรดแก่ไปหาเบสแก่ให้กลายเป็นกรดอ่อนและเบสอ่อน (McMurry and Fay, 2001, P. 612) ดังนี้



กรดแก่ เช่น  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{HNO}_3$  และ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  จึงคู่กับเบสอ่อนตามลำดับ ดังนี้  $\text{ClO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{HSO}_4^-$  ซึ่งเบสอ่อนเหล่านี้แทบจะไม่สามารถรวมตัวกับโปรตอนในน้ำแล้วกลายเป็นกรดแก่ได้ จึงถือว่าเบสอ่อนเหล่านี้มีความเป็นเบสที่อ่อนกว่าน้ำ

กรดอ่อน เช่น กรดไนโตรัส ( $\text{HNO}_2$ ), กรดไฮโดรฟลูออริก ( $\text{HF}$ ) และ กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) จะสามารถแตกตัวได้เล็กน้อยเพื่อให้  $\text{H}^+$  แก่น้ำ ดังนั้นในสารละลายจึงมีโมเลกุลของกรด (ที่ยังไม่แตกตัว)  $\text{H}_3\text{O}^+$  และไฮดรอกไซด์ อยู่ร่วมกัน หากปล่อยเวลาทิ้งไว้จะเกิดสมดุลขึ้นในสารละลาย ในกรณีของสารที่มีความเป็นกรดน้อยมาก ๆ เช่น  $\text{NH}_3$ ,  $\text{OH}^-$  และ  $\text{H}_2$  จะไม่สามารถแตกตัวให้  $\text{H}^+$  แก่น้ำได้เลย ในทางตรงกันข้ามคู่เบสของสารเหล่านี้คือ  $\text{NH}_2^-$ ,  $\text{O}^{2-}$  และ  $\text{H}^-$  เป็นเบสแก่ สามารถรวมตัวกับโปรตอนในน้ำได้ดี และถือว่ามีความเป็นเบสที่แรงกว่าน้ำ

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ความแรงของคู่กรด-เบสบางชนิด

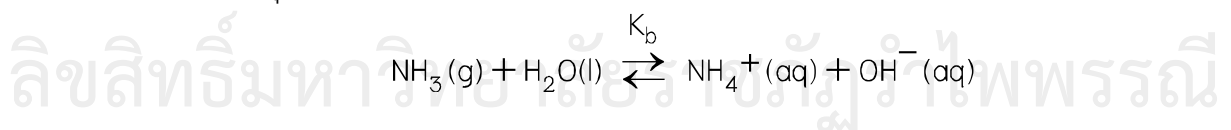
กรด	เบส
HClO <sub>4</sub>	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
HCl	Cl <sup>-</sup>
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
HNO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
HNO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
HF	F <sup>-</sup>
CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
H <sub>2</sub> S	HS <sup>-</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub>
HCN	CN <sup>-</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
H <sub>2</sub> O	OH <sup>-</sup>
NH <sub>3</sub>	NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>
OH <sup>-</sup>	O <sup>2-</sup>
H <sub>2</sub>	H <sup>-</sup>

↑ กรดแก่  
↓ กรดอ่อน  
↓ เบสอ่อน  
↑ เบสแก่

กรดแก่: HClO<sub>4</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>  
 กรดอ่อน: H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, HNO<sub>2</sub>, HF, CH<sub>3</sub>COOH, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, HCN, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
 กรดอ่อน (ที่่สุด): H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>  
 เบสอ่อน (ที่่สุด): ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
 เบสอ่อน: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HS<sup>-</sup>, NH<sub>3</sub>, CN<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>  
 เบสแก่: NH<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>2-</sup>, H<sup>-</sup>

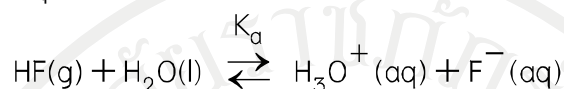
(ที่มา : McMurry and Fay, 2001, P. 613)

ในสารละลายแอมโมเนียที่มี NH<sub>3</sub>(g) กับ H<sub>2</sub>O(l) ผสมอยู่ร่วมกัน เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5.1 จึงพบว่า NH<sub>3</sub> ทำหน้าที่เป็นเบสและ H<sub>2</sub>O ทำหน้าที่เป็นกรด แต่ NH<sub>3</sub> เป็นเบสอ่อน ดังนั้นจึงเกิดสมดุลขึ้นดังนี้



เรียกค่า  $K_b$  ว่า ค่าคงที่การแตกตัวของเบส (base ionization equilibrium constant)

ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่มี HF(g) กับ H<sub>2</sub>O(l) ผสมอยู่ร่วมกัน เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5.1 จึงพบว่า HF ทำหน้าที่เป็นกรดและ H<sub>2</sub>O ทำหน้าที่เป็นเบส แต่ HF เป็นกรดอ่อน ดังนั้นจึงเกิดสมดุลขึ้นดังนี้



เรียกค่า  $K_a$  ว่า ค่าคงที่การแตกตัวของกรด (acid ionization equilibrium constant)

การคำนวณเกี่ยวกับสมดุลของกรดอ่อนและเบสอ่อนอยู่บนพื้นฐานของสมดุลเคมี (ดูรายละเอียดในบทที่ 3) ซึ่งสามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 5.7** สารละลายกรดอะซิติก ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ 4.2% จะมีค่าคงที่การแตกตัวของกรด ( $K_a$ ) เท่าใด

วิธีทำ กรดอะซิติกแตกตัวเป็นไอออน 4.2% หมายความว่า

ถ้ามีกรด 100 โมล/ลิตร จะแตกตัวให้ H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> 4.2 โมล/ลิตร (ณ สมดุล)

ดังนั้น ถ้ามีกรด 0.01 โมล/ลิตร จะแตกตัวให้ H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> = (4.2×0.01/100)

$$= 4.2 \times 10^{-4} \text{ โมล/ลิตร}$$

พิจารณาสารทุกตัวในระบบ ณ สมดุล จึงได้ดังนี้

	CH <sub>3</sub> COOH(aq)	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> (aq)	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> (aq)
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, โมล/ลิตร	0.01	0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, โมล/ลิตร	0.01 - (4.2×10 <sup>-4</sup> )	4.2×10 <sup>-4</sup>	4.2×10 <sup>-4</sup>

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

$$= \frac{(4.2 \times 10^{-4})(4.2 \times 10^{-4})}{0.01 - (4.2 \times 10^{-4})}$$

$$= 1.84 \times 10^{-5}$$



**ตัวอย่างที่ 5.8** จงคำนวณหาความเข้มข้นของ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ของสารละลายกรดอะซิติก ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร เมื่อ  $K_a$  ของกรดนี้มีค่าเท่ากับ  $1.8 \times 10^{-5}$

วิธีทำ สมมติให้ ณ สมดุลมี  $[\text{H}_3\text{O}^+] = x$  โมล/ลิตร

พิจารณาสารทุกตัวในระบบ ณ สมดุล จึงได้ดังนี้

$\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq})$			
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, โมล/ลิตร	0.1	0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, โมล/ลิตร	$0.1 - x$	$x$	$x$

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

$$1.8 \times 10^{-5} = \frac{x^2}{0.1 - x}$$

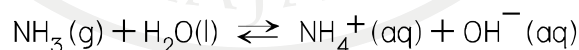
เนื่องจากค่า  $K_a$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสามารถประมาณค่า  $0.1 - x \approx 0.1$  เพื่อให้สามารถ

แก้สมการหาค่า  $x$  ได้ง่ายขึ้น

จะได้ ค่า  $x = 1.34 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร

ดังนั้น จะมี  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1.34 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร

**ตัวอย่างที่ 5.9** แก๊สแอมโมเนียละลายน้ำดังสมการ



ถ้าในเวลาเริ่มต้นมีแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ) เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร เมื่อถึงสมดุลจะมี  $\text{OH}^-$  เข้มข้นเท่าใด (กำหนดค่า  $K_b$  ของแอมโมเนียเท่ากับ  $1.8 \times 10^{-5}$ )

วิธีทำ สมมติให้ ณ สมดุลมี  $[\text{OH}^-] = x$  โมล/ลิตร

พิจารณาสารทุกตัวในระบบ ณ สมดุล จึงได้ดังนี้

$\text{NH}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$			
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, โมล/ลิตร	0.1	0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, โมล/ลิตร	0.1-x	x	x

$$K_b = \frac{[\text{NH}_4^+][\text{OH}^-]}{[\text{NH}_4\text{OH}]}$$

มาจาก  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

$$1.8 \times 10^{-5} = \frac{x^2}{0.1 - x}$$

เนื่องจากค่า  $K_b$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสามารถประมาณค่า  $0.1 - x \approx 0.1$  เพื่อให้สามารถแก้สมการหาค่า  $x$  ได้ง่ายขึ้น

จะได้ ค่า  $x = 1.34 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร

ดังนั้น จะมี  $[\text{OH}^-] = 1.34 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร

**ตัวอย่างที่ 5.10** จงคำนวณหาค่า pH ของสารละลายเบสอ่อน  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร (เตรียมจากสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น) ถ้าเบสนี้แตกตัว 4.1% ที่ 25 องศาเซลเซียส วิธีทำ แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ 4.1% หมายความว่า

ถ้ามีเบส 100 โมล/ลิตร จะแตกตัวให้  $\text{OH}^-$  4.1 โมล/ลิตร (ณ สมดุล)

ดังนั้น ถ้ามีเบส 0.1 โมล/ลิตร จะแตกตัวให้  $\text{OH}^- = (4.1 \times 0.1 / 100)$

$$= 4.1 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ,  $K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$

$$4.1 \times 10^{-3} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 2.439 \times 10^{-12} \text{ โมล/ลิตร}$$

จากสมการ (6.3)  $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (2.439 \times 10^{-12})$

ดังนั้น

$$\text{pH} = 11.613$$

**ตัวอย่างที่ 5.11** จงคำนวณหาค่า pH ของสารละลายกรดอ่อน HCN เข้มข้น 1 โมล/ลิตร

(กำหนด  $K_a = 4 \times 10^{-10}$ )

วิธีทำ สมมติให้ ณ สมดุลมี  $[H_3O^+] = x$  โมล/ลิตร

พิจารณาสารทุกตัวในระบบ ณ สมดุล จึงได้ดังนี้

	HCN(aq)	H <sub>2</sub> O(l)	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> (aq)	CN <sup>-</sup> (aq)
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, โมล/ลิตร	1		0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, โมล/ลิตร	1-x		x	x

$$K_a = \frac{[H_3O^+][CN^-]}{[HCN]}$$

$$4 \times 10^{-10} = \frac{x^2}{1-x}$$

เนื่องจากค่า  $K_a$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสามารถประมาณค่า  $1-x \approx 1$  เพื่อให้สามารถ

แก้สมการหาค่า  $x$  ได้ง่ายขึ้น

จะได้ ค่า  $x = 2 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

ดังนั้น จะมี  $[H_3O^+] = 2 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

จากสมการ (6.3)  $pH = -\log [H_3O^+] = -\log (2 \times 10^{-5}) = 4.7$

### 5.7 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง pH และค่า $K_w$

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส,  $K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$

ใส่  $-\log$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$-\log \{ [H_3O^+][OH^-] \} = -\log (10^{-14})$$

$$-\log [H_3O^+] - \log [OH^-] = -(-14)$$

กำหนดให้  $-\log [OH^-]$  มีค่าเท่ากับ pOH (potential of hydroxide)

ดังนั้น 
$$pH + pOH = 14 \quad (6.4)$$

**ตัวอย่างที่ 5.12** จากตัวอย่างที่ 5.11 จงคำนวณหาค่า pOH

วิธีทำ จากสมการ (6.4)  $pH + pOH = 14$

$$4.7 + pOH = 14$$

ดังนั้น 
$$pOH = 14 - 4.7 = 9.3$$

**ตัวอย่างที่ 5.13** สารละลาย NaOH มีค่า pH = 10.3 จะมี  $[H_3O^+]$  และ  $[OH^-]$  เท่าใด

วิธีทำ จากสมการ (6.3) จะได้  $[H_3O^+] = 10^{-pH}$   
 $= 10^{-10.3} = 5.012 \times 10^{-11}$  โมล/ลิตร

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส,  $K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$

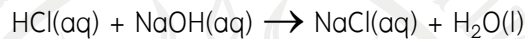
$$5.012 \times 10^{-11} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$$

จะได้  $[OH^-] = 1.995 \times 10^{-4}$  โมล/ลิตร

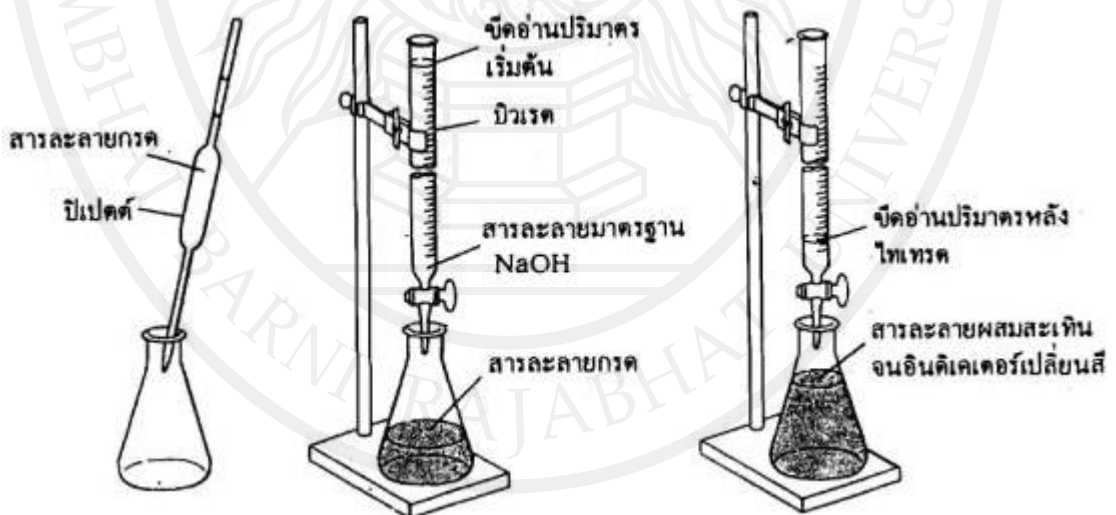
## 5.8 ปฏิกริยาระหว่างกรดและเบส

ปฏิกริยาระหว่างกรดและเบส หรือปฏิกริยาการสะเทิน (neutralization) เกิดขึ้นเมื่อจำนวนโมล ของ  $H^+$  จากกรด (ในรูป  $H_3O^+$ ) ทำปฏิกริยาพอดีกับจำนวนโมลของ  $OH^-$  เกิดเป็นน้ำ ส่วนไอออนบวกจากเบส และไอออนลบจากกรดจะรวมตัวกันเป็นเกลือ เช่น ปฏิกริยาระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนี้



ปฏิกริยาการสะเทินนี้สามารถใช้หาปริมาณหรือความเข้มข้นของสารที่เป็นกรดหรือเบสได้ โดยใช้วิธีที่สารละลายตัวอย่างที่เป็นกรดหรือเบส ทำปฏิกริยากับสารละลายที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (เรียกว่า สารละลายมาตรฐาน) ซึ่งเป็นเบสหรือกรด แล้ววัดปริมาตรของสารละลายทั้งสองที่เข้าทำปฏิกริยาพอดีกัน วิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า วิธีการไทเทรต (titration)

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการไทเทรตแสดงในภาพที่ 5.2 ซึ่งประกอบด้วยบิวเรตที่บรรจุกรดหรือเบส และขวดรูปชมพู่ที่บรรจุเบสหรือกรด (โดยปกติจะใช้ปิเปตตวงสารเพื่อทราบปริมาตรที่แน่นอน) ก่อนเริ่มการไทเทรตจะต้องหยดอินดิเคเตอร์ลงไปเพื่อแสดงจุดสะเทิน ซึ่งอินดิเคเตอร์ที่เลือกใช้ควรจะเปลี่ยนสีที่จุดสะเทินพอดี จากนั้นทำการไทเทรตจนอินดิเคเตอร์เปลี่ยนสี แล้วอ่านปริมาตรของสารในบิวเรตที่ใช้ไปทั้งหมด



ภาพที่ 5.2 วิธีการไทเทรต

(ที่มา : สำนักงานส่งเสริมการศึกษานอกระบบและการศึกษาตามอัธยาศัย, 2556)

ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตกรด-เบส คือ ปริมาตรของสารในบิวเรตที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาสะเทิน โดยสัดส่วนโมลในการทำปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ที่แตกตัวออกมาจากรด และปริมาณ  $\text{OH}^-$  ที่มาจากเบสต้องทำปฏิกิริยาพอดีกัน ในการคำนวณจะใช้วิธีการเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์เหมือนกับปฏิกิริยาเคมีทั่ว ๆ ไป ซึ่งศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 5.14** ไทเทรตสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.25 โมล/ลิตร จำนวน 24 มิลลิลิตร (อยู่ในขวดรูปชมพู่) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต จะต้องใช้เบสนี้กี่มิลลิลิตร

วิธีทำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  $\text{HCl}(\text{aq}) + \text{NaOH}(\text{aq}) \rightarrow \text{NaCl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

สมมติให้ใช้เบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ปริมาตร  $y$  มิลลิลิตร ในการสะเทินกรด เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล HCl}}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล NaOH}}{1}$$

$$(0.25 \text{ โมล/ลิตร}) \times (24 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = (0.3 \text{ โมล/ลิตร}) \times (y \times 10^{-3} \text{ ลิตร})$$

แก้สมการหาค่า  $y$  ได้ ค่า  $y = 20$  มิลลิลิตร

ข้อสังเกต โดยปกติการไทเทรตกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ไม่ว่าจะรู้ความเข้มข้นหรือไม่) จะให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บรรจุอยู่ในบิวเรตเสมอ เพื่อลดการสัมผัสกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในอากาศ

**ตัวอย่างที่ 5.15** ถ้านำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 40 มิลลิลิตร มาผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.45 โมล/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร จงหา pH ของสารละลายหลังการผสม

วิธีทำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ  $\text{HCl}(\text{aq}) + \text{NaOH}(\text{aq}) \rightarrow \text{NaCl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

เนื่องจากปริมาณสารตั้งต้นถูกกำหนดขึ้นมา 2 ชนิด ดังนั้นต้องหาสารกำหนดปริมาณ ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



$$\frac{(0.45 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{1} > \frac{(0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (40 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{1}$$

จำนวนโมล HCl > จำนวนโมล NaOH

แสดงว่า NaOH เป็นสารกำหนดปริมาณ (ถูกใช้ไปหมดก่อน)

และมี HCl เหลือ ดังนั้นต้องคำนวณหาว่า HCl มีเหลืออยู่เท่าใด ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมล HCl ที่มีอยู่ก่อนทำปฏิกิริยา} &= (0.45 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) \\ &= 4.5 \times 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

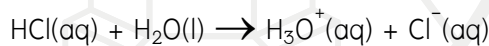
จากสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล HCl ที่ทำปฏิกิริยาหายไป}}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล NaOH}}{1}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น จำนวนโมล HCl ที่ทำปฏิกิริยาหายไป} &= (0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (40 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) \\ &= 4 \times 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ จำนวนโมล HCl ที่เหลือ} &= (\text{จำนวนโมล HCl ที่มีอยู่ก่อนทำปฏิกิริยา}) - \\ &\quad (\text{จำนวนโมล HCl ที่ทำปฏิกิริยา}) \\ &= (4.5 \times 10^{-3}) - (4 \times 10^{-3}) \\ &= 0.5 \times 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

HCl ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยา จะแตกตัวในน้ำให้  $\text{H}_3\text{O}^+$  ซึ่งมีจำนวนโมลเท่ากัน ดังนี้



คำนวณหา

$$\begin{aligned} [\text{H}_3\text{O}^+] &= \frac{\text{จำนวนโมล H}_3\text{O}^+}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} = \frac{0.5 \times 10^{-3} \text{ โมล}}{(40 + 10) \times 10^{-3} \text{ ลิตร}} \\ &= 0.01 \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการ (6.3)} \quad \text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$= -\log (0.01)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 5.16** ในการทำให้สารละลายกรดไนตริก ปริมาตร 400 มิลลิลิตร เป็นกลางจะต้องใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ของแข็ง) จำนวน 12 กรัม จงหาความเข้มข้น (โมล/ลิตร) ของสารละลายกรดไนตริกนี้

วิธีทำ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น คือ  $2\text{HNO}_3(\text{aq}) + \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

สมมติว่าใช้กรดไนตริก มีความเข้มข้น  $x$  โมล/ลิตร

เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล HNO}_3}{2} = \frac{\text{จำนวนโมล Ca(OH)}_2}{1}$$

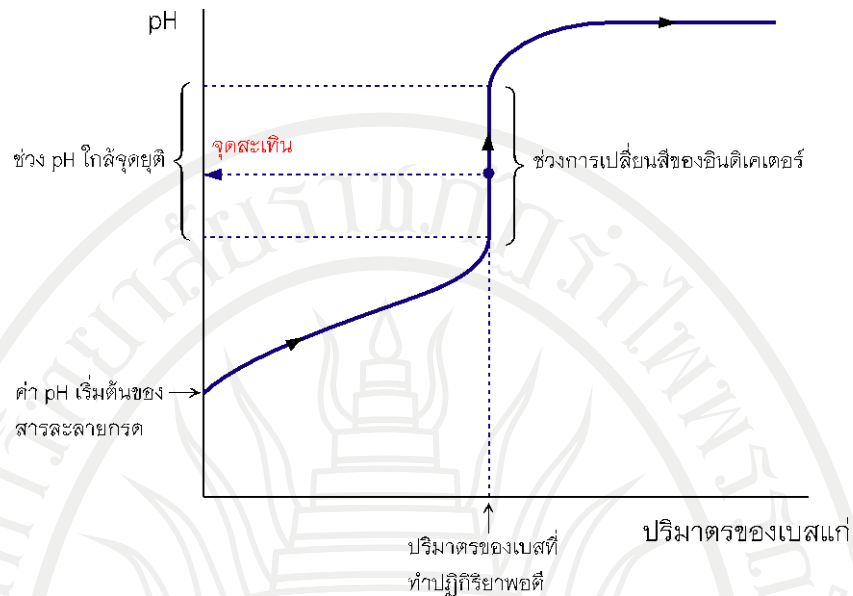
$$\frac{(x \text{ โมล/ลิตร}) \times (400 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{2} = \frac{12 \text{ กรัม}}{40.078 + (2 \times 1.008) + (2 \times 15.999) \text{ กรัม/โมล}}$$

แก้สมการหาค่า  $x$  จะได้ ค่า  $x = 0.81$  โมล/ลิตร

## 5.9 กราฟของการไทเทรต

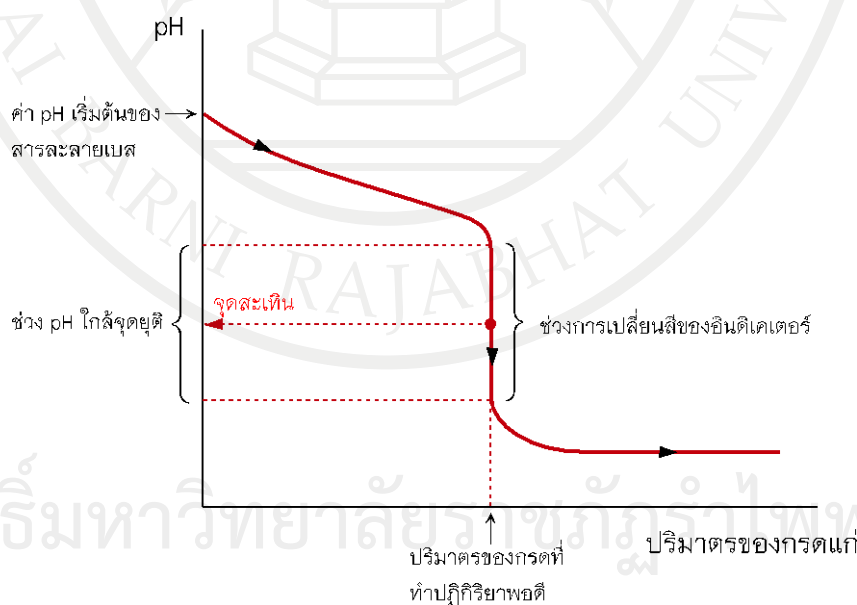
การไทเทรตสารละลายกรดด้วยสารละลายเบสแก่ โดยใส่เบสแก่ลงไปในกรดเรื่อย ๆ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่า pH ดังแสดงในภาพที่ 5.3 ซึ่งพบว่าจะทำให้ค่า pH ของสารละลายกรดเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับค่า pH ตอนเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะปริมาณของ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ถูกทำให้หายไปเนื่องจากการสะเทินกับ  $\text{OH}^-$  ที่มาจากเบสแก่ หลังจากปริมาณของเบสที่หยดลงไปสะเทินพอดีกับกรด ณ จุดสะเทิน ปริมาตรของเบสแก่ที่เพิ่มลงไปอีกเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่า pH ของสารละลายนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณเบสลงไปอีกจะทำให้สารละลายนั้นมีสภาพเป็นเบส

ในการหาจุดสะเทินของการไทเทรต หากเลือกใช้อินดิเคเตอร์ที่มีช่วงการเปลี่ยนสี ณ จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH อย่างมาก จะใช้เป็นตัวบอกจุดยุติของการไทเทรตได้ (โดยปกติจุดยุติการไทเทรตกับจุดสะเทินจะต้องใกล้เคียงกันมาก ๆ) การไทเทรตกรดแก่ด้วยเบสแก่จะให้สารละลายที่มีสภาพเป็นกลาง (ดูหัวข้อ 5.11) ดังนั้นจากภาพที่ 5.1 อินดิเคเตอร์ (ที่เปลี่ยนสีในช่วง  $\text{pH} \approx 7$ ) ที่ควรเลือกใช้ เช่น ฟีนอลเรด (phenol red) หรือบรอมไทมอลบลู (bromthymol blue) เป็นต้น แต่หากเป็นการไทเทรตกรดอ่อนด้วยเบสแก่จะให้สารละลายที่มีสภาพเป็นเบส (ดูหัวข้อ 5.11) จากภาพที่ 5.1 อินดิเคเตอร์ (ที่จะเปลี่ยนสีในช่วง  $\text{pH} > 7$ ) ที่ควรเลือกใช้ เช่น ไทมอลอล์ฟทาลีน (thymolphthalein) หรือฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นต้น



ภาพที่ 5.3 การไทเทรตกรดด้วยเบสแก่

การไทเทรตสารละลายเบสด้วยสารละลายกรดแก่ โดยใส่กรดแก่ลงไปในเบสเรื่อย ๆ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่า pH ดังแสดงในภาพที่ 5.4 ซึ่งพบว่าจะทำให้ค่า pH ของสารละลายเบสลดลง เมื่อเทียบกับค่า pH ตอนเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะปริมาณของ  $H_3O^+$  ถูกทำให้เพิ่มขึ้น หลังจากปริมาณของกรดที่หยดลงไปสะเทินพอดีกับเบส ณ จุดสะเทิน ปริมาตรของกรดแก่ที่เพิ่มลงไปอีกเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่า pH ของสารละลายนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดแก่ลงไปอีกจะทำให้สารละลายนั้นมีสภาพเป็นกรด



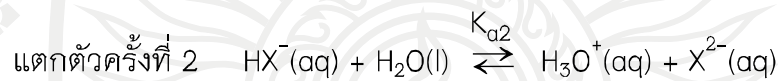
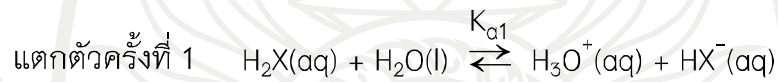
ภาพที่ 5.4 การไทเทรตเบสด้วยกรดแก่

การไทเทรตเบสอ่อนด้วยกรดแก่จะให้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด (ดูหัวข้อ 5.11) จากภาพที่ 5.1 อินดิเคเตอร์ (ที่จะเปลี่ยนสีในช่วง pH < 7) ที่ควรเลือกใช้ เช่น เมทิลเรด (methyl red) หรือ บรอมฟีนอลบลู (bromphenol blue) เป็นต้น

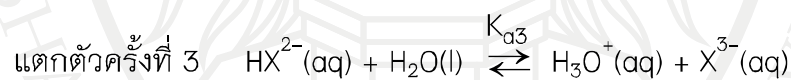
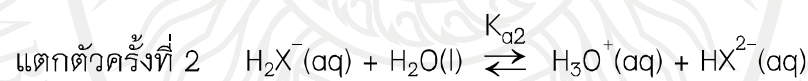
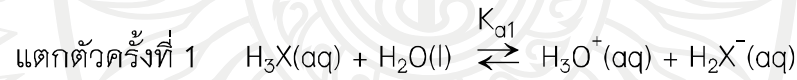
### 5.10 กรดพอลิโปรติก

กรดพอลิโปรติก (polyprotic acid) คือ กรดที่สามารถแตกตัวในน้ำแล้วให้โปรตอน (ในรูป  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) ได้มากกว่า 1 ตัว แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ กรดที่แตกตัวให้โปรตอนได้ 2 ตัว หรือเรียกว่า กรดไดโปรติก (diprotic acid) เช่น  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  เป็นต้น และกรดที่แตกตัวให้โปรตอนได้ 3 ตัว หรือเรียกว่า กรดไตรโปรติก (triprotic acid) เช่น  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  เป็นต้น การแตกตัวของกรดพอลิโปรติกในน้ำแสดงได้ดังนี้

กรดไดโปรติก (ใช้สัญลักษณ์  $\text{H}_2\text{X}$ )



กรดไตรโปรติก (ใช้สัญลักษณ์  $\text{H}_3\text{X}$ )



ค่า  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$  และ  $K_{a3}$  เรียกว่า ค่าคงที่การแตกตัวของกรดครั้งที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติ  $K_{a1} \gg K_{a2} \gg K_{a3}$  หมายความว่า การแตกตัวครั้งที่ 1 จะให้  $\text{H}_3\text{O}^+$  มากที่สุด และมากกว่าครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ตามลำดับ สำหรับกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งเป็นกรดแก่ การแตกตัวครั้งที่ 1 จึงไม่มีสมดุลเกิดขึ้น ส่วนการแตกตัวครั้งที่ 2 จะมีค่า  $K_{a2} = 1.1 \times 10^{-2}$  ค่าคงที่การแตกตัวของกรดชนิดอื่นแสดงในตารางที่ 5.3 ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่การแตกตัวของกรดบางชนิดในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส

กรด	การแตกตัว	$K_a$
กรดซัลฟูริก	$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HSO}_4^-(\text{aq})$	-
	$\text{HSO}_4^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$	$1.1 \times 10^{-2}$
กรดซัลฟูรัส	$\text{H}_2\text{SO}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HSO}_3^-(\text{aq})$	$1.3 \times 10^{-2}$
	$\text{HSO}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{SO}_3^{2-}(\text{aq})$	$6.3 \times 10^{-8}$
กรดคาร์บอนิก	$\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HCO}_3^-(\text{aq})$	$4.2 \times 10^{-7}$
	$\text{HCO}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$	$5.6 \times 10^{-11}$
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	$\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HS}^-(\text{aq})$	$1.1 \times 10^{-7}$
	$\text{HS}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{S}^{2-}(\text{aq})$	$1.1 \times 10^{-14}$
กรดฟอสฟอริก	$\text{H}_3\text{PO}_4(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{PO}_4^-(\text{aq})$	$5.9 \times 10^{-3}$
	$\text{H}_2\text{PO}_4^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HPO}_4^{2-}(\text{aq})$	$6.2 \times 10^{-8}$
	$\text{HPO}_4^{2-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{PO}_4^{3-}(\text{aq})$	$4.8 \times 10^{-13}$
กรดอะซิติก	$\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq})$	$1.8 \times 10^{-5}$
กรดฟอร์มิก	$\text{HCOOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HCOO}^-(\text{aq})$	$1.8 \times 10^{-4}$
กรดไฮโปคลอรัส	$\text{HClO}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{ClO}^-(\text{aq})$	$2.95 \times 10^{-8}$
กรดคลอรัส	$\text{HClO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{ClO}_2^-(\text{aq})$	$1.2 \times 10^{-2}$
กรดไฮโดรฟลูออริก	$\text{HF}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{F}^-(\text{aq})$	$6.7 \times 10^{-4}$
กรดไนตริก	$\text{HNO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{NO}_2^-(\text{aq})$	$5.13 \times 10^{-4}$
กรดไฮโดรไซยานิก	$\text{HCN}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{CN}^-(\text{aq})$	$4.0 \times 10^{-10}$

(ที่มา : วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์, 2541, หน้า 184)

**ตัวอย่างที่ 5.17** จงหาความเข้มข้นของ  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{PO}_4^{3-}$  ของสารละลายกรด  $\text{H}_3\text{PO}_4$  เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร (กำหนดค่า  $K_{a1} = 5.9 \times 10^{-3}$ ,  $K_{a2} = 6.2 \times 10^{-8}$ ,  $K_{a3} = 4.8 \times 10^{-13}$ )

วิธีทำ

พิจารณาการแตกตัวครั้งที่ 1 คือ  $\text{H}_3\text{PO}_4(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightleftharpoons{K_{a1}} \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{PO}_4^-(\text{aq})$

สมมติให้  $x$  คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  ที่มาจากการแตกตัวของ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $[\text{H}_2\text{PO}_4^-]$ )

ดังนั้นจากค่าคงที่สมดุล

$$K_{a1} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{H}_2\text{PO}_4^-]}{[\text{H}_3\text{PO}_4]}$$

$$5.9 \times 10^{-3} = \frac{x^2}{0.1 - x}$$

แก้สมการหาค่า  $x$  ได้ค่า  $x = 0.02152$  โมล/ลิตร

พิจารณาการแตกตัวครั้งที่ 2 คือ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightleftharpoons{K_{a2}} \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HPO}_4^{2-}(\text{aq})$

สมมติให้  $y$  คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  ที่มาจากการแตกตัวของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $[\text{HPO}_4^{2-}]$ )

ดังนั้นจากค่าคงที่สมดุล

$$K_{a2} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{HPO}_4^{2-}]}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]}$$

$$6.2 \times 10^{-8} = \frac{(0.02152 + y)(y)}{(0.02152 - y)}$$

เนื่องจาก  $K_{a2}$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก แสดงว่า  $y$  ต้องมีค่าน้อย ๆ ดังนั้นจึงประมาณค่าได้ดังนี้

$$6.2 \times 10^{-8} = \frac{\overset{0.02152 \text{ เพราะ } 0.02152 \gg y}{(0.02152 + y)}(y)}{\underset{0.02152 \text{ เพราะ } 0.02152 \gg y}{(0.02152 - y)}} \approx \frac{(0.02152)(y)}{(0.02152)}$$

ดังนั้น  $y = 6.2 \times 10^{-8}$  โมล/ลิตร



พิจารณาการแตกตัวครั้งที่ 3 คือ  $\text{HPO}_4^{2-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightleftharpoons{K_{a3}} \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{PO}_4^{3-}(\text{aq})$

สมมติให้  $z$  คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  ที่มาจากการแตกตัวของ  $\text{HPO}_4^{2-}$  (ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $[\text{PO}_4^{3-}]$ )

ดังนั้นจากค่าคงที่สมดุล

$$K_{a3} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{PO}_4^{3-}]}{[\text{HPO}_4^{2-}]}$$

$$4.8 \times 10^{-13} = \frac{(0.02152 + 6.2 \times 10^{-8} + z)(z)}{(6.2 \times 10^{-8} - z)}$$

เนื่องจาก  $K_{a3}$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก แสดงว่า  $z$  ต้องมีค่าน้อย ๆ ดังนั้นจึงประมาณค่าได้ดังนี้

$$4.8 \times 10^{-13} = \frac{(0.02152 + \overset{0.02152 \text{ เพราะ } 0.02152 \gg 6.2 \times 10^{-8} \gg z}{6.2 \times 10^{-8}} + z)(z)}{\underset{6.2 \times 10^{-8} \text{ เพราะ } 6.2 \times 10^{-8} \gg z}{(6.2 \times 10^{-8} - z)}} \approx \frac{(0.02152)(z)}{(6.2 \times 10^{-8})}$$

ดังนั้น  $z = 1.383 \times 10^{-18}$  โมล/ลิตร

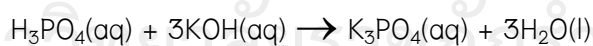
สรุป  $[\text{H}_3\text{O}^+] = x + y + z \approx x = 0.02152$  โมล/ลิตร

$[\text{H}_2\text{PO}_4^-] = 0.02152 - y \approx 0.02152$  โมล/ลิตร

$[\text{HPO}_4^{2-}] = 6.2 \times 10^{-8} - z \approx 6.2 \times 10^{-8}$  โมล/ลิตร

$[\text{PO}_4^{3-}] = z = 1.383 \times 10^{-18}$  โมล/ลิตร

**ตัวอย่างที่ 5.18** ถ้าต้องการทำให้สารละลายกรด  $\text{H}_3\text{PO}_4$  เข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เกิดปฏิกิริยาสะเทิน จะต้องใช้สารละลาย  $\text{KOH}$  เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ปริมาตรเท่าใด  
วิธีทำ การไทเทรตกรดพอลิโปรติกให้พิจารณาว่ากรดนั้นแตกตัวให้  $\text{H}^+$  ได้หมด แล้วคำนวณสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ตามปกติ ดังนี้



เมื่อเทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์จะได้

$$\frac{\text{จำนวนโมล H}_3\text{PO}_4}{1} = \frac{\text{จำนวนโมล KOH}}{3}$$

สมมติให้ V คือ ปริมาตรของ KOH ที่ทำปฏิกิริยาพอดี

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{(0.5 \text{ โมล/ลิตร}) \times (100 \times 10^{-3} \text{ ลิตร})}{1} = \frac{(0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (V \text{ ลิตร})}{3}$$

แก้สมการหาค่า V จะได้ค่า V = 1.5 ลิตร

**ตัวอย่างที่ 5.19** กรดไฮโปคลอรัส (HClO) เข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร มีค่า pH = 4.08 จะมีค่า  $K_a$  เท่าใด

วิธีทำ กรดไฮโปคลอรัสเป็นกรดอ่อนและแตกตัวได้ในน้ำ

สมมติให้ x คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  ณ สมดุล

เมื่อพิจารณาสารทุกตัวในระบบ ณ สมดุล จึงได้

	$\text{HClO(aq)} + \text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{ClO}^-(\text{aq})$		
ความเข้มข้นก่อนสมดุล, โมล/ลิตร	0.2	0	0
ความเข้มข้น ณ สมดุล, โมล/ลิตร	0.2-x	x	x

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

จากข้อมูลโจทย์ ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 4.08 แสดงว่า

$$-\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 4.08$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-4.08} = 8.318 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

ดังนั้น ณ สมดุล  $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{ClO}^-] = 8.318 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$

$$[\text{HClO}] = 0.2 - (8.318 \times 10^{-5}) \approx 0.2 \text{ โมล/ลิตร}$$

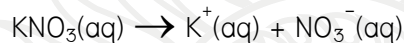
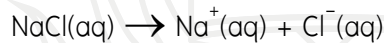
$$K_a = \frac{(8.318 \times 10^{-5})^2}{0.2} = 3.459 \times 10^{-8}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## 5.11 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) คือ ปฏิกิริยาของสารกับน้ำ (Lewis and Evans, 2006, P. 296) โดยในที่นี้หมายถึงปฏิกิริยาของเกลือ (ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดและเบส) กับน้ำ ซึ่งเมื่อเกลือละลายน้ำจะสามารถแตกตัวเป็นไอออน และถ้าไอออนเหล่านั้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ จะทำให้เกิด  $\text{H}_3\text{O}^+$  หรือ  $\text{OH}^-$  ซึ่งมีผลทำให้สารละลายมีสมบัติเป็นกรดหรือเบสได้ ดังนั้นเมื่อเกลือละลายน้ำอาจทำให้สารละลายที่ได้มีสภาพเป็นกลาง (ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส) เป็นกรดหรือเบส (เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส) ซึ่งแยกพิจารณาเป็นกรณีได้ดังนี้

**5.11.1 เกลือที่เกิดจากกรดแก่-เบสแก่** เช่น  $\text{NaCl}$  (เกิดจาก  $\text{HCl}$  กับ  $\text{NaOH}$ ),  $\text{KNO}_3$  (เกิดจาก  $\text{HNO}_3$  กับ  $\text{KOH}$ ), และ  $\text{NaNO}_3$  (เกิดจาก  $\text{HNO}_3$  กับ  $\text{NaOH}$ ) เป็นต้น เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนดังนี้

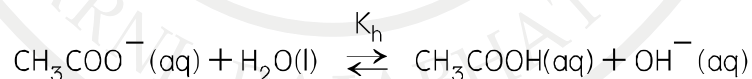


ไอออนเหล่านี้จะอยู่อย่างเสถียรในน้ำ และไม่ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ ดังนั้นเมื่อไทเทรตกรดแก่-เบสแก่ สารละลายเกลือที่ได้จึงมีสภาพเป็นกลาง ( $\text{pH} = 7$ )

**5.11.2 เกลือที่เกิดจากกรดอ่อน-เบสแก่** เช่น  $\text{CH}_3\text{COONa}$  (เกิดจาก  $\text{CH}_3\text{COOH}$  กับ  $\text{NaOH}$ ),  $\text{KCN}$  (เกิดจาก  $\text{HCN}$  กับ  $\text{KOH}$ ), และ  $\text{NaF}$  (เกิดจาก  $\text{HF}$  กับ  $\text{NaOH}$ ) เป็นต้น เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออน (ยกตัวอย่างเฉพาะ  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) ดังนี้



จากตารางที่ 5.2  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  เป็นเบสที่แรงกว่าน้ำ ดังนั้นน้ำจึงทำหน้าที่เป็นกรด และให้  $\text{H}^+$  แก่  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการ



เรียกค่า  $K_h$  ว่าค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดย  $K_h = \frac{K_w}{K_a}$

เมื่อ  $K_w$  คือ ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ (เท่ากับ  $10^{-14}$  ที่ 25 องศาเซลเซียส)

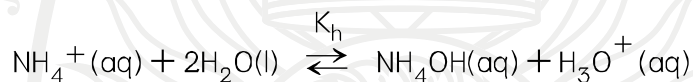
$K_a$  คือ ค่าคงที่การแตกตัวของกรดอ่อน (กรดที่เกิดจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส)

ผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ทำให้สารละลายมี  $\text{OH}^-$  มากขึ้น ดังนั้นเมื่อไทเทรตสารละลายกรดอ่อน-เบสแก่ จะเกิดเกลือที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อได้ และให้สารละลายที่มีสภาพเป็นเบส ( $\text{pH} > 7$ )

**5.11.3 เกลือที่เกิดจากกรดแก่-เบสอ่อน** เช่น  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (เกิดจาก  $\text{HCl}$  กับ  $\text{NH}_4\text{OH}$ ), และ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (เกิดจาก  $\text{HNO}_3$  กับ  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เป็นต้น เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนดังนี้ (ยกตัวอย่างเฉพาะ  $\text{NH}_4\text{Cl}$ )



จากตารางที่ 5.2  $\text{NH}_4^+$  เป็นกรดที่แรงกว่าน้ำ ดังนั้นน้ำจะทำหน้าที่เป็นเบส คือรับ  $\text{H}^+$  จาก  $\text{NH}_4^+$  เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการ



โดย  $K_h = \frac{K_w}{K_b}$

เมื่อ  $K_w$  คือ ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ (เท่ากับ  $10^{-14}$  ที่ 25 องศาเซลเซียส)

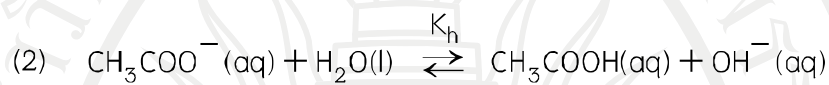
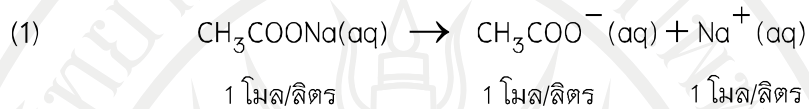
$K_b$  คือ ค่าคงที่การแตกตัวของเบสอ่อน (เบสที่เกิดจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส)

ผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ทำให้สารละลายมี  $\text{H}_3\text{O}^+$  มากขึ้น ดังนั้นเมื่อไทเทรตสารละลายกรดแก่-เบสอ่อน จะเกิดเกลือที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อได้ และให้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ )

**ตัวอย่างที่ 5.20** จงคำนวณหา  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , และค่า pH ของสารละลาย  $\text{CH}_3\text{COONa}$  เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส (กำหนดค่า  $K_a$  ของกรดอะซิติกเท่ากับ  $1.8 \times 10^{-5}$ )

วิธีทำ

เมื่อ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังนี้



พิจารณาสมดุลที่เกิดขึ้นดังนี้

$$K_h = \frac{[\text{CH}_3\text{COOH}][\text{OH}^-]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]}$$

$$\text{แต่ } K_h = \frac{K_w}{K_a} = \frac{10^{-14}}{1.8 \times 10^{-5}} = 5.55 \times 10^{-10}$$

สมมติให้  $x$  คือ  $[\text{OH}^-]$  ณ สภาวะสมดุล (ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $[\text{CH}_3\text{COOH}]$ )

$$\text{ดังนั้น } 5.55 \times 10^{-10} = \frac{x^2}{1-x}$$

แก้สมการหาค่า  $x$  ได้ค่า  $x = 2.356 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

$$\text{ดังนั้น } [\text{OH}^-] = x = 2.356 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = x = 2.356 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{CH}_3\text{COO}^-] = 1-x \approx 1 \text{ โมล/ลิตร}$$

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ;  $K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$

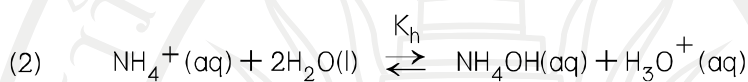
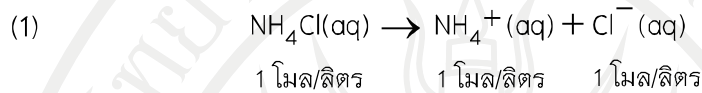
$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_w}{[\text{OH}^-]} = \frac{10^{-14}}{2.356 \times 10^{-5}} = 4.244 \times 10^{-10}$$

$$\text{ดังนั้น } \text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (4.244 \times 10^{-10}) = 9.372$$

**ตัวอย่างที่ 5.21** จงคำนวณหา  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$ , และค่า pH ของสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส (กำหนดค่า  $K_b$  ของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เท่ากับ  $1.8 \times 10^{-5}$ )

วิธีทำ

เมื่อ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังนี้



พิจารณาสมดุลที่เกิดขึ้นดังนี้

$$K_h = \frac{[\text{NH}_4\text{OH}][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{NH}_4^+]}$$

$$\text{แต่ } K_h = \frac{K_w}{K_b} = \frac{10^{-14}}{1.8 \times 10^{-5}} = 5.55 \times 10^{-10}$$

สมมติให้  $x$  คือ  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  ณ สภาวะสมดุล (ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $[\text{NH}_4\text{OH}]$ )

$$\text{ดังนั้น } 5.55 \times 10^{-10} = \frac{x^2}{1-x}$$

แก้สมการหาค่า  $x$  ได้ค่า  $x = 2.356 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

$$\text{ดังนั้น } [\text{H}_3\text{O}^+] = x = 2.356 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{NH}_4\text{OH}] = x = 2.356 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$[\text{NH}_4^+] = 1-x \approx 1 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (2.356 \times 10^{-5}) = 4.628$$

จากค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ;  $K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{10^{-14}}{2.356 \times 10^{-5}} = 4.244 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}$$



## 5.12 สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) คือ สารละลายที่สามารถรักษาสภาพ pH เอาไว้ได้ โดยเมื่อเติมกรดหรือเบสลงในสารละลายนั้น จะทำให้ค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลงไม่มาก สารละลายบัฟเฟอร์มี 2 ชนิด คือ สารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นกรด (acidic buffer solution) ในสารละลายประกอบไปด้วยกรดอ่อนและเกลือของกรดอ่อนนั้น อีกชนิดหนึ่งคือสารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นเบส (alkaline buffer solution) ที่ในสารละลายประกอบไปด้วยเบสอ่อนและเกลือของเบสอ่อนนั้น สารละลายบัฟเฟอร์จะทำหน้าที่ได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอ่อนและเกลือของมัน (หรือความเข้มข้นของเบสอ่อนและเกลือของมัน) โดยสารละลายบัฟเฟอร์ที่ทำหน้าที่รักษาสภาพ pH ได้ดีที่สุด คือ ที่อัตราส่วนกรดต่อเกลือ (หรือเบสต่อเกลือ) เป็น 1:1 (ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์, 2531, หน้า 170)

การคำนวณหาค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์และกลไกการทำงานของบัฟเฟอร์เมื่อเติมกรดหรือเบสลงไป สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างโดยแยกตามชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ ดังนี้

**5.12.1 สารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นกรด** เช่น สารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติก-โซเดียมอะซิเตต

**ตัวอย่างที่ 5.22** จงหาค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.25 ลิตร ที่ประกอบด้วย  $\text{CH}_3\text{COOH}$  0.35 โมล/ลิตร (กำหนด  $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$ ) และ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  0.35 โมล/ลิตร และคำนวณหาค่า pH เมื่อมีการรบกวนระบบดังนี้

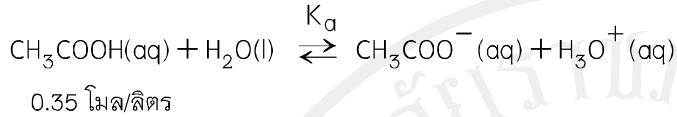
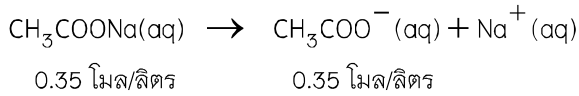
- (1) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 30 มิลลิลิตร
- (2) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 30 มิลลิลิตร

วิธีทำ หาค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากข้อมูลโจทย์} \quad [\text{CH}_3\text{COOH}] &= 0.35 \text{ โมล/ลิตร} \\ [\text{CH}_3\text{COONa}] &= 0.35 \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

ในสารละลายบัฟเฟอร์จึงเกิดปฏิกิริยาและสมดุลดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



จากสมมูลที่เกิดขึ้น จะได้

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_a [\text{CH}_3\text{COOH}]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]}$$

มาจากเกลือ ที่แตกตัวเป็นไอออนได้หมด  
จึงมีความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นของเกลือ

มาจากกรดอ่อน ซึ่งแตกตัวน้อยมาก ( $K_a \ll 1$ )  
จึงประมาณความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นเริ่มต้น

ดังนั้น

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.35 \text{ โมล/ลิตร})}{(0.35 \text{ โมล/ลิตร})} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (1.8 \times 10^{-5}) = 4.745$$

ข้อสังเกต ถ้า ความเข้มข้นของกรด = ความเข้มข้นของเกลือ ค่า  $\text{pH} = -\log (K_a)$

(1) เติมกรด HCl เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 30 มิลลิลิตร

$$\text{จำนวนโมล } \text{H}_3\text{O}^+ \text{ ที่เพิ่มเข้าไป} = (0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = 0.003 \text{ โมล}$$

$\text{H}_3\text{O}^+$  ที่เพิ่มเข้าไปจะรบกวณสมมูลและจะถูกกำจัดโดยกลไกของสมมูลคือจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  เกิดเป็น  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ซึ่งพิจารณา ดังนี้

	$\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightleftharpoons{K_a} \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$		
ปริมาณก่อนเติม HCl	(0.35 โมล/ลิตร) × (0.25 ลิตร) = 0.0875 โมล (มาจากกรด)	(0.35 โมล/ลิตร) × (0.25 ลิตร) = 0.0875 โมล (มาจากเกลือ)	
ปริมาณ $\text{H}_3\text{O}^+$			+0.003 โมล
ปริมาณหลังเติม HCl	(0.0875 + 0.003) = 0.0905 โมล	(0.0875 - 0.003) = 0.0845 โมล	(0.003 - 0.003) = 0 โมล
คิดเป็นความเข้มข้น	$\frac{0.0905 \text{ โมล}}{0.25 + 30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$ = 0.3232 โมล/ลิตร	$\frac{0.0845 \text{ โมล}}{0.25 + 30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$ = 0.3018 โมล/ลิตร	

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_a[\text{CH}_3\text{COOH}]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]} = \frac{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.3232)}{(0.3018)} = 1.928 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (1.928 \times 10^{-5}) = 4.715$$

(2) เติมเบส NaOH เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 30 มิลลิลิตร

$$\text{จำนวนโมล OH}^- \text{ ที่เพิ่มเข้าไป} = (0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = 0.003 \text{ โมล}$$

$\text{OH}^-$  ที่เพิ่มเข้าไปจะสะเทินกับ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ที่มีอยู่ก่อน ทำให้  $\text{H}_3\text{O}^+$  หายไปจากระบบ  $\text{CH}_3\text{COOH}$  จึงแตกตัวเพื่อชดเชยกับ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ที่หายไป

	$\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$\rightleftharpoons$	$\text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
ปริมาณก่อนเติม NaOH	$(0.35 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.25 \text{ ลิตร})$ = 0.0875 โมล (มาจากกรด)		$(0.35 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.25 \text{ ลิตร})$ = 0.0875 โมล (มาจากเกลือ)
ปริมาณ $\text{H}_3\text{O}^+$			-0.003 โมล
ปริมาณหลังเติม NaOH	$(0.0875 - 0.003)$ = 0.0845 โมล		$(0.0875 + 0.003)$ = 0.0905 โมล (-0.003 + 0.003) = 0 โมล
คิดเป็นความเข้มข้น	$\frac{0.0845 \text{ โมล}}{0.25 + 30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$ = 0.3018 โมล/ลิตร		$\frac{0.0905 \text{ โมล}}{0.25 + 30 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}}$ = 0.3232 โมล/ลิตร

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_a[\text{CH}_3\text{COOH}]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]} = \frac{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.3018)}{(0.3232)} = 1.680 \times 10^{-5} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (1.680 \times 10^{-5}) = 4.774$$

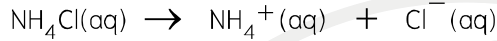
**5.12.2 สารละลายบัฟเฟอร์ที่รักษาสภาพความเป็นเบส** เช่น สารละลายบัฟเฟอร์ของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์-แอมโมเนียมคลอไรด์

**ตัวอย่างที่ 5.23** จงหาค่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ 80 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วย  $\text{NH}_4\text{OH}$  0.169 โมล/ลิตร (กำหนด  $K_b = 1.81 \times 10^{-5}$ ) และ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.183 โมล/ลิตร และคำนวณหาค่า pH เมื่อมีการรบกวนระบบดังนี้

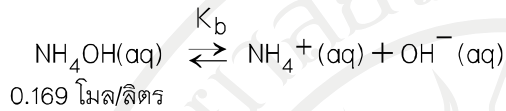
(1) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

(2) เติมนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

วิธีทำ



0.183 โมล/ลิตร      0.183 โมล/ลิตร



จากสมมูลที่เกิดขึ้น จะได้

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_b [\text{NH}_4\text{OH}]}{[\text{NH}_4^+]}$$

มาจากเบสอ่อน ซึ่งแตกตัวน้อยมาก ( $K_b \ll 1$ )

จึงประมาณความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น

มาจากเกลือ ที่แตกตัวเป็นไอออนได้หมด

จึงมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นของเกลือ

ดังนั้น

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_w}{[\text{OH}^-]} = \frac{K_w [\text{NH}_4^+]}{K_b [\text{NH}_4\text{OH}]} = \frac{(10^{-14}) \times (0.183)}{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.169)} = 6.0158 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (6.0158 \times 10^{-10}) = 9.22$$

(1) เติมนกรด HCl เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

จำนวนโมล  $\text{H}_3\text{O}^+$  ที่เพิ่มเข้าไป =  $(0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = 0.001 \text{ โมล}$

$\text{H}_3\text{O}^+$  ที่เพิ่มเข้าไปจะสะเทินกับ  $\text{OH}^-$  ที่มีอยู่ก่อน ทำให้  $\text{OH}^-$  หายไปจากระบบ

$\text{NH}_4\text{OH}$  จึงแตกตัวเพื่อชดเชยกับ  $\text{OH}^-$  ที่หายไป ซึ่งพิจารณา ดังนี้

	$\text{NH}_4\text{OH}(\text{aq})$	$\rightleftharpoons$	$\text{NH}_4^+(\text{aq})$	+	$\text{OH}^-(\text{aq})$
ปริมาณก่อนเติม HCl	$(0.169 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.08 \text{ ลิตร})$ = 0.01352 โมล (มาจากเบส)		$(0.183 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.08 \text{ ลิตร})$ = 0.01464 โมล (มาจากเกลือ)		
ปริมาณ $\text{OH}^-$					-0.001 โมล
ปริมาณหลังเติม HCl	$(0.01352 - 0.001)$ = 0.01252 โมล		$(0.01464 + 0.001)$ = 0.01564 โมล		$(-0.001 + 0.001)$ = 0 โมล
คิดเป็นความเข้มข้น	$\frac{0.01252 \text{ โมล}}{0.08 + 0.01 \text{ ลิตร}}$ = 0.1391 โมล/ลิตร		$\frac{0.0845 \text{ โมล}}{0.08 + 0.01 \text{ ลิตร}}$ = 0.1737 โมล/ลิตร		

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_w}{[\text{OH}^-]} = \frac{K_w [\text{NH}_4^+]}{K_b [\text{NH}_4\text{OH}]} = \frac{(10^{-14}) \times (0.1737)}{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.1391)}$$

$$= 6.9374 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (6.9374 \times 10^{-10}) = 9.16$$

(2) เติมน้ำ NaOH เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

จำนวนโมล  $\text{OH}^-$  ที่เพิ่มเข้าไป =  $(0.1 \text{ โมล/ลิตร}) \times (10 \times 10^{-3} \text{ ลิตร}) = 0.001 \text{ โมล}$

$\text{OH}^-$  ที่เพิ่มเข้าไปจะรบกวนสมดุลและจะถูกกำจัดโดยกลไกของสมดุลคือจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{NH}_4^+$  เกิดเป็น  $\text{NH}_4\text{OH}$  ซึ่งพิจารณา ดังนี้

	$\text{NH}_4\text{OH}(\text{aq})$	$\rightleftharpoons$	$\text{NH}_4^+(\text{aq})$	+	$\text{OH}^-(\text{aq})$
ปริมาณก่อนเติม NaOH	$(0.169 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.08 \text{ ลิตร})$ = 0.01352 โมล (มาจากเบส)		$(0.183 \text{ โมล/ลิตร}) \times (0.08 \text{ ลิตร})$ = 0.01464 โมล (มาจากเกลือ)		
ปริมาณ $\text{OH}^-$					+0.001 โมล
ปริมาณหลังเติม NaOH	$(0.01352 + 0.001)$ = 0.01452 โมล		$(0.01464 - 0.001)$ = 0.01364 โมล		$(+0.001 - 0.001)$ = 0 โมล
คิดเป็นความเข้มข้น	$\frac{0.01452 \text{ โมล}}{0.08 + 0.01 \text{ ลิตร}}$ = 0.1613 โมล/ลิตร		$\frac{0.01364 \text{ โมล}}{0.08 + 0.01 \text{ ลิตร}}$ = 0.1515 โมล/ลิตร		

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_w}{[\text{OH}^-]} = \frac{K_w [\text{NH}_4^+]}{K_b [\text{NH}_4\text{OH}]} = \frac{(10^{-14}) \times (0.1515)}{(1.8 \times 10^{-5}) \times (0.1613)}$$

$$= 5.218 \times 10^{-10} \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (5.218 \times 10^{-10}) = 9.28$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### 5.13 สรุป

จากนิยามกรด-เบสสรุปได้ว่า กรด คือ สารที่ให้โปรตอนหรือรับอิเล็กตรอนได้ ส่วนเบส คือ สารที่รับโปรตอนหรือให้อิเล็กตรอนได้ สารละลายกรดแก่และเบสแก่จะแตกตัวเป็นไอออนให้  $H^+$  และ  $OH^-$  ได้หมด (100%) แต่สารละลายกรดอ่อนและเบสอ่อนจะแตกตัวเป็นไอออนให้  $H^+$  และ  $OH^-$  ได้ไม่หมด (ไม่ถึง 100%) และมีสมดุลเกิดขึ้น สารใดในปฏิกิริยาเคมีจะทำหน้าที่เป็นกรดหรือเบสขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้โปรตอนหรือรับอิเล็กตรอน โดยอาจพิจารณาเป็นคู่กรด-เบส ซึ่งคู่กรดจะมีไฮโดรเจนมากกว่าคู่เบสอยู่ 1 เสมอ อินดิเคเตอร์กรด-เบสสามารถใช้เป็นตัวบอกลักษณะความเป็นกรด-เบสได้ โดยอาศัยความแตกต่างของสีในรูปกรดและสีในรูปเบสของอินดิเคเตอร์นั้น นอกจากนี้ยังอาจใช้ค่า pH บอกลักษณะความเป็นกรด-เบสได้ โดยถ้า  $pH < 7$  แสดงว่าสารนั้นเป็นกรด ถ้า  $pH = 7$  แสดงว่าสารนั้นเป็นกลาง และถ้า  $pH > 7$  แสดงว่าสารนั้นเป็นเบส เมื่อกรดสัมผัสกับเบสจะเกิดปฏิกิริยาสะเทิน จนถึงจุดสมมูล หรือจุดที่กรด-เบสทำปฏิกิริยาพอดีตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ สารละลายเกลือที่ได้จากการสะเทินกรดแก่-เบสแก่จะมีสภาพเป็นกลางเพราะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่วนสารละลายเกลือที่ได้จากการสะเทินกรดแก่-เบสอ่อนและกรดอ่อน-เบสแก่ จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อได้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเบสตามลำดับ ดังนั้นการเลือกใช้อินดิเคเตอร์กรด-เบสสำหรับการไทเทรตหรือวิธีการหาความเข้มข้นของสารที่เป็นกรดหรือเบสโดยอาศัยปฏิกิริยาสะเทิน จึงต้องเลือกอินดิเคเตอร์ให้ตรงกับความเป็นกรด เบส หรือกลางของเกลือที่เกิดขึ้น สารละลายบัฟเฟอร์คือสารละลายผสมระหว่างกรดอ่อนกับเกลือของกรดอ่อนนั้น หรือเบสอ่อนกับเกลือของเบสอ่อนนั้น มีคุณสมบัติคือสามารถรักษาสภาพ pH ของสารละลายไว้ได้เมื่อเติมกรดหรือเบสลงไปในสารละลายในปริมาณเล็กน้อย กลไกการทำงานอยู่ที่กรดอ่อนหรือเบสอ่อนที่จะแตกตัวชดเชยกับ  $H_3O^+$  (หรือ  $OH^-$ ) ส่วนที่หายไป หรือกำจัด  $H_3O^+$  (หรือ  $OH^-$ ) ส่วนที่เพิ่มเข้ามาจากการเติมกรดหรือเบส ทำให้ pH ของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



## แบบฝึกหัดบทที่ 5

- จงคำนวณค่าคงที่สมดุลของสารละลายต่อไปนี้
  - 1.1) สารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  0.1 โมล/ลิตร แยกตัวเป็นไอออน 1.3%
  - 1.2) สารละลาย  $\text{CH}_3\text{COOH}$  0.001 โมล/ลิตร แยกตัวเป็นไอออน 12.6%
  - 1.3) สารละลาย  $\text{HCN}$  0.01 โมล/ลิตร แยกตัวเป็นไอออน 0.02%
- สารละลายกรด  $\text{HCl}$  มีค่า  $\text{pH} = 3.6$  จงตอบคำถามต่อไปนี้
  - 2.1)  $[\text{H}^+]$ ,  $[\text{OH}^-]$ , และ  $[\text{Cl}^-]$  มีค่าเท่าใด
  - 2.2) ถ้าต้องการสารละลายปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะต้องละลาย  $\text{HCl}(\text{g})$  กี่กรัม
- สารละลายกรด  $\text{HCl}$  (ไม่ทราบความเข้มข้น) ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำปฏิกิริยาพอดีกับ  $\text{NaOH}$  (ของแข็ง) 0.4 กรัม จงหาความเข้มข้นของสารละลายกรดนี้
- จงคำนวณค่า  $\text{pH}$  ของสารละลายกรด  $\text{HOCl}$  เข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร กำหนดค่า  $K_a$  ของ  $\text{HOCl}$  เท่ากับ  $3.5 \times 10^{-8}$
- จงหา  $\text{pH}$  ของสารละลาย  $\text{NaCN}$  เข้มข้น 1 โมล/ลิตร (กำหนดค่า  $K_a$  ของ  $\text{HCN}$  เท่ากับ  $4 \times 10^{-10}$ )
- จงหา  $\text{pH}$  ของสารละลายโซเดียมฟีนอลेट ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{ONa}$ ) เข้มข้น  $1 \times 10^{-3}$  โมล/ลิตร ซึ่งโซเดียมฟีนอลेटนี้เป็นเกลือของเบสแก่ ( $\text{NaOH}$ ) และกรดอ่อน ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นคือ
$$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{OH}(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$$
กำหนดให้  $K_a$  ของ  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} = 1 \times 10^{-10}$
- จงคำนวณ  $\text{pH}$  ของสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  เข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร กำหนดให้ค่าคงที่ของสมดุล  $K_b$  ของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  เท่ากับ  $1.8 \times 10^{-5}$
- สารละลาย  $\text{KNO}_2$  เข้มข้น 0.045 โมล/ลิตร มี  $\text{pH}$  8.0 จงคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของ  $\text{HNO}_2$
- จงหา  $\text{pH}$  ของสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งเตรียมโดยการเติม  $\text{CH}_3\text{COOH}$  0.35 โมล และ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  0.225 โมลในน้ำที่มีปริมาตรสุทธิ 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร ( $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$ )
- สมมติว่ามีสารละลายบัฟเฟอร์อยู่ 0.25 ลิตร ซึ่งประกอบด้วยกรดอะซิติก 0.225 โมล/ลิตร และโซเดียมอะซิเตต 0.225 โมล/ลิตร ถ้าวาง  $\text{pH}$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ถ้าเติมกรดเกลือเข้มข้น 1 โมล/ลิตร จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปยังสารละลายนี้ กำหนดให้  $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$



## เอกสารอ้างอิง

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2531). **เคมีคำนวณและเทคนิคการทำโจทย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ไอเดียสโตร์.

วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์. (2541). **เคมีทั่วไป 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ไอเดียสโตร์.

สำนักงานส่งเสริมการศึกษานอกระบบและการศึกษาตามอัธยาศัย. (2556). **การไทเทรต**

**ระหว่างกรดเบส**. [ออนไลน์] จาก :

[http://ebook.nfe.go.th/nfe\\_ebook/data\\_o\\_ebook/html/023/187.htm](http://ebook.nfe.go.th/nfe_ebook/data_o_ebook/html/023/187.htm)

[5 พฤศจิกายน 2556].

Brown, T. L., Lemay, H. E., and Bursten, B. E. (1997). **Chemistry the Central Science**. 7<sup>th</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.

Lewis, R. and Evans, W. (2006). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Palgrave Macmillan.

Lovett, C. and Chang, R. (2005). **Understanding Chemistry**. New York : McGraw– Hill Company.

McMurry, J. and Fay, R. C. (2001). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.

Oxtoby, D. W., Nachtrieb, N. H. and Freeman, W. A. (1994). **Chemistry Science of Change**. 2<sup>nd</sup> Ed. USA : Saunders College Publishing.

Petrucci, R. H., Harwood, W. S., and Herring, F. G. (2002). **General Chemistry**. New Jersey : Prentice Hall.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 6 ปฏิริยาเคมีไฟฟ้า

- 6.1 ลักษณะของปฏิริยารีดอกซ์
- 6.2 เลขออกซิเดชัน
- 6.3 หลักเกณฑ์ในการกำหนดค่าเลขออกซิเดชัน
- 6.4 การพิจารณาปฏิริยาว่าเป็นปฏิริยารีดอกซ์หรือไม่
- 6.5 การดุลสมการรีดอกซ์
- 6.6 เซลล์เคมีไฟฟ้า
  - 6.6.1 เซลล์กัลวานิก
  - 6.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลติก
- 6.7 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. คำนวณหาค่าเลขออกซิเดชันของธาตุในสารประกอบได้
2. ดุลสมการรีดอกซ์โดยตรวจสอบจากค่าเลขออกซิเดชันได้
3. บอกลักษณะและคำนวณเกี่ยวกับเซลล์กัลวานิกได้
4. บอกลักษณะและคำนวณเกี่ยวกับเซลล์อิเล็กโทรไลติกได้

### กิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 6 เรื่องปฏิริยาเคมีไฟฟ้ามาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณที่ละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 6 เรื่องปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 6

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทที่ 6

### ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

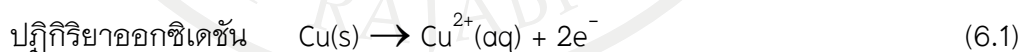
ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) คือ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้วมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้น การถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดจากสารตั้งต้นชนิดหนึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และในขณะเดียวกันสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งจะรับอิเล็กตรอนนั้น เรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ดังนั้นในกระบวนการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนนี้ ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจำเป็นต้องเกิดขึ้นควบคู่กันไปเสมอ ขาดอย่างหนึ่งอย่างใดไม่ได้ ทำให้ในบางครั้งเรียกปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านี้ว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งมาจากคำว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction reaction)

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของปฏิกิริยารีดอกซ์ การดุลสมการรีดอกซ์ เซลล์ไฟฟ้า กัลวานิก เซลล์ไฟฟ้าอิเล็กโทรไลติก และการประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ การชุบโลหะ และการป้องกันการเป็นสนิมของโลหะ เป็นต้น

#### 6.1 ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์

เมื่อนำแผ่นโลหะทองแดง (Cu) มาจุ่มลงในสารละลาย  $\text{Ag}^+$  พบว่าที่แผ่นโลหะทองแดงมีโลหะเงินมาเคลือบ พร้อม ๆ กับมี  $\text{Cu}^{2+}$  ละลายปนออกมาอยู่ในของเหลว ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายที่เปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีฟ้า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้คือปฏิกิริยารีดอกซ์ เนื่องจากการที่โลหะทองแดงเกิดการสักร่อน เพราะโลหะทองแดงสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งมีสีฟ้า และเมื่อ  $\text{Ag}^+$  รับอิเล็กตรอนเข้ามาจะกลายเป็นโลหะเงิน (Ag) มาเกาะอยู่ที่แผ่นทองแดง

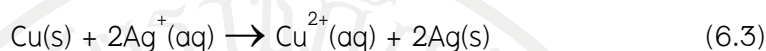
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เขียนในรูปสมการเคมีได้ดังนี้



สัญลักษณ์  $\text{e}^-$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเท ซึ่งจำนวนอิเล็กตรอนที่ต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่รับ ดังนั้น



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสมการ (6.1) และ (6.2) เรียกว่า ครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน ตามลำดับ ซึ่งการถ่ายเทอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน และรวมเขียนเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาในสมการ (6.3) สารที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน คือ Cu(s) เรียกว่า **ตัวรีดิวซ์** (reducing agent) ส่วนสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน คือ Ag<sup>+</sup>(aq) เรียกว่า **ตัวออกซิไดส์** (oxidizing agent) (McMurry and Fay, 2001, P. 761)

## 6.2 เลขออกซิเดชัน

ผลของการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้สารตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ซึ่งคำว่า เลขออกซิเดชัน (oxidation number) คือค่าประจุไฟฟ้าที่สมมติขึ้นของไอออนหรืออะตอมของธาตุ โดยคิดจากจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้หรือรับหรือใช้ร่วมกับอะตอมของธาตุตามเกณฑ์ที่กำหนดขึ้น (Lewis and Evans, 2006, P. 102) ซึ่งเลขออกซิเดชันส่วนใหญ่เป็นเลขจำนวนเต็มบวกหรือลบหรือศูนย์ (ดังแสดงในตารางที่ 6.1) ดังนั้นตัวรีดิวซ์หรือสารตั้งต้นที่สูญเสียอิเล็กตรอน (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือเรียกว่าถูกออกซิไดส์) จะมีเลขออกซิเดชันของอะตอมธาตุที่เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น ส่วนตัวออกซิไดส์หรือสารตั้งต้นที่รับอิเล็กตรอน (เกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือเรียกว่าถูกรีดิวซ์) จะมีเลขออกซิเดชันของอะตอมธาตุที่เป็นองค์ประกอบลดลง (McMurry and Fay, 2001, P. 761)

ตารางที่ 6.1 เลขออกซิเดชันของธาตุบางชนิด

1A		2A		8B										3A 4A 5A 6A 7A					8A
Li +1		Be +2												B +3	C +4 +2 -4	N +5 +4 +3 +2 +1 -3	O -1 -2	F -1	He
Na +1		Mg +2												Al +3	Si +4 -4	P +5 +3 -3	S +6 +4 +2 -2	Cl +7 +5 +3 +1 -1	Ar
				3B	4B	5B	6B	7B	8B			1B	2B						
K +1	Ca +2	Sc +3	Ti +4 +3 +2	V +5 +4 +3 +2	Cr +6 +3 +2	Mn +7 +4 +3 +2	Fe +3 +2	Co +3 +2	Ni +2	Cu +2 +1	Zn +2	Ga +3	Ge +4 -4	As +5 +3 -3	Se +6 +4 -2	Br +5 +1 -1	Kr +4 +2		
Rb +1	Sr +2	Y +3	Zr +4	Nb +5 +3	Mo +6 +4 +3	Tc +7 +6 +4	Ru +8 +6 +4 +3 +2	Rh +4 +3 +2	Pd +4 +2	Ag +1	Cd +2	In +3	Sn +4 +2	Sb +5 +3 -3	Te +6 +4 -2	I +7 +5 +1 -1	Xe +6 +4 +2		
Cs +1	Ba +2	La +3	Hf +4	Ta +5	W +6 +4	Re +7 +6 +4	Os +8 +4	Ir +4 +3	Pt +4 +2	Au +3 +1	Hg +2 +1	Tl +3 +1	Pb +4 +2	Bi +5 +3	Po +2	At -1	Rn		

(ที่มา : ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2531, หน้า 196)



### 6.3 หลักเกณฑ์ในการกำหนดค่าเลขออกซิเดชัน

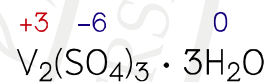
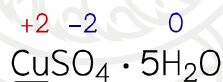
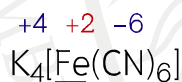
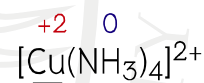
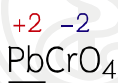
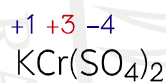
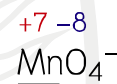
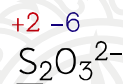
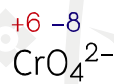
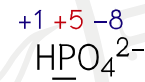
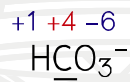
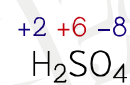
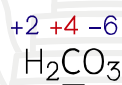
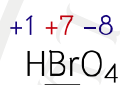
การกำหนดค่าเลขออกซิเดชันของธาตุใด ๆ มีหลักเกณฑ์ที่สรุปพอสังเขปดังนี้

- (1) เลขออกซิเดชันของโลหะหมู่ 1A, 2A และ 3A มีค่าเท่ากับ +1, +2 และ +3 ตามลำดับ
- (2) เลขออกซิเดชันของธาตุอิสระทุกชนิดไม่ว่าธาตุนั้นหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วย อะตอมกี่ตัวก็ตามมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่น Na, Zn, Cu, He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, P<sub>4</sub> และ S<sub>8</sub> มีเลขออกซิเดชันเท่ากับศูนย์
- (3) เลขออกซิเดชันของไฮโดรเจนในสารประกอบโดยทั่วไป (H รวมตัวกับอโลหะ) เช่น HCl, H<sub>2</sub>O และ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มีค่าเท่ากับ +1 แต่ในสารประกอบไฮไดรด์ของโลหะ (H รวมตัวกับโลหะ) เช่น NaH และ CaH<sub>2</sub> ไฮโดรเจนมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -1
- (4) เลขออกซิเดชันของออกซิเจนในสารประกอบโดยทั่วไปเท่ากับ -2 แต่ในสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ BaO<sub>2</sub> ออกซิเจนมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -1 เฉพาะในสารประกอบซูเปอร์ออกไซด์ ออกซิเจนมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -1/2 และในสารประกอบ OF<sub>2</sub> เท่านั้น ที่ออกซิเจนมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +2
- (5) เลขออกซิเดชันของฟลูออรีนในสารประกอบมีค่า -1 เสมอ เนื่องจากเป็นธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity; EN) สูงที่สุด
- (6) เลขออกซิเดชันของไอออนที่ประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกันมีค่าเท่ากับประจุที่แท้จริงของไอออนนั้น เช่น Mg<sup>2+</sup> ไอออน มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +2 หรือ F<sup>-</sup> ไอออน มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -1 เป็นต้น
- (7) ไอออนที่ประกอบด้วยอะตอมมากกว่าหนึ่งชนิด ผลรวมของเลขออกซิเดชันของอะตอมทั้งหมดจะเท่ากับประจุที่แท้จริงของไอออนนั้น เช่น เลขออกซิเดชันของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ไอออน เท่ากับ -2 หรือเลขออกซิเดชันของ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ไอออนเท่ากับ +1 เป็นต้น
- (8) ในสารประกอบใด ๆ ผลบวกของเลขออกซิเดชันของอะตอมทั้งหมดเท่ากับศูนย์ เช่น H<sub>2</sub>O H มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +1 แต่มี H 2 อะตอม จึงมีเลขออกซิเดชันทั้งหมดเท่ากับ +2 O มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -2 เมื่อรวมกันจะเท่ากับศูนย์ เป็นต้น

ในสารประกอบไอออนิกที่อะตอมมีการให้และรับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นไอออนบวกและไอออนลบอย่างชัดเจน ดังนั้นเลขออกซิเดชันจึงตรงกับค่าประจุไฟฟ้าที่แท้จริง ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าของไอออนนั้น ๆ ส่วนในสารประกอบโคเวเลนต์ที่อะตอมของธาตุใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ไม่ได้มีการให้และรับอิเล็กตรอนเหมือนกับในสารประกอบไอออนิก ดังนั้น

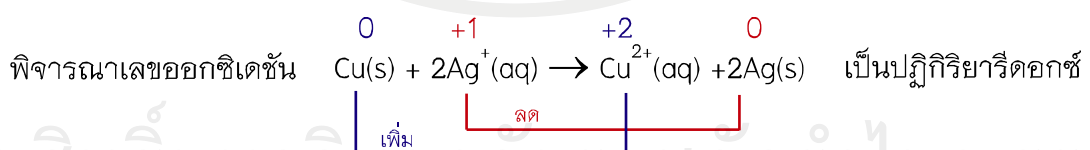
ในกรณีนี้เลขออกซิเดชันเป็นแต่เพียงประจุมมติ โดยอะตอมของธาตุใดจะมีค่าเลขออกซิเดชันเป็นบวกหรือลบ ให้พิจารณาจากค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี อะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูงกว่าจะมีเลขออกซิเดชันเป็นลบ ส่วนอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีต่ำกว่าจะมีเลขออกซิเดชันเป็นบวก ส่วนจะมีค่าบวกเท่าใดนั้นพิจารณาได้จากจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่อะตอมของธาตุนำไปใช้ร่วมกับอะตอมของธาตุอื่น (Lovett and Chang, 2005, P. 43)

**ตัวอย่างที่ 6.1** จงหาเลขออกซิเดชันของธาตุที่ขีดเส้นใต้ในสารประกอบหรือไอออนต่อไปนี้



#### 6.4 การพิจารณาปฏิกิริยาว่าเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์หรือไม่

ปฏิกิริยาที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของอะตอมธาตุในสารตั้งต้นหลังจากเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์แล้ว ถือว่าไม่ใช่ปฏิกิริยารีดอกซ์ (เพราะไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน) ดังนั้นการตรวจสอบว่าเลขออกซิเดชันของธาตุมีการเปลี่ยนแปลงไปหลังจากปฏิกิริยาเกิดขึ้น จึงใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าปฏิกิริยานั้นเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์หรือไม่ เช่น

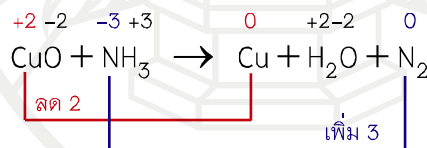


พิจารณาเลขออกซิเดชัน  $\overset{+1-1}{\text{HCl}}(\text{aq}) + \overset{+1-2+1}{\text{NaOH}}(\text{aq}) \rightarrow \overset{+1-1}{\text{NaCl}}(\text{aq}) + \overset{+1-2}{\text{H}_2\text{O}}(\text{l})$  ไม่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์  
 เพราะทุกอะตอมในปฏิกิริยามีเลขออกซิเดชันเท่าเดิม

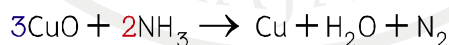
## 6.5 การดุลสมการรีดอกซ์

การเขียนสมการแสดงปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ถูกต้องจะต้องเป็นสมการที่สมดุลแล้ว โดยจำนวนอะตอมของแต่ละธาตุและผลรวมประจุไฟฟ้าของสารตั้งต้น (ฝั่งซ้าย) และสารผลิตภัณฑ์ (ฝั่งขวา) ต้องเท่ากัน การดุลสมการรีดอกซ์ทำได้โดยการหาธาตุที่มีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนไปต่อ 1 อะตอม จากนั้นทำให้เลขออกซิเดชันของธาตุที่ลดลง (ในตัวออกซิไดส์) เท่ากับเลขออกซิเดชันของธาตุที่เพิ่มขึ้น (ในตัวรีดิวซ์) โดยนำเลขออกซิเดชันที่เปลี่ยนไปมาคูณไขว้หน้าสารตั้งต้นที่ใช้ (ตัวรีดิวซ์) และรับอิเล็กตรอน (ตัวออกซิไดส์) เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทเท่ากัน (Lewis and Evans, 2006, P. 104–105) ทำการดุลจำนวนอะตอมของธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ต่อมาจึงดุลอะตอมของธาตุอื่น จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของสมการอีกครั้ง โดยนับจำนวนอะตอมของธาตุและประจุไฟฟ้าทางด้านซ้ายและขวาซึ่งต้องเท่ากัน และต้องทำสมการให้เป็นสัดส่วนอย่างต่ำ การดุลสมการรีดอกซ์ตามวิธีที่กล่าวมาเรียกว่า วิธีเลขออกซิเดชัน ซึ่งแต่ละขั้นตอนแสดงอย่างละเอียดดังตัวอย่างการดุลสมการรีดอกซ์  $\text{CuO}(\text{s}) + \text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Cu}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{N}_2(\text{g})$  ต่อไปนี้

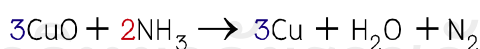
(1) หาเลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นของตัวรีดิวซ์และลดลงของตัวออกซิไดส์



(2) ทำเลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น และลดลงให้เท่ากัน โดยไขว้เลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นไว้ข้างหน้าตัวออกซิไดส์ และเลขออกซิเดชันที่ลดลงไว้หน้าตัวรีดิวซ์



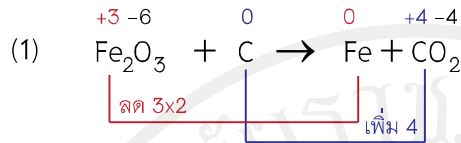
(3) ดุลจำนวนอะตอมของธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน



(4) ดุลจำนวนอะตอมของธาตุอื่น จนได้สมการที่ดุลแล้ว

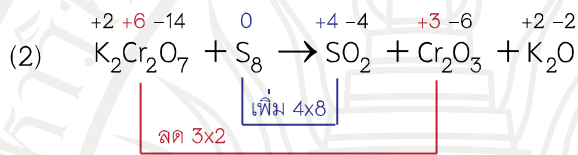


## ตัวอย่างที่ 6.2 จงดุลสมการรีดอกซ์ต่อไปนี้



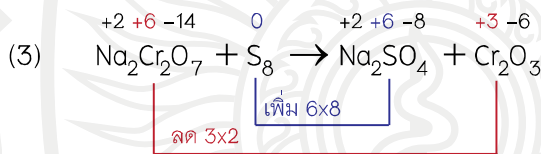
สมการที่ดุลแล้ว คือ  $4\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{C} \rightarrow 8\text{Fe} + 6\text{CO}_2$

ทำเป็นสัดส่วนอย่างต่ำจะได้  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$



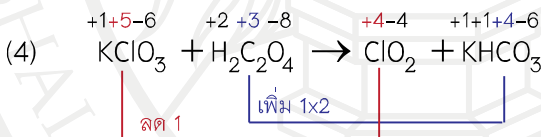
สมการที่ดุลแล้ว คือ  $32\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 6\text{S}_8 \rightarrow 48\text{SO}_2 + 32\text{Cr}_2\text{O}_3 + 32\text{K}_2\text{O}$

ทำเป็นสัดส่วนอย่างต่ำจะได้  $16\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 3\text{S}_8 \rightarrow 24\text{SO}_2 + 16\text{Cr}_2\text{O}_3 + 16\text{K}_2\text{O}$

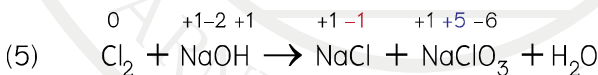


สมการที่ดุลแล้ว คือ  $48\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 6\text{S}_8 \rightarrow 48\text{Na}_2\text{SO}_4 + 48\text{Cr}_2\text{O}_3$

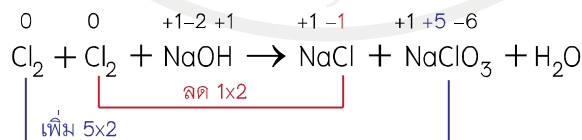
ทำเป็นสัดส่วนอย่างต่ำจะได้  $8\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{S}_8 \rightarrow 8\text{Na}_2\text{SO}_4 + 8\text{Cr}_2\text{O}_3$



สมการที่ดุลแล้ว คือ  $2\text{KClO}_3 + \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{ClO}_2 + 2\text{KHCO}_3$



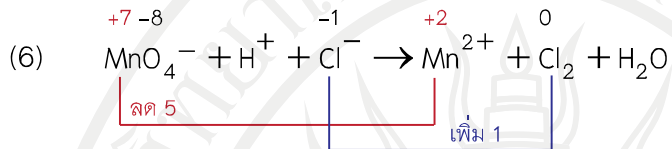
เนื่องจากอะตอม Cl มีทั้งเลขออกซิเดชันที่ลดและเพิ่ม จึงแยกพิจารณา ดังนี้



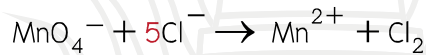
สมการที่ดุลแล้ว คือ  $2\text{Cl}_2 + 10\text{Cl}_2 + 24\text{NaOH} \rightarrow 20\text{NaCl} + 4\text{NaClO}_3 + 12\text{H}_2\text{O}$

ทำเป็นสัดส่วนอย่างต่ำจะได้  $3\text{Cl}_2 + 6\text{NaOH} \rightarrow 5\text{NaCl} + \text{NaClO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$

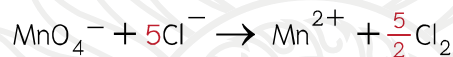
ในกรณีสารละลายที่เป็นกรดหรือเบส มีวิธีการดุลสมการเพิ่มเติม คือ หลังจากดุลจำนวนอะตอมของธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันแล้ว จะต้องมีการเติม  $H^+$  หรือ  $OH^-$  เพื่อดุลประจุสารฝั่งซ้ายและขวาของสมการให้เท่ากัน ต่อมาจึงเติม  $H_2O$  เพื่อดุลอะตอม H และ O เป็นขั้นตอนสุดท้าย (Lewis and Evans, 2006, P. 104) ดังตัวอย่างต่อไปนี้



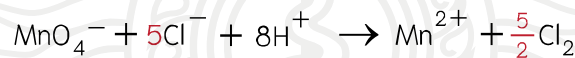
ทำเลขออกซิเดชันที่เพิ่มและลดลงให้เท่ากันได้



ดุลจำนวนอะตอมของธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน



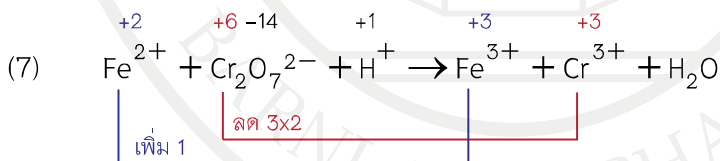
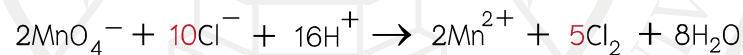
ดุลจำนวนประจุฝั่งซ้ายให้เท่ากับฝั่งขวาด้วยการเติม  $8H^+$



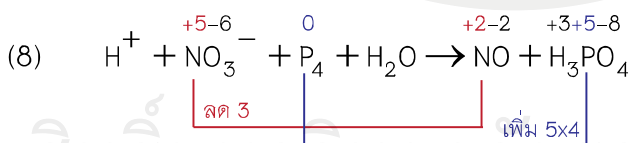
ดุลจำนวนอะตอม H และ O ด้วยการเติม  $4H_2O$  ฝั่งขวา จะได้สมการที่ดุลแล้ว คือ



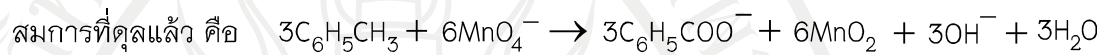
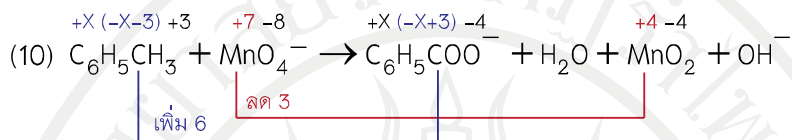
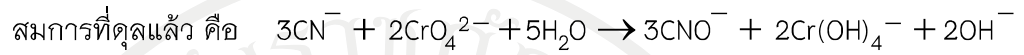
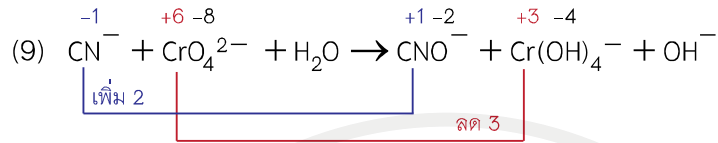
ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็ม จะได้



สมการที่ดุลแล้ว คือ  $6\text{Fe}^{2+} + \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ \rightarrow 6\text{Fe}^{3+} + 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$



สมการที่ดุลแล้ว คือ  $20\text{NO}_3^- + 3\text{P}_4 + 20\text{H}^+ + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 20\text{NO} + 12\text{H}_3\text{PO}_4$



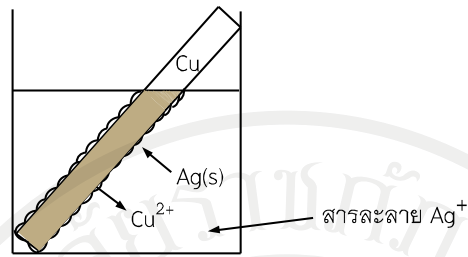
## 6.6 เซลล์เคมีไฟฟ้า

ระบบที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้วให้กระแสไฟฟ้าออกมา จะเรียกว่า เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) หรือเซลล์โวลตาอิก (voltaic cell) โดยระบบจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออกมาได้เองตามธรรมชาติ ส่วนระบบที่ต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ หรือปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ จะเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลติก (electrolytic cell) ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าทั้งสองประเภท มีรายละเอียดดังนี้

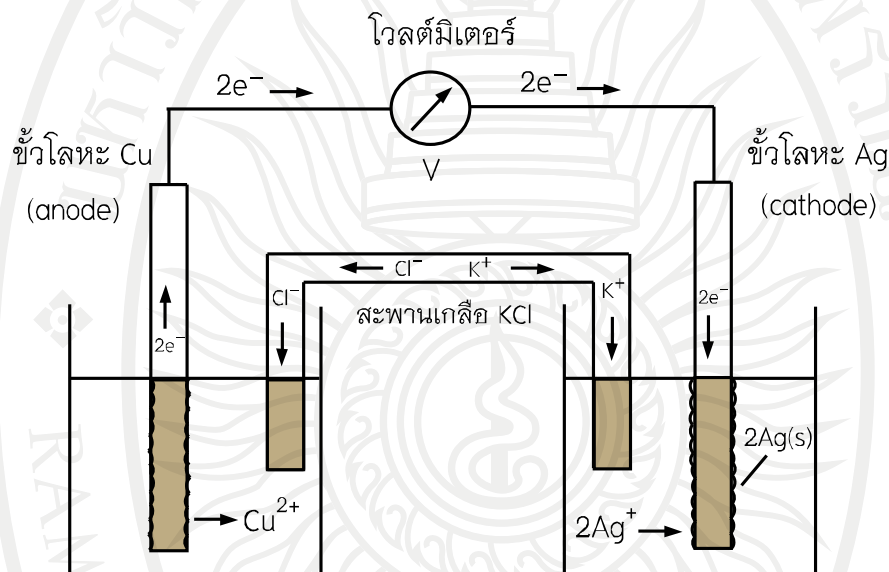
### 6.6.1 เซลล์กัลวานิก

สารที่ให้และรับอิเล็กตรอนสัมผัสกันโดยตรง จะไม่สามารถแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ เช่น ระบบที่แสดงในภาพที่ 6.1 เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอน ดังนั้นหากต้องการให้มีกระแสไฟฟ้าไหล ต้องมีการแยกครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอนและครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอนออกจากกัน (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 730-731) เช่น ปฏิกิริยารีดอกซ์ตามสมการ (6.3) ถ้าแยกครึ่งเซลล์ โดยให้โลหะ Cu จุ่มอยู่ในสารละลาย  $\text{Cu}^{2+}$  และโลหะ Ag จุ่มอยู่ในสารละลาย  $\text{Ag}^+$  ระบบดังกล่าวจะมีกระแสไหลระหว่างสองครึ่งปฏิกิริยาเมื่อเชื่อมต่อขั้วโลหะ Cu และ Ag ด้วยลวดตัวนำที่เชื่อมต่อกับโวลต์มิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 6.2 และให้สารละลายเชื่อมต่อกันผ่านสะพานเกลือ





ภาพที่ 6.1 ปฏิกิริยาระหว่างโลหะ Cu กับสารละลาย  $\text{Ag}^+$



ภาพที่ 6.2 การเชื่อมต่อครึ่งเซลล์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

เมื่อต่อระบบเซลล์กัลวานิกครบวงจร อิเล็กตรอนที่เกิดจากการออกซิเดชันของโลหะ Cu จะเคลื่อนที่ผ่านลวดตัวนำมายังขั้วโลหะ Ag โดย  $\text{Ag}^+$  ในสารละลายจะรับอิเล็กตรอนนี้ไว้ (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) การไหลของอิเล็กตรอนผ่านลวดตัวนำและผ่านสารละลายนี้คือกระแสไฟฟ้า ขั้วโลหะ Cu ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (anode) เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนขั้วโลหะ Ag ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (cathode) เพราะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน สำหรับสะพานเกลือประกอบด้วยสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ เช่น KCl ทำหน้าที่ดุลประจุ โดย  $\text{K}^+$  จะไหลลงไปที่ขั้วแคโทด ส่วน  $\text{Cl}^-$  จะไหลลงไปที่ขั้วแอโนด

### 6.6.1.1 การเขียนแผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้า

แผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้า คือ สัญลักษณ์แสดงเซลล์เคมีไฟฟ้าอย่างย่อที่เขียนขึ้นเพื่อให้สะดวก กะทัดรัด และสามารถเข้าใจได้ว่าขั้วใดเป็นขั้วแอโนด (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) และขั้วใดเป็นขั้วแคโทด (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) เช่น ปฏิกิริยารีดอกซ์  $A(s) + B^+(aq) \rightarrow A^+(aq) + B(s)$  แผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้า คือ  $A(s)/A^+(aq) // B^+/B(s)$  ซึ่งการเขียนแผนภาพเซลล์ดังกล่าว มีหลักการดังนี้

- (1) เขียนครึ่งเซลล์ออกซิเดชันที่เป็นขั้วแอโนดไว้ทางซ้ายมือ และครึ่งเซลล์รีดักชันที่เป็นแคโทดไว้ทางขวามือ
- (2) สัญลักษณ์ // แทนสะพานเกลือกั้นระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสอง และแต่ละครึ่งเซลล์ใช้เครื่องหมาย / คั่นระหว่างสารต่างสถานะ เช่น ขั้วไฟฟ้ากับไอออน
- (3) ถ้าทราบความเข้มข้นหรือความดันของไอออนหรือสารที่เกี่ยวข้อง ให้เขียนไว้ในวงเล็บ แล้ววางหลังสารนั้น เช่น  $Cu(s)/Cu^{2+}(0.2 M) // Ag^+(0.2 M)/Ag(s)$  หรือ  $Pt(s)/H_2(1 atm)/H^+(1 M) // Ag^+(1 M)/Ag(s)$
- (4) ถ้าสารในสถานะเดียวกันมีมากกว่า 1 ชนิด ให้ใช้เครื่องหมายจุลภาคคั่น เช่น  $Fe(s)/Fe^{2+}(aq), Fe^{3+}(aq) // Cu^{2+}(aq)/Cu(s)$

### 6.6.1.2 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

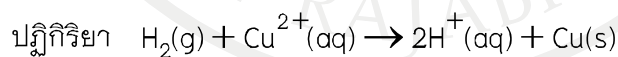
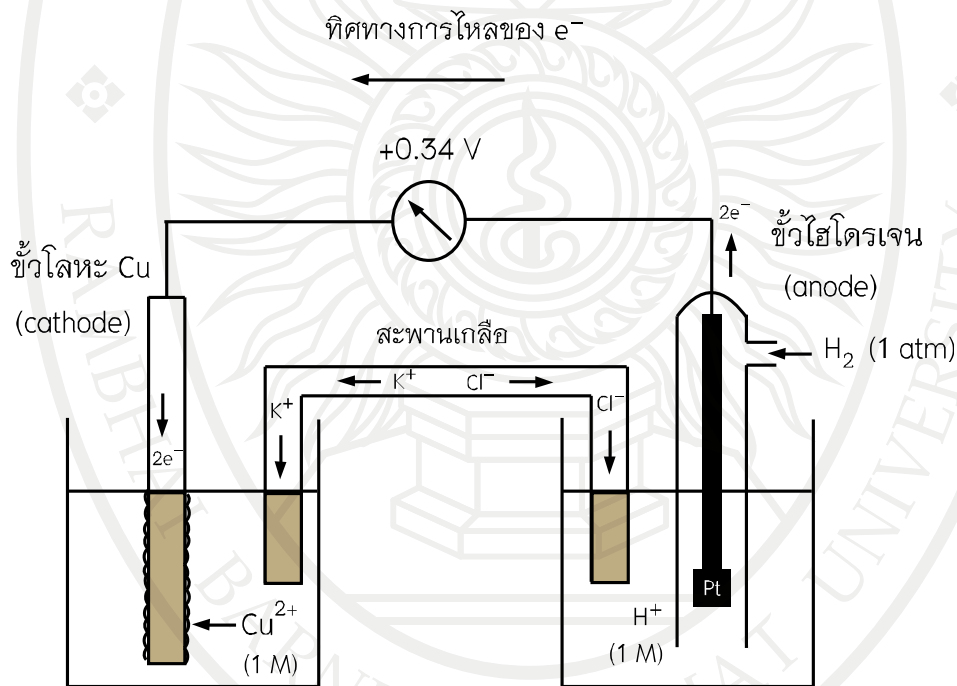
ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (cell potential) คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือแรงผลักดันที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ใช้สัญลักษณ์  $E_{cell}$  สำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (standard state) คือ ที่ความเข้มข้นของไอออนเท่ากับ 1 โมลาร์หรือความดันของแก๊สเท่ากับ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สภาวะนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (standard cell potential) ใช้สัญลักษณ์  $E^\circ_{cell}$  (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 830) การคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าทั้งสองค่า ( $E_{cell}$  และ  $E^\circ_{cell}$ ) มีสูตรที่คล้ายกันดังนี้

$$E_{cell} = E_{r(\text{แคโทด})} - E_{r(\text{แอโนด})} \quad (6.6)$$

$$E^\circ_{cell} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} \quad (6.7)$$

เมื่อ  $E_{r(\text{แคโทด})}$  และ  $E_{r(\text{แอโนด})}$  คือ ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่เขียนในรูปปฏิกิริยารีดักชัน และในทำนองเดียวกัน  $E^\circ_{r(\text{แคโทด})}$  และ  $E^\circ_{r(\text{แอโนด})}$  คือ ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่เขียนในรูปปฏิกิริยารีดักชัน ณ สภาวะมาตรฐาน

โดยปกติการวัดศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชัน ณ สภาวะมาตรฐาน จะวัดเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิง (ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ที่ทราบศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้นแล้ว เช่น ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (standard hydrogen electrode; SHE) ซึ่งมีค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.00 โวลต์ (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 734) เมื่อต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ณ สภาวะมาตรฐาน ก็เพียงแต่ต่อเซลล์นั้นกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน เช่น การวัดศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชันของขั้วทองแดง ณ สภาวะมาตรฐาน (ใช้สัญลักษณ์  $E^\circ_{\text{Cu}}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 การต่อขั้วทองแดงกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน

จากภาพที่ 6.3 อ่านค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$  จากโวลต์มิเตอร์ได้ +0.34 โวลต์ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณหา  $E^\circ_{\text{Cu}}$  จากสมการ (6.7) ได้ดังนี้

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})}$$

$$+0.34 = E^\circ_{\text{Cu}} - 0.00$$

ดังนั้น  $E^\circ_{\text{Cu}} = +0.34$  โวลต์

การต่อขั้วไฟฟ้า (ของเซลล์กัลวานิก) สองขั้วเข้าด้วยกัน จะให้ค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$  เป็นค่าบวกเสมอ โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนด (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ไปยังขั้วแคโทด (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) ซึ่งสามารถดูได้จากเข็มของโวลต์มิเตอร์ที่ชี้เข้าหาขั้วแคโทดเสมอ เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วทองแดงที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ณ สภาวะมาตรฐานกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน จะพบว่าขั้วทองแดงเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฮโดรเจน ( $\text{Cu}^{2+}$  รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า  $\text{H}^+$ ) ดังนั้นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจนจึงถูกบังคับให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำหน้าที่เป็นแอโนด ส่วนขั้วทองแดงจะทำหน้าที่เป็นแคโทด ดังนั้นจึงเขียนแผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้านี้ ได้คือ  $\text{Pt}/\text{H}_2(1 \text{ atm})/\text{H}^+(1 \text{ M}) // \text{Cu}^{2+}(1 \text{ M})/\text{Cu}(\text{s})$  ซึ่งโลหะแพลทินัม (Pt) ในที่นี้จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอิเล็กตรอนเท่านั้น ไม่ได้มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 829)

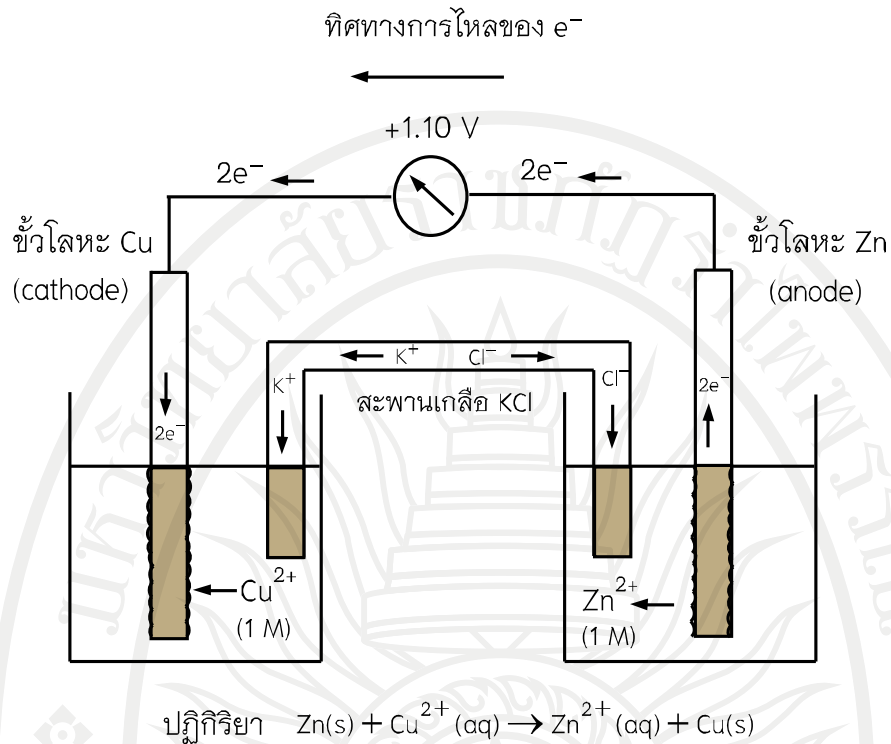
ในกรณีที่ต่อขั้วโลหะทองแดงเข้ากับขั้วโลหะอื่น เช่น ขั้วสังกะสี ณ สภาวะมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 6.4 แล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ +1.10 โวลต์ (แผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้า คือ  $\text{Zn}(\text{s})/\text{Zn}^{2+}(1 \text{ M}) // \text{Cu}^{2+}(1 \text{ M})/\text{Cu}(\text{s})$ ) จากสมการ (6.7) จะสามารถหาค่า  $E^\circ_{\text{Zn}}$  ได้ เพราะทราบ  $E^\circ_{\text{Cu}}$  แล้ว ดังนี้

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})}$$

$$+1.10 = E^\circ_{\text{Cu}} - E^\circ_{\text{Zn}}$$

ดังนั้น  $E^\circ_{\text{Zn}} = 0.34 - 1.10 = -0.76$  โวลต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 6.4 การต่อขั้วทองแดงกับขั้วสังกะสีที่สภาวะมาตรฐาน

ขั้วทองแดงและขั้วสังกะสีมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน  $E^\circ_{Cu}$  และ  $E^\circ_{Zn}$  เท่ากับ 0.34 และ -0.76 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่า  $E^\circ_{Cu} > E^\circ_{Zn}$  แสดงว่า  $Cu^{2+}$  รับผิดชอบได้ออกซิไดส์ได้ดีกว่า  $Zn^{2+}$  (หรือ  $Cu^{2+}$  เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงกว่า  $Zn^{2+}$ ) ดังนั้น ขั้วทองแดงจึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเป็นขั้วแคโทด ส่วนขั้วสังกะสีเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเป็นขั้วแอโนด จากหลักการต่อขั้วไฟฟ้าในเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น ทำให้สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหรือของปฏิกิริยารีดักชันในครึ่งเซลล์ใด ๆ ได้ (ใช้สัญลักษณ์  $E^\circ_r$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ดังนี้

ตารางที่ 6.2 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของสารบางชนิด

ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน	$E_r^\circ$ (โวลต์)
$F_2(g) + 2e^- \rightarrow 2F^-(aq)$	+2.87
$MnO_4^-(aq) + 8H^+(aq) + 5e^- \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$	+1.51
$Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-(aq)$	+1.36
$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$	+1.33
$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l)$	+1.23
$Br_2(l) + 2e^- \rightarrow 2Br^-(aq)$	+1.06
$NO_3^-(aq) + 4H^+(aq) + 3e^- \rightarrow NO(g) + 2H_2O(l)$	+0.96
$Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s)$	+0.80
$Fe^{3+}(aq) + e^- \rightarrow Fe^{2+}(aq)$	+0.77
$O_2(g) + 2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow 2H_2O_2(aq)$	+0.68
$MnO_4^-(aq) + 2H_2O(l) + 3e^- \rightarrow MnO_2(s) + 4OH^-(aq)$	+0.59
$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-(aq)$	+0.54
$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$	+0.40
$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$	+0.34
$2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	0.00
$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ni(s)$	-0.28
$Fe^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Fe(s)$	-0.44
$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$	-0.76
$2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$	-0.83
$Al^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Al(s)$	-1.66
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$	-2.71
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$	-3.05

(ที่มา : สุชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 163)

ค่า  $E_r^\circ$  ที่แสดงในตารางที่ 6.2 ถูกจัดเรียงจากมากไปหาน้อย หรือ เรียงลำดับตามความสามารถในการรับอิเล็กตรอน ซึ่งในที่นี้พบว่า  $F_2(g)$  รับอิเล็กตรอนได้ดีที่สุด เพราะมีค่า  $E_r^\circ$  สูงที่สุด ( $E_r^\circ = +2.87$  โวลต์) แสดงว่า  $F_2(g)$  เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงที่สุด (อาจกล่าวได้ว่า  $F^-(aq)$  เป็นตัวรีดิวส์ที่อ่อนที่สุด เพราะไม่ชอบเสียอิเล็กตรอน) ในทางตรงกัน



ข้าม  $\text{Li}^+(\text{aq})$  ไม่ชอบรับอิเล็กตรอน เพราะมีค่า  $E^\circ_r$  ต่ำที่สุด ( $E^\circ_r = -3.05$  โวลต์) แสดงว่า  $\text{Li}^+(\text{aq})$  เป็นตัวออกซิไดส์ที่อ่อนที่สุด (อาจกล่าวได้ว่า  $\text{Li}(\text{s})$  เป็นตัวรีดิวส์ที่แรงที่สุด เพราะชอบเสียอิเล็กตรอน)

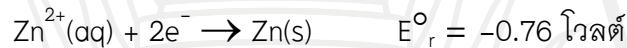
ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันมาตรฐาน (ใช้สัญลักษณ์  $E^\circ$ ) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเป็นตัวเลขเดียวกันกับ  $E^\circ_r$  แต่มีเครื่องหมายเป็นตรงกันข้าม ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันมาตรฐานของสารบางชนิด

ครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน	$E^\circ$ (โวลต์)
$2\text{F}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{F}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	-2.87
$\text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 5\text{e}^-$	-1.51
$2\text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	-1.36
$2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14\text{H}^+(\text{aq}) + 6\text{e}^-$	-1.33
$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$	-1.23
$2\text{Br}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^-$	-1.06
$\text{NO}(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{NO}_3^-(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 3\text{e}^-$	-0.96
$\text{Ag}(\text{s}) \rightarrow \text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	-0.80
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^-$	-0.77
$2\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	-0.68
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 3\text{e}^-$	-0.59
$2\text{I}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^-$	-0.54
$4\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4\text{e}^-$	-0.40
$\text{Cu}(\text{s}) \rightarrow \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	-0.34
$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	0.00
$\text{Ni}(\text{s}) \rightarrow \text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	+0.28
$\text{Fe}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	+0.44
$\text{Zn}(\text{s}) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	+0.76
$\text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^-$	+0.83
$\text{Al}(\text{s}) \rightarrow \text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^-$	+1.66
$\text{Na}(\text{s}) \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	+2.71
$\text{Li}(\text{s}) \rightarrow \text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	+3.05

การพิจารณาค่า  $E^\circ$  ใช้บอกค่าความสามารถในการให้อิเล็กตรอน โดยจากตารางที่ 6.3 พบว่า  $\text{Li(s)}$  มีค่า  $E^\circ$  สูงที่สุด ( $E^\circ = +3.05$  โวลต์) แสดงว่า  $\text{Li(s)}$  ชอบให้อิเล็กตรอนได้มากที่สุด จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงที่สุดในทางตรงกันข้าม  $\text{F}^-(\text{aq})$  มีค่า  $E^\circ$  ต่ำที่สุด ( $E^\circ = -2.87$  โวลต์) แสดงว่า  $\text{F}^-(\text{aq})$  ไม่ชอบให้อิเล็กตรอน จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อนที่สุด จะเห็นว่าการพิจารณาความแรงของตัวออกซิไดส์หรือตัวรีดิวซ์โดยพิจารณาจากค่า  $E^\circ$  หรือ  $E^\circ_r$  ให้ผลไปในทางเดียวกัน

**ตัวอย่างที่ 6.3** เซลล์กัลวานิกที่เกิดจากครึ่งปฏิกิริยารีดักชันต่อไปนี้



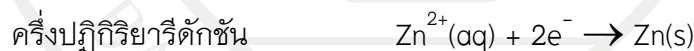
จงตอบคำถามต่อไปนี้

(1) แรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $E^\circ_{\text{cell}}$ ) ของเซลล์นี้เป็นเท่าใด

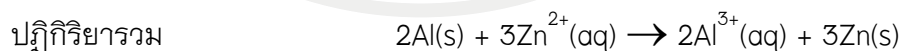
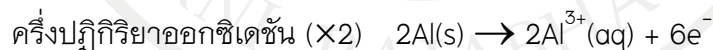
วิธีทำ เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์กัลวานิกต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นขั้วแอโนด คือ ขั้วโลหะ Al และขั้วแคโทด คือ ขั้วโลหะ Zn

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (6.7)} \quad E^\circ_{\text{cell}} &= E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} \\ &= E^\circ_{\text{Zn}} - E^\circ_{\text{Al}} = -0.76 - (-1.66) = 0.9 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

(2) จงเขียนปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้น



เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับมีจำนวนไม่เท่ากัน จึงปรับสัดส่วน ดังนี้



(3) สารใดเป็นตัวออกซิไดส์ สารใดเป็นตัวรีดิวส์ สารใดถูกออกซิไดส์ และสารใดถูกรีดิวส์

วิธีทำ ตัวออกซิไดส์ คือ สารที่ถูกรีดิวส์ คือ  $Zn^{2+}(aq)$

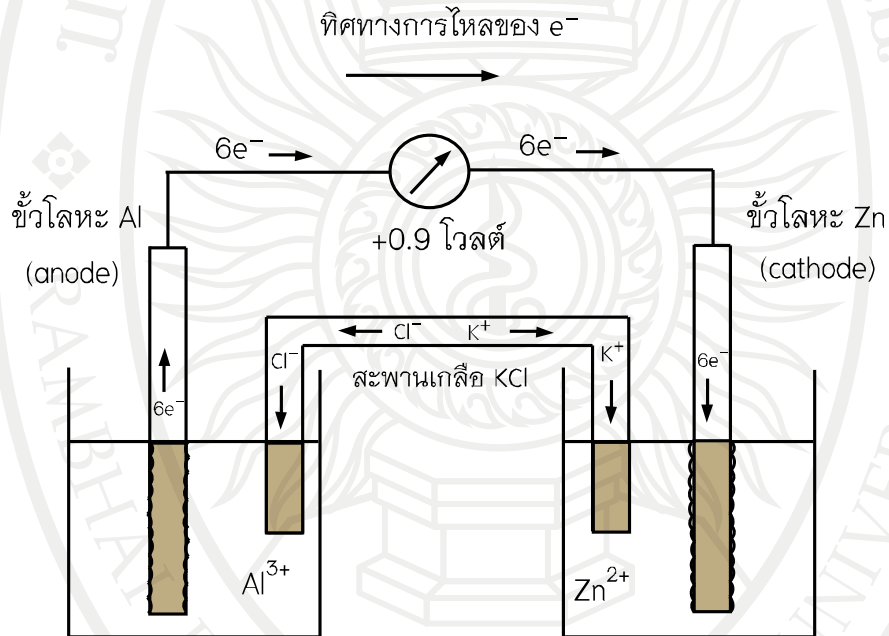
ตัวรีดิวส์ คือ สารที่ถูกออกซิไดส์ คือ  $Al(s)$

(4) จงเขียนแผนภาพเซลล์ไฟฟ้า

วิธีทำ แผนภาพเซลล์ไฟฟ้า คือ  $Al(s)/Al^{3+}(aq) // Zn^{2+}(aq)/Zn(s)$

(5) จงเขียนภาพแสดงเซลล์กัลวานิกนี้ พร้อมระบุทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน

วิธีทำ



ตัวอย่างที่ 6.4 เมื่อนำครึ่งเซลล์  $M/M^{2+}$  มาต่อกับครึ่งเซลล์  $B/B^{2+}$ ,  $C/C^{2+}$ , และ  $D/D^{2+}$  ทีละครั้ง ได้ผลดังตาราง

ครึ่งเซลล์ที่ต่อกัน	ขั้วโลหะที่เพิ่มโวลต์มิเตอร์ เป็นเข้าหา	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)
$M/M^{2+}$ กับ $B/B^{2+}$	M	1.0
$M/M^{2+}$ กับ $C/C^{2+}$	C	1.5
$M/M^{2+}$ กับ $D/D^{2+}$	D	3.0

จงเรียงลำดับความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวส์ของสารจากมากไปหาน้อย

วิธีทำ ปฏิริยาระหว่างครึ่งเซลล์  $M/M^{2+}$  กับ  $B/B^{2+}$  คือ  $B + M^{2+} \rightarrow B^{2+} + M$

ดังนั้นความแรงของตัวออกซิไดส์ (รับอิเล็กตรอน)  $M^{2+} > B^{2+}$

ปฏิริยาระหว่างครึ่งเซลล์  $M/M^{2+}$  กับ  $C/C^{2+}$  คือ  $M + C^{2+} \rightarrow M^{2+} + C$

ดังนั้นความแรงของตัวออกซิไดส์ (รับอิเล็กตรอน)  $C^{2+} > M^{2+}$

ปฏิริยาระหว่างครึ่งเซลล์  $M/M^{2+}$  กับ  $D/D^{2+}$  คือ  $M + D^{2+} \rightarrow M^{2+} + D$

ดังนั้นความแรงของตัวออกซิไดส์ (รับอิเล็กตรอน)  $D^{2+} > M^{2+}$

เปรียบเทียบระหว่าง  $C^{2+}$  กับ  $D^{2+}$  พบว่าความแรงของตัวออกซิไดส์  $D^{2+} > C^{2+}$  (ดูจาก

