510.7
2234ก
ก 2

การสร้างบทเรียนแบบInquiry เรื่องสมดุลเคมี

ดร.นิดา สะเพียรชัย

27 ส.ค. 2525

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร. 3921575, 3915058

คณะวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์

วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร

พ.ศ. 2517

150308

ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีก็ด้วยความร่วมมือกันของคณะกรรมการพัฒนาหลักสูตรวิชาเคมีที่ได้ทำงานร่วมกับผู้เขียน รายนามอาจารย์เหล่านั้น คือ

1. ศาสตราจารย์ไชศรี อาภรณ์รัตน์
2. นางสาวมานี จันทวิมล
3. ดร.พีรวรรณ พันธุมนาวิน
4. นางปราณี เส็งหะพันธุ์
5. นางสาวโสภี วงศ์ทองเหลือ
6. นางนพพร สุนทรพิทักษ์
7. นางสาวสุนีย์ ศรีอัสดร
8. นายชงชัย ชิวปรีชา
9. นางสาววนิดา อัครปรีดี

อาจารย์ดังกล่าวนี้ได้ทำงานด้วยความอุตสาหะตั้งแต่เริ่มวางเค้าโครงหลักสูตร จัดลำดับเนื้อหาวิชา ทำการทดลองและปรับปรุงการทดลองตลอดจนการเขียนแบบเรียนและคู่มือครูจนได้ผลเป็นที่พอใจ หากปราศจากการร่วมมือของอาจารย์ดังกล่าวแล้ว งานนี้คงไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ที่มีส่วนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ก็คือ อดีตปลัดกระทรวงศึกษาธิการ นายบุญถิ่น อัตถากร ท่านอธิการ ศาสตราจารย์ ดร.สุดใจ เหล่าสุนทร ท่านหัวหน้าคณะ ศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ รักษพลเดช ซึ่งได้อนุมัติให้ผู้เขียนได้มีโอกาสไปทำงานร่วมกับสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาหลักสูตรวิชาวิทยาศาสตร์จนเป็นผลสำเร็จ

ผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศได้แก่ Professor G.H. Aylward Professor M. Gardner และ Mr. W. Butts ได้ให้ความร่วมมือในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี นับตั้งแต่เริ่มงานตลอดจนการประเมินผล บทเรียน คู่มือครู และอุปกรณ์

ผู้ให้การสนับสนุนอีกท่านหนึ่งคือ ท่านผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายสนั่น สุมิตร ท่านเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนกับผู้เขียนอย่างดียิ่ง ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวนามมาแล้ว ณ โอกาสนี้ด้วย

นิดา สะเพียรชัย

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	
	ภูมิหลัง	1
	ความมุ่งหมายของการค้นคว้า	2
	ความสำคัญของการค้นคว้า	2
	ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	2
2	เอกสารและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	รูปแบบของบทเรียนเดิม	3
	รูปแบบของบทเรียนใหม่	6
3	วิธีดำเนินการ	10
	การเลือกและวางเค้าโครงเนื้อหาวิชา	10
	การจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องของบทเรียน	11
	การเขียนเค้าโครงละเอียดของบทเรียน	12
	การเขียนบทเรียนร่างแรก	13
	การเขียนคู่มือครู	16
	การประเมินผลบทเรียน	18
	การสร้างชุดเครื่องมือ	18
4	การสรุปและอภิปรายผล	21
	ความมุ่งหมายของการวิจัย	21
	วิธีดำเนินการวิจัย	21
	สรุปผลการวิจัย	21
	อภิปรายผลการวิจัย	22
	แผนการวิจัยขั้นต่อไป	23

บรรณานุกรม 24

ภาคผนวก 25

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ทั้งในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนี้มักจะเป็นการเน้นความรู้ความจำกันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นเพียงจุดมุ่งหมายอันหนึ่งของหลักสูตรวิชาวิทยาศาสตร์ การที่จะได้รับประโยชน์จากการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์อย่างสมบูรณ์ตามจุดมุ่งหมายนั้น จะต้องพยายามให้บรรลุจุดมุ่งหมายที่สำคัญอื่น ๆ อีก อาทิ เช่น เพื่อให้เกิดทัศนคติทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้เกิดทักษะที่สำคัญในการศึกษาค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลของวิทยาศาสตร์ที่มีต่อมวลมนุษย์และสภาพแวดล้อม[3] เป็นต้น

การที่จะให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวนั้น ครูจะต้องเป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถพอที่จะดำเนินการสอนให้สอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของหลักสูตรให้ครบถ้วน อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบเรียนคู่มือครูตลอดจนอุปกรณ์ เพื่อช่วยในการเรียนการสอน ก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าความรู้ความสามารถของครู แบบเรียนที่เขียนกันโดยทั่วไปนั้นมักจะเป็นการเขียนแบบบอกเล่า คือให้แต่ความรู้อย่างเดียว มิได้ผสมผสานแนวการสอนที่จะให้นักเรียนใช้ความคิดหาเหตุผลหรือสรุปได้เอง แบบเรียนดังกล่าวยังไม่แพร่หลาย จะมีตัวอย่างก็คือโครงการพัฒนาหลักสูตรขั้นนำเป็นต้นว่า โครงการสอนวิชาเคมีของ Nuffield Foundation[9] โครงการสอนวิทยาศาสตร์ Australian Science Education Project (ASEP)[6] หรือ Chemistry An Experimental Science[10] ซึ่งได้ทุ่มเทกำลังเงินและกำลังคนหลายฝ่ายเพื่อพัฒนาหลักสูตรกันอย่างจริงจัง ประเทศไทยของเราก็ได้จัดตั้งสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขึ้น[5] เพื่อพัฒนาหลักสูตรวิชาเคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์ และคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาปลาย วิทยาศาสตร์ทั่วไปและคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น สถาบันได้ตระหนักถึงความสำคัญและความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ทุกระดับให้ได้ผลสมบูรณ์ตามจุดมุ่งหมาย งานที่สำคัญอันดับแรกก็คือการพัฒนาแบบเรียน คู่มือครู และอุปกรณ์ เพื่อครูจะได้ใช้เป็นแนวในการเรียนการสอนแบบใหม่

ความมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์และจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องที่สำคัญในการสอนเรื่องสมดุลเคมี

2. เพื่อศึกษาหาวิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการสอนเรื่องสมดุลเคมี

3. เพื่อสร้างบทเรียนเรื่องสมดุลเคมีเพื่อช่วยในการสอนแบบ inquiry

4. เพื่อสร้างคู่มือครูในการสอนเรื่องสมดุลเคมี

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้จะทำให้ได้แบบเรียนเรื่องสมดุลเคมี ตามแนวการสอนแบบ inquiry สำหรับใช้ประกอบการสอนวิชาเคมีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5

2. ผลการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้จะทำให้ได้คู่มือครู ซึ่งจะช่วยให้ครูทราบถึงวิธีสอนเรื่องสมดุลเคมีตามแนวใหม่

3. ผลการศึกษาเรื่องนี้จะได้ชุดอุปกรณ์และการทดลองใหม่ ๆ ที่เหมาะสมในการสอนเรื่องสมดุลเคมี

4. เป็นการเผยแพร่วิธีการสอนวิชาเคมีตามแบบ inquiry ซึ่งจะเป็นแนวทางให้มีการค้นคว้าต่อไป

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. เนื้อหาที่ใช้สร้างบทเรียนแบบใหม่นี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของเนื้อหาวิชาเคมีตามหลักสูตรใหม่ เฉพาะเรื่อง "สมดุลเคมี"

2. ระยะเวลาที่จะใช้สอนเรื่องนี้ประมาณ 14 คาบ

3. การประเมินประสิทธิภาพของบทเรียนที่สร้างขึ้น ใช้ข้อวิจารณ์ของผู้เชี่ยวชาญทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมทั้งครูผู้สอนวิชาเคมีระดับมัธยมศึกษาตอนปลายอีกด้วย

บทที่ 2

เอกสารและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักสูตรวิชาเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ [4] เริ่มใช้มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503 รายละเอียดที่ให้ไว้ในหลักสูตรเป็นเรื่อง ๆ นั้นไม่ได้แสดงถึงความต่อเนื่องของเนื้อหาวิชา หรือความลึกซึ้งและขอบเขตของเนื้อหาแต่ละเรื่อง จึงเป็นหน้าที่ของผู้เขียนแบบเรียนจะแปลความหมายเอาเองว่าจะใช้ขอบเขตเท่าใด จะใช้วิธีบรรยายหรือใช้วิธีอื่น ๆ เมื่อพิจารณาดูหัวข้อในหลักสูตรแล้วก็พบว่า หัวข้อ สมดุลเคมีไม่มีทั้ง ๆ ที่มีเรื่อง กรด-เบส และออกซิเดชั่น-รีดักชั่น การที่จะให้นักเรียนได้เข้าใจเรื่องทั้งสองอย่างดี ก็ควรจะได้เน้น concept ที่สำคัญซึ่งเป็นรากฐานของเรื่องกรด-เบส และออกซิเดชั่นและรีดักชั่น นั่นก็คือ สมดุลเคมีนั่นเอง ในโครงการพัฒนาหลักสูตรชั้นนำ [9,10] ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ล้วนแต่รวมเรื่องสมดุลเคมีไว้ ทั้งนี้ก็เพราะคณะผู้ปรับปรุงหลักสูตรเล็งเห็นว่า ในการศึกษาปฏิกริยาเคมีนั้น เรื่องที่สำคัญ ๆ ที่ควรจะต้องเรียนก็คือ ปฏิกริยาเกิดหรือไม่ (Stoichiometry) เกิดมากน้อยเพียงไร (Equilibrium) และเกิดเร็วเพียงใด (Rate of Chemical Reaction)

รูปแบบของบทเรียนเดิม

ตัวอย่างแบบเรียนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะเขียนแยกกันเป็นภาคทฤษฎีหรือภาคบรรยายเล่มหนึ่ง ภาคปฏิบัติอีกเล่มหนึ่ง ในหนังสือภาคทฤษฎีนั้นก็มักจะเป็นการบรรยายแบบบอกเล่า มิได้สอดแทรกให้เกิดแนวความคิดตามขบวนการทางวิทยาศาสตร์ ส่วนภาคปฏิบัติการนั้นยังให้เลือกได้เสียอีก คือนักเรียนอาจจะเรียนวิชาเคมีภาคบรรยายเท่านั้นก็ได้ ซึ่งเป็นการผิดหลักของการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ แม้นักเรียนที่เลือกเรียนภาคปฏิบัติการก็ตาม แบบเรียนภาคปฏิบัตินั้นก็มีความสัมพันธ์กับภาคทฤษฎีน้อยมากจนเกือบจะเรียกว่าเรียนแยกกันไปเลย ครูผู้สอนก็มักจะแยกการสอนภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ในสัปดาห์หนึ่งเรียนภาคทฤษฎี 2 ชั่วโมง ภาคปฏิบัติ 1 ชั่วโมง เนื้อหาอาจจะเป็นคนละเรื่องกันก็ได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหลักสูตรได้กำหนดไว้เช่นนั้นอย่างหนึ่ง และรูปแบบของแบบเรียนที่ไม่ได้ชี้แนวให้เห็นการเรียนการสอนตามขบวนการทางวิทยาศาสตร์อีกอย่างหนึ่ง

การวางลำดับแนวความคิดของบทเรียนเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง ถ้าหากออกแบบบทเรียนเป็นเรื่อง ๆ โดยขาดความต่อเนื่องแล้ว จะไม่ทำให้เกิดความเข้าใจและไม่อาจมองเห็นโครงสร้างของเนื้อหาวิชาและอาจจะไม่ได้ concept ที่สำคัญ ๆ ตัวอย่างเช่น แบบเรียนที่เขียนโดย กฤษณา ชุติมา และ ชุลี ชัยพิพัฒน์[1] ในเรื่อง กรด เบส วางลำดับดังนี้

กรด

ความหมายของกรด
ชนิดของกรด การเรียกชื่อกรด
สมบัติทั่วไปของกรด อนุมูลกรดและเวเลนซ์ของอนุมูลกรด
รายชื่อกรดและอนุมูลกรดที่ควรจำ
สภาพเบสของกรด
แอซิดแอนไฮไดรด์
วิธีเตรียมกรด
กรดแก่ กรดอ่อน

เบส

ความหมายของเบส
ชนิดของเบส
การเรียกชื่อเบส
สมบัติทั่วไปของเบส
อนุมูลเบสและเวเลนซ์ของอนุมูลเบส
สภาพกรดของเบส
เบสิคแอนไฮไดรด์
วิธีเตรียมเบส
เบสแก่ เบสอ่อน

ความสัมพันธ์ระหว่างกรดกับเบสในทัศนะใหม่

จากเค้าโครงอันนี้จะเห็นว่า เป็นวิธีเน้นการสอนแบบบรรยายให้รู้ความหมายของกรด สูตร สมบัติ และวิธีเตรียม ถ้าดูรายละเอียดในแบบเรียนจะเห็นได้ชัดว่า มีการให้สูตรของกรดไว้มากมาย ซึ่งจะต้องจดจำ แม้กระทั่งตอนที่เกี่ยวกับสมบัติของกรด ก็ใช้การบรรยายว่ากรดมีสมบัติอะไรบ้าง ยิ่งกว่านั้น ยังมีการเขียนสมการมากมาย ตามด้วยการเรียกชื่อกรดและอนุมูลกรดต่าง ๆ ในตอนที่เกี่ยวกับวิธีเตรียม ก็ไม่มีวิธีทดลองแต่เป็นการเขียนสมการแสดงการเตรียมกรดวิธีต่าง ๆ อีกมาก เมื่อจะอธิบายว่าทำไมกรดบางชนิดจึงเป็นกรดแก่ กรดบางชนิดจึงเป็นกรดอ่อน ก็จำเป็นต้องใช้วิธีบอกว่า กรดแก่แตกตัวให้อิออนได้มาก กรดอ่อนแตกตัวได้น้อย สำหรับเรื่องเบสก็ใช้วิธีบรรยายในทำนองเดียวกัน

บุญพฤกษ์ จาฏามระ [2] จัดลำดับในเรื่องกรด-เบสดังนี้

การอ่านชื่อประกอบ
สารประกอบประเภทธาตุคู่
สารประกอบประเภทธาตุพหู
อิออน อิออไนเซชัน
อนุมูล กรดไฮโดร กรดออกซี อนุมูลกรด เวเลนซีของอนุมูล
การอ่านชื่ออนุมูล สภาพเบสของกรด
เบส สภาพกรดของเบส การสะเทิน

เมื่อดูรายละเอียดในแบบเรียนก็เป็นลักษณะบรรยายในทำนองเดียวกับของกฤษณา และชุลี มีสูตรและสมการมากมายเป็นการเน้นความรู้ความจำในรายละเอียดปลีกย่อยเสียเป็นส่วนมาก concept ที่สำคัญเกี่ยวกับสมดุลมิได้กล่าวถึงเลย และที่ขาดมากก็คือ การทดลองเพื่อนำไปสู่ข้อสรุปหรือเพื่อสร้าง concept ที่สำคัญ การที่จะทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกรด-เบสนั้น ควรจะได้สร้าง concept เกี่ยวกับสมดุลเคมีเสียก่อน เพื่อจะได้เป็นพื้นฐานในการอธิบายว่าทำไมกรดจึงมีสมบัติเช่นนั้น ทำไมอินดิเคเตอร์แต่ละชนิดจึงมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่าง ๆ กัน ทำไมกรดบางชนิดจึงเป็นกรดอ่อน บางชนิดจึงเป็นกรดแก่ ทำไมเกลือบางชนิดเมื่อละลายน้ำแล้วเป็นกลาง บางชนิดละลายน้ำแล้วเป็นกรด บางชนิดเป็นเบส ถ้าหากไม่สร้าง concept เกี่ยวกับสมดุลเคมีแล้วก็ยากที่จะอธิบาย

เท่าที่กล่าวมานี้พอจะสรุปได้ว่า รูปแบบในการเขียนแบบเรียนวิชาเคมีระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโดยทั่วไปแล้ว เป็นการเขียนแบบบรรยาย ไม่ได้สัมพันธ์กับการทดลอง จึงทำให้การเรียนการสอนในโรงเรียนเป็นไปตามลักษณะของแบบเรียน คือ เน้นความรู้ความจำ ในรายละเอียดมากมาย ไม่มีการสร้าง concept ที่สำคัญ ๆ จึงเป็นการยากที่จะบรรลุเป้าหมายในการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ ถ้าจะฝึกให้นักเรียนเป็นคนช่างสังเกต มีทักษะทางขบวนการวิทยาศาสตร์ ช่างคิดหาเหตุผลเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ ก็จำเป็นจะต้องเขียนแบบเรียนเพื่อเป็นแนวทางที่จะให้ได้ตามจุดมุ่งหมายนั้น ๆ

<u>รูปแบบของบทเรียนใหม่</u>

โครงการพัฒนาหลักสูตรวิชาเคมีของสหรัฐอเมริกาเป็นตัวอย่างของความพยายามที่จะพัฒนาการสอนวิชาเคมีให้เป็นการสอนวิทยาศาสตร์อย่างแท้จริง นั่นคือ เน้นการทดลองเป็นหัวใจสำคัญ โครงการ Chemical Bond Approach[12] (CBA) และโครงการ CHEM Study[11] ได้ทำการพัฒนาหลักสูตรวิชาเคมีตามความหมายอย่างสมบูรณ์ โดยการรวมกำลังบุคคลากรหลายระดับได้แก่ อาจารย์จากมหาวิทยาลัย ครูผู้สอนวิชาเคมีในระดับมัธยมและผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชา โครงการ CBA มีวัตถุประสงค์ที่จะสอนวิชาเคมีโดยเน้นขบวนการคิดตามแนวของนักวิทยาศาสตร์ เป็นการผสมผสานกลมกลืนระหว่างแนวความคิดและข้อเท็จจริงซึ่งหมายถึงการรวบรวมข้อมูลจากการทดลองและนำข้อมูลมาแปลความหมายและนำไปสู่การสรุป รูปแบบของการเขียนแบบเรียนได้เบนออกจากแนวเก่า คือไม่เป็นการบรรยาย มีการสอดแทรกปัญหาเพื่อให้นักเรียนตอบหรือคิดค้น บางครั้งจะเป็นการตั้งปัญหาในลักษณะที่ยังไม่อาจหาคำตอบได้ เพื่อให้นักเรียนตระหนักถึงความจริงที่ว่า การเรียนวิชาเคมีซึ่งเป็นวิทยาศาสตร์สาขาหนึ่งนั้น มิใช่ว่าจะรู้คำตอบไปเสียหมด แต่ยังมีปัญหาอีกมากที่ยังต้องการการค้นคว้าวิจัยต่อไปเพื่อหาคำตอบ จะทำให้นักเรียนสนใจใคร่เรียนรู้ต่อไป

CBA ได้ผลิตแบบเรียนเล่มหนึ่ง คือ Chemical System[12] และปฏิบัติการอีกเล่มหนึ่งคือ Investigating Chemical Systems[13] แม้ว่าแบบเรียนกับคู่มือปฏิบัติการจะแยกกัน แต่มีคู่มือครู[14] ที่เขียนแนะนำไว้ค่อนข้างละเอียดว่าแต่ละ concept จะสอนอย่างไร ทำอะไรก่อนหลัง มีตัวอย่างผลการทดลองไว้ให้ด้วย

โครงการ CHEM Study ได้ผลิตแบบเรียน Chemistry An Experimental Science[10] และ Laboratory Manual[7] แล้วยังมีคู่มือครู[8] เพื่อชี้แจงโดยละเอียดถึงการทดลองอุปกรณ์ในการทดลอง และวิธีการสอนเพื่อให้เป็นไปตามวิธีการทางวิทยาศาสตร์ ถ้าหากว่ามีตอนใดที่ไม่อาจให้นักเรียนทดลองด้วยตนเองได้ก็จะใช้ภาพยนต์ที่ได้สร้างไว้อย่างดีเข้าช่วยเพื่อให้นักเรียนได้รวบรวมข้อมูลจากการทดลอง การอภิปรายผลหลังการทดลองถือเป็นเรื่องสำคัญยิ่ง เพราะจะช่วยให้นักเรียนได้นำเอาผลการทดลองมาคิดค้นเพื่อนำไปสู่ข้อสรุปและสร้าง concept ต่าง ๆ ได้

ก่อนที่จะเริ่มสอนสมดุลเคมี CHEM Study ได้วางรากฐาน concept ที่สำคัญมาก่อนได้แก่

Chemical Reactions

The Gas Phase : Kinetic Theory

Liquids and Solids : Condensed Phases of Matter

Structure of the Atoms and the Periodic Table

Energy Effects in Chemical Reactions

The Rates of Chemical Reactions

Equilibrium in Chemical Reactions

สำหรับเรื่องสมดุลเคมี ได้จัดลำดับแนวความคิดดังนี้

Qualitative Aspects of Equilibrium

Reconizing Equilibrium

The Dynamic Nature of Equilibrium

The State of Equilibrium

Altering the State of Equilibrium

Attainment of Equilibrium

Predicting New Equilibrium Concentration : Le Chatetier

Application of Equilibrium Principles

Quantitative Aspects of Equilibrium

Equilibrium Constant

The Law of Chemical Equilibrium

The Factors which Determine Equilibrium

ในแบบเรียนของ CHEM Study มีการใช้คำถามเพื่อให้นักเรียนคิดตามไปเป็นตอน ๆ ใช้ภาพยนต์เรื่อง "สมดุลเคมี" เข้าช่วยแต่มีการทดลองค่อนข้างน้อย คือมีการสาธิต 1 การทดลอง และมีการทดลองของนักเรียน 1 การทดลอง ในการดำเนินเรื่องนั้นได้พยายามใช้ข้อมูล และการอภิปรายเป็นส่วนใหญ่

โครงการชั้นนำของประเทศอังกฤษได้แก่ โครงการ Nuffield Foundation การพัฒนาการสอนวิชาเคมีของโครงการนี้เปลี่ยนแนวการสอนจากเดิมมาก คือ จากการบรรยายบอกเล่าไปเป็นแบบ Inquiry โดยให้นักเรียน "ค้นพบ" ด้วยตนเองจริง ๆ ฉะนั้นโครงการนี้ไม่มีแบบเรียนให้นักเรียน เอกสารที่ผลิตขึ้นคือ

1. The Sample Scheme Stages I and II : The Basic Course
2. The Sample Scheme Stage III : A Course of Options
3. Collected Experiments
4. Laboratory Investigations : Stage I A
   Stage I B
   Stage II
   Stage III Options
5. Handbook for Teachers

เอกสารที่เตรียมขึ้นเป็นของครูเป็นส่วนใหญ่ สิ่งที่เป็นของนักเรียน คือ Laboratory Investigations ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงการ Nuffield ได้เน้นการทดลองเป็นหัวใจสำคัญเช่นเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลจากการทดลองแล้ว ครูจะเป็นผู้นำอภิปรายเพื่อนำไปสู่การสรุป Sample Scheme ก็คือคู่มือครูนั่นเอง ซึ่งจะให้รายละเอียดต่าง ๆ ว่าครูจะดำเนินการสอนอย่างไรในแต่ละหัวข้อ โครงการ Nuffield ได้รวมเรื่อง "สมดุลเคมี" ไว้ใน 'O' - Level Chemistry ด้วย แต่ก่อนจะถึงเรื่องนี้ก็ได้วางพื้นฐานเกี่ยวกับการเกิดปฏิกริยาเคมีไว้แล้วใน

Stage I ซึ่งมีทั้งหมดประมาณ 10 หัวข้อ ใน Stage II เรียงลำดับดังนี้

Atoms in Chemistry

Investigation of Salt and "Salt gas"

Looking at the Elements in the Light of the Periodic Table

Finding out how atoms are arranged in elements

Solids , liquids and gases

Explaining the behaviour of electrolytes

Finding the relative number of particles involved in reactions

How fast ? Rates and catalysts

How far ? The idea of dynamic equilibrium

หัวข้อสมดุลเคมีของ Nuffield จัดลำดับดังนี้

Looking at reactions which go both ways

Further Studies of Chemical systems in equilibrium

Testing the idea of dynamic equilibrium

ในเรื่องสมดุลเคมี มีการทดลองของนักเรียน 4 การทดลอง ครูสาธิตอีก 2 การทดลอง และมี Film liip ประกอบ 2 เรื่อง

ดังได้กล่าวมาแล้วแต่ตอนต้นว่า โครงการ Nuffield ไม่มีแบบเรียนให้นักเรียน แต่จะให้นักเรียนเขียนแบบเรียนด้วยตนเองโดยรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง เมื่อได้อภิปรายกับครูแล้วก็รวบรวมเขียนแบบเรียนขึ้น

จากการติดตามผลจากการทดลองสอนในโรงเรียนพบว่า นักเรียนส่วนใหญ่ชอบให้มีแบบเรียนมากกว่าที่จะให้เขียนแบบเรียนเอง ฉะนั้นการเปลี่ยนแนวการสอนให้เป็นแบบ inquiry จนเกินไป อาจจะไม่เหมาะสมก็ได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

การเลือกและวางเค้าโครงเนื้อหาวิชา

ในการเลือกเนื้อหาวิชานั้นควรจะได้ถือความมุ่งหมายของการ**สอนการเรียนวิชาวิทยาศาสตร์**[1] เป็นหลัก แต่เนื่องจากความมุ่งหมายนั้นได้เขียนไว้กว้าง ๆ จึงควรจะได้แปลความหมายออกมาเป็นเกณฑ์เสียก่อน เพื่อจะได้ใช้เป็นแนวทางในการเลือกเนื้อหาวิชา

เกณฑ์ในการเลือกเนื้อหาวิชาวิทยาศาสตร์มีดังนี้

เนื้อหาวิชานั้นควรจะ

1 ทันกับความก้าวหน้าของวิชาการ และสะท้อนให้เห็นถึงความรู้พื้นฐานและโครงสร้างของวิชาการที่เป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน

2 มีความต่อเนื่องและสัมพันธ์กัน

3 ใช้อธิบายข้อมูลและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง

4 พอเหมาะกับเวลาที่จะใช้สอนและเหมาะกับความสามารถและวัยของผู้เรียน

5 พอเหมาะกับความสามารถและประสบการณ์ของครู และภายในขอบเขตของอุปกรณ์ที่พอจะหาได้

6 รวมการประยุกต์ในทางเทคโนโลยี เกษตรกรรม การแพทย์ อุตสาหกรรมและการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมของไทย

7 มีความสัมพันธ์กับวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ๆ รวมทั้งคณิตศาสตร์ด้วย

8 ช่วยทำให้ผู้เรียนเกิดความเจริญงอกงามทางปัญญาและคุณธรรมและรู้จักการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมรวมทั้งการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม

จากการใช้เกณฑ์การเลือกเนื้อหาวิชาดังกล่าว ก็ได้เลือก concept สำคัญ ๆ ที่ควรจะบรรจุไว้ในหลักสูตรมัธยมศึกษาตอนปลาย ดังมีหัวข้อดังนี้

1. สสารและพลังงาน
2. การศึกษาปฏิกริยาเคมีเบื้องต้น

3. ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของธาตุ
4. โครงสร้างอะตอม
5. พันธะเคมี
6. อัตราการเกิดปฏิกริยาเคมี
7. สมดุลเคมี
8. กรด-เบส
9. ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี
10. ตารางธาตุ
11. สารประกอบของการ์บอน
12. ความสัมพันธ์ของวิชาเคมีต่ออุตสาหกรรมและสภาวะแวดล้อม

ทั้ง 12 หัวข้อนี้เป็นหัวข้อที่นักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายจะต้องเรียนภายใน 2 ปี เรียนสัปดาห์ละ 3 คาบ จึงได้แบ่ง 1 หัวข้อแรกสำหรับมัธยมศึกษาปีที่ 4 และ 6 หัวข้อหลังสำหรับมัธยมศึกษาปีที่ 5 จะเห็นว่าเรื่องสมดุลเคมีเป็นเรื่องแรกที่จะต้องเรียนในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 5

<u>การจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่อง</u>

ในแต่ละหัวข้อซึ่งจะเป็นบทเรียน 1 บทนั้น ก็จะต้องมาจัดหัวข้อย่อยว่าจะมีขอบเขตมากน้อยเพียงใด และลึกซึ้งเพียงใด ในการจัดก็ต้องคำนึงถึงเกณฑ์ 8 ข้อที่ได้ตั้งไว้ด้วย หัวข้อย่อยแต่ละหัวข้อจะต้องมีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน นอกจากนี้ยังต้องคิดถึงวิธีสอนหัวข้อนั้น ๆ พร้อมกันไปด้วย การจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องนั้นมีตารางแสดงถึงลำดับวิธีดำเนินการสอน เช่น

นักเรียนทำการทดลอง
เขียนกราฟ
หาข้อมูล
การคำนวณ
แบบฝึกหัด
การให้ความรู้
การอภิปรายเกี่ยวกับการทดลอง

การอภิปรายความรู้ที่ได้เรียนมา

การสาธิตของครู เป็นต้น

ตัวอย่างลำดับแนวความคิดต่อเนื่องของ "สมดุลเคมี" ดูได้ในภาคผนวก ข หน้า 3-7

ขั้นต่อไปก็คือ การหาการทดลองและอุปกรณ์เพื่อจะทำให้นักเรียนได้เรียนรู้และเกิดความเข้าใจใน concept ต่าง ๆ ตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนสถานะ การเกิดสารละลายและการเกิดปฏิกริยาเคมี จะออกแบบการทดลองที่ง่าย ๆ อย่างไรจึงจะเกิดความเข้าใจ การทดลอง 7.1 ในภาคผนวก ก หน้า 2 เป็นการทดลองที่ได้มาจากการค้นคว้า ปรับปรุงจนได้ผลเป็นที่พอใจ ในหัวข้ออื่น ๆ ก็ดำเนินการในทำนองเดียวกัน ในหัวข้อ "สมดุลเคมี" ได้การทดลองทั้งหมด 7 การทดลอง ปริมาณของสารเคมีและอุปกรณ์ในแต่ละการทดลองนั้น ได้รวบรวมไว้ในตารางเพื่อจะได้รวมไว้ในคู่มือครู