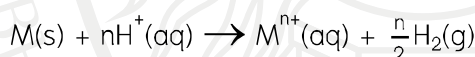
ค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$ )

สรุปความแรงของตัวออกซิไดส์  $D^{2+} > C^{2+} > M^{2+} > B^{2+}$

เนื่องจากสารที่รับอิเล็กตรอนได้ดี จะให้อิเล็กตรอนได้ไม่ดี ดังนั้นความแรงของตัวรีดิวส์เรียงตามลำดับดังนี้  $B > M > C > D$

**ตัวอย่างที่ 6.5** เมื่อจุ่มโลหะเงิน (Ag), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และ อะลูมิเนียม (Al) ลงในสารละลายกรด HCl 1 โมล/ลิตร จงทำนายว่าโลหะชนิดใดสามารถเกิดปฏิกิริยาให้พองแก๊ส  $H_2$  ได้

วิธีทำ โลหะ M เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ  $H^+$  ให้แก๊ส  $H_2$  จะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



แยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ดังนี้

ครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $M(s) \rightarrow M^{n+}(aq) + ne^-$  (ขั้วแอโนด)

ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน  $nH^+(aq) + ne^- \rightarrow (n/2)H_2(g)$  (ขั้วแคโทด)

ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เองเมื่อ  $E^\circ_{\text{cell}} > 0$

นั่นคือ

$$E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} > 0$$

$$0.00 - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} > 0$$

$$E^\circ_{r(\text{แอโนด})} < 0$$

ดังนั้นปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของขั้วแอโนดน้อยกว่าศูนย์ จาก

ตารางที่ 6.2 พบว่า  $E^\circ_{\text{Ag}} = 0.8$  โวลต์,  $E^\circ_{\text{Cu}} = 0.34$  โวลต์,  $E^\circ_{\text{Zn}} = -0.76$  โวลต์, และ  $E^\circ_{\text{Al}} = -1.66$  โวลต์ จึงได้ข้อสรุปว่า โลหะ Zn และ Al จะเกิดปฏิกิริยากับ  $H^+$  ได้แก๊ส  $H_2$  แต่

โลหะ Ag และ Cu ไม่เกิดปฏิกิริยา

### 6.6.1.3 อุณหพลศาสตร์ของเซลล์กัลวานิก

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิก ( $E_{\text{Cell}}$ ) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G$ ) สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยา ณ สภาวะมาตรฐาน จะมีความสัมพันธ์ (ปริญา อรุณวิสุทธิ, 2553, หน้า 284) คือ

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ_{\text{Cell}} \quad (6.8)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดการแลกเปลี่ยน  
 $F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่า 96485 คุลอมป์ต่อโมล ( $\approx 96500$  คุลอมป์ต่อโมล)

ค่า  $\Delta G^\circ$  สามารถบอกทิศทางการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ (ดูบทที่ 3) ดังนั้นเมื่อเชื่อมโยงค่า  $\Delta G^\circ$  กับค่า  $E^\circ_{\text{Cell}}$  ตามสมการที่ (6.8) จึงใช้ค่า  $E^\circ_{\text{Cell}}$  ทำนายทิศทางการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ใด ๆ ได้ ดังนี้

(1) ถ้า  $E^\circ_{\text{Cell}} > 0$  แสดงว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์นั้นเกิดขึ้นได้เอง (เซลล์กัลวานิก)

(2) ถ้า  $E^\circ_{\text{Cell}} = 0$  แสดงว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์นั้นอยู่ในสภาวะสมดุล

(3) ถ้า  $E^\circ_{\text{Cell}} < 0$  แสดงว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์นั้นเกิดขึ้นเองไม่ได้ ต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้ (เซลล์อิเล็กโทรไลติก)

ณ สภาวะสมดุล จะได้ 
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (6.9)$$

เมื่อ  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 จูล/โมล·เคลวิน  
 $T$  คือ อุณหภูมิ 298.15 เคลวิน (25 องศาเซลเซียส)  
 $K$  คือ ค่าคงที่สมดุล

รวมความสัมพันธ์ตามสมการ (6.8) และ (6.9) จะได้

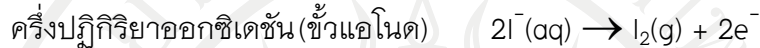
$$E^\circ_{\text{Cell}} = \frac{RT}{nF} \ln K \quad (6.10)$$

ที่ 298.15 เคลวิน และเปลี่ยน  $\ln$  เป็น  $2.303 \log$  จะได้

$$E^\circ_{\text{cell}} = \frac{0.05916}{n} \log K \quad (6.11)$$

**ตัวอย่างที่ 6.6** จงตรวจสอบว่าปฏิกิริยา  $2\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 2\text{I}^{-}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{I}_2(\text{g})$  เกิดขึ้นได้ในทิศทางที่กำหนดหรือไม่

วิธีทำ จากโจทย์แยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ดังนี้



คำนวณหาค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$  ตามสมการ (6.7) และโดยดูค่า  $E^\circ_r$  จากตาราง 6.2 จึงได้

$$\begin{aligned} E^\circ_{\text{cell}} &= E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} \\ &= +0.77 - (+0.54) = 0.23 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

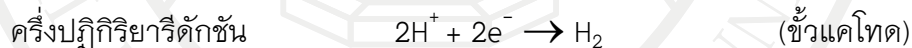
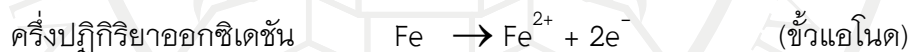
เนื่องจาก  $E^\circ_{\text{cell}} > 0$  แสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเองได้ในทิศทางที่กำหนด

**ตัวอย่างที่ 6.7** จากค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$  ของเซลล์กัลวานิกที่เกิดจากครึ่งปฏิกิริยารีดักชันต่อไปนี้



จงคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา  $\text{Fe} + 2\text{H}^{+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2$

วิธีทำ จากปฏิกิริยาที่โจทย์กำหนด แยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ดังนี้



จากสมการ (6.7)  $E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})}$

ดังนั้น  $E^\circ_{\text{cell}} = 0.00 - (-0.44) = +0.44$  โวลต์

จากสมการ (6.11)

$$E^\circ_{\text{cell}} = \frac{0.05916}{n} \log K$$

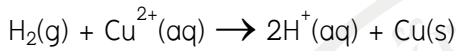
$$0.44 = \frac{0.05916}{2} \log K$$

แก้สมการหาค่า K จะได้ค่า  $K = 7.49 \times 10^{14}$



## 6.6.1.4 สมการเนินสต์

การหาค่า  $E_{\text{Cell}}$  ซึ่งไม่ใช่ที่สภาวะมาตรฐาน ทำได้โดยพิจารณาตัวอย่าง เซลล์ต่อไปนี้  $\text{Pt(s)}/\text{H}_2(\text{g})/\text{H}^+(\text{aq}) // \text{Cu}^{2+}(\text{aq})/\text{Cu(s)}$  ซึ่งมีปฏิกิริยารวม คือ



การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ หาได้จากสมการ (6.12) ดังนี้

$$\Delta G = -RT \left( \ln K - \ln \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}]} \right) \quad (6.12)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta G^\circ = -RT \ln K = -nFE_{\text{Cell}}^\circ$$

$$\text{และ } \Delta G = -nFE_{\text{Cell}}$$

$$\text{ดังนั้น } -nFE_{\text{Cell}} = -nFE_{\text{Cell}}^\circ + RT \ln \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}]}$$

$$\text{หรือ } E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (6.13)$$

ที่ 298 เคลวิน และเปลี่ยน  $\ln$  เป็น  $2.303 \log$  จะได้

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^\circ - \frac{0.05916}{2} \log \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (n = 2)$$

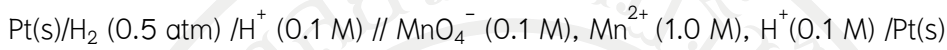
สำหรับปฏิกิริยา  $aA + bB \rightarrow cC + dD$

$$\text{กำหนด } Q = \frac{[\text{C}]^c [\text{D}]^d}{[\text{A}]^a [\text{B}]^b}$$

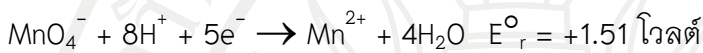
$$\text{ดังนั้น } E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^\circ - \frac{0.05916}{n} \log Q \quad (6.14)$$

เรียกสมการ (6.14) นี้ว่า สมการเนิร์นสต์ (Nernst equation) ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้หาค่า  $E_{\text{Cell}}$  ณ สภาวะอื่นที่ไม่ใช่สภาวะมาตรฐาน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

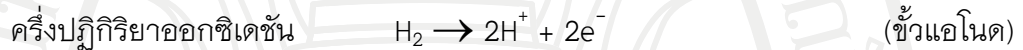
**ตัวอย่างที่ 6.8** จงคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อไปนี้



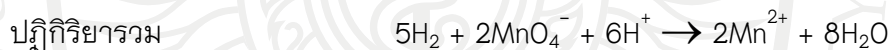
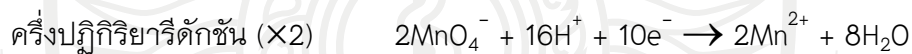
กำหนดค่า  $E^\circ_r$  ให้ดังนี้



วิธีทำ จากปฏิกิริยาที่โจทย์กำหนด แยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ดังนี้



เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับมีจำนวนไม่เท่ากัน จึงปรับสัดส่วน ดังนี้



$$\text{จากสมการ (6.7)} \quad E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad E^\circ_{\text{cell}} = +1.51 - 0.00 = +1.51 \text{ โวลต์}$$

ข้อสังเกต ค่า  $E^\circ$  จะเท่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าจะมีการคูณสมการด้วยเลขใด ๆ

ก็ตาม

$$Q = \frac{[\text{Mn}^{2+}]^2}{[\text{H}_2]^5 [\text{MnO}_4^-]^2 [\text{H}^+]^6}$$

$$\text{จากสมการสมการเนิร์นสต์} \quad E_{\text{Cell}} = E^\circ_{\text{Cell}} - \frac{0.05916}{n} \log Q$$

$$E_{\text{Cell}} = E^\circ_{\text{Cell}} - \frac{0.05916}{n} \log \left( \frac{[\text{Mn}^{2+}]^2}{[\text{H}_2]^5 [\text{MnO}_4^-]^2 [\text{H}^+]^6} \right)$$

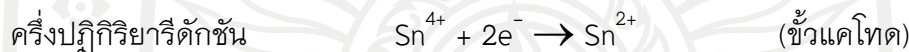
$$E_{\text{cell}} = 1.51 - \frac{0.05916}{10} \log \left( \frac{(1)^2}{(0.5)^5 (0.1)^2 (0.1)^6} \right)$$

$$= +1.45 \text{ โวลต์}$$

**ตัวอย่างที่ 6.9** จงคำนวณหาความเข้มข้นของ  $\text{Sn}^{4+}$  ที่อยู่ในสารละลายเดียวกันกับ  $\text{Sn}^{2+}$  เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เมื่อนำมาต่อกับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐาน แล้วได้ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ กำหนดให้



วิธีทำ จากข้อมูลที่โจทย์กำหนด แยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ดังนี้



$$\text{จากสมการ (6.7)} \quad E_{\text{cell}}^\circ = E_{r(\text{แคโทด})}^\circ - E_{r(\text{แอโนด})}^\circ$$

$$\text{ดังนั้น} \quad E_{\text{cell}}^\circ = +0.13 - 0.00 = +0.13 \text{ โวลต์}$$

$$Q = \frac{[\text{H}^+]^2 [\text{Sn}^{2+}]}{[\text{H}_2] [\text{Sn}^{4+}]}$$

$$\text{จากสมการเนิร์นสต์} \quad E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^\circ - \frac{0.05916}{n} \log Q$$

$$0 = 0.13 - \frac{0.05916}{2} \log \left( \frac{(1)^2 (1)}{(1) [\text{Sn}^{4+}]} \right)$$

$$0 = 0.13 - \frac{0.05916}{2} \log \left( \frac{1}{[\text{Sn}^{4+}]} \right)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี  
แก้สมการหาค่า  $[\text{Sn}^{4+}]$  จะได้ค่า  $[\text{Sn}^{4+}] = 4 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร

### 6.6.1.5 เซลล์ความเข้มข้น

เซลล์ความเข้มข้น คือ เซลล์กัลวานิกที่ใช้โลหะชนิดเดียวกันเป็นขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายของโลหะชนิดนั้น (สุชาติพิทย์ คิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 176) โดยในด้านของสารละลายเจือจางจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ส่วนด้านสารละลายเข้มข้นจะเป็นขั้วแคโทด (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) เช่น เซลล์ไฟฟ้า  $\text{Zn(s)}/\text{Zn}^{2+}(0.01 \text{ M}) // \text{Zn}^{2+}(0.03 \text{ M})/\text{Zn(s)}$  เขียนแยกเป็นครึ่งปฏิกิริยาได้ ดังนี้



$$\text{จากสมการ (6.7)} \quad E_{\text{cell}}^{\circ} = E_{\text{r(แคโทด)}}^{\circ} - E_{\text{r(แอโนด)}}^{\circ} = E_{\text{Zn}}^{\circ} - E_{\text{Zn}}^{\circ} = 0 \text{ โวลต์}$$

ใช้สมการเนินสต์คำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ ดังนี้

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^{\circ} - \frac{0.05916}{n} \log Q$$

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cell}}^{\circ} - \frac{0.05916}{n} \log \left( \frac{\text{Zn}^{2+}(0.01 \text{ M})}{\text{Zn}^{2+}(0.03 \text{ M})} \right)$$

$$E_{\text{Cell}} = 0 - \frac{0.05916}{2} \log \left( \frac{0.01}{0.03} \right)$$

$$= 0.0141 \text{ โวลต์}$$

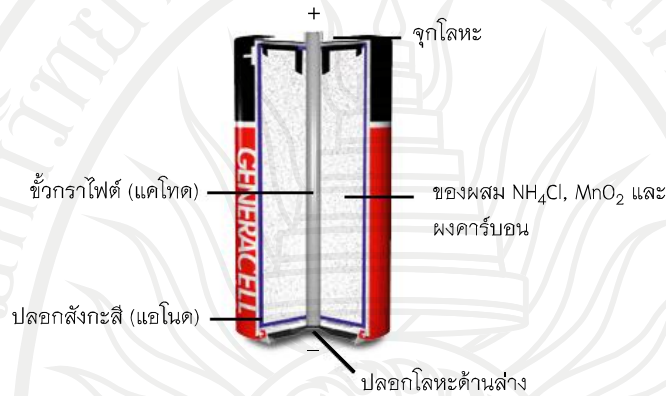
### 6.6.1.6 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานเซลล์กัลวานิก

เซลล์กัลวานิกเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมาได้ จึงมีประโยชน์ สำหรับเป็นแหล่งสะสมพลังงาน และเป็นตัวจุกกันติในรูปของถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

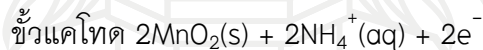
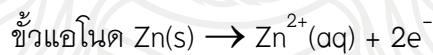
### (1) ถ่านไฟฉายชนิดสังกะสีคาร์บอน

ลักษณะภายในของถ่านไฟฉายประกอบด้วยสารแอมโมเนียมคลอไรด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และแท่งกราไฟต์ซึ่งอยู่ใจกลางทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วนสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 749) ดังแสดงในภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 ถ่านไฟฉายชนิดสังกะสีคาร์บอน  
(ที่มา : Davidson, 2013)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

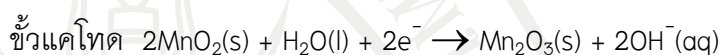
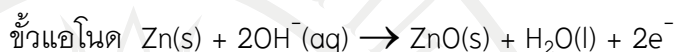


หลังจากจ่ายกระแสไฟฟ้า จะมี  $\text{NH}_3$  เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Zn}^{2+}$  กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $\text{Zn}(\text{NH}_3)_4^{2+}$  และ  $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$  ซึ่งมีข้อดีคือทำให้  $\text{Zn}^{2+}$  ในเซลล์เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้อยมากจนเกือบคงที่ ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้ (ประมาณ 1.5 โวลต์) ค่อนข้างคงที่ แต่มีข้อเสียคือมีอายุการใช้งานสั้น ไม่สามารถประจุไฟใหม่ได้ และเมื่อทิ้งวัสดุแอโนดจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักแมงกานีสและสังกะสี (สุชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 178)

## (2) ถ่านไฟฉายแอลคาไลน์

ถ่านไฟฉายชนิดนี้ใช้สังกะสีเป็นขั้วแอโนด และแมงกานีส ไดออกไซด์เป็นแคโทด นอกจากนี้ยังผสมเบส เช่น KOH เพิ่มเข้าไปเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้น จึงเรียกถ่านไฟฉายชนิดนี้ว่าถ่านไฟฉายแอลคาไลน์ (Olmsted III and Williams, 2002, P. 893)

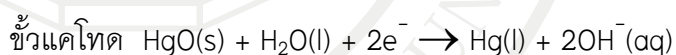
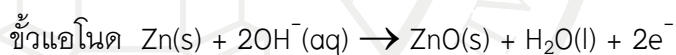
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



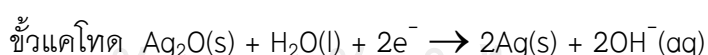
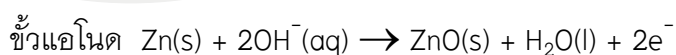
แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากถ่านไฟฉายชนิดนี้มีค่าคงที่ประมาณ 1.5 โวลต์ และให้กระแสไฟฟ้าที่มากกว่าและยาวนานกว่าถ่านไฟฉายชนิดสังกะสีคาร์บอน เพราะที่ขั้วแคโทดเกิด  $\text{OH}^-$  ซึ่งสามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ที่ขั้วแอโนด (McMurry and Fay, 2001, P. 784)

## (3) ถ่านกระดุม

เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดนี้มีขนาดเล็ก ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมา ประมาณ 1.35 โวลต์ ใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น นาฬิกาข้อมือ เครื่องคิดเลข และรีโมทรถยนต์ เป็นต้น ขั้วแอโนดทำจากโลหะสังกะสี ส่วนขั้วแคโทดทำจากเมอคิวไรต์ออกไซด์ ( $\text{HgO}$ ) นอกจากนี้ยังผสมเบส (เช่นเดียวกับถ่านไฟฉายแอลคาไลน์) และซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) สำหรับเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Olmsted III and Williams, 2002, P. 893) ดังแสดงในภาพที่ 6.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ถ่านกระดุมอีกชนิดหนึ่งที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า (ประมาณ 1.8 โวลต์) และมีราคาสูงกว่า ทำมาจากซิลเวอร์ออกไซด์ ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ) ซึ่งใช้เป็นขั้วแคโทด ส่วนขั้วแอโนดยังคงเป็นสังกะสีเช่นเดิม (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 846-847) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้







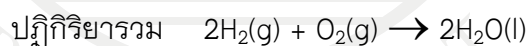
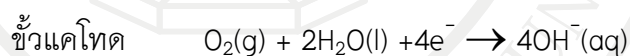
ภาพที่ 6.6 ถ่านกระดุม

(ที่มา : McMurry and Fay, 2001, P. 784)

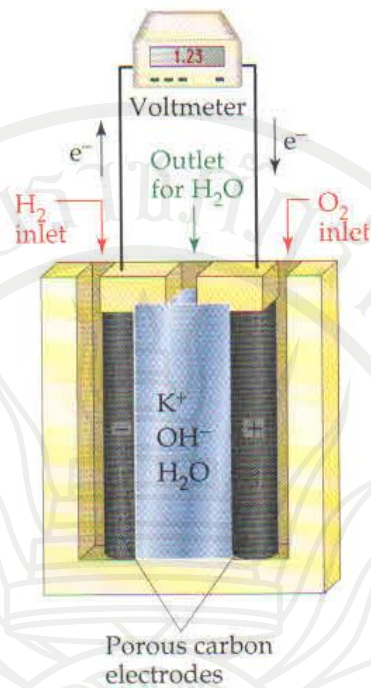
#### (4) เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงใช้แก๊ส  $H_2$  และ  $O_2$  เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา โดยให้แก๊สทั้งสองเข้าไปทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ( $H_2$  เข้าทางด้านแอโนด ส่วน  $O_2$  เข้าทางด้านแคโทด) ขั้วไฟฟ้าทำจากคาร์บอนที่มีความพรุนผสมโลหะนิกเกิล และใช้  $KOH$  เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (McMurry and Fay, 2001, P. 785) ดังแสดงในภาพที่ 6.7

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นผลของปฏิกิริยาจึงได้น้ำบริสุทธิ์ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า (1.23 โวลต์) ออกมาในคราวเดียวกัน ทำให้เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ถูกติดตั้งบนยานอวกาศ (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 750) นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีผู้คิดค้นรถยนต์พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (hydrogen fuel cell electric car) สำหรับเป็นพลังงานทางเลือกที่สะอาด และปราศจากมลพิษ

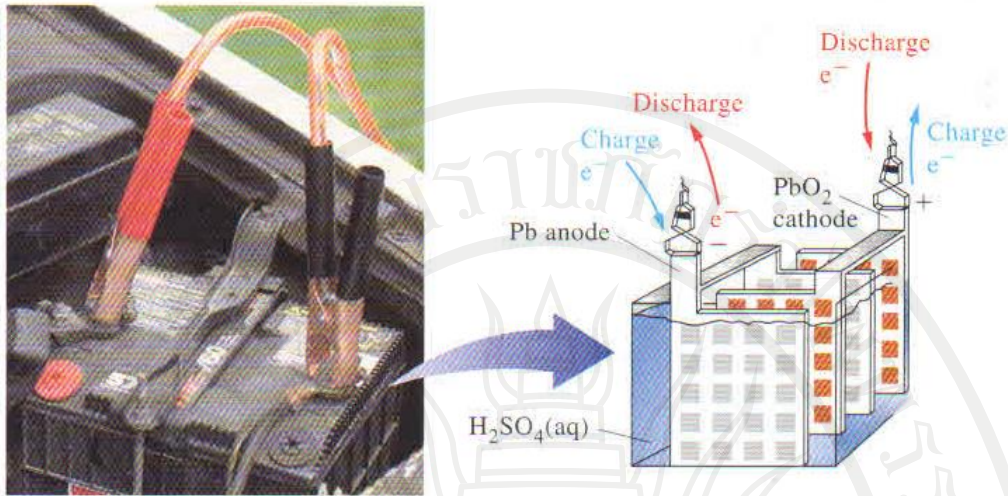


ภาพที่ 6.7 เซลล์เชื้อเพลิง  $H_2-O_2$

(ที่มา : Brown, Lemay, and Bursten, P. 751)

#### (5) แบตเตอรี่รถยนต์

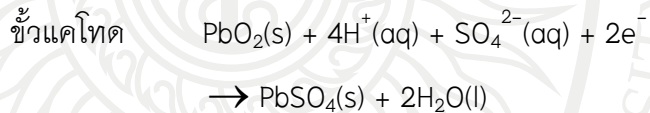
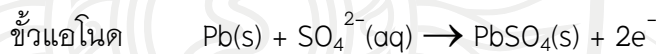
แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่วประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกหลายเซลล์ ซึ่งโดยปกติจะมี 6 เซลล์ต่ออนุกรมกัน แต่ละเซลล์มีค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ ทำให้ได้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 845) ภายในแบตเตอรี่ประกอบด้วยแผ่นตะกั่ว (Pb) ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแผ่นตะกั่วออกไซด์ ( $PbO_2$ ) ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด วางสลับกันแบบอนุกรม สารอิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายกรดซัลฟูริก ดังแสดงในภาพที่ 6.8



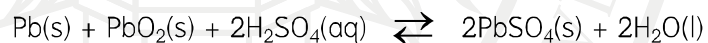
ภาพที่ 6.8 แบตเตอรี่สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว

(ที่มา : Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 845)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นชนิดผันกลับได้ดังนี้



ปฏิกิริยารวม

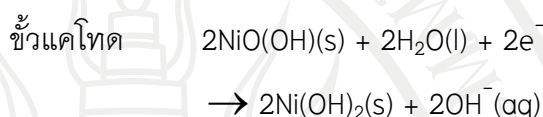


จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้  $\text{PbSO}_4(\text{s})$  ทั้งที่แคโทดและแอโนด ขณะจ่ายไฟนี้มีการใช้กรดซัลฟูริก ทำให้ความเข้มข้นของกรดลดลงเรื่อย ๆ จึงต้องมีการตรวจเช็คสภาพแบตเตอรี่ด้วยการวัดความหนาแน่นของกรดซัลฟูริก โดยใช้เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์ วัดความถ่วงจำเพาะของกรด ซึ่งควรจะมีค่าประมาณ 1.25–1.30 (สุชาติพิศศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 182)

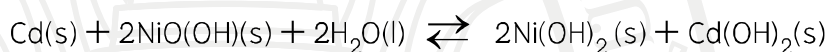
หลังจากจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องยนต์และเครื่องยนต์ทำงานแล้ว จะเกิดการรีชาร์จโดยเจนเนอเรเตอร์ (generator) จ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้  $\text{PbSO}_4(\text{s})$  และ  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  เกิดปฏิกิริยา ให้  $\text{Pb(s)}$ ,  $\text{PbO}_2(\text{s})$  และ  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$  กลับคืนมา นอกจากนี้จะต้องเติมน้ำกลั่นให้กับแบตเตอรี่เป็นครั้งคราวเพราะน้ำสามารถระเหยออกจากตัวแบตเตอรี่ได้ (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 749)

## (6) ถ่านชาร์จ

ถ่านไฟฉายที่ประจุไฟใหม่ได้หรือเรียกว่า ถ่านชาร์จ (rechargeable battery) ประกอบด้วยโลหะแคดเมียมเป็นขั้วแอโนด และสารประกอบนิกเกิล III (NiO(OH)) บนโลหะนิกเกิล เป็นขั้วแคโทด มี KOH เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 847) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นชนิดผันกลับได้ดังนี้



ปฏิกิริยารวม



จะสังเกตเห็นว่าสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาเป็นของแข็งทั้งหมด ดังนั้นความเข้มข้นจะคงที่และให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ประมาณ 1.4 โวลต์ (สุชาติพิทย์ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 183) แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือจ่ายไฟฟ้าได้นาน และยังสามารถประจุไฟใหม่เมื่อประจุไฟฟ้าหมด แต่มีข้อเสียคืออาการกัดเซลล์ไฟฟ้าเมื่อเสื่อมสภาพ เพราะมีโลหะแคดเมียม ซึ่งเป็นโลหะมีพิษ จึงต้องใช้วิธีการเฉพาะในการกำจัด

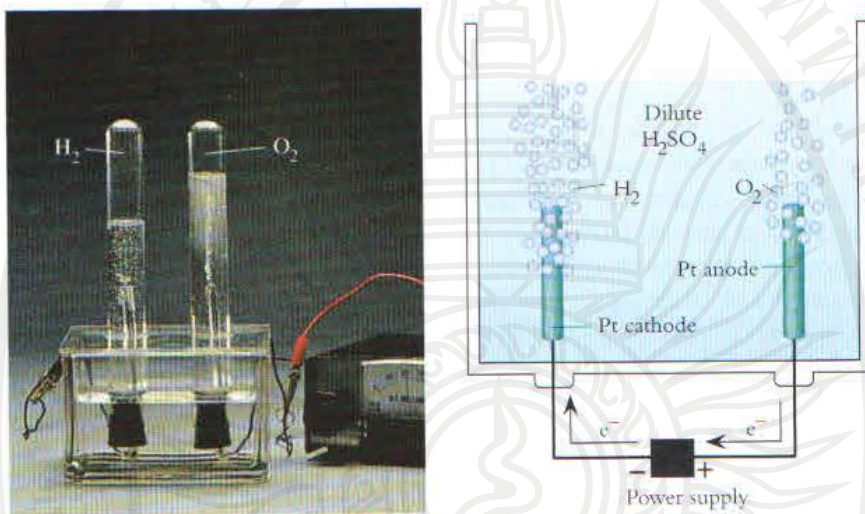
นอกจากนี้ยังมีถ่านชาร์จอีกชนิดหนึ่งที่ใช้โลหะลิเทียมเป็นขั้วแอโนด และใช้แมงกานีสไดออกไซด์เป็นขั้วแคโทด (McMurry and Fay, 2001, P. 784-785) สารอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่  $\text{LiClO}_4$  ในตัวทำละลายอินทรีย์ ให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ประมาณ 3 โวลต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้





## 6.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลติก

เซลล์อิเล็กโทรไลติกเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีลักษณะตรงกันข้ามกับเซลล์กัลวานิก ดังนั้นภายในเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้จึงต้องมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เช่น จากแบตเตอรี่หรือถ่านไฟฉาย จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ (ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้) ดังแสดงในภาพที่ 6.9



ภาพที่ 6.9 เซลล์อิเล็กโทรไลติก

(ที่มา : Olmsted III and Williams, 2002, P. 898)

จากภาพที่ 6.9 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่สารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางอาจใช้แกรไฟต์ หรือโลหะ Pt, Ag, Au (โลหะที่ไม่ชอบเสียดังเล็กน้อย) ที่แอโนดซึ่งต่อกับขั้วบวก (+) ของแบตเตอรี่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนที่แคโทดซึ่งต่อกับขั้วลบ (-) ของแบตเตอรี่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  ซึ่งจากภาพที่ 6.9 เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาตรของ  $\text{H}_2$  :  $\text{O}_2$  เท่ากับ 2 : 1 ตามสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์พอดี เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis process)

### 6.6.2.1 กฎของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ (นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ มีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 1791–1867) ได้อธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณสารในเซลล์อิเล็กโทรไลติกกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ แล้วตั้งเป็นกฎของฟาราเดย์ ดังนี้ “ปริมาณการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่

เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านเซลล์นั้น” (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 742) โดยทราบข้อมูลเพิ่มเติมดังนี้

- (1) อิเล็กตรอน 1 ตัวมีประจุ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์
- (2) ประจุของอิเล็กตรอน 1 โมล เทียบเท่ากับหน่วย 1 ฟาราเดย์ คิดเป็นประจุ 96485 คูลอมป์ ( $\approx 96500$  คูลอมป์)
- (3) ประจุไฟฟ้า (Q; คูลอมป์) เท่ากับผลคูณของกระแส (I; แอมแปร์) กับระยะเวลา (t; วินาที) ที่จ่ายกระแส  
การคำนวณเกี่ยวกับกฎของฟาราเดย์สามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

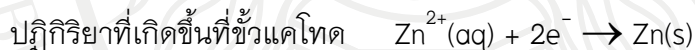
**ตัวอย่างที่ 6.10** จะได้โลหะสังกะสีกี่กรัม (ที่ขั้วแคโทด) ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสซิงค์คลอไรด์ที่หลอมเหลว ( $\text{ZnCl}_2$ ) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (กำหนดมวลอะตอมของ Zn = 65.38 กรัม/โมล)

วิธีทำ หาประจุที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

$$\text{จาก } Q = It = (0.01 \text{ แอมแปร์}) \times (1 \times 60 \times 60 \text{ วินาที}) = 36 \text{ คูลอมป์}$$

$$96500 \text{ คูลอมป์ คิดเป็น 1 ฟาราเดย์}$$

$$\text{ดังนั้น } 36 \text{ คูลอมป์ คิดเป็น } \frac{36}{96500} = 3.73 \times 10^{-4} \text{ ฟาราเดย์}$$



จากสมการจะเห็นว่าถ้าใช้  $\text{e}^-$  จำนวน 2 ฟาราเดย์ จะได้ Zn(s) 1 โมล

ดังนั้น  $\text{e}^-$  จำนวน  $3.73 \times 10^{-4}$  ฟาราเดย์ จะได้ Zn(s)

$$= \frac{1}{2} \times 3.73 \times 10^{-4}$$

$$= 1.865 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{คิดเป็นน้ำหนัก} = (1.865 \times 10^{-4} \text{ โมล}) \times (65.38 \text{ กรัม/โมล}) = 12.19 \times 10^{-3} \text{ กรัม}$$

**ตัวอย่างที่ 6.11** จะต้องใช้เวลานานเท่าใด ในการที่จะทำให้ได้โลหะทองแดงจำนวน 0.5 กรัม มาเกาะที่ขั้วไฟฟ้า เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ในการอิเล็กโทรไลซิสสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  (กำหนดมวลอะตอมของ Cu = 63.546 กรัม/โมล)

วิธีทำ สมมติว่าใช้เวลา t วินาที ดังนั้น  $Q = It = 4t$  คูลอมป์



96500 คูลอมป์ คิดเป็น 1 ฟาราเดย์

ดังนั้น  $4t$  คูลอมป์ คิดเป็น  $\frac{4t}{96500} = (4.145 \times 10^{-5})t$  ฟาราเดย์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด  $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$

จากสมการจะเห็นว่าถ้าใช้  $e^-$  จำนวน 2 ฟาราเดย์ จะได้  $\text{Cu}(\text{s})$  1 โมล

ดังนั้น  $e^-$  จำนวน  $(4.145 \times 10^{-5})t$  ฟาราเดย์ จะได้  $\text{Cu}$

$$= \frac{1}{2} \times 4.145 \times 10^{-5} t = 2.0725 \times 10^{-5} t \text{ โมล}$$

เทียบสัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ ได้ดังนี้

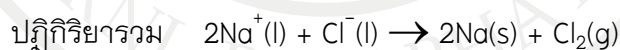
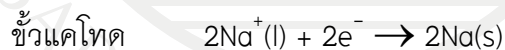
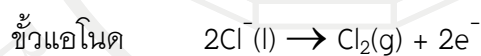
$\text{Cu}(\text{s})$   $2.0725 \times 10^{-5} t$  โมล คิดเป็นน้ำหนัก 0.5 กรัม

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{2.0725 \times 10^{-5} t}{0.5} = \frac{0.5}{63.546}$$

แก้สมการหาค่า  $t$  ได้ค่า  $t = 379.95 \approx 380$  วินาที

### 6.6.2.2 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลติก

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสามารถใช้เป็นกระบวนการสังเคราะห์โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง จากเกลือหลอมเหลวที่มีองค์ประกอบของโลหะชนิดนั้น (Brown, Lemay, and Bursten, 1997, P. 877-880) เช่น เมื่อทำการอิเล็กโทรไลซิสโซเดียมคลอไรด์เหลว โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) จะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและรับอิเล็กตรอน เปลี่ยนเป็นอะตอมของโลหะโซเดียม ( $\text{Na}$ ) และสะสมพอกพูนอยู่ที่ขั้วนั้น นอกจากนี้ยังได้แก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

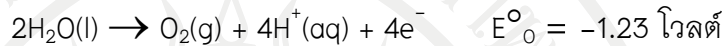


นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการดังกล่าวกับเกลือหลอมเหลวชนิดอื่น เช่น  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{ZnO}$  และสินแร่ในธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อผลิตโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง > 99.99% (วรรณ กาญจนมยุร, 2545, หน้า 95) แต่กระบวนการดังกล่าวมีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องใช้พลังงานความร้อนสูงมาก ในการที่จะทำให้เกิดไอออนิกหลอมเหลว (Briggs, 2000, P. 282)

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำ

ละลาย จะต้องพิจารณาน้ำที่อาจจะให้หรือรับอิเล็กตรอน แข่งขันกับไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในสารละลาย เช่น กระบวนการ อิเล็กโทรไลซิสสารละลายโซเดียมคลอไรด์เจือจาง ( $< 1$  โมลาร์) ต้องพิจารณาดังนี้

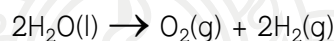
ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่



ขั้วแคโทด ปฏิกิริยารีดักชันที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดคือน้ำให้อิเล็กตรอน เพราะมีค่า  $E^\circ$  สูงกว่าของ  $\text{Cl}^-$  ( $-1.23 > -1.36$ ) ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดคือน้ำรับอิเล็กตรอน เพราะมีค่า  $E^\circ_r$  สูงกว่าของ  $\text{Na}^+$  ( $-0.83 > -2.71$ ) ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นจึงได้



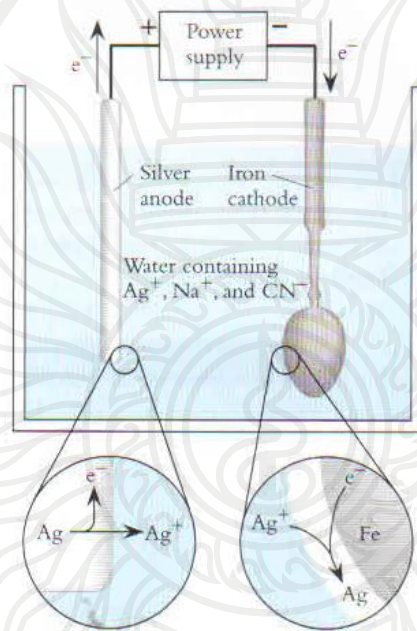
$$E^\circ_{\text{Cell}} = E^\circ_{r(\text{แคโทด})} - E^\circ_{r(\text{แอโนด})} = -0.83 - (-1.23) = -2.06 \text{ โวลต์}$$

ค่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่จะทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ คือจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2.06 โวลต์ สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสารละลายชนิดอื่น ๆ ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สรุปผลได้ดังตารางที่ 6.4 (สุชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 192) ดังนี้

ตารางที่ 6.4 ผลของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสารละลายไฮดรอกไซด์บางชนิด

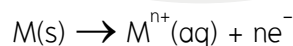
อิเล็กโทรไลต์	ปฏิกิริยาที่แอโนด	ปฏิกิริยาที่แคโทด
สารละลาย NaCl (เจือจาง)	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$
สารละลาย NaCl (เข้มข้น)	$2\text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$
สารละลาย HCl (เข้มข้น)	$2\text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
สารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$
สารละลาย $\text{CuSO}_4$	$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$

ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเกลือหลอมเหลว ที่พบโลหะ (จากไอออนในสารอิเล็กโทรไลต์) สะสมพอกพูนที่ขั้วแคโทด สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานชุบเคลือบโลหะ ได้โดยต้องใช้สารละลายโลหะนั้นเป็นอิเล็กโทรไลต์ (มีน้ำเป็นตัวทำละลาย) เช่น การชุบซ็อนสแตนเลส ด้วยโลหะเงินจะใช้สารเชิงซ้อนซิลเวอร์ไซยาไนด์  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  หรือซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และใช้ซ็อนสแตนเลสที่ผ่านการขัดผิวให้เรียบมาแล้วเป็นขั้วแคโทด ส่วนโลหะเงินบริสุทธิ์ทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 6.10

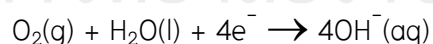


ภาพที่ 6.10 การชุบซ็อนสแตนเลสด้วยโลหะเงิน  
(ที่มา : Olmsted III and Williams, 2002, P. 901)

ประโยชน์อีกอย่างของความรู้ที่ได้จากเซลล์เคมีไฟฟ้า คือนำมาใช้ในการป้องกันการเป็นสนิม หรือป้องกันการผุกร่อนของโลหะ โดยกระบวนการผุกร่อนถือเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ จึงมีค่า  $E^\circ_{\text{cell}}$  เป็นบวก (เป็นเซลล์กัลวานิก) โลหะ (M) จะเสียอิเล็กตรอน แล้วกลายเป็นไอออนของโลหะนั้น ( $M^{n+}$ ) ดังปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปนี้



ส่วนความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และแก๊สออกซิเจนจะรับอิเล็กตรอน ดังปฏิกิริยารีดักชันต่อไปนี้



ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา จะรวมตัวกับไอออนของโลหะ เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อถูกดองน้ำออกจะกลายเป็นสนิมหรือโลหะออกไซด์ในที่สุด

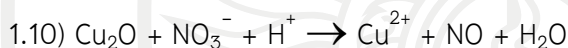
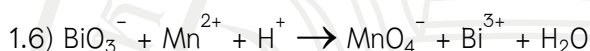
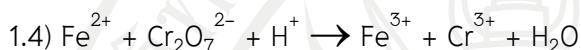
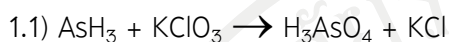
การป้องกันการเป็นสนิมของโลหะ ยกตัวอย่างเช่น ท่อเหล็ก ทำได้ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าคือนำโลหะที่ให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็กมาสัมผัสกับเหล็ก เช่น สังกะสี (ดูค่า  $E^{\circ}$  จากตารางที่ 6.3) โดยการรัดหรือเชื่อมต่อกับท่อเหล็กด้วยห่วงที่ทำจากโลหะสังกะสี (สาเหตุที่นิยมใช้โลหะสังกะสีเพราะมีราคาถูก) ซึ่งจะบังคับให้เหล็กทำหน้าที่เป็นแคโทด ส่วนสังกะสีทำหน้าที่เป็นแอโนด (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ดังนั้นสังกะสีจะผุกร่อน โดยที่เหล็กจะไม่เกิดการผุกร่อนจนกว่าสังกะสีจะผุกร่อนหมดไป จึงเปลี่ยนห่วงรัดสังกะสีวงใหม่ (สุชาติพิศ พิเศษ, 2541, หน้า 203)

## 6.7 สรุป

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าหรือปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน โดยในสารตั้งต้นที่ให้อิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเรียกว่าตัวรีดิวซ์ จะมีอะตอมธาตุองค์ประกอบมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ส่วนสารตั้งต้นที่รับอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน หรือเรียกว่าตัวออกซิไดส์ จะมีอะตอมธาตุองค์ประกอบมีเลขออกซิเดชันลดลง การดุลสมการรีดอกซ์อาศัยการเพิ่มและลดที่เท่ากันของเลขออกซิเดชัน ทั้งนี้เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนที่จ่ายและรับมีค่าเท่ากัน ระบบที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้วให้กระแสไฟฟ้าออกมา จะเรียกว่า เซลล์กัลวานิก โดยระบบจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออกมาได้เองตามธรรมชาติ อันเป็นผลมาจากการไหลของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือขั้วแอโนด ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน หรือขั้วแคโทด การเขียนแผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้าจะเขียนขั้วแอโนดไว้ทางซ้ายและขั้วแคโทดไว้ทางขวา คั่นกลางด้วยสะพานเกลือ ซึ่งทำหน้าที่ดุลประจุ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์กัลวานิกคำนวณจากผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งจะต้องได้ค่าบวกเสมอ หากเป็นสภาวะอื่นที่ไม่ใช่สภาวะมาตรฐานต้องใช้สมการของเนิร์นสต์ในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิก ส่วนระบบที่ต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ (ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้) จะเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลติก ซึ่งจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเสมอ จากความรู้เรื่องเซลล์เคมีไฟฟ้า สามารถนำมาประดิษฐ์สิ่งอำนวยความสะดวกมากมาย เช่น ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ การผลิตโลหะบริสุทธิ์ การชุบโลหะ และการป้องกันการเป็นสนิมของโลหะ เป็นต้น

## แบบฝึกหัดบทที่ 6

1. จงดุลสมการรีดอกซ์ต่อไปนี้



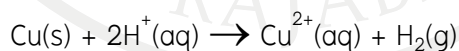
2. จงเขียนแผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้า พร้อมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และหาค่า  $E^\circ_{\text{Cell}}$  เมื่อต่อครึ่งเซลล์ต่อไปนี้



3. จงเรียงลำดับความแรงของตัวออกซิไดส์ต่อไปนี้  $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$ ,  $\text{Ni}^{2+}(\text{aq})$ ,  $\text{Br}_2(\text{l})$  และ  $\text{H}^+(\text{aq})$  (ใช้ข้อมูลจากตารางที่ 6.2)

4. จงเรียงลำดับความแรงของตัวรีดิวส์ต่อไปนี้  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ ,  $\text{F}^-(\text{aq})$ ,  $\text{Ag}(\text{s})$ ,  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$  (ใช้ข้อมูลจากตารางที่ 6.3)

5. จงตรวจสอบว่าปฏิกิริยาต่อไปนี้เกิดขึ้นได้ในทิศทางที่กำหนดหรือไม่



6. จากแผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อไปนี้  $\text{Ni}(\text{s})/\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) // \text{Ag}^+(\text{aq})/\text{Ag}(\text{s})$  จงหา

6.1) ค่า  $E^\circ_{\text{Cell}}$

6.2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

6.3) ค่า  $\Delta G^\circ$

6.4) ค่าคงที่สมดุล



7. ถ้าความเข้มข้นของ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  เท่ากัน จะต้องใช้  $[\text{Ag}^+]$  กี่โมลต่อลิตร จึงจะทำให้ เซลล์กัลวานิกที่เกิดปฏิกิริยา  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{Ag}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{Ag}(\text{s})$  มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นศูนย์โวลต์
8. จงคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ต่อไปนี้
- 8.1)  $\text{Cu}(\text{s})/\text{Cu}^{2+}(0.0001 \text{ M}) // \text{Ag}^+(0.005 \text{ M})/\text{Ag}(\text{s})$
- 8.2)  $\text{Cu}(\text{s})/\text{Cu}^{2+}(0.18 \text{ M}) // \text{Cu}^{2+}(2.5 \text{ M})/\text{Cu}(\text{s})$
9. จะต้องใช้กระแสจำนวนกี่แอมแปร์ที่จะทำให้ได้โครเมียม 0.5 กรัม จากสารละลาย  $\text{Cr}^{3+}$  ไป เกาะที่ขั้วแคโทดในเวลา 1 ชั่วโมง
10. จงคำนวณหาจำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่แคโทด และจำนวนโมลของแก๊สออกซิเจนที่ แอโนด จากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  โดยใช้กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
11. จงคำนวณหาเลขออกซิเดชันของโครเมียม ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเกลือหลอมเหลว ที่ใช้กระแส 15 แอมแปร์ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วได้โลหะโครเมียม 9.71 กรัมมาเกาะที่ ขั้วแคโทด (ใช้ 1 ฟาราเดย์ เท่ากับ 96485 คูลอมป์)



## เอกสารอ้างอิง

- ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. (2531). **เคมีคำนวณและเทคนิคการทำโจทย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ปริญญา อรุณวิสุทธิ. (2553). **เทอร์โมไดนามิกส์เคมีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณ กาญจนมยุร. (2545). **เคมีอุตสาหกรรม**. ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุชาติพิศ ศิริไพศาลพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. (2541). **เคมีทั่วไป 2**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์.
- Briggs, J.G.R. (2000). **Chemistry Insights**. Singapore : Pearson Education Asia Pte Ltd.
- Brown, T. L., Lemay, H. E., and Bursten, B. E. (1997). **Chemistry The Central Science**. 7<sup>th</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.
- Davidson, M.W., The Florida State University, (2013). **Zinc–Carbon Batteries**.  
[online] Available :  
<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/batteries/zinccarbon.html>  
[24 October 2013].
- Lewis, R. and Evans, W. (2006). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Palgrave Macmillan.
- Lovett, C. and Chang, R. (2005). **Understanding Chemistry**. New York : McGraw– Hill Company.
- McMurry, J. and Fay, R. C. (2001). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.
- Olmsted III, J. and Williams, G. M. (2002). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S., and Herring, F. G. (2002). **General Chemistry**. New Jersey : Prentice Hall.

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7

### เนื้อหาประจำบท

#### บทที่ 7 เคมีนิวเคลียร์

- 7.1 นิวเคลียสของอะตอม
- 7.2 สัญลักษณ์ของนิวไคลด์
- 7.3 นิวไคลด์เสถียรและนิวไคลด์ไม่เสถียร
- 7.4 รังสีนิวเคลียร์
  - 7.4.1 รังสีแอลฟา
  - 7.4.2 รังสีบีตา
  - 7.4.3 รังสีแกมมา
  - 7.4.4 นิวตรอน
- 7.5 พลังงานยึดเหนี่ยว
- 7.6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์
  - 7.6.1 ปฏิกิริยาฟิชชัน
  - 7.6.2 ปฏิกิริยาฟิวชัน
- 7.7 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี
- 7.8 อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี
- 7.9 การวัดกัมมันตรังสี
- 7.10 หน่วยที่ใช้วัดเมื่อวัดกัมมันตรังสี
- 7.11 การป้องกันอันตรายจากกัมมันตรังสี
- 7.12 ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี
- 7.13 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายเกี่ยวกับรังสีนิวเคลียร์แบบต่าง ๆ ได้
2. คำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนได้
3. คำนวณเกี่ยวกับพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้
4. คำนวณเกี่ยวกับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีได้
5. อธิบายกัมมันภาพและกัมมันตภาพรังสีได้
6. คำนวณเกี่ยวกับการหาอายุของวัตถุโบราณได้

### กิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 7 เรื่องเคมีนิวเคลียร์มาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย แนะนำแนวทางการคำนวณ โดยยกตัวอย่างโจทย์มาคำนวณที่ละขั้นตอนบนกระดาน
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าหาแบบฝึกหัดทำเองเพิ่มเติม แล้วเขียนส่งเป็นการบ้าน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 7 เรื่องเคมีนิวเคลียร์
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 7

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

## บทที่ 7

### เคมีนิวเคลียร์

เคมีนิวเคลียร์เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของอะตอม ทั้งในแง่ของการปลดปล่อยพลังงาน ที่เรียกว่า พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear energy) และการแปรสภาพของนิวเคลียสจากอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งไปเป็นอะตอมของธาตุอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์แตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไป เพราะปฏิกิริยาเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่รอบ ๆ นิวเคลียส โดยที่นิวเคลียสยังคงเป็นอะตอมของธาตุเดิม (ที่มีจำนวนโปรตอนเท่าเดิม) และไม่มีธาตุใหม่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี

ในบทนี้จะกล่าวถึงนิวเคลียสของอะตอม ที่มาของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ กัมมันตรังสี กัมมันตภาพรังสี พลังงานนิวเคลียร์ รวมถึงการใช้ประโยชน์จากความรู้ด้านเคมีนิวเคลียร์ ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

#### 7.1 นิวเคลียสของอะตอม

นิวเคลียสอยู่ใจกลางของอะตอม เรียกว่า นิวไคลด์ (nuclide) ประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนที่มีประจุบวกและอนุภาคนิวตรอนที่ไม่มีประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบล้อมรอบนิวเคลียส โดยสมบัติพื้นฐานของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม แสดงในตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม

อนุภาค	สัญลักษณ์	มวล		ประจุ
		หน่วย กรัม	หน่วย amu	
อิเล็กตรอน	e	$9.1095 \times 10^{-28}$	0.000548	-1e
โปรตอน	p	$1.6726 \times 10^{-24}$	1.007276	+1e
นิวตรอน	n	$1.6749 \times 10^{-24}$	1.008665	0

(ที่มา : นวฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2547, หน้า 30)

โดย มวล 1 amu (atomic mass unit) =  $1.6606 \times 10^{-24}$  กรัม =  $1.6606 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม  
 ประจุ  $1e = 1.6022 \times 10^{-19}$  คูลอมป์

## 7.2 สัญลักษณ์ของนิวไคลด์

นิวไคลด์ของธาตุ X ที่มีเลขมวล (mass number) เป็น A และเลขอะตอม (atomic number) เป็น Z เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้



เมื่อ A = เลขมวล คือ จำนวนอนุภาคทั้งหมดในนิวเคลียส ซึ่งก็คือผลรวมของจำนวนโปรตอนกับนิวตรอน

Z = เลขอะตอม คือ จำนวนโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียส

ดังนั้นจำนวนนิวตรอน =  $A - Z$

บางครั้งอาจเรียกอนุภาคภายในนิวเคลียส (โปรตอนและนิวตรอน) ว่า นิวคลีออน (nucleon) ดังนั้นเลขมวลจึงบอกถึงจำนวนนิวคลีออนด้วย เช่น  ${}^{14}_6\text{C}$  เป็นนิวไคลด์ของธาตุคาร์บอน มีจำนวนโปรตอน = 6 จำนวนนิวคลีออน = 14 และจำนวนนิวตรอน =  $14 - 6 = 8$

กลุ่มของนิวไคลด์อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามจำนวนโปรตอน นิวตรอน และนิวคลีออนในนิวเคลียส ดังนี้

- (1) ไอโซโทป (isotope) คือ นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน เช่น  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$
- (2) ไอโซโทน (isotone) คือ นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนเท่ากัน เช่น  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{15}_7\text{N}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$
- (3) ไอโซบาร์ (isobar) คือ นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวคลีออนเท่ากัน เช่น  ${}^{12}_5\text{B}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{12}_7\text{N}$

### 7.3 นิวไคลด์เสถียรและนิวไคลด์ไม่เสถียร

ในแต่ละนิวไคลด์ นิวคลีออนจะส่งแรงกระทำซึ่งกันและกัน หากแรงกระทำพอดีกันก็จะเกิดสมดุล เรียกว่า นิวไคลด์มีเสถียรภาพทางนิวเคลียร์ (nuclear stability) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับนิวเคลียส เรียกนิวไคลด์ประเภทนี้ว่า นิวไคลด์เสถียร (stable nuclide) เช่น  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$  เมื่อพิจารณาจากจำนวนนิวตรอนและโปรตอน พบว่า นิวไคลด์เสถียรมักจะมีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเป็นเลขคู่หรือตัวใดตัวหนึ่งเป็นเลขคู่ สำหรับกรณีนิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนหรือโปรตอนมากหรือน้อยเกินไป หรือมีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเป็นเลขคี่ จะเป็นนิวไคลด์ที่ไม่มีเสถียรภาพทางนิวเคลียร์ เรียกว่า นิวไคลด์ไม่เสถียร (unstable nuclide) ซึ่งนิวไคลด์เหล่านี้จะพยายามปรับตัวให้อยู่ในสภาพเสถียร เช่น สลายตัวด้วยการลดจำนวนโปรตอนลง พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, 2547, หน้า 32)

นิวไคลด์ที่มีสมบัติในการสลายตัวหรือปล่อยรังสีออกมา จะเรียกว่า ธาตุกัมมันตรังสี หรือสารกัมมันตรังสี ส่วนการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีด้วยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี จะเรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเรียกรังสีที่ปล่อยออกมาว่า รังสีนิวเคลียร์ (nuclear radiation)

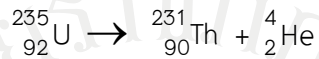
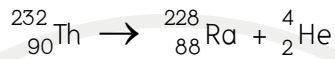
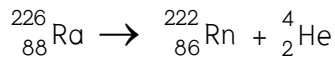
### 7.4 รังสีนิวเคลียร์

จากสมบัติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีนิวเคลียร์ออกมา (รังสีเหล่านี้อาจมีสมบัติได้ทั้งอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา นิวตรอน รวมทั้งรังสีเอกซ์ ซึ่งแม้ว่าจะไม่ได้ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส แต่ก็เป็นผลที่ได้จากการสลายตัว ก็ถือว่าเป็นรังสีนิวเคลียร์เช่นกัน (จะไม่กล่าวถึงในที่นี้) ซึ่งรังสีนิวเคลียร์แต่ละประเภทมีสมบัติดังนี้

#### 7.4.1 รังสีแอลฟา

รังสีแอลฟา (alpha-rays;  $\alpha$ ) ประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาคและนิวตรอน 2 อนุภาค ซึ่งก็คือนิวไคลด์ของธาตุฮีเลียม สัญลักษณ์ของรังสีแอลฟา คือ  ${}^4_2\text{He}$  (บางครั้งก็เรียกว่าอนุภาคแอลฟา จากสมบัติทวิภาคของคลื่นและอนุภาค) มีประจุเท่ากับ  $+2e$  มีมวลเท่ากับ  $4.001516$  amu อนุภาคชนิดนี้มักจะถูกปลดปล่อยออกจากนิวไคลด์ที่มีมวลมาก ๆ ที่มีเลขมวลตั้งแต่ 83 ขึ้นไป (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, 2547, หน้า 41) เช่น  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ,  ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  ดังนี้



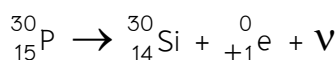
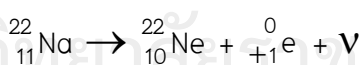
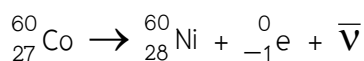
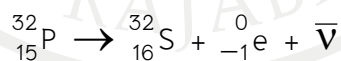


นิวไคลด์ที่สลายตัวให้รังสีแอลฟาจะเปลี่ยนเป็นนิวไคลด์ใหม่ ซึ่งมีเลขมวลลดลง 4 หน่วยและเลขอะตอมลดลง 2 หน่วย พลังงานที่ได้จากการสลายตัวให้รังสีแอลฟาส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟานั้น และเนื่องจากมีมวลและมีประจุ จึงทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ เพียงกระดาษแผ่นบาง ๆ หรือผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์ก็สามารถกั้นอนุภาคแอลฟาได้

#### 7.4.2 รังสีบีตา

รังสีบีตา (beta-rays;  $\beta$ ) คือ อนุภาคของอิเล็กตรอน มีมวลเท่ากับ 0.000548 amu แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อนุภาคบีตาลบ (negative beta;  $\beta^-$ ) ใช้สัญลักษณ์  ${}_{-1}^0\text{e}$  มีประจุ  $-1\text{e}$  และอนุภาคบีตาบวก (positive beta;  $\beta^+$ ) ใช้สัญลักษณ์  ${}_{+1}^0\text{e}$  มีประจุ  $+1\text{e}$  การสลายตัวให้อนุภาคบีตามักจะเกิดขึ้นกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนน้อยหรือมากเกินไป เช่น  ${}_{6}^{14}\text{C}$ ,  ${}_{15}^{32}\text{P}$ ,  ${}_{19}^{40}\text{K}$  เป็นนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากเกินไปจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ ส่วน  ${}_{7}^{13}\text{N}$ ,  ${}_{8}^{18}\text{O}$ ,  ${}_{15}^{30}\text{P}$  เป็นนิวไคลด์ที่มีโปรตอนมากเกินไปจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาบวก

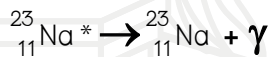
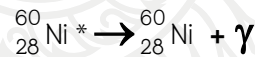
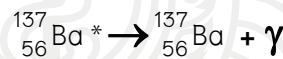
นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคบีตาแล้ว จะเปลี่ยนเป็นนิวไคลด์ที่มีเลขมวลคงเดิม แต่เลขอะตอมจะเปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยหากเป็นการสลายตัวให้อนุภาคบีตาบวก นิวไคลด์ที่ได้จะมีเลขอะตอมลดลง 1 หน่วย แต่หากเป็นการสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ นิวไคลด์ที่ได้จะมีเลขอะตอมเพิ่มขึ้น 1 หน่วย นอกจากนี้พร้อม ๆ กับการสลายตัวให้อนุภาคบีตา จะมีอนุภาคนิวตริโน (neutrino) ใช้สัญลักษณ์  $\nu$  และแอนตินิวตริโน (anti-neutrino) ใช้สัญลักษณ์  $\bar{\nu}$  ปล่อยออกมาด้วย ดังนี้