ในการออกแบบการทดลองนั้นก็อหลักดังนี้

1. ตั้งวัตถุประสงค์ทั่วไปของการทดลองเสียก่อนว่าต้องการอะไร
2. ตั้งวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของการทดลองนั้นว่า เมื่อนักเรียนทำการทดลองนั้นแล้ว ควรจะสามารถทำอะไรได้บ้าง
3. ใช้สารเคมีราคาถูกและปริมาณน้อย เพื่อประหยัดงบประมาณ
4. ใช้อุปกรณ์หาง่าย ราคาถูก และปลอดภัย
5. เป็นการทดลองที่น่าสนใจและตื่นเต้น
6. ได้ผลเหมือนกันทุกครั้ง

จากหลักการดังกล่าวนี้ จะเห็นว่า การออกแบบการทดลองแต่ละหัวข้อ ต้องใช้เวลาพอประมาณ เพื่อให้ได้การทดลองที่เหมาะสมตรงตามเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้ตั้งไว้ นอกจากนี้ ยังต้องทำซ้ำเพื่อความมั่นใจว่า ได้ผลเหมือนเดิมทุกครั้งด้วย

<u>การเขียนเค้าโครงละเอียดของบทเรียน</u>

จากลำดับแนวความคิดต่อเนื่องและการทดลองที่ได้รวบรวมไว้ นำมาเขียนเค้าโครงละเอียดดังนี้

1. เขียนวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของบทเรียน ทั้งนี้ก็เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการเขียนบทเรียนว่าจะต้องการให้นักเรียนสามารถทำอะไรได้บ้าง เมื่อเรียนจบบทเรียนแล้ว (ภาคผนวก ข หน้า 1-2)

นอกจากนี้ วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมยังเป็นแนวในการสอนและการวัดผลอีกด้วย

2. นำการทดลองที่ได้ค้นคว้าและรวบรวมไว้มาวิเคราะห์ดูว่าจะจัดเข้าอยู่ในบทเรียนในรูปใดจึงจะทำให้การเรียนการสอนเป็นแบบ Inquiry

3. เขียนการอภิปรายก่อนการทดลองและอภิปรายหลังการทดลอง

4. ตั้งคำถามต่าง ๆ ที่ต้องการสอดแทรกในบทเรียน

5. เขียนแบบฝึกหัดซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งของการเรียนรู้แต่ละตอน

6. เขียนบทขยายความของบทเรียนทั้งบทเพื่อให้มองเห็นลำดับขั้นและรายละเอียดมากขึ้น

7. สอดแทรกการประยุกต์ของความรู้แต่ละตอนเท่าที่จะทำได้

<u>การเขียนบทเรียนร่างแรก</u>

เท่าที่ได้วิเคราะห์แบบเรียนทั้งที่ใช้ในประเทศและต่างประเทศก็พบว่ามีหลายแบบชนิดที่เป็นบรรยายบอกเล่านั้นมีอยู่มากมาย เพราะเป็นแบบที่ใช้กันอยู่เดิม ส่วนแบบที่สอดแทรกวิธีการสอนแบบ inquiry เข้าไว้ก็พอมีตัวอย่างบ้างดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ผู้วิจัยเห็นว่า การแยกแบบเรียนออกจากภาคปฏิบัตินั้นจะทำให้การเรียนการสอนดำเนินไปตามแนวทางวิทยาศาสตร์ได้ยาก จึงได้ตกลงว่า วิธีที่จะให้ได้ผลดีกว่าก็คือ ไม่แยกภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติออกจากกัน ดังนั้นการทดลองจะผสมผสานอยู่ในบทเรียน จะทำให้เกิดความสัมพันธ์ต่อเนื่องดีกว่า ยิ่งกว่านี้ทั้งครูและนักเรียนจะได้มองเห็นความสำคัญของการทดลองเพราะคงจะข้ามการทดลองไปไม่ได้ จะทำให้ไม่เข้าใจ concept ในตอนนั้น ๆ เพราะการอภิปรายหลังการทดลองเพื่อนำไปสู่การสรุปนั้น อาศัยผลการทดลองจริง ๆ

เมื่อได้ตัดสินรูปแบบของบทเรียนดังนี้แล้ว ขั้นต่อไปก็คือ จะเขียนบทเรียนอย่างไรจึงจะทำให้คนอ่านเกิดความเข้าใจ และคิดตามเป็นขั้น ๆ โดยไม่บอกผลการทดลอง ฉะนั้นในขณะเขียนจะต้องคอยระวังไม่นำผลการทดลองมาใช้อย่างโจ่งแจ้งยกเว้นในกรณีที่เลี่ยงไม่ได้จริง ๆ

บางครั้งอาจจะตั้งคำถามเอาไว้ แต่ไม่ให้คำตอบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

<u>การทดลองที่ 7.3</u> ปฏิกริยาเคมีระหว่างไอร์ออน (II) อิออนกับซิลเวอร์อิออน

<u>วิธีทำ</u> <u>ตอนที่ 1</u> การทดสอบไอร์ออน (II)อิออน และไอร์ออน (III) อิออน

1. นำหลอดทดลองขนาดกลางมา 2 หลอด หลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออนซัลเฟต 0.1 mol/l 5 cm^3 และอีกหลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน (III) ไนเตรต 0.1 mol/l 5 cm^3 แล้วหยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2 mol/l ประมาณ 2 - 3 หยด ลงในสารละลายแต่ละหลอด เปรียบเทียบผลที่ได้ และบันทึกไว้
2. นำหลอดทดลองขนาดกลางมาอีก 2 หลอด หลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน (II)ซัลเฟต และอีกหลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน (III) ไนเตรต ใช้ชนิดละ 5 cm^3 แล้วหยดสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III) 0.2 mol/l ลงในสารละลายทั้งสองหลอด หลอดละ 2-3 หยด เปรียบเทียบผลที่ได้และบันทึกไว้

<u>ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.3 ตอนที่ 1</u>

สารละลายที่เติม	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	
	$Fe^{2+}(aq)$	$Fe^{3+}(aq)$
อัมโมเนียมไธโอไซยาเนต		
โปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III)		

ตอนที่ 2 ทดสอบอิออนที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาไอร์ออน(II) อิออนกับซิลเวอร์อิออน

1. ใช้หลอดทดลองขนาดกลางบรรจุสารละลายไอร์ออน (II)ซัลเฟต ประมาณ 5 cm^3 แล้วเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 mol/l ประมาณ 5 cm^3 ลงไป คนหรือเขย่าเบา ๆ สังเกตและบันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้น
2. กรองตะกอนที่เกิดขึ้น (เก็บตะกอนแช่น้ำไว้ในหลอดทดลองขนาดกลาง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองตอนที่ 3) แล้วแบ่งสารละลายที่กรองได้ออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ใส่หลอดทดลองขนาดเล็ก 2 หลอด และเขียนหมายเลขกำกับไว้
3. หยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต ประมาณ 2 - 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 1 สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผลไว้
4. หยดสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) ประมาณ 2 - 3 หย ลงในสารละลายหลอดที่ 2 สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผลไว้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.3 ตอนที่ 2

การทดลอง	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	อธิบายผลที่เกิดขึ้น
1. เมื่อผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตกับสารละลายไอร์ออน (II) ซัลเฟต		
2. เมื่อทดสอบสารละลายที่กรองได้จากข้อ 1 โดยใช้สารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต(หลอดที่ 1)		
3. เมื่อทดสอบสารละลายที่กรองได้จากข้อ 1 โดยใช้สารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III) (หลอดที่ 2)		

นักเรียนจะสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่าอย่างไร

จากปฏิกริยาในการทดลองตอนที่ 1 นักเรียนคงจะได้ทราบสมบัติของไอร์ออน (II) อิออน และไอร์ออน (III) อิออนแล้ว และคงจะได้นำความรู้นั้นมาใช้ในปฏิกริยาตอนที่ 2 ซึ่งเป็นปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน (II) อิออนกับซิลเวอร์อิออน นักเรียนคิดว่าจะพบอิออนบวกชนิดใดบ้างจากผลการทดลองตอนที่ 2 และนักเรียนทดสอบพบอิออนบวกชนิดใด

ปฏิกริยาในตอนที่ 2 เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้หรือไม่ และมีสมดุลเกิดขึ้นหรือยัง ถ้ามีให้เขียนสมการแสดงด้วย

เพื่อทดสอบสมมติฐานที่นักเรียนคิดไว้ ให้ลองตรวจสอบดูว่าสมมติฐานนั้นถูกต้องหรือไม่ โดยทำการทดลองตอนที่ 3 ต่อไป

จากตัวอย่างที่ยกมานี้จะเห็นว่า ถ้าผู้เรียนไม่ได้ทำการทดลองจะไม่เข้าใจอะไรเลย เพราะจะไม่ทราบว่าไอร์ออน (II) อิออนกับไอร์ออน (III) อิออนมีสมบัติต่างกันอย่างไรเมื่อทดสอบด้วยอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต และโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III)

ในการทดลองตอนที่ 2 เมื่อนักเรียนผสม Fe^{2+} กับ Ag^{+} จะได้ตะกอน เมื่อกรองตะกอนออก แล้วนำสารละลายไปทดสอบ เช่นเดียวกับตอนที่ 1 นักเรียนจะพบ Fe^{3+} และ Fe^{2+} แล้วจึงจะตอบคำถามในบทเรียนได้ สำหรับคนที่ไม่ได้ทำการทดลองจะตอบอะไรไม่ได้เลย

การเขียนแบบเรียนนี้ได้ใช้วิธีการนี้ตลอด ฉะนั้นจึงอาจพูดได้ว่า แบบเรียนนี้ได้สอดแทรกวิธีการสอนแบบ inquiry ไว้มากทีเดียว

<u>การเขียนคู่มือครู</u>

เมื่อแนวการเขียนแบบเรียนเป็นแนวใหม่ เน้นการทดลองเป็นหัวใจ และยังสอดแทรกวิธีสอนแบบ inquiry อีกด้วย คู่มือครูจึงเป็นสิ่งจำเป็นยิ่ง ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการแนะแนวทางให้กับครู โครงการพัฒนาการสอนวิชาเคมีตามหลักสูตรใหม่นี้เรียกได้ว่า เป็น Innovation ทางการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ เพราะได้มีการปฏิรูป การทดลอง อุปกรณ์ แบบเรียน วิธีสอนตลอดจนวิธีการวัดผล

การเขียนคู่มือครูจึงถือหลักดังนี้

1. ในแต่ละบทเรียน จะมีวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม
2. ลำดับแนวความคิดต่อเนื่อง
3. เวลาที่ใช้สอนทั้งหมด
4. มีสรุปแนวความคิดที่สำคัญภายในบท
5. เรียงลำดับหัวข้อเหมือนในแบบเรียน สรุปสาระสำคัญในหัวข้อนั้นว่าต้องการอะไร
6. ในแต่ละการทดลอง มีความมุ่งหมายทั่วไปและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เวลาที่ใช้อภิปรายก่อนการทดลอง การทดลอง และอภิปรายหลังการทดลอง
7. ในแต่ละการทดลองมีตารางบอกรายละเอียดของปริมาณสารเคมีและอุปกรณ์ต่อนักเรียน 1 กลุ่ม (3 คน) และต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
8. การเตรียมล่วงหน้า เพื่อชี้แจงให้ครูทราบว่าจะต้องเตรียมอะไรไว้บ้าง
9. อภิปรายก่อนการทดลอง
   ตัวอย่างผลการทดลอง
   อภิปรายหลังการทดลอง
10. ข้อแนะนำเพิ่มเติม บางครั้งอาจจะเป็นการให้ความรู้เพิ่มเติมกับครู เพื่อให้ครูมั่นใจในเนื้อหานั้น ๆ แนะนำเอกสารอื่น ๆ ที่ครูอาจต้องการอ่านเพิ่มเติม บางครั้งอาจจะเป็นการขยายความจากแบบเรียนเพื่อครูจะได้ชี้แจงหากมีเวลาหรือเมื่อนักเรียนซักถาม
11. เฉลยแบบฝึกหัด

จากหลักการดังกล่าวนี้ จะเห็นว่า คู่มือครูที่เขียนขึ้นนี้มีค่ามากสำหรับครูผู้สอน แบบเรียนเป็นคู่มือนักเรียน แต่นักเรียนจะเรียนได้ผลตามความมุ่งหมายที่ได้ตั้งไว้ก็ต่อเมื่อครูเป็นผู้นำทางให้เป็นไปตามแนวทางวิทยาศาสตร์ ถ้าหากครูไม่เข้าใจวิธีการ การเรียนการสอนก็จะไม่ได้ผล

การประเมินผลบทเรียน

ในการพัฒนาบทเรียนมาเป็นลำดับขั้นตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้มีการประเมินผลทุกระยะ คือ

1. ลำดับแนวความคิดต่อเนื่อง คณะบรรณาธิการโดยมีผู้วิจัยเป็นหัวหน้า ทำการตรวจแก้ไขปรับปรุงจนเรียบร้อยได้ผลเป็นที่พอใจ จึงจะให้ดำเนินขั้นต่อไป

2. ทำการตรวจดูผลการทดลองว่าเป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่ได้วางไว้หรือไม่ เสนอข้อแก้ไขปรับปรุงจนได้ผลตามวัตถุประสงค์

3. ทำการตรวจแก้เค้าโครงละเอียดประมาณ 2 ครั้ง จนได้ร่างเค้าโครงละเอียดที่ใช้ได้

4. ทำการตรวจแก้บทเรียนประมาณ 3 ครั้ง เมื่อได้ร่างที่ 3 แล้ว มอบคณะบรรณาธิการ

5. คณะบรรณาธิการตรวจแก้ต่อไปอีกโดยนำเอาข้อวิจารณ์ของผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศมาพิจารณาด้วย อาจจะต้องแก้ไขปรับปรุงอีกประมาณ 2 - 3 ครั้ง จึงจะได้ร่างสุดท้ายดังแสดงในภาคผนวก ก (บทเรียน) และภาคผนวก ข (คู่มือครู)

วิธีประเมินผลอีกวิธีหนึ่ง คือ การทดลองสอนย่อย (Minitrial) เมื่อบทเรียนร่าง 3 เสร็จแล้วก็ลองนำออกสอนกับนักเรียนกลุ่มเล็กประมาณ 15 - 20 คน เพื่อดูว่านักเรียนอ่านบทเรียนเข้าใจหรือไม่ การทดลองที่ออกแบบไว้นั้นเหมาะสมเพียงใด ลำดับแนวความคิดเป็นอย่างไรบ้าง เมื่อได้ข้อมูลเหล่านี้ ก็นำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขร่างสุดท้าย

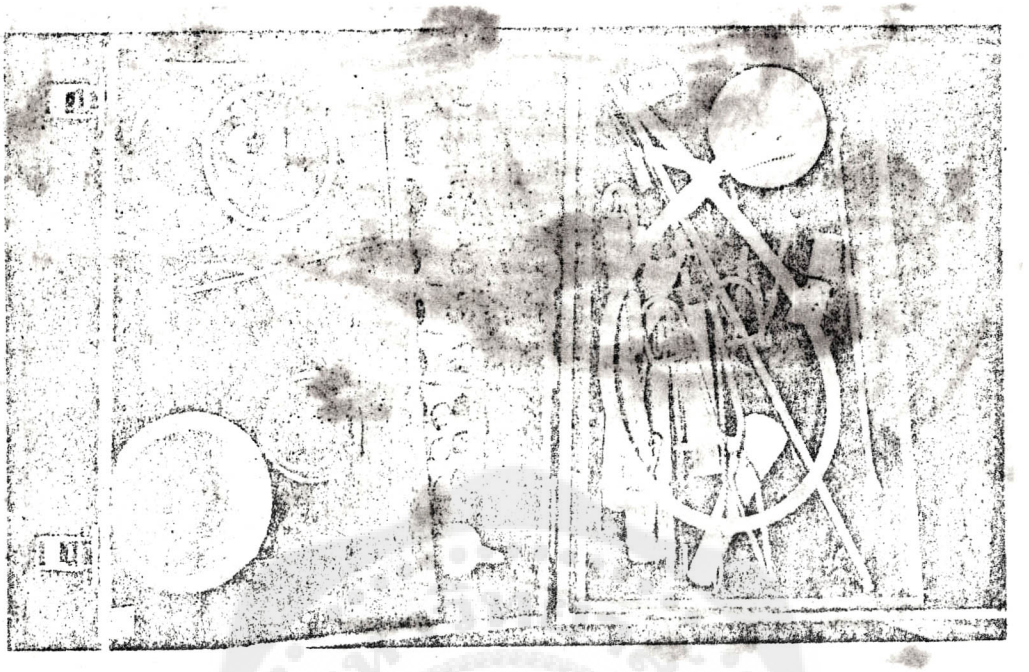
การสร้างชุดเครื่องมือ (Experinental Kits)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า โครงการพัฒนาการสอนวิชาเคมีตามหลักสูตรใหม่นี้มีการออกแบบการทดลองใหม่ ๆ มาก บทเรียนเรื่อง "สมดุลเคมี" ที่ได้หยิบยกมากล่าวนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของหลักสูตรทั้งหมด การสร้าง Kits ขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้มีชุดเครื่องมือใช้จึงเป็นสิ่งจำเป็นถ้าต้องการให้การเรียนการสอนได้ผลตามความมุ่งหมาย เนื่องจากประเทศเราเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา มีงบประมาณจำกัด การออกแบบการทดลองตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงต้องถือหลัก

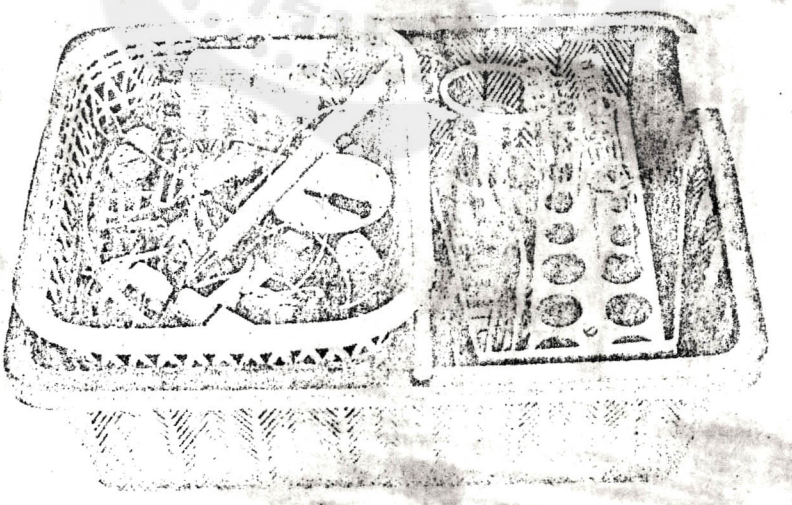
ประหยัดเป็นสำคัญ การทดลองแต่ละการทดลองนั้นควรจะได้ใช้เครื่องมือง่าย ๆ ราคาถูกตัวอย่าง เช่น ในเรื่องสมดุลเคมี ในหัวข้อที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนภาวะสมดุล เมื่อเปลี่ยนความดันหรืออุณหภูมิ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุลหรือไม่ เครื่องมือที่ใช้ก็คือกระบอกฉีดยาพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุที่หาง่ายไม่ต้องลงทุนซื้อ ตามโรงพยาบาลต่าง ๆ มักจะใช้ฉีดยาแล้วทิ้ง หรือหากจะต้องซื้อก็ราคาถูกมาก กระบอกฉีดยาใช้ในชุดเครื่องมือแทนเครื่องมือราคาแพงได้หลายอย่าง เป็นต้นว่า กระบอกตวง ซึ่งต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ตามโรงเรียนมักจะไม่มีงบประมาณซื้อ กระบอกฉีดยาใช้แทนได้เป็นอย่างดีและได้ผลละเอียดพอกัน

ด้วยหลักเกณฑ์ที่ว่า เครื่องมือชนิดหนึ่งควรจะใช้ได้หลาย ๆ การทดลอง ทำให้ชุดเครื่องมือของนักเรียนมีน้อยชิ้น บรรจุในกล่องไม้หรือถาดพลาสติกก็ได้ เครื่องมือ 1 กล่องต่อนักเรียน 3 คน และ 15 กล่องต่อนักเรียน 1 ชั้น

ผลของการค้นคว้าปรับปรุงชุดเครื่องมือของนักเรียนนี้ปรากฏว่า เครื่องมือ 15 กล่องนี้อาจใช้กับนักเรียน 3 ห้องเรียนได้ตลอดทั้ง 2 ปี ของการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และคิดเป็นเงินเพียง 6000 บาท ถ้าคิดค่าใช้จ่ายต่อ 1 คน ต่อปีก็เพียง 20 บาทเท่านั้น ซึ่งนับว่าถูกมาก



แสดงกล่องไม้บรรจุอุปกรณ์



แสดงถาดพลาสติกบรรจุอุปกรณ์

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร. 3921575, 3915058

บทที่ 4

การสรุปและอภิปรายผล

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ และจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องที่สำคัญในการสอนเรื่องสมดุลเคมี
2. เพื่อศึกษาหาวิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการสอนเรื่องสมดุลเคมี
3. เพื่อสร้างบทเรียนเรื่องสมดุลเคมีเพื่อช่วยในการสอนแบบ inquiry
4. เพื่อสร้างคู่มือครูในการสอนเรื่องสมดุลเคมี

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการอาจสรุปเป็นขั้น ๆ ได้ดังนี้

1. การเลือกและวางเค้าโครงเนื้อหาวิชา
2. การจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องของบทเรียน
3. การออกแบบการทดลองและอุปกรณ์
4. การเขียนเค้าโครงละเอียดของบทเรียน
5. การเขียนบทเรียนร่างแรก
6. การประเมินผลบทเรียน
7. การเขียนคู่มือครูร่างแรก
8. การปรับปรุงแก้ไขบทเรียนจนได้ร่างสุดท้าย

สรุปผลการวิจัย

จากผลการค้นคว้าและดำเนินการมาเป็นขั้น ๆ ก็ได้บทเรียนที่จะใช้สอนเรื่องสมดุลเคมี (ภาคผนวก ก) ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 7 การทดลอง ใช้เวลาสอนทั้งหมดประมาณ 14 คาบ ชุดเครื่องมือจัดรวมกับบทเรียนอื่น ๆ ที่ใช้สอนได้ตลอด 2 ปี ของระดับมัธยมศึกษาตอนปลายซึ่งเป็นชุดเครื่องมือที่หาได้ง่ายและราคาถูก

150308

คู่มือครูที่เขียนขึ้นนั้น (ภาคผนวก ข) ก็ได้ผ่านการแก้ไขปรับปรุงหลายครั้งเช่นเดียวกับบทเรียน ในคู่มือครูมีทั้งวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม การจัดลำดับแนวความคิดต่อเนื่องที่สำคัญในบทเรียน เสนอแนะวิธีอภิปรายก่อนและหลังการทดลอง เพื่อให้การเรียนการสอนเป็นแบบ inquiry นอกจากนี้ยังให้รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับทุกการทดลอง รวมทั้งตัวอย่างผลการทดลอง ข้อแนะนำเพิ่มเติมและการอภิปรายแบบฝึกหัดด้วย

<u>อภิปรายผลการวิจัย</u>

การวิจัยครั้งนี้เป็นขั้นสำคัญขั้นแรกของการพัฒนาหลักสูตรวิชาเคมี อาจจะเรียกว่าเป็น Developmental Research การกำหนดวัตถุประสงค์และการตั้งเกณฑ์การเลือกเนื้อหาวิชาย่อมเป็นเสมือนเครื่องชี้ทางว่าจะดำเนินไปในทิศทางใด การเลือกหัวข้อเรื่องสมดุลเคมีนั้นก็เพื่อจะใช้เป็นตัวอย่างในการพัฒนาแบบเรียนและคู่มือครูตามแนวหลักสูตรใหม่เท่านั้น ความจริงแล้ว หลักเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้กับการพัฒนาบทเรียนนี้ก็จะเป็นแนวทางในการพัฒนาบทเรียนอื่น ๆ ได้

การเขียนแบบเรียนเพื่อช่วยในการสอนแบบ inquiry นี้เป็นรูปแบบของบทเรียนที่ต่างไปจากรูปแบบเดิมที่มักจะเป็นแบบบรรยายบอกเล่า การพัฒนาบทเรียนแบบใหม่นี้จึงต้องใช้ความพยายามในการจัดลำดับและรูปแบบให้เหมาะสม การรวมการทดลองเข้าไว้ในแบบเรียนก็เป็นวิธีหนึ่งที่ผู้วิจัยเห็นว่า จะทำให้การเรียนการสอนดำเนินไปตามวิธีการทางวิทยาศาสตร์ได้ดีกว่าการแยกไว้อีกเล่มหนึ่งต่างหาก การสอดแทรกคำถามก็เพื่อกระตุ้นให้นักเรียนคิดตามเป็นขั้น ๆ บางคำถามอาจจะไม่มีคำตอบให้ บางคำถามอาจมีคำตอบให้ การอภิปรายผลแต่ละตอน ใช้ข้อมูลจากการทดลอง หากผู้เรียนไม่ได้ทำการทดลองก็ไม่อาจจะติดตามแนวความคิดที่จะนำไปสู่ข้อสรุปได้ วิธีนี้จึงถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะของการพัฒนาแบบเรียนแบบ inquiry

ชุดเครื่องมือก็เป็นสิ่งจำเป็นอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องพัฒนาควบคู่กันไป การเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์นั้นมีการทดลองเป็นหัวใจสำคัญ การวิจัยครั้งนี้ได้พยายามใช้วัสดุที่หาง่ายและราคาถูก พร้อมที่จะผลิตเองในประเทศเพื่อประหยัดงบประมาณ ต้นแบบแต่ละชนิดต้องผ่านการทดสอบว่าทำงานได้ผลดีตามวัตถุประสงค์จริง ๆ จึงจะถือว่าใช้ได้ ชุดเครื่องมือที่ผลิตได้นี้ใช้ทำการทดลองได้เป็นจำนวน 100 การทดลอง ตลอดเวลา 2 ปี ของการเรียนการสอนวิชาเคมีระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย นี่ก็ถือเป็นความสำเร็จอีกขั้นหนึ่ง

คู่มือครูที่เขียนขึ้นนี้นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นยิ่งสำหรับครู การเรียนจะบรรลุผลสมจุดมุ่งหมายหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับครูผู้สอนว่าจะสามารถชี้ทางตามแนวการเรียนการสอนแบบไต้หรือไม่ ฉะนั้น ในคู่มือครูจึงต้องมีรายละเอียดไว้ให้ครูมากพอที่จะดำเนินการสอนไปได้ การสรุปแนวความคิดที่สำคัญภายในบทเรียนจะช่วยให้ครูทราบถึง concept ที่สำคัญและความต่อเนื่องของ concept เหล่านั้นด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมจะช่วยในการสอนและการวัดผลด้วย

การประเมินผลบทเรียนและคู่มือครูนั้น ได้นำเอาข้อวิจารณ์ของคณะบรรณาธิการและผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศมาประกอบการพิจารณาแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้น ข้อวิจารณ์จากครูผู้สอนวิชาเคมีก็เป็นการประเมินผลอีกขั้นหนึ่ง นอกจากนี้ยังได้นำบทเรียนออกทดลองสอนย่อย (Minitrial) กับนักเรียน เพื่อจะได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงแบบเรียนและอุปกรณ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จนในที่สุด ได้บทเรียนและคู่มือครูร่างสุดท้ายดังแสดงในภาคผนวก ก และ ข

<u>แผนการวิจัยขั้นต่อไป</u>

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การวิจัยขั้นนี้เป็นขั้น Developmental ขั้นต่อไปควรจะเป็นขั้น Evaluative ซึ่งอาจทำได้ดังนี้

นำแบบเรียนและคู่มือครูออกทดลองใช้ในกลุ่มนักเรียนมากขึ้น เพื่อติดตามผลในแง่ต่าง ๆ เช่น

1. ประเมินผลวัตถุประสงค์ แบบเรียนและคู่มือครู
2. เปรียบเทียบวิธีสอน
3. เปรียบเทียบทัศนคตินักเรียนหลักสูตรเดิมและหลักสูตรใหม่
4. เปรียบเทียบทักษะทางขบวนการวิทยาศาสตร์
5. ทำการวิจัยเกี่ยวกับ Cognitive Preference ของนักเรียน 2 กลุ่ม
6. เปรียบเทียบทัศนคติของครู
7. ประเมินผลอุปกรณ์

โครงการพัฒนาหลักสูตรใหม่เช่นที่กำลังกระทำอยู่นี้ เปิดโอกาสให้มีงานวิจัยได้มากมาย ที่กล่าวมาข้างต้นก็เป็นเพียงตัวอย่างเท่านั้น สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีคงจะได้ติดตามผลงานทางด้านวิจัยต่อไป

บรรณานุกรม

1. กฤษณา ชุติมาและชุลี ชัยพิพัฒน์ , แบบเรียนเคมีประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย , โรงพิมพ์นิยมวิทยา , 2511

2. บุญพฤกษ์ จาฏามระ , แบบเรียนเคมีบรรยาย , อักษรเจริญทัศน์ , 2512

3. รายงานของคณะอนุกรรมการ , ความมุ่งหมายของการสอนการเรียนวิชาวิทยาศาสตร์ , สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี , 2514

4. หลักสูตรมัธยมศึกษาตอนปลาย (ม.ศ. 4-5-6) , พุทธศักราช 2503 , กระทรวงศึกษาธิการ

5. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี , ข่าวสาร ฉบับที่ 1, 2515

6. Australian Science Education Project, Newsletter , No. 1 , 1972

7. Malm, L.E., Chemistry-An Experimental Science, Laboratory Manual, CHEM Study Project, 1964

McClellan, A.L., Teachers' Guide, CHEM Study Project, 1964

9. Nuffield Foundation, Chemistry Project, 1967

10. Pimentel, G.C., Chemistry-An Experimental Science, CHEM Study Project, 1969

11. Ridgway, D.W., The CHEM Study, Story W.H. Freeman San Francisco , 1969

12. Strong, L.W., Chemical Systems, CBA Project, Earlam College Press, 1964

13. Strong, L.E., Investigating Chemical Systems , CBA Project, Earlam College Press, 1964

14. Strong, L.E., Teacher's Manual , CBA Project, Earlam College Press, 1964

ภาคผนวก ก

บทเรียนเรื่องสมดุลเคมี

สมดุลเคมี

นักเรียนได้ศึกษาปฏิกริยาเคมีในแง่ต่าง ๆ มาบ้างแล้ว เป็นต้นว่าปฏิกริยาเกิดขึ้นได้อย่างไร และพลังงานเกี่ยวข้องกับปฏิกริยาเคมีอย่างไรบ้าง ทั้งได้นำความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างไปใช้อธิบายปฏิกริยาเคมีอีกด้วย นอกจากนี้ นักเรียนยังได้ศึกษาเรื่องอัตราการเกิดปฏิกริยา ซึ่งทำให้เราทราบว่าปฏิกริยาเคมีนั้นเกิดเร็วหรือช้า เพียงใด

ยังมีแง่อื่น ๆ ที่ควรศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงและปฏิกริยาเคมีอีก เป็นต้นว่า เมื่อนำน้ำตาลมาละลายในน้ำจำนวนหนึ่ง ณ อุณหภูมิห้อง น้ำตาลจะละลายได้จนถึงขีดจำกัดขีดหนึ่ง แล้วจะไม่ละลายเพิ่มขึ้นอีก ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น หรือเมื่อเราตักน้ำใส่ภาชนะที่ไม่ปิดฝา ตั้งทิ้งไว้หลาย ๆ วัน น้ำจะระเหยกลายเป็นไอไปจนหมด แต่ถ้าใส่น้ำไว้ในภาชนะที่ปิดฝาสนิท น้ำจะไม่ระเหยไปหมด แต่จะสังเกตเห็นระดับน้ำในภาชนะลดลง และคงอยู่เช่นนั้น เหตุใดน้ำจึงไม่ระเหยต่อไปจนหมด นักเรียนพอจะอธิบายได้หรือไม่ นอกจากนี้ในปฏิกริยาเคมีบางชนิด เช่น ในอุตสาหกรรมทำปูนคิบจากหินปูน ซึ่งนักเรียนบางคนอาจเคยเห็นเขาเผาหินปูนกันในที่โล่งโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส หินปูนจะสลายตัวหมดให้ปูนคิบและกาซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$CaCO_3(s) \longrightarrow CaO(s) + CO_2(g)$$

หินปูน ปูนคิบ คาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อเผาด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ปูนคิบร้อยเปอร์เซนต์ แต่ได้มีผู้ทดลองพบว่าถ้าเผาหินปูนในภาชนะปิดโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน ปรากฏผลว่า ไม่ว่าจะเผานานเท่าใดก็ตาม หินปูนเพียงหนึ่งในสี่ส่วนเท่านั้นที่สลายให้ปูนคิบและกาซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงว่าปฏิกริยานี้เกิดไม่สมบูรณ์เหมือนกับการเผาโดยวิธีแรก เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น เราจะทำให้ปฏิกริยาเกิดมากขึ้นได้อย่างไร ในบทนี้เราจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงและปฏิกริยาเคมีต่าง ๆ ในแง่ของปริมาณ ว่าเกิดผลิตภัณฑ์มากหรือน้อยเพียงใด และจะพยายามศึกษาแฟคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณ การเปลี่ยนแปลงและการเกิดปฏิกริยานั้น ๆ ด้วย

7.1 การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

สารบางชนิดเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วอาจคืนสู่สภาพเดิมได้ เช่น ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอเมื่อได้รับความร้อน แล้วไอก็กลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวได้อีกเมื่ออุณหภูมิลดลง การเปลี่ยนสถานะดังกล่าวนี้จัดเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ หากเราคิดว่าการระเหยของน้ำเป็นการเปลี่ยน

แปลงไปข้างหน้า การกลั่นตัวของไอน้ำจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับ เขียนย่อโดยใช้ลูกศรแสดงดังนี้

การระเหย

น้ำ $\rightleftharpoons$ ไอน้ำ

การกลั่นตัว

ในปฏิกริยาเคมี เมื่อสารตั้งต้นทำปฏิกริยาแล้วเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ เราเรียกว่าเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า ในทางกลับกันถ้าผลิตภัณฑ์นั้นเปลี่ยนกลับมาเป็นสารเดิมได้ เราเรียกว่าเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ และเรียกปฏิกริยาที่มีทั้งปฏิกริยาไปข้างหน้า และปฏิกริยาย้อนกลับว่า ปฏิกริยาที่ผันกลับได้

ในบทเรียนต่อไปนี้ นักเรียนจะได้ทำการทดลองและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสารต่าง ๆ ว่าการเปลี่ยนแปลงใดบ้างที่ผันกลับได้

การทดลองที่ 7.1 การเปลี่ยนแปลงของสาร

วิธีทำ ตอนที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของไอโอดีน

1. ตักไอโอดีน 5 – 6 เกล็ดใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 100 cm^3 ใช้กระจกนาฬิกาปิดปากขวดไว้
2. จุ่มขวดนี้ลงในภาชนะที่ใส่น้ำร้อนจัดจนเกือบเดือด ตั้งทิ้งไว้ราว 2 – 3 นาที
3. ยกขวดนี้ออกจากน้ำร้อน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผล

ตอนที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของเลด (II)ไอโอไดด์

1. ตักเลด (II)ไอโอไดด์ปริมาณขนาดเท่าหัวไม้ขีด ใส่ลงในหลอดทดลองขนาดกลางที่มีน้ำอยู่ประมาณ 5 cm^3
2. อุ่นสารในหลอดทดลองด้วยตะเกียงอัลกอฮอล์ ขณะอุ่นควรเขย่าเบา ๆ พร้อมทั้งสังเกตว่าเลด(II)ไอโอไดด์ละลายหรือไม่
3. จุ่มหลอดทดลองนั้นลงในน้ำเย็น สังเกตผล
4. ทดลองซ้ำโดยใช้สารละลายเดิม อุ่นและทำให้เย็นลงอีก สังเกตและบันทึกผลทั้งหมดไว้

ตอนที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์

1. รินสารละลายโคบอลต์ (II)คลอไรด์ที่เตรียมไว้ ลงในหลอดทดลองขนาดเล็กประมาณ 5 cm^3
2. อุ่นสารละลายให้เดือด สังเกตการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เริ่มอุ่นจนเดือด
3. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น สังเกตผล
4. ทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยใช้สารละลายในหลอดเดิม สังเกตและบันทึกผลทั้งหมดไว้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.1

ระบบที่ทดลอง	ผลที่สังเกตได้	
	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	เมื่ออุณหภูมิลดลง
ไอโอดีน		
เลด(II)ไอโอไดด์		
สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์		

ให้นักเรียนช่วยกันสรุปผลที่ได้จากการทดลองนี้

เราเคยกล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 ว่า ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบจำแนกได้เป็น 3 แบบด้วยกัน คือการเปลี่ยนสถานะ การเกิดสารละลาย และการเกิดปฏิกริยาเคมี การเปลี่ยนแปลงที่นักเรียนได้ทำในการทดลองที่ 7.1 นี้ จัดว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบใด และการเปลี่ยนแปลงใดที่ผันกลับได้ เพราะเหตุใด

การทดลองในตอนที่ 1 ไอโอดีนเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอโดยไม่หลอมเหลว ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า <u>การระเหิด</u> โดยปกติการระเหิดของไอโอดีนเกิดขึ้นได้ ณ อุณหภูมิห้อง แต่สำหรับการทดลองนี้ เราได้ให้ความร้อนแก่ไอโอดีนเพื่อช่วยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

การทดลองตอนที่ 2 และตอนที่ 3 ซึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของเลด(II)ไอโอไดด์ และสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์นั้น นักเรียนคิดว่าอุณหภูมิมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างไรหรือไม่

ในชีวิตประจำวัน เราคุ้นเคยกับการระเหิดของสารบางชนิด เช่นการบูร หรือลูกเหม็น ที่ทิ้งไว้ในตู้นาน ๆ จะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ ปรากฏการณ์เช่นนี้ ทำให้เรารู้สึกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเดียวโดยไม่ผันกลับ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเท่านั้น แต่ถ้าใส่ลูกเหม็นไว้ในขวดแล้วปิดจุกให้สนิท นักเรียนคิดว่าลูกเหม็นจะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เหมือนกับทิ้งไว้ในตู้หรือไม่ เพราะเหตุใด

7.2 <u>ระบบเปิดและระบบปิด</u>

การศึกษามวลของสารในปฏิกริยาเคมีในบทที่ 2 นั้น ได้มีการทดลองกับระบบที่ใช้สารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ทำปฏิกริยากับสารละลายเลด(II)ไนเตรต ได้ตะกอนสีเหลืองของเลด(II)ไอโอไดด์

นักเรียนคงจะระลึกได้ว่า ในระบบนี้มวลของสารก่อนทำปฏิกริยาเท่ากับมวลของสารหลังทำปฏิกริยา ไม่ว่าเราจะทดลองในภาชนะเปิดหรือปิด ระบบเช่นนี้เราจัดเป็น ระบบปิด เนื่องจากมวลของสารทั้งหมดในระบบไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนพลังงานยังคงถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมได้ แต่การทดลองบางระบบ เช่นเมื่อใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกทำปฏิกริยากับหินปูน ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดรูปกรวย เมื่อเกิดปฏิกริยาแล้วมวลของสารในระบบได้เปลี่ยนไป เพราะเราไม่ได้ปิดจุกขวด กาซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจึงฟุ้งกระจายออกไปได้ ระบบเช่นนี้เราจัดเป็น ระบบเปิด ซึ่งหมายถึงระบบที่มีการถ่ายเททั้งมวลของสารและพลังงานให้แก่สิ่งแวดล้อมได้ แต่ถ้าเราปิดจุกขวดเพื่อมิให้กาซฟุ้งกระจายออกไป ซึ่งมวลของสารรวมทั้งหมดในระบบไม่เปลี่ยนแปลง ระบบนี้ก็เป็นระบบปิด

ฉะนั้นเราสรุปได้ว่า ระบบปิดต่างกับระบบเปิด ในแง่ที่ว่าระบบปิดมีการถ่ายเทเฉพาะพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเท่านั้น ส่วนระบบเปิดนั้นถ่ายเทได้ทั้งมวลและพลังงาน

การทดลองที่ 7.1 ตอนที่ 1 เมื่อให้ความร้อนแก่ไอโอดีนในภาชนะที่มีกระจกนาฬิกาปิด นักเรียนจะสังเกตเห็นว่า เมื่อมีการระเหิดเกิดขึ้นไอของไอโอดีนไม่อาจฟุ้งกระจายออกไปจากภาชนะได้ ไอของไอโอดีนในภาชนะมีสีเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะมีสีคงที่ และมีเกล็ดไอโอดีนเกาะอยู่ข้างภาชนะ ทั้งนี้เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ เมื่อยกภาชนะบรรจุไอโอดีนออกจากน้ำร้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะปรากฏว่าภาชนะเย็นลง แสดงว่ามีการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ส่วนปริมาณของไอโอดีนทั้งหมดยังคงเท่าเดิม แต่ถ้าทำการทดลองนี้ในภาชนะเปิด ไอของไอโอดีนจะฟุ้งกระจายออกไปจากภาชนะ จนในที่สุดไอโอดีนจะระเหิดไปหมด นักเรียนพอจะวินิจฉัยได้หรือไม่ว่า ในการทดลองนี้ตอนใดเป็นการทดลองในระบบปิดและตอนใดเป็นระบบเปิด

จะเห็นได้ว่า การระเหิดของไอโอดีนในระบบเปิดและระบบปิดให้ผลแตกต่างกัน ทำนองเดียวกันกับปฏิกริยาระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับหินปูนดังกล่าวมาแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่า สารชนิดเดียวกันเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบต่างกัน อาจให้ผลไม่เหมือนกัน

นักเรียนคิดว่า การทดลองที่ 7.1 ตอนที่ 2 และตอนที่ 3 นั้น เป็นการทดลองในระบบปิดหรือระบบเปิด เพราะเหตุใด

แบบฝึกหัดที่ 7.1

1. จงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบต่อไปนี้ ว่าระบบใดเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

ก. ถ้วยแก้วใส่น้ำแข็งตั้งทิ้งไว้ในห้อง

ข. กระดิกใส่น้ำเดือด แล้วปิดฝาแน่น

ค. ขวดใส่น้ำเชื่อมข้น ๆ ปิดฝาสนิท และมีผ้าลึกน้ำตาลนอนก้นขวด

ง. การต้มน้ำในกาจนเดือด

จ. การนึ่งข้าวเหนียว

2. นักเรียนเคยพบตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้มาก่อนแล้วมากมาย จงบอกมาสัก 2 ตัวอย่าง และอธิบายโดยย่อ

3. การทดลองต่อไปนี้นักเรียนเคยทดลองในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 หรือเคยพบในชีวิตประจำวันมาแล้ว การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นในระบบใด

ก. หลอมแนพธาลีนในชามกระเบื้องเคลือบ

ข. ใส่ชิ้นโลหะทองแดงลงในสารละลายกรดไนตริกเจือจาง

ค. ผสมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บรรจุอยู่

ง. ต้มน้ำในกาให้เดือด

จ. ตั้งบีกเกอร์ใส่น้ำปูนใสไว้บนโต๊ะหลาย ๆ วันจนมีฝ้าลอยอยู่บนผิวน้ำปูน

ฉ. การหุงข้าว

7.3 ภาวะสมดุล

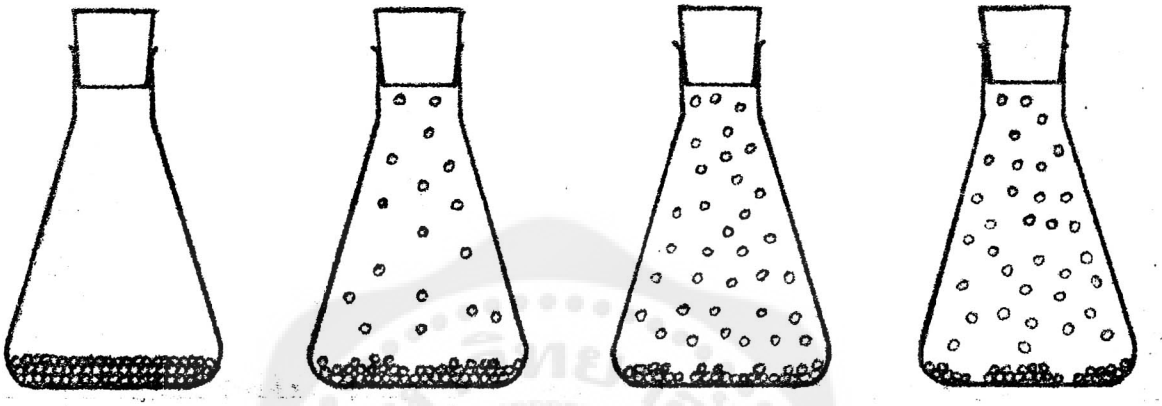
ในบทที่ 2 เราได้เคยอภิปรายเกี่ยวกับการระเหยของของเหลว ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิด แล้วตั้งทิ้งไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง ปรากฏว่าระดับของของเหลวลดลงเล็กน้อย เนื่องจากระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปอยู่เหนือระดับของของเหลวนั้น ขณะเดียวกันถ้าไอมีจำนวนมากขึ้นก็จะเกิดการกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวอีก จะมีการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้อยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งระดับของของเหลวไม่ลดลงอีกต่อไป ไม่ว่าจะตั้งทิ้งไว้นานเท่าใดก็ตาม เรากล่าวว่าของเหลวและไออยู่ในภาวะสมดุลแล้ว ณ อุณหภูมินั้น

นักเรียนจะได้ศึกษาเรื่องภาวะสมดุลในระบบต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอีก เพื่อให้ได้ข้อสังเกตในการที่จะบอกว่า ระบบใดระบบหนึ่งอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่

7.3.1 ภาวะสมดุลระหว่างสถานะ

ในการทดลองที่ 7.1 เมื่อใส่เกล็ดไอโอดีนลงในขวดรูปกรวย แล้วใช้กระจกนาฬิกาปิด ตั้งทิ้ง

ไว้ให้ระเหิด ณ อุณหภูมิห้อง สักครู่หนึ่ง จะพบว่าไอสีม่วงของไอโอดีนค่อย ๆ เข้มขึ้น จนในที่สุดสีจะคงที่ แสดงว่าไอของไอโอดีนมีความเข้มข้นคงที่แล้ว แม้ว่าตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนานเท่าใดก็ตาม สีก็จะไม่เปลี่ยนแปลง เรากล่าวว่าขณะนี้เกิดภาวะสมดุลระหว่างไอโอดีนที่มีสถานะกาซ กับไอโอดีนที่มีสถานะของแข็งในระบบปิด ณ อุณหภูมินั้น



รูป 7.1 แสดงการเข้าสู่ภาวะสมดุลในการระเหิดของไอโอดีน

ถ้าระบบนี้อยู่ที่ภาวะสมดุลนาน ๆ จะเห็นว่าเกล็ดไอโอดีนบางส่วนหายไป และบางส่วนเกิดขึ้นใหม่ โดยที่สีหรือความเข้มข้นของไอของไอโอดีนคงที่ตลอดเวลา อธิบายได้ว่า ณ ภาวะสมดุล มีโมเลกุลของไอบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และโมเลกุลของของแข็งบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นไอออกมาแทนที่ด้วยปริมาณเท่า ๆ กัน ทำให้เราสังเกตเห็นสีคงที่ หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบมีทั้งการระเหิด ซึ่งเทียบได้กับการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และการตกผลึกซึ่งเทียบได้กับการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ เกิดขึ้นในขณะเดียวกันตลอดเวลา เมื่ออัตราการระเหิดเท่ากับอัตราการตกผลึก ระบบจึงอยู่ในภาวะสมดุล

จึงเห็นได้ว่า ในภาวะสมดุลระหว่างสถานะ มีการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าและการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ เกิดด้วยอัตราเท่า ๆ กัน

ถ้าทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังเช่นในการทดลองที่ 7.1 จะเห็นไอของไอโอดีนมีสีเข้มขึ้น แล้วสีจะคงที่อีก แสดงว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง ณ อุณหภูมินั้น ดังนั้นเรากล่าวได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อภาวะสมดุลระหว่างสถานะ

7.3.2 ภาวะสมดุลในสารละลายอิ่มตัว

นักเรียนได้เคยทดลองมาแล้ว และพบว่าไอของไอโอดีนอยู่ในภาวะสมดุลกับเกล็ดไอโอดีน ถ้าเราจะใส่เกล็ดไอโอดีนลงไปในตัวทำละลายบ้าง นักเรียนคิดว่าจะมีสมดุลเกิดขึ้นหรือไม่ และระบบจะมีสมบัติอย่างไรที่ภาวะสมดุล เราจะได้ศึกษาระบบเช่นนี้ในการทดลองต่อไป

การทดลองที่ 7.2 ศึกษาการละลายของไอโอดีน

วิธีทำ 1. ผสมเอทธานอลกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร

2. แบ่งสารละลายนี้มาประมาณ 5 cm^3 ใส่ลงในหลอดทดลองขนาดกลาง

3. หักไอโอดีนเกล็ดใหญ่ ๆ ใส่ลงไป 3 – 4 เกล็ด ปิดจุกให้แน่น เขย่าแรง ๆ สักครู่ สังเกตการเปลี่ยนแปลง แล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่ สังเกตต่อไปอีก บันทึกผลทั้งหมดไว้

เมื่อละลายเกล็ดไอโอดีนลงไปในสารละลายเอทธานอลในน้ำกลั่น เกล็ดไอโอดีนจำนวนหนึ่งจะละลาย ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น กล่าวคือ สีของสารละลายจะค่อย ๆ เข้มขึ้น จนกระทั่งสีของสารละลายคงที่และเกล็ดไอโอดีนไม่ละลายอีกต่อไป ขณะนี้สารละลายอิ่มตัวแล้ว และมีความเข้มข้นคงที่ สมบัติเช่นนี้แสดงว่า สารละลายอิ่มตัวของไอโอดีนอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว ณ ภาวะสมดุลดังกล่าว นักเรียนไม่อาจสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ทำการทดลองเติมเกล็ดไอโอดีนกัมมันตรังสีลงไปในสารละลายอิ่มตัวนั้น แล้วตั้งทิ้งไว้สักพักหนึ่ง ผู้ทดลองได้ตรวจพบไอโอดีนกัมมันตรังสีในสารละลาย แสดงว่าต้องมีการละลายเกิดขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายคงที่ จึงจะต้องมีไอโอดีนที่ตกผลึกออกมาในปริมาณเท่ากับปริมาณของไอโอดีนที่ละลายเข้าสู่สารละลาย แสดงว่าระบบมิได้หยุดนิ่ง แต่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เรียกสมดุลเช่นนี้ว่า สมดุลไดนามิก ซึ่งเป็นสมดุลที่โมเลกุลของสารในระบบยังคงมีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา

ณ ภาวะสมดุลของสารละลายอิ่มตัวจากการทดลองนี้ นักเรียนบอกได้หรือไม่ว่า การเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าคืออะไร และการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับคืออะไร เพราะเหตุใดจึงเกิดสมดุลขึ้น

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงเรื่องการละลายของสารที่ภาวะอิ่มตัวว่า อุณหภูมิมีส่วนเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารที่ละลายอยู่ ถ้าเราเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณของสารที่ใช้ในการทำให้สารละลายนั้นอิ่มตัวก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ฉะนั้น อุณหภูมิจึงเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับภาวะสมดุลของสารละลายอิ่มตัว

การศึกษาระบบต่าง ๆ ที่ภาวะสมดุลเท่าที่กล่าวมาแล้ว พอจะสรุปได้ว่า เมื่อมีสมดุลเกิดขึ้น สมบัติของระบบจะต้องคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ คือ เราไม่สามารถมองเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ

เกิดขึ้นทั้ง ๆ ที่ระบบมิได้หยุดนิ่ง เราจำเป็นที่จะเน้นว่าระบบนั้นจะต้องเป็นระบบปิด เพราะต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่ไปข้างหน้า และการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับภายในระบบนั้น ว่าจะต้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เท่า ๆ กัน จึงจะเกิดสมดุลขึ้น และการเปลี่ยนแปลงเช่นนั้นสนับสนุนให้เราได้ทราบว่าระบบมิได้หยุดนิ่งเลย ภาวะสมดุลอาจเปลี่ยนแปลงได้ ถ้ามีการเปลี่ยนอุณหภูมิ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

7.3.3 <u>ภาวะสมดุลในปฏิกริยาเคมี</u>

ในปฏิกริยาเคมีที่นักเรียนได้เคยทำการทดลองมาแล้ว ยังไม่เคยพิจารณาว่ามีภาวะสมดุลเกิดขึ้นหรือไม่ ในตอนนี้เราจะทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลสำหรับพิจารณาเรื่องภาวะสมดุลในปฏิกริยาเคมีว่าเกิดขึ้นอย่างไร และถ้ามีสมดุลเกิดขึ้นจะมีข้อสรุปทำนองเดียวกับภาวะสมดุลระหว่างสถานะ และาาวะสมดุลในสารละลายอิ่มตัวหรือไม่

ปฏิกริยาที่จะศึกษาต่อไป เป็นปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)อิออน กับซิลเวอร์อิออน ซึ่งเกิดจากการผสมสารละลายที่มีอิออนทั้งสองเข้าด้วยกัน เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \longrightarrow Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

เราจะทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลมาประกอบการวินิจฉัยว่า ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าปฏิกริยาเกิดขึ้นจนสมบูรณ์ สารตั้งต้นชนิดหนึ่งชนิดใดคงจะหมดไป แต่ถ้าปฏิกริยาเกิดไม่สมบูรณ์ คือเป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ ก็คงจะมีสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ทุกชนิดอยู่รวมกันในระบบตลอดเวลา

<u>การทดลองที่ 7.3</u> ปฏิกริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(II)อิออนกับซิลเวอร์อิออน

<u>วิธีทำ</u> <u>ตอนที่ 1</u> การทดสอบไอร์ออน(II)อิออน และไอร์ออน(III)อิออน

1. นำหลอดทดลองขนาดกลางมา 2 หลอด หลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน(II)ซัลเฟต 0.1 mol/l 5 cm^3 และอีกหลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรต 0.1 mol/l 5 cm^3 แล้วหยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2 mol/l ประมาณ 2 – 3 หยด ลงในสารละลายแต่ละหลอด เปรียบเทียบผลที่ได้ และบันทึกไว้
2. นำหลอดทดลองขนาดกลางมาอีก 2 หลอด หลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน(II)ซัลเฟต และอีกหลอดหนึ่งบรรจุสารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรต ใช้ชนิดละ 5 cm^3 แล้วหยดสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III)0.2 mol/l ลงในสารละลายทั้งสองหลอด หลอดละ 2 – 3 หยด เปรียบเทียบผลที่ได้และบันทึกไว้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.3 ตอนที่ 1

สารละลายที่เติม	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	
	$Fe^{2+}(aq)$	$Fe^{3+}(aq)$
อัมโมเนียมไธโอไซยาเนต		
โปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III)		

ตอนที่ 2 ทดสอบอิออนที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาไอร์ออน(II)อิออนกับซิลเวอร์อิออน

1. ใช้หลอดทดลองขนาดกลางบรรจุสารละลายไอร์ออน(II)ซัลเฟต ประมาณ 5 cm^3 แล้วเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 mol/l ประมาณ 5 cm^3 ลงไป คนหรือเขย่าเบา ๆ สังเกตและบันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้น
2. กรองตะกอนที่เกิดขึ้น (เก็บตะกอนแช่น้ำไว้ในหลอดทดลองขนาดกลาง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองตอนที่ 3) แล้วแบ่งสารละลายที่กรองได้ออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ใส่หลอดทดลองขนาดเล็ก 2 หลอด และเขียนหมายเลขกำกับไว้
3. หยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต ประมาณ 2 – 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 1 สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผลไว้
4. หยดสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) ประมาณ 2 – 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 2 สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผลไว้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.3 ตอนที่ 2

การทดลอง	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	อธิบายผลที่เกิดขึ้น
1. เมื่อผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตกับสารละลายไอร์ออน(II)ซัลเฟต		

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.3 ตอนที่ 2 (ต่อ)

การทดลอง	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	อธิบายผลที่เกิดขึ้น
2. เมื่อทดสอบสารละลายที่กรองได้จากข้อ 1 โดยใช้สารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต (หลอดที่ 1)		
3. เมื่อทดสอบสารละลายที่กรองได้จากข้อ 1 โดยใช้สารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) (หลอดที่ 2)		

นักเรียนจะสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่าอย่างไร

จากปฏิกริยาในการทดลองตอนที่ 1 นักเรียนคงจะได้ทราบสมบัติของไอร์ออน(II)อิออน และไอร์ออน(III)อิออนแล้ว และคงจะได้นำความรู้นั้นมาใช้ในปฏิกริยาตอนที่ 2 ซึ่งเป็นปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)อิออนกับซิลเวอร์อิออน นักเรียนคิดว่าจะพบอิออนบวกชนิดใดบ้างจากผลการทดลองตอนที่ 2 และนักเรียนทดสอบพบอิออนบวกชนิดใด

ปฏิกริยาในตอนที่ 2 เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้หรือไม่ และมีสมดุลเกิดขึ้นหรือยัง ถ้ามีให้เขียนสมการแสดงด้วย

เพื่อทดสอบสมมติฐานที่นักเรียนคิดไว้ ให้ลองตรวจสอบดูว่าสมมติฐานนั้นถูกต้องหรือไม่ โดยทำการทดลองตอนที่ 3 ต่อไป

ตอนที่ 3 การทดสอบปฏิกริยาย้อนกลับ

1. นำตะกอนที่เก็บไว้จากตอนที่ 2 รินน้ำออก แล้วเติมสารละลายไอร์ออน (III)ไนเตรตลงไปประมาณ 5 cm^3 ปิดจุกให้แน่น เขย่าแรง ๆ สังเกตและเปรียบเทียบปริมาณของตะกอนที่มีอยู่เดิมกับที่มีอยู่หลังจากเขย่า บันทึกผล
2. แบ่งสารละลายจากข้อ 1 มาประมาณ 2 cm^3 แล้วเติมสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III)ลงไปประมาณ 2 – 3 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลง บันทึกผล

จากการทดลองตอนที่ 3 นี้ สรุปผลได้ว่าอย่างไร

นักเรียนตอบได้อย่างแน่ใจหรือยังว่า ปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)ไอออน กับซิลเวอร์ไอออน เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้

เมื่อไอร์ออน(II)ไอออนทำปฏิกริยากับซิลเวอร์ไอออน เกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นคือไอร์ออน(III)ไอออนกับตะกอนของโลหะเงิน ถ้าปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ ผลิตภัณฑ์ คือไอร์ออน(III)ไอออน และตะกอนโลหะเงินจะทำปฏิกริยากัน กลับคืนเป็นสารตั้งต้น คือไอร์ออน(II)ไอออนและซิลเวอร์ไอออนได้อีก เมื่อใดที่อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ แสดงว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว และเราไม่สังเกตเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นทั้ง ๆ ที่ระบบมิได้หยุดนิ่ง ปฏิกริยายังคงดำเนินไปข้างหน้าและย้อนกลับต่อไป สมดุลเช่นนี้จึงจัดเป็น สมดุลไดนามิก

เขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

เครื่องหมายลูกศรคู่ $\rightleftharpoons$ แสดงว่า มีปฏิกริยาเกิดไปข้างหน้าและย้อนกลับด้วยอัตราการเกิดเท่า ๆ กัน และระบบอยู่ในภาวะสมดุล

ปฏิกริยาเริ่มต้นด้วยการผสมไอร์ออน(II)ไอออนกับซิลเวอร์ไอออน ฉะนั้น

เรียกปฏิกริยา $Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \longrightarrow Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$ ว่าปฏิกริยาไปข้างหน้า

และเรียกปฏิกริยา $Fe^{3+}(aq) + Ag(s) \longrightarrow Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq)$ ว่าปฏิกริยาย้อนกลับ

เมื่อมีภาวะสมดุลเกิดขึ้นในปฏิกริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(II)ไอออน และซิลเวอร์ไอออนดังกล่าวแล้ว เราสามารถทดสอบว่ามีสารตั้งต้นทุกชนิดปนอยู่กับผลิตภัณฑ์ ดังเช่นในการทดลองที่ 7.3