พลังงานที่ได้จากการสลายตัวให้รังสีบีตา จะอยู่ในรูปของพลังงานของอนุภาคบีตาและพลังงานของแอนตินิวตริโนและนิวตริโน โดยแบ่งกันในอัตราส่วนที่ไม่แน่นอน และหลังจากการสลายตัวแล้ว หากนิวไคลด์ยังอยู่ในสถานะกระตุ้นก็อาจจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาได้อีก เนื่องจากมีมวลน้อย และมีประจุน้อย อนุภาคบีตาจึงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟา เมื่อเทียบต่อหน่วยพลังงานที่เท่า ๆ กัน

#### 7.4.3 รังสีแกมมา

รังสีแกมมา ( $\gamma$ ; gamma-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ไม่มีมวล ไม่มีประจุ จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เกิดจากการปล่อยพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีชนิดอื่นแล้วยังมีพลังงานเหลืออยู่ จึงปล่อยพลังงานนั้นออกมาในรูปของรังสีแกมมา โดยเปลี่ยนจากสถานะกระตุ้น (excited state) ไปเป็นสถานะพื้น (ground state) พลังงานของรังสีแกมมาจึงเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองสถานะ (สุชาติพิศศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 343) ดังนั้นการสลายตัวให้รังสีแกมมา จึงไม่ทำให้เกิดนิวไคลด์ชนิดใหม่ เพียงแต่มีการปลดปล่อยพลังงานนิวไคลด์ก่อนและหลังการสลายตัว จึงมีเลขมวลและเลขอะตอมเท่าเดิม ดังสมการต่อไปนี้

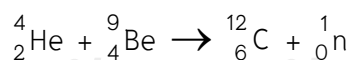


เครื่องหมาย \* แสดงว่าเป็นสถานะกระตุ้น

รังสีแกมมามีพลังงานสูงมาก (อยู่ในช่วง  $10^3 - 10^6$  eV) จึงทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง และเป็นอันตรายมากกว่ารังสีแอลฟาและรังสีบีตา

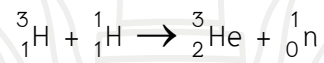
#### 7.4.4 นิวตรอน

นิวตรอน (neutron) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์  ${}_0^1\text{n}$  ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อให้อนุภาคแอลฟาชนกับ  ${}_4^9\text{Be}$  ดังนี้

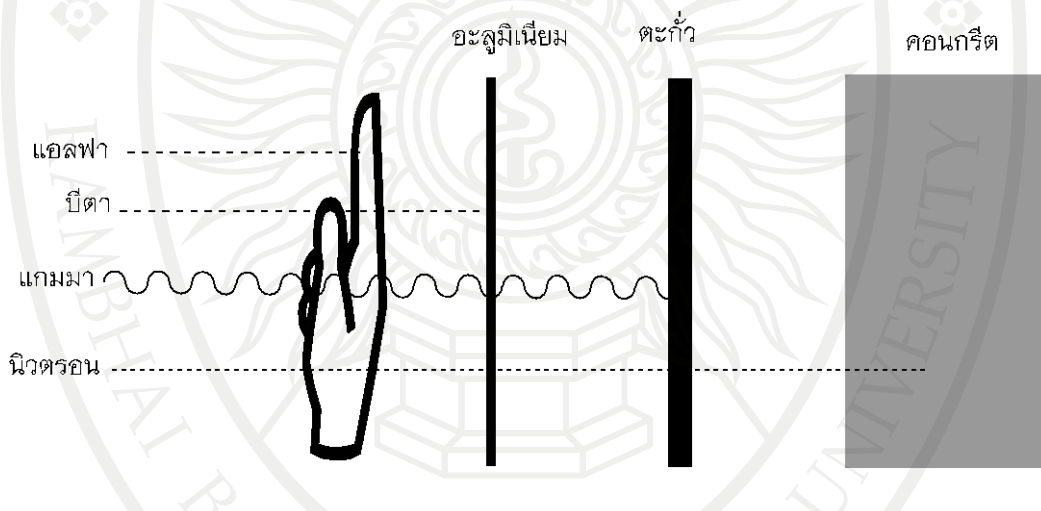


นิวตรอนแตกต่างจากรังสีนิวเคลียร์อื่น ๆ เพราะไม่ได้เกิดขึ้นจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี แต่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องกำเนิดนิวตรอนหรือแหล่ง

กำเนิดนิวตรอน เป็นหลัก เช่น ปฏิกิริยาในเครื่องกำเนิดนิวตรอน ที่ใช้ดิวเทรียม ( $^2_1\text{H}$ ) และ โปรตอน ( $^1_1\text{H}$ ) ดังนี้



เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ จึงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับรังสีประเภทอื่น ทำให้นิวตรอนมีอันตรายมากกว่ารังสีทุกประเภท ดังแสดงในภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 อำนาจทะลุทะลวงของรังสีนิวเคลียร์ต่าง ๆ

## 7.5 พลังงานยึดเหนี่ยว

พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy; BE) คือ พลังงานที่ปล่อยออกมา เมื่อนิวคลีอิด โปรตอนและนิวตรอนรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส (มีค่าเท่ากับพลังงานที่ต้องใช้ในการแยกสลาย นิวเคลียส) โดยพลังงานนี้เกิดจากมวลของโปรตอนและนิวตรอนส่วนหนึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน เพื่อดึงดูดให้โปรตอนและนิวตรอนนั้นรวมกันเป็นนิวเคลียสของอะตอมได้ (McMurry and Fay, 2001, P. 958)

การหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวคำนวณจากผลต่างของมวลรวมจากการทดลองกับมวลรวมของอนุภาคโปรตอนกับนิวตรอนที่เป็นองค์ประกอบของธาตุนั้น เรียกผลต่างของมวลดังกล่าวว่า มวลพร่อง (mass defect) ซึ่งค่าจากมวลพร่องนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวได้ (สุชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 335) จากกฎของไอน์สไตน์ มวลที่หายไปนี้ ( $\Delta m$ ) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ( $E$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$E = \Delta mc^2$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงาน หน่วย จูล

$\Delta m$  คือ มวลพร่อง หน่วย กิโลกรัม

$c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $2.99793 \times 10^8$  เมตร/วินาที (ประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที)

โดย ถ้ามวลพร่องเท่ากับ 1 amu จะประมาณเทียบเท่าพลังงาน 931 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และพลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) จะเทียบเท่ากับพลังงาน  $1.6022 \times 10^{-19}$  จูล (Petrucci, Harwood, and Herring, 2002, P. 1036)

หน่วยของพลังงานที่ใช้ในระดับอะตอมจะใช้หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์เนื่องจากพลังงานในหน่วยอื่น เช่น จูล เป็นหน่วยที่ใหญ่เกินไป โดยที่ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ หมายถึง พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำให้วัตถุที่มีประจุเท่ากับอิเล็กตรอน 1 ตัวสามารถเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ และเมื่อต้องการหน่วยที่ใหญ่ขึ้น อาจใช้คำอุปสรรคนำหน้า เช่น กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ได้

การคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสามารถศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 7.1** โคบอลต์  $^{59}_{27}\text{Co}$  มีมวลเท่ากับ 58.9332 amu จงคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน กำหนดมวลของแต่ละอนุภาคดังนี้

$$\text{โปรตอน } ({}^1_1\text{H}) = 1.007276 \text{ amu}$$

$$\text{นิวตรอน } ({}^0_1\text{n}) = 1.008665 \text{ amu}$$

วิธีทำ จากโจทย์ โคบอลต์  $^{59}_{27}\text{Co}$  มีจำนวนโปรตอน = 27

$$\text{และจำนวนนิวตรอน} = 59 - 27 = 32$$

$$\begin{aligned} \text{มวลรวมของโปรตอนและนิวตรอน} &= (27 \times 1.007276) + (32 \times 1.008665) \\ &= 59.473722 \text{ amu} \end{aligned}$$

$$\text{มวลพร่อง } (\Delta m) = 59.473722 - 58.9332 = 0.540532 \text{ amu}$$

$$\text{พลังงานยึดเหนี่ยว} = (0.540532 \text{ amu}) \times (931 \text{ MeV/amu}) = 503.235292 \text{ MeV}$$

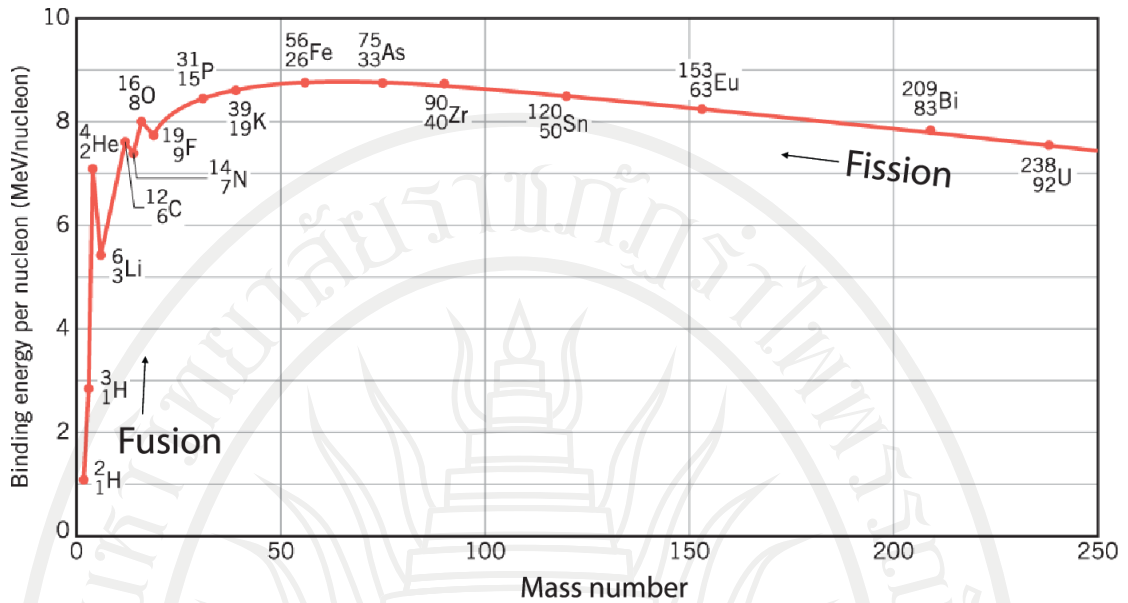
$$\text{พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน} = \frac{503.235292}{59} = 8.5294 \text{ MeV}$$

ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน (BE/A) บอกให้ทราบถึงเสถียรภาพของนิวเคลียสได้ โดยนิวเคลียสใดมีค่า BE/A สูง แสดงว่านิวเคลียสของธาตุนั้นเสถียร ยากแก่การถูกทำลายเป็น นิวคลีออนย่อย เช่น  ${}_{29}^{63}\text{Cu}$  มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 550.96 MeV และมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเป็น 8.75 MeV ส่วน  ${}_{92}^{238}\text{U}$  มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 1802.24 MeV และมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน 7.57 MeV แสดงว่านิวเคลียสของ  ${}_{29}^{63}\text{Cu}$  เสถียรกว่า  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ดังนั้นการที่จะทำให้ทองแดงแตกตัวจึงยากกว่ายูเรเนียม

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออน (BE/A) กับ เลขมวลของธาตุแสดงในภาพที่ 7.2 ซึ่งพบว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเพิ่มขึ้นตาม เลขมวลที่เพิ่มขึ้นของธาตุ จนถึงเลขมวลประมาณ 60 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนจะค่อย ๆ ลดลง แสดงว่าไอโซโทปที่มีเลขมวลใกล้เคียง 60 เป็นไอโซโทปที่เสถียรมาก เช่น  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  เป็น ไอโซโทปที่เสถียร มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 8.7–8.8 MeV (สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 337) นอกจากนี้ค่า BE/A ยังมี ประโยชน์ในการทำนายแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้คือ

(1) ธาตุเบาที่มีค่า BE/A น้อย จะมีเสถียรภาพน้อย มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็น นิวไคลด์ที่มีค่า BE/A สูงขึ้น ดังนั้นธาตุเบาจึงมักจะทำปฏิกิริยาหลอมนิวเคลียส (fusion reaction) เพื่อให้กลายเป็นธาตุที่หนักกว่าเดิม

(2) ธาตุหนักที่มีค่า BE/A น้อย มีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียส (fission reaction) กลายเป็นธาตุที่มีเลขมวลปานกลาง และมีค่า BE/A สูงขึ้นกว่าเดิม



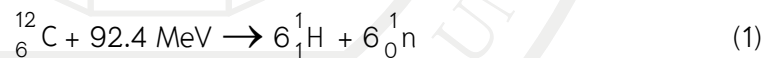
ภาพที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนกับเลขมวล (ที่มา : Sitton, 2015)

**ตัวอย่างที่ 7.2** ถ้าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ  $^{12}_6\text{C}$  และ  $^{13}_6\text{C}$  เท่ากับ 7.7 และ 7.5 MeV ตามลำดับ จงคำนวณหาพลังงานอย่างน้อยที่สุดในหน่วย MeV ที่ใช้ในการดิ่งนิวตรอนหนึ่งตัวออกจาก  $^{13}_6\text{C}$

**วิธีทำ** จากโจทย์ ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ  $^{12}_6\text{C}$  เท่ากับ 7.7 MeV/นิวคลีออน

ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{12}_6\text{C}$  เท่ากับ  $7.7 \times 12 = 92.4$  MeV

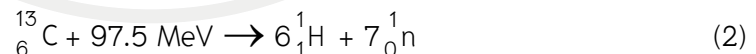
เขียนเป็นสมการนิวเคลียร์ได้คือ



จากโจทย์ ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ  $^{13}_6\text{C}$  เท่ากับ 7.5 MeV/นิวคลีออน

ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{13}_6\text{C}$  เท่ากับ  $7.5 \times 13 = 97.5$  MeV

เขียนเป็นสมการนิวเคลียร์ได้คือ



กลับข้างสมการ (1) แล้วบวกสมการ (2) จะได้

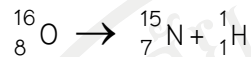


แสดงว่าต้องใช้พลังงาน 5.1 MeV ในการดิ่งนิวตรอน 1 ตัวออกจาก  $^{13}_6\text{C}$



**ตัวอย่างที่ 7.3** มวลอะตอมของ  ${}^8_{16}\text{O}$  และ  ${}^7_{15}\text{N}$  เท่ากับ 15.9949 และ 15.0001 amu ตามลำดับ จงหาพลังงานที่จะใช้แยกโปรตอน 1 ตัวออกมาจาก  ${}^8_{16}\text{O}$

วิธีทำ เขียนเป็นสมการนิวเคลียร์ได้คือ



$$\text{มวลหลังปฏิกิริยา} = \text{มวล } {}^7_{15}\text{N} + \text{มวลของ } {}^1_1\text{H}$$

$$= 15.0001 + 1.007276 = 16.007376 \text{ amu}$$

$$\text{มวลก่อนปฏิกิริยา} = \text{มวลของ } {}^8_{16}\text{O} = 15.9949 \text{ amu}$$

$$\Delta m = m_{\text{หลัง}} - m_{\text{ก่อน}} = 16.007376 - 15.9949 = 0.012476 \text{ amu}$$

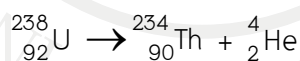
$$BE = \Delta m \times 931 = 11.61516 \text{ MeV} \text{ (เครื่องหมายบวกแสดงว่าดูดพลังงาน)}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้แยกโปรตอน 1 ตัวจาก  ${}^8_{16}\text{O}$  มีค่าเท่ากับ 11.61516 MeV

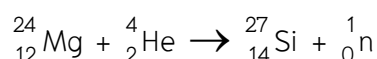
ข้อสังเกต การที่จะแยกโปรตอนหรือนิวตรอนออกจากนิวเคลียสได้ จะต้องให้พลังงานแก่นิวไคลด์อย่างน้อยที่สุดเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวคลีออนในนิวเคลียส ถ้าหากพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว พลังงานส่วนที่เกินนี้จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของนิวคลีออนที่ถูกแยกออกมา

## 7.6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของนิวเคลียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (McMurry and Fay, 2001, P. 960) เช่น



นอกจากนี้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการยิงอนุภาคชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น โปรตอน นิวตรอน แอลฟา เป็นต้น เข้าไปในนิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้า ซึ่งผลที่ได้จะมีการปล่อยอนุภาคอีกชนิดหนึ่งออกมา (Olmsted III and Williams, 2002, P. 1022) ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น การยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปยังนิวเคลียสของโลหะแมกนีเซียม แล้วปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา เขียนสมการนิวเคลียร์ได้ดังนี้



โดยทั่วไปปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการชนกันระหว่างนิวเคลียสกับอนุภาค เช่น ปฏิกิริยา

$X + a \rightarrow Y + b$  จะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $X(a, b)Y$

เมื่อ  $X$  คือ นิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้า

$a$  คือ อนุภาคที่วิ่งมาชนเป้า

$b$  คือ อนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ (ปล่อยออกมา)

$Y$  คือ นิวเคลียสของธาตุที่เกิดขึ้นใหม่

เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยา  $(a, b)$  ของนิวเคลียส  $X$  ดังนั้นปฏิกิริยา

${}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{14}^{27}\text{Si} + {}_0^1\text{n}$  จึงเขียนเป็นสัญลักษณ์ ได้คือ  ${}_{12}^{24}\text{Mg}(\alpha, n){}_{14}^{27}\text{Si}$  และเรียก

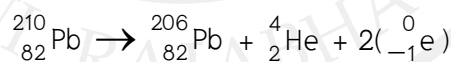
ปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยา  $(\alpha, n)$  ของ  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$

ในทุกสมการนิวเคลียร์ผลบวกของเลขอะตอมทั้งก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องเท่ากัน แสดงว่าประจุไฟฟ้ารวมมีค่าคงตัว และผลบวกของเลขมวลก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องเท่ากัน ด้วย ซึ่งแสดงว่าจำนวนนิวคลีออนรวมก่อนและหลังปฏิกิริยาจะต้องคงตัว (Olmsted III and Williams, 2002, P. 1018)

**ตัวอย่างที่ 7.4** นิวเคลียสธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งสลายตัวให้อนุภาค 3 ตัว โดย 2 ตัวเป็นชนิดเดียวกัน ปรากฏว่านิวเคลียสสุดท้ายมีเลขอะตอมคงเดิม ถ้านิวเคลียสสุดท้ายคือ  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$  แล้วนิวเคลียสเริ่มต้นจะมีเลขมวลและเลขอะตอมเท่าใด

วิธีทำ

จากโจทย์นิวเคลียสธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวให้อนุภาค 3 ตัว โดย 2 ตัวเป็นชนิดเดียวกัน แล้วทำให้เลขอะตอมเท่าเดิม แสดงว่าอนุภาคทั้ง 3 ตัว คือ แอลฟา 1 ตัว และบีตาลบ 2 ตัว ซึ่งเขียนเป็นสมการนิวเคลียร์ ได้ดังนี้



ดังนั้นนิวเคลียสเริ่มต้น คือ  ${}_{82}^{210}\text{Pb}$  มีเลขมวลและเลขอะตอมเท่ากับ 210 และ 82

ตามลำดับ

**ตัวอย่างที่ 7.5** จากปฏิกิริยานิวเคลียร์  $X(\alpha, d)$   $^{197}_{79}\text{Au}$  นิวเคลียส X จะมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่าใด

วิธีทำ

สมมติให้ X เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A ดังนั้นสัญลักษณ์  $X(\alpha, d)$   $^{197}_{79}\text{Au}$  (เมื่อ d คือ อนุภาคดิวเทอเรียม ซึ่งเป็นไอโซโทปหนึ่งของไฮโดรเจนที่มีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 1 ตัว;  $^2_1\text{H}$ ) สามารถเขียนเป็นสมการนิวเคลียร์ ได้ดังนี้



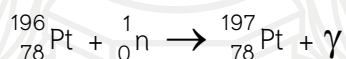
จากผลบวกของเลขอะตอมฝั่งซ้ายเท่ากับฝั่งขวาจึงได้  $Z+2 = 79+1$  จะได้  $Z = 78$

จากผลบวกของเลขมวลฝั่งซ้ายเท่ากับฝั่งขวาจึงได้  $A+4 = 197+2$  จะได้  $A = 195$

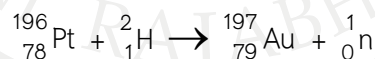
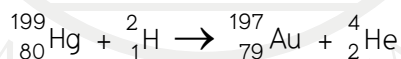
ดังนั้น X จะมี จำนวนโปรตอนเท่ากับ  $Z = 78$  ตัว

จำนวนนิวตรอนเท่ากับ  $A-Z = 195-78 = 117$  ตัว

ประโยชน์ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของธาตุเสถียร (เมื่อถูกอนุภาคพุ่งชน) คือใช้ศึกษาองค์ประกอบของนิวเคลียส อีกทั้งยังมีความสำคัญคือใช้สังเคราะห์ธาตุกัมมันตรังสีที่ไม่มีในธรรมชาติ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552, หน้า 304) เช่น  $^{197}_{78}\text{Pt}$  สามารถสร้างขึ้นจากปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  ของ  $^{196}_{78}\text{Pt}$  ดังนี้



นอกจากนี้ด้วยวิธีการดังกล่าว ยังสามารถนำมาใช้ในการสร้างนิวเคลียสของธาตุใหม่ เช่น ทำให้ปรอทกลายเป็นทองคำ จากการยิงด้วยอนุภาคดิวเทอเรียม ( $^2_1\text{H}$ ) ดังนี้



พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เรียกว่าพลังงานนิวเคลียร์ (nuclear energy) คำนวณได้จากมวลพหุคูณที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานและผลต่างของพลังงานจลน์ของอนุภาคก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา โดยศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ตัวอย่างที่ 7.6** จากปฏิกิริยานิวเคลียร์  ${}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$  กำหนดมวลอะตอมของธาตุแต่ละตัวดังนี้

$${}^{12}_6\text{C} = 12.000000 \text{ amu} \quad ; \quad {}^1_0\text{n} = 1.008665 \text{ amu}$$

$${}^9_4\text{Be} = 9.012186 \text{ amu} \quad ; \quad {}^4_2\text{He} = 4.002604 \text{ amu}$$

เมื่อยิงนิวตรอนที่มีพลังงาน 10 MeV อนุภาคแอลฟาที่เกิดจากปฏิกิริยาจะมีพลังงานเท่าใด  
วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{มวลก่อนปฏิกิริยา} &= \text{มวล } {}^{12}_6\text{C} + \text{มวล } {}^1_0\text{n} \\ &= 12.000000 + 1.008665 = 13.008665 \text{ amu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลหลังปฏิกิริยา} &= \text{มวล } {}^9_4\text{Be} + \text{มวล } {}^4_2\text{He} \\ &= 9.012186 + 4.002604 = 13.014790 \text{ amu} \end{aligned}$$

$$\Delta m = m_{\text{หลัง}} - m_{\text{ก่อน}} = 13.014790 - 13.008665 = 0.006125 \text{ amu}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานจากการทำปฏิกิริยา} &= (0.006125 \text{ amu}) \times (931 \text{ MeV/amu}) \\ &= 5.702 \text{ MeV} \text{ (เครื่องหมายบวกแสดงว่าดูดพลังงาน)} \end{aligned}$$

แต่นิวตรอนมีพลังงาน 10 MeV

$$\text{แสดงว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเหลือพลังงาน} = 10 - 5.702 = 4.298 \text{ MeV}$$

ดังนั้นอนุภาคแอลฟาจะมีพลังงานเท่ากับ 4.298 MeV

จากตัวอย่างที่ 7.6 แสดงว่าผลต่างระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอนและอนุภาคแอลฟา ต้องมีค่าน้อยเท่ากับ 5.702 MeV จึงจะเกิดปฏิกิริยาได้ ทำให้ในกรณีนี้ อนุภาคนิวตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าอนุภาคแอลฟา ดังนั้นอาจเขียนสมการนิวเคลียร์ได้เป็น  ${}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n} + 5.702 \text{ MeV} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$  จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังกล่าวจะพบว่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวก่อนปฏิกิริยามีค่ามากกว่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวหลังปฏิกิริยาอยู่ 5.702 MeV ซึ่งเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ (ปฏิกิริยาดูดพลังงาน)

**ตัวอย่างที่ 7.7** จากปฏิกิริยานิวเคลียร์  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$  กำหนดมวลอะตอมของธาตุแต่ละตัวดังนี้

${}^7_3\text{Li} = 7.016005 \text{ amu}$  ;  ${}^1_1\text{H} = 1.007276 \text{ amu}$  ;  ${}^4_2\text{He} = 4.002604 \text{ amu}$   
 เมื่อยิงโปรตอนที่มีพลังงาน 5 MeV อนุภาคแอลฟาที่เกิดจากปฏิกิริยาจะมีพลังงานเท่าใด  
 วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{มวลก่อนปฏิกิริยา} &= \text{มวล } {}^7_3\text{Li} + \text{มวล } {}^1_1\text{H} \\ &= 7.016005 + 1.007276 = 8.023281 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลหลังปฏิกิริยา} &= 2 \times \text{มวล } {}^4_2\text{He} \\ &= 2 \times 4.002604 = 8.005208 \text{ amu} \end{aligned}$$

$$\Delta m = m_{\text{หลัง}} - m_{\text{ก่อน}} = 8.005208 - 8.023281 = -0.018073 \text{ amu}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานจากการทำปฏิกิริยา} &= (-0.018073 \text{ amu}) \times (931 \text{ MeV/amu}) \\ &= -16.826 \text{ MeV} \text{ (เครื่องหมายลบแสดงว่าคายพลังงาน)} \end{aligned}$$

แต่โปรตอนมีพลังงาน 5 MeV

$$\text{แสดงว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเหลือพลังงาน} = 5 - (-16.826) = 21.826 \text{ MeV}$$

ดังนั้นอนุภาคแอลฟาจะมีพลังงาน (รวมทั้งสองอนุภาค) เท่ากับ 21.826 MeV

จากตัวอย่างที่ 7.7 เพราะมวลรวมก่อนปฏิกิริยามีค่ามากกว่ามวลรวมหลังปฏิกิริยา ปฏิกิริยานี้จึงคายพลังงาน (-16.826 MeV) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาคแอลฟาและโปรตอน ดังนั้นอาจเขียนสมการนิวเคลียร์ได้เป็น

${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + 16.826 \text{ MeV}$  ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้จะมีค่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวก่อนปฏิกิริยาน้อยกว่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวหลังปฏิกิริยาอยู่ 16.826 MeV ซึ่งเท่ากับค่าพลังงานนิวเคลียร์ที่คายออกมา

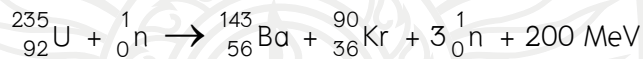
จากการวิเคราะห์พลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ทำให้สรุปได้ว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีการปลดปล่อยพลังงานหรือคายพลังงาน จะมีค่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวหลังปฏิกิริยามากกว่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวก่อนปฏิกิริยาเสมอ ซึ่งถ้าพิจารณาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนตามภาพที่ 7.2 จะพบว่า ในการทำให้นิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่ เช่น  ${}^{235}_{92}\text{U}$  แตกตัวออกเป็นสองส่วนที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกัน จะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเพิ่มขึ้น หรือถ้าทำให้นิวเคลียสขนาดเล็ก เช่น  ${}^2_1\text{He}$  สองนิวเคลียสมารวมกันเป็นอนุภาคแอลฟา ก็จะทำให้ค่า

พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเพิ่มสูงขึ้นได้เช่นกัน (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552, หน้า 307) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่กล่าวถึงทั้งสองกรณีเป็นลักษณะของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เรียกว่า ฟิชชันและฟิวชัน ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 7.6.1 ปฏิกิริยาฟิชชัน

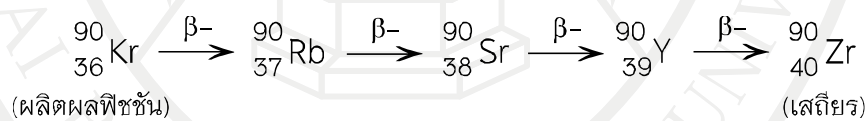
ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction) คือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสของธาตุหนัก (เลขมวลมากกว่า 230) ถูกทำให้แตกออกเป็นนิวเคลียสขนาดกลางสองหรือสามนิวเคลียส ที่มีมวลใกล้เคียงกัน (เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ฟิชชัน) และให้นิวตรอนพร้อมกับพลังงานจำนวนมหาศาลออกมา ซึ่งเกิดจากมวลรวมก่อนปฏิกิริยามีค่ามากกว่ามวลรวมหลังปฏิกิริยา และมวลที่หายไป (มวลพร้อม) กลายเป็นพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา

ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นซ้ำ ๆ และเกิดอย่างต่อเนื่อง เช่น นิวตรอนที่มีพลังงาน 1 eV วิ่งชน  $^{235}_{92}\text{U}$  จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันดังนี้



ดังนั้นหาก  $^{235}_{92}\text{U}$  จำนวน 1 กรัมทำปฏิกิริยาฟิชชันจะให้พลังงานสูงเทียบเท่ากับพลังงานที่เกิดจากการเผาถ่านหินถึง 3 ตัน (มวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, 2547, หน้า 67)

ถ้าผลผลิตฟิชชันที่ได้เป็นนิวไคลด์ไม่เสถียร (ธาตุกัมมันตรังสี) จะเกิดการแผ่รังสีต่อไปจนได้นิวไคลด์เสถียรที่มีเสถียรภาพ เช่น



ปฏิกิริยาฟิชชันนี้มีนิวตรอนเกิดขึ้นใหม่ และมีจำนวนมากกว่านิวตรอนที่ใช้ยิง นิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้ สามารถวิ่งชนนิวเคลียสของธาตุหนักอะตอมอื่น ๆ ได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้อย่างต่อเนื่อง และได้จำนวนนิวตรอนเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อย ๆ เรียกปฏิกิริยาในลักษณะนี้ว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)



**ตัวอย่างที่ 7.8** ถ้าปฏิกิริยาฟิชชันของ  $^{235}_{92}\text{U}$  1 ปฏิกิริยาให้พลังงาน 200 MeV ถ้าต้องการใช้พลังงาน 48 เมกกะวัตต์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จะต้องใช้สาร  $^{235}_{92}\text{U}$  นี้ทำปฏิกิริยาที่กี่กรัม/วินาที

$$\text{วิธีทำ} \quad \text{พลังงาน } 48 \text{ MW} = \frac{48 \text{ MJ}}{1 \text{ s}} = \frac{48}{1.6022 \times 10^{-19}} \text{ MeV/s} = 2.9959 \times 10^{20} \text{ MeV/s}$$

1 ปฏิกิริยาฟิชชันให้พลังงาน 200 MeV/s

ดังนั้นพลังงาน  $2.9959 \times 10^{20}$  MeV/s ต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

$$\text{จำนวนครั้ง} = \frac{2.9959 \times 10^{20} \text{ MeV/s}}{200 \text{ MeV/s}} = 1.49795 \times 10^{18} \text{ ครั้ง}$$

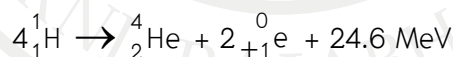
แสดงว่าต้องการ  $^{235}_{92}\text{U}$  จำนวน  $1.49795 \times 10^{18}$  นิวเคลียส (แตกตัว 1 ครั้งใช้  $^{235}_{92}\text{U}$  1 นิวเคลียส)

$$\text{คิดเป็นจำนวนโมล} = \frac{1.49795 \times 10^{18}}{6.02 \times 10^{23}} = 2.488 \times 10^{-6} \text{ โมล}$$

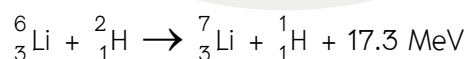
$$\text{คิดเป็นน้ำหนัก} = (2.488 \times 10^{-6} \text{ โมล}) \times (238.02891 \text{ กรัม/โมล}) = 5.922 \times 10^{-4} \text{ กรัม}$$

### 7.6.2 ปฏิกิริยาฟิวชัน

ปฏิกิริยาฟิวชัน (fusion reaction) คือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสของธาตุเบาสองชนิดหลอมรวมกันเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า ทำให้มีพลังงานยึดเหนี่ยวเพิ่ม และนิวเคลียสมีเสถียรภาพมากขึ้น พร้อมกับคายพลังงานมหาศาล โดยพลังงานที่คายออกมามีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของนิวเคลียสที่มีจำนวนเท่ากัน เช่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์เป็นปฏิกิริยาฟิวชันของโปรตอน 4 ตัวที่อุณหภูมิสูงดังนี้



หรือปฏิกิริยา



ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดขึ้นได้ยาก เพราะนิวเคลียสของนิวเคลียสต่างก็ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก ทำให้ผลักกัน ดังนั้นเพื่อที่จะให้เกิดการหลอมรวมกันของนิวเคลียสจะต้องอาศัยอุณหภูมิที่สูงมาก อาจถึงล้านเคลวิน อนุภาคที่รวมกันที่อุณหภูมิสูงมากนี้

เรียกว่า พลาสมา (plasma) (สุชาติพิทย์ คิริไพศาลพิพัฒน์, อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 349)

## 7.7 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติจะมีเลขอะตอมสูงกว่า 83 (เริ่มจากบิสมัท) และจะสลายตัวให้ธาตุกัมมันตรังสีอย่างต่อเนื่อง จากธาตุหนึ่งไปเป็นอีกธาตุหนึ่งอย่างเป็นอนุกรมซึ่งแบ่งได้เป็น 3 อนุกรม (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, 2547, หน้า 96–97) คือ

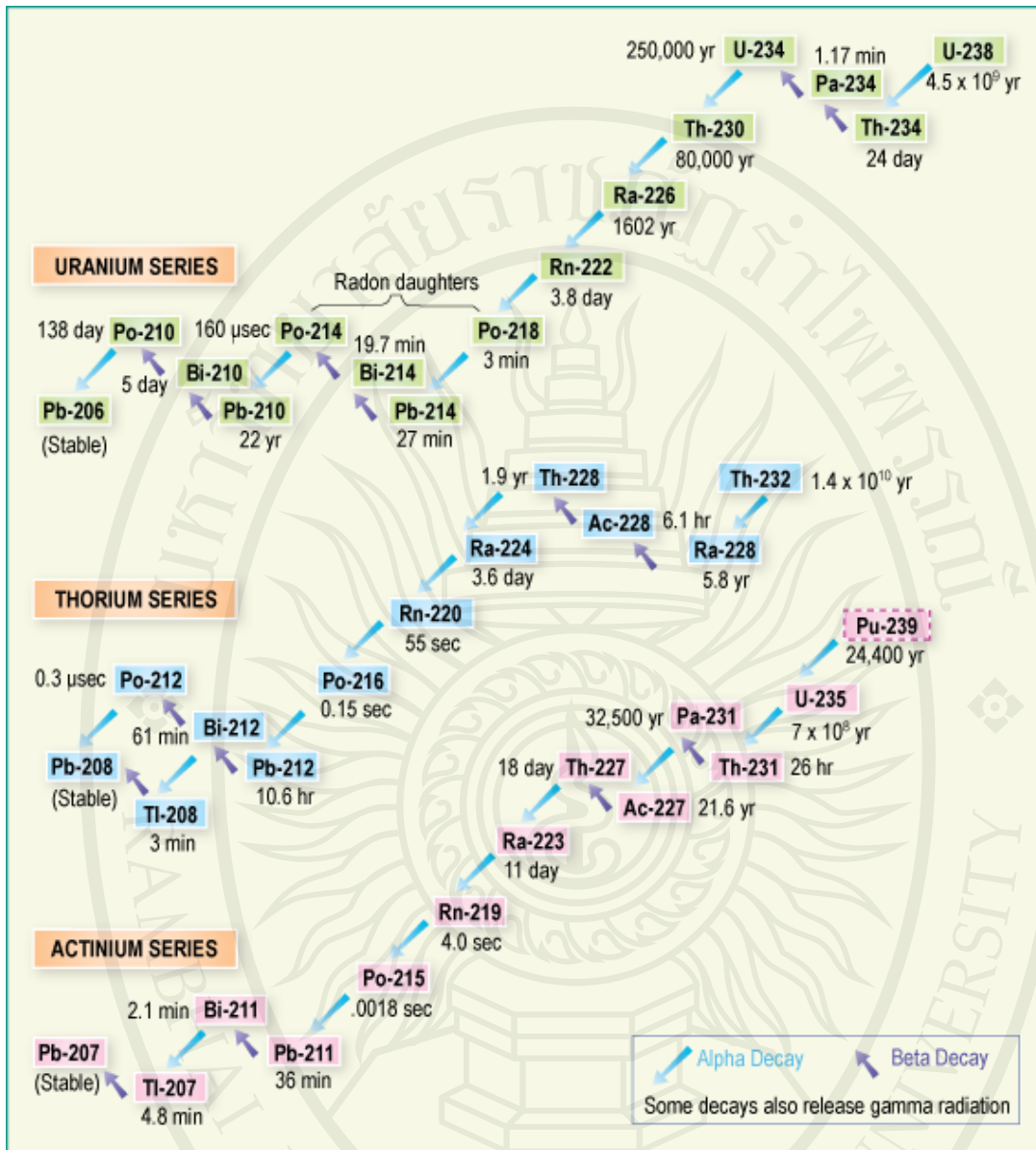
**7.7.1 อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series)** นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มจาก  $^{238}_{92}\text{U}$  สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ  $^{206}_{82}\text{Pb}$  นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 จึงมักเรียกอนุกรมชุดนี้ว่าอนุกรม  $4n+2$

**7.7.2 อนุกรมทอเรียม (Thorium series)** นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มจาก  $^{232}_{90}\text{Th}$  สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ  $^{208}_{82}\text{Pb}$  นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีเลขมวลที่หารด้วย 4 ลงตัว จึงมักเรียกอนุกรมชุดนี้ว่าอนุกรม  $4n$

**7.7.3 อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series)** นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มจาก  $^{235}_{92}\text{U}$  สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ  $^{207}_{82}\text{Pb}$  นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 จึงมักเรียกอนุกรมชุดนี้ว่าอนุกรม  $4n+3$

การสลายตัวของนิวไคลด์ของอนุกรมทั้งสามชนิด แสดงในภาพที่ 7.3 ซึ่งพบว่ามีการสลายตัวต่อเนื่องกันไปเฉพาะอนุกรม ไม่มีการโยกข้ามอนุกรม ดังนั้นนิวไคลด์ในอนุกรมใดอนุกรมหนึ่งจะไม่มีสลายตัวข้ามไปเป็นนิวไคลด์ของอนุกรมอื่น (สุชาติพิทย์ คิริไพศาลพิพัฒน์ อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 354)

นอกจากนี้ในการสลายตัวยังเกี่ยวข้องกับครึ่งชีวิต (half life;  $t_{1/2}$ ) ซึ่งก็คือระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวจนเหลือจำนวนอะตอมครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น ธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตยาวนานจะมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ แต่หากธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตสั้นจะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์เริ่มต้นของทั้ง 3 อนุกรม ได้แก่  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$ , และ  $^{235}_{92}\text{U}$  มีค่าเท่ากับ  $4.5 \times 10^9$ ,  $1.4 \times 10^{10}$ , และ  $7.0 \times 10^8$  ปี ตามลำดับ



ภาพที่ 7.3 การสลายตัวของธาตุในอนุกรมยูเรเนียม, อนุกรมทอเรียม, และอนุกรมแอกทิเนียม (ที่มา : World Nuclear Association, 2013)

## 7.8 อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวและแผ่รังสีตลอดเวลา โดยไม่สามารถทำนายได้ว่า อะตอมกัมมันตรังสี (นิวไคลด์) อะตอมใดจะสลายตัวเมื่อใด เนื่องจากการสลายตัวเกิดขึ้นแบบสุ่ม (random) แต่อย่างไรก็ตาม สามารถคำนวณได้ว่ามีกี่อะตอม (นิวไคลด์) ที่สลายตัวต่อเวลา หรือมีกี่อะตอมที่ยังเหลืออยู่ที่เวลาใด ๆ โดยอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือเรียกว่ากัมมันตภาพ (activity;  $A$ ) แปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมกัมมันตรังสี ( $N$ ) ที่ปรากฏอยู่ ณ เวลานั้น ๆ ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้คือ

$$\text{อัตราการสลายตัว} = A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (7.1)$$

จัดรูปสมการ (7.1) จะได้

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

จะได้

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (7.2)$$

เมื่อ  $N_0$  คือ จำนวนอะตอมกัมมันตรังสี ณ เวลา เริ่มต้น ( $t = 0$ )

$N$  คือ จำนวนอะตอมกัมมันตรังสี ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว

แต่จาก  $A = \lambda N$  ดังนั้นจึงได้

$$\ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t \quad (7.3)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ กัมมันตภาพของสาร ณ เวลา เริ่มต้น ( $t = 0$ )

$A$  คือ กัมมันตภาพของสาร ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

และจำนวนอะตอมแปรผันโดยตรงกับน้ำหนัก ( $W$ ) ดังนั้นจึงได้

$$\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t \quad (7.4)$$

เมื่อ  $W_0$  คือ น้ำหนักของสารกัมมันตรังสี ณ เวลา เริ่มต้น ( $t = 0$ )

$W$  คือ น้ำหนักของสารกัมมันตรังสี ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

ปริมาณกัมมันตภาพของสารวัดเป็นปริมาณอะตอมที่สลายในหนึ่งหน่วยเวลา เช่น วัดการสลายตัวต่อวินาที (disintegration per second; dps) นอกจากนี้ยังมีหน่วยเบคเคอเรล (becquerel; Bq) และคูรี (curie; Ci) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

จากนิยามของครึ่งชีวิต (ดูหัวข้อ 7.7) เมื่อแทนค่า  $N = \frac{N_0}{2}$  ที่เวลา  $t_{1/2}$  ลงในสมการ (7.2) จะได้

$$\begin{aligned} \ln \frac{N_0/2}{N_0} &= -\lambda t_{1/2} \\ \ln \frac{1}{2} &= -\lambda t_{1/2} \\ \ln 2 &= \lambda t_{1/2} \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned} \quad (7.5)$$

สมการ (7.5) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งชีวิต ( $t_{1/2}$ ) กับค่าคงที่การสลายตัว ( $\lambda$ ) ซึ่งหากทราบค่าใดค่าหนึ่งก็สามารถหาค่าหนึ่งได้ การคำนวณเกี่ยวกับอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี มักจะเกี่ยวข้องกับครึ่งชีวิต ซึ่งศึกษาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 7.9** ธาตุ  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ หนัก 0.375 กรัม จะต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะสลายตัวเหลือ 0.100 กรัม เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  เท่ากับ 3.823 วัน

วิธีทำ จากสมการ (7.5) จะได้  $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

ดังนั้น  $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{3.823} = 0.1813 \text{ วัน}^{-1}$

จากสมการ (7.4) จะได้  $\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t$

$$\ln \frac{0.100}{0.375} = -0.1813t$$

แก้สมการหาค่า  $t$  จะได้ ค่า  $t = 7.29$  วัน

**ตัวอย่างที่ 7.10** ธาตุ  $^{32}_{15}\text{P}$  มีครึ่งชีวิต 14.3 วัน ถ้ามีธาตุ  $^{32}_{15}\text{P}$  อยู่ 1 มิลลิกรัม หลังจากผ่านไป 10 วัน จะมีธาตุนี้เหลืออยู่ที่กี่กรัม

วิธีทำ จากสมการ (7.5) จะได้ 
$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

ดังนั้น 
$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{14.3} = 0.0485 \text{ วัน}^{-1}$$

จากสมการ (7.4) จะได้ 
$$\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t$$

$$\ln \frac{W}{1 \times 10^{-3}} = -0.0485 \times 10$$

แก้สมการหาค่า W จะได้ ค่า  $W = 0.615 \times 10^{-3}$  กรัม

**ตัวอย่างที่ 7.11** จงคำนวณหาความเข้มรังสีของสารในหน่วย Ci ของ  $^{237}_{93}\text{Np}$ หนัก 0.5 กรัม และมีครึ่งชีวิต  $2.20 \times 10^6$  ปี

วิธีทำ 
$$t_{1/2} = 2.20 \times 10^6 \text{ ปี}$$

$$= 2.20 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ วินาที}$$

$$= 6.94 \times 10^{13} \text{ วินาที}$$

จาก 
$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{6.94 \times 10^{13}} = 10^{-14} \text{ วินาที}^{-1}$$

หาจำนวนนิวไคลด์ของ  $^{237}_{93}\text{Np}$ หนัก 0.5 กรัม ดังนี้

$$N = \text{จำนวนนิวไคลด์} = \frac{0.5 \text{ กรัม}}{237 \text{ กรัม/โมล}} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ นิวไคลด์/โมล}$$

$$= 1.27 \times 10^{21} \text{ นิวไคลด์}$$

จากสมการ (7.1) 
$$A = \lambda N = 10^{-14} \times 1.27 \times 10^{21} = 1.27 \times 10^7 \text{ dps}$$

จาก  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$  ดังนั้น 
$$A = \frac{1.27 \times 10^7 \text{ dps}}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps/Ci}}$$

$$= 0.343 \times 10^{-3} \text{ Ci}$$



จากสมการ (7.2), (7.3), และ (7.4) สามารถเขียนในรูปเอกโปเนนเชียลได้ดังนี้

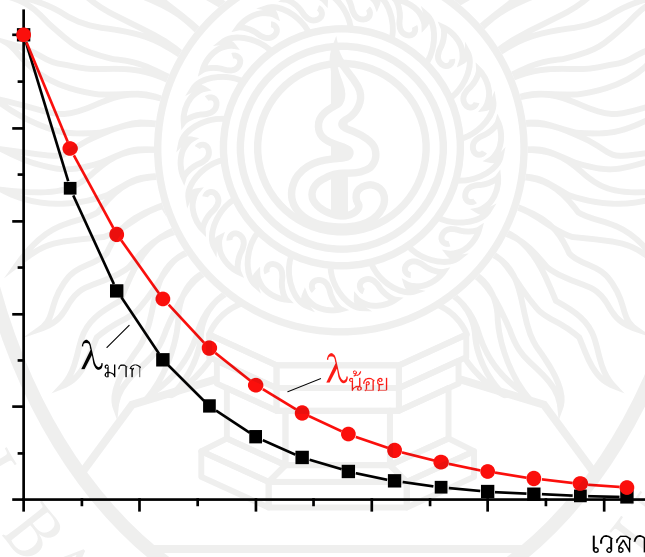
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7.6)$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (7.7)$$

$$W = W_0 e^{-\lambda t} \quad (7.8)$$

จากสมการ (7.6), (7.7), และ (7.8) จะเห็นว่า การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ทำให้จำนวนอะตอม กัมมันตภาพ และน้ำหนักของธาตุกัมมันตรังสึ้นั้นลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาดังแสดงในภาพที่ 7.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี 2 ชนิดที่มีค่า  $\lambda$  แตกต่างกัน ธาตุที่มีค่า  $\lambda$  มาก (มีครึ่งชีวิตสั้น;  $t_{1/2}$  น้อย) จะมีอัตราการสลายตัวหรือกัมมันตภาพมากกว่าธาตุที่มีค่า  $\lambda$  น้อย (มีครึ่งชีวิตยาว;  $t_{1/2}$  มาก)

จำนวนอะตอม



ภาพที่ 7.4 จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเทียบกับเวลา

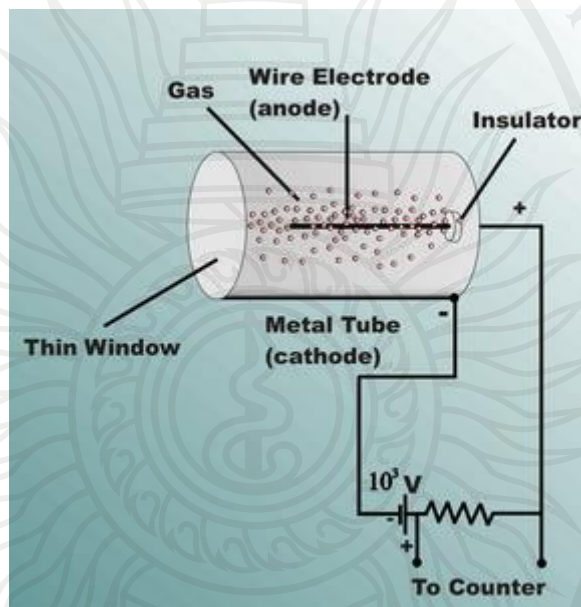
## 7.9 การวัดกัมมันตรังสี

การวัดการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสี ช่วยในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยานิวเคลียร์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพิจารณาการแผ่ขยายของรังสี เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ วิธีการที่นิยมใช้มีดังนี้

**7.9.1 การตรวจวัดรังสีด้วยฟิล์มถ่ายรูป** เป็นวิธีการโบราณที่ใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1896 รังสีที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับเกลือซิลเวอร์เฮไลด์ที่ฉาบอยู่บนแผ่นฟิล์ม ทำให้  $Ag^+$

เกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนเป็นโลหะเงิน และปรากฏเป็นสีดำบนฟิล์ม ปัจจุบันทำเป็นแผ่นติดตัวผู้ที่ต้องทำงานเกี่ยวข้องกับรังสี เพื่อตรวจสอบปริมาณรังสีที่บุคคลนั้นได้รับ

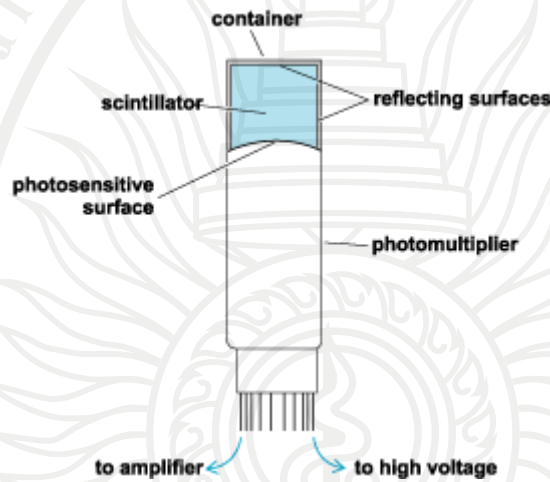
**7.9.2 การวัดโดยใช้เครื่องนับจำนวนไกเกอร์มูลเลอร์ (Geiger-Muller counter) วิธี**นี้เหมาะที่จะใช้กับอนุภาคที่มีประจุ ได้แก่ อนุภาคแอลฟา หรืออนุภาคบีตา อุปกรณ์ที่ใช้วัดประกอบด้วยหลอดไกเกอร์ที่ทำจากโลหะ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ภายในบรรจุแก๊ส เช่น แก๊สอาร์กอน บริเวณกลางหลอดเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะ และเป็นขั้วแอโนด ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วต่อกับแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ดังแสดงในภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.5 เครื่องนับจำนวนไกเกอร์มูลเลอร์  
(ที่มา : สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, 2556)

อนุภาคที่ต้องการวัดจะผ่านเข้ามาทางช่องหน้าต่างด้านปลายหลอดไกเกอร์ และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแก๊สอาร์กอนเกิดเป็นอนุภาคบวกของแก๊สอาร์กอน และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าจนไปชนและทำให้อะตอมอื่น ๆ แตกตัว เป็นการเพิ่มจำนวนไอออนและอิเล็กตรอนให้มากขึ้น เกิดกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถตรวจวัดและแสดงค่าเป็นตัวเลขได้ (สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และ สายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 366)

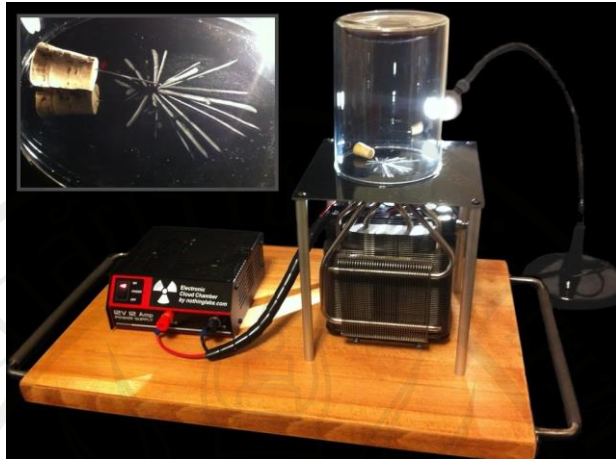
**7.9.3 การวัดโดยใช้เครื่องซินทิลเลชัน (Scintillation counter)** วิธีการนี้จะให้อนุภาคหรือรังสีทำปฏิกิริยากับสารที่มีสมบัติเรืองแสง ทำให้เกิดแสงวาบ เรียกว่าซินทิลเลชัน อุปกรณ์โฟโตออปติคัล เช่น หลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier) ดังแสดงในภาพที่ 7.6 จะขยายสัญญาณแสงที่เกิดขึ้น และตรวจวัดปริมาณรังสี จากการนับจำนวนแสงวาบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ในการตรวจวัดรังสีบีตาจะใช้ ZnS เป็นสารเรืองแสง ซึ่งจะเกิดแสงวาบขึ้นเมื่อมีอนุภาคบีตามาตกกระทบ



ภาพที่ 7.6 หลอดโฟโตมัลติพลีเออร์

(ที่มา : McGraw-Hill Science & Technology Encyclopedia, 2013)

**7.9.4 การวัดด้วยเครื่องคราวด์แชมเบอร์ (Cloud Chamber)** อนุภาคหรือรังสีจากสารกัมมันตรังสี จะผ่านไปใ้ในอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอของของเหลว เช่น น้ำหรือแอลกอฮอล์ จะทำให้ไอกลั่นตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ตามทิศทางที่รังสีผ่าน ถ้าถ่ายภาพไว้จะเห็นเป็นทางสีขาว ดังแสดงในภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7 เครื่องคราวด์แชมเบอร์  
(ที่มา : Olson, 2013)

### 7.10 หน่วยที่ใช้วัดเมื่อวัดดูดกลืนรังสี

ในกรณีที่ร่างกายได้รับรังสีนิวเคลียร์ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย ปริมาณของพลังงานต่อน้ำหนักที่อวัยวะหรือเนื้อเยื่อของร่างกายดูดกลืนไว้ เรียกว่า absorbed dose มีหน่วยเป็นเกรย์ (gray; Gy) ปริมาณรังสี (dose) 1 เกรย์เทียบเท่ากับพลังงานของรังสี 1 จูล (joule) ที่อวัยวะหรือเนื้อเยื่อของร่างกายน้ำหนัก 1 กิโลกรัมดูดกลืนเอาไว้ (ฝ่ายวิศวกรรมนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2556)

หน่วยวัด rad เป็นหน่วยเก่าของ absorbed dose ที่ยังคงมีการใช้อยู่ (ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับ 1 เกรย์ เทียบเท่ากับ 100 rads หรือ  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$

นอกจากนี้ในการอ้างอิงถึงผลกระทบที่เกิดกับร่างกายมนุษย์ นักวิทยาศาสตร์จะใช้หน่วย Sv (sievert) หรือ rem (roentgen equivalent in man) เป็นหลัก (โดย  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ) เพราะรังสีแต่ละชนิดมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตไม่เหมือนกัน แม้ว่าจะมีในปริมาณเท่ากันก็ตาม เช่น รังสีแอลฟามีอำนาจทำลายเซลล์ได้มากกว่ารังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น และเนื้อเยื่อแต่ละชนิดก็ได้รับผลกระทบไม่เท่ากัน ดังนั้นการรายงานเพียงแต่ปริมาณพลังงานที่วัดดูก่อนหนึ่งดูซับซ้อนเข้าไปเป็น gray จึงไม่ได้ชี้ให้เห็นข้อมูลในทางชีววิทยา ดังนั้นจำเป็นต้องเทียบค่าถ่วงน้ำหนักตามผลกระทบเป็น sievert หรือ rem

สำหรับร่างกายมนุษย์ที่ได้รับรังสีชนิดต่าง ๆ มีข้อมูลที่สำคัญดังนี้

- (1) การดูดซับรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมา  $1 \text{ rad} = 1 \text{ rem} = 10 \text{ mSv}$   
(millisievert)
- (2) การดูดซับนิวตรอน  $1 \text{ rad} = 5\text{--}20 \text{ rem} = 50\text{--}200 \text{ mSv}$  (ขึ้นอยู่กับพลังงาน)
- (3) การดูดซับรังสีแกมมา  $1 \text{ rad} = 20 \text{ rem} = 200 \text{ mSv}$

ตามข้อเสนอแนะของ TLV (Threshold Limit Value) มนุษย์ร่างกายปกติที่มีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม สามารถได้รับรังสีเฉลี่ย  $0.05 \text{ Sv}$  ( $50 \text{ mSv}$ ) ต่อปี ซึ่งถือว่าปริมาณรังสี  $1 \text{ Sv}$  เป็นระดับที่สูงมาก การได้รับรังสีปริมาณมากในครั้งเดียว (acute exposure) จะมีผลกระทบต่อปริมาณของรังสี (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2556) ดังนี้

- |         |  |
|---------|--|
| 10 Sv   | มีความเสี่ยงที่จะเสียชีวิตในเวลาเป็นวันหรือสัปดาห์               |
| 1 Sv    | มีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในภายหลัง (5 คน ใน 100 คน)            |
| 100 mSv | มีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในภายหลัง (5 คน ใน 1000 คน)           |
| 50 mSv  | ปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีของผู้ที่ปฏิบัติงานทางรังสีตาม TLV      |
| 20 mSv  | ปริมาณรังสีที่ได้รับเฉลี่ยต่อปี หรือโดยเฉลี่ยในเวลา 5 ปี ตาม TLV |

## 7.11 การป้องกันอันตรายจากกัมมันตรังสี

รังสีนิวเคลียร์มีผลต่อโมเลกุลของสิ่งมีชีวิต เมื่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมนุษย์และสัตว์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ น้ำ (ประมาณ 75%) สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (ประมาณ 25% ของน้ำหนักร่างกาย) ได้รับรังสีประเภทก่อให้เกิดไอออน เช่น รังสีแกมมา หรือเอกซเรย์ จะไปทำให้โมเลกุลของสารภายในร่างกายเปลี่ยนแปลง และมีอนุมูลอิสระต่าง ๆ (free radicals) เกิดขึ้น ซึ่งมักมีคุณสมบัติไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี จึงสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ของร่างกายได้ เช่น ก่อให้เกิดมะเร็งในกระดุกและเม็ดเลือด แก่ชราก่อนวัย และเป็นหมัน เป็นต้น (รุ่งทิพย์ อุดมวิเศษสันต์, 2556)

นอกจากนี้รังสีอาจมีผลต่อเนื้อเยื่อและอวัยวะ เมื่อโมเลกุลและเซลล์ได้รับความเสียหาย ก็จะส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อและอวัยวะ ก่อให้เกิดอาการต่าง ๆ ซึ่งอาการจากการได้รับรังสีไม่มีลักษณะเฉพาะตัว แต่จากการศึกษาผู้ได้รับรังสีทั่วร่างกายจากการใช้ระเบิดปรมาณูในสงครามโลกครั้งที่ 2 อุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ การทดสอบกับสัตว์ทดลอง และการใช้รังสีทางการแพทย์ ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มอาการจากการได้รับรังสี