ระบบต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุลไม่ว่าจะเป็นระบบที่มีสมดุลระหว่างสถานะ สมดุลระหว่างการละลาย หรือสมดุลระหว่างปฏิกริยาเคมีก็ดี ระบบเหล่านั้นจะต้องมีสมบัติคงที่ เราไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น เพราะว่าระบบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับเท่ากัน แต่ยังมีบางกรณีที่นักเรียนจะต้องพิจารณา ทำความเข้าใจให้ดีเกี่ยวกับสมบัติคงที่ของระบบและภาวะสมดุล เช่น ถ้าบรรจุน้ำเกลือที่ยังไม่อิ่มตัวไว้ในภาชนะใบหนึ่ง ตั้งทิ้งไว้สักครู่ แล้วสังเกตดูจะเห็นว่าไม่มีเกลือตกผลึกออกมา หรือระดับน้ำไม่ลดลง แสดงว่าสมบัติของระบบยังคงที่ แต่เราไม่เรียกระบบเช่นนี้ว่าอยู่ในภาวะสมดุล เพราะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ แต่ถ้าน้ำเกลือนั้นเป็นน้ำเกลืออิ่มตัว ซึ่งมีผลึกของเกลือตกอยู่ ก็จะเห็นว่าระบบมีสมบัติคงที่เช่นกัน เรากล่าวว่า น้ำเกลืออิ่มตัวนี้อยู่ในภาวะสมดุล เพราะมีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ระหว่างการตกผลึกกับการละลายของเกลือเกิดขึ้น ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่า ๆ กัน

ฉะนั้น ระบบที่มีสมบัติคงที่ อาจจะอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่อยู่ในภาวะสมดุลก็ได้

แบบฝึกหัดที่ 7.2

1. นำถ้วยแก้วขนาดเดียวกันมา 2 ใบ รินน้ำใส่ใบละครึ่งแก้ว ใช้แผ่นกระจกปิดถ้วยใบหนึ่งไว้ ส่วนอีกใบหนึ่งไม่ต้องปิด ตั้งน้ำทั้งสองถ้วยไว้สัก 3 วัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด

2. ระบบต่อไปนี้มีสมบัติคงที่ทั้งสิ้น ระบบใดบ้างที่อยู่ในภาวะสมดุล และระบบใดบ้างที่ไม่อยู่ในภาวะสมดุล จงอธิบาย

ก. ปรอทและไอปรอทในเทอร์โมมิเตอร์ มีอุณหภูมิคงที่

ข. คว่ำปลายด้านหนึ่งของหลอดคะปิลลารีลงในน้ำ น้ำจะเข้าไปในหลอดเนื่องจากความตึงผิว ทำให้ระดับน้ำในหลอดสูงกว่าน้ำภายนอก และระดับน้ำในหลอดจะคงที่

ค. ใช้หลอดคะปิลลารีในข้อ ข. คว่ำลงในน้ำทำนองเดียวกัน ระดับน้ำที่เข้าไปในหลอดจะคงที่ ถึงแม้จะตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน

ง. อ่างน้ำเหนือเขื่อนเจ้าพระยามีระดับคงที่ โดยที่มีน้ำไหลเข้าและออกจากอ่างนี้ตลอดเวลา

จ. ท่อนไม้ลอยน้ำ

ฉ. คนที่มีสุขภาพปกติ มีอุณหภูมิในร่างกายคงที่

7.4 การดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบ

ในการทดลองที่ 7.3 นักเรียนได้เห็นแล้วว่าเมื่อมีปฏิกริยาเกิดขึ้นระหว่างไอร์ออน(II)ไอออนและซิลเวอร์ไอออนนั้น ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ค่อนข้างเร็ว ถ้านักเรียนได้ทำการทดลองมากขึ้นก็จะพบว่า ระบบต่าง ๆ เข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วช้าต่างกัน บางระบบอาจจะใช้เวลามาก บางระบบใช้เวลาน้อย ในการที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุล เพราะแต่ละระบบมีอัตราการเกิดปฏิกริยาเร็วและช้าแตกต่างกัน เราจะทราบว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่ โดยดูจากสมบัติของระบบดังกล่าวมาแล้ว

ในการทดลองต่อไปนี้ นักเรียนจะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ในระบบต่าง ๆ โดยเริ่มด้วยการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า หรือเริ่มด้วยการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อติดตามสังเกตว่าระบบนั้นดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยเริ่มจากทิศทางใด

การทดลองที่ 7.4 การดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ

วิธีทำ ตอนที่ 1 การละลายของไอโอดีน

1. บรรจุเฮกเซน 5 cm^3 ลงในหลอดทดลองขนาดกลาง หยดสารละลายไอโอดีน 5 หยด แล้วเขย่า สังเกตและบันทึกผล
2. บรรจุสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ 0.1 mol/l 5 cm^3 ลงในหลอดทดลองขนาดกลางอีกหลอดหนึ่ง หยดสารละลายไอโอดีน 5 หยด แล้วเขย่า สังเกตและบันทึกผล
3. เติมสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ 0.1 mol/l 5 cm^3 ลงในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายในข้อ 1 และเติมเฮกเซน 5 cm^3 ลงในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายในข้อ 2
4. เอาจุกปิดหลอดทั้งสองให้แน่น เขย่าพร้อม ๆ กัน เปรียบเทียบสีของสารละลายในหลอดทดลองทั้งสอง บันทึกผลไว้ (เมื่อทดลองเสร็จให้หยดสารละลายไอโอดีนลงไปอีกหลอดละ 5 หยด ปิดจุกให้แน่น เขย่าแล้วเก็บไว้สำหรับการทดลองที่ 7.7)

ตอนที่ 2 สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์

1. รินสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์ ใส่หลอดทดลองขนาดเล็กสองหลอด หลอดละประมาณ 2 cm^3 บันทึกสีของสารละลายไว้
2. นำหลอดที่บรรจุสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์มาหลอดหนึ่ง อุ่นจนเกือบเดือด สังเกตและบันทึกสีที่เปลี่ยนแปลงไป
3. จุ่มสารละลายทั้งสองหลอดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำอุ่นประมาณ 50 ^{o}C ให้พอดีกับระดับของสารละลายในหลอด สังเกตสีของสารในหลอดทั้งสอง เปรียบเทียบผลและบันทึกไว้

*ในการทดลองตอนที่ 1 เกี่ยวกับการละลายของไอโอดีนในหลอดทดลองทั้งสองนั้น นักเรียนสังเกตเห็นสีของไอโอดีนในชั้นของเฮกเซนเข้มเท่ากันหรือไม่ และสารละลายในหลอดทั้งสองอยู่ ณ ภาวะสมดุลแล้วหรือยัง

โดยปกติไอโอดีนละลายในเฮกเซนและในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ได้ต่างกัน ในหลอดทดลองหลอดแรกมีไอโอดีนละลายอยู่ในเฮกเซน เมื่อเติมสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ลงไปอีก จะสังเกตเห็นว่าสีของสารละลายเปลี่ยนแปลง แสดงว่ามีไอโอดีนบางส่วนในเฮกเซนมาละลายอยู่ในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ และเมื่อเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่ สีของสารละลายจะไม่เปลี่ยนแปลง ในทางกลับกัน ในหลอดทดลองที่สองมีไอโอดีนละลายอยู่ในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ก่อน เมื่อเติมเฮกเซนลงไป จะสังเกตเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงเช่นกัน แสดงว่าไอโอดีนบางส่วนในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์มาละลายในเฮกเซนได้ เมื่อเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่ สีของสารละลายจะไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน และมีลักษณะเหมือนกันทั้งสองหลอด แสดงว่ามีสมดุลที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการเกิดขึ้นในหลอดทั้งสองใช่หรือไม่

เมื่อเติมสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ลงไปในหลอดทดลองที่มีไอโอดีนละลายอยู่ในเฮกเซน จะมีไอโอดีนบางส่วนจากชั้นเฮกเซนเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในชั้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ ถ้าถือว่าการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า การที่ไอโอดีนบางส่วนในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ เคลื่อนที่กลับมาอยู่ในสารละลายเฮกเซนได้ ก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ เขียนย่อโดยใช้ลูกศรแสดงดังนี้

$$I_2(\text{Hexane}) \rightleftharpoons I_2(\text{KI})$$

การที่ระบบอยู่ในภาวะสมดุล อธิบายได้ว่า โมเลกุลของไอโอดีนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างของเหลวทั้งสองตลอดเวลา ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ไปมาเท่ากัน และจากการทดลองเราจะเห็นได้ว่าการดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบนี้ ไม่ว่าจะเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า หรือเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับอย่างใดอย่างหนึ่ง ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน คือสีของสารละลายจะเหมือนกัน แสดงว่ามีสมดุลลักษณะเดียวกันทุกประการเกิดขึ้น

นักเรียนเคยทดลองมาแล้วในการทดลองที่ 7.1 ว่าสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์เปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ในการทดลองที่ 7.4 ได้ทดลองเพิ่มเติมอีก โดยนำสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์ หลอดที่มีอุณหภูมิเท่ากับห้องทดลอง และหลอดที่มีอุณหภูมิสูงจนเกือบเดือดมาจุ่มในน้ำอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยกัน ได้สังเกตเห็นว่าสารละลายหลอดที่มีสีชมพูจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วง และสารละลายหลอดสีน้ำเงินค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงเช่นกัน ในที่สุดสารละลายทั้งสองมีสีม่วงเหมือนกัน และสีเข้มเท่ากันด้วย แสดงว่าระบบเข้าสู่สมดุลที่มีลักษณะเหมือน ๆ กันทุกประการแล้ว นักเรียนอธิบายได้หรือไม่ว่า ระบบดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยเริ่มจากทิศทางใด

การที่สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์เป็นสีชมพูหรือสีน้ำเงินนั้น เพราะมีอิออนที่มีสีเช่นนั้นอยู่ การเปลี่ยนสีของสารละลายเกิดจากปฏิกริยาเคมีของอิออน คือปฏิกริยาที่อิออนสีชมพูเปลี่ยนเป็นอิออนสีน้ำเงิน หรืออิออนสีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นอิออนสีชมพู เขียนย่อ ๆ แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ระหว่างอิออนทั้งสองได้ดังนี้

สารละลายที่มีอิออนสีชมพู $\rightleftharpoons$ สารละลายที่มีอิออนสีน้ำเงิน

นักเรียนคิดว่า ในการทดลองนี้มีสมดุลเกิดขึ้นหรือไม่ เราทราบได้อย่างไร และสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์ดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยทิศทางใดได้บ้าง

7.5 <u>อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า และอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ</u>

ในบทที่ 6 นักเรียนเคยทดลองปฏิกริยาระหว่างมักเนเซียมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาแล้ว

เมื่อเราใส่ชิ้นมักเนเซียมลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าเรื่อย ๆ และกาซไฮโดรเจนหนีออกไปจากระบบ จนกระทั่งสารตั้งต้นชนิดใดชนิดหนึ่งหมดไป และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไม่มีโอกาสทำปฏิกริยากลับมาเป็นสารตั้งต้นอีก คือไม่เกิดปฏิกริยาย้อนกลับ ในกรณีเช่นนี้เรากล่าวว่าปฏิกริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

ถ้าเราพิจารณาปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)อิออน กับซิลเวอร์อิออน ในการทดลองที่ 7.3 ที่นักเรียนได้ทำมาแล้ว ผลปรากฏว่าปฏิกริยานี้มิได้เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ แต่มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ เพราะตรวจพบว่าที่ภาวะสมดุลมีไอร์ออน(II) อิออนซึ่งเป็นสารตั้งต้นเหลืออยู่ ปนกับไอร์ออน (III)อิออน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ เขียนสมการแสดงปฏิกริยาไปข้างหน้าได้ดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \longrightarrow Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกริยา ดังที่นักเรียนได้เรียนมาแล้วในบทที่ 6 กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราการเกิดปฏิกริยาจะเพิ่มขึ้น ฉะนั้นในปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)อิออนกับซิลเวอร์อิออนก็ทำนองเดียวกัน เมื่อเริ่มปฏิกริยาความเข้มข้นของสารตั้งต้นยังมากอยู่ อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าจึงเร็ว แต่เมื่อสารตั้งต้นถูกใช้ไป ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลง ฉะนั้นอัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าจะลดลงเรื่อย ๆ จนในที่สุดคงที่ ขณะนั้นปฏิกริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว

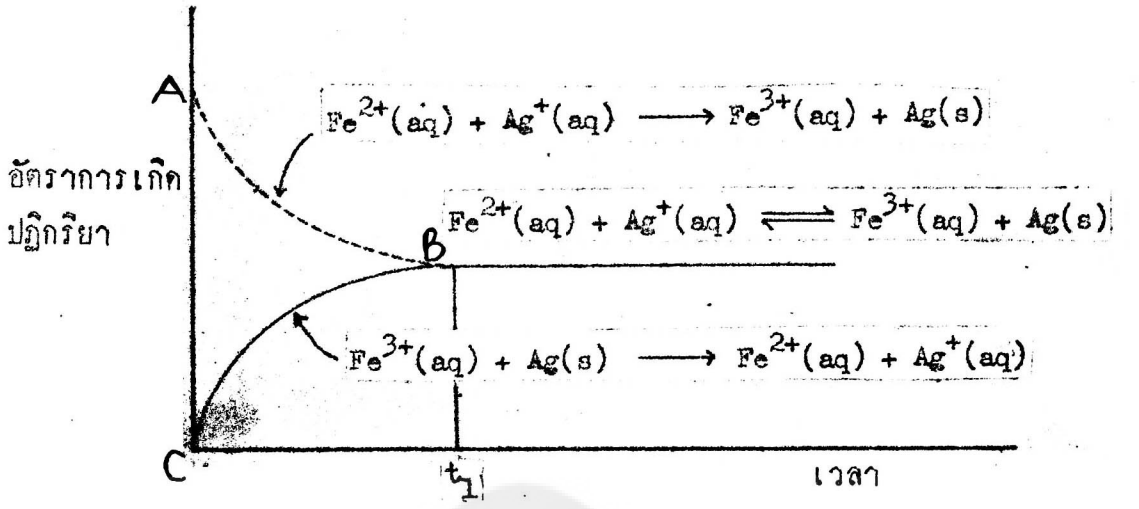
ถ้าพิจารณาปฏิกริยาย้อนกลับซึ่งเกิดควบคู่กับปฏิกริยาไปข้างหน้า เมื่อสารตั้งต้นเริ่มทำปฏิกริยากัน อัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับเป็นศูนย์ เพราะยังไม่มีผลิตภัณฑ์ ต่อเมื่อเริ่มเกิดไอร์ออน(III)อิออนและตะกอนเงินซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ จึงเริ่มเกิดปฏิกริยาย้อนกลับคือไอร์ออน(III)อิออนทำปฏิกริยากับเงินกลับมาเป็นสารตั้งต้น ฉะนั้นอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งคงที่ ขณะนั้นปฏิกริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว เขียนสมการแสดงปฏิกริยาย้อนกลับได้ดังนี้

$$Fe^{3+}(aq) + Ag(s) \longrightarrow Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq)$$

เมื่อใดที่ความเข้มข้นของสารทุกชนิดในปฏิกริยานี้คงที่ อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าย่อมเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ เขียนสมการรวมได้ดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกริยากับเวลา ของปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)อิออนกับซิลเวอร์อิออนจะได้ดังนี้



รูป 7.2 แสดงอัตราการเกิดปฏิกริยาของ $Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$

ตามรูป 7.2 เส้นประแสดงอัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าซึ่งลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงเวลา t_1 จะคงที่

เส้นทึบแสดงอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับซึ่งเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงเวลา t_1 จะคงที่ แสดงว่าปฏิกริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา t_1

ในกรณีที่มีการระเหิดของไอโอดีน และการละลายของเลด(II)ไอโอไดด์ในการทดลองที่ 7.1 นั้น อาจพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ในทำนองเดียวกัน สำหรับระบบทั้งสองนี้ ถ้าเราเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลาดังตัวอย่าง จะมีรูปร่างเช่นเดียวกับรูป 7.2 หรือไม่ ให้นักเรียนลองเขียนกราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระบบทั้งสองดังกล่าว

7.6 การเปลี่ยนภาวะสมดุล

ณ ภาวะสมดุลของปฏิกริยาเคมีใด ๆ สมบัติต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือจะมีค่าคงที่ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเกิดขึ้น เช่น เปลี่ยนความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือความดัน จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาเปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนั้น จะมีผลต่อสมดุลอย่างไร นักเรียนคิดว่าปฏิกริยาจะดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่หรือไม่ ถ้ามีสมดุลใหม่เกิดขึ้น ปริมาณของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือจะคงที่เท่ากับปริมาณที่มีอยู่ ณ ภาวะสมดุลเดิมหรือไม่

...จะได้ทดลองต่อไปว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือความดัน ณ ภาวะสมดุลจะมีผลต่อระบบอย่างไรหรือไม่

การทดลองที่ 7.5 การเปลี่ยนความเข้มข้นกับภาวะสมดุล

วิธีทำ 1. นำหลอดทดลองขนาดกลางมา 2 หลอด รินน้ำกลั่นใส่ลงไปประมาณหลอดละ 10 cm^3 แล้วหยดสารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรต 0.2 mol/l ลงในหลอดหนึ่ง 3 หยด และหยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2 mol/l ลงในอีกหลอดหนึ่ง 3 หยด

2. นำสารละลายในหลอดทดลองทั้งสองมาเทผสมลงในบีกเกอร์ คนหรือเขย่าให้เข้ากัน แล้วแบ่งสารละลายนั้นออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน บรรจุไว้ในหลอดทดลองขนาดกลาง 4 หลอด และเขียนหมายเลขกำกับหลอดทั้งสี่ไว้ เก็บหลอดที่ 1 ไว้สำหรับเทียบสี

3. หยดสารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรต 0.2 mol/l 2 – 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 2 สังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างใดหรือไม่ บันทึกไว้โดยละเอียด

4. หยดสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2 mol/l 2 – 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 3 สังเกตผลและบันทึกไว้ทำนองเดียวกัน

5. หยดสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.2 mol/l 2 – 3 หยด ลงในสารละลายหลอดที่ 4 สังเกตผลและบันทึกไว้เช่นเดียวกัน

นักเรียนสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงในสารละลายแต่ละหลอดอย่างไรบ้าง ให้สรุปผลการทดลองนี้

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7.5

หลอดที่	สารละลายที่เติมลงไป	ผลที่สังเกตได้
1		
2		
3		
4		

เมื่อผสมสารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรตกับสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนตเข้าด้วยกัน ได้ไธโอไซยาโนเฟอเรต(III) อิออน($FeSCN^{2+}$) ซึ่งเป็นปฏิกริยาเคมีที่ผันกลับได้ เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq)$$

สีเหลืองอ่อน ไม่มีสี สีแดง

เมื่อเติมสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ลงในหลอดที่ 4 นั้น ไอร์ออน(III)ไอออนจะเข้าทำปฏิกริยาได้ตะกอนไอร์ออน(III)ฟอสเฟต ($Fe(PO_4)_3$)

นักเรียนได้สังเกตเห็นแล้วว่าการที่สารละลายมีสีนั้น เกิดจากการที่ไอร์ออน(III)ไอออนเข้าทำปฏิกริยากับไอออนชนิดต่าง ๆ ดังนั้น เมื่อเติมสารละลายต่าง ๆ ลงในหลอดทดลองที่ 2, 3 และ 4 จึงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

นักเรียนลองหาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ

การเปลี่ยนแปลงในหลอดที่ 2 และที่ 3 เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันหรือไม่ แตกต่างจากหลอดที่ 4 อย่างไร

และสารละลายทุกหลอดเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้ว จะเข้าสู่ภาวะสมดุลหรือไม่ นักเรียนใช้อะไรเป็นเกณฑ์ในการตัดสินเช่นนั้น

ต่อไปนี้จะศึกษาระบบระหว่างกาซไนโตรเจนไดออกไซด์ และกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ เพื่อดูว่าการเปลี่ยนภาวะสมดุลของระบบที่เป็นกาซขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิอย่างไร

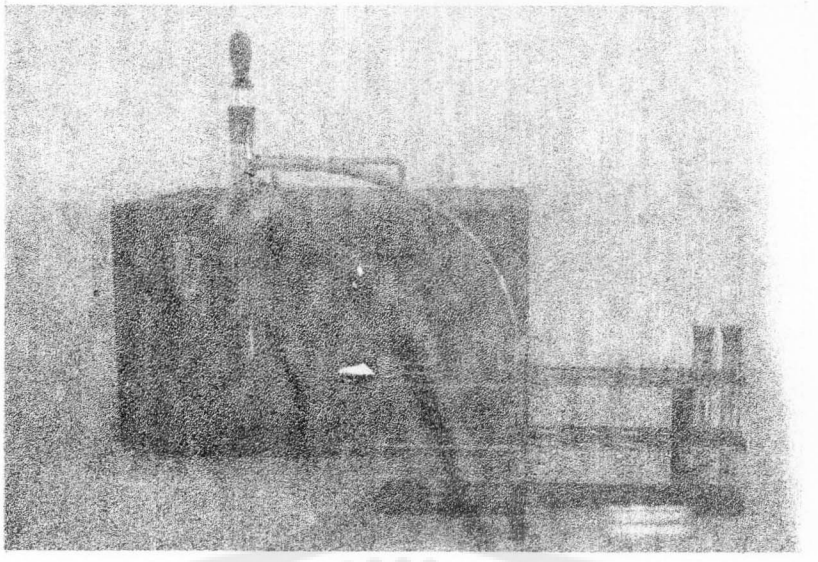
$$2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g)$$

สีน้ำตาลแดง ไม่มีสี

<u>การทดลองที่ 7.6</u> การเปลี่ยนความดันหรืออุณหภูมิกับภาวะสมดุล

<u>วิธีทำ</u> <u>ตอนที่ 1</u> เมื่อเปลี่ยนความดัน

1. เตรียมกาซไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยใส่ชิ้นโลหะทองแดงประมาณ 1 g ไว้ในหลอดทดลองที่มีแขนข้าง เติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปประมาณ 5 cm^3
2. เก็บกาซใส่หลอดทดลองขนาดเล็กสองหลอด แล้วปิดจุกยางให้แน่นเก็บไว้ทดลองในตอนที่ 2
3. เก็บกาซต่อไปอีก แต่คราวนี้ใส่กระบอกฉีดยาพลาสติกที่เชื่อมด้านที่ต่อกับเข็มฉีดยาให้ปิดสนิทหรือใช้ปลายนิ้วอุดไว้
4. เมื่อได้กาซเต็มกระบอก ใช้หลอดฉีดยากดเข้าไปเพื่ออัดกาซจนได้ปริมาตรค่าหนึ่ง แล้วสังเกตดูสีและเปรียบเทียบกับสีเดิม ปล่อยมือเพื่อลดแรงอัด แล้วกดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง สังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีของกาซทุกครั้งที่กดและปล่อยหลอดฉีดยา



รูป 7.3 แสดงการเตรียมกาซไนโตรเจนไดออกไซด์

5. นำกระบอกฉีดยาที่เก็บกาซในข้อ 4 มาทำการทดลองซ้ำ แต่ให้กดหรืออัดหลอดฉีดยาให้กาซมีปริมาตรแตกต่างจากข้อ 4 และอยู่ที่ตำแหน่งนั้นประมาณ 1 นาที สังเกตสีของกาซในกระบอกฉีดยานั้น บันทึกผลและสรุปผลการทดลองนี้

<u>ตอนที่ 2</u> เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ

1. นำกาซทั้งสองหลอดที่เก็บไว้ในตอนที่ 1 มา จุ่มหลอดหนึ่งลงในอ่างน้ำแข็ง และจุ่มอีกหลอดหนึ่งลงในอ่างน้ำร้อน ทิ้งไว้สักครู่ สังเกตสีที่เปลี่ยนไป บันทึกไว้
2. นำหลอดในอ่างน้ำร้อนมาจุ่มในอ่างน้ำแข็ง และหลอดในอ่างน้ำแข็งมาจุ่มในอ่างน้ำร้อน ทิ้งไว้สักครู่ สังเกตและบันทึกผล การเปลี่ยนสีของกาซช่วยให้นักเรียนสรุปผลการทดลองนี้ได้อย่างไรบ้าง
3. นำหลอดทั้งสองมาจุ่มในอ่างน้ำที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบสีของกาซในหลอดทั้งสอง บันทึกผลเช่นเดียวกัน

ในการทดลองตอนที่ 1 การกดและปล่อยหลอดฉีดยา เป็นการเปลี่ยนแปลงความดันที่กระทำต่อกาซที่อยู่ภายในกระบอกฉีดยา เมื่อกดหลอดฉีดยา ตอนแรกจะเห็นกาซมีสีเข้มขึ้น แล้วสักครู่หนึ่งสีจะจางลง เราอธิบายได้ว่าเพราะตอนแรกเพิ่มความดันให้กาซซึ่งเท่ากับเป็นการลดปริมาตร จะทำให้โมเลกุลของกาซเข้ามาอยู่ใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้แลเห็นสีของกาซเข้มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าจำนวนโมเลกุลของกาซต่อ 1 หน่วยปริมาตร ซึ่งก็คือความเข้มข้นของกาซมากขึ้น ฉะนั้น การเพิ่มความดันของ

กาซก็เทียบได้กับการเพิ่มความเข้มข้นนั่นเอง ในกรณีของกาซ เราจึงวัดความดันแทนความเข้มข้นได้

นักเรียนจะสังเกตเห็นว่า ถ้าเรากดหลอดฉีดยาให้อยู่ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งนานพอสมควร สีของกาซภายในกระบอกฉีดยาจะคงที่ แต่ถ้าเราเปลี่ยนตำแหน่งของหลอดฉีดยา หรือเปลี่ยนความดัน ความเข้มของสีก็จะเปลี่ยนไป การที่เป็นเช่นนั้น แสดงว่าภาวะสมดุลของกาซในระบบเปลี่ยนไปแล้ว

จึงอาจสรุปได้ว่า การเปลี่ยนความดันมีผลต่อภาวะสมดุลของระบบที่มีกาซเป็นองค์ประกอบทำนองเดียวกัน ถ้าเราพิจารณาผลการทดลองตอนที่ 2 โดยละเอียด ก็จะสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อภาวะสมดุลของระบบด้วย

ให้นักเรียนตั้งข้อสังเกตจากผลการทดลองว่า การเพิ่มความดัน และอุณหภูมิให้แก่ระบบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางใดที่เราสังเกตเห็นได้ ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

แบบฝึกหัดที่ 7.3

1. ระบบต่อไปนี้เป็นระบบปิด ณ ภาวะสมดุล ถ้าเติมสารบางชนิดลงไปในระบบต่าง ๆ ตามที่ระบุไว้ จะทำให้ความเข้มข้นของสารในระบบนั้น มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ก. ปฏิกริยา $C_2H_6(g) \rightleftharpoons H_2(g) + C_2H_4(g)$

กาซที่เติม H_2

ข. ปฏิกริยา $2NO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$

กาซที่เติม NO

ค. ปฏิกริยา $PbSO_4(s) + H^+(aq) \rightleftharpoons Pb^{2+}(aq) + HSO_4^-(aq)$

สารที่เติม $Pb(NO_3)_2$

2. โปตัสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ละลายในน้ำให้สารละลายสีเหลือง โปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ละลายน้ำให้สารละลายสีส้ม เขียนสมการแสดงปฏิกริยา ณ ภาวะสมดุลได้ดังนี้

$$2CrO_4^{2-}(aq) + H^+(aq) \rightleftharpoons Cr_2O_7^{2-}(aq) + OH^-(aq)$$

ก. ถ้าเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงไปในสารละลายโปตัสเซียมโครเมต จะได้ผลอย่างไรเกิดขึ้น

ข. นำสารละลายจากข้อ ก. มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป จะได้ผลอย่างไรเกิดขึ้น

7.7 หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์

การทดลองที่ 7.5 ได้แสดงถึงการเปลี่ยนภาวะสมดุลในสารละลาย อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารบางชนิดในปฏิกริยาเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล เขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq)$$

สีเหลืองอ่อน ไม่มีสี สีแดง

เมื่อเติมไอร์ออน(III) อิออนลงไป สารละลายมีสีเข้มขึ้น แสดงว่ามีไธโอไซยาโนเฟอเรต(III)อิออนเกิดขึ้น แล้วสารละลายมีสีคงที่ใหม่อีกครั้งหนึ่ง อธิบายได้ว่า ระบบที่สมดุลอยู่แล้วจะพยายามปรับตัวเพื่อลดปริมาณของไอร์ออน(III)อิออนที่เติมลงไป โดยการเข้ารวมตัวกับไธโอไซยาเนตอิออน เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ คือไธโอไซยาโนเฟอเรต (III)อิออน ดังนั้นความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันนั้นความเข้มข้นของไธโอไซยาเนตอิออนจะลดลงไปจากเดิม แล้วในที่สุดระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ได้อีกซึ่งต่างจากภาวะสมดุลเดิม การเติมไธโอไซยาเนตอิออนลงไป ก็อาจอธิบายได้ทำนองเดียวกัน

ถ้าเราเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ โดยเติมไธโอไซยาโนเฟอเรต (III)อิออนลงไป ณ ภาวะสมดุล นักเรียนคิดว่าภาวะสมดุลจะเปลี่ยนไปหรือไม่ อย่างไร

ในการทดลองที่ 7.5 นี้ เรายังได้ทดลองเติมสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงไป จะเห็นว่าสีของสารละลายจางลง แสดงว่าระบบที่สมดุลนั้นถูกรบกวน ระบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร นักเรียนจะเห็นว่ามีตะกอนเกิดขึ้น ตะกอนนั้นมาจากไอร์ออน (III)อิออนทำปฏิกริยากับสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ทำให้ปริมาณของไอร์ออน(III) อิออนในสารละลายที่จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไธโอไซยาโนเฟอเรต(III) อิออนลดน้อยลง ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่จึงสลายตัวออกให้ไอร์ออน (III) อิออนเพื่อชดเชย ปฏิกริยาจะดำเนินต่อไปเช่นนี้ จนไม่มีตะกอนเกิดเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุลใหม่ ซึ่งต่างจากภาวะสมดุลเดิม