ได้เป็น 3 กลุ่มได้แก่ กลุ่มอาการทางระบบเลือด กลุ่มอาการทางระบบทางเดินอาหาร และกลุ่มอาการทางระบบประสาทส่วนกลาง โดยกลุ่มอาการเหล่านี้จะปรากฏเมื่อการได้รับรังสีอยู่ภายใต้เงื่อนไข ได้แก่ ได้รับรังสีภายในระยะเวลาสั้น ๆ (นาที) ได้รับรังสีทั่วร่างกาย และต้นกำเนิดรังสีอยู่ภายนอกร่างกาย รวมทั้งรังสีเป็นชนิดที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง (Sunflowercosmos ,Non-profit organization, 2556)

จากโทษและพิษภัยของรังสีนิวเคลียร์ จึงต้องมีการป้องกันอันตรายจากรังสี ซึ่งมีแนวทางปฏิบัติที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ เวลา ระยะทาง และเครื่องกำบังรังสี (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2547, หน้า 142) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 7.11.1 เวลา (time)

ปริมาณรังสีที่ได้รับขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ได้รับรังสี หากเป็นการรับรังสีจากแหล่งรังสีที่อยู่ภายนอกร่างกาย ปริมาณรังสีที่ได้รับขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่อยู่ใกล้และรับรังสีจากแหล่งนั้น การหลีกเลี่ยงรังสีจึงควรจะมีสัมผัสรังสีด้วยเวลาที่สั้นที่สุด แต่หากเป็นแหล่งรังสีภายในร่างกายจะได้รับรังสีตลอดเวลา จนกระทั่งสารกัมมันตรังสีนั้นสลายตัวหมดไปหรือถูกร่างกายขับออกมา

#### 7.11.2 ระยะทาง (distance)

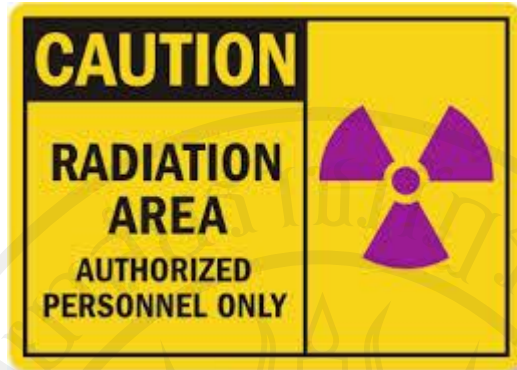
ความเข้มของรังสีหรือปริมาณรังสีมีลักษณะเช่นเดียวกับแสงสว่างจากหลอดไฟฟ้า เมื่ออยู่ใกล้แหล่งรังสีมากก็จะได้รับรังสีปริมาณสูง แต่หากอยู่ไกลก็จะได้รับรังสีปริมาณน้อย อย่างไรก็ตามยังระบุไม่ได้ว่าระยะห่างจากแหล่งรังสีควรเป็นเท่าใดจึงจะไม่ได้รับรังสี เพราะขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี พลังงานที่แผ่และกัมมันตภาพของแหล่งรังสีนั้น

#### 7.11.3 เครื่องกำบังรังสี (shielding)

เมื่อมีวัสดุกั้นระหว่างแหล่งรังสีจะทำให้รับรังสีน้อยลง วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะใช้กำบังรังสีได้ดี ส่วนจะมีความหนาแน่นเท่าใดขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี พลังงานที่แผ่และกัมมันตภาพของแหล่งรังสีนั้น โดยเฉพาะรังสีแกมมา ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอำนาจทะลุทะลวงสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องกำบังรังสีที่มีความหนาแน่นและมีความหนามาก

บริเวณและพื้นที่ที่มีการปฏิบัติงานด้านรังสี ต้องมีเครื่องหมายเตือนว่าเป็นบริเวณรังสี โดยใช้สัญลักษณ์ใบพัดสีม่วงแดง 3 ใบ โดยใบพัดแต่ละใบกว้าง 60 องศา ขอบด้านในอยู่ห่างจากวงกลมกลาง 1.5 เท่าของรัศมี R และขอบด้านนอกอยู่ห่าง 5 เท่าของรัศมี R และพื้นหลังเป็นสีเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 7.8





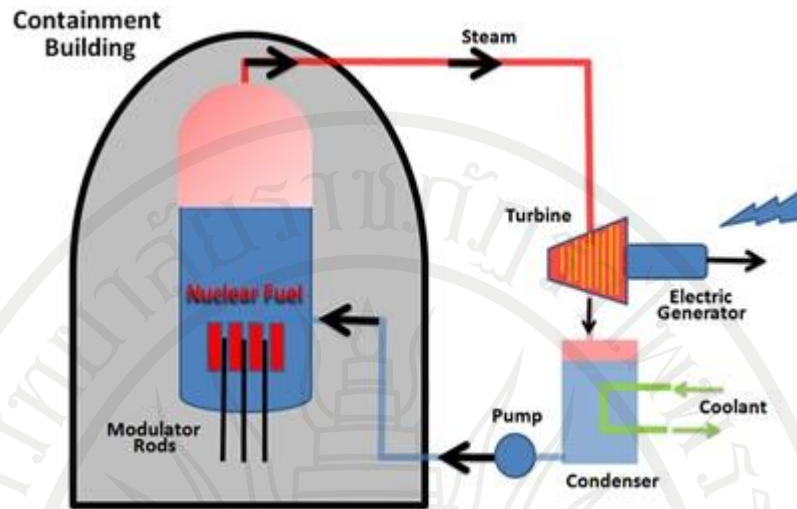
ภาพที่ 7.8 เครื่องหมายเตือนทางรังสี  
(ที่มา : MySafetyLabels, 2013)

## 7.12 ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

ความรู้ทางด้านเคมีนิวเคลียร์ที่ศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยพลังงานออกมาจากธาตุกัมมันตรังสี ผสมกับประชากรที่เพิ่มมากขึ้นจนมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มนุษย์นำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ประโยชน์อีกด้านคือการนำไอโซโทปมาศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการใช้ธาตุกัมมันตรังสีในการหาอายุของวัตถุโบราณ นอกจากนี้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ยังถูกใช้สร้างรังสีนิวเคลียร์เพื่อประโยชน์ทางด้านอาหาร การเกษตร การแพทย์ และอุตสาหกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 7.12.1 การใช้พลังงานนิวเคลียร์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

พลังงานนิวเคลียร์ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้ามาจากปฏิกิริยาฟิชชัน เพราะควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาฟิวชัน (Olmsted III and Williams, 2002, P. 1026) ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) โดยสามารถควบคุมปฏิกิริยาและเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากฟิชชันที่มีปริมาณมหาศาลไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น เช่น ทำให้น้ำกลายเป็นไอล้ำไปหมุนกังหันไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 7.9



ภาพที่ 7.9 ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์  
(ที่มา : มานัส มงคลสุข, 2556)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (ดูภาพที่ 7.9) ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง (fuel rod) ที่ภายในบรรจุธาตุกัมมันตรังสี เช่น  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$  และ  $^{239}_{94}\text{Pu}$  จัดเรียงอยู่กับมอดเรเตอร์ (moderator) หรือสารหน่วง เพราะนิวตรอนที่ชนกับธาตุกัมมันตรังสีเพื่อกระตุ้นให้เกิดฟิชชันต้องเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ แต่นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูง จึงต้องลดพลังงานของนิวตรอนเกิดใหม่ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการให้ชนกับสารหน่วงเพื่อถ่ายเทพลังงาน โดยสารหน่วงที่นิยมใช้มักจะเป็นวัสดุที่มีมวลต่ำ เช่น น้ำ และกราไฟต์ นอกจากนี้ยังมีแท่งควบคุม (control rod) ที่ควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันให้เกิดขึ้นหรือลดลง ด้วยการควบคุมจำนวนนิวตรอนซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา แท่งควบคุมทำจากวัสดุที่จับนิวตรอนได้ดี เช่น แคดเมียมและโบรอน โดยจัดเรียงแท่งควบคุมให้กระจายอยู่กับแท่งเชื้อเพลิง

พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เกิดขึ้นหลังปฏิกิริยาและรังสีที่เกิดขึ้น เมื่อชนกับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถถ่ายโอนออกจากเครื่องปฏิกรณ์เพื่อนำความร้อนนี้ไปใช้ประโยชน์ด้วยระบบหล่อเย็น (coolant) โดยถ้าใช้น้ำหล่อเย็นจะได้ไอน้ำร้อนที่สามารถนำไปใช้หมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ นอกจากนี้อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำบังรังสี (shielding) ทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก และคอนกรีต โดยทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคหรือรังสีชนิดใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกสู่ภายนอก (นवलฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2547, หน้า 70)

### 7.12.2 การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

สารกัมมันตรังสีสามารถนำมาใช้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยให้บางอะตอมของสารตั้งต้นถูกแทนที่ด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุนั้น แล้วนำโมเลกุลสารดังกล่าวไปทำปฏิกิริยา เพราะไอโซโทปกัมมันตรังสีและไอโซโทปที่เสถียรของธาตุเดียวกันสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีในแบบเดียวกันแล้วให้สารผลิตภัณฑ์เป็นสารชนิดเดียวกัน แตกต่างกันตรงที่สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไอโซโทปกัมมันตรังสีสามารถปล่อยรังสีออกมาได้ (สุชาติพิศศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐ์กุล, 2541, หน้า 369) ดังนั้นจึงสามารถติดตามทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นได้ด้วยการติดตามไอโซโทปกัมมันตรังสีว่าหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้วจะอยู่กับสารประกอบใด เรียกเทคนิคนี้ว่า isotropic labelling

### 7.12.3 การใช้ธาตุกัมมันตรังสีในการหาอายุของวัตถุโบราณ

ธาตุกัมมันตรังสีมีปะปนอยู่ในสินแร่ ดิน และทรายตามธรรมชาติ (ปริมาณน้อย) ซึ่งในสมัยโบราณนิยมนำดินและทรายเหล่านี้มาขึ้นรูปและเขียนสีเป็นเครื่องใช้ในการดำรงชีวิตต่าง ๆ ดังนั้นจากความรู้เกี่ยวกับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี สามารถนำมาใช้หาอายุของแร่หรือวัตถุโบราณ เช่น การวิเคราะห์หินแร่ที่มี  $^{238}_{92}\text{U}$  เป็นองค์ประกอบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

**ตัวอย่างที่ 7.12** ผลจากการวิเคราะห์หินก้อนหนึ่งพบมี  $^{238}_{92}\text{U}$  และ  $^{206}_{82}\text{Pb}$  อยู่  $1.3 \times 10^{-5}$  กรัม และ  $3.4 \times 10^{-6}$  กรัม ตามลำดับ จงคำนวณหาอายุของหินก้อนนี้ กำหนดให้  $^{238}_{92}\text{U}$  มีครึ่งชีวิตเท่ากับ  $4.5 \times 10^9$  ปี

วิธีทำ หา  $^{238}_{92}\text{U}$  ที่เวลาเริ่มต้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $^{238}_{92}\text{U}$  ที่เหลือรวมกับ  $^{238}_{92}\text{U}$  ที่สลายไปเป็น  $^{206}_{82}\text{Pb}$

ดังนั้น  $^{206}_{82}\text{Pb}$  (1 โมล)หนัก 207.2 กรัม เกิดจากการสลายตัวของ  $^{238}_{92}\text{U}$  (1 โมล)หนัก 238.03 กรัม

$$^{206}_{82}\text{Pb} \text{หนัก } 3.4 \times 10^{-6} \text{ กรัม เกิดจากการสลายตัวของ } ^{238}_{92}\text{U} = \frac{238.03 \times 3.4 \times 10^{-6}}{207.2} = 3.9 \times 10^{-6} \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } ^{238}_{92}\text{U} \text{ ที่เวลาเริ่มต้น} &= (^{238}_{92}\text{U} \text{ ที่เหลือ}) + (^{238}_{92}\text{U} \text{ ที่สลายไป}) \\ &= (1.3 \times 10^{-5}) + (3.9 \times 10^{-6}) = 1.69 \times 10^{-5} \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากสมการ (7.5) จะได้  $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

ดังนั้น  $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{4.5 \times 10^9} = 1.54 \times 10^{-10} \text{ ปี}^{-1}$

จากสมการ (7.4) จะได้  $\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t$

$$\ln \frac{1.3 \times 10^{-5}}{1.69 \times 10^{-5}} = -1.54 \times 10^{-10} t$$

จะได้  $t = 1.703 \times 10^9$  ปี หรือหินก้อนนี้มีอายุ  $1.703 \times 10^9$  ปี

การหาอายุของสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นไม้และกระดูกสัตว์ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจะตรวจวัดด้วยการวัดปริมาณ  $^{14}\text{C}$  ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสี ในธรรมชาติมี  $^{14}\text{C}$  อยู่ในปริมาณเล็กน้อย เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืช เพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต สัตว์กินพืชก็จะได้รับสารประกอบที่มี  $^{14}\text{C}$  ต่อไป ซึ่งโดยปกติ  $^{14}\text{C}$  ในสิ่งมีชีวิตจะสลายตัวไปเรื่อย ๆ ในขณะที่เดียวกันก็มีการรับ  $^{14}\text{C}$  เข้ามาเพิ่ม

กัมมันตภาพรังสีของ  $^{14}\text{C}$  ของสิ่งมีชีวิตในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่จะมีค่า 15.3 ครั้งของการสลายตัวต่ออนาที (disintegration per minute; dpm) ต่อกรัม หมายความว่า  $^{14}\text{C}$  1 กรัม มีกัมมันตภาพ 15.3 dpm เมื่อสิ่งมีชีวิตนั้นตาย จะไม่ได้รับ  $^{14}\text{C}$  เข้ามาเพิ่ม และ  $^{14}\text{C}$  ที่เหลืออยู่ในซากสิ่งมีชีวิตนั้นจะสลายตัวตามเวลา ทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อคำนวณโดยอาศัยครึ่งชีวิตของการสลายตัวของ  $^{14}\text{C}$  มีค่า 5770 ปี (สุชาติพิศศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล, 2541, หน้า 372) จะสามารถหาเวลาตั้งแต่สิ่งมีชีวิตนั้นตายลงได้

**ตัวอย่างที่ 7.13** กะโหลกศีรษะมนุษย์โบราณวัดค่า  $^{14}\text{C}$  ได้เป็น 0.682 เท่าของ  $^{14}\text{C}$  ที่พบในกะโหลกศีรษะมนุษย์ที่มีชีวิต กะโหลกศีรษะมนุษย์นี้มีอายุกี่ปี เมื่อครึ่งชีวิตของ  $^{14}\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี

วิธีทำ จากสมการ (7.5) จะได้  $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5770} = 1.20 \times 10^{-4} \text{ ปี}^{-1}$

จากสมการ (7.4) จะได้  $\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t$

$$\ln \frac{0.682 {}^1_6\text{C}_0}{{}^1_6\text{C}_0} = -1.20 \times 10^{-4} t$$

จะได้  $t = 3189$  ปี หรือกะโหลกศีรษะมนุษย์โบราณนี้มีอายุ 3189 ปี

**ตัวอย่างที่ 7.14** เก็บเปลือกหอยจากทะเลแห่งหนึ่งมาวัดกัมมันตภาพของ  ${}^{14}_6\text{C}$  ได้ 7 ครั้งของการสลายตัวต่อนาที่ต่อกรัม จงคำนวณหาอายุของเปลือกหอย เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี และกัมมันตภาพรังสีของ  ${}^{14}_6\text{C}$  ของสิ่งมีชีวิตในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่มีค่า 15.3 dpm ต่อกรัม

วิธีทำ จากสมการ (7.5) จะได้  $\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5770} = 1.20 \times 10^{-4} \text{ ปี}^{-1}$

จากสมการ (7.3) จะได้  $\ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t$

$$\ln \frac{7}{15.3} = -1.20 \times 10^{-4} t$$

จะได้  $t = 6516$  ปี หรือเปลือกหอยนี้มีอายุ 6516 ปี

**ตัวอย่างที่ 7.15** ซากเรือโบราณทำด้วยไม้ เมื่อเผาไม้ส่วนหนึ่ง พบว่าได้  $\text{CO}_2$  7.32 กรัม และวัดกัมมันตภาพรังสีใน  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 10.8 dpm จงคำนวณหาอายุของซากเรือโบราณนี้ เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี และกัมมันตภาพรังสีของ  ${}^{14}_6\text{C}$  ของสิ่งมีชีวิตในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่มีค่า 15.3 dpm ต่อกรัม

วิธีทำ จากโจทย์ มวลของคาร์บอนในซากเรือ =  $\frac{7.32 \text{ กรัม } \text{CO}_2}{44 \text{ กรัม } \text{CO}_2 / \text{โมล}} \times 12 \text{ กรัม C / โมล}$

$$= 1.996 \text{ กรัม C}$$

จะได้  $A = \frac{10.8 \text{ dpm}}{1.996 \text{ กรัม C}} = 5.41 \text{ dpm/กรัม C}$

ลิขสิทธิ์ © มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



$$\text{จากสมการ (7.5) จะได้ } \lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5770} = 1.20 \times 10^{-4} \text{ ปี}^{-1}$$

$$\text{ดังนั้น จากสมการ (7.4) จะได้ } \ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t$$

$$\ln \frac{5.41}{15.3} = -1.20 \times 10^{-4} t$$

จะได้  $t = 8663$  ปี หรือซากเรือโบราณนี้มีอายุ 8663 ปี

#### 7.12.4 การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านอาหาร

การฉายรังสีร่วมกับกรรมวิธีในการถนอมอาหารสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดไว้ได้ เช่น การฉายรังสีแกมมาปริมาณต่ำสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และสามารถหยุดยั้งการเจริญเติบโตของพยาธิใบไม้ในเนื้อหมู และฆ่าพยาธิใบไม้ในตับที่มีในปลาดิบ เมื่อให้ปริมาณรังสีสูงขึ้นสามารถฆ่าเชื้อซัลโมเนลลาในแฮม กุ้งแช่แข็ง และในเนื้อไก่ โดยไม่ทำให้คุณลักษณะของอาหารเปลี่ยนแปลง ซึ่งการฉายรังสีดังกล่าวอยู่ภายใต้กฎข้อบังคับขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO) ไม่ให้ฉายรังสีในอาหารในปริมาณมากกว่า 10 กิโลเกรย์ (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2547, หน้า 148)

อาหารฉายรังสีต้องติดฉลากด้วยสัญลักษณ์ดอกไม้อายรังสี (radura) ดังแสดงในภาพที่ 7.10 และมีข้อความแสดงว่าผ่านการฉายรังสีแล้ว พร้อมทั้งระบุวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี ชื่อและสถานที่ตั้งของผู้ผลิตอาหารและผู้ฉายรังสี พร้อมวันเดือนปีที่ทำการฉายรังสี เพื่อให้ผู้บริโภคได้ทราบและมีโอกาสเลือกซื้อ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ภาพที่ 7.10 สัญลักษณ์ดอกไม้อายรังสี



### 7.12.5 การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านการเกษตร

เมล็ดพืชบางชนิดหลังการฉายรังสีแกมมาสามารถควบคุมการงอกและยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้ นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาปริมาณไม่เกิน 1 กิโลเกรย์ สามารถทำลายไข่แมลงบางชนิด และควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงที่อาจติดมากับเมล็ดพืช เช่น ข้าว ถั่วเขียว ถั่วเหลือง เมล็ดกาแฟ อินทผลัม เมล็ดโกโก้ และมะพร้าวแห้ง เป็นการลดสารพิษตกค้าง (จากการรวมด้วยสารเคมี) อย่างได้ผล

การฉายรังสีเพื่อให้แมลงเป็นหมันเป็นการควบคุมและกำจัดแมลง โดยใช้แมลงชนิดเดียวกันควบคุมและจำกัดประชากรด้วยตัวมันเอง ด้วยการฉายรังสีให้แมลงตัวผู้เป็นหมันแล้วปล่อยให้ไปผสมพันธุ์กับแมลงตัวเมียตามธรรมชาติ ทำให้ตัวเมียที่ได้รับการผสมพันธุ์แล้วไม่สามารถให้ลูกหลานต่อไปได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่มีการใช้ยาฆ่าแมลง จึงไม่มีผลกระทบต่อแมลงที่มีประโยชน์ เช่น ผีเสื้อ

นอกจากนี้ยังสามารถใช้การฉายรังสีในการปรับปรุงพันธุ์พืช โดยรังสีจะทำให้พืชเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม ซึ่งหากมีการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นอย่างดี จะทำให้ได้พืชที่รอดตาย แล้วเก็บเกี่ยวเมล็ดหรือส่วนของพืชไว้ปลูกในรุ่นต่อไป ซึ่งจะทำให้ได้พืชที่มีผลผลิตสูง ทนโรคและแมลงศัตรูพืช มีคุณค่าทางโภชนาการหรือมีรสชาติดีขึ้น โดยปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืช คือปริมาณรังสีที่ใช้พืชตายร้อยละ 30-50 เช่น ปริมาณรังสีที่ใช้กับถั่วเขียวควรอยู่ในช่วง 400-750 เกรย์ ถั่วเหลือง 100-200 เกรย์ และข้าวโพด 150-300 เกรย์ (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, 2547, หน้า 162)

การใช้ความรู้ด้านไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุ N, P, K, Mg, และ S ซึ่งเป็นธาตุอาหารจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช มาตรวจสอบและติดตามการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหาร กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช ทำให้ทราบความสัมพันธ์ในการเจริญเติบโตและหน้าที่ของธาตุอาหารนั้น ๆ หลังการดูดซึมน้ำในต้นพืช อีกทั้งยังใช้ศึกษากระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ของพืช ศึกษาการเปลี่ยนแปลงและปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในดิน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน เป็นต้น

### 7.12.6 การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านการแพทย์

ธาตุกัมมันตรังสีบางชนิดมีส่วนช่วยในการตรวจและวินิจฉัยโรค โดยให้ผู้ป่วยรับสารกัมมันตรังสีปริมาณไม่สูงมากนักไว้ในร่างกาย โดยการดื่มหรือฉีด เมื่อเข้าไปอยู่ในร่างกายก็สามารถติดตามได้ว่าธาตุนั้นไปสะสมอยู่ที่ใด การตรวจวัดธาตุกัมมันตรังสีทำงานในร่างกาย จึงต้องเลือกใช้ธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา เพราะสามารถทะลุผ่าน

ร่างกายออกมาได้ จนสามารถใช้กล้องตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อประมวลผลการทำงานของอวัยวะที่ธาตุนั้นไปสะสมได้

ในการรักษาโรคนอกจากจะใช้ยา สารเคมี หรือการผ่าตัดแล้ว บางครั้งอาจใช้รังสีร่วมด้วยเช่นการรักษาโรคมะเร็งด้วยการฉายรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ไปที่เซลล์มะเร็ง ให้เซลล์มะเร็งฝ่อ และธาตุกัมมันตรังสียังสามารถใช้รักษาโรคได้ เช่น ต่อมไทรอยด์เป็นพิษ เนื่องจากผลิตฮอร์โมนมากกว่าปกติ คนไข้จะได้รับ <sup>131</sup>I<sub>53</sub> ซึ่งจะไปสะสมที่ต่อมไทรอยด์ และสลายตัวให้รังสีบีตาไปทำลายเซลล์ของต่อมไทรอยด์ ทำให้ผลิตฮอร์โมนลดลงสู่ระดับปกติ

นอกจากนี้ยังสามารถใช้รังสีในการทำสภาพที่ปลอดภัย สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น เข็มฉีดยา กระบอกฉีดยา ชุดให้เลือด สำลี ภาชนะบรรจุ ยา และเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ และยังสามารถใช้รังสีเพื่อการปลอดภัยในเนื้อเยื่อจากส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เพื่อใช้สำหรับการรักษาบาดแผลและการปลูกถ่ายอวัยวะต่าง ๆ เช่น กระดูก เอ็น เยื่อหุ้มสมอง และผิวหนัง

#### 7.12.7 การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านอุตสาหกรรม

ธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีตลอดเวลา จะให้รังสีแต่ละประเภทที่มีสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกัน เช่น การทำให้เกิดภาพบนแผ่นฟิล์ม รังสีที่ใช้เป็นรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง และมีแผ่นฟิล์มวางอยู่ด้านหลังชิ้นงาน ด้วยเทคนิคนี้สามารถบอกลักษณะรูปร่างและจุดบกพร่องต่าง ๆ ภายในชิ้นงานหรือสิ่งที่ต้องการตรวจสอบได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องแยกชิ้นส่วนหรือทำลายชิ้นงานที่ตรวจสอบ

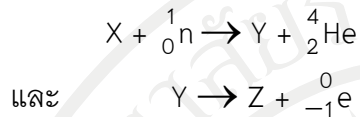
นอกจากนี้รังสีนิวเคลียร์ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นมาตรวัดต่าง ๆ ในงานอุตสาหกรรม เช่น มาตรวัดระดับ วัดความหนา วัดความหนาแน่น และความชื้น ซึ่งเมื่อรังสีตกกระทบวัตถุ บางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนผ่านออกไปได้ และอาจมีบางส่วนกระเจิงกลับ จากหลักการดังกล่าวเมื่อมีการสอบเทียบ (calibrate) ค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัดรังสี (radiation detector) ที่สัมพันธ์กับค่าจริง จะได้เครื่องมือวัดและมาตรวัดที่มีความละเอียดแม่นยำสูง

### 7.13 สรุป

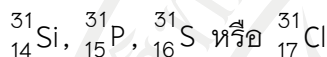
เคมีนิวเคลียร์ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของอะตอมที่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนและนิวตรอน เรียกว่า นิวไคลด์ พลังงานที่ดึงดูดอนุภาคทั้งหมดนี้เอาไว้ในนิวเคลียส เรียกว่า พลังงานยึดเหนี่ยว นิวไคลด์ที่ไม่เสถียรคือมีสัดส่วนระหว่างโปรตอนและนิวตรอนมากหรือน้อยเกินไป จะสามารถปลดปล่อยรังสีนิวเคลียร์ออกมาได้ เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา นิวตรอน และรังสีแกมมา พร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นนิวไคลด์ของธาตุขนาดเล็กที่เสถียรมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งในธรรมชาติมีกลุ่มธาตุกัมมันตรังสีที่มีการลดลงของเลขมวลเป็น 3 กลุ่มอนุกรม ได้แก่ อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และอนุกรมแอกทิเนียม ที่เริ่มต้นด้วยธาตุ  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ,  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ , และ  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ตามลำดับ นิวตรอนซึ่งมักจะเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยายังสามารถวิ่งชนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ทำให้ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง จึงเรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่นิวเคลียสได้ด้วยการหลอมรวมนิวไคลด์กัมมันตรังสีขนาดเล็กเป็นธาตุที่มีนิวเคลียสขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยาฟิวชัน ทั้งปฏิกิริยาฟิชชันและฟิวชันเป็นปฏิกิริยาที่คายพลังงาน โดยจะมีค่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวหลังปฏิกิริยามากกว่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวก่อนปฏิกิริยาเสมอ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ของอนุภาคหรือรังสีที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า พัฒนาการเกษตร อาหาร การแพทย์ และอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามรังสีนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นอาจมีอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะต้องป้องกันตนเองให้สัมผัสรังสีในระยะเวลาสั้นที่สุดและในปริมาณน้อยที่สุด

## แบบฝึกหัดบทที่ 7

1. จากปฏิกิริยานิวเคลียร์



ถ้า Z มีเลขมวลเป็น 2 เท่าของเลขอะตอมของมันเอง แล้ว X คือธาตุใดจากกลุ่มธาตุต่อไปนี้



2. จงคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ  ${}^6_3\text{Li}$  (เป็น MeV ต่ออะตอม) ถ้ามวลจริงที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 6.01512 amu และให้คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน

3. ปฏิกิริยาฟิชชันของธาตุหนึ่ง ให้มวลรวมของธาตุหลังเกิดปฏิกิริยาลดลง 0.025 amu จงคำนวณหาว่า จะต้องเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกี่ครั้งต่อวินาที จึงจะให้ได้กำลังงาน 931 วัตต์ (กำหนดให้  $1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

4. นิวเคลียสของ  ${}^{235}_{92}\text{U}$  เกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะให้พลังงาน 200 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ถ้าต้องการกำลัง 8 จิกะวัตต์ จงหาว่าในแต่ละวินาทีจะต้องเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกี่ครั้ง

5. ปฏิกิริยาฟิวชันในดวงอาทิตย์เป็นการเปลี่ยนมวลไฮโดรเจนให้เป็นพลังงาน ถ้าแต่ละวินาทีดวงอาทิตย์แผ่พลังงานออกมา  $3.9 \times 10^{26}$  จูล มวลของดวงอาทิตย์จะลดลงวินาทีละเท่าใด

6. สารกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีค่าคงที่การสลายตัว 0.077 ต่อปี จะต้องใช้เวลานานเท่าใด จึงจะทำให้สารกัมมันตรังสีชนิดนี้มีมวลลดลงจาก 40 กรัม เหลือเพียง 2.5 กรัม

7. มัมมี่ชาวอียิปต์ที่ขุดค้นพบ เมื่อนำสวมนหนึ่งของร่างกายของมัมมี่ชาวอียิปต์มาเผาจะไดถ่านหนัก 1.3 กรัม เมื่อนำมาวัดรังสีปรากฏว่านับได้ 399 ครั้งในเวลา 40 นาที จงหาว่าชาวอียิปต์คนนี้เสียชีวิตแล้วกี่ปี เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี

8. แบตเตอรี่ที่อยู่ในนาฬิกาสลายตัวให้อนุภาคบีตาจากแหล่งพลังงานปฏิกิริยา  ${}^{147}_{61}\text{Pm}$  ถ้าครึ่งชีวิตของ  ${}^{147}_{61}\text{Pm}$  เท่ากับ 2.62 ปี จงคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อัตราการสลายตัวของแบตเตอรี่ให้อนุภาคบีตาลดลงเหลือร้อยละ 10 ของค่าเริ่มต้น

9. นำคาร์บอนบริสุทธิ์หนัก 100 มิลลิกรัม มาจากถ่านหิน พบว่าอัตราการสลายตัวเป็น 0.25 counts/min จงคำนวณหาอายุของถ่านหิน เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี

10. ในกระดูกไดโนเสาร์พบว่ามีกัมมันตภาพของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 2.8 dpm/g carbon จงคำนวณหาอายุของไดโนเสาร์ เมื่อครึ่งชีวิตของ  ${}^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี

11. จากการวิเคราะห์ผงถ่านที่ขุดพบจากสถานที่หนึ่งพบว่า  $^{14}_6\text{C}$  ที่นับได้โดยไซเคโรอัมป์ไกเกอร์มูลเลอร์ เท่ากับ 8.6 ครั้งต่อกรัมต่อนาที จงคำนวณหาอายุของผงถ่านนี้ กำหนด  $^{14}_6\text{C}$  มีครึ่งชีวิต 5770 ปี และจำนวนครั้งที่นับได้สำหรับไม้ 1 กรัมที่ยังมีชีวิตอยู่เท่ากับ 15.3 dpm
12. จากการวิเคราะห์กระดูกงาช้างที่ประวัติศาสตร์ชั้นหนึ่ง ณ บริเวณทะเลสาบ Dead Sea ในตะวันออกกลางพบ  $^{14}_6\text{C} : ^{12}_6\text{C}$  เพียงร้อยละ 79.5 ของพืชที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นกระดูกงาช้างนี้ควรมีอายุประมาณกี่ปี กำหนดให้ครึ่งชีวิตของ  $^{14}_6\text{C}$  เท่ากับ 5770 ปี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



## เอกสารอ้างอิง

- นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ. (2547). **พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฝ่ายวิศวกรรมนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2556). **หน่วยวัดทางรังสี**.  
[ออนไลน์] จาก : [http://www3.egat.co.th/ned/index.php?option=com\\_content&view=article&id=18&Itemid=121](http://www3.egat.co.th/ned/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=121) [1 ธันวาคม 2556].
- มานัส มงคลสุข. (2556). **ผลกระทบแผ่นดินไหวต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Fukushima Daiichi**.  
[ออนไลน์] จาก : <http://rt-spark.blogspot.com/2011/03/fukushima-daiichi.html>  
[2 ธันวาคม 2556].
- รุ่งทิพย์ อุดมวิเศษสันต์. (2556). **การป้องกันอันตรายจากรังสี**.  
[ออนไลน์] จาก : <http://www.vibhavadi.com/health183.html> [1 ธันวาคม 2556].
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2552). **หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้  
พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค.
- สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (2556). **รังสี ปริมาณและการตรวจวัดรังสี**.  
[ออนไลน์] จาก : <http://www.nst.or.th/article/article493/article493020.html>  
[1 ธันวาคม 2556].
- สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. (2541).  
**เคมีทั่วไป 2**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์.
- สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. (2556). **ประวัติย่อการตรวจหาและการวัดรังสีชนิดกัมมาไอออน**.  
[ออนไลน์] จาก : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-018.html>  
[1 ธันวาคม 2556].
- McGraw-Hill Science & Technology Encyclopedia. (2013). **Scintillation counter**.  
[online] Available : <http://www.answers.com/topic/scintillation-counter>  
[1 December 2013].
- McMurry, J. and Fay, R. C. (2001). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.



MySafetyLabels. (2013). **Caution Sign and Label : Radiation Area Authorized**

**Personal Only.** [online] Available :

<http://www.mysafetylabels.com/safety-signs/radiation-authorized-personnel-sign/saf-sku-s-2936.aspx> [2 December 2013].

Olmsted III, J. and Williams, G. M. (2002). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.

Olson, R. (2013). **Introducing the Nothing Labs Electronic Cloud Chamber.**

[online] Available :

[http://nothinglabs.blogspot.com/2010/12/introducing-nothing-labs-electronic\\_01.html](http://nothinglabs.blogspot.com/2010/12/introducing-nothing-labs-electronic_01.html) [1 December 2013].

Petrucci, R. H., Harwood, W. S., and Herring, F. G. (2002). **General Chemistry**. New Jersey : Prentice Hall.

Sitton, L. (2015). **The Mass Defect of The Nucleus and Nuclear Binding Energy.**

[online] Available : <http://staff.orecity.k12.or.us/les.sitton/Nuclear/313.htm> [19 July 2015].

Sunflowercosmos, Non-profit organization. (2556). **อันตรายจากกัมมันตภาพรังสี.**

[ออนไลน์] จาก :

[http://www.sunflowercosmos.org/about/about\\_home/about\\_sun.html](http://www.sunflowercosmos.org/about/about_home/about_sun.html)

[1 ธันวาคม 2556].

World Nuclear Association. (2013). **Nuclear Radiation and Health Effect.**

[online] Available :

[http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/radioactive\\_decay\\_series.png](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/radioactive_decay_series.png) [30 November 2013].

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 8

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 8 เคมีสิ่งแวดล้อม

8.1 ความหมายของสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

8.2 เคมีของบรรยากาศ

8.2.1 มลพิษทางอากาศ

8.2.2 ปฏิกิริยาการเกิดที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ

8.2.3 การควบคุมมลพิษทางอากาศ

8.3 เคมีของน้ำ

8.3.1 การทำน้ำประปา

8.3.2 มลพิษทางน้ำ

8.3.3 การควบคุมมลพิษทางน้ำ

8.4 เคมีของดิน

8.4.1 มลพิษทางดิน

8.5 สรุป

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. บอกและอธิบายเกี่ยวกับเคมีของบรรยากาศ เคมีของน้ำและเคมีของดินได้
2. บอกและอธิบายเกี่ยวกับสาเหตุของการเกิดมลพิษและการแก้ไขปัญหาได้
3. ชี้แจงและสรุปความสำคัญของการแก้ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมได้

### กิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 8 เรื่องเคมีสิ่งแวดล้อมมาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย และสรุปเนื้อหา
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 8 เรื่องเคมีสิ่งแวดล้อม
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 8

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลทดสอบของนักศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทที่ 8

### เคมีสิ่งแวดล้อม

เคมีสิ่งแวดล้อม (environmental chemistry) คือ การศึกษาปรากฏการณ์ทางเคมีในสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับว่าในปัจจุบันนี้สภาพแวดล้อมได้เสื่อมโทรมลงไปมาก อันเนื่องมาจากอากาศ น้ำ ดิน พืชผัก และสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีสิ่งปฏิกูล และมีสารเคมีที่เป็นพิษปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก การเสื่อมโทรมของสภาวะแวดล้อมนี้มีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยไม่คำนึงถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จนเป็นเหตุให้สิ่งแวดล้อมเกิดภาวะมลพิษ ซึ่งเคมีสิ่งแวดล้อมจะศึกษาแหล่งกำเนิดของสารมลพิษ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม และวิถีทางของสารเคมีรูปต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ น้ำ ดิน และสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเคมีสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสหวิทยาการซึ่งต้องอาศัยการบูรณาการของศาสตร์ต่าง ๆ ทั้งเคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์ เกษตร และสาธารณสุขศาสตร์เข้าด้วยกัน

การศึกษาเคมีสิ่งแวดล้อมจะช่วยให้เข้าใจถึงแหล่งกำเนิดของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม การกระจายไปสู่แหล่งอื่น ๆ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น รวมถึงผลของสภาวะมลพิษที่มีต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต เพื่อให้เห็นแนวทางในการควบคุมและแก้ปัญหามลภาวะ เพื่อให้นักศึกษาได้ตระหนักและเห็นความสำคัญของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ เคมีของอากาศ น้ำ และดิน รวมถึงมลพิษที่เกิดขึ้น สาเหตุของมลพิษ และการจัดการมลพิษ ดังนี้

#### 8.1 ความหมายของสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

สิ่งแวดล้อม (environment) หมายถึง ทุกสิ่งทุกอย่างที่อยู่รอบตัวมนุษย์ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต จากการดำรงชีวิตของมนุษย์ซึ่งจะเปลี่ยนทรัพยากรธรรมชาติไปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ประโยชน์ เช่น อาหาร ที่อยู่อาศัย เครื่องนุ่งห่ม ยารักษาโรค และยานพาหนะ ทำให้มีการปล่อยกากของเสียทั้งในรูปสสาร และพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากสิ่งมีชีวิตทั้งหลายอยู่ร่วมกันโดยพึ่งพาอาศัยกัน ของเสียจากมนุษย์จึงอาจเป็นสิ่งที่มิใช่ประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เช่น สิ่งปฏิกูลในชีวิตประจำวันของมนุษย์จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลายเป็นปุ๋ยซึ่งเป็นที่มิใช่ประโยชน์ต่อพืช เป็นต้น

ระบบนิเวศ คือ การที่สิ่งมีชีวิตทั้งหลายดำรงชีวิตอยู่ร่วมกันอย่างเป็นระบบ โดยมีแรงผลักดันตามธรรมชาติที่คอยปรับให้ระบบนิเวศเข้าสู่สภาวะสมดุลเสมอ (พิมล เรือนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวนิช, 2539, หน้า 4) แต่ในปัจจุบันมีการปล่อยของเสียในอัตราที่ไม่สมดุลกับการย่อยสลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยของเสียในรูปแบบที่ไม่ย่อยสลายได้ง่าย ๆ ในธรรมชาติ เช่น พลาสติก โฟม สารฟลูออโรคาร์บอน และสารไฮโดรคาร์บอน อีกทั้งยังมีการปล่อยสารพิษที่มากเกินไปเกินความสามารถของจุลินทรีย์หรือธรรมชาติที่จะย่อยสลายได้หมด ทำให้เกิดปัญหาการตกค้างของของเสียและสารพิษ จึงเป็นที่มาของมลพิษหรือมลภาวะ (pollution) เช่น อากาศเป็นพิษ ฝนกรด ขยะสะสม ดินเสีย เป็นต้น

นอกจากการปล่อยของเสียในอัตราที่ไม่สมดุลแล้ว การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมากเกินไป เช่น การบุกรุกทำลายป่า ความต้องการใช้น้ำ อากาศ แร่ธาตุ และพลังงาน ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดมลพิษ สาเหตุมาจากการเพิ่มจำนวนของประชากรอย่างรวดเร็ว การขยายตัวเมืองอย่างรวดเร็ว และการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ในการผลิตด้านการเกษตร (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542, หน้า 117) เช่น การใช้ปุ๋ย และยาฆ่าแมลง จนเกินพอดี ทำให้ดินเสื่อมคุณภาพและมีสารพิษเจือปน และสารพิษอาจแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดน้ำเสีย และอาจมีสารพิษตกค้างอยู่ในผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

มนุษย์เป็นต้นเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรม ผลกระทบจะกลับคืนมาสู่มนุษย์ เพราะมนุษย์เป็นส่วนหนึ่งของสิ่งแวดล้อม ผลร้ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางดิน มลพิษทางเสียง เหล่านี้เรียกว่า สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสุขภาพทางร่างกาย จิตใจ และสังคมของมนุษย์ ให้เกิดการเจ็บป่วย อีต้อด หงุดหงิด สิ้นหวัง และเกิดความวิตกกังวล ไม่มีความปลอดภัย และไม่มีความสุขในการดำเนินชีวิต

บรรยากาศ น้ำ และดินเป็นสิ่งที่มนุษย์จะต้องอยู่ร่วมด้วยไปตลอดชีวิต การเข้าใจและเรียนรู้ธรรมชาติรวมถึงมลพิษของสิ่งเหล่านี้ จึงเป็นเรื่องจำเป็น เพื่อจะได้ไม่สร้างภาวะมลพิษและกำจัดมลพิษที่เป็นอยู่ในปัจจุบันให้ลดน้อยลง

## 8.2 เคมีของบรรยากาศ

บรรยากาศ (atmosphere) คือ ชั้นของแก๊สต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลกเอาไว้ด้วยแรงโน้มถ่วง มีความสูงประมาณ 2,000 กิโลเมตร จากผิวโลก (นัทธิรา สรรมณี, 2541, หน้า 4) มีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง เช่น เป็นแหล่งแก๊สออกซิเจนที่สิ่งมีชีวิตใช้หายใจ เป็นแหล่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการสังเคราะห์แสงของพืช แบคทีเรียบางชนิดตรึงไนโตรเจนจากอากาศให้

พืชใช้เป็นสารอาหาร ไอน้ำจากมหาสมุทรควบแน่นในบรรยากาศเป็นฝนตกกลับคืนสู่โลก นอกจากนี้บรรยากาศยังทำหน้าที่ปกป้องอันตรายจากรังสีและวัตถุต่าง ๆ จากนอกโลก และยังช่วยรักษาอุณหภูมิของโลกให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต

บรรยากาศประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงตารางที่ 8.1 (พิมล เรียนวัฒนาและชัยวัฒน์ เจนวานิช, 2539, หน้า 15) โดยพิจารณาจากปริมาณร้อยละ โดยปริมาตรในสภาวะอากาศแห้งและไร้ภาวะมลพิษเฉียบปน ดังนี้

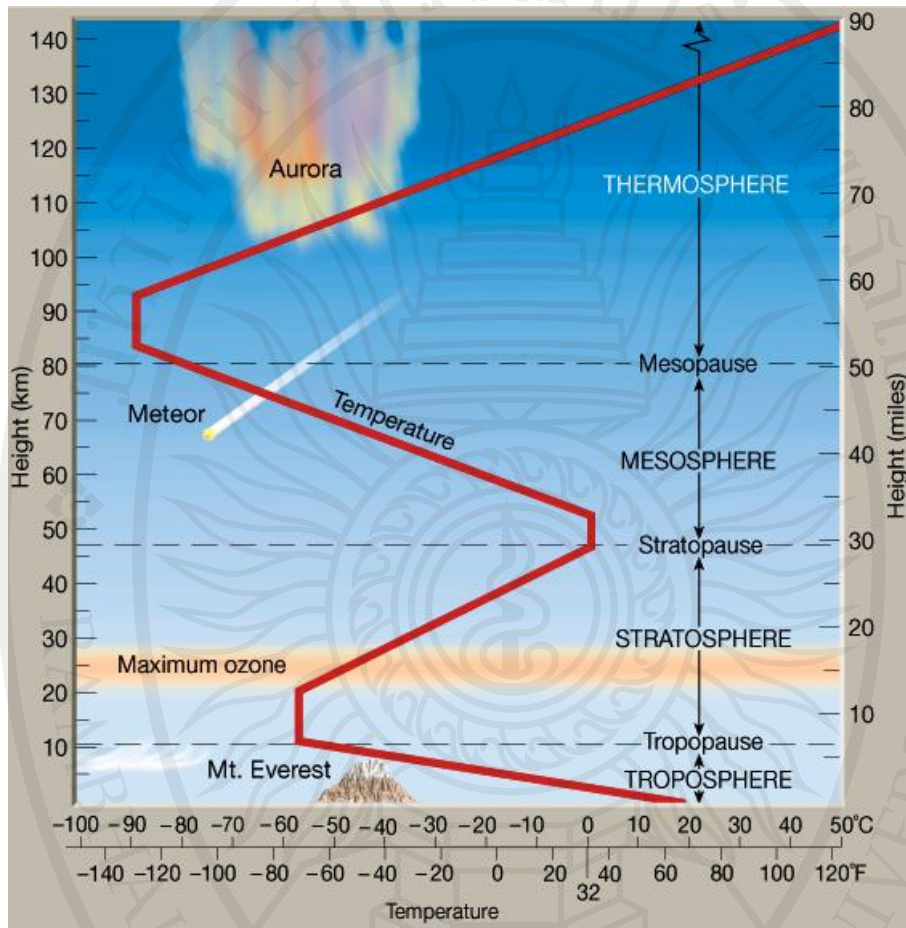
ตารางที่ 8.1 องค์ประกอบของบรรยากาศ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	78.09
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	20.94
อาร์กอน (Ar)	0.93
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	0.0318
นีออน (Ne)	1.8×10 <sup>-3</sup>
ฮีเลียม (He)	5.2×10 <sup>-4</sup>
คริปทอน (Kr)	1×10 <sup>-4</sup>
ซีนอน (Xe)	8×10 <sup>-6</sup>
ไนตรัสออกไซด์ (N <sub>2</sub> O)	2.5×10 <sup>-5</sup>
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	5×10 <sup>-5</sup>
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	1.5×10 <sup>-4</sup>
ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	1×10 <sup>-7</sup>
โอโซน (O <sub>3</sub> )	2×10 <sup>-7</sup>
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> )	2×10 <sup>-8</sup>
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1×10 <sup>-5</sup>
แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	1×10 <sup>-6</sup>

อุณหภูมิของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกมีการเปลี่ยนแปลงตามความสูง (ในทิศตั้งฉากกับผิวโลกขึ้นไป) จึงสามารถนำไปใช้แบ่งชั้นของบรรยากาศได้ดังแสดงในภาพที่ 8.1 บรรยากาศชั้น



แรกคือ โทรโปสเฟียร์ (troposphere) ชั้นถัดไปคือ สตราโตสเฟียร์ (stratosphere) มีโซสเฟียร์ (mesosphere) และ เทอร์โมสเฟียร์ (thermosphere) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละชั้นบรรยากาศมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 8.1 การแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกตามแนวตั้ง (ที่มา : Stimac, 2013)

**ชั้นโทรโปสเฟียร์** บรรยากาศชั้นนี้เป็นชั้นที่อยู่ติดกับผิวโลก มีความสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 10 กิโลเมตรจากผิวโลก ลักษณะของบรรยากาศชั้นนี้จะมีมวลอากาศอยู่หนาแน่นมากที่สุดถึง 70% ของทั้งหมด มีการคลุกเคล้าของกระแสอากาศทั้งในแนวตั้งและแนวนอนตลอดเวลา ทำให้บรรยากาศชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงของลมฟ้าอากาศ อุณหภูมิของอากาศในชั้นนี้จะลดลงตามความสูง โดยทุก ๆ ความสูง 1 กิโลเมตรจะมีอุณหภูมิลดลงประมาณ 6.5 องศาเซลเซียส (นัทธีรา สรรมณี, 2541, หน้า 8) สาเหตุที่อุณหภูมิลดลงตามความสูงเนื่องจาก

อากาศและละอองน้ำที่มีอยู่มากบริเวณผิวโลกดูดกลืนคลื่นแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ จากดวงอาทิตย์ ทำให้บริเวณผิวโลกอบอุ่น และอุณหภูมิจะค่อย ๆ เย็นลงเมื่อสูงขึ้นไป เพราะอากาศและละอองน้ำเบาบางลงตามลำดับ (พิมล เรียนวัฒนาและชัยวัฒน์ เจนวานิช, 2539, หน้า 13)

บริเวณรอยต่อระหว่างบนสุดของชั้นโทรโปสเฟียร์และล่างสุดก่อนถึงชั้นสตราโตสเฟียร์ อุณหภูมิจะคงที่ (isothermal) เรียกบริเวณจุดแบ่งนี้ว่า โทรโปพอส (tropopause) ซึ่งสามารถพบได้อีกในบริเวณรอยต่อของชั้นสตราโตสเฟียร์และมีโซสเฟียร์ และบริเวณรอยต่อของชั้นมีโซสเฟียร์และเทอร์โมสเฟียร์ ซึ่งเรียกว่า สตราโตพอส (stratopause) และมีโซพอส (mesopause) ตามลำดับ

**ชั้นสตราโตสเฟียร์** เป็นชั้นที่อยู่ถัดไปจากชั้นโทรโปสเฟียร์ อุณหภูมิของชั้นนี้จะกลับมามีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 0 เคลวิน ทั้งนี้เพราะบรรยากาศชั้นนี้มีโอโซนอยู่ ซึ่งปริมาณโอโซนมีมากที่สุดในช่วงความสูง 20-30 กิโลเมตร (ดูภาพที่ 8.1) ซึ่งจะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และอินฟราเรด (IR) ดังนั้นโอโซนในชั้นนี้จึงทำหน้าที่กรองแสง UV และมีเพียงแสง UV ส่วนน้อยที่สามารถผ่านเข้าสู่ชั้นโทรโปสเฟียร์ได้ จึงเป็นการป้องกันสิ่งมีชีวิตไม่ได้รับแสง UV มากเกินไป

**ชั้นมีโซสเฟียร์** อุณหภูมิในชั้นนี้จะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เพราะในชั้นนี้มีโอโซนน้อยมาก ในขณะที่เดียวกันจะเริ่มพบไอออนของแก๊สชนิดต่าง ๆ เช่น  $O^+$  และ  $NO^+$  เป็นต้น

**ชั้นเทอร์โมสเฟียร์** หรือเรียกว่าไอออโนสเฟียร์ (ionosphere) เป็นชั้นบรรยากาศนอกสุด อุณหภูมิของชั้นนี้จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นอีก ที่ระดับความสูง 200 กิโลเมตรจากผิวโลกจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส และเมื่อสูงขึ้นไปอีกจนถึง 700-800 กิโลเมตรจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยในชั้นนี้สามารถดูดกลืนรังสี UV จากดวงอาทิตย์ได้ และถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นไอออนบวก เช่น  $O^+$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$  กับอิเล็กตรอน (นัทธิรา สรรมณี, 2541, หน้า 9) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ได้อย่างอิสระทั่วทั้งชั้น ไอออนเหล่านี้สามารถเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะในย่านความถี่วิทยุ AM ดังนั้นบรรยากาศชั้นนี้จึงมีประโยชน์ในด้านการติดต่อสื่อสารระหว่างดาวเทียมและสถานีภาคพื้นดินและการกระจายสัญญาณวิทยุ AM นอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีประจุเหล่านี้พบกับสนามแม่เหล็กโลกที่มีความเข้มสูงที่ขั้วโลกเหนือและใต้เป็นเหตุให้เกิดแสงสว่างหลากสีกระเพื่อมไหวบนท้องฟ้า และแสงดังกล่าวถูกเรียกว่าแสงเหนือ (aurora borealis) และแสงใต้ (aurora australis) ตามลำดับ (สมพงษ์ เลียงโรคาพาธ, 2556)

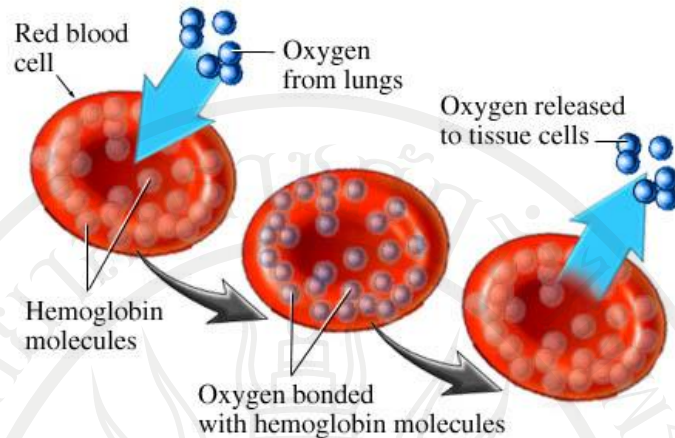
### 8.2.1 มลพิษทางอากาศ

ชั้นโทรโปสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศล่างสุดที่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตบนผิวโลกได้อาศัยและใช้ประโยชน์ สารพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมการผลิตของมนุษย์จึงสะสมและคงอยู่ในบรรยากาศชั้นนี้มากที่สุด สารพิษที่ทำให้อากาศสกปรก (จักรพันธ์ุ ปัญจะสุวรรณ, 2542, หน้า 127) ได้แก่

**8.2.1.1 คว้น** เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ไม้ หญาแห้ง บุหรี่ และยาสูบ เป็นต้น โดยมักจะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ คว้นจึงประกอบด้วยฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น ถ่าน ชี้อ้ำมัน ซึ่งลอยฟุ้งกระจายได้ในบรรยากาศ และแก๊สพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น

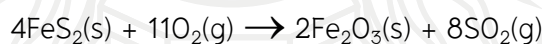
**8.2.1.2 ฝุ่นละอองจากโรงงาน** ฝุ่นละอองที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ส่วนใหญ่เกิดจากฝุ่นละอองของหิน เช่น โรงโม่หิน โรงงานปูนซีเมนต์ และฝุ่นละอองจากโลหะต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี

**8.2.1.3 แก๊สพิษ** คือ แก๊สที่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีหลายชนิดดังนี้  
(1) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดจากการเผาไหม้สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนน้อย ๆ แก๊สชนิดนี้ไม่มีพิษต่อพืช แต่มีพิษต่อมนุษย์และสัตว์อย่างรุนแรง เพราะสารฮีโมโกลบิน ซึ่งก็คือโปรตีนสำคัญที่อยู่ในเม็ดเลือดแดง ทำหน้าที่นำออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ (ดังแสดงในภาพที่ 8.2) สามารถจับกับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เร็วกว่าออกซิเจนถึง 250 เท่า (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 777) โดยในเม็ดเลือดแดงจะเกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งจะไปขัดขวางการลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย เพราะเม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับออกซิเจนไว้ได้ตามปกติ ทำให้เกิดอาการเวียนศีรษะ หายใจขัด คลื่นไส้ อาเจียน และอาจเสียชีวิตได้หากได้รับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมาก



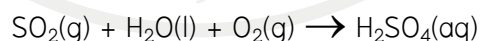
ภาพที่ 8.2 การทำงานของฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง  
(ที่มา : Gregory Thompson, 2013)

(2) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_x$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของกำมะถัน ได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) โดยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกพบได้มากกว่า ซึ่งแก๊สนี้ไม่มีสี แต่มีกลิ่นกรด เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน และน้ำมันดีเซล ในกรณีของถ่านหิน กำมะถันจะอยู่ในรูปสารประกอบไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) เมื่อถูกเผาในสภาวะมีอากาศจะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนี้

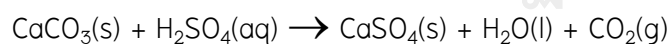


นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี มักจะใช้กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ในการสกัดแร่ (leaching) พร้อม ๆ กับให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 70 องศาเซลเซียส (วรรณภา กาญจนมยุร, 2545, หน้า 94) ทำให้มีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระเหยออกมาพร้อมกับไอน้ำ และแพร่กระจายออกสู่บรรยากาศได้

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สัมผัสกับความชื้น (หรือน้ำฝน) และอากาศจะรวมตัวกันกลายเป็นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ได้ดังสมการ

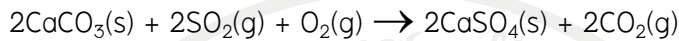


กรดซัลฟูริกที่ตกลงมาพร้อมกับน้ำฝนจะมีฤทธิ์กัดกร่อน เรียกว่าฝนกรด (acid rain) โดยเฉพาะกับอาคารบ้านเรือนที่สร้างมาจากหินอ่อนหรือหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) จะเกิดปฏิกิริยากับฝนกรด ดังนี้



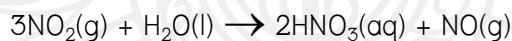


นอกจากนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมคาร์บอเนตได้โดยตรง (นภดล ไชยคำ, 2543, หน้า 135) ดังนี้

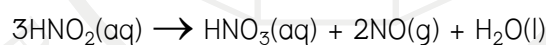


ผลของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อร่างกายมนุษย์ คือจะทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยเรื้อรัง โลหิตจาง เกิดอาการแสบจมูกและคอ เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ ถ้าได้รับปริมาณมาก ๆ จะทำให้ปอดอักเสบ หลอดลมตีบตัน เช่น ชาวบ้านที่อยู่ใกล้เหมืองถ่านหินลิกไนต์ ที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ได้รับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทุกวันเป็นเวลานาน จนมีอาการป่วยด้วยโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง นอกจากนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังมีผลต่อพืชโดยจะพอกจางสีของใบไม้ จนพืชสังเคราะห์แสงไม่ได้ และตายในที่สุด อีกทั้งยังทำให้อาคารบ้านเรือนผุกร่อนเสียหาย และทำให้โบราณสถาน สถาปัตยกรรมและประติมากรรมสลักหิน ผุกร่อนและเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ

(3) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ ( $\text{NO}$ ) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นแก๊สสีน้ำตาลแกมเหลืองหรือแดง เมื่อรวมตัวกับกับความชื้นในอากาศหรือน้ำฝนจะกลายเป็นกรดไนตริกกับแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ ได้ดังสมการ



นอกจากนี้กรดไนตริก ( $\text{HNO}_2$ ) ยังสามารถเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กับกรดไนตริก และสลายตัวต่อไปจนได้แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542, หน้า 129) ดังสมการ



กรดไนตริกและกรดไนตริกเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฝนกรด เมื่อร่างกายมนุษย์ได้รับแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เข้าไปจะเกิดอาการแสบจมูก แสบคอ อันเนื่องมาจากเกิดกรดไนตริกและกรดไนตริกภายในระบบทางเดินหายใจ ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายเยื่อจมูก หลอดลมและปอด

(4) แก๊สไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) บิวเทน ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) โพรเพน ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds; VOCs) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ตัวทำละลายอินทรีย์ และสารระเหยจากยางมะตอย สารเหล่านี้มาจากการระเหยสู่บรรยากาศโดยตรง และอาจจะมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบไม่สมบูรณ์ ทำให้มีสารไฮโดรคาร์บอนหลงเหลือออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนเฮไลด์ เช่น สารในกลุ่ม

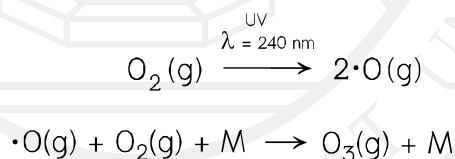
คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluoro carbon; CFC) ซึ่งเป็นสารระเหยง่าย นิยมใช้เป็นสารทำความเย็นในตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ สารชนิดนี้เมื่อรั่วไหลออกสู่บรรยากาศจะทำลายโอโซน ( $O_3$ ) ซึ่งมีมากในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน (global warming) และปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) สารไฮโดรคาร์บอนทุกชนิดมีพิษต่อร่างกาย โดยทำให้ระบบทางเดินหายใจอักเสบ มีอาการแสบจมูก แสบคอ เป็นอันตรายต่อเยื่อหุ้มตา และเป็นสารก่อมะเร็ง

## 8.2.2 ปรากฏการณ์ที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ

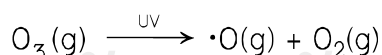
สารพิษต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา นอกจากจะทำให้ชั้นบรรยากาศสกปรก จนเกิดพิษภัยและมีผลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์แล้ว ยังทำให้เกิดปรากฏการณ์ในธรรมชาติทางด้านลบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ได้อีก ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่

### 8.2.2.1 การสูญเสียโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์

โอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ช่วยป้องกันรังสี UV จากดวงอาทิตย์ไม่ให้ส่องลงมายังผิวโลกมากนัก โอโซนในชั้นนี้เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน โดยรังสีจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร (นภดล ไชยคำ, 2543, หน้า 122) ได้ออกซิเจนเรดิคัล (oxygen radical;  $\cdot O$ ) ซึ่งเป็นสารที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก จึงทำปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลออกซิเจน โดยมีโมเลกุลที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (M) เช่น แก๊สไนโตรเจนทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานที่คายออก เพื่อไม่ให้โอโซนแตกตัวกลับไปเป็นเรดิคัลอีก พลังงานส่วนที่ M ไม่ได้ดูดกลืนจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน และในขณะเดียวกัน M ก็จะคายความร้อนส่วนที่รับมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



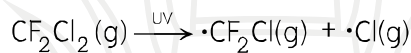
เมื่อโอโซนดูดกลืนรังสี UV (ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 200 ถึง 300 นาโนเมตร) แล้วกลายเป็น  $O\cdot$  กับ  $O_2$  ได้อีก ดังสมการ



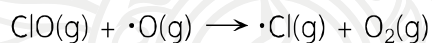
การเกิดขึ้นและการสลายตัวของโอโซนตามธรรมชาติเกิดขึ้นอย่างสมดุล โดยรักษาระดับความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ให้คงที่ได้ แต่ใน



ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา มนุษย์เพิ่งจะได้ตระหนักจากข้อมูลที่ทราบว่าการคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เช่น  $\text{CFCl}_3$  (ฟร็อน 11),  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (ฟร็อน 12),  $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$  (ฟร็อน 113), และ  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$  (ฟร็อน 114) ที่นิยมใช้เป็นสารทำความเย็นในขณะนั้นสามารถทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศได้ ด้วยคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาของสาร CFC เมื่อลอยสู่ชั้นบรรยากาศจะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารใด ๆ จนเมื่อลอยสู่ชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งมีแก๊สโอโซนอยู่เป็นจำนวนมาก และได้รับรังสี UV ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 175 ถึง 220 นาโนเมตร จะสลายตัวเป็นเรดิคัลดังสมการ



คลอรีนเรดิคัล (chlorine radical;  $\cdot\text{Cl}$ ) เป็นสารที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา จึงเกิดปฏิกิริยาต่อกับโอโซนดังสมการ



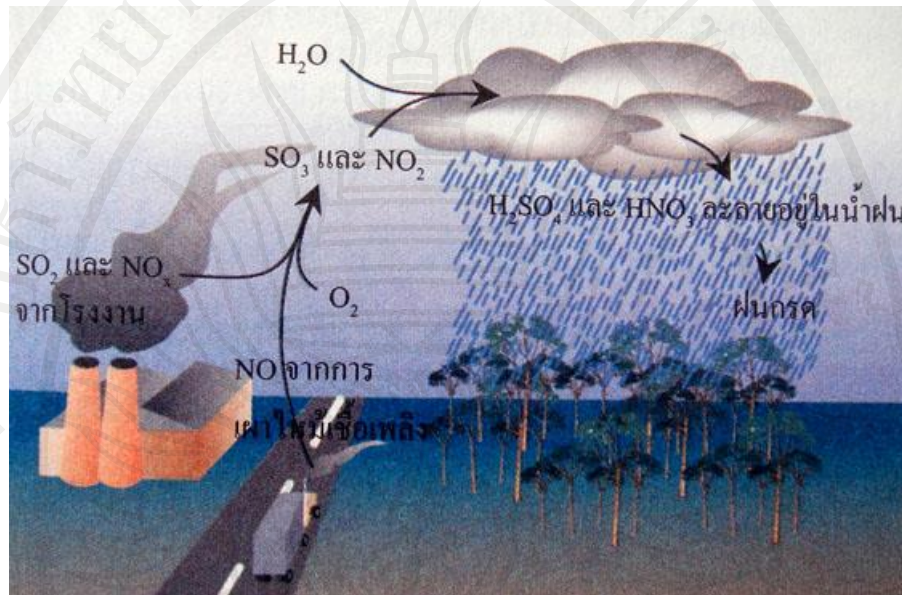
เมื่อรวมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน คือ  $\text{O}_3(\text{g}) + \cdot\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{O}_2(\text{g})$  โดยมี  $\cdot\text{Cl}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะได้ตัวเร่งกลับคืนมาในลักษณะเดิมและปริมาณเท่าเดิม (จตุพร วิทยาคุณและนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547, หน้า 1) ดังนั้น  $\cdot\text{Cl}$  จึงทำลายโอโซนได้อย่างต่อเนื่อง และกว่าที่  $\cdot\text{Cl}$  จะทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารอื่น พบว่าแต่ละอนุภาคของ  $\cdot\text{Cl}$  สามารถทำลายโอโซนไปได้มากถึง 100,000 โมเลกุล (นภดล ไชยคำ, 2543, หน้า 124)

การที่ชั้นโอโซนถูกทำลายจะส่งผลให้รังสี UV ผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่ผิวโลกมากขึ้น มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ จะได้รับรังสี UV เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง เกิดความร้อนสะสมที่ผิวโลก และหากสิ่งมีชีวิตชนิดใดปรับตัวไม่ได้ก็จะสูญพันธุ์ไปในที่สุด

ปัจจุบันนักเคมีได้พยายามสังเคราะห์สารเพื่อนำมาใช้แทนสารในกลุ่ม CFC เช่น สาร  $\text{CF}_3\text{CHCl}_2$  หรือเรียกว่า HCFC-123 ซึ่งพบว่าสารมีไฮโดรเจนในโครงสร้างจะทำให้สารประกอบนี้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศชั้นล่างได้ง่ายขึ้น จึงแพร่ไปไม่ถึงชั้นสตราโตสเฟียร์

### 8.2.2.2 ฝนกรด

ฝนกรดเป็นผลมาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซทั้งสองชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำและสารเคมีอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ ก่อให้เกิดกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ดังแสดงในภาพที่ 8.3



ภาพที่ 8.3 การเกิดฝนกรด

(ที่มา : พวงเพชร เสี่ยมแหลม, 2556)

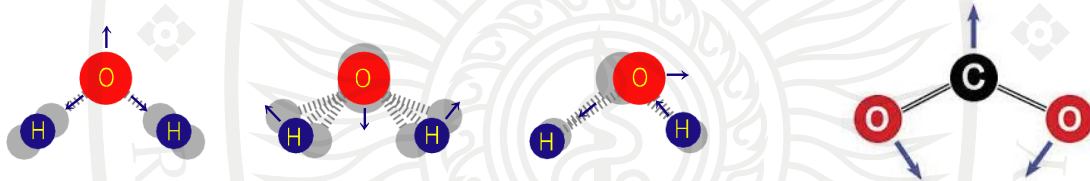
ฝนกรดจะละลายปุ๋ยในดิน ทำให้พืชเติบโตช้า เมื่อไหลลงแหล่งน้ำ ก็จะทำให้แหล่งน้ำนั้น ๆ ไม่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต หรือแม้แต่ในชุมชนเมือง ฝนกรดจะกัดกร่อนสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ หรืออาจจะจับตัวรวมกับหมอกก่อให้เกิดหมอกควันพิษ (smog) ที่ทำอันตรายกับระบบทางเดินหายใจได้

### 8.2.2.3 ปรากฏการณ์เรือนกระจก

ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) คือ ปรากฏการณ์ที่โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สบางชนิดดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (infrared; IR) หรือรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ เมื่อโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้มีพลังงานสูงขึ้น จะมีการถ่ายเท

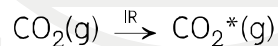
พลังงานซึ่งกันและกัน ทำให้โมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศโดยรวมเกิดการสั่นและการเคลื่อนไหว จนในที่สุดทำให้อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศสูงขึ้น

โมเลกุลที่สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้จะต้องมีการสั่นในลักษณะที่ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) เกิดการเปลี่ยนแปลง (โมเมนต์ขั้วคู่คือประจุคูณกับระยะทาง) โมเลกุลของแก๊สอะตอมคู่ที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน เช่น  $N_2$  และ  $O_2$  การสั่นจะไม่ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่เปลี่ยนแปลง เพราะไม่ว่าอะตอมทั้งสองจะอยู่ไกลหรือใกล้ โมเลกุลก็ยังคงมีโมเมนต์ขั้วคู่เป็นศูนย์ โมเลกุลของ  $N_2$  และ  $O_2$  จึงไม่สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ ส่วนโมเลกุลอะตอมคู่ที่ประกอบด้วยอะตอมต่างชนิดกัน เช่น  $CO$  และ  $NO$  สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ เพราะโมเมนต์ขั้วคู่เปลี่ยนแปลงได้ตามความยาวพันธะ (นภดล ไชยคำ, 2543, หน้า 129-130) โมเลกุลที่ประกอบด้วยหลายอะตอม เช่น  $H_2O$  และ  $CO_2$  จะมีการสั่นที่ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 8.4



ภาพที่ 8.4 การสั่นของโมเลกุล  $H_2O$  และ  $CO_2$  ที่ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่เกิดการเปลี่ยนแปลง

โมเลกุลของ  $H_2O$  และ  $CO_2$  ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด จะมีพลังงานสูงขึ้น (โมเลกุลอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น) ใช้สัญลักษณ์ \* ดังนี้



โมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้จะถ่ายเทพลังงานโดยการชนกับโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น หรือคายรังสีความร้อนออกมา ซึ่งก็คือสาเหตุหลักของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

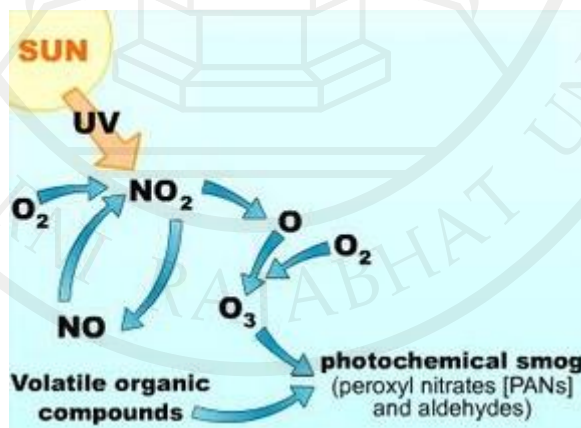
จากอดีตถึงปัจจุบันปริมาณไอน้ำในอากาศไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ปริมาณของ  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ , CFC, และไฮโดรคาร์บอนระเหยง่ายอื่น ๆ ซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ กลับมีปริมาณสูงขึ้นมาก อันเนื่องมาจากกิจกรรมการดำเนินชีวิตของมนุษย์ วิธีการแก้ปัญหาที่ตรงจุดที่สุดคือลดการปลดปล่อยแก๊สเหล่านี้ เช่น เพิ่มประสิทธิภาพการ

ทำงานของเครื่องยนต์พร้อมกับการหาแหล่งพลังงานอื่นที่ไม่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ลดการใช้สาร CFC ลดการรั่วไหลของแก๊สธรรมชาติ และลดการตัดไม้ทำลายป่า เป็นต้น

#### 8.2.2.4 หมอกควันเคมี

หมอกควัน (smog) เป็นลักษณะของมลพิษทางอากาศชนิดหนึ่ง โดยคำว่า หมอก มาจากคำว่า สโมก (smoke แปลว่า ควัน) กับ ฟ็อก (fog แปลว่า หมอก) ในอดีตหมอกควันเกิดขึ้นมาจากการผสมระหว่างควันไฟกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหิน ส่วนหมอกควันในปัจจุบันมักจะมาจากควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และควันจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำปฏิกิริยากับแสงแดด จึงเรียกว่า หมอกควันแบบโฟโตเคมี (photochemical smog) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า หมอกควันเคมี

หมอกควันเคมีเกิดจากปฏิกิริยาในชั้นบรรยากาศ โดยรังสี UV จากดวงอาทิตย์ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไนโตรเจนออกไซด์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ซึ่งโมเลกุลแก๊สออกซิเจนจะออกซิไดส์สารต่าง ๆ ในอากาศไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถออกซิไดส์ต่อไปได้อีก จนได้สารประกอบในกลุ่มเปอร์ออกซิอะซิไทล ไนเตรต (peroxyacetyl nitrates; PANs) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และคีโตน (ketone) (มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย, 2554, หน้า 86) ซึ่งก็คือ หมอกควันเคมี ดังแสดงในภาพที่ 8.5 ผลที่เกิดจากหมอกควันเคมีเหล่านี้จะทำให้ระคายเคืองตา ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง เนื่องจากการกระเจิงแสงของอนุภาคต่าง ๆ



ภาพที่ 8.5 การเกิดหมอกควันเคมี  
(ที่มา : Goyal, 2013)

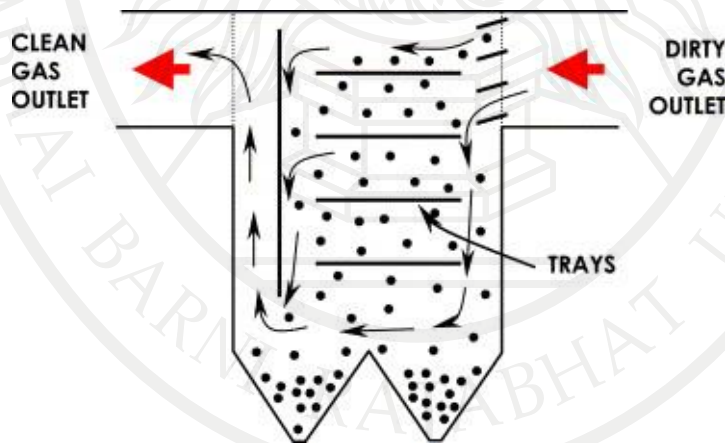


### 8.2.3 การควบคุมมลพิษทางอากาศ

กระบวนการทางอุตสาหกรรมหรือแหล่งกำเนิดที่มีการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ ได้แก่ คว้น ผุ่นละออง และแก๊สพิษ มีวิธีการควบคุม บำบัด และกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ดังนี้

#### 8.2.3.1 การควบคุมคว้นและผุ่นละออง

การกำจัดคว้นและผุ่นละอองอาศัยการแยกผุ่นละอองออกจากแก๊สของเสียที่ปล่อยออกมา ทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ในการเลือกใช้วิธีการรวมถึงอุปกรณ์ดักผุ่นขึ้นกับขนาดอนุภาค และประสิทธิภาพที่ต้องการ เทคโนโลยีที่ง่ายที่สุดในการดักจับผุ่นคืออาศัยการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ห้องดักผุ่นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity settling chamber) ซึ่งจะให้อากาศผุ่นผ่านเข้าไปในห้องดักผุ่น ดังแสดงในภาพที่ 8.6 การออกแบบห้องดักผุ่นจะทำให้ความเร็วของอากาศลดลงจนอนุภาคขนาดใหญ่ตกตะกอน และไม่ฟุ้งกระจายขึ้นมาอีก การดักจับผุ่นด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (ประมาณ 50%) มักจะใช้ก่อนผ่านอากาศเข้าเครื่องเก็บผุ่นชนิดอื่น และใช้ได้ดีกับผุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 50 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) แต่ไม่นิยมใช้กำจัดอนุภาคที่ละเอียดมาก เพราะต้องใช้เวลาดักตะกอนนานขึ้น (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 783-784)

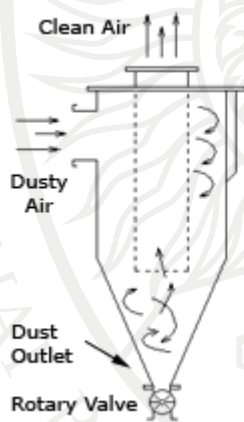


ภาพที่ 8.6 ห้องดักผุ่นด้วยแรงโน้มถ่วง

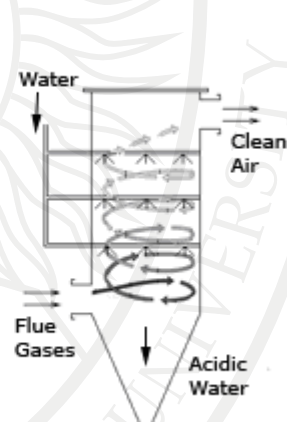
(ที่มา : Magnabiz Corporation, 2013)

อุปกรณ์ดักฝุ่นอีกชนิดหนึ่งอาศัยการแยกโดยแรงเหวี่ยง เรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ไซโคลน (cyclone) ดังแสดงในภาพที่ 8.7(ก) ภายในอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้แก๊สหมุนวนเป็นเกลียว ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงให้ฝุ่นละอองไปกระทบกับผนังและตกลงไปกองอยู่ในกรวยตอนล่างเพื่อรอการกำจัดต่อไป ไซโคลนเหมาะสำหรับกำจัดอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนขึ้นไป (ปราณี พันธุมสินชัย, 2542, หน้า 53) ดังนั้นหากฝุ่นละอองมีอนุภาคขนาดใหญ่ควรผ่านห้องดักฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงมาก่อนเข้าไซโคลน เพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกก่อนจะช่วยยืดอายุการใช้งานของไซโคลนได้

ในการดักจับฝุ่นอาจมีการฉีดพ่นน้ำเป็นละอองฝอยเพื่อให้อนุภาคเปียก และตกลงไปพร้อม ๆ กับน้ำได้ เรียกอุปกรณ์ลักษณะนี้ว่า เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) ดังแสดงในภาพที่ 8.7(ข) ซึ่งใช้ได้กับอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 0.1 ถึง 2 ไมครอน (ปราณี พันธุมสินชัย, 2542, หน้า 54) เพราะน้ำทำให้อนุภาคเล็ก ๆ รวมตัวใหญ่ขึ้น จึงลดการฟุ้งกระจายได้ดี แต่มีข้อเสียคือจะทำให้เกิดน้ำเสียที่ต้องไปบำบัดต่อ โดยเฉพาะในกรณีที่อากาศฝุ่นมี  $SO_x$  และ  $NO_x$  เจือปน จะทำให้เกิดน้ำกรดกัดกร่อนเครื่องมือได้



(ก) ไซโคลน



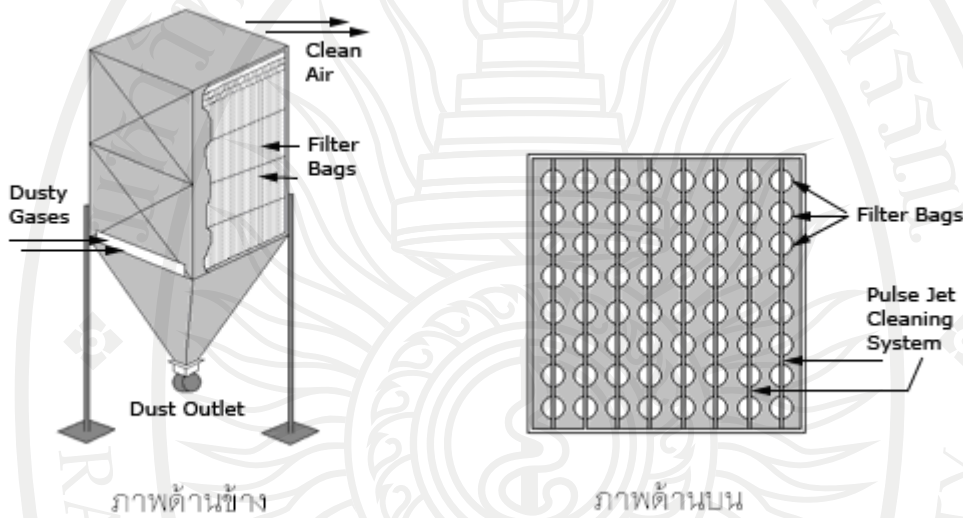
(ข) เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก

ภาพที่ 8.7 อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิด (ก) ไซโคลน และ (ข) เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก

(ที่มา : Magnabiz Corporation, 2013)



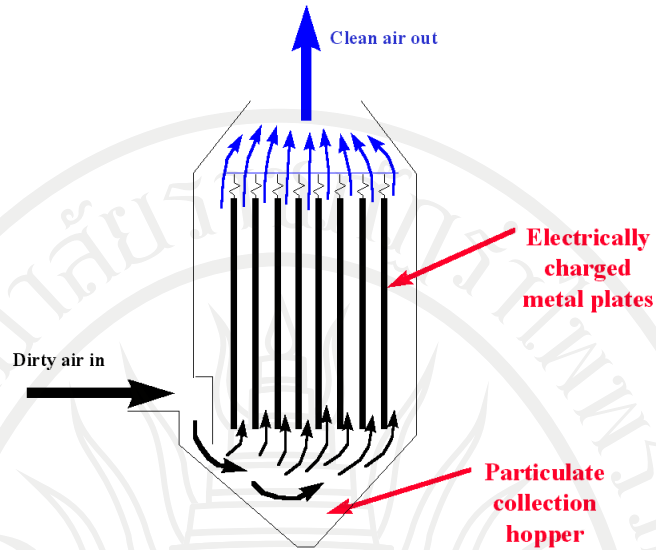
อุปกรณ์ดักจับฝุ่นโดยอาศัยการกรองทางกายภาพด้วยถุงกรอง คือ อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกรองใย (fabric filter) ดังแสดงในภาพที่ 8.8 โดยจะให้อากาศฝุ่นผ่านเข้าไปในห้องแยก (bag house) ซึ่งมีถุงกรองหลายใบแขวนอยู่ เพื่อทำหน้าที่กรองฝุ่นออกจากอากาศ วัสดุที่ใช้ทำถุงอาจเป็นผ้าฝ้าย ผ้าป่าน ผ้าอาบนํ้ายา ใยสังเคราะห์ หรือกระดาษ ขึ้นกับอุณหภูมิของแก๊สและชนิดของอนุภาค เมื่อถุงสกปรกจะทำความสะอาดได้ด้วยการเขย่าหรือใช้ลมเป่า



ภาพที่ 8.8 เครื่องกรองใย

(ที่มา : Magnabiz Corporation, 2013)

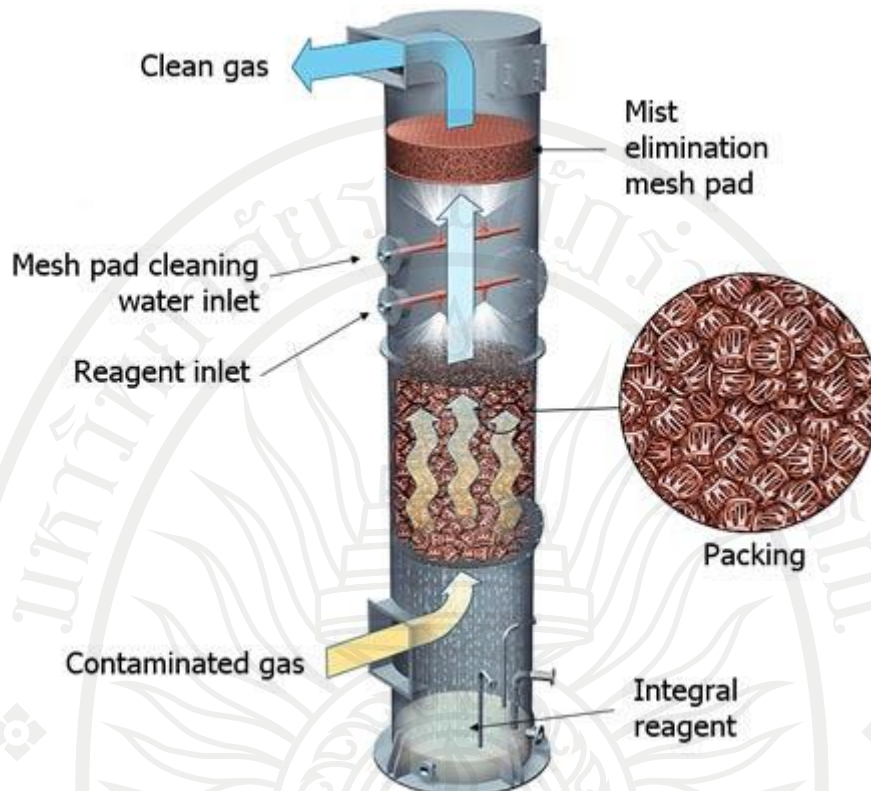
อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดักจับฝุ่น คือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) ดังแสดงในภาพที่ 8.9 สามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ปราณี พันธุมสินชัย, 2542, หน้า 56) โดยจะให้อากาศฝุ่นผ่านเข้าสู่สนามไฟฟ้าแรงสูง ทำให้อนุภาคฝุ่นเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นและวิ่งเข้าหาแผ่นโลหะที่มีประจุตรงกันข้าม ฝุ่นละอองจะตกจากขั้วไฟฟ้าได้เมื่อถูกเคาะ และตกลงสู่กรวยรองรับ



ภาพที่ 8.9 เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต  
(ที่มา : Ray, 2013)

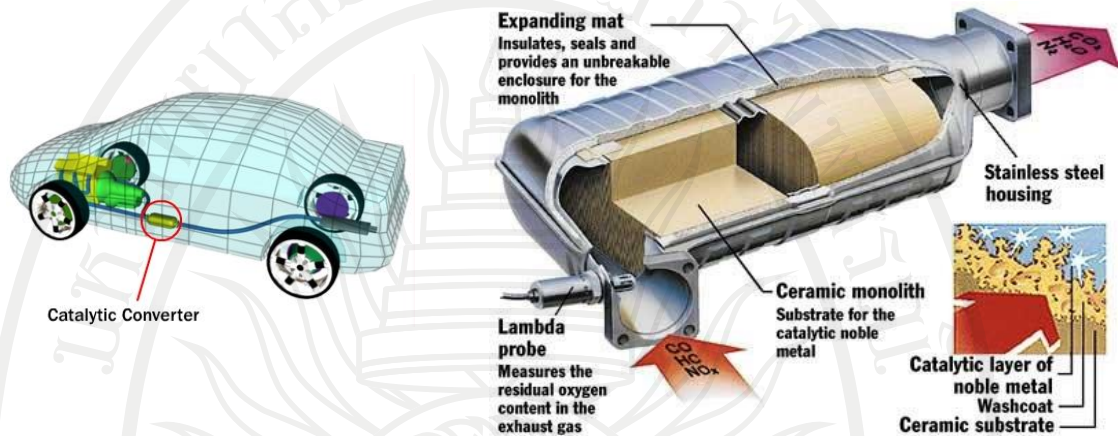
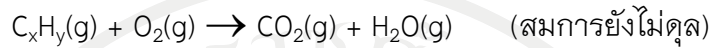
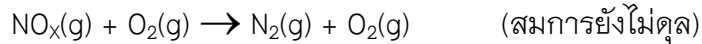
### 8.2.3.2 การควบคุมแก๊สพิษ

การควบคุมแก๊สพิษจากกระบวนการผลิตให้เกิดขึ้นปริมาณน้อย ๆ ทำได้ด้วยการควบคุมให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (completely combustion) เช่น ปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักร หรือเครื่องยนต์ โดยให้อากาศที่เพียงพอกับการเผาไหม้ ให้เวลาในการเผาไหม้ที่เพียงพอ นอกจากนี้ยังอาจใช้น้ำพ่นเป็นละอองฝอยในหอดูดซึมแก๊ส (gas absorption tower) ดังแสดงในภาพที่ 8.10 เพื่อดูดซึมแก๊สพิษ เช่น  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , และ  $\text{CO}_2$  ออกมาในรูปสารละลายกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ , และ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ตามลำดับ และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับแก๊ส ด้วยการใส่สารละลายที่มีสภาพเป็นเบส เช่น สารละลายแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) หรือน้ำปูนใส ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เพราะแก๊สเหล่านี้มีฤทธิ์เป็นกรดจึงจับกับสารละลายเบสได้ดี ซึ่งจะทำให้เกิดเกลือซัลเฟต เกลือคาร์บอเนต ที่สามารถตกตะกอนได้ ส่วนเกลือไนเตรตมักจะละลายน้ำ ซึ่งหากใช้สารละลายแอมโมเนียดักจับจะได้เกลือแอมโมเนียมไนเตรต โดยสามารถนำไปตกผลึกแล้วใช้เป็นปุ๋ยไนโตรเจนได้



ภาพที่ 8.10 หอดูดซึมแก๊ส  
(ที่มา : Actom LTD., 2013)

การควบคุมแก๊สด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic treatment) เป็นอีกวิธีการหนึ่ง ซึ่งสามารถควบคุมแก๊สพิษได้ด้วยการเปลี่ยนแก๊สพิษไปเป็นสารอื่นที่มีประโยชน์หรือเป็นสารที่มีอันตรายน้อยกว่าแล้วปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5$  (vanadium pentoxide) ให้แก๊ส  $SO_2$  ทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ได้แก๊ส  $SO_3$  ซึ่งเมื่อนำแก๊ส  $SO_3$  ไปเข้าหอดูดซึมแก๊สที่มีการฟ่นละของน้ำ จะได้กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งสามารถนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำปูนใส ( $Ca(OH)_2$ ) ได้ยิปซัม ( $CaSO_4$ ) ที่ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์และฉนวนกันความร้อนได้ นอกจากนี้แก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เช่น  $NO_x$ ,  $CO$ , และไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด สามารถถูกกำจัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า คตะาไลดิกคองเวอเตอร์ (catalytic converter) ที่ติดตั้งขวางทางเดินของแก๊สก่อนปล่อยออกทางท่อไอเสีย ดังแสดงในภาพที่ 8.11 โดยเปลี่ยนแก๊สไอเสียให้เป็นแก๊ส  $N_2$ ,  $O_2$ , และ  $CO_2$  (โดยใช้อุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์) ดังสมการ



ภาพที่ 8.11 ตำแหน่งของการติดตั้ง (ซ้าย) และลักษณะภายในของคatalytic converter (ขวา) (ที่มา : Nice and Bryant, 2013)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในคatalytic converter เป็นโลหะมีตระกูล (noble metals) ได้แก่ แพลทินัม (platinum; Pt) แพลเลเดียม (palladium; Pd) และโรเดียม (rhodium; Rh) สาเหตุที่ต้องใช้โลหะหลายชนิด เนื่องจากโลหะชนิดหนึ่งเหมาะกับการเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบหนึ่งเท่านั้น โดยโรเดียมถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันของแก๊ส  $\text{NO}_x$  ส่วนแพลทินัม และแพลเลเดียมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊ส CO และสารไฮโดรคาร์บอน

การถ่ายเทมวลสารที่เป็นแก๊ส ด้วยการให้ไปยึดเกาะกับผิวของแข็งที่มีรูพรุนมาก ๆ หรือมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อะลูมินา (alumina) ซิลิกา (silica) และซีโอไลต์ (zeolite) โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีใด ๆ เกิดขึ้น เรียกว่า การดูดซับ (adsorption) สารที่มีขั้วน้อยจะชอบดูดซับบนวัสดุดูดซับที่มีขั้วน้อย ส่วนสารที่มีขั้วมากก็จะชอบดูดซับบนวัสดุดูดซับที่มีขั้วมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ใช้เป็นตัวดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์ที่มีกลิ่นได้ดี อะลูมินาใช้เป็นตัวดูดซับความชื้น เป็นต้น เมื่อตัวดูดซับดูดซับแก๊สจนอิ่มตัวแล้วสามารถนำไปคืนสภาพ (regenerate) ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน เพื่อให้เกิดการคายซับ (desorption) แล้วนำตัวดูดซับนั้นกลับมาดูดซับสารใหม่ได้

### 8.3 เคมีของน้ำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ มนุษย์ใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค การเกษตร การคมนาคม และการพักผ่อนหย่อนใจ น้ำในโลกมีวัฏจักรหมุนเวียน โดยน้ำจะระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ แล้วควบแน่นและตกสู่พื้นโลกในรูปของฝน หิมะ ลูกเห็บ และน้ำค้าง ซึ่งน้ำบนโลกร้อยละ 97 อยู่ในมหาสมุทรและเป็นน้ำเค็ม ร้อยละ 2 เป็นน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก และร้อยละ 1 เป็นน้ำจืด

น้ำบริสุทธิ์มีสูตรโมเลกุลคือ  $H_2O$  แต่น้ำในธรรมชาติ ได้แก่ น้ำตก น้ำคลอง น้ำบ่อ น้ำบาดาล น้ำทะเล ล้วนมีสิ่งเจือปนในน้ำมากมาย เช่น สารแขวนลอย และไอออนต่าง ๆ ทำให้น้ำในแต่ละสถานที่ที่มีสมบัติที่แตกต่างกัน การพิจารณาคุณสมบัติของน้ำจากลักษณะทางกายภาพมักจะเป็นสิ่งพึงกระทำอันดับแรก เพียงใช้ประสาทสัมผัสก็สามารถบอกได้อย่างคร่าว ๆ ซึ่งน้ำสะอาดจะต้องใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่น้ำในธรรมชาติมักจะมีกลิ่นขุ่นอยู่ อันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เกิดจากการผุพังของพืชเจือปนอยู่ และถ้าเป็นน้ำนิ่งก็อาจมีกลิ่นด้วย (นัทธีรา สรรมณี, 2541, หน้า 76) ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่นิยมใช้ในการพิจารณาคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ความขุ่น ของแข็ง กลิ่น และสี สรุปไว้ในตารางที่ 8.2 ดังนี้



ตารางที่ 8.2 สมบัติทางกายภาพที่นิยมใช้บอกคุณภาพน้ำ

สมบัติทางกายภาพ	ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	หน่วยที่ใช้วัด	เกณฑ์สูงสุด สำหรับน้ำดื่ม* สำหรับน้ำประปา**
อุณหภูมิ	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเพิ่มขึ้น การละลายของแก๊สลดลง การละลายของแร่ธาตุเพิ่มขึ้น สิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนใหญ่มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และสิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนใหญ่ต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อการสืบพันธุ์ และการดำรงชีวิตอยู่	องศาเซลเซียส	ไม่ระบุ
ความขุ่น	เป็นลักษณะที่เกิดขึ้นจากการมีสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งสารเหล่านี้มีขนาดเล็กลงและมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำจึงไม่จมหรือไม่ลอย เช่น โคลน แร่ เศษหิน ซากพืช ซึ่งถูกพัดพามาตามกระแสน้ำ	NTU	5 10
ของแข็ง	คือ สิ่งปนเปื้อนทุกชนิด นอกเหนือจากแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำ ได้แก่ ดิน แร่ สิ่งปฏิจุล และสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการตกตะกอน (sedimentation) ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแก๊สต่าง ๆ สามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมี (precipitation)	mg/l	500 1000
กลิ่น	มีสาเหตุมาจากมีสารอินทรีย์ที่กำลังถูกย่อยสลาย โดยเฉพาะในแหล่งน้ำที่มีตะกอนสารอินทรีย์ทับถมจะเกิดการระบวมการย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดแก๊สที่มีกลิ่นรุนแรงได้ หรือมีสารไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากการระบวมการรีดักชันของซัลเฟตไดออกไซด์โดยแบคทีเรีย	-	ไม่มีกลิ่น (ยกเว้นกลิ่นคลอรีน)
สี	สีที่มองเห็นในน้ำเป็นผลมาจากอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น แทนิน เกิดจากการสลายตัวของซากพืช ทำให้มีธรรมชาติมีสีต่างๆ เช่น สีน้ำตาล สีเขียวจากสาหร่าย มักจะมีสี เมื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการบำบัด ย่อมทำให้แหล่งน้ำนั้นมีสีตามไปด้วย	แพลทินัมโคบอลต์	15 15

ที่มา : \* กรมควบคุมมลพิษ, 2556

\*\* ประกาศกรมอนามัย เรื่องคุณภาพน้ำประปา ปี พ.ศ. 2543



นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางเคมีและชีววิทยาของน้ำ ที่จะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับสมบัติทางกายภาพ ว่าน้ำมีคุณภาพเหมาะแก่การอุปโภคบริโภคหรือไม่ ซึ่งได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ ค่าความกระด้าง โลหะหนัก และเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 8.3 ดังนี้

ตารางที่ 8.3 สมบัติทางเคมีและชีววิทยาที่นิยมใช้บอกคุณภาพน้ำ

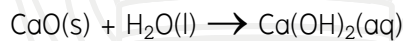
สมบัติทางเคมีและชีววิทยา	หน่วยที่ใช้วัด	เกณฑ์สูงสุด	
		สำหรับน้ำดื่ม*	สำหรับน้ำประปา**
pH	-	6.5-8.5	6.5-8.5
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid)	mg/l	500	600
ความกระด้างทั้งหมด (คิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต)	mg/l	100	300
สารหนู (As)	mg/l	0.05	0.01
แบเรียม (Ba)	mg/l	1.0	0.7
แคดเมียม (Cd)	mg/l	0.005	0.003
คลอไรด์ (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	250	250
โครเมียม (Cr)	mg/l	0.05	0.05
ทองแดง (Cu)	mg/l	1.0	2.0
เหล็ก (Fe)	mg/l	0.3	0.3
ตะกั่ว (Pb)	mg/l	0.05	0.01
แมงกานีส (Mn)	mg/l	0.05	0.4
ปรอท (Hg)	mg/l	0.002	0.001
ไนเตรต (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	4.0	50
ฟีนอล (phenol)	mg/l	0.001	ไม่ระบุ
ซีลีเนียม (Se)	mg/l	0.01	0.01
เงิน (Ag)	mg/l	0.05	ไม่ระบุ
ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	250	250
สังกะสี (Zn)	mg/l	5.0	3.0
ฟลูออไรด์ (F <sup>-</sup> )	mg/l	1.5	1.0
อะลูมิเนียม (Al)	mg/l	0.2	ไม่ระบุ
อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (alkyl benzene sulfonate)	mg/l	0.2	ไม่ระบุ
ไซยาไนด์ (CN <sup>-</sup> )	mg/l	0.1	ไม่ระบุ
โคลิฟอร์ม (Coliform) (ตรวจโดยวิธี most probable number)	MPN/100 ml	2.2	ไม่พบ
อี.โคไล (E.Coli) (ตรวจโดยวิธี most probable number)	MPN/100 ml	ไม่พบ	ไม่พบ
จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (ตรวจโดยวิธี most probable number)	MPN/100 ml	ไม่พบ	ไม่พบ

ที่มา : \*การประปาส่วนภูมิภาค, 2557

\*\*กรมควบคุมมลพิษ, 2556

### 8.3.1 การทำน้ำประปา

ในยุคปัจจุบัน น้ำประปาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาอาจใช้น้ำผิวดินจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ น้ำบาดาล หรือแม้กระทั่งใช้น้ำที่ผ่านการใช้มาแล้ว กระบวนการทำน้ำให้สะอาดสามารถแบ่งได้ออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ การกรองหยาบ การตกตะกอน การกรองทราย การเติมอากาศ และการฆ่าเชื้อโรค หลังจากกรองหยาบด้วยตะแกรงแล้ว น้ำดิบจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อทำให้ทรายและอนุภาคแขวนลอยนอนก้น ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กนี้จะใช้สารเคมีช่วย โดยการปรับสภาพน้ำจะเติมปูนขาว (CaO) เพื่อลดความกระด้างของน้ำ แต่ใช้ได้เฉพาะกับน้ำกระด้างชั่วคราวที่มีเกลือไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ละลายอยู่เท่านั้น โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จากนั้นจึงเติมสารส้มหรือโพแทสเซียม (KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O) เพื่อกำจัดความขุ่นของน้ำ เนื่องจากมีสารแขวนลอยขนาดเล็กจนไม่สามารถตกตะกอนเองได้ การเติมสารส้มจะช่วยลดแรงผลักระหว่างอนุภาคที่แขวนลอยให้สามารถเข้ามาเกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่จนมีน้ำหนักมากแล้วตกตะกอนออกมาได้ วิธีนี้สามารถกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำรวมถึงแบคทีเรียได้เกือบทั้งหมด จากนั้นน้ำใสที่ได้จะผ่านกระบวนการกรองด้วยกรวดทราย และอาจมีการพ่นน้ำเป็นละอองฝอยให้สัมผัสอากาศ เพื่อเร่งการออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ยังอาจหลงเหลืออยู่ในน้ำ และขั้นตอนสุดท้ายคือการเติมเกลือคลอรีน ได้แก่ สารประกอบไฮโปคลอไรต์ (เช่น NaOCl หรือ Ca(OCl)<sub>2</sub>) และคลอรีนไดออกไซด์ (ClO<sub>2</sub>) ในปริมาณ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ณ จุดเริ่มต้น โดยเกลือคลอรีนจะเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง เมื่อละลายน้ำจะย่อยสลายสารอินทรีย์รวมทั้งเชื้อโรคต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว ถ้าเติมเกลือคลอรีนปริมาณน้อยก็จะมีคลอรีนเหลือตกค้างในน้ำประปา แต่ถ้าเติมเกลือคลอรีนให้มากพอ หลังจากทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ แล้ว ก็จะมีคลอรีนเหลือตกค้างอยู่ในน้ำ (มีความเข้มข้นประมาณ 0.2–0.5 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำให้สามารถฆ่าเชื้อโรคที่หลงเหลือหรือหลุดรอดเข้ามาในน้ำได้ แต่ก็จะทำให้น้ำมีกลิ่นคลอรีน ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงไปพร้อมกับเกลือคลอรีนเพื่อดูดซับกลิ่นไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ อีกทั้งยังสามารถดูดซับสี กลิ่น และรสชาติอื่น ๆ ได้อีก เมื่อใช้ไปนานประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง จึงต้องทำการเปลี่ยนผงถ่านกัมมันต์เป็นระยะ ๆ

จากนั้นน้ำสะอาดที่ได้จะถูกสูบไปเก็บไว้บนหอสูงเพื่อเพิ่มแรงดันในการส่งจ่ายไปตามบ้านเรือนต่อไป

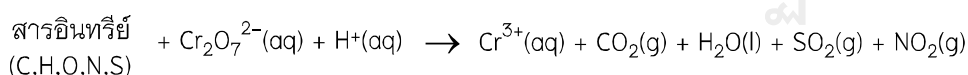
### 8.3.2 มลพิษทางน้ำ

มลพิษทางน้ำ คือ สภาวะที่น้ำเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะเสื่อมโทรม เน่าเหม็น จนไม่มีสิ่งมีชีวิตชนิดใดสามารถดำรงชีพ และใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ สาเหตุมาจากน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน น้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีทางการเกษตร และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง หรือแม้กระทั่งการรั่วไหลของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำจากอุบัติเหตุและโดยเจตนา ล้วนก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำทั้งสิ้น

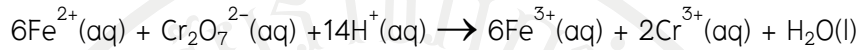
สารก่อมลพิษที่ปะปนมากับน้ำเสีย ได้แก่ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ดินตะกอน สารกัมมันตรังสี และความร้อน (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 793-795) โดยในแต่ละหัวข้อ มีรายละเอียดดังนี้

**8.3.2.1 สารอินทรีย์** ได้แก่ ซากพืชซากสัตว์ สารอินทรีย์สังเคราะห์ คราบน้ำมัน สารเหล่านี้เมื่อเจือปนอยู่ในน้ำจะทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (dissolved oxygen; DO) มีปริมาณลดลง ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในน้ำใช้แก๊สออกซิเจนเพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าว โดยปกติค่า DO ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีค่าอยู่ในช่วง 4-6 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ ppm (1 มิลลิกรัม/ลิตร = 1 ppm)

การวัดคุณภาพน้ำด้วยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือ วัดปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยจุลินทรีย์ (biochemical oxygen demand; BOD) ซึ่งจะแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ในน้ำต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะมีอากาศ ในการวัดค่า BOD จะหาค่า DO ในน้ำตัวอย่างก่อน จากนั้นเก็บน้ำไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้วหาค่า DO อีกครั้ง ซึ่งผลต่างของค่า DO ทั้งสองค่าคือค่า BOD ถ้าค่า BOD สูงแสดงว่าในน้ำมีสารอินทรีย์อยู่มาก จุลินทรีย์จึงต้องใช้แก๊สออกซิเจนในการย่อยสลายปริมาณมาก โดยมีเกณฑ์ของค่า BOD คือถ้ามีค่า BOD มากกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร ถือว่าเป็นน้ำเสีย วิธีที่สองคือวัดปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยสารเคมี (chemical oxygen demand; COD) วิธีนี้จะใช้สารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดส์ได้ดี เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ในสารละลายกรดซัลฟูริก ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ดังนี้



หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว จึงหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียมไอโรน (II) ซัลเฟต  $((\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  ดังสมการ



โดยปกติค่า COD จะสูงกว่าค่า BOD เพราะค่า COD คือปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งหมด ทั้งที่แบคทีเรียย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ แต่ค่า BOD คิดเฉพาะสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้เท่านั้น (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542, หน้า 122)

**8.3.2.2 สารอินทรีย์** ได้แก่ เกลือไนเตรต เกลือฟอสเฟต กรดแอมโมเนีย ฟุนโกลิโหหนัก สารประกอบโลหะ และเกลืออินทรีย์อื่น ๆ สารเหล่านี้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยของเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัด และสารซักล้างจากอาคารบ้านเรือนทำให้แหล่งน้ำอุดมไปด้วยสารอาหารจำพวกฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ส่งผลให้สาหร่ายและพืชน้ำในแหล่งน้ำนั้นเจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็ว จนออกซิเจนที่ละลายในน้ำถูกใช้จนหมดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) สิ่งที่มาคือสิ่งมีชีวิตในน้ำอื่น ๆ จะตายเป็นจำนวนมาก อีกทั้งพืชน้ำที่หนาแน่นยังไปกั้นแสงอาทิตย์ไม่ให้ส่องลงไปถึงใต้น้ำทำให้พืชที่อยู่ใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้และตายในที่สุด (มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย, 2554, หน้า 86)

**8.3.2.3 ดินตะกอน** เกิดจากการกัดกร่อนของดินและหินโดยลมพายุ น้ำไหลบ่าจากภูเขา การเกษตร และการก่อสร้าง ขนาดของดินตะกอนมีตั้งแต่ก้อนกรวดที่ใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดอนุภาคคอลลอยด์ (ขนาด  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  เซนติเมตร) ดินตะกอนเป็นปัญหามลพิษสำหรับแหล่งน้ำผิวดิน โดยจะไปทับถมพืชใต้น้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ชัดขวางวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เป็นแหล่งรวมของโลหะหนักต่าง ๆ เช่น Ca, Cu, Mo, Ni, Co, และ Mn ซึ่งจะทำให้คุณภาพของน้ำลดลง

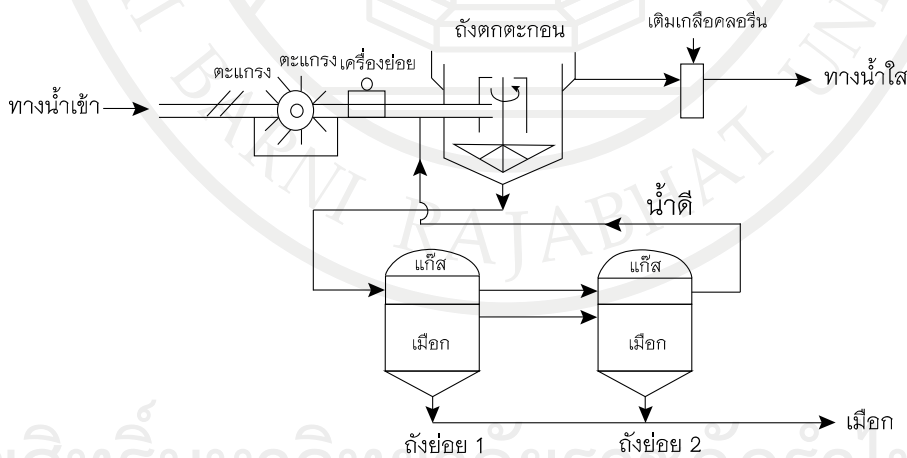
**8.3.2.4 สารกัมมันตรังสี** เกิดจากการทำเหมือง กระบวนการแปรรูปแร่ การใช้อาวุธนิวเคลียร์ การระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และกากกัมมันตรังสีทางการแพทย์ เป็นต้น เมื่อฝนตกหรือน้ำบ่าไหลหลากจะชะเอาสารกัมมันตรังสีลงสู่แหล่งน้ำได้

**8.3.2.5 ความร้อน** ได้แก่ ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากน้ำในกระบวนการผลิตและน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำ เช่น น้ำร้อนจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิของแหล่งน้ำสูงขึ้นและปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง

### 8.3.3 การควบคุมมลพิษทางน้ำ

มลพิษทางน้ำเกิดจากน้ำเสียชุมชน (domestic waste water) และน้ำเสียอุตสาหกรรม (industrial waste water) ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจน และกำจัดสารพิษออกไปก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีการบำบัดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อนในน้ำนั้น ดังนี้

**8.3.3.1 การบำบัดน้ำเสียจากชุมชน** น้ำเสียจากชุมชนมักจะเป็นน้ำสกปรกที่มีสารอินทรีย์เจือปนและมีสารซัลฟายด์ปะปนอยู่ การบำบัดเริ่มจากการแยกสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ออกโดยใช้ตะแกรง (screen) แล้วส่งเข้าเครื่องย่อย (grinder) ทำหน้าที่ตัดสิ่งสกปรกให้มีความเล็กลง เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกชิ้นใหญ่ ๆ ที่อาจหลุดรอดตะแกรงได้ไหลไปอุดตันท่อทางระบายน้ำ หรือเครื่องสูบน้ำ จากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่รางตกตะกอน (grit chamber) เพื่อแยกเศษหิน ดิน ทราายให้ตกลงไปอยู่ด้านล่างของรางตกตะกอน ส่วนโคลนหรือสารแขวนลอยในน้ำจะถูกปล่อยให้ตกตะกอนในถังตกตะกอน (sedimentation tank) น้ำใสที่ได้จะนำไปเติมเกลือคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อ ส่วนตะกอนที่ก้นถังจะถูกดึงออกจากถังเพื่อนำไปย่อยด้วยแบคทีเรีย (แบบไม่ใช้ออกซิเจน) ในถังย่อย (digester) โดยจะแยกโคลนและเมือก (sludge) ออกจากน้ำดี (supernatant liquor) ซึ่งจะนำกลับไปถังตกตะกอนเพื่อทำให้น้ำใสอีกครั้ง (วรรณ กาญจนมยุร, 2545, หน้า 16) ดังแสดงในภาพที่ 8.12 ในกรณีที่ต้องการน้ำทิ้งที่สะอาด จนนำไปใช้อุปโภคบริโภคต่อไปได้จะต้องเพิ่มกระบวนการเติมอากาศ กระบวนการตกตะกอนด้วยปูนขาว การกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการกำจัดไอออนต่าง ๆ ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นขั้นตอนสุดท้าย (พิมล เรียนวิวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิช, 2539, หน้า 106)



ภาพที่ 8.12 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน

(ที่มา : วรรณ กาญจนมยุร, 2545, หน้า 17)



ระบบบำบัดน้ำเสียอีกวิธีหนึ่งคือระบบบ่อบอกซิเดชัน (oxidation pond) ดังแสดงในภาพที่ 8.13 โดยมีลักษณะเป็นบ่อดิน หรือบ่อกอนกรีตที่มีความลึกประมาณ 0.5-2 เมตร น้ำเสียจะไหลเข้าและออกจากบ่อตลอดเวลา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอาศัยจุลินทรีย์ ทั้งที่ใช้ ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการกำจัดสารอินทรีย์ ส่วนแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มาจากการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ และระบบเติมอากาศ เช่น กังหันน้ำ ชัยพัฒนา ดังนั้นระบบนี้จึงต้องใช้พื้นที่มากและใช้งานได้ดีในบริเวณที่มีแสงแดดมาก (วรรณภาณจนมยุร, 2545, หน้า 18)



ภาพที่ 8.13 ระบบบ่อบอกซิเดชัน(ซ้าย) และระบบเติมอากาศด้วยกังหันน้ำชัยพัฒนา(ขวา)  
(ที่มา : มูลนิธิชัยพัฒนา, 2557)

**8.3.3.2 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม** การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีกระบวนการหรือแบบแผนที่แน่นอน โดยกระบวนการบำบัดขึ้นอยู่กับชนิดของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ที่มีไอออนของโลหะหนักเจือปน จะต้องใช้กระบวนการทางเคมีในการบำบัด ส่วนน้ำทิ้งจากโรงงานทำน้ำอัดลมส่วนใหญ่เป็นน้ำล้างขวดและน้ำอัดลมที่เหลือติดขวดที่มีน้ำตาลปนอยู่กับน้ำทิ้ง จะใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อควรคำนึงถึงเพิ่มเติมอีก (พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิช, 2539, หน้า 102) ดังนี้



(1) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 40–60 องศาเซลเซียส จะต้องมีการลดอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด ด้วยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

(2) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกรดหรือเบสเจือปนอยู่มาก จะต้องปรับสภาพ pH ให้เป็นกลาง

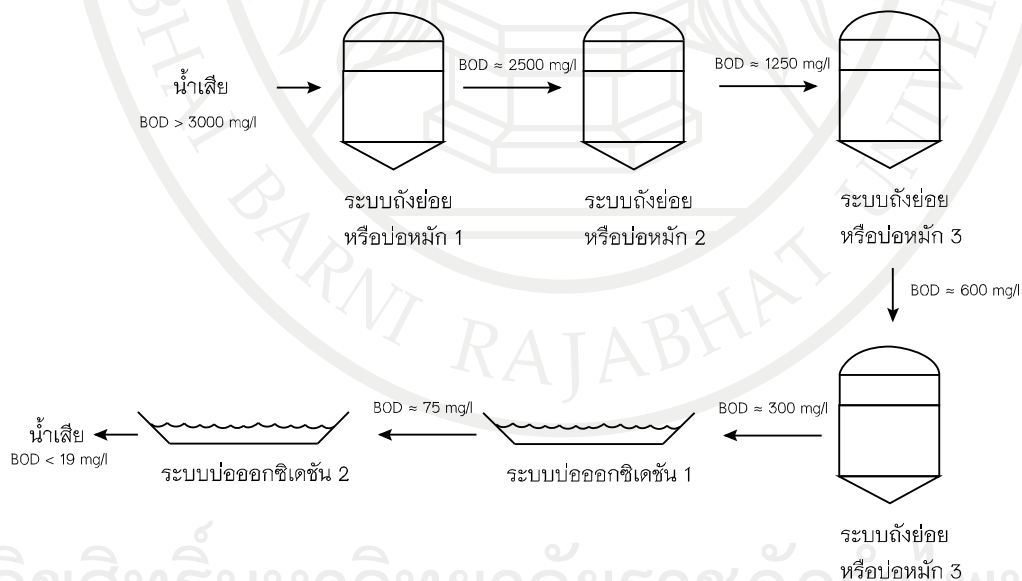
(3) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่ขาดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จะต้องเติมสารประกอบที่มีธาตุทั้งสองนี้ลงไปเพื่อเป็นอาหารเสริมสำหรับแบคทีเรีย หากต้องการจะบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

(4) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า BOD สูงมาก การลดค่า BOD จนถึงค่าตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (20 มิลลิกรัม/ลิตร) จะต้องใช้กระบวนการบำบัดที่มีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก

(5) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่กำจัดได้ยากปนอยู่ เช่น สีในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

โดยทั่วไปน้ำเสียที่มีค่า BOD สูงกว่า 3000 มิลลิกรัม/ลิตร จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนก่อน แล้วจึงนำมาบำบัดในขั้นต่อไปด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งสามารถลดค่า BOD ได้ดังภาพที่

8.14



ภาพที่ 8.14 ค่า BOD ของน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ

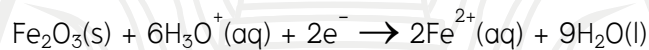
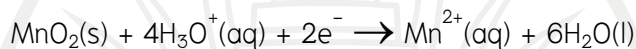
(ที่มา : พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวนิช, 2539, หน้า 103)

การควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถป้องกันการเน่าเสียของน้ำได้ โดยน้ำทิ้งจากโรงงานจะต้องมีค่าของสารแขวนลอยไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่า BOD ไม่เกิน 20 มิลลิกรัม/ลิตร จึงจะปล่อยสู่แหล่งน้ำได้ นอกจากนี้การทำให้ของเสียเจือจางด้วยน้ำมากเพียงพอเพื่อลดปริมาณความสกปรก เช่น การระบายน้ำเสียลงในแม่น้ำลำคลองต้องคำนึงถึงปริมาณความสกปรกที่แหล่งน้ำนั้นจะสามารถรับได้ ซึ่งขึ้นกับปริมาตรของน้ำและอัตราการไหลของน้ำ โดยหากปล่อยน้ำเสียตามเกณฑ์มาตรฐาน แล้วถูกเจือจางด้วยน้ำจากแหล่งน้ำอย่างน้อย 8 เท่า จะทำให้ได้น้ำในลักษณะที่ถือว่าไม่เน่าเสียแล้ว การเวียนเอาน้ำที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอื่นที่ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำสะอาดมากนัก จะเป็นผลดีต่อโรงงานอุตสาหกรรม เพราะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต วิธีการเหล่านี้กระทำร่วมกับการกักเก็บและปล่อยของเสียลงแหล่งน้ำที่ละน้อย และเปลี่ยนแปลงแหล่งรับของเสียใหม่ เพื่อหลีกเลี่ยงการทิ้งของเสียจำนวนมากเกินไปลงสู่แหล่งรับเดิม จนทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย (ทัศนีย์ ศรีเพชรพันธุ์, 2542, หน้า 208-209) จะเป็นวิธีการที่จะสามารถรักษาแหล่งน้ำให้มีความสะอาด ปลอดภัย ต่อสิ่งมีชีวิต และมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้อีกยาวนาน