นักเรียนคงพอจะได้ข้อสังเกตแล้วว่า เมื่อมีการรบกวนระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นนั้น ระบบพยายามปรับตัวเพื่อลดปริมาณของสารที่เติมลงไป แล้วในที่สุดระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ได้อีก ซึ่งต่างจากภาวะสมดุลเดิม

ในการทดลองที่ 7.6 ได้แสดงถึงการเปลี่ยนภาวะสมดุล เมื่อเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิ ในระบบสมดุลของ $NO_2 - N_2O_4$ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนภาวะสมดุลในระบบ ทำนองเดียวกับการเปลี่ยนความเข้มข้นในการทดลองที่ 7.5 นักเรียนคิดว่าระบบจะมีการปรับตัวอย่างไร และสอดคล้องกับข้อสังเกตดังกล่าวหรือไม่

จากการทดลองที่ 7.6 ในระบบ $NO_2 - N_2O_4$ ที่ภาวะสมดุลระบบจะมีทั้งก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และก๊าซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ปนกันอยู่ นักเรียนได้เห็นแล้วว่าเมื่อเพิ่มความดันให้แก่ระบบ ก๊าซจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แล้วจางลงเล็กน้อย แสดงว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์บางส่วนกลายเป็นก๊าซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ดังนี้

$$2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g)$$

2 โมล 1 โมล

พิจารณาจากสมการจะเห็นว่า ในการเกิดก๊าซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์นั้น ทำให้จำนวนโมลรวมทั้งหมดของก๊าซในระบบลดลง เทียบได้กับการลดความเข้มข้นของก๊าซในระบบนั่นเอง เราได้เคยอภิปรายกันมาแล้วว่า ในกรณีเกี่ยวกับก๊าซ เราอาจวัดความดันแทนความเข้มข้นได้ ฉะนั้น อาจกล่าวได้ว่า การเกิดก๊าซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์นั้น เป็นการลดความดันของก๊าซในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตที่ได้จากการทดลองที่ 7.5 กล่าวคือ เมื่อเรารบกวนสมดุลของระบบนี้โดยการเพิ่มความดัน ระบบได้พยายามปรับตัวเพื่อลดผลการรบกวนนั้น โดยการลดความดันของก๊าซในระบบดังกล่าว แล้วระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ ซึ่งต่างจากภาวะสมดุลเดิม

เราจะพิจารณาต่อไปอีกว่า การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้แก่ระบบ $NO_2 - N_2O_4$ ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว ระบบจะมีการปรับตัวอย่างไรจึงเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ การทดลองนี้นักเรียนได้เห็นแล้วว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีก๊าซสีน้ำตาลแดง คือก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดมากขึ้น ตั้งทิ้งไว้สักครู่สีจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ได้มีผู้ทำการทดลองวัดความร้อนของปฏิกริยาการเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ จากการสลายตัวของก๊าซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ว่าเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน แสดงให้เห็นว่า ระบบ

$$N_2O_4(g) \longrightarrow 2NO_2(g)$$

ได้นำความร้อนที่ได้รับจากการเพิ่มอุณหภูมิไปใช้ เป็นการลดผลการรบกวนสมดุล แล้วระบบจึงเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ ซึ่งต่างจากภาวะสมดุลเดิม

ในทางตรงกันข้าม การเกิดกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ จากการรวมตัวของกาซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ ภาวะสมดุลของระบบย่อมจะเปลี่ยนไป ซึ่งจากผลการทดลองสังเกตเห็นว่าสีของกาซภายในกระบอกฉีดยาค่อย ๆ จางลงแล้วคงที่ เนื่องจากเกิดกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ซึ่งไม่มีสี ปฏิกริยาการเกิดกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์เช่นนี้ ได้มีผู้ทดลองพบว่าเป็นปฏิกริยาคายความร้อน แสดงว่าเมื่อมีการลดอุณหภูมิของระบบ ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว ระบบจะต้องปรับตัวให้เข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่โดยการคายความร้อน คือกาซไนโตรเจนไดออกไซด์บางส่วนรวมตัวเป็นกาซไดไนโตร-เจนเตตรอกไซด์

$$N_2O_4(g) \longrightarrow 2NO_2(g)$$

ได้มีผู้ทำการทดลองทำนองนี้ในระบบอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก ทั้งในระบบที่เป็นของเหลวและกาซก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ฉะนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ถ้าเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งในระบบ ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ จะทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป โดยระบบมีการปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดปริมาณการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น แล้วระบบดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

สำหรับระบบที่มีกาซเป็นองค์ประกอบ นอกจากจะเปลี่ยนความเข้มข้นของสารโดยตรงแล้ว การเปลี่ยนความดัน จะให้ผลเช่นเดียวกับการเปลี่ยนความเข้มข้นของจำนวนโมลของกาซทั้งหมดอีกด้วย และอุณหภูมิก็เป็นอีกแฟคเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อภาวะสมดุลของระบบ

ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสผู้หนึ่งชื่อ เลอ ชาเตอลิเยร์ สนใจเกี่ยวกับภาวะสมดุลของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ความดัน และอุณหภูมิ ได้ทำการทดลองค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่องนี้ และได้สรุปเป็นหลักไว้ดังนี้ เมื่อระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลถูกรบกวน โดยการเปลี่ยนแปลงแฟคเตอร์ใด ๆ ที่มีผลต่อสมดุล ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบกลับคืนเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ หลักนี้เรียกว่า หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ เขาได้เผยแพร่งานชิ้นนี้เมื่อปี ค.ศ.1884 การทดลองที่ 7.5 และ 7.6 ที่ได้ทำมาแล้วนั้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุลซึ่งเป็นไปตามหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ นั่นเอง

นักเรียนคงเคยเปิดจุกขวดน้ำอัดลม และสังเกตเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยปกติภายในขวดน้ำอัดลม เขามักจะอัดกาซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ภายใต้ความดันสูงประมาณ 3 – 4 บรรยากาศ เพราะกาซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ดีที่ความดันสูง ถ้าเราไปรบกวนสมดุลภายในขวดน้ำอัดลม โดยการเปิดจุกขวด ซึ่งเท่ากับเป็นการลดความดันของกาซที่อยู่บริเวณเหนือน้ำ ถ้า

ใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์อธิบาย จะได้ว่าระบบต้องพยายามปรับตัวอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ เราจึงเห็นฟองกาซหนีออกจากน้ำอัดลมขึ้นสู่พื้นผิวหน้า แสดงว่าระบบพยายามเพิ่มความดันของกาซคาร์บอนไดออกไซด์ในบริเวณเหนือน้ำ

นักเรียนคิดว่าเมื่อลดความดันของกาซที่อยู่บริเวณเหนือน้ำ กาซเหล่านั้นจะละลายได้น้อยลงหรือไม่ และการเปลี่ยนความดันในระบบที่เป็นกาซ จะเป็นการรบกวนสมดุลเสมอไปหรือไม่ ตัวอย่างเช่น ในระบบที่มีปฏิกริยาระหว่างกาซคาร์บอนมอนอกไซด์กับกาซไนโตรเจนไดออกไซด์ ดังนี้

$$CO(g) + NO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + NO(g)$$

นักเรียนลองใช้หลักของเลอ ชาเตอร์ลิเยร์ทำนายดูว่า ถ้าเพิ่มความดันให้แก่ระบบ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเกิดขึ้น

7.7.1 <u>การใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ในการอุตสาหกรรม</u>

ในวงการอุตสาหกรรม ผู้ผลิตต้องเลือกใช้กรรมวิธีในการเปลี่ยนวัตถุดิบ หรือสารตั้งต้นให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์มากที่สุด นอกจากนี้การลงทุน เวลา และเรื่องอื่น ๆ ก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญเช่นกัน ในที่นี้เราจะลองใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ช่วยในการวินิจฉัยว่า เราสามารถเปลี่ยนปริมาณของผลิตภัณฑ์โดยเปลี่ยนแฟคเตอร์บางอย่างนั้น จะนำมาใช้ประโยชน์ในการอุตสาหกรรมได้อย่างไรบ้าง

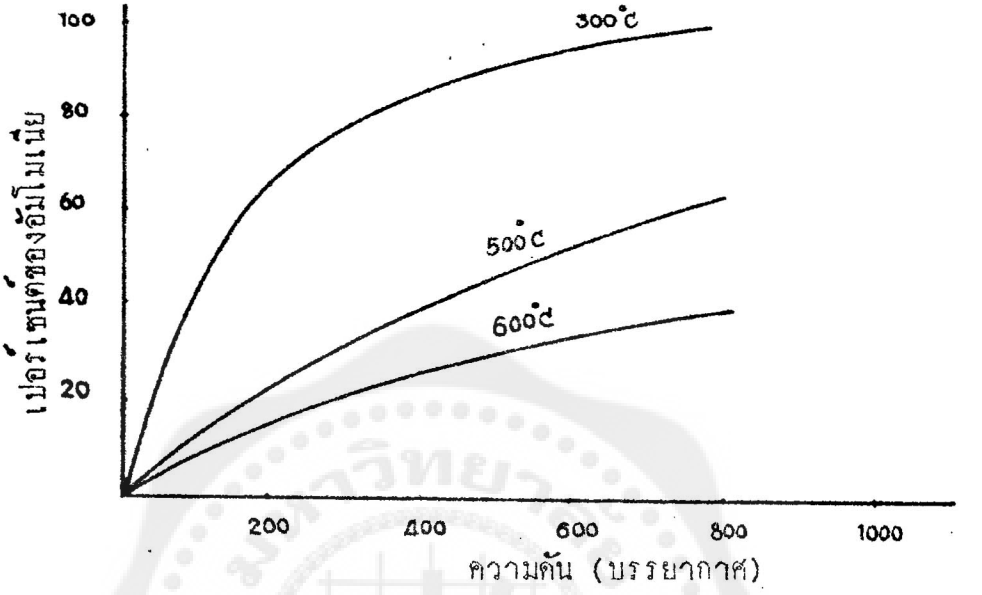
ในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยวิทยาศาสตร์ที่ทำกันในเมืองไทย เช่น ปุ๋ย อัมโมเนียมซัลเฟต ซึ่งผลิตจากปฏิกริยาระหว่างกาซอัมโมเนียและกรดซัลฟุริกนั้น ทางโรงงานได้เตรียมกาซอัมโมเนียขึ้นใช้เอง โดยใช้กาซไนโตรเจน (เตรียมจากอากาศ) ทำปฏิกริยากับกาซไฮโดรเจน (เตรียมจากการใช้กาซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกริยากับไอน้ำ) เขียนสมการแสดงปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า การผลิตกาซอัมโมเนียโดยวิธีนี้ปฏิกริยาไม่ได้เกิดโดยสมบูรณ์ เนื่องจากเป็นปฏิกริยาที่ย้อนกลับได้ ซึ่ง ณ ภาวะสมดุลย่อมมีสารตั้งต้นเหลืออยู่กับผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้ยังเป็นปฏิกริยาคายความร้อนอีกด้วย

ตามหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ การที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีเปอร์เซนต์สูงขึ้น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแฟคเตอร์บางอย่าง เช่น ความดัน และอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงแฟคเตอร์เหล่านี้ อาจทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไปด้วย นักเรียนคิดว่าในการผลิตกาซอัมโมเนีย เราควรจะเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนแฟคเตอร์ใด อย่างไร

ได้มีผู้ทำการทดลองเก็บข้อมูลในการผลิตกาซอัมโมเนียที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ กัน แล้วนำผลมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูป 7.4 แสดงเปอร์เซนต์ของกาซอัมโมเนียเมื่อผลิตที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ

ถ้าพิจารณาจากกราฟนี้ จะเห็นว่าเมื่อระบบอยู่ภายใต้ความดันเท่ากัน เราจะได้อัมโมเนียมากขึ้นถ้าสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ นักเรียนคิดว่าการเพิ่มอุณหภูมิแล้วทำให้เราได้อัมโมเนียน้อยลงนี้เป็นไปตามหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์หรือไม่

จากข้อมูลที่รวบรวมได้นั้น พบว่าเมื่อไนโตรเจนรวมตัวกับไฮโดรเจนเกิดเป็นอัมโมเนีย จะคายความร้อนออกมา 92 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้น ตามหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ การลดอุณหภูมิจะทำให้ระบบปรับตัวไปในทิศทางที่จะคายพลังงานออกมาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ จึงเกิดกาซอัมโมเนียมากขึ้น ซึ่งคำอธิบายเช่นนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูป 7.4

ถ้าพิจารณาในแง่ที่เกี่ยวกับความดันจากกราฟบ้าง จะเห็นว่ากาซอัมโมเนียที่ผลิตได้ ณ อุณหภูมิใดก็ตาม เมื่อเพิ่มความดันจะได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงความดันเกี่ยวข้องกับปริมาณของผลิตภัณฑ์อย่างไร

ถ้าเรารบกวนสมดุลของระบบโดยการเพิ่มความดัน ตามหลักเลอ ชาเตอลิเยร์ ทำนายได้ว่าระบบจะต้องพยายามปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดผลการรบกวนนั้น กล่าวคือ ระบบจะต้องพยายามลดความดันแล้วเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

ถ้าพิจารณาจากสมการ $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$

1 โมล 3 โมล 2 โมล

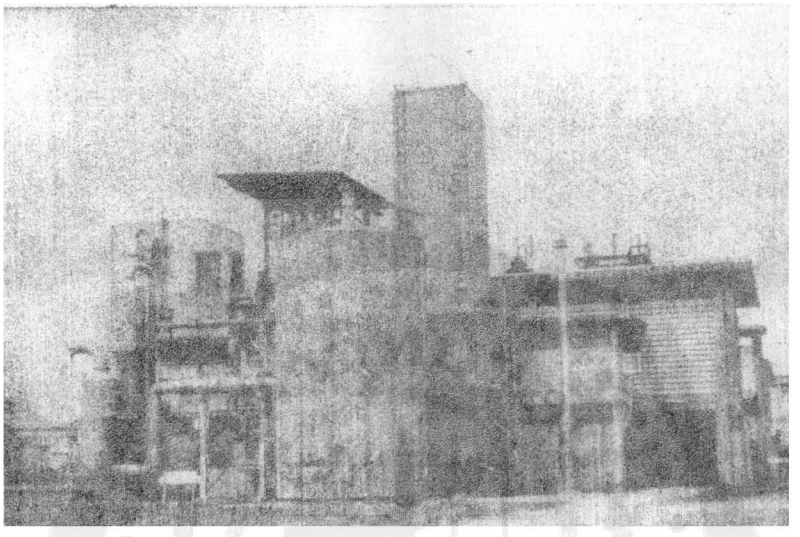
จะเห็นว่า เมื่อใช้สารตั้งต้น คือกาซไนโตรเจน 1 โมล และกาซไฮโดรเจน 3 โมล รวมกันเป็น 4 โมล จะเกิดผลิตภัณฑ์คือ กาซอัมโมเนีย 2 โมล แสดงว่าในการเกิดกาซอัมโมเนียนั้นทำให้จำนวนโมลรวมของกาซในระบบลดลง ซึ่งเทียบได้กับการลดความเข้มข้นของกาซในระบบ จึงเห็นได้ว่าในการเกิดกาซอัมโมเนียจะทำให้ความดันของกาซในระบบลดลง ดังนั้น ถ้าต้องการให้ได้กาซอัมโมเนียมีเปอร์เซนต์สูง จึงทำได้โดยการเพิ่มความดันให้แก่ระบบ เพื่อระบบจะปรับตัวในทิศทางดังกล่าวแล้วเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

สรุปได้ว่าถ้าต้องการจะให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือกาซอัมโมเนียเปอร์เซนต์สูง ผู้ทำการอุตสาหกรรมควรเตรียมกาซอัมโมเนียที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และใช้ความดันสูง ๆ แต่ก็ยังมีแฟคเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยาหรืออัตราการเกิดปฏิกริยา ที่อุณหภูมิต่ำกาซไนโตรเจนรวมตัวกับกาซไฮโดรเจนได้ช้ามาก กว่าจะเข้าสู่ภาวะสมดุล และมีกาซอัมโมเนียจำนวนมากเกิดขึ้น อาจกินเวลาเป็นปี

นักเรียนคงจำได้ว่า ~~ในบทที่ 6 เราทดลองได้ผลว่า~~ อัตราการเกิดปฏิกริยาจะสูงขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิ และใช้ตะตะไลส์ที่เหมาะสม ฉะนั้น การใช้อุณหภูมิต่ำมากอาจไม่เหมาะ เพราะปฏิกริยาเกิดช้า เนื่องจากการอุตสาหกรรมจำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ด้วย ได้มีผู้ทดลองค้นคว้าและพบว่าควรใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส และควรใช้ตะตะไลส์ด้วย เพื่อช่วยให้ปฏิกริยาเกิดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความดันที่ใช้ การใช้ความดันมีขอบเขตจำกัด เพราะอุปกรณ์ที่จะใช้กับความดันสูงมีราคาแพงมาก ได้มีการทดลองค้นคว้าพบว่าในการเตรียมกาซอัมโมเนีย ความดันที่ควรใช้คือ 350 บรรยากาศ

การเตรียมกาซอัมโมเนียในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ภาวะที่เหมาะคือใช้กาซไนโตรเจนทำปฏิกริยากับกาซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 350 บรรยากาศ และพบว่าเหล็กเป็นตะตะไลส์ที่เหมาะสมในปฏิกริยานี้ ปรากฏว่า ณ ภาวะดังกล่าว กาซไนโตรเจนและกาซไฮโดรเจนทำปฏิกริยากันให้กาซอัมโมเนียเพียง 30 เปอร์เซนต์เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ทางอุตสาหกรรมได้พิจารณาเห็นว่าเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติ เพราะกาซไนโตรเจนและกาซไฮโดรเจนที่เหลือจากปฏิกริยานำกลับไปใช้ในขบวนการเตรียมกาซอัมโมเนียได้อีก แยกกาซอัมโมเนียที่เกิดขึ้นออกได้โดยอัดกาซผสมภายใต้ความดันสูงแล้วลดอุณหภูมิ อัมโมเนียจะเป็นของเหลวขณะที่ไนโตรเจนและไฮโดรเจนยังคงเป็นกาซ จึงแยกจากกันได้

ขบวนการดังกล่าว นักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ ฟริทซ์ ฮาเบอร์เป็นผู้ค้นพบ ในวงการอุตสาหกรรมรู้จักการเตรียมกาซอัมโมเนียโดยขบวนการฮาเบอร์กันดี สำหรับประเทศเรามีอุตสาหกรรมผลิตกาซอัมโมเนีย โดยขบวนการนี้ที่บ้านแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ลิกไนท์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกาซไฮโดรเจน เพื่อนำไปเข้าขบวนการผลิตอัมโมเนียต่อไป นักเรียนจะได้ศึกษาเรื่องนี้ต่อไปในบทที่ 12



รูป 7.5 แสดงโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยที่บ้านแม่เมาะ อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

อุตสาหกรรมชนิดอื่นก็ได้นำเอาหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์มาใช้ เช่น การเตรียมกาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เพื่อทำเป็นกรดซัลฟุริก ในประเทศไทยผลิตกรดซัลฟุริกโดยขบวนการเดียวกับที่ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศ คือผลิตจากกาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ โดยการนำกาซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ซึ่งได้จากการหลอมเหลวกำมะถัน แล้วนำไปเผากับออกซิเจนในอากาศ) มารวมกับกาซออกซิเจน เขียนสมการแสดงปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$$

ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาคายความร้อน

ในการเตรียมกาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ดังกล่าวนี้ ให้นักเรียนลองใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายดูว่า ถ้าต้องการจะให้ได้ผลิตภัณฑ์คือ กาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เปอร์เซนต์สูงขึ้น อุณหภูมิ และความดันมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบนี้อย่างไร และในการอุตสาหกรรมควรจะจัดภาวะอย่างไรจึงจะได้ผลคุ้มค่า

7.7.2 <u>คะตะไลส์กับภาวะสมดุล</u>

การใช้คะตะไลส์ในปฏิกริยาต่าง ๆ นั้น เราต้องการช่วยให้ปฏิกริยาเกิดเร็วขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเพื่อทำให้ปฏิกริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลเร็วขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ในการอุตสาหกรรมมากในแง่ของเวลาที่ใช้ในการผลิต นักเรียนอาจจะสนใจในแง่ของผลผลิตบ้างว่า คะตะไลส์ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้นหรือไม่

จากการศึกษาผลของคะตะไลส์ในปฏิกริยาต่าง ๆ ได้พบว่า ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาใด ๆ จะมีค่าเฉพาะค่าหนึ่ง เมื่อใช้คะตะไลส์ช่วยก็ยังคงได้ผลิตภัณฑ์ปริมาณเท่าเดิม และคะตะไลส์ไม่ทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น

นักเรียนคงจำได้ว่า ในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงผลของคะตะไลส์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกริยาว่า คะตะไลส์ช่วยให้ปฏิกริยานั้นมีพลังงานกระตุ้นต่ำลง (ดูรูป 6.8) ปฏิกริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งหมายความว่าคะตะไลส์จะช่วยเร่งทั้งปฏิกริยาไปข้างหน้า และปฏิกริยาย้อนกลับให้เกิดเร็วขึ้นได้เช่นกัน จึงเห็นได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าและอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้คะตะไลส์จึงไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในระบบสมดุล เพียงแต่ช่วยให้ระบบถึงภาวะสมดุลเร็วขึ้น โดยปริมาณของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ที่ภาวะสมดุล เมื่อมีคะตะไลส์ หรือไม่มีคะตะไลส์ก็ไม่เปลี่ยนแปลง

<u>แบบฝึกหัดที่ 7.4</u>

1. ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นในระบบปิด และเป็นปฏิกริยาคายความร้อน

$$2CO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2CO_2(g)$$

เมื่ออุณหภูมิของระบบเป็น 1,000 องศาเซลเซียส และระบบอยู่ในภาวะสมดุล จงทำนายว่าเมื่อเพิ่มความกันในระบบโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง จงให้เหตุผลประกอบด้วย

2. ปฏิกริยาในข้อ 1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ จะมีอะไรเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้างในระบบ จงให้เหตุผลประกอบ

3. การผลิตกาซไนโตรเจนมอนอกไซด์ จากกาซไนโตรเจนและกาซออกซิเจน จะเกิดปฏิกริยาดังสมการ

$$N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g)$$

ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ให้นักเรียนใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ประกอบการพิจารณาว่า เมื่อต้องการให้เกิดผลิตภัณฑ์มาก จะต้องเลือกใช้ภาวะอย่างไร

7.8 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุล</u>

ในการทดลองที่ 7.5 นักเรียนได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนภาวะสมดุล เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในปฏิกริยาระหว่างสารละลายไอร์ออน (III)ไนเตรตกับสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต ซึ่งเป็นปฏิกริยาเคมีที่ผันกลับได้ ได้สารละลายสีแดงเข้ม และระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$Fe^{3+}(aq) + SCN^-(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq)$$

มีผู้ทดลองหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตรของผลิตภัณฑ์ คือ $FeSCN^{2+}$ และของสารตั้งต้นที่เหลือคือ Fe^{3+} และ SCN^- ในขณะที่ระบบอยู่ในภาวะสมดุล

เราเขียน $[FeSCN^{2+}]$, $[Fe^{3+}]$ และ $[SCN^-]$ แทนความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตรของ $FeSCN^{2+}$, Fe^{3+} และ SCN^- ตามลำดับ

จากการทดลองหลาย ๆ ครั้งเมื่ออุณหภูมิคงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารในแต่ละครั้งต่าง ๆ กัน หาความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวพบว่า

$$\frac{[FeSCN^{2+}]}{[Fe^{3+}][SCN^-]} = \text{ค่าคงที่}$$

ค่าคงที่นี้ก็คือ ค่าของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เป็นโมลต่อลิตร หารด้วยผลคูณของความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตรของสารตั้งต้นที่เหลือ นั่นเอง

มีผู้ทำการทดลองในระบบ $HI - H_2 - I_2$ ณ ภาวะสมดุล มีข้อมูลที่เชื่อถือได้ดังในตาราง 7.1 ให้นักเรียนลองวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารต่าง ๆ เป็นโมลต่อลิตร ณ ภาวะสมดุล เขียนสมการแสดงปฏิกริยา ณ ภาวะสมดุลได้ดังนี้

$$2HI(g) \rightleftharpoons H_2(g) + I_2(g)$$

ตาราง 7.1 ความเข้มข้นของ HI, H_2 และ I_2 เป็นโมลต่อลิตร ณ ภาวะสมดุลที่ 427°C

การทดลองที่	$[HI]$	$[H_2]$	$[I_2]$
1	17.7×10^{-3}	1.83×10^{-3}	3.13×10^{-3}
2	16.5×10^{-3}	2.91×10^{-3}	1.71×10^{-3}
3	13.5×10^{-3}	4.56×10^{-3}	0.74×10^{-3}
4	3.35×10^{-3}	0.48×10^{-3}	0.43×10^{-3}
5	8.41×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.14×10^{-3}

ค่าที่ได้จากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ได้จากการเผา H_2 และ I_2 เข้าด้วยกัน ส่วนการทดลองที่ 4 และ 5 ได้จากการเผา HI

ให้นักเรียนลองหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารต่าง ๆ เหล่านี้ จากข้อมูลในตาราง 7.1 แล้วตรวจคำตอบจากตาราง 7.2

ตาราง 7.2 ค่าของอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 7.1

การทดลองที่	$\frac{[H_2][I_2]}{[HI]}$	$\frac{[H_2][I_2]}{2[HI]}$	$\frac{[H_2][I_2]}{[HI]^2}$
1	3.24×10^{-4}	1.62×10^{-4}	1.83×10^{-2}
2	3.02×10^{-4}	1.51×10^{-4}	1.83×10^{-2}
3	2.50×10^{-4}	1.25×10^{-4}	1.85×10^{-2}
4	0.65×10^{-4}	0.32×10^{-4}	1.85×10^{-2}
5	1.55×10^{-4}	0.77×10^{-4}	1.84×10^{-2}

นักเรียนคงจะเห็นแล้วว่า จากการทดลองทั้ง 5 ครั้งนั้น อัตราส่วน $\frac{[H_2][I_2]}{[HI]^2}$ เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าใกล้เคียงกัน หรือถือได้ว่าเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

อัตราส่วนที่ได้ คือผลคูณของความเข้มข้น ณ ภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์สองชนิด หารด้วยความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือยกกำลังสอง จะเห็นได้ว่าในอัตราส่วนนี้ ตัวเลขยกกำลังที่ใช้บนเครื่องหมาย [ ] ซึ่งแทนความเข้มข้นของสารเป็นโมลต่อลิตรนั้น เท่ากับสัมประสิทธิ์ของสารคิดเป็นโมลที่ปรากฏในสมการเคมีที่ดุลแล้วนั่นเอง

ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตรของสารต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุลในระบบต่าง ๆ เท่าที่กล่าวมามีดังนี้

ในระบบ $Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq)$

$$\frac{[FeSCN^{2+}]}{[Fe^{3+}][SCN^{-}]} = \text{ค่าคงที่}$$

ในระบบ $2HI(g) \rightleftharpoons H_2(g) + I_2(g)$

$$\frac{[H_2][I_2]}{[HI]^2} = \text{ค่าคงที่}$$

ในปฏิกริยาเคมีอื่น ๆ ก็อาจหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตรของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้เช่นกัน เช่นในการผลิตกาซอัมโมเนีย ซึ่งได้เคยกล่าวมาแล้ว ดังสมการ

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า $$\frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3} = \text{ค่าคงที่}$$

จากการทดลองเป็นจำนวนมากที่นำมาหาข้อสรุปเกี่ยวกับความเข้มข้นของสาร ณ ภาวะสมดุลทำนองเดียวกับที่กล่าวมานี้ ก็ได้ผลตรงกัน พอที่จะนำมาใช้เป็นหลักเกณฑ์ได้ว่า ในปฏิกริยาทั่ว ๆ ไป เมื่อสาร A จำนวน a โมล ทำปฏิกริยากับสาร B จำนวน b โมล ได้สาร C จำนวน c โมล และสาร D จำนวน d โมล ตามลำดับ เขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$$

ณ ภาวะสมดุลจะมีทั้งสาร A, B, C และ D ปนกันอยู่ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสารตั้งต้นที่เหลือ ณ ภาวะสมดุล เมื่ออุณหภูมิคงที่ จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{[C]^c\ [D]^d}{[A]^a\ [B]^b} = \text{ค่าคงที่} = K$$

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ คือ อัตราส่วนระหว่างผลคูณของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดยกกำลังด้วยสัมประสิทธิ์บอกจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ กับผลคูณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือแต่ละชนิดยกกำลังด้วยสัมประสิทธิ์บอกจำนวนโมลของสารที่เหลือนั้น ณ ภาวะสมดุล มีค่าคงที่ (K) เมื่ออุณหภูมิคงที่ และความเข้มข้นของสารคิดเป็นโมลต่อลิตร

เราเรียก K ว่าค่าคงตัวของสมดุล ค่านี้จะคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไป ค่า K จะเปลี่ยนไปด้วย

เราจะพิจารณาหาค่า K ของปฏิกริยาระหว่าง Fe^{2+} กับ Ag^{+} ในการทดลองที่ 7.3 คูบ้างเขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

$$K_1 = \frac{[Fe^{3+}][Ag]}{[Fe^{2+}][Ag^{+}]}$$

เมื่อ K_1 เป็นค่าคงตัวของสมดุล

ในปฏิกริยานี้ มีโลหะเงินซึ่งเป็นของแข็งเกิดขึ้น โดยปกติมวลของของแข็งต่อหนึ่งหน่วยบริมาตรมีค่าคงที่ ดังนั้น ความเข้มข้นเมื่อคิดเป็นโมลต่อลิตรของโลหะเงินจึงมีค่าคงที่ เมื่อนำไปหารค่า K_1 ก็จะได้ค่าคงตัวใหม่ คือ K ดังนี้

$$\frac{K_1}{[Ag]} = \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}][Ag^{+}]}$$

$$K = \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}][Ag^{+}]}$$

ฉะนั้น ณ ภาวะสมดุลในระบบใด ๆ ที่มีของแข็งเกี่ยวข้องอยู่ด้วย ความเข้มข้นของของแข็งได้คิดรวมอยู่ในค่าคงตัวของสมดุล (K) แล้ว จึงไม่เขียนไว้ในอัตราส่วนที่แสดงค่าคงตัวของสมดุลนั้น