#### 8.4 เคมีของดิน

ดินเป็นแหล่งผลิตอาหารแก่มนุษย์และสัตว์ มนุษย์ปลูกพืชเพื่อสร้างอาหาร ในขณะที่สัตว์กินพืชและดำรงชีวิตอยู่บนผืนแผ่นดิน ดินประกอบด้วยส่วนที่เป็นแร่ธาตุ อินทรีย์วัตถุ อากาศ และน้ำ อินทรีย์วัตถุในดินเกิดจากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ ดินชั้นบนจึงมีอินทรีย์วัตถุสูง เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ เห็ดรา และสัตว์ในดิน เนื่องจากอนุภาคของดินมีขนาดเล็ก เกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ จึงมีช่องว่างที่มีน้ำและอากาศแทรกอยู่ ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมาก จะมีช่องว่างที่มีน้ำและอากาศแทรกอยู่มาก ทำให้อุ้มน้ำได้ดีกว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุน้อย ซึ่งโดยทั่วไปดินที่อุดมสมบูรณ์จะมีแร่ธาตุ 45% อินทรีย์วัตถุและฮิวมัส 5% (ฮิวมัส คือ ซากพืชซากสัตว์ที่คงทนต่อการย่อยสลาย) อากาศและน้ำอย่างละ 25% (สถาบันนวัตกรรมและการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557) ดินที่มีน้ำท่วมขัง จะมีสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เปลี่ยนไปจากเดิม จุลินทรีย์ในดินจะใช้ออกซิเจนในดินจนหมด ดินจึงขาดอากาศที่รากพืชต้องการ พืชโดยทั่วไปจึงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีน้ำท่วมขัง ยกเว้น พืชตระกูลข้าว (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 801)

สภาพความเป็นกรด-เบสของดินโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 3.0-9.0 ดินจึงอาจมีสภาพเป็นได้ทั้ง กรด เบส หรือกลาง ความเป็นกรด-เบสของดินมีผลทั้งโดยตรงและโดยอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกอยู่ในดิน ในดินที่มีสภาพเป็นกรดจะมีไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญทางเคมีของดิน เช่น ทำให้มีการละลายตัวของธาตุหรือสารต่าง ๆ ในดินออกมา ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์หรือก่อให้เกิดผลเสียต่อพืชได้ เช่น ในดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 สารอินทรีย์ในดินจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้  $\text{MnO}_2(\text{s})$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$  ถูกรีดิวซ์เป็น  $\text{Mn}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{2+}$  (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 801) ดังนี้



แมงกานีสและเหล็ก แม้จะเป็นธาตุอาหารพืชที่สำคัญ แต่พืชต้องการในปริมาณน้อย ถ้ามีสะสมอยู่ในดินมากเกินไปก็จะเกิดเป็นพิษขึ้นกับพืชได้

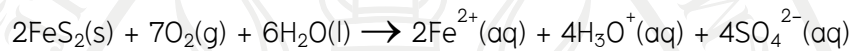
ธาตุอาหารต่าง ๆ ในดินที่พืชสามารถดึงดูดเอามาใช้ประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับสภาพ pH ของดิน โดยธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในดินจะคงสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และมีปริมาณมากที่ pH ช่วงหนึ่ง ถ้าดินมี pH สูงหรือต่ำกว่าช่วงนั้น ๆ ก็เปลี่ยนสภาพเป็นสภาพที่ยากที่พืชจะดึงดูดเอาไปใช้เป็นประโยชน์ได้ เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต (ในรูป  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  และ  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) ที่ใส่ลงไปลงในดินจะอยู่ในรูปของสารละลายที่พืชดึงดูดไปใช้ได้ง่าย เมื่อดินมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0-7.0 ถ้าดินมี pH สูงหรือต่ำกว่าช่วงนี้ ความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดินก็ลดน้อยลง เพราะไปทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดิน เช่น  $\text{Al}^{3+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ได้สารประกอบที่ละลายน้ำยาก พืชจึงดึงดูดไปใช้ไม่ได้

ส่วนธาตุอาหารรองของพืช เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส โบรอน เป็นต้น จะละลายออกมาอยู่ในสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และมีอยู่ในดินอย่างพอเพียงกับความต้องการของพืช เมื่อดินมี pH เป็นกรดอย่างอ่อน แต่ในทางตรงกันข้ามธาตุอาหารโมลิบดีนัม จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดีขึ้น ถ้าดินมีค่า pH เป็นกลางถึงเบสอย่างอ่อน อย่างไรก็ตามโดยสรุปดินที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืชควรจะมี pH อยู่ในช่วง 6.0-7.0

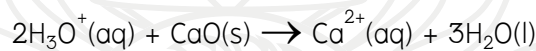
ความสำคัญของค่า pH ของดินยังเกี่ยวข้องกับการทำงานที่เป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในดิน ซึ่งโดยปกติสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ในดินจะเน่าเปื่อยผุพังได้ด้วยกร่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ขณะที่สารอินทรีย์เหล่านี้กำลังสลายตัวจะปลดปล่อยธาตุอาหารต่าง ๆ ออกมาซึ่งรากพืชสามารถดึงดูดไปใช้ได้ ดังนั้นเมื่อใส่ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยพืชสดลงไปลงในดินแล้วทำให้พืชงอกงามดีขึ้น แต่ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเนื่องจากจุลินทรีย์จะต้องเข้าย่อยและทำให้

ปุ๋ยเหล่านี้สลายตัว และปลดปล่อยธาตุอาหารออกมา ซึ่งแตกต่างจากปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำแล้ว พืชก็สามารถดึงดูดเอาธาตุอาหารไปใช้ได้ทันที โดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่เข้าย่อยสลายปุ๋ยคอกและสารอินทรีย์ ตลอดจนอินทรีย์ในดินนั้นจะทำงานได้เต็มที่และมีประสิทธิภาพ เมื่อค่า pH ของดิน อยู่ระหว่าง 6.0-7.0 ถ้าดินเป็นกรดหรือเบสรุนแรง จะทำให้จุลินทรีย์ในดินจะทำงานได้ช้าลง ปุ๋ยคอกและสารอินทรีย์ในดินจะสลายตัวช้าและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ช้า

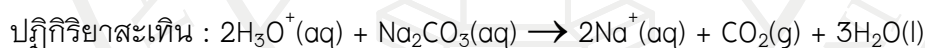
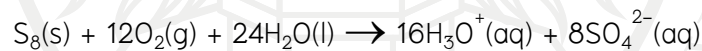
ดินเปรี้ยว (acidic soil) เป็นดินที่มีกรดรุนแรง เช่น ดินที่ประกอบด้วยแร่ไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) ปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นกรดในดิน (ทววงมหาวิทยาลัย, 2524, หน้า 802) ดังสมการ



พืชที่ปลูกในดินเปรี้ยวจะไม่เจริญเติบโตและงอกงามเท่าที่ควร แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) หรือหินปูนที่บดละเอียด ( $\text{CaCO}_3$ ) สารประกอบเหล่านี้เมื่อใส่ลงไปในดิน จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรด ทำให้ความเป็นกรดในดิน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) ลดน้อยลง ดังสมการ



พื้นที่แห้งแล้งและฝนตกน้อยมักจะมีดินที่มีสภาพเป็นเบส (basic soil) หรือในดินที่มีเกลือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการเติมสารเคมี เช่น เต็มกำมะถัน ( $\text{S}_8$ ) หรือ  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นในดินให้  $\text{H}_3\text{O}^+$  (นัทธีรา สรรพณี, 2541, หน้า 177) แล้วสะเทินกับดินเบสได้ ดังสมการ



ดินเค็ม (saline soil) เป็นดินที่พบมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ป่าพรุ และตามแถบชายทะเล เนื่องจากเป็นดินที่มีเกลือปะปนอยู่มาก ได้แก่ เกลือที่เกิดจากไอออนต่อไปนี้  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  และอาจมีไอออนอื่น ๆ ปะปนอยู่บ้าง เช่น  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{BO}_3^-$ , และ  $\text{NO}_3^-$  (ทัศนีย์ ศรีเพชรพันธุ์, 2542, หน้า 239) ผลของเกลือดังกล่าวทำให้การเพาะปลูกไม่ประสบผลสำเร็จ

การแก้ปัญหาดินเค็มทำได้ด้วยวิธีการชะล้าง (leaching) โดยการยกร่องพืชที่ปลูก เมื่อฝนตกน้ำจะชะเกลือออกไป หรือการยกร่องกว้างประมาณ 50 เซนติเมตร สูงประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วปล่อยน้ำจืดเข้ามาตามร่องทิ้งไว้ให้ดินชุ่มเป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วระบายน้ำออกทิ้งไป เมื่อดินแห้งจะมีคราบเกลือสะสมในร่องที่ไม่มีน้ำ จากนั้นจึงปล่อยน้ำจืดเข้าไปชะเกลือน้ำออกทิ้งไป นอกจากนี้ยังสามารถใช้แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) หรือยิปซัมเพื่อ



เปลี่ยนเกลือพวก NaCl และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ให้กลายเป็น  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ที่สามารถชะล้างออกไปได้ง่าย อีกทั้งเกลือแคลเซียมที่เกิดขึ้นมาแทนที่ ยังมีพิษต่อพืชน้อยกว่าเกลือโซเดียม

#### 8.4.1 มลพิษทางดิน

การกำจัดขยะชุมชนด้วยวิธีการฝังกลบในดิน (landfill) จะต้องมีกระบวนการที่ถูกต้องลักษณะ เช่น ต้องปูพื้นหลุมด้วยแผ่นพลาสติกที่ทนทาน มีที่ระบายน้ำที่เกิดจากการหมักของขยะเพื่อนำไปบำบัด มีที่ระบายแก๊สที่อาจเกิดขึ้นจากหมัก เป็นต้น การทิ้งขยะไว้กลางแจ้งจะก่อให้เกิดมลพิษทางดิน น้ำ และเป็นแหล่งแพร่เชื้อโรค เพราะสารพิษในขยะจะถูกชะล้างด้วยน้ำฝนลงสู่ดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะจากอุตสาหกรรมที่มีอันตรายจะนำมาฝังกลบในบ่อที่หุ้มคอนกรีตหนาเพื่อป้องกันสารพิษรั่วไหลออกมาปนเปื้อนดินและน้ำ

กากกัมมันตรังสีหรือของเสียจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นขยะสารพิษที่มีอันตรายอย่างร้ายแรง ต้องกำจัดโดยการนำใส่ถังและฝังในหลุมใต้ดินที่ทำจากคอนกรีตและเหล็กกล้าลึกมากกว่า 20 เมตร ซึ่งจะต้องเก็บไว้เป็นเวลานานนับพัน ๆ ปี (พินล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวนิช, 2539, หน้า 182) เนื่องจากกากของเสียเหล่านี้จะต้องถูกเก็บเป็นเวลานานมาก จึงเป็นภาระและความรับผิดชอบของผู้ดูแลที่จะต้องตรวจสอบสถานะบรรจุอย่างสม่ำเสมอว่าเกิดการรั่วไหลหรือไม่ กรณีที่สงสัยว่ามีการรั่วไหลจะต้องถ่ายเทจากภาชนะเก่าไปยังภาชนะเก็บใบใหม่ทันที

การเกษตรกรรมที่มีการใช้สารเคมีจะสร้างภาวะมลพิษให้แก่ดิน โดยเฉพาะจากยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืชและปุ๋ยเคมี ซึ่งถ้าใช้เกินความจำเป็นจะทำให้ดินเสีย ยาฆ่าแมลงประเภทดีดีที (DDT) สามารถตกค้างอยู่ในร่างกายและสิ่งแวดล้อมได้นาน สามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งตับ โลหิตจาง ส่วนสารกำจัดวัชพืชชนิดอื่น ๆ ทุกชนิดล้วนก่อให้เกิดโรค โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเกษตรกรที่ใกล้ชิดกับยาดังกล่าวมักจะเจ็บป่วยและเสียชีวิตเนื่องจากสารเคมีที่ใช้โดยประมาทหรือรู้เท่าไม่ถึงการณ์ นอกจากนี้สารกำจัดศัตรูพืช อาจเป็นพิษโดยตรงต่อพืช หรือสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เมื่อมนุษย์หรือสัตว์กินพืชนั้นจะได้รับสารพิษ จนอาจเกิดอันตรายแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้สารมลพิษในดินอาจเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ในดินไปสู่สภาพที่ละลายน้ำได้ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำและแพร่กระจายออกไปได้ไกล การใช้สารเคมีทางการเกษตรจึงควรทำอย่างระมัดระวัง และควรใช้วิธีการทางธรรมชาติในการทำเกษตรกรรมมากขึ้น เช่น การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ การเลี้ยงสัตว์เพื่อกำจัดวัชพืช และการใช้แมลงเพื่อควบคุมแมลงศัตรูพืช เป็นต้น

การทิ้งโลหะหนักให้ปะปนอยู่ในดินหรือแม้กระทั่งการทำเหมืองแร่ที่ไม่ถูกกระบวนการ เช่น การเปิดหน้าดินจนฝนชะเอาแร่ธาตุโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดโรคภัยแก่มนุษย์เมื่อไปสัมผัส ดื่มน้ำในแหล่งน้ำใกล้เคียง และกินพืชที่ปลูกในบริเวณนั้น เช่น โรคมินามาตะ (Minamata) เกิดจากโลหะปรอท (Hg) ผู้ป่วยจะมีอาการเหน็บชา บวมตามร่างกาย สายตามัว เป็นอัมพาต ความจำเสื่อม และเสียชีวิตในที่สุด โรคอิไตอิไต (Itai-itai) เกิดจากโลหะแคดเมียม (Cd) ผู้ป่วยจะมีอาการปวดกระดูก เจ็บปวดทั่วร่างกายเพราะอาการผิดปกติของกระดูก โรคพิษตะกั่ว เกิดจากโลหะตะกั่ว (Pb) ผู้ป่วยจะมีอาการ โลหิตจาง สมองเลื่อม ไตวาย และช็อคหมดสติ (ทพวงมหาวิทยาลัย, 2540, หน้า 406-411)

## 8.5 สรุป

เคมีสิ่งแวดล้อมจะศึกษาแหล่งกำเนิดของสารมลพิษ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม และวิถีทางของสารเคมีรูปต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการกระทำของมนุษย์อันเนื่องมาจากความต้องการพื้นฐานและความต้องการความสะดวกสบายในด้านต่าง ๆ กระตุ้นให้มนุษย์พัฒนาความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และวิทยาการในการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างสะดวกสบายและง่ายยิ่งขึ้น อีกทั้งมีการพัฒนากระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการผลิตนี้เองที่ก่อให้เกิดของเสียสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ขยะสารเคมี สารกำจัดศัตรูพืช น้ำเสีย ฟุนละออง ควัน โลหะหนัก และผลของการบริโภคก็ทำให้เกิดของเสียกระจายสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ขยะมูลฝอย น้ำเสียจากการซักล้าง และฟุนควัน เหล่านี้ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ และมลพิษทางดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์หลายประการ เช่น การแปรปรวนของภูมิอากาศโลก การร่อยหรอของทรัพยากรธรรมชาติ ภัยพิบัติมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้น มลพิษสิ่งแวดล้อมขยายขอบเขตกว้างขวางมากขึ้น เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อ การดำรงอยู่และการมีคุณภาพชีวิตที่ดีของมนุษย์ ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว มนุษย์จึงต้องตระหนักถึงปัญหาร่วมกัน โดยศึกษาถึงลักษณะของปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้น ตลอดจนแสวงหาแนวทางในการแก้ปัญหาที่เป็นอยู่และป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระยะยาวอย่างรอบคอบ



## แบบฝึกหัดบทที่ 8

1. บรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ ประกอบด้วยแก๊สชนิดใด และมีความสำคัญกับการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างไร
2. ปรากฏการณ์เรือนกระจก คืออะไร และเกิดจากอะไร จงอธิบาย
3. การพิจารณาว่าแก๊สชนิดใดเป็นแก๊สเรือนกระจก พิจารณาจากสิ่งใด
4. ฝนกรด เกิดจากอะไร และมีผลอย่างไรต่อมนุษย์
5. ส്മ็อก คืออะไร เกิดจากอะไร และจะมีวิธีการแก้ไขอย่างไร
6. ค่า DO และค่า BOD คืออะไร มีความสัมพันธ์กันอย่างไร
7. น้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาลและน้ำทิ้งจากโรงงานถลุงแร่ โรงงานใดน่าจะมีน้ำทิ้งที่มีค่า BOD สูงกว่า จงให้เหตุผลประกอบ
8. ความกระด้างในน้ำเกิดจากสิ่งใด และมีวิธีการแก้ไขอย่างไร
9. จงอธิบายขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียชุมชนอย่างละเอียด
10. การทำน้ำประปามีวิธีการอย่างไร จงอธิบาย
11. สิ่งที่ทำให้เกิดมลพิษทางดินมีอะไรบ้าง จงอธิบาย
12. นักศึกษาจะมีวิธีการตรวจสอบดินที่ปลูกพืชไม่ได้ผลว่าเกิดจากสาเหตุใด ได้อย่างไร จงค้นคว้า และอธิบาย
13. จากข้อ 12. จะมีวิธีการแก้ไขให้ดินนั้นสามารถปลูกพืชได้อย่างไร จงค้นคว้า และอธิบาย
14. จงค้นคว้าและยกตัวอย่างชนิดของยาฆ่าศัตรูพืช อากาศเมื่อได้รับสารพิษ พร้อมกับวิธีการแก้ไขเมื่อได้รับสารพิษ

## เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2556). **มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค**. [ออนไลน์] จาก :  
[http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water01.html#s2](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html#s2) [25 ธันวาคม 2556].

การประปาส่วนภูมิภาค. (2557). **มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค**.  
[ออนไลน์] จาก : <http://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf>  
[2 มกราคม 2557].

จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดาอนุรักษ์. (2547). **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการ  
ประยุกต์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ. (2542). **เคมีประยุกต์**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์.

ทบวงมหาวิทยาลัย. (2524). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัทอักษรเจริญทัศน์ จำกัด.

ทบวงมหาวิทยาลัย. (2540). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัทอักษรเจริญทัศน์ จำกัด.

ทัศนีย์ ศรีเพชรพันธุ์. (2542). **เคมีสิ่งแวดล้อม**. เพชรบูรณ์ : สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์.

นภดล ไชยคำ. (2543). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล เอ็นเตอร์  
ไพรส์, อิงค์.

นัทธีรา สรรพณี. (2541). **เคมีสิ่งแวดล้อม**. นครปฐม : มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ประกาศกรมอนามัย เรื่อง คุณภาพน้ำประปา ปี พ.ศ. 2543.

ปราณี พันธุ์ลินชัย. (2542). **มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์เรือนแก้ว  
การพิมพ์.

พวงเพชร เสี่ยมแหลม. (2556). **ฝนกรด**. [ออนไลน์] จาก :

<https://www.l3nr.org/posts/298086> [21 ธันวาคม 2556].

พิมล เรียงวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิช. (2539). **เคมีสภาวะแวดล้อม**. กรุงเทพฯ :  
โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. (2557). **การขอความอนุเคราะห์การติดตั้งเครื่องกลเติมอากาศ**.

[ออนไลน์] จาก :

[http://www.chaipat.or.th/chaipat/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1](http://www.chaipat.or.th/chaipat/index.php?option=com_content&view=article&id=1)

185:chaipattana-water-turbine-development&catid=19&Itemid=1185

[1 มกราคม 2557].

มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย. (2554). **การสร้างกลุ่มความร่วมมือสีเขียว เพื่อพัฒนาสายใยการ  
ผลิตผลิตภัณฑ์สู่ตลาดผลิตภัณฑ์สีเขียว.** กรุงเทพฯ : บริษัทแสงสว่างเวิลด์เพรส  
จำกัด.

วรรณภา กาญจนมยุร. (2545). **เคมีอุตสาหกรรม.** ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2557). **นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter4/>

[4 มกราคม 2557].

สมพงษ์ เลียงโรคาพาธ. (2556). **สภาพแวดล้อมอวกาศและผลกระทบต่อดาวเทียม.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=environ>

[17 ธันวาคม 2556].

Actom Ltd. (2013). **Packed Tower.** [online] Available :

[http://www.actomapc.co.za/products\\_wetscrubbers\\_pt.php](http://www.actomapc.co.za/products_wetscrubbers_pt.php) [23 December 2013].

Goyal, I. (2013). **What is photochemical smog??** [online] Available :

<http://www.meritnation.com/ask-answer/question/what-is-photochemical-smog/environmental-chemistry/2127195> [21 December 2013].

Gregory Thompson, E. (2013). **Hemoglobin.** [online] Available :

<http://www.webmd.com/a-to-z-guides/hemoglobin> [19 December 2013].

Magnabiz Corporation. (2013). **Pollution Control System.** [online] Available :

<http://www.magnabiz.com/battery/pollution.htm> [23 December 2013].

Nice, K. and Bryant, C.W. (2013). **How Catalytic Converters Work.** [online] Available :

<http://auto.howstuffworks.com/catalytic-converter1.htm> [23 December 2013].

Ray, B.T. (2013). **Air Pollution and Control.** [online] Available :

[http://civil.engr.siu.edu/3011\\_Ray/he\\_air.htm](http://civil.engr.siu.edu/3011_Ray/he_air.htm) [23 December 2013].

Stimac, J.P. (2013). **Origin of the Earth's Atmosphere.** [online] Available :

[http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos\\_origin.html](http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos_origin.html) [17 December 2013].

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 9

### เนื้อหาประจำบท

บทที่ 9 เคมีสีเขียว

9.1 ที่มาของเคมีสีเขียว

9.2 หลักการของเคมีสีเขียว

9.3 ปฏิกริยาเคมีสีเขียว

9.4 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตที่นำหลักการของเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้

9.4.1 การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์และปรับปรุงกระบวนการผลิต

เครื่องปรับอากาศ

9.4.2 การใช้พลาสติกชีวภาพสำหรับกระบวนการผลิต

9.4.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ

9.4.4 การผลิตสารเคมีที่มีคุณค่าจากสิ่งเหลือใช้

9.4.5 การเพิ่มมูลค่าจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการทางเคมี

### จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อได้ศึกษาบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. บอกหลักการของเคมีสีเขียวได้
2. ชี้แจงและสรุปความสำคัญของเคมีสีเขียวได้

### กิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ผู้สอนให้นักศึกษาอ่านเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 9 เรื่องเคมีสีเขียวมาก่อนล่วงหน้า
2. ผู้สอนบรรยาย
3. เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้อภิปรายและซักถาม
4. ให้นักศึกษารวมกลุ่มเพื่อทำแบบฝึกหัดท้ายบทในคาบเรียน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 บทที่ 9 เรื่องเคมีสีเขียว
2. PowerPoint สรุปเนื้อหาสำคัญของแต่ละหัวข้อในบทที่ 9

### การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากการตอบและซักถามของนักศึกษา
2. จากการทำแบบฝึกหัดของนักศึกษา
3. จากผลการสอบของนักศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทที่ 9

### เคมีสีเขียว

เคมีสีเขียว (green chemistry) คือ การประยุกต์ใช้หลักการพื้นฐานที่คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้สารเคมี การใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด รวมทั้งคำนึงถึงการป้องกันหรือลดการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการในการเลือกใช้วัตถุดิบ การวางแผนและการออกแบบการผลิต และการใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสม กล่าวง่าย ๆ ว่าหลักสำคัญของเคมีสีเขียว คือ การใช้สารเคมีในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจะต้องคำนึงและระลึกเสมอว่าสารเคมีชนิดนั้นต้องไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเคมีสีเขียวจะให้ความสำคัญกับการป้องกันที่ต้นเหตุมากกว่าการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ

เคมีสีเขียวต่างจากเคมีสิ่งแวดล้อมตรงที่จะศึกษาถึงสาเหตุ แหล่งที่มา ปฏิกริยาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทาง อากาศ ดิน และ น้ำ รวมถึงผลกระทบต่อกิจกรรมในการดำรงชีวิตของมนุษย์ อันเนื่องมาจากกระบวนการสังเคราะห์สารหรือใช้สารเคมีในลักษณะต่าง ๆ เพื่อออกแบบกระบวนการสังเคราะห์วัสดุหรือสารเคมี โดยการลดหรือหลีกเลี่ยงการใช้หรือสังเคราะห์สารที่ก่อให้เกิดอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นกระบวนการหรือขั้นตอนทางเคมีรวมถึงการวางแผนการปฏิบัติการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุด

ในบทนี้จะกล่าวถึงเคมีสีเขียว ซึ่งเป็นบทสุดท้ายของเอกสารประกอบการสอนวิชาเคมี 2 โดยมีเนื้อหาเกี่ยวกับหลักการของเคมีสีเขียว แนวทางปฏิบัติของเคมีสีเขียว และตัวอย่างของกระบวนการผลิตที่นำเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เพื่อให้นักศึกษาได้ตระหนักและเล็งเห็นถึงความสำคัญของเคมีสีเขียว โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะส่งผลให้นักศึกษาเป็นนักวิทยาศาสตร์สีเขียว ที่ลดการใช้สารเคมีอันตราย ลดการสร้างขยะ และใช้ความรู้ทางด้านเคมีอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคต



## 9.1 ที่มาของเคมีสีเขียว

เคมีสีเขียวเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากพบว่าในกระบวนการผลิตหรือกิจกรรมต่าง ๆ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมล้วนนำสารเคมีมาใช้ทั้งสิ้น ไม่ว่าจะใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นหรือใช้ประกอบกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น ด้านการแพทย์ สารเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ในเรื่องของการผลิตยา ด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผลิตไนลอน เรยอน และพอลิเอสเตอร์ ด้านการเกษตร เกี่ยวข้องกับการผลิตปุ๋ยหรือยาฆ่าแมลง เป็นต้น ถึงแม้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมที่หลากหลายเหล่านี้จะมีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ แต่สารเคมีและขั้นตอนที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้ในระยะยาว ดังนั้นจึงมีการรณรงค์ให้เกิดความใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นที่มาของเคมีสีเขียว โดยการลดหรือหลีกเลี่ยงการใช้หรือสังเคราะห์สารที่ก่อให้เกิดอันตราย และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

## 9.2 หลักการของเคมีสีเขียว

เคมีสีเขียวสามารถสอดแทรกอยู่ได้ในเคมีแขนงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น อินทรีย์เคมี (organic chemistry) อนินทรีย์เคมี (inorganic chemistry) ชีวเคมี (biochemistry) เคมีชีวภาพ (chemical biology) เคมีวิเคราะห์ (analytical chemistry) หรือแม้แต่เคมีเชิงฟิสิกส์ (physical chemistry) ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้กระบวนการทางเคมีในแขนงต่าง ๆ เช่น ปิโตรเคมี พอลิเมอร์ ยา เครื่องสำอาง และนาโนเทคโนโลยี เป็นต้น ทั้งนี้ด้วยวัตถุประสงค์อันเป็นจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือการทำให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุด แต่เพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพของกระบวนการผลิตและสังเคราะห์ ตลอดจนการนำไปใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด ซึ่ง Paul Anastas และ John C. Warner ได้คิดหลักการของการพัฒนาเคมีสีเขียวไว้ทั้งหมด 12 ข้อ (นพพร ทัศน, 2556) ดังนี้

9.2.1 ป้องกันการเกิดของเสีย (prevent waste) โดยการออกแบบกระบวนการการสังเคราะห์ที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียเพื่อจะได้ไม่ต้องมีการกำจัดในภายหลัง

9.2.2 ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ (design safer chemicals and products) เพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยไม่มีพิษหรือมีพิษน้อยที่สุด

9.2.3 ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นอันตราย (design less hazardous chemical synthesis) โดยการใช้ หรือสังเคราะห์สารที่เป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

9.2.4 การใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (use renewable feedstock) ซึ่งรวมถึงการใช้วัสดุเหลือใช้หรือทิ้งแล้วจากกระบวนการอื่น ๆ

9.2.5 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (utilize catalysts) ที่มีประสิทธิภาพ และหลีกเลี่ยงการใช้สารทำปฏิกิริยาในปริมาณมาก เพราะปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดของเสียในปริมาณที่น้อยกว่าและสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งในปฏิกิริยาแบบเดียวกัน ในขณะที่ปฏิกิริยาแบบที่มีการใช้สารในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าที่กำหนดในปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric equivalent) ของสารตั้งต้น มักจะทำให้เกิดของเสียในปริมาณที่มากและใช้ได้เพียงครั้งเดียว

9.2.6 หลีกเลี่ยงการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น (avoid chemical derivatives) เช่น การใส่หมู่ป้องกัน (protecting groups) ที่ต้องมีการเอาออกในภายหลัง ทั้งนี้ขั้นตอนการใส่หมู่ป้องกันและการเอาออก อาจจะเป็นการสร้างของเสียขึ้นมาได้

9.2.7 ทำปฏิกิริยาที่ให้มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด (maximize atom economy) โดยการออกแบบกระบวนการที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด และให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการน้อยที่สุด หรือสูญเสียมวลสารตั้งต้นไปเป็นสารอย่างอื่นที่ไม่ต้องการน้อยที่สุด

9.2.8 ใช้ตัวทำละลายและกระบวนการที่ปลอดภัย (use safer solvents and reaction conditions) ตัวทำละลายที่ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์เหลว และตัวทำละลายมีประจุ (ionic liquids) ในขณะที่ตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนมากไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการใช้สภาวะที่รุนแรง เป็นพิษ มีกรดหรือด่างรุนแรง ถือเป็นปัจจัยที่ควรหลีกเลี่ยงของเคมีสีเขียว

9.2.9 เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน (increase energy efficiency) เช่น การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ แต่ภายใต้สภาวะความดันสูง จะช่วยลดการใช้พลังงานลงได้

9.2.10 การออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วย่อยสลายได้ (design chemicals and products to degrade after use) ภายหลังจากใช้งานผลิตภัณฑ์ หรือสารที่ได้จากกิจกรรมนั้น ๆ จะต้องมีการสลายตัวในภาพที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่สะสมในสิ่งแวดล้อม

9.2.11 มีกระบวนการวิเคราะห์แบบทันทีเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะ (analyze in real time to prevent pollution) จากผลข้างเคียงของปฏิกิริยา โดยการตรวจสอบและควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตจนเสร็จสิ้น เพื่อลดหรือจำกัดการเกิดผลข้างเคียงของปฏิกิริยา

9.2.12 ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ (minimize the potential for accidents) โดยการออกแบบและควบคุมปฏิกิริยาไม่ว่าอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เพื่อป้องกันมิให้เกิดการระเบิด ลุกติดไฟหรือถูกปลดปล่อยสู่ธรรมชาติ

โดยสรุปจากหลักการทั้งหมดสามารถมองเป็นภาพกว้าง ๆ และครอบคลุมหัวใจหลักของเคมีสีเขียว ได้ดังนี้

- (1) การออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้ได้ผลผลิตมากที่สุด
- (2) การเลือกใช้กระบวนการที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- (3) การออกแบบและเลือกใช้กระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

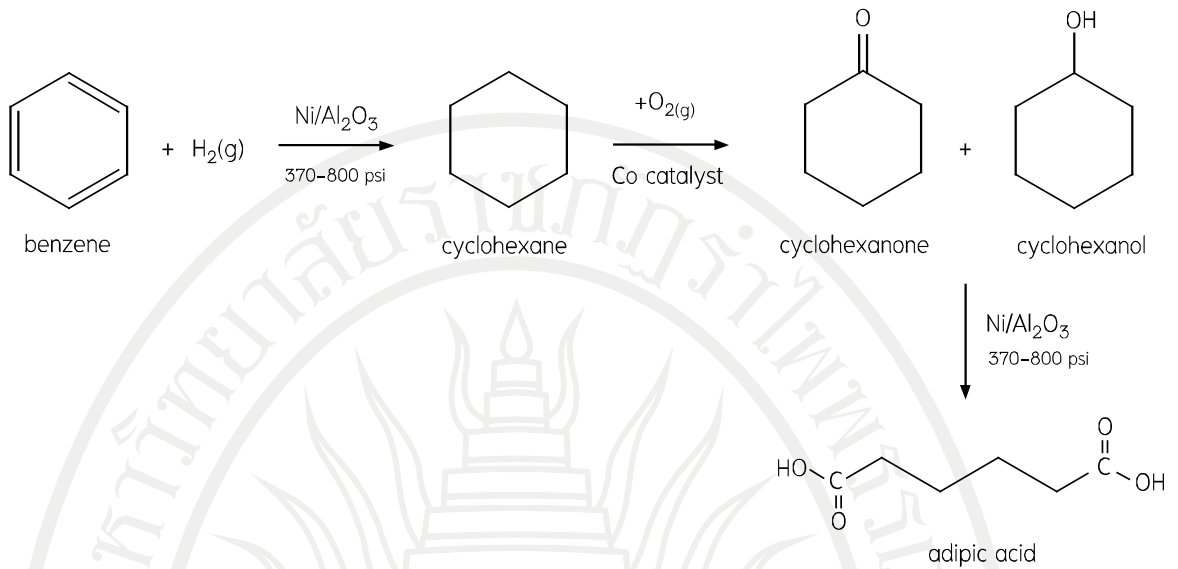
สูงสุด

- (4) สิ่งที่ดีที่สุดของการจัดการของเสียคือการไม่สร้างของเสีย

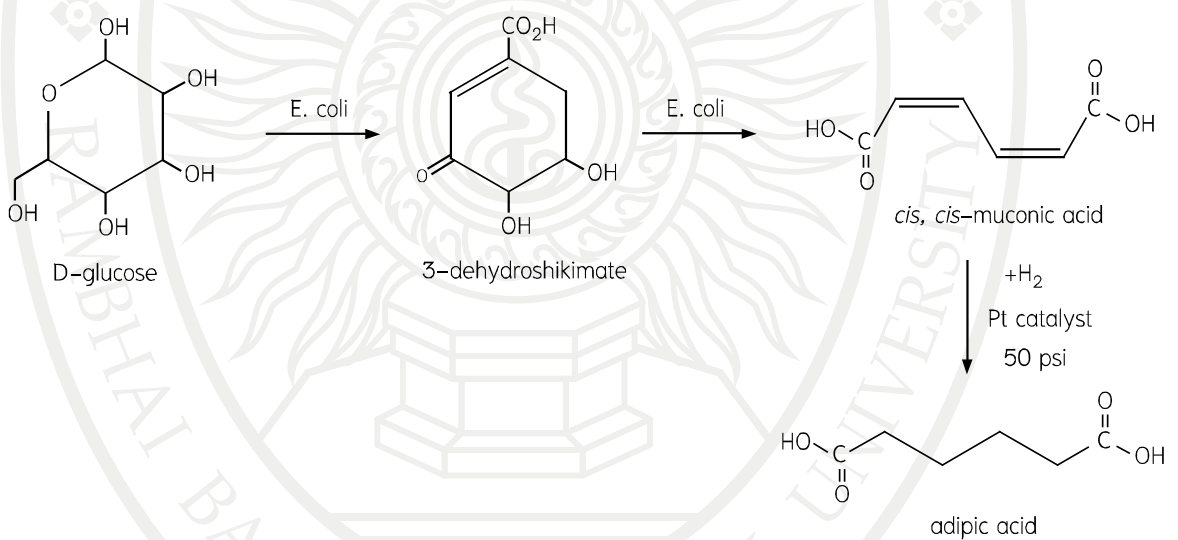
### 9.3 ปฏิกริยาเคมีสีเขียว

ปฏิกริยาเคมีที่ใช้หลักการของเคมีสีเขียวจะใช้สารตั้งต้นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการสังเคราะห์สารเคมีต่าง ๆ ซึ่งแต่เดิมผลิตขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่มีความเป็นพิษ หรือเป็นกระบวนการผลิตที่มีการปล่อยสารพิษ หรือใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษและทำลายสิ่งแวดล้อม ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างของปฏิกริยาเคมีที่แต่เดิมใช้สารตั้งต้นที่เป็นพิษ แต่ปัจจุบันมีกระบวนการอื่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งการใช้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกริยาที่ไม่เป็นพิษ ดังนี้

การสังเคราะห์กรดอะดิพิค (adipic acid) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตไนลอน แต่เดิมใช้เบนซีน ( $C_6H_6$ ) ซึ่งเป็นสารพิษที่ก่อมะเร็งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 9.1 แต่ปัจจุบันสามารถใช้กระบวนการทางชีวภาพมาสังเคราะห์ โดยใช้กลูโคสแทนเบนซีน ดังแสดงในภาพที่ 9.2 อีกทั้งวิธีการใหม่นี้ยังใช้น้ำเป็นตัวทำละลายแทนการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ จึงมีความปลอดภัย และไม่สร้างสารระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อม (ศุภวรรณ ต้นตยานนท์, 2554, หน้า 106–107)

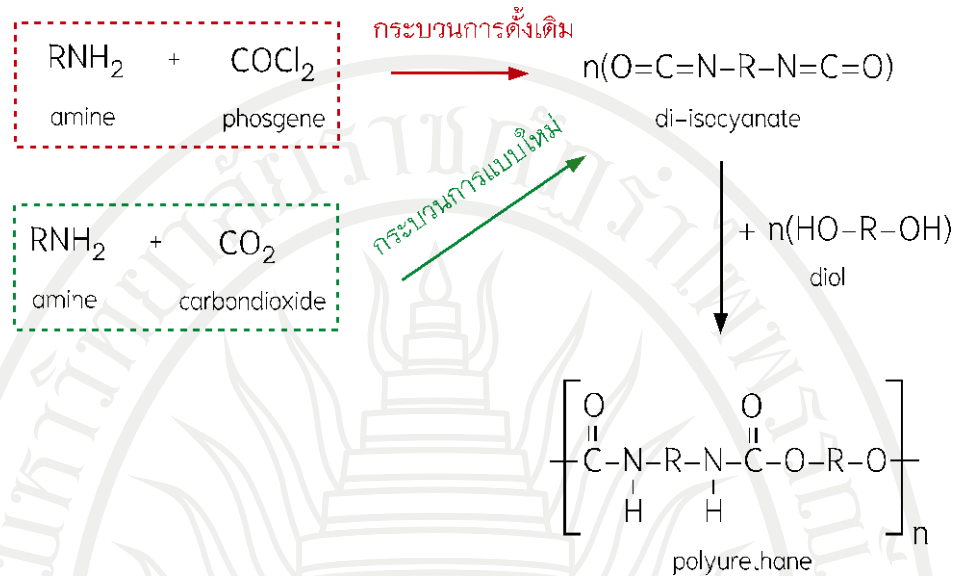


ภาพที่ 9.1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์กรดอะดิพิคจากเบนซีน



ภาพที่ 9.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์กรดอะดิพิคจากกลูโคส

การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน (polyurethane) ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์เป็นโฟม กาว หรือเป็นวัสดุเคลือบผิวเครื่องบิน เคลือบโลหะ ไม้ และอิฐ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและสารเคมี แต่เดิมถูกสังเคราะห์ขึ้นมา โดยใช้สารตั้งต้นชนิดหนึ่งคือฟอสจีน (phosgene; COCl<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นแก๊สพิษรุนแรง ทำปฏิกิริยากับเอมีน ดังแสดงในภาพที่ 9.3 แต่ปัจจุบันสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ฟอสจีน (ศุภวรรณ ตันตยานนท์, 2554, หน้า 114-115)



ภาพที่ 9.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

#### 9.4 ตัวอย่างของกระบวนการผลิตที่นำหลักการของเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้

ปัจจุบันแนวความคิดของเคมีสีเขียว เป็นที่สนใจของอุตสาหกรรมหลายประเภท ทั้งที่ใช้สารเคมีและไม่ใช้สารเคมี เพราะสามารถลดต้นทุนการผลิต ลดต้นทุนในการบำบัดของเสีย และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ได้จริง รวมทั้งยังสร้างกระแสการตื่นตัวในเรื่องการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือผลิตภัณฑ์สีเขียว โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้ว และสร้างความตระหนักให้แก่ภาคอุตสาหกรรมที่จะต้องมีความรู้ความสามารถในการออกแบบและสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือเอื้อต่อการรีไซเคิล (มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย, 2554, หน้า 2) นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยรุ่นใหม่ให้ความสำคัญกับงานวิจัยทางด้านเคมีสีเขียว ด้วยการลดพลังงาน ลดการปล่อยสารพิษ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การปรับปรุงกระบวนการผลิต และอื่น ๆ ดังตัวอย่างอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่อไปนี้

##### 9.4.1 การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์และปรับปรุงกระบวนการผลิตเครื่องปรับอากาศ

###### อากาศ

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (carbon footprint) คือ ปริมาณแก๊สเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และกลุ่มสารจำพวกคลอโรฟลูออโรคาร์บอน) ที่ปล่อยออกมาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น โดยแก๊สเรือนกระจกสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้วัตถุดิบและพลังงานทุกประเภท กระบวนการเผาไหม้ ปฏิกิริยาเคมี



การสูญเสียและรั่วไหลของน้ำยาทำความเย็น การขนส่งทุกประเภท การแปรรูปและกระบวนการผลิตทางการเกษตร รวมทั้งของเสียและการจัดการของเสีย เป็นต้น (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์, 2554, หน้า 11) การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ใช้นาฬิกาในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย, 2554, หน้า 95)

พรจันท์ เปี่ยมอรุณ (2556) ได้ปรับปรุงและออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกชนิด high impact polystyrene ของเครื่องปรับอากาศยี่ห้อหนึ่ง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป GABI 5 โดยทำการเปรียบเทียบการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของชิ้นส่วนพลาสติกจากกระบวนการผลิตเครื่องปรับอากาศ 2 รุ่น ซึ่งพบว่าน้ำหนักของพลาสติกมีผลต่อปริมาณแก๊สเรือนกระจก พลาสติกที่มีน้ำหนักมากกว่าจะปล่อยแก๊สเรือนกระจกมากกว่าพลาสติกที่มีน้ำหนักน้อย ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบชิ้นส่วนใหม่เพื่อลดน้ำหนัก ด้วยการรวมชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยไม่กระทบต่อหน้าที่หลัก และมีข้อดีคือลดขั้นตอนจากกระบวนการผลิตลงได้ นอกจากนี้หากเปลี่ยนชนิดพลาสติกมาใช้พลาสติกชีวภาพ (bio plastic) พบว่าสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพิ่มเติมได้อีก 20% (ยังไม่เปิดเผยชนิด เพราะเป็นความลับทางการค้า)

#### 9.4.2 การใช้พลาสติกชีวภาพสำหรับกระบวนการผลิต

พลาสติกชีวภาพ (bio plastic) คือ พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพืช ทำให้สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ จึงช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพได้มีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส คอလာเจน แป้ง และโปรตีนจากถั่ว เป็นต้น แต่วัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพมากที่สุด คือ แป้ง เพราะสามารถผลิตได้จากพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ซึ่งพืชเหล่านี้เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกกันมาก หาได้ง่ายและมีราคาถูก แต่พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งมักจะมีข้อจำกัดเพราะจะเกิดการพองตัวและเสียรูปร่างเมื่อได้รับความชื้น (เยาวภา สุวัทธิ, 2554, หน้า 2-3) โดยพลาสติกชีวภาพ แป้งได้เป็น 3 ชนิด คือ

(1) กรดพอลิแลคติก (polylactic acid; PLA) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PLA ได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลและใช้กระบวนการหมักด้วยแบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้เป็น กรดแลคติก (lactic acid) และนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี



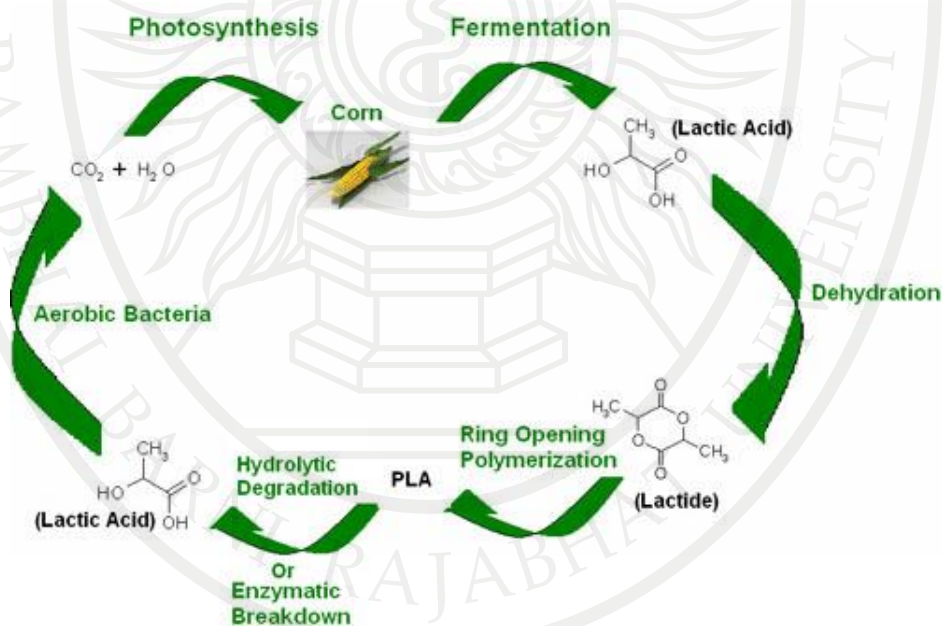
เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นสายยาว ซึ่ง PLA มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความใส ไม่ถูกย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน

(2) พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates; PHAs)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PHAs ก็คือ ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย โดยกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลด้วยแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลให้เป็น PHAs โดย PHAs มีคุณสมบัติในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม สามารถฉีกและเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ

(3) โพรเพนไดออล (propanediol; PDO) ผลิตได้จากข้าวโพดและมันสำปะหลัง โดยเกิดจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลด้วยแบคทีเรีย และเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็น PDO ด้วยเอนไซม์ ซึ่งจะใช้ PDO เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยชีวภาพในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเส้นใยที่ได้จะมีความยืดหยุ่นได้ดี มีความอ่อนนุ่ม แห้งเร็ว และย่อยสลายได้ดี

วงจรชีวิตของพลาสติกชีวภาพตั้งแต่การผลิตจนถึงการย่อยสลาย และถูกพืชนำกลับมาใช้ใหม่ (ยกตัวอย่างเฉพาะกรดพอลิแลคติก) แสดงในภาพที่ 9.4 ดังนี้



ภาพที่ 9.4 วงจรชีวิตตั้งแต่การผลิตจนถึงการย่อยสลายของกรดพอลิแลคติก

(ที่มา : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2556)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

สำหรับประเทศไทย ซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ด้านชีวมวล (biomass) และมีวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ได้แก่ มันสำปะหลัง และอ้อย ทั้งนี้ในปัจจุบันประเทศไทยผลิตหัวมันสดเป็นอันดับ 3 ของโลก และส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยในปี 2548 มีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังกว่า 6.6 ล้านไร่ และมีการผลิตหัวมันสดได้กว่า 20 ล้านตันต่อปี (ประภาส ช่างเหล็ก สุตประสงค์ สุวรรณเลิศ และสกล ฉายศรี, 2556) ทำให้มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการพัฒนาและส่งเสริมให้มีการผลิตพลาสติกชีวภาพในประเทศไทย รวมทั้งสนับสนุนให้มีการวิจัยเพื่อใช้พืชหรือวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตแทนพลาสติกทั่วไป โดยที่สามารถใช้ประโยชน์ ได้ดีเหมือนกัน ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ปัจจุบันบริษัทแคนนอนร่วมมือกับบริษัทโทเร พัฒนาชิ้นส่วนพลาสติกชีวภาพขนาดใหญ่ ทั้งยังมีอัตราการทนไฟสูง โดยจะใช้ประกอบเป็นเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์มัลติฟังก์ชันใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยผลิตได้ในอุตสาหกรรม (กรุงเทพฯธุรกิจ, 2553) โดยใหญ่กว่าถึง 11 เท่า แต่มีน้ำหนักที่มากกว่าเพียง 6.5 เท่า ในระดับชิ้นส่วนที่มีระดับการทนไฟในมาตรฐานเดียวกัน ตัววัสดุมีขนาด 640x440 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 1,100 กรัม และผ่านโปรแกรมการทดสอบคุณสมบัติการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 สามารถทนความร้อนจากการลวกของแบริ่งไฟได้ในระดับคุณภาพ 5V โดยวัสดุที่ได้นี้ จะถูกนำไปประกอบเป็นวัสดุภายนอกของเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์มัลติฟังก์ชันเพื่อใช้ในสำนักงานต่าง ๆ ซึ่งถึงแม้ว่าการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวจะมีความยุ่งยากทางด้านเทคโนโลยีของการขึ้นรูปแบบพิมพ์และปัจจัยอื่น ๆ ในการผลิตชิ้นส่วนให้มีขนาดใหญ่ แต่การผลิตก็ยังคงสามารถรักษาประสิทธิภาพของวัสดุภายนอกให้มีความแข็งแรง ทนทาน และทนไฟได้ในระดับสูงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุดังกล่าว ทำให้พลาสติกชีวภาพนี้ ได้ถูกนำมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบภายนอกของอุปกรณ์เครื่องใช้สำนักงานอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ผู้ผลิตปัจจุบันต้องการ

นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพมักจะถูกผลิตขึ้นตามความต้องการของการใช้งาน โดยมองความคุ้มค่าทางธุรกิจ คือลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพออกสู่ท้องตลาดหลายชนิด (เขาวภา สุวัตติ, 2554, หน้า 2-3) เช่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

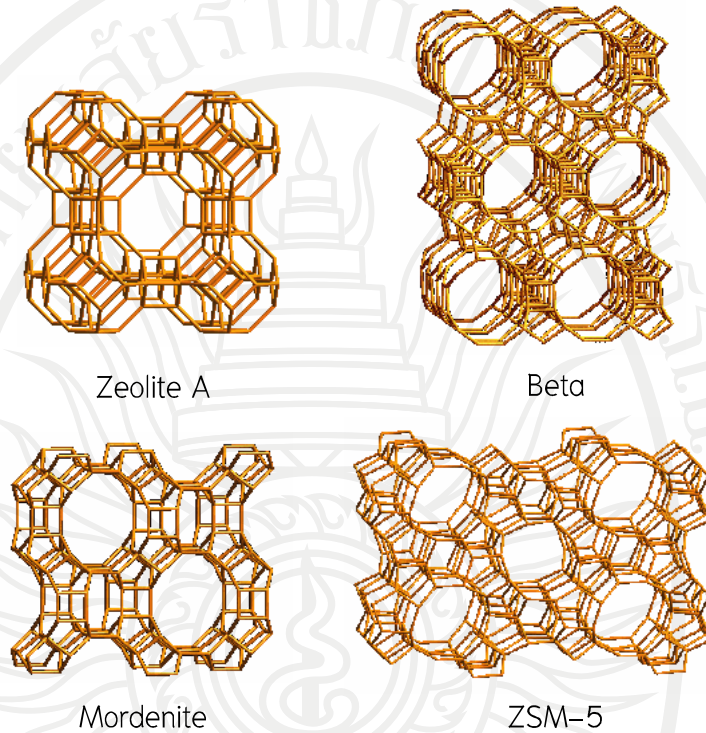
- (1) ฤกษ์ชะพลาสติกที่ย่อยสลายตัวได้ ใช้สำหรับบรรจุขยะอินทรีย์ในครัวเรือนและถุงหูหิ้วพลาสติกที่ใช้ใส่ของ ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้มีประโยชน์คือ สามารถย่อยสลายได้ไปพร้อมกับขยะและลดระยะเวลาของการฝังกลบขยะได้
- (2) พลาสติกคลุมดิน และวัสดุทางการเกษตร พลาสติกคลุมดินจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเพาะปลูกทั้งในด้านแรงงานและการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในดิน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปผลิตถุงหรือกระถางปลูกต้นไม้ได้
- (3) พลาสติกชีวภาพที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานจัดเลี้ยงหรือบรรจุภัณฑ์สำหรับขนมขบเคี้ยวต่าง ๆ เพราะผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้เป็นแบบใช้แล้วทิ้งไป เช่น ถาดใส่อาหาร แก้ว จาน เป็นต้น
- (4) บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดฟิล์มใช้สำหรับบรรจุอาหาร ซึ่งมีทั้งบรรจุภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานที่สั้น แต่ต้องการความสวยงามในการนำเสนอต่อลูกค้าและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เช่น ตาข่ายและถาดสำหรับใส่เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้
- (5) บรรจุภัณฑ์ประเภทขวดน้ำ ซึ่งจะทำจากพลาสติกกลุ่มกรดพอลิแลคติกที่ใช้งานสำหรับบรรจุเครื่องดื่มที่ไม่ผสมโซดาและผลิตภัณฑ์จำพวกนมต่าง ๆ

#### 9.4.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาในรูปเดิมและปริมาณเท่าเดิม หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาลิ้นสุด (ดูหัวข้อ 4.12) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพที่สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นให้กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ได้มากที่สุดกำลังเป็นที่สนใจของอุตสาหกรรมหลายชนิด โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพราะสามารถลดความเสี่ยงของสารตั้งต้น ลดกรรมวิธีในการกำจัดหรือบำบัดของเสีย/สารที่ไม่ต้องการจากปฏิกิริยาลงได้ โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่าซีโอไลต์ (zeolite) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นผลึกของแข็งและมีรูพรุนอยู่ภายใน โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดคือ  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  โดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน การที่มี  $\text{Al}^{3+}$  กระจายปะปนกับ  $\text{Si}^{4+}$  ในโครงสร้างของซีโอไลต์ จะทำให้เกิดประจุลบขึ้นเท่ากับจำนวนอะตอมของ Al ดังนั้นจึงต้องมีไอออนบวกมาดุลประจุลบที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นไอออนบวกของโลหะ เช่น หาก M คือไอออนบวกของโลหะหมู่ 1 จะได้สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ  $\text{M}_x(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (จตุพร วิทยาคูณ และ นุรักษ์ กฤษดาอนุรักษ์, 2547, หน้า 146)

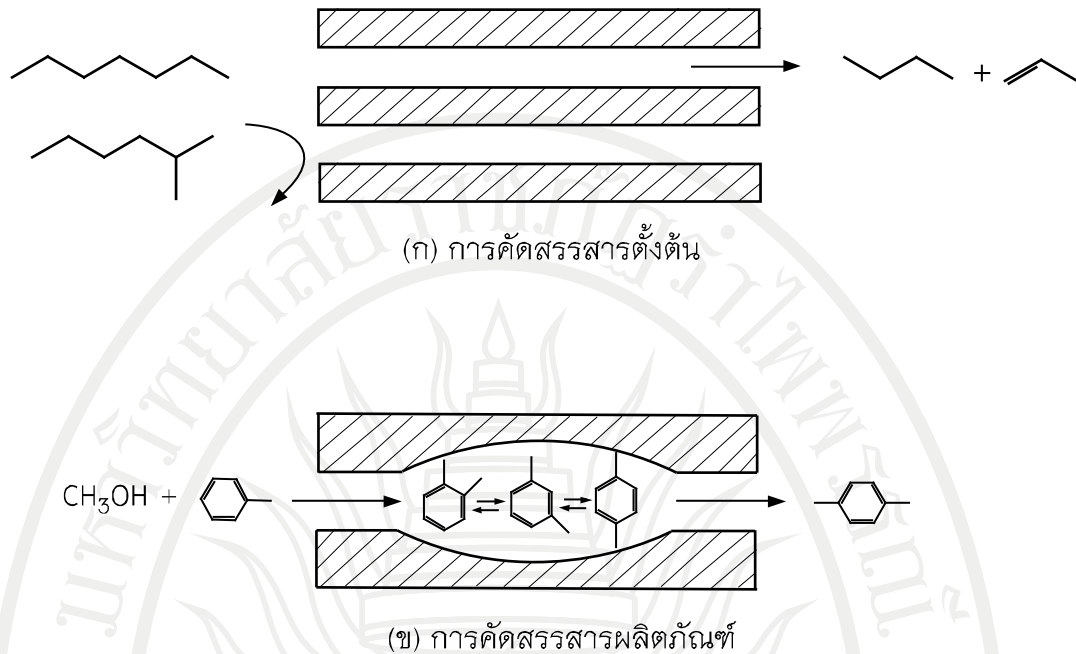
การรวมตัวกันของ  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนได้หลายแบบ ซีโอไลต์จึงมีหลายชนิด มีขนาดรูพรุนได้ตั้งแต่ 3-10 อังสตรอม (Å) ดังแสดงในภาพที่ 9.5



ภาพที่ 9.5 โครงสร้างของซีโอไลต์บางชนิด

การที่ซีโอไลต์มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ภายใน ทำให้ซีโอไลต์ 1 กรัมอาจมีพื้นที่ผิวสูงถึง 500 ตารางเมตร ทำให้เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของโพรงที่มีลักษณะเฉพาะตัว ทำให้เมื่อนำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจะมีความสามารถในการคัดสรรสารตั้งต้นที่เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่าโพรงจะไม่สามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนได้ ดังแสดงในภาพที่ 9.6(ก) อีกทั้งยังสามารถคัดสรรสารผลิตภัณฑ์ โดยจะให้สารผลิตภัณฑ์ที่สามารถหลุดลอดออกจากโพรงได้เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 9.6(ข)





ภาพที่ 9.6 คุณสมบัติด้านการคัดสรรของซีโอไลต์

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิต อัลเคนจากไฮโดรคาร์บอนสายยาวด้วยกระบวนการ hydrocracking ผลิตอัลซีนจากอัลเคนด้วยกระบวนการ dehydrogenation ผลิตอะโรมาติกส์ (BTX) จากอัลเคน และอัลซีนด้วยกระบวนการ aromatization ผลิตไฮโดรคาร์บอนจากแอลกอฮอล์ด้วยกระบวนการ dehydration เป็นต้น

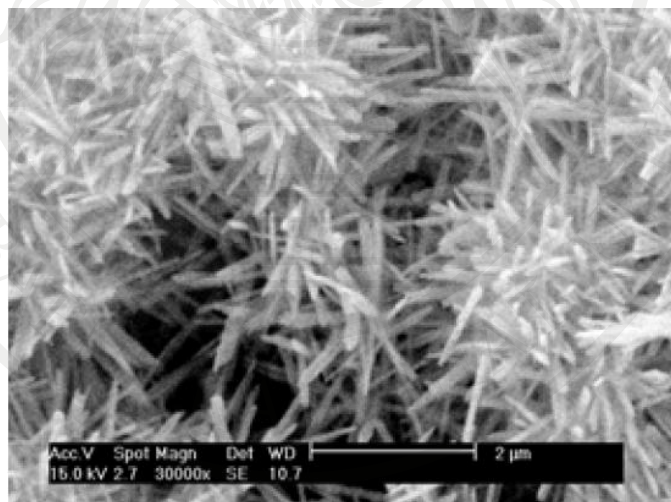
#### 9.4.4 การผลิตสารเคมีที่มีคุณค่าจากสิ่งเหลือใช้

จากประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ รวมถึงสารที่มีรูพรุนชนิดต่าง ๆ เช่น วัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ส (ขนาดรูพรุน 20–500 อังสตรอม) และถ่านกัมมันต์ ทำให้สารเหล่านี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมอย่างมาก โดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุดูดซับ และใช้แลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น การนำกากของเสียที่มีองค์ประกอบของ Si หรือ Al เช่น ถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำแกลบ และโคโคซาน ซึ่งมีราคาถูกและหาได้ง่ายภายในประเทศ มาใช้ทดแทนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มมูลค่าจากสิ่งเหลือใช้ จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจ

ถ้ำลอยถ่านหิน ในประเทศไทยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์สำหรับนำความร้อนมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ที่โรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง แต่เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ เมื่อเผาถ่านหินจึงได้ถ้ำลอยปริมาณสูงถึง 30–35% ของ

น้ำหนักถ่านหิน และมีปริมาณสะสมเพิ่มมากขึ้นทุกวัน แก้วลอยมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สายฝน หาญโยธีและเมตตา เจริญพานิช (2547) จึงได้ทำการวิจัยเพื่อเปลี่ยนแก้วลอยให้เป็นซีโอไลต์ชนิดที่มีคุณค่าเชิงพาณิชย์ เช่น ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยทำการสกัดแยกสารประกอบเหล็กด้วยกรดออกจากแก้วลอย เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งพบว่าหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่อุณหภูมิและความดันสูง ( $210^\circ\text{C}$ , 4 atm) จะได้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สูงสุด 87.6% จากการสกัดเอาเหล็กออกไซด์ออกด้วยกรดเกลือ 3.5 โมล/ลิตร

แก้วแกลบเป็นแหล่งที่มีของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มีความบริสุทธิ์สูง นักวิจัยจีระวัฒน์ พันธนิตย และไพศาล คงคาฉุยฉาย (2550) จึงได้นำแก้วแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส มาผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาจากแก้วแกลบต่อสารละลายซิลิกาเท่ากับ 50 อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 21.2 และอัตราส่วนโดยโมลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 7.9 สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 ได้ 100% ผลึกที่ได้มีรูปร่างคล้ายเข็ม (ดังแสดงในภาพที่ 9.7) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 469 ตารางเมตร ตอกรัม และมีขนาดรัศมีรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 5.3 Å



ภาพที่ 9.7 Scanning Electron Micrograph (SEM) ของซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 (ที่มา : จีระวัฒน์ พันธนิตย และไพศาล คงคาฉุยฉาย, 2550)



#### 9.4.5 การเพิ่มมูลค่าจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการทางเคมี

การพัฒนาพลังงานอย่างมีคุณภาพควบคู่ไปกับการดูแลสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญต่อการพัฒนาพลังงานอย่างยั่งยืน ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกันกับเคมีสีเขียว จากแนวโน้มปัญหาความผันผวนของราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกที่พุ่งตัวสูงขึ้นเป็นประวัติการณ์ในปี 2551 ถึงปี 2553 ได้ส่งผลกระทบต่อสถานการณ์พลังงานและความมั่นคงทางเศรษฐกิจ ในขณะเดียวกันก็มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ขยะพลาสติกส่วนใหญ่จะเข้าสู่กระบวนการทำลายด้วยวิธีฝังกลบและการเผา ซึ่งพบว่าเกิดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกมาระหว่างการกำจัดซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นจึงมีการศึกษาการเพิ่มคุณค่าของขยะพลาสติก โดยทำการสลายพลาสติกด้วยความร้อนและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในที่อับอากาศ เรียกว่า ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ เช่น มีเทน อีเทน เอทิลีน โพรเพน โพรพิลีน บิวเทน บิวทีน กลุ่มน้ำมันเบนซิน ( $C_5-C_{12}$ ) และกลุ่มสารอะโรมาติก (BTX) เป็นต้น (Boonsueb Sontayamarn, 2008)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 400–600 องศาเซลเซียส) ทำให้จำเป็นต้องป้องกันความร้อนให้แก่ปฏิกิริยา เฉลิมพล พุ่งธรรมสารและคณะ (2551) จึงได้ทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับการออกซิเดชันบางส่วนของพลาสติกเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยการป้องกันอากาศปริมาณจำกัดเข้าไปร่วมทำปฏิกิริยาด้วย โดยแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในอากาศจะไปทำปฏิกิริยาสันดาปกับพลาสติกบางส่วน (partial oxidation) และคายความร้อนออกมาทดแทนความร้อนที่ต้องใช้ในการทำไพโรไลซิสได้ ซึ่งพบว่าช่วยลดปริมาณพลังงานความร้อนที่ป้อนให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสลงได้โดยที่ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาในที่อับอากาศ

## 9.5 สรุป

เคมีสีเขียวใช้หลักการพื้นฐานที่คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้สารเคมี การใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด โดยมีหลักการ 12 ข้อ ได้แก่ ป้องกันการเกิดของเสีย ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นอันตราย การใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยงการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น ทำปฏิกิริยาที่ให้มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด ใช้ตัวทำละลายและกระบวนการที่ปลอดภัย เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน การออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วย่อยสลายได้ มีกระบวนการวิเคราะห์แบบทันทีเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะ และลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ รวมทั้งคำนึงถึงการป้องกันและลดการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการในการเลือกใช้วัตถุดิบ การวางแผนและการออกแบบการผลิต การใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสม และการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิต เช่น ใช้ปฏิกิริยาเคมีตามหลักการของเคมีสีเขียว การลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต การใช้พลาสติกชีวภาพในกระบวนการผลิต การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติในการคัดสรรทั้งสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ การผลิตสารเคมีที่มีคุณค่าจากสิ่งเหลือใช้ และการเพิ่มมูลค่าจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นการใช้สารเคมีในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจะต้องคำนึงและตระหนักว่าสารเคมีชนิดนั้นต้องไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ด้วยหลักการของเคมีสีเขียวที่ลดการใช้สารเคมีอันตราย ลดการสร้างขยะ และใช้ความรู้ทางด้านเคมีอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทำให้เป็นที่เชื่อมั่นว่า หากนักเคมีใช้ความรู้ทางด้านเคมีอย่างสร้างสรรค์ นอกจากจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้ยั่งยืนในอนาคตแล้ว ยังจะสร้างคุณค่าให้แก่ตนเองและสาขาวิชาชีพอย่างภาคภูมิใจด้วย

## แบบฝึกหัดบทที่ 9

1. จงอธิบายหลักการของเคมีสีเขียว มาพอสังเขป
2. เคมีสิ่งแวดล้อมและเคมีสีเขียวมีสิ่งๆที่เหมือนและต่างกันอย่างไร จงอธิบาย
3. การเตือนภัยอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในโรงงาน มีข้อดีอย่างไร และสอดคล้องตามหลักการของเคมีสีเขียวอย่างไร
4. การใช้พลาสติกชีวภาพและพลาสติกธรรมดา มีข้อดีและข้อเสียอย่างไร จงหาข้อมูลและอธิบายมาพอสังเขป
5. สารตั้งต้น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , และ  $\text{H}_2\text{O}$  เป็นสารในธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นสารที่มีมูลค่าชนิดใดได้บ้าง จงยกตัวอย่างมา 1 ชนิด พร้อมกระบวนการสังเคราะห์สารนั้น
6. จงแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการเปลี่ยนขยะเป็นสารที่มีมูลค่าด้วยปฏิกิริยาเคมีว่าสามารถช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างไร
7. ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้สารอินทรีย์และตัวทำละลายอินทรีย์ (solvent) ระเหยง่าย จะต้องมีความระมัดระวังสิ่งใด จงหาข้อมูลและอธิบายมาพอสังเขป
8. จงหาข้อมูลของ catalytic converter หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สพิษจากท่อไอเสียรถยนต์ ว่าคืออะไร และมีหลักการทำงานอย่างไร
9. จงยกตัวอย่างกระบวนการและตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่สอดคล้องตามหลักการของเคมีสีเขียว
10. การประหยัดพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมี ทำได้อย่างไร จงหาข้อมูลและอธิบายมาพอสังเขป

## เอกสารอ้างอิง

กรุงเทพธุรกิจ. (2553). **โทเรย์พัฒนาพลาสติกชีวภาพสำหรับแคนนอน**. [ออนไลน์] จาก : <http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/it /innovation/20101016/358074/news.html> [8 ธันวาคม 2556].