เราจะพิจารณาสมดุลของน้ำเป็นตัวอย่างต่อไป การแตกตัวของน้ำ เขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$H_2O(l) \rightleftharpoons H^{+}(aq) + OH^{-}(aq)$$

จะหาค่าคงตัวของสมดุลได้เช่นกัน

$$K = \frac{[H^{+}][OH^{-}]}{[H_2O]}$$

ปริมาณของน้ำส่วนที่แตกตัวไปมีค่าน้อยมาก จึงถือว่า $[H_2O]$ ไม่เปลี่ยนแปลง หรือมีค่าคงที่ เมื่อคูณกับค่า K จะได้ค่าคงตัวของสมดุลใหม่ คือ Kw ดังนี้

$$K[H_2O] = [H^+][OH^-]$$
$$Kw = [H^+][OH^-]$$

สำหรับค่าคงตัวของสมดุลของน้ำ นักเรียนจะได้ศึกษาเพิ่มเติม ในเรื่องกรด–เบสในบทต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุลดังกล่าว มีประโยชน์มากในทางเคมี เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสารตั้งต้นได้ทันทีจากสมการที่เขียนแสดงปฏิกริยาเคมีใด ๆ ความสัมพันธ์นั้นเป็นค่าคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ถ้าเราทราบค่าคงตัวของสมดุลของระบบหนึ่ง ๆ จะนำมาใช้คำนวณหาความเข้มข้นของสาร ณ ภาวะสมดุลได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

<u>ตัวอย่าง</u> ณ ภาวะสมดุลของปฏิกริยาเคมีระหว่าง Fe^{2+} กับ Ag^+ พบว่ามี Ag^+ 0.25 โมล/ลิตร และ Fe^{3+} 0.50 โมล/ลิตร จงหาความเข้มข้นของ Fe^{2+} ณ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าคงตัวของสมดุล (K) ที่ 25 องศาเซลเซียส = 3.0

<u>วิธีทำ</u>

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^+(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

$$K = \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}][Ag^+]}$$

แทนค่า
$$3.0 = \frac{0.50}{[Fe^{2+}] \times 0.25}$$

$$[Fe^{2+}] = \frac{0.50}{3.0 \times 0.25}$$

$$= 0.67$$

ฉะนั้น ณ ภาวะสมดุลมี $[Fe^{2+}]$ 0.67 โมล/ลิตร

เนื่องจากค่าคงตัวของสมดุล (K) แสดงอัตราส่วนของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสารตั้งต้นที่เหลือ ณ ภาวะสมดุล ถ้าพิจารณาจากค่า K จะทำให้ทราบว่า ณ ภาวะสมดุลมีผลิตภัณฑ์เกิด

ขึ้นมากน้อยเพียงใด นักเรียนคาดคะเนได้หรือไม่ว่า ถ้า K มีค่าเป็น 3.0 ดังในโจทย์ข้อนี้ จะมีผลิตภัณฑ์เกิดมากหรือน้อย

ถ้าค่าคงตัวของสมดุลมากกว่า 1 แสดงว่าปฏิกริยาเกิดไปทางขวามาก จะมีปริมาณของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมาก มีสารตั้งต้นเหลือน้อย ถ้าค่าคงตัวของสมดุลยิ่งมากก็จะยิ่งได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น แต่ถ้าค่าคงตัวของสมดุลน้อยกว่า 1 แสดงว่าปฏิกริยาไม่ได้ดำเนินไปทางขวามากนัก ปริมาณของผลิตภัณฑ์ย่อมเกิดขึ้นน้อย และมีสารตั้งต้นเหลืออยู่มาก ณ ภาวะสมดุล

เราจะมีวิธีหาค่าคงตัวของสมดุลได้อย่างไร

ในการทดลองที่นักเรียนจะได้ทำต่อไปนี้ จะนำผลการทดลองที่ 7.4 มาใช้ ในการทดลองนั้นได้แสดงถึงการละลายไอโอดีนในตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ โปตัสเซียมไอโอไดด์ และเฮกเซน ได้ผลว่า ไอโอดีนบางส่วนละลายได้ในโปตัสเซียมไอโอไดด์ บางส่วนละลายได้ในเฮกเซน เมื่อตั้งทิ้งไว้สักครู่ จะเห็นสีของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสมดุลเกิดขึ้น เขียนสมการแสดงปฏิกริยา ณ ภาวะสมดุลได้ดังนี้

$$I_2(\text{Hexane}) \rightleftharpoons I_2(\text{KI})$$

$$K = \frac{[I_2](\text{KI})}{[I_2](\text{Hexane})}$$ เมื่อ K คือค่าคงตัวของสมดุล

เราต้องทดลองหาปริมาณของไอโอดีนในสารละลายทั้งสองชนิด แล้วนำมาคำนวณดูว่า อัตราส่วนของความเข้มข้นของไอโอดีนในสารละลายทั้งสองนั้นคงที่ หรือไม่

การทดลองที่ 7.7 การหาค่าคงตัวของสมดุลของไอโอดีนในตัวทำละลายที่ไม่ผสมกัน

วิธีทำ 1. นำสารละลายที่เก็บไว้จากการทดลองที่ 7.4 มาหลอดหนึ่ง ใช้หลอดหยดอย่างยาวดูดสารละลายชั้นบนมา 4 cm^3 ใส่ลงไปในหลอดทดลองขนาดกลาง หยดน้ำแป้งลงไป 10 หยด เขย่าแรง ๆ จนเห็นสีน้ำเงินในชั้นของน้ำแป้ง

2. ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.01 mol/l ลงไปทีละหยด พร้อมกับเขย่าแรง ๆ จนกระทั่งสีน้ำเงินของสารละลายหายไป บันทึกจำนวนหยดของสารละลายไว้

3. ใช้หลอดหยดอย่างยาวดูดสารละลายชั้นล่างมา 4 cm^3 ใส่ในหลอดทดลองขนาดกลาง (ระวังอย่าให้สารละลายชั้นบนติดมาด้วย) หยดน้ำแป้งลงไป 10 หยด แล้วค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.01 mol/l ลงไปทีละหยด พร้อมกับเขย่า จนกระทั่งสีน้ำเงินของสารละลายหายไป บันทึกจำนวนหยดของสารละลายไว้

4. นำสารละลายจากการทดลองที่ 7.4 มาอีกหลอดหนึ่ง แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 – 3 อีกครั้งหนึ่ง บันทึกผล

ไอโอดีนให้สีน้ำเงินกับแป้ง เมื่อหยดสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตลงไป ไอโอดีนจะทำปฏิกริยากับโซเดียมไธโอซัลเฟต สีน้ำเงินของสารละลายจึงหายไป จำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไอโอดีนในสารละลาย เราจึงอาจใช้จำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต แทนความเข้มข้นของไอโอดีนได้

ให้นักเรียนคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทำปฏิกริยาพอดีกับไอโอดีนในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์กับจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทำปฏิกริยาพอดีกับไอโอดีนในเฮกเซน

อัตราส่วนที่ได้ทั้งสองครั้งคงที่เท่ากันหรือไม่ นักเรียนพอจะบอกได้หรือไม่ว่า ค่าคงตัวของสมดุลของไอโอดีนในการทดลองนี้มีค่าเท่าใด

เมื่อหาค่าคงตัวของสมดุลได้แล้ว ให้นักเรียนร่วมกันอภิปรายว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันหรือไม่ และถ้าพิจารณาจากค่าคงตัวของสมดุล นักเรียนจะบอกได้หรือไม่ว่าไอโอดีนละลายในตัวทำละลายชนิดใดได้ดีกว่ากัน

แบบฝึกหัดที่ 7.5

1. จงเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และของสารตั้งต้น ณ ภาวะสมดุลในระบบต่อไปนี้

ก. $CO(g) + NO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + NO(g)$

ข. $Cu(s) + 2Ag^+(aq) \rightleftharpoons Cu^{2+}(g) + 2Ag(s)$

ค. $PbI_2(s) \rightleftharpoons Pb^{2+}(aq) + 2I^-(aq)$

2. $PCl_5(g) \rightleftharpoons PCl_3(g) + Cl_2(g)$

จากปฏิกริยานี้ จงหาค่า K เมื่อปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส มีฟอสฟอรัสเพนตะคลอไรด์ 1.5 โมล/ลิตร ฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์ 0.2 โมล/ลิตร และคลอรีน 0.3 โมล/ลิตร

3. จากค่า K ในข้อ 2 จงหาความเข้มข้นของคลอรีน ณ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 250 องศา

เซลเซียส เมื่อความเข้มข้น ณ ภาวะสมดุลของฟอสฟอรัสเพนตะคลอไรด์เป็น 0.2 โมล/ลิตร และของฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์เป็น 0.01 โมล/ลิตร

4. $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$

ค่า K ของปฏิกริยานี้เท่ากับ 1.85 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ถ้าใช้กาซไฮโดรเจน 0.2 โมล/ลิตร จะต้องใช้กาซไนโตรเจนกี่โมล/ลิตร ระบบจึงจะอยู่ในภาวะสมดุล เมื่อมีกาซอัมโมเนีย 0.1 โมล/ลิตร ณ อุณหภูมิเดียวกัน

7.9 ประโยชน์ของค่าคงตัวของสมดุล

นักเรียนได้ศึกษาระบบ ณ ภาวะสมดุล การเปลี่ยนภาวะสมดุล และค่าคงตัวของสมดุลมาแล้ว ต่อไปนี้เราจะพิจารณาว่าค่าคงตัวของสมดุลมีประโยชน์อย่างไรบ้าง

7.9.1 ค่าคงตัวของสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง

ให้นักเรียนพิจารณาตาราง 7.3 ซึ่งแสดงค่าคงตัวของสมดุลของปฏิกริยาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเห็นว่ามีค่ามากน้อยต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 10^{15} ถึง 10^{-14} โดยทั่วไปจากค่าคงตัวของสมดุลเหล่านี้ เราพอจะคาดคะเนอะไรได้บ้าง

ตาราง 7.3 แสดงค่าคงตัวของสมดุลของปฏิกริยาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปฏิกริยา	ค่าคงตัวของสมดุล
$Cu(s) + 2Ag^+(aq) \rightleftharpoons Cu^{2+}(aq) + 2Ag(s)$	2×10^{15}
$Fe^{2+}(aq) + Ag^+(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$	3.0
$N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$	5.4×10^{-3}
$CH_3COOH(aq) \rightleftharpoons H^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$	1.8×10^{-5}
$AgCl(s) \rightleftharpoons Ag^+(aq) + Cl^-(aq)$	1.7×10^{-10}
$H_2O(l) \rightleftharpoons H^+(aq) + OH^-(aq)$	1.0×10^{-14}

นักเรียนได้ศึกษาปฏิกริยาระหว่างไอร์ออน(II)ไอออนกับซิลเวอร์ไอออนมาแล้ว คงระลึกได้ว่ามีผลิตภัณฑ์ คือโลหะเงินเกิดขึ้น และได้หาค่าคงตัวของสมดุลของปฏิกริยานี้ได้เท่ากับ 3.0 จากค่านี้คงจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบางปฏิกริยาที่อุณหภูมิเดียวกัน ปริมาณของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิด มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือ ณ ภาวะสมดุล หรือกล่าวได้ว่าปฏิกริยาเกิดขึ้นไปทางขวาได้มากพอสมควร

ถ้าพิจารณาค่าคงตัวของสมดุลจากตาราง 7.3 ซึ่งได้มาจากหนังสือรวมข้อมูล เมื่อค่าคงตัวของสมดุลมีค่ามากกว่า 1 เช่น ในปฏิกริยา $Cu(s) + 2Ag^+(aq) \rightleftharpoons Cu^{2+}(aq) + 2Ag(s)$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส $K = 2 \times 10^{15}$ ค่า K มากย่อมแสดงว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดมาก และมีสารตั้งต้นเหลืออยู่น้อยมาก อาจถือได้ว่าในระบบเช่นนี้ ปฏิกริยาเกิดไปทางขวาจนสมบูรณ์ อันที่จริงแล้วไม่มีปฏิกริยาใดในระบบปิดเกิดโดยสมบูรณ์อย่างแท้จริง แต่ถ้าสารตั้งต้นในปฏิกริยามีเหลือน้อยจนเราไม่สามารถตรวจหรือวัดได้ เราอนุโลมว่าปฏิกริยานั้น ๆ เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ดังตัวอย่างที่กล่าวนี้ จึงเห็นได้ว่า ถ้า K ยิ่งมากเท่าใดผลิตภัณฑ์ก็ยิ่งเกิดได้มากขึ้นเท่านั้น

ถ้าค่าคงตัวของสมดุลน้อยกว่า 1 เช่น ในปฏิกริยา $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$ ค่า $K = 5.4 \times 10^{-3}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงว่า ณ ภาวะสมดุลมีปริมาณของผลิตภัณฑ์ คือไนโตรเจนไดออกไซด์น้อยกว่าสารตั้งต้นคือ ไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ หรือกล่าวได้ว่าปฏิกริยาดำเนินไปข้างขวาได้น้อย ปฏิกริยาอื่น ๆ ที่มีค่าคงตัวของสมดุลน้อยก็อาจอธิบายได้เช่นกัน

ฉะนั้น ถ้าเราทราบค่าคงตัวของสมดุลของปฏิกริยาต่าง ๆ ณ อุณหภูมิเดียวกัน เราจะคาดคะเนได้ว่า ปฏิกริยาใดมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด

7.9.2 ค่าคงตัวของสมดุลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เมื่อปฏิกริยาเคมีใด ๆ ดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งแล้ว ค่าคงตัวของสมดุลจะมีค่าคงที่เสมอ แม้ว่าภาวะสมดุลจะเปลี่ยนแปลงไป แต่ถ้าเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังการทดลองที่ 7.6 ค่าคงตัวของสมดุลจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ในการทดลองเกี่ยวกับการสลายตัวของกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ที่ 25 องศาเซลเซียส เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$$

เนื่องจากปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน เราอาจใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และนักเรียนคิดว่าค่าคงตัวของสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือไม่

จากการทดลองหาค่าคงตัวของสมดุลของปฏิกริยานี้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

ตาราง 7.4 แสดงค่า K ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของปฏิกริยา $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$K = \frac{[NO_2]^2}{[N_2O_4]}$
25	5.4×10^{-3}
35	1.6×10^{-2}
45	2.4×10^{-2}

จากตาราง 7.4 นักเรียนคงจะเห็นแล้วว่า ในปฏิกริยา $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$ ซึ่งเป็นปฏิกริยาดูดความร้อนนั้น ค่า K จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม

สำหรับปฏิกริยาการผลิตกาซอัมโมเนีย ซึ่งเป็นปฏิกริยาคายความร้อน

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

เราเคยใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์อภิปรายมาแล้วว่า ในระบบที่มีปฏิกริยาคายความร้อนนั้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิจะได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง ค่าคงตัวของสมดุลย่อมลดลงด้วย และความจริงก็เป็นเช่นนั้น ถ้าลดอุณหภูมิลงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และค่าคงตัวของสมดุลย่อมมากขึ้น

ฉะนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในปฏิกริยาใด ๆ ณ ภาวะสมดุล ย่อมทำให้ค่าคงตัวของสมดุลเปลี่ยนแปลง ค่าคงตัวของสมดุลอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกริยา นักเรียนจะต้องพิจารณาดูว่าปฏิกริยานั้น ๆ เป็นปฏิกริยาดูดความร้อนหรือคายความร้อน

เมื่อเป็นปฏิกริยาคายความร้อน การลดอุณหภูมิจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และค่าคงตัวของสมดุลจะมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ค่าคงตัวของสมดุลจะมีค่ามากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวของสมดุลเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้น เราอาจนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตสารบางชนิดในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตอัมโมเนียและซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ดังได้กล่าวมาแล้ว โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้พอเหมาะ เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้มากตามต้องการ อย่างไรก็ตามค่าคงตัวของสมดุลนั้น ช่วยในการพิจารณาว่าปฏิกริยาเคมีดำเนินไปได้แค่ไหน มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้บอกให้ทราบว่าปฏิกริยานั้นเกิดเร็วหรือช้าแต่อย่างไร

ภาคผนวก ข

คู่มือครูเรื่องสมดุลเคมี

สมดุลเคมี

<u>วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม</u> เมื่อเรียนจบบทนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. ทดลองให้เห็นจริงได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสารอาจผันกลับได้
2. หาข้อแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสารในระบบปิดและระบบเปิด
    ก. การเปลี่ยนแปลงสถานะ
    ข. การเกิดสารละลาย
    ค. การเกิดปฏิกริยาเคมี
3. ทดลองให้เห็นจริงว่า ระบบที่มีเกล็ดและไอของไอโอดีนอยู่ในภาวะสมดุลนั้น มีปริมาณของสารทั้งสองสถานะคงที่
4. ทดลองให้เห็นจริงว่าในระบบที่มีของแข็งปนอยู่กับสารละลายอิ่มตัวที่มีของแข็งนั้นเป็นตัวถูกละลาย ณ ภาวะสมดุล มีความเข้มข้นคงที่
5. เข้าใจและอธิบายความหมายของภาวะสมดุลของระบบใด ๆ
6. อธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงในภาวะสมดุลเป็นสมดุลไดนามิก
7. ทำการทดลองเพื่อแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อาจเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ไม่ว่าจะเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ไปข้างหน้าหรือจากการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับ
8. ทดสอบได้ว่า ณ ภาวะสมดุลของปฏิกริยาเคมีใด ๆ มีสารตั้งต้นปนอยู่กับผลิตภัณฑ์เสมอ
9. ใช้ข้อมูลซึ่งได้จากการทดลองเพื่อแสดงว่าเมื่อเริ่มเกิดปฏิกริยาเคมีนั้น
    ก. ปริมาณสารตั้งต้นลดลงด้วยอัตราสูงมาก
    ข. ปริมาณผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วยอัตราสูงมาก
    แล้วอัตราทั้งสองจะค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากัน ณ ภาวะสมดุล
10. ระบุได้ว่าระบบที่มีสมบัติคงที่อาจอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่อยู่ในภาวะสมดุลก็ได้
11. ทำการทดลองเพื่อแสดงว่าภาวะสมดุลอาจเปลี่ยนไปได้ เมื่อเปลี่ยน
    ก. ความเข้มข้นของสาร
    ข. อุณหภูมิ
    ค. ความดัน (ในกรณีของก๊าซ)
12. อธิบายหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์และนำมาใช้อธิบายผลการทดลอง ณ ภาวะสมดุลได้
13. นำหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์มาใช้ประโยชน์ในการผลิตสารบางชนิดในการอุตสาหกรรม เช่น อัมโมเนีย และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เป็นต้น

14. ใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายความสามารถในการละลายของกาซ และความดันที่จะเปลี่ยนแปลงไป
15. ใช้ข้อมูลจากระบบ $H_2 - I_2 - HI$ ณ ภาวะสมดุล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับของผลิตภัณฑ์
16. อธิบายความหมายของค่าคงตัวของสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ใช้ค่าคงตัวของสมดุลทำนายการดำเนินไปของปฏิกริยาเคมี
17. คำนวณหาค่าคงตัวของสมดุลของระบบใด ๆ จากข้อมูลหรือผลการทดลอง
18. บอกได้ว่า ค่าคงตัวของสมดุลเปลี่ยนแปลงได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป
19. ตั้งและเลือกสมมติฐานที่เหมาะสม สำหรับแก้ปัญหาพร้อมทั้งออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้

การให้ความรู้	การอภิปรายเกี่ยวกับการทดลองที่ได้เรียนมา	การอภิปรายความรู้ที่ได้เรียนมา	การสาธิตของครู	ลำดับแนวความคิดต่อเนื่องภายในบทเรียน สมดุลเคมี	นักเรียนทำการทดลอง	กิจกรรมของนักเรียน เขียนกราฟ	กิจกรรมของนักเรียน หาขอมูล	กิจกรรมของนักเรียน การคำนวณ	แสดงแผนภาพและรูป	โสตทัศนอุปกรณ	แบบฝึกหัด
	3	1		ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร การเกิดเป็นสารละลาย และการเกิดปฏิกริยาเคมีของระบบต่าง ๆ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่อาจผันกลับได้	2						
2		1		การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในภาชนะเปิดและภาชนะปิด และนำไปสู่ความเข้าใจเรื่องระบบเปิดกับระบบปิด							3
2		1		การเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบเปิดจะดำเนินไปจนกระทั่งสารตั้งต้นหมดไป ส่วนการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบปิด จะดำเนินไปจนถึงภาวะหนึ่งซึ่งไม่อาจสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อีกเลย							
	1	2		สารชนิดเดียวกันเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเปิดหรือระบบปิด อาจให้ผลแตกต่างกัน							

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางแสดงถึงลำดับของวิธีดำเนินการสอนในแต่ละบทเรียน

การใช้ความรู้	การอภิปรายเกี่ยวกับการทดลอง	การอภิปรายความรู้ที่ได้เรียนมา	การสาธิตของครู	ลำดับแนวความคิดต่อเนื่องภายในบทเรียน (ต่อ)	นักเรียนทำการทดลอง	กิจกรรมของนักเรียน: เขียนกราฟ	กิจกรรมของนักเรียน: หาขอมูล	กิจกรรมของนักเรียน: การคำนวณ	แสดงแนวภาพและรูป	โสตทัศนอุปกรณ์	แบบฝึกหัด
				สมบัติของสารเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล							
2		1		ศึกษาภาวะสมดุลระหว่างสถานะและอธิบายว่า ณ ภาวะสมดุลยังคงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอยู่เสมอ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ระบบจึงมีสมบัติคงที่					3		
3	2			ศึกษาภาวะสมดุลในระบบของสารละลายอิ่มตัว ณ อุณหภูมิหนึ่ง	1						
				ความหมายของสมดุลไดนามิก							
3	2			ศึกษาภาวะสมดุลในปฏิกริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(II)ออนกับซิลเวอร์ออน	1						4
2		1		ระบบที่มีสมบัติคงที่ทุกประการบางชนิดอาจไม่อยู่ในภาวะสมดุลก็ได้							

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางแสดงถึงลำดับของวิธีดำเนินการสอนในแต่ละบทเรียน

การให้ความรู้	การอภิปรายเกี่ยวกับการทดลอง	การอภิปรายความรู้ที่ได้เรียนมา	การสาธิตของครู	ลำดับแนวความคิดต่อเนื่องภายในบทเรียน (ต่อ)	นักเรียนทำการทดลอง	กิจกรรมของนักเรียน: เขียนกราฟ	กิจกรรมของนักเรียน: หาข้อมูล	กิจกรรมของนักเรียน: การคำนวณ	แสดงแผนภาพและรูป	โสตทัศนอุปกรณ์	แบบฝึกหัด
4	3	1		ทำการทดลองต่าง ๆ เพื่อแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อาจดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลได้โดยเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ไปข้างหน้าหรือจากการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับได้	2						
2		1		เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า และอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ ตั้งแต่ปฏิกริยาเริ่มดำเนินไปจนถึงภาวะสมดุล							
3	2			ศึกษาการเปลี่ยนภาวะสมดุลโดยทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสาร อุณหภูมิของระบบ และเปลี่ยนความดันในกรณีที่เป็นระบบของกาซ	1						4
2	1			หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์							
1				การใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ในการอุตสาหกรรม							2

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางแสดงถึงลำดับของวิธีดำเนินการสอนในแต่ละบทเรียน

การให้ความรู้	การอภิปรายเกี่ยวกับการทดลอง	การอภิปรายความรู้ที่ได้เรียนมา	การสาธิตของครู	ลำดับแนวความคิดต่อเนื่องภายในบทเรียน (ต่อ)	นักเรียนทำการทดลอง	กิจกรรมของนักเรียน: เขียนกราฟ	กิจกรรมของนักเรียน: หาข้อมูล	กิจกรรมของนักเรียน: การคำนวณ	แสดงแผนภาพและรูป	โสตทัศนอุปกรณ์	แบบฝึกหัด
2		1		การใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายความสามารถในการละลายของกาซเมื่อเปลี่ยนความดัน							
2		1		ศึกษาผลของตะตะไลส์ที่มีต่อภาวะสมดุล							
2	1			ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นของสารในระบบ $H_2 - I_2 - HI$ เพื่อนำไปสู่การหาค่าคงตัวของสมดุล				3			
1	3			ทำการทดลองหาค่าคงตัวของสมดุล และการแปลความหมายของค่าคงตัวของสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง	2						4
1				ประโยชน์ของค่าคงตัวของสมดุลที่อุณหภูมิหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น							

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางแสดงถึงลำดับของวิธีดำเนินการสอนในแต่ละบทเรียน

สรุปแนวความคิดที่สำคัญภายในบท

นี้ มีความมุ่งหมายที่จะให้นักเรียนได้ศึกษาปฏิกริยาเคมีอีกแง่หนึ่ง คือเรื่องสมดุลเคมี ซึ่งจะนำมาใช้พิจารณาเกี่ยวกับปริมาณของสารในการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ว่าปฏิกริยาเกิดมากน้อยเพียงใด ในบทเรียนจะเริ่มพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร การเกิดสารละลาย และการเกิดปฏิกริยาเคมี ว่าการเปลี่ยนแปลงใดเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ในระบบปิด ณ อุณหภูมิหนึ่ง แล้วระบบนั้นมีสมบัติคงที่ เรียกว่ามีสมดุลเกิดขึ้น และในภาวะสมดุลเช่นนี้ระบบมิได้หยุดนิ่ง โมเลกุลของสารมีการเคลื่อนที่ระหว่างสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง หรือเคลื่อนที่ระหว่างปฏิกริยาที่ไปข้างหน้ากับปฏิกริยาที่เกิดย้อนกลับอยู่ตลอดเวลา จึงจัดว่าสมดุลเคมีเป็นสมดุลไดนามิกทั้งสิ้น ต่อจากนั้นให้นักเรียนได้ศึกษาทิศทางการเข้าสู่ภาวะสมดุล การเปลี่ยนภาวะสมดุลโดยเปลี่ยนแฟคเตอร์บางประการ เช่น ความเข้มข้น ความดัน และอุณหภูมิ การใช้คะตะไลส์จะไม่ทำให้มีการเปลี่ยนภาวะสมดุล เพียงแต่ช่วยให้ระบบถึงภาวะสมดุลเร็วขึ้นเท่านั้น ได้พยายามสอดแทรกการประยุกต์เรื่องสมดุลเคมี โดยกล่าวถึงการใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ในอุตสาหกรรม และเมื่อศึกษาค่าคงตัวของสมดุล ก็กล่าวถึงประโยชน์ของค่าคงตัวของสมดุลด้วย

หลักของสมดุลเคมีนี้จะได้ใช้ประโยชน์ในการศึกษาเรื่องกรด–เบส และปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในบทต่อไปด้วย

ควรใช้เวลาสอนบทนี้ประมาณ 14 คาบ

7.1 การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

ครูนำอภิปรายโดยให้นักเรียนยกตัวอย่างประสบการณ์ในชีวิตประจำวันของการเปลี่ยนแปลงบางอย่าง ที่เมื่อเกิดขึ้นแล้วอาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แล้วให้ความรู้ว่า การเปลี่ยนแปลงเช่นนั้นเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

ชี้ให้นักเรียนเห็นว่า ในการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้นั้น จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง 2 อย่าง เกิดคู่กันแต่ในลักษณะตรงกันข้าม เช่น น้ำระเหยเป็นไอ และไอกลั่นตัวเป็นน้ำ เราเรียกการระเหยของน้ำว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และไอกลั่นตัวเป็นน้ำว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ การเรียกเช่นนี้เป็นการสมมติขึ้น จะเรียกกลับกันก็ได้ แล้วแต่ว่าเราจะตั้งต้นอธิบายการเปลี่ยนแปลงอย่างใดก่อน

การทดลองที่ 7.1 การเปลี่ยนแปลงของสาร

การทดลองนี้ มีความมุ่งหมายให้นักเรียนสังเกตดูว่า การเปลี่ยนแปลงของสารต่าง ๆ นั้น มีการเปลี่ยนแปลงใดบ้างที่ผันกลับได้

<u>วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม</u> เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. ยืนยันได้ว่าพลังงานความร้อนเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบที่มีการผันกลับได้
2. เข้าใจและอธิบายความหมายของการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าและการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ พร้อมทั้งยกตัวอย่างได้ด้วย
3. บอกได้ว่า การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ของสารต่าง ๆ อาจจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร การเกิดสารละลาย หรือการเกิดปฏิกริยาเคมีของสารบางชนิด

<u>เวลาที่ใช้</u> อภิปรายก่อนการทดลอง 10 นาที
ทดลอง 30 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 10 นาที <u>รวม 50 นาที</u>

<u>สารเคมีและอุปกรณ์</u>

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
<u>สารเคมี</u>		
1. ไอโอดีน	ประมาณ 5–6 เกล็ด	1g
2. เลด (II)ไอโอไดด์	ขนาดเท่าหัวไม้ขีด	4.5 g
3. โคบอลต์(II)คลอไรด์	–	3.5 g
4. โซเดียมคลอไรด์	–	15 g
5. น้ำกลั่น	10 cm^3	150 g
<u>อุปกรณ์</u>		
1. หลอดทดลองขนาดเล็ก	1 หลอด	15 หลอด
2. หลอดทดลองขนาดกลาง	1 หลอด	15 หลอด
3. ขวดรูปกรวยขนาด 100 cm^3	1 ใบ	15 ใบ
4. บีกเกอร์ขนาด 100 cm^3	1 ใบ	15 ใบ
5. ตะเกียงอัลกอฮอล์	1 ดวง	15 ดวง
6. กระจกนาฬิกา	1 แผ่น	15 แผ่น
7. กลองพลาสติกสำหรับบรรจุน้ำร้อน	1 ใบ	15 ใบ