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2556). **พลาสติกชีวภาพ**. [ออนไลน์] จาก : <http://library.dip.go.th/Industrial%20Innovation/www/innonew0-01.html> [8 ธันวาคม 2556].

คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. (2554). **แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์**. กรุงเทพฯ : บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน).

จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. (2547). **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

จีระวัฒน์ พันธนิตย และไพศาล คงคาฉุยฉาย. (2550). **การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 จากเถ้าแกลบ**. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45 หน้า 256-264.

เฉลิมพล พงษ์ธรรมสาร และคณะ. (2551). “การทำไฟโรไลซิสร่วมกับการออกซิเดชันของพลาสติกเพื่อการประหยัดพลังงาน.” **วิศวกรรมสาร มก** 21 (64), หน้า 25-33.

นพพร ทัดนา. (2556). **12 หลักการของเคมีสีเขียว**. [ออนไลน์] จาก : <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a7.shtml> [7 ธันวาคม 2556].

ประภาส ช่างเหล็ก สุตประสงค์ สุวรรณเลิศ และสกล ฉายศรี. (2556). **มันสำปะหลังเพื่ออาหารและพลังงานทดแทนของโลก**. [ออนไลน์] จาก : [http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/04-plant/prapart/plant\\_00.html](http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/04-plant/prapart/plant_00.html) [10 ธันวาคม 2556].

พรจันท์ เปี่ยมอรุณ. (2556). **การศึกษาและปรับปรุงการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกของเครื่องปรับอากาศเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม). ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา.

- มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย. (2554). **การสร้างกลุ่มความร่วมมือสีเขียว เพื่อพัฒนาสายใยการ  
ผลิตผลิตภัณฑ์สู่ตลาดผลิตภัณฑ์สีเขียว.** กรุงเทพฯ : บริษัทแสงสว่างเวิลด์เพรส  
จำกัด.
- เยาวภา สุวัตติ. (2554). “พลาสติกชีวภาพ.” **วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การ  
เภสัชกรรม**, 18 (4) หน้า 2-3.
- ศุภวรรณ ตันตยานนท์. (2554). **Green Chemistry ทฤษฎีและการปฏิบัติ.** กรุงเทพฯ :  
บริษัท เอสทีซี มีเดีย แอนด์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด.
- สายฝน หาญโยธีและเมตตา เจริญพานิช. (2547). “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5  
บริสุทธิ์สูงจากเถ้าลอยลิกไนต์โดยกระบวนการสองขั้นตอน.” **วิศวกรรมสาร มข**  
31 (4) หน้า 409-424.
- Boonsueb Sontayamarn. (2008). **Synthetic Fuels from Cracking Reaction of  
Polyethylene using Zeolite Beta Catalyst in Continuous Process.** Master's  
thesis of M.Sc. (Petrochemical and hydrocarbon chemistry), King Mongkut's  
Institute of Technology Ladhrabang (KMITL), Thailand.

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). **มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค**. [ออนไลน์] จาก : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water01.html#s2](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html#s2) [25 ธันวาคม 2556].
- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2556). **พลาสติกชีวภาพ**. [ออนไลน์] จาก : <http://library.dip.go.th/Industrial%20Innovation/www/innonew0-01.html> [8 ธันวาคม 2556].
- กรุงเทพธุรกิจ. (2553). **โทเรย์พัฒนาพลาสติกชีวภาพสำหรับแคนนอน**. [ออนไลน์] จาก : <http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/it /innovation/20101016/358074/news.html> [8 ธันวาคม 2556].
- การประปาส่วนภูมิภาค. (2557). **มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค**. [ออนไลน์] จาก : <http://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf> [2 มกราคม 2557].
- เกริกชัย สุภาจันจทิ. (2538). **เทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับอุตสาหกรรมซีพีไอ**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. (2554). **แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์**. กรุงเทพฯ : บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน).
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. (2547). **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ. (2542). **เคมีประยุกต์**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พริ้นติ้งเฮ้าส์.
- จีระวัฒน์ พันธนิย และไพศาล คงคาอุยฉาย. (2550). **การสังเคราะห์ซีไอไลต์ชนิด SUZ-4 จากเก้าแกลบ**. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45 วันที่ 30 ม.ค. – 2 ก.พ. 2550 (หน้า 256-264).
- เฉลิมพล พึ่งธรรมสาร และคณะ. (2551). “การทำไพโรไลซิสร่วมกับการออกซิเดชันของพลาสติกเพื่อการประหยัดพลังงาน.” **วิศวกรรมสาร มก** 21 (64), หน้า 25-33.



ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. (2531). **เคมีคำนวณและเทคนิคการทำไจท์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์  
โอเดียนสโตร์.

ประกาศกรมอนามัย เรื่อง คุณภาพน้ำประปา ปี พ.ศ. 2543.

ประภาส ช่างเหล็ก สุตประสงค์ สุวรรณเลิศ และสกล ฉายศรี. (2556). **มันสำปะหลังเพื่อ  
อาหารและพลังงานทดแทนของโลก**. [ออนไลน์] จาก :

[http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/04-plant/prapart/plant\\_00.html](http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/04-plant/prapart/plant_00.html)

[10 ธันวาคม 2556].

ปราณี พันธุมสินชัย. (2542). **มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์เรือนแก้ว  
การพิมพ์.

ปริญญา อรุณวิสุทธิ. (2553). **เทอร์โมไดนามิกส์เคมีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทบวงมหาวิทยาลัย. (2524). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัทอักษรเจริญทัศน์ จำกัด.

ทบวงมหาวิทยาลัย. (2540). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัทอักษรเจริญทัศน์ จำกัด.

ทัศนีย์ ศรีเพชรพันธุ์. (2542). **เคมีสิ่งแวดล้อม**. เพชรบูรณ์ : สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์.

นพพร ทัศนาศ. (2556). **12 หลักการของเคมีสีเขียว**. [ออนไลน์] จาก :

<http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a7.shtml> [7 ธันวาคม 2556].

นภดล ไชยคำ. (2543). **เคมี เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล เอ็นเตอร์  
ไพรส์, อิงค์.

นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. (2547). **พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ :  
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นัทธีรา สรรพณี. (2541). **เคมีสิ่งแวดล้อม**. นครปฐม : มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ฝ่ายวิศวกรรมนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2556). **หน่วยวัดทางรังสี**.

[ออนไลน์] จาก :

[http://www3.egat.co.th/ned/index.php?option=com\\_content&view=article&id=18&Itemid=121](http://www3.egat.co.th/ned/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=121)

[1 ธันวาคม 2556].

พรจันท์ เปี่ยมอรุณ. (2556). **การศึกษาและปรับปรุงการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกของ**

**เครื่องปรับอากาศเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม). ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา.

- พรพรรณ อุดมกาญจนนันท์ และคณะ. (2546). **เปิดโลกเคมี**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พวงเพชร เสี่ยมแหลม. (2556). **ฝนกรด**. [ออนไลน์] จาก : <https://www.l3nr.org/posts/298086> [21 ธันวาคม 2556].
- พิมล เรียงวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิช. (2539). **เคมีสภาวะแวดล้อม**. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮ้าส์.
- มานัส มงคลสุข. (2556). **ผลกระทบแผ่นดินไหวต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ Fukushima Daiichi**. [ออนไลน์] จาก : <http://rt-spark.blogspot.com/2011/03/fukushima-daiichi.html> [2 ธันวาคม 2556].
- มูลนิธิชัยพัฒนา. (2557). **การขอความอนุเคราะห์การติดตั้งเครื่องกลเติมอากาศ**. [ออนไลน์] จาก : [http://www.chaipat.or.th/chaipat/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1185:chaipattana-water-turbine-development&catid=19&Itemid=1185](http://www.chaipat.or.th/chaipat/index.php?option=com_content&view=article&id=1185:chaipattana-water-turbine-development&catid=19&Itemid=1185) [1 มกราคม 2557].
- มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย. (2554). **การสร้างกลุ่มความร่วมมือสีเขียว เพื่อพัฒนาสายใยการผลิตผลิตภัณฑ์สู่ตลาดผลิตภัณฑ์สีเขียว**. กรุงเทพฯ : บริษัทแสงสว่างเจ็ดเพรส จำกัด.
- เยาวภา สุวัทธิ. (2554). “พลาสติกชีวภาพ.” **วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม**, 18 (4) หน้า 2-3.
- รุ่งทิพย์ อุดมวิเศษสันต์. (2556). **การป้องกันอันตรายจากรังสี**. [ออนไลน์] จาก : <http://www.vibhavadi.com/health183.html> [1 ธันวาคม 2556].
- ลัดดา มีศุข. (2545). **เคมีทั่วไป 1**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณ กาญจนมยุร. (2545). **เคมีอุตสาหกรรม**. ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา. (2544). **জনপলসাস্ত্রและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์. (2541). **เคมีทั่วไป 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ศุภวรรณ ตันตยานนท์. (2554). **Green Chemistry ทฤษฎีและการปฏิบัติ**. กรุงเทพฯ : บริษัท เอสทีซี มีเดีย แอนด์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2552). **หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้**

**พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสศ.

สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2557). **นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter4/>

[4 มกราคม 2557].

สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชารี. (2546). **เทอร์โมไดนามิกส์.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์

ท็อป จำกัด.

สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชารี. (2551). **เทอร์โมไดนามิกส์.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์

ท็อป จำกัด.

สมพงษ์ เลียงโรคาพาธ. (2556). **สภาพแวดล้อมอวกาศและผลกระทบต่อดาวเทียม.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=environ>

[17 ธันวาคม 2556].

สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (2556). **รังสี ปริมาณและการตรวจวัดรังสี.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www.nst.or.th/article/article493/article493020.html>

[1 ธันวาคม 2556].

สายฝน หาญโยธีและเมตตา เจริญพานิช. (2547). “การสังเคราะห์ซีไอไลต์ชนิด ZSM-5

บริสุทธิ์สูงจากแก๊สลอยลิกไนต์โดยกระบวนการสองขั้นตอน.” **วิศวกรรมสาร มข**

31 (4) หน้า 409-424.

สำนักงานส่งเสริมการศึกษานอกระบบและการศึกษาตามอัธยาศัย. (2556). **การไทเทรต**

**ระหว่างกรดเบส.** [ออนไลน์] จาก :

[http://ebook.nfe.go.th/nfe\\_ebook/data\\_o\\_ebook/html/023/187.htm](http://ebook.nfe.go.th/nfe_ebook/data_o_ebook/html/023/187.htm)

[5 พฤศจิกายน 2556].

สุชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. (2541). **เคมี**

**ทั่วไป 2.** กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์.

สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. (2556). **ประวัติย่อการตรวจหาและการวัดรังสีชนิดก่อกอไอออน.**

[ออนไลน์] จาก : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-018.html>

[1 ธันวาคม 2556].

- Actom Ltd. (2013). **Packed Tower**. [online] Available :  
[http://www.actomapc.co.za/products\\_wetscrubbers\\_pt.php](http://www.actomapc.co.za/products_wetscrubbers_pt.php) [23 December 2013].
- Atkins, P.W. (1994). **Physical Chemistry**. 5<sup>th</sup> Ed. Oxford : Oxford University Press.
- Boonsueb Sontayamarn. (2008). **Synthetic Fuels from Cracking Reaction of Polyethylene using Zeolite Beta Catalyst in Continuous Process**. Master's thesis of M.Sc. (Petrochemical and hydrocarbon chemistry), King Mongkut's Institute of Technology Ladhrabang (KMITL), Thailand.
- Briggs, J.G.R. (2000). **Chemistry Insights**. Singapore : Pearson Education Asia Pte Ltd.
- Brown, T. L., Lemay, H. E., and Bursten, B. E. (1997). **Chemistry the Central Science**. 7<sup>th</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.
- Davidson, M.W., The Florida State University, (2013). **Zinc-Carbon Batteries**. [online] Available :  
<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/batteries/zinccarbon.html>  
 [24 October 2013].
- Faculty of Chemical Technology, SVEUCILISTE U SPLITU, Croatia. (2013). **K<sub>sp</sub> of Some Hardly Dissolved Inorganic Salts**. [online] Available :  
<http://www.ktf-split.hr/periodni/en/abc/kpt.html> [8 September 2013].
- Felder, R. M. and Rousseau, R. W. (1986). **Elementary Principles of Chemical Processes**. 2<sup>nd</sup> Ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Gates, B. C. (1992). **Catalytic Chemistry**. John Wiley & Sons.
- Goyal, I. (2013). **What is photochemical smog??** [online] Available :  
<http://www.meritnation.com/ask-answer/question/what-is-photochemical-smog/environmental-chemistry/2127195> [21 December 2013].
- Gregory Thompson, E. (2013). **Hemoglobin**. [online] Available :  
<http://www.webmd.com/a-to-z-guides/hemoglobin> [19 December 2013].
- Hagen, J. (2006). **Industrial Catalysis**. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Laidler, K. J. and Meiser, J. H. (1999). **Physical Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. Boston : Houghton Mifflin Company.

- Levenspiel, O. (1999). **Chemical Reaction Engineering**. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons.
- Lewis, R. and Evans, W. (2006). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Palgrave Macmillan.
- Lovett, C. and Chang, R. (2005). **Understanding Chemistry**. New York : McGraw– Hill Company.
- Magnabiz Corporation. (2013). **Pollution Control System**. [online] Available : <http://www.magnabiz.com/battery/pollution.htm> [23 December 2013].
- McGraw–Hill Science & Technology Encyclopedia. (2013). **Scintillation counter**. [online] Available : <http://www.answers.com/topic/scintillation-counter> [1 December 2013].
- McMurry, J. and Fay, R. C. (2001). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey : Prentice Hall.
- MySafetyLabels. (2013). **Caution Sign and Label : Radiation Area Authorized Personal Only**. [online] Available : <http://www.mysafetylabels.com/safety-signs/radiation-authorized-personnel-sign/saf-sku-s-2936.aspx> [2 December 2013].
- National Institute of Standard and Technology. (2013). **Periodic Table Atomic Properties of the elements**. [online] Available : [http://www.nist.gov/pml/data/upload/periodic\\_table\\_composite\\_2013\\_nocrops.pdf](http://www.nist.gov/pml/data/upload/periodic_table_composite_2013_nocrops.pdf) [30 July 2013].
- Nice, K. and Bryant, C.W. (2013). **How Catalytic Converters Work**. [online] Available : <http://auto.howstuffworks.com/catalytic-converter1.htm> [23 December 2013].
- Olmsted III, J. and Williams, G. M. (2002). **Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Olson, R. (2013). **Introducing the Nothing Labs Electronic Cloud Chamber**. [online] Available : [http://nothinglabs.blogspot.com/2010/12/introducing-nothing-labs-electronic\\_01.html](http://nothinglabs.blogspot.com/2010/12/introducing-nothing-labs-electronic_01.html) [1 December 2013].
- Oxtoby, D. W., Nachtrieb, N. H. and Freeman, W. A. (1994). **Chemistry Science of Change**. 2<sup>nd</sup> Ed. USA : Saunders College Publishing.



- Panchenkov, G. M. (1978). **Calculations of Chemical Equilibria Examples and Problems**. English translation from Russian : Mir Publishers.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S., and Herring, F. G. (2002). **General Chemistry**. New Jersey : Prentice Hall.
- Pilling, M. J. and Seakins, P. W. (1995). **Reaction Kinetics**. New York : Oxford University Press.
- Ray, B.T. (2013). **Air Pollution and Control**. [online] Available : [http://civil.engr.siu.edu/301L\\_Ray/he\\_air.htm](http://civil.engr.siu.edu/301L_Ray/he_air.htm) [23 December 2556].
- Sitton, L. (2015). **The Mass Defect of The Nucleus and Nuclear Binding Energy**. [online] Available : <http://staff.orecity.k12.or.us/les.sitton/Nuclear/313.htm> [19 July 2015].
- Socrates, G. (1971). **Thermodynamics and Statistical Mechanics**. 1<sup>st</sup> Ed. London : Butterworths & Co.
- Steinfeld, J. I., Francisco, J. S., and Hase, W. L. (1999). **Chemical Kinetics and Dynamics**. New Jersey : Prentice Hall International.
- Stimac, J.P. (2013). **Origin of the Earth's Atmosphere**. [online] Available : [http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos\\_origin.html](http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos_origin.html) [17 December 2013].
- Sunflowercosmos, Non-profit organization. (2556). **อันตรายจากกัมมันตภาพรังสี**. [ออนไลน์] จาก : [http://www.sunflowercosmos.org/about/about\\_home/about\\_sun.html](http://www.sunflowercosmos.org/about/about_home/about_sun.html) [1 ธันวาคม 2556].
- Walas, S. M. (1985). **Phase Equilibria in Chemical Engineering**. USA : Butterworths.
- World Nuclear Association. (2013). **Nuclear Radiation and Health Effect**. [online] Available : [http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/radioactive\\_decay\\_series.png](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/radioactive_decay_series.png) [30 November 2013].



ภาคผนวก ก

Group		PERIODIC TABLE																																																																																																																																																																																											
1 IA		2 IIA																3 IIIB										4 IVB										5 VB										6 VIB										7 VIIB										8 VIII										9 VIII										10										11 IB										12 IIB										13 IIIA										14 IVA										15 VA										16 VIA										17 VIIA										18 VIIIA																					
1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																																																																																																																																																											
H 1.008 <sup>1</sup> 1s		He 4.002602 <sup>2</sup> 1s <sup>2</sup>		Li 6.941 <sup>3</sup> 2s <sup>1</sup>		Be 9.012182 <sup>4</sup> 2s <sup>2</sup>		B 10.811 <sup>5</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>		C 12.011 <sup>6</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>		N 14.007 <sup>7</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>		O 15.999 <sup>8</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>		F 18.998 <sup>9</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>		Ne 20.179 <sup>10</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>		Na 22.990 <sup>11</sup> 3s <sup>1</sup>		Mg 24.305 <sup>12</sup> 3s <sup>2</sup>		Al 26.982 <sup>13</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>		Si 28.086 <sup>14</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>		P 30.974 <sup>15</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>		S 32.06 <sup>16</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>		Cl 35.45 <sup>17</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>		Ar 39.948 <sup>18</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>																																																																																																																																																											
Period		1																		2										3										4										5										6										7										8										9										10										11										12										13										14										15										16										17										18									
K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr																																																																																																																																																											
Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe																																																																																																																																																											
Cs		Ba		La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn																																																																																																																																																											
Fr		Ra		Ac		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Cn		Nh		Fl		Lv		Uus		Uuo																																																																																																																																																													
Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number		Atomic Number																																																																																																																																																											
Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level		Ground-state Level																																																																																																																																																											
Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol																																																																																																																																																											
Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name		Name																																																																																																																																																											
Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight		Standard Atomic Weight																																																																																																																																																									
Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration		Ground-state Configuration																																																																																																																																																									
Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)		Ionization Energy (eV)																																																																																																																																																									

Based upon <sup>12</sup>C. ( ) indicates the mass number of the longest-lived isotope.   
 \*IUPAC conventional atomic weights; standard atomic weights for these elements are expressed in intervals; see iupac.org for an explanation and values.   
 For a description of the data, visit physics.nist.gov/data   
 NIST SP 966 (March 2013)

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารประกอบบางชนิด

รายการสัญลักษณ์ที่ใช้ในตารางที่ ข.1

$T_M(^{\circ}\text{C})$	=	อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลว (melting temperature)
$\Delta H_M(\text{kJ/mol})$	=	ความร้อนของการหลอมเหลว (heat of fusion)
$T_B(^{\circ}\text{C})$	=	อุณหภูมิ ณ จุดเดือด (boiling temperature)
$\Delta H_V(\text{kJ/mol})$	=	ความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอ (heat of vaporization)
$\Delta H^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	=	ความร้อนของการก่อเกิด (standard heat of formation) ณ สภาวะมาตรฐาน
$\Delta G^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของการก่อเกิด (standard Gibbs free energy change of formation) ณ สภาวะมาตรฐาน
$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	=	เอนโทรปี (standard entropy) ณ สภาวะมาตรฐาน
$\Delta H^{\circ}_C(\text{kJ/mol})$	=	ความร้อนของการเผาไหม้ (standard heat of combustion) ณ สภาวะมาตรฐาน
c	=	ผลึกของแข็ง (crystal)
l	=	ของเหลว (liquid)
g	=	แก๊ส (gas)
aq	=	สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (aqueous solution)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

1/5

สารประกอบ	สูตร	$T_M(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_M(\text{kJ/mol})$	$T_B(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_V(\text{kJ/mol})$	$\Delta G^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	$\Delta H^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$\Delta H^{\circ}_C(\text{kJ/mol})$
Acetaldehyde	$\text{CH}_3\text{CHO}$	-123.7	-	20.2	25.1	-128.86(g)	250.3(g)	-166.2(g)	-1192.4(g)
Acetic Acid	$\text{CH}_3\text{COOH}$	16.6	12.09	118.2	24.39	-389.9(l)	159.8(l)	-486.18(l) -438.15(g)	-871.69(l) -919.73(g)
Acetone	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	-95.0	5.69	56.0	30.2	-151.3(g)	295.4(g)	-248.2(l) -216.7(g)	-1785.7(l) -1821.4(g)
Acetylene	$\text{C}_2\text{H}_2$	-	-	-81.5	17.6	+209.2(g)	200.94(g)	+226.75(g)	-1299.6(g)
Ammonia	$\text{NH}_3$	-77.8	5.653	-33.43	23.351	-16.45(g)	192.45(g)	-67.2(l) -46.19(g)	- -382.58(g)
Ammonium hydroxide	$\text{NH}_4\text{OH}$	-	-	-	-	-	-	-366.48(aq)	-
Ammonium nitrate	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	169.6	5.4	-	Decompose at 210 $^{\circ}\text{C}$	-183.87(c)	151.08(c)	-365.14(c) -339.36(aq)	-
Ammonium sulfate	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	513	-	-	Decompose at 513 $^{\circ}\text{C}$	-	-	-1179.3(c) -1173.1(aq)	-
Aniline	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	-6.3	-	184.2	-	-	-	+31.1(l)	-3393(l)
Benzaldehyde	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$	-26.0	-	179.0	36.40	-	-	-88.83(l) -40.04(g)	-3520.0(l) -
Benzene	$\text{C}_6\text{H}_6$	5.53	9.837	80.1	30.765	+124.3(l) +129.72(g)	173.3(l) 269.31(g)	+48.66(l) +82.93(g)	-3267.6(l) -3301.5(g)
Benzoic acid	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	122.2	-	249.8	-	-245.3(c) -214.2(g)	167.6(c) 369.0(g)	-385.1(c) -294.1(g)	-3226.7(c)
Benzyl alcohol	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	-15.4	-	205.2	-	-	-	-	-3741.8(l)
Bromine	$\text{Br}_2$	-7.4	10.6	58.6	31.0	0(l) +3.11(g)	152.23(l) 245.46(g)	0(l) +30.907(g)	-
1,2-Butadiene	$\text{C}_4\text{H}_6$	-136.5	-	10.1	-	+198.6(g)	293(g)	+162.3(g)	-2461.7(g)
1,3-Butadiene	$\text{C}_4\text{H}_6$	-109.1	-	-4.6	-	+149.72(g)	109.24(g)	+278.89(g)	-2409(g)
n-Butane	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	-138.3	4.661	-0.6	22.305	-17.03(g)	310.23(g)	-147.0(l) -124.7(g)	-2855.6(l) -2878.5(g)
Isobutane	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	-159.6	4.54	-11.73	21.292	-21.44(g)	295.5(g)	-158.4(l) -134.5(g)	-2849.0(l) -2868.8(g)
1-Butene	$\text{C}_4\text{H}_8$	-185.3	3.848	-6.25	21.916	+71.39(g)	305.71(g)	+1.17(g) -62.76(c)	-2718.6(g) -
Calcium carbide	$\text{CaC}_2$	2500	-	-	-	-66.88(c)	-	-62.76(c)	-
Calcium carbonate (Calcite)	$\text{CaCO}_3$	-	-	-	Decompose at 825 $^{\circ}\text{C}$	-1128.8(c)	92.9(c)	-1206.9(c)	-
Calcium chloride	$\text{CaCl}_2$	782	28.37	>1600	-	-748.1(c)	104.6(c)	-794.96(c)	-
Calcium hydroxide	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-	-	-	- $\text{H}_2\text{O}$ at 580 $^{\circ}\text{C}$	-894.1(c)	-	-986.59(c)	-
Calcium oxide	$\text{CaO}$	2570	50	2850	-	-604.03(c)	39.75(c)	-635.69(c)	-
Calcium phosphate	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1670	-	-	-	-	-	-4138(c)	-
Calcium silicate	$\text{CaSiO}_3$	1530	48.62	-	-	-	-	-1584(c)	-
Calcium sulfate	$\text{CaSO}_4$	-	-	-	-	-1303.742(c)	-	-1432.7(c) -1450.4(aq)	-



## ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

2/5

สารประกอบ	สูตร	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_m(\text{kJ/mol})$	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_v(\text{kJ/mol})$	$\Delta G^{\circ}_f(\text{kJ/mol})$	$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	$\Delta H^{\circ}_f(\text{kJ/mol})$	$\Delta H^{\circ}_c(\text{kJ/mol})$
Calcium sulfate (gypsum)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-1.5 $\text{H}_2\text{O}$ at $128^{\circ}\text{C}$	-1778.46(c)	-	-2021(c)	-
Carbon (graphite)	C	3600	46.0	4200	-	0(c)	5.74(c)	0(c)	-393.51(c)
Carbon dioxide	$\text{CO}_2$	-56.6 at 5.2 atm	8.33	-	Sublimes at $78^{\circ}\text{C}$	-394.36(g)	213.74(g)	-412.9(l) -393.5(g)	-
Carbon disulfide	$\text{CS}_2$	-112.1	4.39	46.25	26.8	+65.27(l)	151.34(l)	+89.7(l) +115.3(g)	-1075.2(l) -1102.6(g)
Carbon monoxide	CO	-205.1	0.837	-191.5	6.042	-137.17(g)	197.67(g)	-110.52(g)	-282.99(g)
Carbon tetrachloride	$\text{CCl}_4$	-22.9	2.51	76.7	30.0	-65.21(l)	216.4(l)	-139.5(l) -106.7(g)	-352.2(l) -385.0(g)
Chlorine	$\text{Cl}_2$	-101.0	6.406	-34.06	20.4	0(g)	223.07	0(g)	-
Chlorobenzene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	-45	-	132.1	36.5	+98.29(g)	314.03(g)	+51.09(g)	-
Chloroethane	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	See ethyl chloride							
Chloroform	$\text{CHCl}_3$	-63.7	-	61.0	-	-70.1(g)	295.6	-131.8(l) -102.9(g)	-373(l) -380(g)
Copper	Cu	1083	13.1	2595	304.6	0(c)	33.15(c)	0(c)	-
Copper sulfate	$\text{CuSO}_4$	-	-	-	Decomposes > $600^{\circ}\text{C}$	-661.8(c)	109(c)	-769.9(c) -843.1(aq)	-
Cyclohexane	$\text{C}_6\text{H}_{12}$	6.7	2.677	80.7	30.1	+31.91(g)	26.8(l) 297.276(g)	-156.2(l) 123.1(g)	-3919.9(l) -3953.0(g)
Cyclopentane	$\text{C}_5\text{H}_{10}$	-93.4	0.609	49.3	27.3	+38.85(g)	292.9(g)	-105.9(l) -77.2(g)	-3290.9(l) -3319.5(g)
n-Decane	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	-29.9	-	173.8	-	+33.18(g)	545.7(g)	-249.7(l)	-6778.3(l) -6829.7(g)
Diethyl ether	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	-116.3	7.30	34.8	26.05	-122.1(g)	342.3(g)	-272.8(l)	-2726.7(l)
Ethane	$\text{C}_2\text{H}_6$	-183.3	2.859	-88.6	14.72	-32.82(g)	229.6(g)	-84.67(g)	-1559.9(g)
Ethyl acetate	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	-83.8	-	77.0	-	-328.0(g)	359.7(g)	-463.2(l) -426.8(g)	-2246.4(l)
Ethyl alcohol (Ethanol)	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	-114.6	5.021	78.5	38.58	-174.78(l) -168.49(g)	160.7(l) 282.7(g)	-277.63(l) -235.31(g)	-1366.91(l) -1409.25(g)
Ethyl benzene	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	-94.97	9.163	136.2	35.98	+130.73(g)	360.63(g)	-12.469(l) +29.79(g)	-4564.9(l) -4607.1(g)
Ethyl bromide	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	-119.1	-	38.2	-	-	-	-54.4(g)	-
Ethyl chloride	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	-138.3	4.452	13.1	24.7	-60.499(g)	275.78(g)	-105.0(g)	-
3-Ethyl hexane	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	-	-	118.5	34.27	-	-	-250.5(l) -210.9(g)	-5407.1(l) -5509.8(g)
Ethylene	$\text{C}_2\text{H}_4$	-169.2	3.35	-103.7	13.54	+68.15(g)	219.56	+52.28(g)	-1410.99(g)
Ethylene glycol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	-13	11.23	197.2	56.9	-301.8(g)	304.89(g)	-451.5(l)	-1179.5(l)
Ferric oxide	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	Decomposes at $1560^{\circ}\text{C}$	-742.2(c)	87.4(c)	-822.2(c)	-
Ferrous oxide	FeO	-	-	-	-	-248.21(c)	-	-266.5(c)	-

## ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

3/5

สารประกอบ	สูตร	$T_M(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_M(\text{kJ/mol})$	$T_B(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_V(\text{kJ/mol})$	$\Delta G^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	$\Delta H^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$\Delta H^{\circ}_c(\text{kJ/mol})$
Ferrous sulfide	FeS	1193	-	-	-	-100.4(c)	60.29(c)	-95.1(c)	-
Formaldehyde	H <sub>2</sub> CO	-92	-	-19.3	24.48	-102.53(g)	218.77(g)	-115.90(g)	-563.46(g)
Formic acid	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8.30	12.68	100.5	22.25	-361.35(l)	128.95(l)	-409.2(l)	-262.8(l)
								-362.6(g)	
Glycerol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	18.20	18.30	290.0	-	-	-	-665.9(l)	-1661.1(l)
Helium	He	-269.7	0	-268.9	0.084	0(g)	126.15(g)	0(g)	-
n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-90.59	14.03	98.43	31.69	+1.0(l)	328.6(l)	-224.4(l)	-4816.9(l)
								-187.8(g)	-4853.5(g)
n-hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-95.32	13.03	68.74	28.85	-0.06(g)	204.3(l)	-198.8(l)	-4163.1(l)
							388.74(g)	-167.2(g)	-4194.8(g)
Hydrogen	H <sub>2</sub>	259.19	0.12	252.76	0.904	0(g)	130.684(g)	0(g)	-285.84(g)
Hydrogen bromide	HBr	-86	-	-67	-	-53.45(g)	198.7(g)	-36.23(g)	-
Hydrogen chloride	HCl	-114.2	1.99	-85.0	16.1	-95.30(g)	186.91(g)	-92.31(g)	-
						-131.23(aq)	56.5(aq)	-167.16(aq)	-
Hydrogen cyanide	HCN	-14	-	26	-	+124.7(g)	201.78(g)	+130.54(g)	-
Hydrogen fluoride	HF	-83	-	20	-	-273.2(g)	173.78(g)	-268.6(g)	-
								-316.9(aq, 200)	
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	-85.5	2.38	-60.3	18.67	-33.56(g)	205.79(g)	-19.96(g)	-562.59(g)
Iodine	I <sub>2</sub>	113.3	-	184.2	-	0(c)	116.135(c)	0(c)	-
Iron	Fe	1535	15.1	2800	354.0	0(c)	27.28(c)	0(c)	-
Lead	Pb	327.4	5.1	1750	179.9	0(c)	64.81(c)	0(c)	-
Lead oxide	PbO	886	11.7	1472	213	-188.93(c)	66.5(c)	-219.2(c)	-
Magnesium	Mg	650	9.2	1120	131.8	0(c)	32.68(c)	0(c)	-
Magnesium chloride	MgCl <sub>2</sub>	714	43.1	1418	136.8	-591.79(c)	89.62(c)	-641.8(c)	-
Magnesium hydroxide	Mg(OH) <sub>2</sub>	-	-	-	Decomposes at 350 <sup>o</sup> C	-836.71(c)		-927.54(c)	-
Magnesium oxide	MgO	2900	77.4	3600	-	-569.43(c)	26.94(c)	-601.8(c)	-
Mercury	Hg	-38.87	-	-356.9	-	0(l)	76.02(l)	0(c)	-
						+31.82(g)	174.96(g)	+61.32(g)	
Methane	CH <sub>4</sub>	-182.5	0.94	-161.5	8.179	-50.72(g)	186.26(g)	-74.85(g)	-890.36(g)
Methyl acetate	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-98.9	-	57.1	-	-324.2(g)	319.8(g)	-409.4(l)	-1595(l)
Methyl alcohol (methanol)	CH <sub>3</sub> OH	-97.9	3.167	64.7	35.27	-166.27(l)	126.8(l)	-238.6(l)	-726.6(l)
						-161.96(g)	239.81(g)	-201.2(g)	-764.0(g)
Methyl amine	CH <sub>3</sub> N	-92.7	-	-6.9	-	+32.07(g)	243.3(g)	-28.0(g)	-1071.5(l)
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	-97.9	-	-24	-	-58.44(g)	234.18(g)	-81.92(g)	-
Methyl ethyl ketone	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	-87.1	-	78.2	32.0	-117.1(g)	308.81(g)	-216.4(g)	-2436(l)
Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	80.0	-	217.8	-	+224.08(g)	333.15(g)	+150.58(g)	-5157(g)
Nickel	Ni	1452	-	2900	-	0(c)		0(c)	-

## ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

4/5

สารประกอบ	สูตร	$T_M(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_M(\text{kJ/mol})$	$T_B(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_V(\text{kJ/mol})$	$\Delta G^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	$\Delta H^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$\Delta H^{\circ}_C(\text{kJ/mol})$
Nitric acid	$\text{HNO}_3$	-41.6	10.47	86	30.3	-80.71(l) -111.25(aq)	155.60(l) 146.4(aq)	-173.23(l) -206.57(aq)	-
Nitrobenzene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	5.5	-	210.7	-	-	-	-	-3092.8(l)
Nitrogen	$\text{N}_2$	-210.0	0.720	-195.8	5.577	0(g)	191.61(g)	0(g)	-
Nitrogen dioxide	$\text{NO}_2$	-9.3	7.335	21.3	14.73	+51.31(g)	240.06(g)	+33.8(g)	-
Nitric oxide	$\text{NO}$	-163.6	2.301	-151.8	13.78	+86.55(g)	210.76(g)	+90.37(g)	-
Nitrogen pentaoxide	$\text{N}_2\text{O}_5$	30	-	47	-	+113.9(c) +115.1(g)	178.2(c) 355.7(g)	-43.1(c) +11.3(g)	-
Nitrogen tetraoxide	$\text{N}_2\text{O}_4$	-9.5	-	21.1	-	+97.89(g)	304.29(g)	+9.3(g)	-
Nitrous oxide	$\text{N}_2\text{O}$	-91.1	-	-88.8	-	+104.2(g)	219.85(g)	+81.5(g)	-
<i>n</i> -Nonane	$\text{C}_9\text{H}_{20}$	-53.8	-	150.6	-	+24.98(g)	506.4(g)	-228.74(g)	-6124.5(l) -6171.0(g)
<i>n</i> -Octane	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	-57.0	-	125.5	-	+6.4(l) +16.0(g)	361.1(l) 467.23(g)	-249.9(l) -208.4(g)	-5470.7(l) -5512.2(g)
Oxalic acid	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	-	-	-	Decomposes at 186 $^{\circ}\text{C}$	-661.4(g)	343.3(g)	-723.7(g)	-198.9(g)
Oxygen	$\text{O}_2$	-	0.444 218.75	- 182.97	6.82	0(g)	205.138(g)	0(g)	-
<i>n</i> -pentane	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	-129.6	8.393	36.07	25.77	-8.2(g)	348.4(g)	-173.0(l) -146.4(g)	-3509.5(l) -3536.1(g)
Isopentane	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	-160.1	-	27.7	-	-14.05(g)	343.74(g)	-179.3(l) -152.0(g)	-3507.5(l) -3529.2(g)
1-Pentene	$\text{C}_5\text{H}_{10}$	-165.2	4.94	29.97	-	+78.37(g)	346.2(g)	-20.9(g)	-3375.8(g)
Phenol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	42.5	11.43	181.4	-	-50.9(c) -32.637(g)	146.0(c) 314.81(g)	-165.0(c) -158.1(l) -90.8(g)	-3063.5(c)
Phosphoric acid	$\text{H}_3\text{PO}_4$	42.3	10.54	-	- $\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ at 213 $^{\circ}\text{C}$	-1119.1(c)	110.5(c)	-1281.1(c) -1278.6(aq, 1H <sub>2</sub> O)	-
Phosphorus (red)	$\text{P}_4$	590 <sup>4,5</sup> atm	81.17	-	Ignites in air, 725 $^{\circ}\text{C}$	+24.44(g)	279.98(g)	+58.91(g)	-
Phosphorus (white)	$\text{P}_4$	44.2	2.51	280	49.71	0(c)	41.09(c)	0(c)	-
Phosphorus pentoxide	$\text{P}_2\text{O}_5$	-	-	-	Sublimes at 250 $^{\circ}\text{C}$	-	-	-1506.2(c)	-
Propane	$\text{C}_3\text{H}_8$	-	3.52 187.69	-42.07	18.77	-23.49(g)	269.91(g)	-119.8(l) -103.8(g)	-2204.0(l) -2220.0(g)
Propylene	$\text{C}_3\text{H}_6$	-185.2	3.00	-47.70	18.42	+62.78(g)	267.05(g)	+20.41(g)	-2058.4(g)
<i>n</i> -propyl alcohol	$\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$	-127	-	97.04	-	-159.9(g)	322.6(g)	-300.7(l) -255.2(g)	-2010.4(l) -2068.6(g)
Isopropyl alcohol	$\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$	-89.7	-	82.24	-	-175.2(g)	317.5(g)	-310.9(l) -272.1(g)	-1834(g)
<i>n</i> -Propyl benzene	$\text{C}_9\text{H}_{12}$	-99.5	8.54	159.2	38.24	+137.6(g)	400.14(g)	-38.40(l) +7.82(g)	-5218.2(l) -5264.48(g)
Silicon dioxide	$\text{SiO}_2$	1710	14.2	2230	-	-856.64(c)	41.84(c)	-910.94(c)	-



ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

5/5

สารประกอบ	สูตร	$T_M(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_M(\text{kJ/mol})$	$T_B(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_V(\text{kJ/mol})$	$\Delta G^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$S^{\circ}(\text{J/mol}\cdot\text{K})$	$\Delta H^{\circ}_F(\text{kJ/mol})$	$\Delta H^{\circ}_c(\text{kJ/mol})$
Sodium bicarbonate	$\text{NaHCO}_3$	-	-	-	Decomposes at $270^{\circ}\text{C}$	-847.12(c)	-	-945.6(c)	-
Sodium bisulfate	$\text{NaHSO}_4$	-	-	-	-	-	-	-1126.3(c)	-
Sodium carbonate	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	-	-	-	Decomposes at $854^{\circ}\text{C}$	-1043.119(c)	-	-1130.9(c)	-
Sodium chloride	$\text{NaCl}$	808	28.5	1465	170.7	-384.14(c)	72.13(c)	-411.0(c)	-
Sodium cyanide	$\text{NaCN}$	562	16.7	1497	155	-	-	-89.79(c)	-
Sodium hydroxide	$\text{NaOH}$	319	8.34	1390	-	-379.49(c)	64.46(c)	-426.6(c) -469.4(aq)	-
Sodium nitrate	$\text{NaNO}_3$	310	15.9	-	Decomposes at $380^{\circ}\text{C}$	-366.25(c)	-	-466.7(c)	-
Sodium nitrite	$\text{NaNO}_2$	271	-	-	Decomposes at $320^{\circ}\text{C}$	-	-	-359.4(c)	-
Sodium sulfate	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	890	24.3	-	-	-1263.95(c)	-	-1384.5(c)	-
Sodium sulfide	$\text{Na}_2\text{S}$	950	6.7	-	-	-	-	-373.2(c)	-
Sodium sulfite	$\text{Na}_2\text{SO}_3$	-	-	-	Decomposes	-1003.78(c)	-	-1090.3(c)	-
Sodium thiosulfate	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	-	-1117.1(c)	-
Sulfur (rhombic)	$\text{S}_8$	113	10.04	444.6	83.7	0(c)	31.8(c)	0(c)	-
Sulfur (monoclinic)	$\text{S}_8$	119	14.17	444.6	83.7	+0.1(c)	32.8(c)	+0.30(c)	-
Sulfur dioxide	$\text{SO}_2$	-75.48	7.402	-10.02	24.91	-300.19(g)	248.22(g)	-296.90(g)	-
Sulfur trioxide	$\text{SO}_3$	16.84	25.48	43.3	41.80	-371.06(g)	256.76(g)	-395.18(g)	-
Sulfuric acid	$\text{H}_2\text{SO}_4$	10.35	9.87	-	Decomposes at $340^{\circ}\text{C}$	-690.0(l) -744.53(aq)	156.9(l) 20.1(aq)	-811.32(l) -907.51(aq)	-
Toluene	$\text{C}_7\text{H}_8$	-94.99	6.619	110.62	33.47	+122.0(g)	320.7(g)	+12.00(l) +50.00(g)	-3909.9(l) -3947.9(g)
Water	$\text{H}_2\text{O}$	0	6.0095	100	40.656	-237.13(l) -228.57(g)	69.91(l) 188.83(g)	-285.84(l) -241.83(g)	-
<i>m</i> -Xylene	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	-47.67	11.569	139.10	36.40	+118.76(g)	358.54(g)	-25.42(l) +17.24(g)	-4551.9(l) -4594.5(g)
<i>o</i> -Xylene	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	-25.18	13.598	144.42	36.82	+122.0(g)	353.83(g)	-24.44(l) +18.99(g)	-4552.9(l) -4596.3(g)
<i>p</i> -Xylene	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	13.26	17.11	138.35	36.07	+121.4(g)	352.165(g)	-24.43(l) 17.95(g)	-4552.9(l) -4595.2(g)
Zinc	$\text{Zn}$	419.5	6.674	907	114.77	0(c)	41.63(c)	0(c)	-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

(รวบรวมจาก : Bruce E. Poling, George H. Thomson, Daniel G. Friend, Richard L. Rowley,  
and W. Vincent Wilding (2008). **Perry's Chemical Engineers'  
Handbook**. 8<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill company. P. 2-186 to 2-193 and  
P. 2-195 to 2-200

P.W. Atkins (1994). **Physical Chemistry**. 5<sup>th</sup> Ed. Oxford : Oxford  
University Press P. C8-C15

Richard M. Felder and Ronald W. Rousseau (1986). **Elementary  
Principles of Chemical Processes**. 2<sup>nd</sup> Ed. USA : John Wiley &  
Sons, Inc. P. 615-621)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## เฉลยแบบฝึกหัด

### บทที่ 1

- 1.1 0.5 โมล, 61.947 กรัม
- 1.2  $1.612 \times 10^{-3}$  โมล, 0.1997 กรัม
- 1.3 3 โมล และ 5 โมล ตามลำดับ
- 2.1 0.0001 โมล, 0.0158 กรัม
- 2.2 0.0008 โมล
- 2.3 0.8 มิลลิลิตร
- 2.4 0.0126 กรัม, 0.0001 โมล
3. 866.356 กรัม
4. 0.5414 กรัม
5. 453.305 กรัม
6. 1.5 โมล
- 7.1 Hg
- 7.2 0.04985 โมล, 10.79759 กรัม
- 7.3 O<sub>2</sub> เหลือ 0.28759 โมล, 9.2024 กรัม
- 8.1  $16\text{Ag(s)} + \text{S}_8\text{(s)} \rightarrow 8\text{Ag}_2\text{S(s)}$
- 8.2 ไม่มีสารใดเหลือ
- 8.3 0.02 โมล, 4.9559 กรัม
9. 1.3076 กรัม
10.  $n = 4$

### บทที่ 2

1.  $W = -0.162$  จูล/โมล,  $\Delta H = 5000$  จูล/โมล,  $\Delta U = 5000.162$  จูล/โมล
2. 55625 กิโลจูล
3. คายความร้อน 530 กิโลจูล
4.  $\frac{a-d}{2} + \frac{c-b}{4}$
5. ตอบ ข้อ ง.
6.  $4.66 \times 10^{-18}$  จูล
7. 436 กิโลจูล/โมล
8. 339 กิโลจูล/โมล
9. 340.475 กิโลจูล/โมล
- 10.1 -1190.5 กิโลจูล/โมล
- 10.2 -2057.36 กิโลจูล/โมล
- 11.1 -203.4 กิโลจูล/โมล
- 11.2 -291.2 กิโลจูล/โมล

**บทที่ 3**

1. 48.913
2.  $[H_2] = 0.89$  โมล/ลิตร,  
 $[Cl_2] = 0.39$  โมล/ลิตร
3. ร้อยละ 95.24
4. 0.050 โมล/ลิตร
5. 33.39 โมล
6. 1.49 โมล/ลิตร
7. 111.02 โมล/ลิตร
8.  $[C_2H_4] = 2.25$  โมล/ลิตร,  
 $[H_2] = 0.75$  โมล/ลิตร,  
 $[C_2H_2] = 0.75$  โมล/ลิตร
9.  $1.2 \times 10^{-5}$  โมล
10. เกิดตะกอน

**บทที่ 4**

1. 6.6 กรัม/วินาที
2.  $X/2$  โมล/ลิตร·วินาที
3.  $2.5 \times 10^{-5}$  โมล/นาที
4.  $Rate = 3.43 \times 10^{-5} [NO]^2 [H_2]$
5. 3.5 เท่า
6. 53594.28 จูล/โมล
7. 173.21 กิโลจูล/โมล
8. 19 องศาเซลเซียส
- 9.1 2 นาที
- 9.2 0.3 โมล/ลิตร·นาที
- 9.3  $0.5$  (โมล/ลิตร) $^{-1}$ ·นาที $^{-1}$
- 10.1  $0.02$  (โมล/ลิตร) $^{-1}$ ·นาที $^{-1}$
- 10.2 25 นาที
- 10.3 1.25 โมล/ลิตร

**บทที่ 5**

- 1.1  $K_b = 1.712 \times 10^{-5}$
- 1.2  $K_a = 1.816 \times 10^{-5}$
- 1.3  $K_a = 4 \times 10^{-10}$
- 2.1  $[H^+] = [Cl^-] = 2.512 \times 10^{-4}$  โมล/ลิตร,  
 $[OH^-] = 3.981 \times 10^{-11}$  โมล/ลิตร
- 2.2  $0.916 \times 10^{-3}$  กรัม
3. 0.2 โมล/ลิตร
4.  $pH = 4.379$
5.  $pH = 11.7$
6.  $pH = 10.43$
7.  $pH = 4.77$
8.  $K_a = 5 \times 10^{-4}$
9.  $pH = 4.55$
10.  $pH$  เปลี่ยนจาก 4.74 เป็น 4.70

### บทที่ 6

- 1.1  $3\text{AsH}_3 + 4\text{KClO}_3 \rightarrow 3\text{H}_3\text{AsO}_4 + 4\text{KCl}$       4.  $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) > \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) > \text{Ag}(\text{s}) > \text{H}_2\text{O}(\text{l}) > \text{F}^-(\text{aq})$
- 1.2  $4\text{SnCl}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 8\text{HCl} \rightarrow 4\text{SnCl}_4 + \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$       5. เกิดขึ้นไม่ได้
- 1.3  $6\text{HNO}_3 + \text{I}_2 \rightarrow 2\text{HIO}_2 + 6\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$       6.1 +1.08 โวลต์
- 1.4  $6\text{Fe}^{2+} + \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ \rightarrow 6\text{Fe}^{3+} + 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$       6.2  $\text{Ni}(\text{s}) + 2\text{Ag}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{Ag}(\text{s})$
- 1.5  $2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{OCl}^- + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{CrO}_4^{2-} + 3\text{Cl}^- + 5\text{H}_2\text{O}$       6.3 -208.4 กิโลจูล/โมล
- 1.6  $5\text{BiO}_3^- + 2\text{Mn}^{2+} + 14\text{H}^+ \rightarrow 2\text{MnO}_4^- + 5\text{Bi}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$       6.4  $3.065 \times 10^{36}$
- 1.7  $3\text{I}_2 + 6\text{KOH} \rightarrow \text{KIO}_3 + 5\text{KI} + 3\text{H}_2\text{O}$       7.  $[\text{Ag}^+] = 0.34$  โมล/ลิตร
- 1.8  $3\text{Cu} + 8\text{HNO}_3 \rightarrow 3\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{NO} + 4\text{H}_2\text{O}$       8.1 0.442 โวลต์
- 1.9  $2\text{KMnO}_4 + 16\text{HCl} \rightarrow 2\text{KCl} + 2\text{MnCl}_2 + 8\text{H}_2\text{O} + 5\text{Cl}_2$       8.2 0.034 โวลต์
- 1.10  $3\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{NO}_3^- + 14\text{H}^+ \rightarrow 6\text{Cu}^{2+} + 2\text{NO} + 7\text{H}_2\text{O}$       9. 0.772 แอมแปร์
2.  $\text{Zn}(\text{s})/\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) // \text{Cr}^{3+}(\text{aq})/\text{Cr}(\text{s})$       10.  $\text{H}_2 = 0.373$  โมล,  $\text{O}_2 = 1.86$  โมล
- $3\text{Zn}(\text{s}) + 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) \rightarrow 3\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{Cr}(\text{s})$       11. +3
- $E^\circ_{\text{cell}} = +0.02$  โวลต์
3.  $\text{Br}_2(\text{l}) > \text{H}^+(\text{aq}) > \text{Ni}^{2+}(\text{aq}) > \text{Zn}^{2+}(\text{aq})$

### บทที่ 7

1.  ${}_{15}^{31}\text{P}$       7. 5747 ปี
2. 30.45 MeV/atom และ 5.07 MeV/nucleon      8. 8.7 ปี
3.  $2.409 \times 10^{14}$  ครั้ง/วินาที      9. 15070 ปี
4.  $2.5 \times 10^{20}$  ครั้ง      10. 14142 ปี
5.  $4.33 \times 10^9$  กิโลกรัม      11. 4800 ปี
6. 36 ปี      12. 1912 ปี