การเตรียมล่วงหน้า

ถ้าไม่มีเลด(II)ไอโอไดด์อาจจะเตรียมขึ้นได้โดยผสมสารละลายเลด (II)ไนเตรต 0.1 โมล/ลิตร 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ 0.1 โมล/ลิตร 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทิ้งไว้สักครู่ให้ตะกอนตกให้สมบูรณ์ กรองตะกอนเลด(II)ไอโอไดด์สีเหลือง ล้างด้วยน้ำกลั่น นำมาบึ่งให้แห้ง เก็บใส่ขวดไว้ใช้ได้

ส่วนวิธีเตรียมสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์นั้น ทำดังนี้คือ ผสมผลึกโคบอลต์(II)คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 10 กรัม กับโซเดียมคลอไรด์ 21 กรัม ลงในน้ำกลั่น 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้สารละลายสีชมพู ซึ่งต่อไปเราจะเรียกว่า สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์

อภิปรายก่อนการทดลอง

ครูควรแนะนำให้นักเรียนสังเกตสภาวะขั้นต้นของสารไว้ก่อน แล้วทดลองตามวิธีทำในแบบเรียน สังเกตผลหลังจากดำเนินตามวิธีนั้น ๆ แล้วบันทึกผลลงในตาราง

ครูอาจแนะสิ่งที่ควรสังเกต เช่น สี การละลายของสาร เป็นต้น แต่ไม่จำเป็นจะต้องแนะนำว่าแต่ละตอนจะต้องสังเกตอะไรบ้าง

การที่ให้ทดลองซ้ำก็เพื่อนักเรียนจะได้สังเกตโดยรอบคอบและพิจารณาอีกครั้งหนึ่ง ก่อนสรุปผลการทดลองแต่ละตอน ซึ่งไม่เสียเวลามากนัก

ตัวอย่างผลการทดลอง

ระบบที่ทดลอง	ผลที่สังเกตได้	
	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	เมื่ออุณหภูมิลดลง
ไอโอดีน	ไอสารในขวดจะมีสีม่วงเข้มขึ้น ปริมาณผลึกในขวดลดลง	ไอสารในขวดมีสีจางลง ปริมาณผลึกมีมากขึ้น
เลด(II)ไอโอไดด์	ละลายได้มากขึ้น	มีการตกผลึกเกิดขึ้น
สารละลายโคบอลต์ (II)คลอไรด์	สีเปลี่ยนจากชมพูเป็นม่วง และเมื่อเดือดสารละลายมีสีน้ำเงิน	สีเปลี่ยนจากน้ำเงินเป็นม่วง และเมื่อเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง สารละลายมีสีชมพู

<u>อภิปรายหลังการทดลอง</u>

เมื่อทดลองเสร็จและรวบรวมผลการทดลองของนักเรียนแล้ว ครูนำอภิปรายไปสู่ข้อสรุปว่า การเปลี่ยนแปลงของสารต่าง ๆ เหล่านั้นมีพลังงานความร้อนเกี่ยวข้องด้วย และเมื่อเปลี่ยนแปลงแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ครูทบทวนเรื่องการระเหิดโดยยกตัวอย่างการทดลองตอนที่ 1 และนำอภิปรายต่อไปเกี่ยวกับชนิดของการเปลี่ยนแปลงในการทดลองนี้ ซึ่งสรุปได้ว่า

<u>ตอนที่ 1</u> การเปลี่ยนแปลงของไอโอดีน เป็นการเปลี่ยนสถานะจากไอโอดีนซึ่งเป็นของแข็งไปเป็นไอโอดีนในภาวะก๊าซเมื่อทำให้ร้อนขึ้น และไอโอดีนเปลี่ยนสถานะจากก๊าซเป็นของแข็งเมื่อทำให้เย็นลง

<u>ตอนที่ 2</u> การเปลี่ยนแปลงของเลด(II)ไอโอไดด์ เป็นการเกิดสารละลาย โดยที่เลด(II)ไอโอไดด์ซึ่งเป็นของแข็งละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อทำให้ร้อน และเมื่อเย็นลงจะตกผลึก

<u>ตอนที่ 3</u> การเปลี่ยนแปลงของสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์นั้น ครูอาจจะต้องบอกให้นักเรียนทราบว่าเป็นการเกิดปฏิกริยาเคมี เพราะมีการเปลี่ยนโครงสร้างจึงทำให้สีเปลี่ยน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงทั้งสามตอน เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับได้

พยายามให้นักเรียนบอกว่าอะไรเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และอะไรเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

ถ้าใส่ลูกเหม็นไว้ในขวดปิดจุก ลูกเหม็นจะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เหมือนกับทิ้งไว้ในตู้ แต่จะมีเกล็ดของสารบางส่วนไปเกาะตามส่วนบนของขวด ที่เป็นเช่นนี้เพราะลูกเหม็นระเหิด หรือเรียกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า ไอสารไม่อาจฟุ้งกระจายไปจากขวดได้ เมื่อถึงภาวะหนึ่งไอสารก็ตกผลึกกลับเป็นของแข็ง คือเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ จึงต่างกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตู้ ซึ่งเราไม่อาจสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ การใช้คำถามข้อนี้ ก็เพื่อจะนำนักเรียนให้เข้าใจเรื่องระบบเปิดและระบบปิดในตอนต่อไป

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.1 และการทดลองที่ 7.1 <u>ประมาณ 1 คาบ</u>

<u>ข้อแนะนำเพิ่มเติม</u>

1. เมื่อนำขวดไอโอดีนไปอุ่นในน้ำร้อนเกือบเดือด ต้องระวังอย่าให้ไอโอดีนหลอมเหลวได้ เพราะเราต้องการศึกษาเรื่องการระเหิด ถ้าสังเกตเห็นว่าไอโอดีนเริ่มหลอมเหลวให้ยกขวดออกเสียก่อน เติมน้ำเย็นลงในน้ำร้อนเพื่อลดอุณหภูมิ แล้วจึงนำขวดไอโอดีนมาอุ่นต่อไป <u>ระวังอย่าให้</u>

ไอของไอโอดีนฟุ้งกระจายออกจากขวด อย่าสูดดมไอนี้เป็นอันขาด และอย่าให้ไอโอดีนหกหรือกระเด็นถูกร่างกายด้วย

2. การเปลี่ยนสีของโคบอลต์(II)คลอไรด์นั้น จากการศึกษาโดยใช้รังสีเอกซ์ พบว่าโคบอลต์(II)อิออนที่มีสีชมพูมีโครงสร้างเป็นลูกเหลี่ยมแปดหน้า (Octahedral) ซึ่งมีสูตรเป็น $Co(H_2O)_6^{2+}$ แต่สำหรับโคบอลต์(II)อิออนที่มีสีน้ำเงินมีโครงสร้างแตกต่างกัน อาจจะมีน้ำหรือ Cl^- เกาะอยู่กับ Co^{2+} ยังไม่มีการยืนยันว่าอิออนสีน้ำเงินมีโครงสร้างอย่างใดแน่ อย่างไรก็ตามการเพิ่ม Cl^- โดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย ดังที่กล่าวไว้ในการเตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์นั้น คงมีส่วนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นเราจึงเขียนแสดงดังนี้

$$\text{โคบอลต์(II) อิออนสีชมพู} \underset{\text{ลดอุณหภูมิ}}{\overset{\text{เพิ่มอุณหภูมิ}}{\rightleftharpoons}} \text{โคบอลต์(II)อิออนสีน้ำเงิน}$$

7.2 ระบบเปิดระบบปิด

ในขั้นแรก ครูอาจจะใช้ตัวอย่าง "ระบบ" ในหัวข้อที่แล้วมาอภิปรายให้นักเรียนเข้าใจดีเสียก่อน จึงกล่าวถึงระบบเปิดและระบบปิดดังในแบบเรียน แล้วร่วมกันอภิปรายโดยใช้ผลการทดลองที่ 7.1 เพื่อสรุปให้ได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงสถานะของไอโอดีนเกิดขึ้นในภาชนะปิด ซึ่งเป็นระบบปิด เพราะมีแต่การถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม มิได้มีการถ่ายเทมวลของไอโอดีนเลย

การละลายของเลด(II)ไอโอไดด์เกิดขึ้นในภาชนะเปิด ซึ่งถือเป็นระบบปิด ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณีของไอโอดีน

ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์นั้นเกิดขึ้นในภาชนะเปิด ซึ่งถือว่าเป็นระบบปิดเช่นเดียวกันด้วย เพราะการอุ่นนั้นใช้ระยะเวลาสั้น ๆ จึงถือว่ามวลสารไม่หายไป คือน้ำไม่ระเหยไป

ไม่ว่าจะละลายเลด(II)ไอโอไดด์ในภาชนะเปิดหรือภาชนะปิดก็ตาม จะไม่มีการถ่ายเทมวลของเลด(II)ไอโอไดด์ในระบบกับสิ่งแวดล้อม ฉะนั้น จึงจัดเป็นระบบปิด การอภิปรายตอนนี้ควรจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที

เฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.1

1. ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ ได้แก่ข้อต่อไปนี้

ข. กระดิกใส่น้ำเดือด แล้วปิดฝาแน่น เพราะมีทั้งการกลายเป็นไอ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และเมื่อไอเย็นลงจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

ค. ขวดใส่น้ำเชื่อมข้น ๆ ปิดฝาสนิท และมียอดน้ำตาลนอนก้นขวด เพราะมีทั้งการละลาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และการตกผลึก ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

ระบบต่อไปนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

ก. ถ้วยแก้วใส่น้ำแข็งตั้งทิ้งไว้ในห้อง น้ำแข็งจะละลาย มีการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว

ง. การต้มน้ำในกาจนเดือด น้ำจะระเหยไปเรื่อย ๆ เป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว

จ. การนึ่งข้าวเหนียว ข้าวเหนียวจะสุก ไม่กลับเป็นข้าวเหนียวดิบอีกและน้ำจะกลายเป็นไอ โดยไม่มีการกลั่นตัวกลับเข้าสู่ระบบอีก เป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าอย่างเดียวเช่นกัน

2. ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ เช่น

ในขวดน้ำอัดลมที่ยังไม่เปิด มีการระเหยของน้ำอยู่ภายในขวด และกาซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนหนีออกไปอยู่ในที่ว่างเหนือระดับน้ำอัดลมในขวด เรียกว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า ในขณะเดียวกันจะมีไอน้ำกลั่นตัว และกาซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงไปในน้ำอัดลมอีก จัดได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

นอกจากนี้อาจยกตัวอย่างอื่นได้อีกเช่น สารละลายต่าง ๆ ที่อยู่ในขวดปิดสนิท ปรอทในบารอมิเตอร์ หรือในเทอร์โมมิเตอร์ และเมทธานอลในเทอร์โมมิเตอร์ มีการระเหยและการกลั่นตัวของของเหลวเกิดขึ้นตลอดเวลา เป็นต้น

3. การเปลี่ยนแปลงต่อไปนี้เกิดขึ้นในระบบเปิด

ก. หลอมแนพธะลีนในถ้วยกระเบื้องเคลือบ เพราะแนพธะลีนบางส่วนอาจเปลี่ยนสถานะเป็นไอฟุ้งกระจายออกไปจากระบบได้

ข. ใส่ชิ้นโลหะทองแดงลงในสารละลายกรดไนตริกเจือจาง เพราะได้กาซไนโตรเจนมอนอกไซด์ฟุ้งกระจายออกไปจากระบบได้

ง. ต้มน้ำในกาให้เดือด เพราะน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอฟุ้งกระจายออกไปจากระบบได้

จ. ตั้งบีกเกอร์ใส่น้ำปูนใสไว้บนโต๊ะหลาย ๆ วันจนมีฝ้าลอยอยู่บนผิวน้ำปูน เพราะกาซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศเข้าทำปฏิกริยากับน้ำปูนใสได้ นั่นคือมีมวลสารถายเทเข้าสู่ระบบ

ฉ. การหุงข้าว เพราะน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอฟุ้งกระจายออกไปจากระบบได้

ส่วน ค. นั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงในระบบปิด เพราะเมื่อผสมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในบีกเกอร์ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บรรจุอยู่นั้น ไม่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเลย

7.3 ภาวะสมดุล

ครูนำอภิปรายเกี่ยวกับระบบต่าง ๆ ที่นักเรียนได้ทำการทดลองมาแล้ว เพื่อให้นักเรียนตั้งข้อสังเกตว่า จะรู้ได้อย่างไรว่ามีสมดุลเกิดขึ้นในระบบใดระบบหนึ่ง

7.3.1 ภาวะสมดุลระหว่างสถานะ

ยกตัวอย่างการระเหิดของไอโอดีน และครูใช้คำถามเพื่อให้เข้าใจว่า เมื่อไอของไอโอดีนภายในขวดที่มีฝาปิดนั้นมีสีคงที่ แสดงว่าเกิดสมดุลขึ้นระหว่างไอโอดีนในภาวะก๊าซกับไอโอดีนในภาวะของแข็ง ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง จึงสรุปได้ว่า เมื่อระบบปิดมีสมบัติต่าง ๆ คงที่แล้ว เรากล่าวว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุล

ต่อจากนั้นครูอธิบายเพิ่มเติมดังในแบบเรียน

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.2 แบบฝึกหัดที่ 7.1 หัวข้อ 7.3 และ 7.3.1 รวมกันประมาณ 1 คาบ

7.3.2 ภาวะสมดุลในสารละลายอิ่มตัว

การอภิปรายและการสาธิตของครูในตอนนี้ ควรพยายามให้นักเรียนสรุปให้ได้ว่า ภาวะสมดุลในสารละลายอิ่มตัวมีความคล้ายคลึงกับภาวะสมดุลในการเปลี่ยนแปลงสถานะ

การทดลองที่ 7.2 ศึกษาการละลายของไอโอดีน (สาธิต)

การทดลองนี้มีความมุ่งหมายให้นักเรียนได้สังเกตและพิจารณาดูว่า เมื่อมีสารละลายอิ่มตัวของสารชนิดหนึ่ง จะเกิดภาวะสมดุลขึ้นได้หรือไม่

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. เตรียมสารละลายอิ่มตัวของสารได้

2. อธิบายความหมายของสารละลายอิ่มตัวและยกตัวอย่างได้
3. อธิบายว่ามีภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างสารชนิดหนึ่งกับสารละลายอิ่มตัวของสารนั้น

เวลาที่ใช้ อภิปรายก่อนการทดลอง 5 นาที
ทดลอง 10 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 15 นาที รวม 30 นาที

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
สารเคมี		
1. ไอโอดีนเกล็ด	3 – 4 เกล็ด	1 g
2. เอทธานอลผสมน้ำกลั่น	5 cm^3	75 cm^3
อุปกรณ์		
1. หลอดทดลองขนาดกลาง	1 หลอด	15 หลอด
2. จุกยางสำหรับปิดหลอดทดลองขนาดกลาง	1 อัน	15 อัน

การเตรียมล่วงหน้า

ผสมเอทธานอลกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร ใส่ขวดเตรียมไว้ เมื่อจะทดลองก็ตวงแบ่งไปใช้ได้ทันที

อภิปรายก่อนการทดลอง

ในการทดลองนี้ ครูชี้แจงให้นักเรียนทราบว่าควรเลือกไอโอดีนเกล็ดใหญ่ ๆ เพื่อจะได้มีปริมาณมากพอ มิฉะนั้นไอโอดีนจะละลายหมด ถ้าละลายหมดให้เติมเกล็ดไอโอดีนลงไปอีกจนได้สารละลายอิ่มตัว

ตัวอย่างผลการทดลอง

เมื่อใส่เกล็ดไอโอดีนลงในของผสมระหว่างเอทธานอลกับน้ำ จะพบว่าไอโอดีนละลายได้ และจะเห็นสีของสารละลายเป็นสีน้ำตาลปนเหลืองอ่อน ๆ เมื่อเขย่าสีจะค่อย ๆ เข้มขึ้นทุกที หลังจากตั้งทิ้งไว้สักครู่สีของสารละลายจะคงที่ และยังมีเกล็ดไอโอดีนเหลืออยู่ในสารละลายด้วย

อภิปรายหลังการทดลอง

ครูทบทวนความรู้เรื่องสารละลายอิ่มตัว แล้วอธิบายภาวะสมดุลในสารละลายอิ่มตัว ดังข้อความในแบบเรียนท้ายการทดลองที่ 7.2 และพยายามสรุปเกี่ยวกับสมบัติของระบบ ณ ภาวะสมดุล เพื่อให้ได้แนวความคิดว่าจะเกิดภาวะสมดุลได้ เมื่อ

1. เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบปิด
2. ระบบมีสมบัติคงที่
3. มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้เกิดขึ้นตลอดเวลา

ในแบบเรียนตอนนี้ มีคำว่าสมดุลไดนามิก ครูอาจอธิบายเพิ่มเติมว่า สมดุลต่าง ๆ ที่จะเรียนในวิชาเคมีเป็นสมดุลไดนามิกทั้งสิ้น

ให้นักเรียนช่วยกันตอบคำถามในแบบเรียน คำตอบคือ ณ ภาวะสมดุลของสารละลายอิ่มตัว ดังการทดลองนี้ การเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า คือการละลายของไอโอดีนในสารละลาย ส่วนการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับคือการตกผลึก และสมดุลเกิดขึ้นได้เพราะระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้เกิดขึ้นตลอดเวลา โดยมีอัตราการละลายเท่ากับอัตราการตกผลึก

ขอให้ย้ำว่าการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า และการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับนั้นเป็นการสมมติขึ้น ตามที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 7.1

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.3.2 และการทดลองที่ 7.2 ประมาณ 1 คาบ

7.3.3 ภาวะสมดุลในปฏิกริยาเคมี

ตอนนี้เป็นการให้ความรู้แก่นักเรียน โดยยกตัวอย่างปฏิกริยาเคมีระหว่างสารละลายไอร์ออน(II)ซัลเฟต กับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เขียนสมการอิออนิกแสดง ตั้งคำถามดังในแบบเรียน แนะให้นักเรียนคิดและอาจทำนายดูว่าจะมีอะไรเกิดขึ้น แล้วจึงทำการทดลอง

สำหรับการทดลองที่ 7.3 นี้ จะเน้นให้เห็นการใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูล สรุปผล ตั้งสมมติฐาน และทดลองเพื่อยืนยันสมมติฐานว่าถูกต้องหรือไม่

การทดลองที่ 7.3 ปฏิกริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(II)ไอออนกับซิลเวอร์ไอออน

การทดลองนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาปฏิกริยาเคมีบางชนิด ณ ภาวะสมดุล

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. อธิบายและแสดงวิธีทดสอบ $Fe^{2+}(aq)$ และ $Fe^{3+}(aq)$ ได้
2. ทดสอบได้ว่าปฏิกริยาเคมีระหว่าง $Fe^{2+}(aq)$ กับ $Ag^{+}(aq)$ เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้
3. อธิบายได้ว่าปฏิกริยาเคมีที่ผันกลับได้จะดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลเสมอ
4. ตั้งสมมติฐานและทำการทดสอบสมมติฐานได้

เวลาที่ใช้ อภิปรายก่อนการทดลอง 5 นาที
ทดลอง 40 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 10 นาที รวม 55 นาที

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
สารเคมี		
1. สารละลายต่าง ๆ คือ		
ก. ไอร์ออน(II)ซัลเฟต 0.1mol/l	15 cm^3	225 cm^3
ข. ไอร์ออน(III)ไนเตรต 0.1mol/l	15 cm^3	225 cm^3
ค. แอมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2mol/l	1 cm^3	15 cm^3
ง. โปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) 0.2mol/l	1 cm^3	15 cm^3
จ. ซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 mol/l	5 cm^3	75 cm^3
2. กระดาษกรอง	1 แผ่น	15 แผ่น

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
อุปกรณ์		
1. หลอดทดลองขนาดกลาง	4 หลอด	60 หลอด
2. หลอดทดลองขนาดเล็ก	1 หลอด	15 หลอด
3. กรวยกรอง	1 อัน	15 อัน
4. แท่งแก้ว	1 อัน	15 อัน
5. หลอดหยด	1 หลอด	15 หลอด

การเตรียมล่วงหน้า

เราอาจเตรียมสารละลายต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ชั่งไอร์ออน(II)ซัลเฟต 7.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำให้เป็นสารละลาย 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นตามต้องการ เก็บใส่ขวดกันแสง อย่าเตรียมสารละลายนี้ค้างไว้เกิน 1 สัปดาห์ ต้องใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นใหม่ ๆ ถ้าจะเตรียมค้างไว้ให้ใส่กรดซัลฟุริกอย่างข้นลงไป 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และตะปูขนาดเล็กสะอาด ๆ 1 ตัว ไว้ในขวดบรรจุสารละลายด้วยเพื่อป้องกันการออกซิไดส์

2. ชั่งไอร์ออน(III)ไนเตรต 12.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร (เก็บสารละลายนี้ไว้ใช้ในการทดลองที่ 7.6 ด้วย)

3. ชั่งอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.76 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร (เก็บสารละลายนี้ไว้ใช้ในการทดลองที่ 7.6 ด้วย)

4. ชั่งโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) 3.29 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

5. ชั่งซิลเวอร์ไนเตรต 2.16 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ถ้าต้องการสารละลายมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ ก็ให้เปลี่ยนแปลงปริมาณสารตามส่วน

อภิปรายก่อนการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งได้เป็น 3 ตอน

ตอนที่ 1 เป็นการทดสอบสมบัติของ $Fe^{2+}(aq)$ และ $Fe^{3+}(aq)$ เพื่อนำไปใช้ในตอนต่อไป ครูสรุปผลเสียก่อนแล้วจึงทดลองตอนที่ 2 และ 3 ต่อไป

ตอนที่ 2 ทดสอบอิออนที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาระหว่าง $Fe^{2+}(aq)$ กับ $Fe^{3+}(aq)$ ว่ามี $Fe^{3+}(aq)$ เกิดขึ้นหรือไม่ และยังมี $Fe^{2+}(aq)$ เหลืออยู่หรือไม่ โดยใช้วิธีทดสอบดังตอนที่ 1

ตอนที่ 3 ทดสอบปฏิกริยาย้อนกลับ โดยดูว่าถ้า $Fe^{3+}(aq)$ ทำปฏิกริยากับโลหะเงินได้จริง ในปฏิกริยาก็ควรจะมี $Fe^{2+}(aq)$ เกิด ซึ่งควรทดสอบได้ดังตอนที่ 1

ตัวอย่างผลการทดลอง

ตอนที่ 1

สารละลายที่ใช้	ผลที่สังเกตได้		สรุป
	$Fe^{2+}(aq)$	$Fe^{3+}(aq)$	
อัมโมเนียมไธโอไซยาเนต	สารละลายสีเหลือง	สารละลายสีแดงสด	$Fe^{3+}(aq)$ ทำปฏิกริยากับไธโอไซยาเนตอิออน ได้สารละลายสีแดงสด
โปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III)	สารละลายไม่มีสีและตะกอนสีน้ำเงิน	สารละลายและตะกอนสีเขียวปนน้ำตาล	$Fe^{2+}(aq)$ ทำปฏิกริยากับเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต(III) อิออน ได้ตะกอนสีน้ำเงิน

อภิปรายหลังการทดลองตอนที่ 1

รวบรวมผลการทดสอบของนักเรียน แล้วชี้ให้เห็นว่า

ถ้าจะทดสอบว่าสารละลายมี $Fe^{3+}(aq)$ อยู่ ให้เติมสารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต จะได้สารละลายสีแดงสด

ถ้าจะทดสอบว่ามีสารละลาย $Fe^{2+}(aq)$ อยู่ ให้เติมสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III) จะได้ตะกอนสีน้ำเงินเข้ม

ตัวอย่างผลการทดลอง

ตอนที่ 2

การทดลอง	การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้	อธิบายผลที่เกิดขึ้น
1. เมื่อผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตกับสารละลายไอร์ออน(II) ซัลเฟต	สารละลายจะขุ่นและมีสีเหลืองจาง ๆ ตอมาจะเห็นตะกอนสีเทาเงินเป็นมันวาวเกิดขึ้น	เกิดปฏิกริยาเคมีเพราะมีสารใหม่ คือ ตะกอนสีเทาเงินเกิดขึ้น
2. เมื่อทดสอบสารละลายใสจากข้อ 1 โดยใช้สารละลายอัมโมเนียมไธโอไซยาเนต	สารละลายสีแดงและมีตะกอนขาวเทา ๆ เกิดขึ้น	สารละลายใสจากข้อ 1 มี $Fe^{3+}(aq)$ ปน
3. เมื่อทดสอบสารละลายใสจากข้อ 1 โดยใช้โปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III)	สารละลายและตะกอนสีน้ำเงิน	สารละลายใสจากข้อ 1 มี $Fe^{2+}(aq)$ ปน

ตอนที่ 3

1. ตะกอนเงินละลายได้ในสารละลายไอร์ออน(III) ไนเตรต
2. เมื่อรินสารละลายจากข้อ 1 มา แล้วเติมสารละลายโปตัสเซียมเฮกซาไซยาโนเฟอร์เรต (III) จะได้ตะกอนสีน้ำเงิน

อภิปรายผลการทดลองตอนที่ 2 และตอนที่ 3

ครูนำอภิปรายเพื่อให้ได้ข้อสรุปทั้งตอนที่ 2 และตอนที่ 3 ดังนี้

ตอนที่ 2 เมื่อผสมสารละลายที่มี $Fe^{2+}(aq)$ และ $Ag^{+}(aq)$ เข้าด้วยกัน ได้สังเกตเห็นว่ามีตะกอนสีเทาเงิน (ซึ่งนักเรียนกรองไว้) คือโลหะเงิน และ $Fe^{3+}(aq)$ เกิดขึ้น แสดงว่ามีปฏิกริยาเคมีดังนี้

$$Fe^{2+}(aq) + Ag^{+}(aq) \longrightarrow Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$$

ในขณะเดียวกันก็ตรวจพบว่ามี $Fe^{2+}(aq)$ อยู่ในสารละลายด้วย จึงอาจจะคิดได้ว่าปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ ถ้าเป็นเช่นนี้ เมื่อเราเริ่มจากทางขวาบ้าง คือนำ $Fe^{3+}(aq)$ มาทำปฏิกริยากับตะกอนเงิน ควรจะมีปฏิกริยาเกิดขึ้น และให้ $Fe^{2+}(aq)$ และ $Ag^{+}(aq)$ เราอาจทดสอบสมมติฐานนี้โดยทำการทดลองในตอนที่ 3 ตะกอนสีเทาที่สังเกตได้ในข้อ 2 คือ ซิลเวอร์ไธโอไซยาเนต

ตอนที่ 3 ผลที่ได้แสดงว่ามีปฏิกริยาเคมีระหว่าง $Fe^{3+}(aq)$ กับตะกอนของโลหะเงิน และทดสอบได้ว่าสารละลายนั้นมี $Fe^{2+}(aq)$ เกิดขึ้น

จึงเป็นการยืนยันได้ว่าปฏิกริยาระหว่าง $Fe^{2+}(aq)$ กับ $Ag^{+}(aq)$ เป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ และเมื่อมีสมดุลเกิดขึ้น จึงตรวจพบว่าในสารละลายมีทั้งผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นปนกันอยู่

อธิบายวิธีการเขียนสมการแสดงปฏิกริยาย้อนกลับ ดังในแบบเรียน

ต่อจากนั้น ครูนำอภิปรายเพื่อให้ได้ข้อสรุปว่า ระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะ การเกิดสารละลายหรือการเกิดปฏิกริยาเคมี จะต้องเป็นระบบปิดที่มีสมบัติดังนี้

1. มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง หรือมีปฏิกริยาเกิดไปข้างหน้าและปฏิกริยาย้อนกลับเกิดขึ้นด้วยอัตราการเกิดที่เท่า ๆ กัน

2. สมบัติที่สังเกตได้ของระบบจะคงที่ เช่น สีของกาซ หรือสีของสารละลายมีความเข้มคงที่ แต่โมเลกุลต่าง ๆ ในระบบมิได้หยุดนิ่งมีการเปลี่ยนแปลงผันกลับได้เกิดขึ้นตลอดเวลา

ครูยกตัวอย่างระบบที่มีสมบัติคงที่ ว่าอาจจะอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่อยู่ในภาวะสมดุลก็ได้ ครูนำอภิปรายดังในแบบเรียน และเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเรื่องนี้ดีขึ้น ควรให้นักเรียนทำแบบฝึกหัดที่ 7.2 แล้วอภิปรายซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.3.3 และการทดลองที่ 7.3 ประมาณ 1 คาบ

เฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.2

1. นำถ้วยแก้วขนาดเดียวกันมา 2 ใบ รินน้ำใส่ไว้ใบละครึ่งแก้ว ใช้แผ่นกระจกปิดถ้วยใบหนึ่งไว้ ส่วนอีกใบหนึ่งไม่ต้องปิด ตั้งน้ำทั้งสองถ้วยไว้สัก 3 วัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างกัน คือ น้ำในถ้วยแก้วใบที่ไม่มีแผ่นกระจกปิดน้ำจะลดลงจากระดับเดิมมากกว่าใบที่มีกระจกปิด ที่เป็นดังนี้เพราะน้ำระเหยออกไปได้ตลอดเวลา ส่วนใบที่ปิดด้วยแผ่นกระจกนั้น น้ำระเหยได้เหมือนกัน แต่ไอน้ำออกไปจากถ้วยไม่ได้ ยังคงลอยอยู่เหนือระดับน้ำในถ้วยแก้ว และไอน้ำบางส่วนจะกลั่นตัวเป็นของเหลวอีก เมื่อการระเหยและการกลั่นตัวในขณะเดียวกันในถ้วยแก้วปิดนี้ถึงสมดุล และมีการหมุนเวียนกันดังกล่าว ระดับน้ำในถ้วยแก้วจึงคงที่ ไม่ลดลงอีก

2. ก. ระบบนี้อยู่ในภาวะสมดุล เพราะเป็นระบบปิด มีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้เกิดขึ้น กล่าวคือปรอทระเหยเป็นไอ และไอปรอทกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวอีก

ข. ระบบนี้เมื่อพิจารณาทันทีทันใด อาจถือว่าเป็นระบบปิด เพราะน้ำในหลอดคะปิลลารียังไม่ระเหยออกไป และเมื่อเลื่อนหลอดขึ้นลง ความสูงของระดับน้ำในหลอดเหนือผิวน้ำในภาชนะจะคงที่ จึงอาจกล่าวได้ว่าระบบนี้อยู่ในภาวะสมดุล

ค. ระบบนี้ไม่อยู่ในภาวะสมดุล เพราะเป็นระบบเปิด มีการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า คือการระเหยเกิดขึ้นอย่างเดียวเท่านั้น ระดับน้ำลงที่นั้นเนื่องจากความตึงผิวของน้ำในหลอดคะปิลลารี ทำให้น้ำไหลเข้ามาแทนที่ส่วนที่ระเหยออกไป

ง. ระบบนี้ไม่อยู่ในภาวะสมดุล เป็นระบบเปิดที่มีสมบัติคงที่ คือมีปริมาณน้ำลงที่

จ. ระบบนี้ไม่อยู่ในภาวะสมดุล เป็นระบบเปิดที่มีสมบัติคงที่ คือหอนไม้ลอยน้ำตลอดเวลา โดยมีส่วนที่โผล่พ้นน้ำและส่วนที่จมน้ำลงที่

ฉ. ระบบนี้ไม่อยู่ในภาวะสมดุล ร่างกายคนเป็นระบบเปิดที่มีสมบัติคงที่ คือมีอุณหภูมิคงที่

7.4 การดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบ

ครูนำอภิปรายโดยยกตัวอย่างปฏิกริยาเคมีในการทดลองที่ 7.3 ว่าเกิดสมดุลค่อนข้างเร็ว แต่บางระบบอาจจะช้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกริยาตามที่เคยเรียนในบทที่ 6 แล้วนำเข้าสู่เรื่องว่าระบบดังกล่าวหรือระบบอื่น ๆ จะมีการดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลได้อย่างไร จะเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า หรือจากการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ ให้นักเรียนศึกษาจากการทดลองต่อไป

การทดลองที่ 7.4 การดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุลของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ

ต้องการให้นักเรียนศึกษาว่าระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับได้นั้น จะเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ไม่ว่าจะเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงที่ไปข้างหน้าหรือเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. อธิบายความหมายพร้อมกับยกตัวอย่างระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลได้
2. บอกได้ว่า การเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับได้ อาจเข้าสู่ภาวะสมดุล ไม่ว่าจะเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ไปข้างหน้า หรือการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

เวลาที่ใช้ อภิปรายก่อนการทดลอง 5 นาที
ทดลอง 30 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 15 นาที รวม 50 นาที

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
สารเคมี		
1. สารละลายต่าง ๆ คือ		
ก. ไอโอดีนในเอทธานอล	10 หยด	10 cm^3
ข. โคบอลต์(II)คลอไรด์	2 – 3 cm^3	30 – 40 cm^3
ค. โปตัสเซียมไอโอไดด์ 0.1 mol/l	10 cm^3	150 cm^3
2. เฮกเซน	10 cm^3	150 cm^3
อุปกรณ์		
1. หลอดทดลองขนาดกลาง	2 หลอด	30 หลอด
2. หลอดทดลองขนาดเล็ก	2 หลอด	30 หลอด

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
อุปกรณ์		
3. บีกเกอร์ขนาด 50 ซม.^{3}	1 ใบ	15 ใบ
4. จุกยางหรือจุกคอร์กปิดหลอดทดลองขนาดกลาง	2 อัน	30 อัน
5. ตะเกียงอัลกอฮอล์	1 ดวง	15 ดวง
6. ขาตั้ง	1 อัน	15 อัน
7. ตะแกรงลวด	1 อัน	15 อัน
8. ที่กันลม	1 อัน	15 อัน

การเตรียมล่วงหน้า

เตรียมสารละลายต่าง ๆ ดังนี้

1. เตรียมสารละลายไอโอดีนอิ่มตัวในเอทธานอลใส่ขวดสีเข้ม ๆ ไว้ประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อไปเราจะเรียกสารละลายนี้ว่าสารละลายไอโอดีนตลอดการทดลองที่ 7.4

2. เตรียมสารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์ดังการทดลองที่ 7.1

3. ชั่งโปตัสเซียมไอโอไดด์ 4.98 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร

อภิปรายก่อนการทดลอง

ตอนที่ 1 ชี้ให้นักเรียนเห็นว่าระบบที่ทดลองเป็นสารละลายของไอโอดีนในตัวทำละลายต่างกัน สารละลายมีสีเข้มมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายนั้น

ตอนที่ 2 นักเรียนได้เคยทดลองและทราบมาแล้วว่า การเปลี่ยนสีของสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เป็นการเกิดปฏิกริยาเคมี แต่ในตอนนี้ ต้องการจะศึกษาว่าปฏิกริยานี้เข้าสู่ภาวะสมดุลในทิศทางใด

ตัวอย่างผลการทดลอง

หลอดที่ 1

1. สารละลายไอโอดีนในเฮกเซนมีสีบานเย็น

2. สารละลายไอโอดีนในโปตัสเซียมไอโอไดด์มีสีน้ำตาลปนเหลือง

3. หลังจากเติมสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ลงในหลอดที่ 1 แล้วเขย่าแรง ๆ จะเห็นว่าสารละลายแยกออกเป็นสองชั้น ชั้นบนมีสีชมพู ส่วนชั้นล่างมีสีน้ำตาลปนเหลือง สารละลายในแต่ละชั้นมีสีคงที่

4. หลังจากเติมเฮกเซนลงในหลอดที่ 2 แล้วเขย่าแรง ๆ จะเห็นว่าสารละลายแยกออกเป็นสองชั้น ให้ผลเหมือนหลอดที่ 1 ทั้งลักษณะและความเข้มของสีในแต่ละชั้น

หลอดที่ 2

1. สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์จะมีสีชมพู ซึ่งอุณหภูมิห้อง

2. เมื่ออุ่นสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์ให้ร้อนจนเกือบเดือด สีของสารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากชมพูเป็นม่วงและน้ำเงินตามลำดับ

3. เมื่อจุ่มสารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์ทั้งสองหลอดลงในน้ำอุ่นนั้น สารละลายในหลอดที่ 1 จะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากชมพูเป็นม่วง ส่วนหลอดที่ 2 นั้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วง ในที่สุดสารละลายในหลอดทั้งสองจะมีสีม่วงเหมือนกัน

อภิปรายหลังการทดลอง

รวบรวมผลการทดลองของนักเรียนทุกกลุ่ม แล้วร่วมกันสรุปผลซึ่งควรจะสรุปได้ว่า

หลอดที่ 1

1. สีของสารละลายไอโอดีนในเฮกเซน ต่างกับสีของสารละลายไอโอดีนในโปตัสเซียมไอโอไดด์

2. เมื่อเติมสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ลงไปในสารละลายไอโอดีนในเฮกเซน จะเห็นสารละลายแยกเป็นสองชั้น ชั้นบนมีสีชมพูเหมือนสารละลายไอโอดีนในเฮกเซน ชั้นล่างมีสีน้ำตาลปนเหลืองเหมือนสารละลายไอโอดีนในโปตัสเซียมไอโอไดด์ แสดงว่าไอโอดีนในสารละลายเฮกเซนบางส่วนเคลื่อนที่ไปอยู่ในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ อาจเรียกว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า เขียนแสดงได้ดังนี้

$$I_2(Hexane) \longrightarrow I(KI(aq))$$

3. เมื่อทดลองกลับกันในหลอดทดลองอีกหลอดหนึ่ง โดยเติมเฮกเซนลงในสารละลายไอโอดีนในโปตัสเซียมไอโอไดด์ ก็จะเห็นสารละลายแยกเป็นสองชั้น ให้ผลเหมือนกับการทดลองตอนแรกทั้งลักษณะและความเข้มของสีแต่ละชั้น แสดงว่าไอโอดีนในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์บางส่วนเคลื่อนที่กลับมาอยู่ในเฮกเซนได้ อาจเรียกว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ เขียนแสดงได้ดังนี้

$$I_2(KI(aq)) \longrightarrow I_2(Hexane)$$

เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงที่ันกลับได้เกิดขึ้นในระบบปิด แล้วระบบมีสมบัติคงที่คือสารละลายแยกตัวออกเป็นสองชั้น และมีความเข้มของสีในแต่ละชั้นเหมือนกันทุกประการ ระบบนี้จึงอยู่ในภาวะสมดุล และจากผลการทดลองแสดงว่าทิศทางที่ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้น จะเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า หรือการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ ก็ได้ผลเช่นองเดียวกัน เขียนแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

$$I_2(Hexane) \rightleftharpoons I_2(KI(aq))$$

ตอนที่ 2

ในการที่สารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์สีชมพู เปลี่ยนไปเป็นสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์สีน้ำเงิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า

ในการที่สารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์สีน้ำเงิน เปลี่ยนมาเป็นสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์สีชมพูเมื่อลดอุณหภูมิ ถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ

เมื่อนำสารละลายที่มีสีต่างกันทั้งสองหลอด มาวุ่มในภาชนะที่มีน้ำอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเกี่ยวกัน แล้วได้สีม่วงเหมือนกันทั้งสองหลอด แสดงว่าระบบทั้งสองมีสมบัติคงที่ คือมีสีม่วงเหมือนกัน ระบบได้เข้าอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว และทิศทางที่เข้าสู่ภาวะสมดุลเริ่มต้นได้ทั้งจากการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า หรือจากการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับก็ได้เช่นเดียวกัน เขียนแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์สีชมพู $\rightleftharpoons$ สารละลายโคบอลต์(II)คลอไรด์สีน้ำเงิน

เมื่อจบการอภิปรายแล้วเป็นการให้ความรู้แก่นักเรียน ตามข้อความในแบบเรียนท้ายการทดลองที่ 7.4

ควรใช้เวลาเฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.2 สอนหัวข้อ 7.4 และการทดลองที่ 7.4 ประมาณ 1 คาบ

ข้อแนะนำเพิ่มเติม

อย่าลืมเก็บสารละลายจากทุกกลุ่มรวบรวมใส่ขวดสีเข้มปิดจุกเก็บไว้ใช้ในการทดลองที่ 7.7 ด้วย

7.5 อัตราการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าและอัตราการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ

อภิปรายเกี่ยวกับปฏิกริยาระหว่าง Fe^{3+} กับ Ag^{+} ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ โดยโยงกับเรื่องอัตราการเกิดปฏิกริยา เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกริยากับเวลาของปฏิกริยานี้ และอธิบายความหมายของกราฟ ดังข้อความในแบบเรียน และควรอธิบายเพิ่มเติมให้เข้าใจว่ากราฟที่เขียนนั้น แสดงแต่เพียงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกริยาเท่านั้น ไม่ได้เขียนให้ถูกสัดส่วนตามความเป็นจริง

ดังนั้น ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกริยากับเวลาของการระเหิดของไอโอดีน และการละลายของเลด(II)ไอโอไดด์ ก็จะได้กราฟรูปร่างเช่นเดียวกันกับรูป 7.2

7.6 การเปลี่ยนภาวะสมดุล

ควรทบทวนแฟคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยาเคมี เช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือความดัน แล้วนำไปสู่เรื่องภาวะสมดุลว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแฟคเตอร์เหล่านี้บ้าง จะมีผลอย่างไรต่อภาวะสมดุลของระบบเพื่อนำเข้าสู่การทดลอง

การทดลองที่ 7.5 การเปลี่ยนความเข้มข้นกับภาวะสมดุล

การทดลองนี้ต้องการให้นักเรียนศึกษาว่า การเปลี่ยนความเข้มข้นของอิออนชนิดใดชนิดหนึ่งในระบบที่อยู่ ณ ภาวะสมดุลแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงแล้วมีสมดุลใหม่เกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ปริมาณของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่ภาวะสมดุลใหม่ก็ย่อมจะเปลี่ยนแปลงด้วย

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. ทำการทดลองเพื่อเปลี่ยนภาวะสมดุลของระบบโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นได้
2. อธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในระบบ ณ ภาวะสมดุล ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงแล้วระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

เวลาที่ใช้ อภิปรายก่อนการทดลอง 5 นาที
ทดลอง 15 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 15 นาที รวม 35 นาที

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
สารเคมี		
1. สารละลายต่าง ๆ คือ		
ก. ไอร์ออน(III)ไนเตรต 0.2 mol/l	5 – 6 หยด	ใช้สารละลายที่ได้เตรียมไว้แล้วจากการทดลองที่ 7.3
ข. อัมโมเนียมไธโอไซยาเนต 0.2 mol/l	5 – 6 หยด	
ค. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.2 mol/l	2 – 3 หยด	5 cm^3
2. น้ำกลั่น	10 cm^3	150 cm^3
อุปกรณ์		
1. หลอดทดลองขนาดกลาง	4 หลอด	60 หลอด
2. บีกเกอร์ขนาด 50 cm^3	1 ใบ	15 ใบ
3. หลอดหยด	1 หลอด	15 หลอด

การเตรียมล่วงหน้า

ใช้สารละลายไอร์ออน(III)ไนเตรตและอัมโมเนียมไธโอไซยาเนตที่ได้เตรียมไว้แล้วจากการทดลองที่ 7.3

เตรียมสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.2 โมล/ลิตร โดยใช้ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.28 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

อภิปรายก่อนการทดลอง

การทดลองตอนนี้ ไม่จำเป็นต้องแนะนำเพิ่มเติมจากที่ได้บอกไว้แล้วในแบบเรียน

ตัวอย่างผลการทดลอง

หลอดที่	สารละลายที่เติมลงไป	ผลที่สังเกตได้
1	–	สารละลายสีส้ม
2	ไอร์ออน(III)ไนเตรต	สารละลายมีสีส้มเข้มขึ้น และสีจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก
3	แอมโมเนียมไธโอไซยาเนต	สารละลายมีสีส้มเข้มขึ้นและสีจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก
4	ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต	ได้ตะกอนสีขาว และสารละลายมีสีจางจนไม่มีสี

อภิปรายหลังการทดลอง

รวบรวมผลการทดลองของนักเรียนเพื่อนำมาสรุปผล ซึ่งควรจะสรุปได้ว่า

1. สารละลายที่มี Fe^{3+} เมื่อทำปฏิกริยากับสารละลายแอมโมเนียมไธโอไซยาเนตจะมีสีแดง แต่ถ้าสารละลายเจือจางจะแลเห็นเป็นสีส้ม และสีจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าสารละลายนี้เข้าอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว ดังนั้น เมื่อนำสารละลายนี้มาแบ่งใส่หลอดที่ 2, 3 และ 4 สารละลายก็ยังอยู่ในภาวะสมดุลเช่นเดิม เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq)$$

2. สารละลายในหลอดที่ 2 มีสีส้มเข้มขึ้น เพราะได้เติม $Fe^{3+}(aq)$ ลงไป การเพิ่มปริมาณของ $Fe^{3+}(aq)$ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นชนิดหนึ่ง ทำให้ $Fe^{3+}(aq)$ เข้าทำปฏิกริยากับไธโอไซยาเนต

มีมากขึ้น จึงมีผลิตภัณฑ์เกิดมาก ทำให้สารละลายมีสีส้มเข้มขึ้นหรือสีแดง และในที่สุดสีจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก แสดงว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น ปฏิกริยาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าอีก แล้วระบบเข้าอยู่ในภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

3. การเตรียมไธโอไซยาเนตอิออนลงในหลอดที่ 3 อธิบายได้ทำนองเดียวกับข้อ 2

4. สารละลายในหลอดที่ 4 ได้ตะกอนสีขาวและสารละลายมีสีจางลงจนไม่มีสี เพราะสารละลายฟอสเฟตที่เติมลงไปทำปฏิกริยากับ $Fe^{3+}(aq)$ ได้ตะกอนขาว ซึ่งเท่ากับไปลดปริมาณของ $Fe^{3+}(aq)$ ของสารตั้งต้นให้เหลือน้อยลง แล้วสารละลายมีสีจางลง $FeSCN^{2+}(aq)$ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จะสลายตัวเกิดปฏิกริยาย้อนกลับให้ $Fe^{3+}(aq)$ มาอีก แสดงว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

กล่าวโดยทั่วไปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในปฏิกริยาเคมี ที่อยู่ในภาวะสมดุล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นอีก โดยที่ความเข้มข้นของทั้งผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงไป จนในที่สุดระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ครูนำอภิปรายต่อไปว่า ถ้าเปลี่ยนแฟกเตอร์อื่นบ้าง เช่น เปลี่ยนความดัน หรืออุณหภูมิ จะมีผลอย่างไรต่อภาวะสมดุล แล้วจึงให้นักเรียนทำการทดลองต่อไป

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.5, 7.6 และการทดลองที่ 7.5 ประมาณ 1 คาบ

<u>การทดลองที่ 7.6</u> การเปลี่ยนความดันหรืออุณหภูมิกับภาวะสมดุล (สาธิต)

การทดลองนี้ต้องการให้นักเรียนศึกษาระบบที่เป็นก๊าซเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลแล้ว เพราะความดันมีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อก๊าซ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิ ก็จะมีการเปลี่ยนภาวะสมดุลใหม่ ทำนองเดียวกับการทดลองที่ 7.5

<u>วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม</u> เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. ทำการทดลองเพื่อเปลี่ยนภาวะสมดุลของก๊าซได้โดยการเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิ
2. บอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดันและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบของก๊าซ ณ ภาวะสมดุลมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

<u>เวลาที่ใช้</u> อภิปรายก่อนการทดลอง 5 นาที
ทดลอง 30 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 20 นาที <u>รวม 55 นาที</u>

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อการสาธิต 1 ครั้ง
สารเคมี	
1. ทองแดง	1 g
2. กรดไนตริกเข้มข้น	5 cm^3
อุปกรณ์	
1. หลอดทดลองที่มีแขนข้าง พร้อมทั้งจุกยางเจาะ 1 รู เสียบหลอดหยดอย่างยาว	1 หลอด
2. กระบอกฉีดยาพลาสติกขนาด 20 cm^3	3 – 4 อัน
3. บีกเกอร์ขนาด 50 cm^3	3 ใบ
4. จุกยางปิดหลอดทดลองขนาดเล็ก	2 อัน
5. หลอดทดลองขนาดเล็ก	2 หลอด
6. ตะเกียงอัลกอฮอล์	1 ดวง

อภิปรายก่อนการทดลอง

ครูชี้แจงให้นักเรียนทราบว่า ในระบบที่จะทดลองนี้ มีกาซไนโตรเจนไดออกไซด์สีน้ำตาลแดงปนอยู่กับกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ซึ่งไม่มีสี เราจะใช้สีของกาซบอกความเข้มข้นของกาซไนโตรเจนไดออกไซด์ และทิศทางของการเปลี่ยนแปลงหรือภาวะสมดุลของระบบ

ตัวอย่างผลการทดลอง

ตอนที่ 1 กาซที่เตรียมได้มีสีน้ำตาลแดง เมื่อกดหลอดฉีดยาลงไป ๗ ตำแหน่งหนึ่งเพื่อดันกาซในกระบอกฉีดยา กาซจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แล้วชั่วขณะหนึ่งสีจะค่อยจางลงเล็กน้อย ในที่สุดกาซมีสีน้ำตาลเข้มน้อยลงกว่าตอนที่กดหลอดฉีดยาตอนแรก แต่ถ้าเลื่อนหลอดฉีดยาขึ้นมา สีของกาซจะค่อย ๆ จางลง ๆ เมื่อทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งโดยกดหลอดฉีดยาลงไปอีกตำแหน่งหนึ่งซึ่งต่างกับตอน

แรก ก็จะได้ผลทำนองเดียวกันแต่ความเข้มของสีไม่เท่ากัน

ตอนที่ 2 เมื่อนำหลอดทดลองที่บรรจุกาซสีน้ำตาลแดง 2 หลอด ๆ หนึ่งจุ่มในอ่างน้ำแข็ง จะแลเห็นกาซในหลอดมีสีจางลงจนไม่มีสี ส่วนอีกหลอดหนึ่งที่จุ่มในอ่างน้ำร้อน กาซในหลอดจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น เมื่อสลับที่กัน หลอดที่มีสีน้ำตาลก็จะไม่มีสี หลอดที่ไม่มีสีก็จะมีสีน้ำตาล แล้วนำกาซทั้งสองหลอดมาจุ่มลงในอ่างน้ำเย็น ณ อุณหภูมิห้อง ได้สังเกตเห็นว่ากาซในหลอดที่ไม่มีสีจะค่อย ๆ มีสีเหลือง ๆ แล้วเข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาลแดง ส่วนหลอดที่มีสีน้ำตาลเข้มจะมีสีจางลงเล็กน้อย แล้วในที่สุด สีของกาซในหลอดทั้งสองจะมีสีน้ำตาล ที่มีความเข้มเหมือนกัน

อภิปรายหลังการทดลอง

ครูรวบรวมผลการทดลองแล้วอภิปรายเพื่อให้สรุปได้ว่า

ตอนที่ 1

1. การเพิ่มความดันให้กับระบบที่เป็นกาซ ก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของกาซทุกชนิดในระบบ และถ้ามีการลดความดันของระบบที่เป็นกาซ ความเข้มข้นของกาซทุกชนิดในระบบก็ลดลงด้วย (ใช้คำอธิบายตามแบบเรียนท้ายการทดลองที่ 7.6)

2. การเพิ่มความดันทำให้กาซมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แล้วค่อยจางลงเล็กน้อยชั่วขณะหนึ่ง และในที่สุดกาซจะมีสีน้ำตาลเข้มน้อยลงกว่าที่กดหลอดฉีดยาตอนแรก อธิบายได้โดยพิจารณาดูจากระบบที่สมดุลของกาซ ดังนี้

$$2NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4$$

สีน้ำตาล ไม่มีสี

เมื่อเพิ่มความดันให้แก่ระบบกาซมีสีน้ำตาลเข้ม แสดงว่าปฏิกริยาเกิดย้อนกลับได้กาซไนโตรเจนไดออกไซด์สีน้ำตาลปริมาณมากขึ้น แล้วระบบปรับตัวเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า มีกาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ซึ่งไม่มีสีเกิดขึ้นปริมาณหนึ่ง จึงทำให้แลเห็นกาซในระบบนี้มีสีน้ำตาลเข้มน้อยลง แล้วก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป แสดงว่ามีสมดุลใหม่เกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

3. การทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนตำแหน่งที่กดหลอดฉีดยาใหม่ เป็นการยืนยันผลที่สังเกตได้ตามข้อสรุปข้อ 2

4. การเปลี่ยนแปลงความดันในระบบของกาซ ณ ภาวะสมดุล มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

ตอนที่ 2

1. กาซมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม เพราะปฏิกริยาเกิดย้อนกลับมากขึ้น คือได้กาซไนโตรเจนไดออกไซด์ แต่กาซมีสีจางลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เพราะปฏิกริยาเกิดไปข้างหน้ามากขึ้น คือได้กาซไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์เกิดมาก

2. มีการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมา แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่นั่นกลับได้ และไม่ว่าจะตั้งต้นปฏิกริยาจากการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าหรือย้อนกลับก็ทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้

3. เมื่อนำกาซทั้งสองหลอดมาทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน กาซจะมีสีน้ำตาลที่มีความเข้มเหมือนกัน แสดงว่าระบบเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

4. เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของกาซภายในระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจนระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่

ควรใช้เวลาสำหรับการทดลองที่ 7.6 ประมาณ 1 คาบ

เฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.3

1. ก. การเติมกาซไฮโดรเจนลงไปในระบบนี้เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของกาซไฮโดรเจน จะทำให้เกิดปฏิกริยาย้อนกลับได้มากขึ้น คือไฮโดรเจนจะทำปฏิกริยากับเอทธิลีนเกิดเป็นอีเธนได้มากขึ้น ฉะนั้น ณ ภาวะสมดุลใหม่ ความเข้มข้นของอีเธนจึงมากกว่าเดิม ปริมาณของเอทธิลีนน้อยลงกว่าเดิมและไฮโดรเจนมากกว่าเดิม

ข. การเติมกาซไนโตรเจนมอนอกไซด์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของกาซชนิดนี้ จะทำให้เกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ฉะนั้น ณ ภาวะสมดุลใหม่ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์และไนโตรเจนมอนอกไซด์ จึงมากกว่าเดิม ส่วนออกซิเจนลดลงกว่าเดิม

ค. การเติมสารละลายเลด(II)ไนเตรตเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเลด(II)อิออน จะทำให้เกิดปฏิกริยาย้อนกลับได้มากขึ้น ฉะนั้น ณ ภาวะสมดุลใหม่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนจึงมากกว่าเดิม และมีตะกอนเลด(II)ซัลเฟตมากกว่าเดิมด้วย ไฮโดรเจนซัลเฟตอิออนน้อยลงกว่าเดิมและเลด(II)อิออนมากกว่าเดิม

2. ก. ถ้าเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงไปในสารละลายโปตัสเซียมโครเมต จะได้ว่าสารละลายเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นส้ม ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้เกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้นนั่นเอง

ข. ถ้านำสารละลายดังกล่าวมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป คาดได้ว่าสารละลายเปลี่ยนสีจากส้มเป็นเหลือง ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอิออนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเหตุให้เกิดปฏิกริยาย้อนกลับได้มากขึ้น

7.7 หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์

นำผลการทดลองที่ 7.5 และ 7.6 มาสรุปอีกครั้งหนึ่ง เพื่อนำไปสู่หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ โดยยกตัวอย่างปฏิกริยาในการทดลองดังกล่าวไว้ในแบบเรียนในหัวข้อ 7.6 แล้วพยายามสรุปให้เห็นว่า

ก. การเปลี่ยนความเข้มข้นมีผลต่อภาวะสมดุล กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารในระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล ระบบจะพยายามปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดปริมาณของสารที่เติมลงไป หรือลดความเข้มข้นของสารในระบบที่อยู่ ณ ภาวะสมดุล ระบบจึงพยายามปรับตัวในทิศทางที่จะเพิ่มปริมาณของสารที่เราลดจำนวนลง แล้วระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ ซึ่งต่างจากสมดุลเดิม

ข. การเปลี่ยนความกันมีผลต่อภาวะสมดุลของระบบที่เป็นกาซ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดันให้แก่กาซในระบบที่อยู่ ณ ภาวะสมดุล ระบบจะพยายามปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดความดัน (หรือความเข้มข้นรวมของกาซทุกชนิดในระบบ) แล้วระบบจะปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง ทำนองเดียวกับการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย

ค. การเปลี่ยนอุณหภูมิมีผลต่อภาวะสมดุลของระบบ กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ระบบจะพยายามปรับตัวให้เข้าสู่สมดุลใหม่ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่จะดูดความร้อน แล้วเข้าสู่สมดุลใหม่ ทำนองเดียวกันเมื่อมีการลดอุณหภูมิ ระบบจะพยายามปรับตัวโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่จะคายความร้อน แล้วเข้าสู่สมดุลใหม่

เมื่อนักเรียนเข้าใจข้อสรุปดีแล้ว จึงแถลงหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ ดังในแบบเรียน

นำหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ มาใช้อธิบายถึงการละลายของกาซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำอัดลม ดังในแบบเรียน

ตอบคำถามในบทเรียนเกี่ยวกับการละลายของกาซ เมื่อลดความดันของกาซนั้นที่อยู่เหนือน้ำจะทำให้กาซนั้นละลายได้น้อยลงเสมอไป ไม่ว่าจะเป็นกาซใด ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกับการเพิ่มความดันของกาซนั้นที่อยู่เหนือน้ำ ตามที่อธิบายในแบบเรียน

การเปลี่ยนความดันในระบบ $CO(g) + NO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + NO(g)$ ไม่มีผลต่อภาวะสมดุล ถ้าอุณหภูมิคงที่ เพราะการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ ไม่ได้ทำให้ปริมาตรของก๊าซที่เข้าทำปฏิกริยากันและที่ได้จากปฏิกริยาเปลี่ยนไป ในที่นี้ดูจากจำนวนโมลแทนปริมาณก็ได้

ควรใช้เวลาเฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.3 และสอนหัวข้อ 7.7 ประมาณ 1 คาบ

7.7.1 การใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ในการอุตสาหกรรม

ครูให้ความรู้แก่นักเรียนเกี่ยวกับอุตสาหกรรมบางชนิด ซึ่งใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ โดยใช้การผลิตกาซอัมโมเนียเป็นตัวอย่าง ครูนำอภิปรายดังในแบบเรียน

สำหรับการเตรียมกาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ใช้หลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายได้ว่า เนื่องจากปฏิกริยาการเตรียมกาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เป็นปฏิกริยาคายความร้อน ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้กาซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เปอร์เซนต์สูง จะต้องลดอุณหภูมิของระบบ และเพิ่มความดัน ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกับการผลิตกาซอัมโมเนียทุกประการ แต่ภาวะที่เหมาะสมในอุตสาหกรรม คือ อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 330 บรรยากาศและใช้วาเนเดียมเพนตะ-ออกไซด์ (V_2O_5) หรือปลาตินัม.ปั่นคะตะไลส์

7.7.2 คะตะไลส์กับภาวะสมดุล

ครูทบทวนเรื่องคะตะไลส์กับอัตราการเกิดปฏิกริยาเคมีที่เคยเรียนมาแล้วในบทที่ 6 แล้วอภิปรายเกี่ยวกับภาวะสมดุลดังในแบบเรียน และพยายามสรุปให้เห็นว่า การใช้คะตะไลส์ไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุล เป็นแต่ช่วยให้ระบบถึงภาวะสมดุลเร็วขึ้น

ควรใช้เวลาสอนหัวข้อ 7.7.1 และ 7.7.2 ประมาณ 1 คาบ

เฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.4

1. ในปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระบบปิด

$$2CO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2CO_2(g) \qquad \Delta H = -565 \text{ kJ/mol.}$$

2 โมล 1 โมล 2 โมล

เมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ก็เท่ากับเพิ่มความเข้มข้นของกาซทุกชนิด ตามหลักเลอ ชาเตอลิเยร์ทำนายได้ว่า จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ระบบพยายามปรับตัวไปในทิศทางเพื่อลดความเข้มข้นหรือลดจำนวนโมลของกาซทั้งหมดในระบบ คือการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น

2. ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบในข้อ 1 ระบบจะพยายามปรับตัวเพื่อลดปริมาณความร้อน โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ดูดความร้อนนั้นไปใช้ แล้วจึงเข้าสู่สมดุลใหม่ในปฏิกริยานี้ การเกิดปฏิกริยาย้อนกลับเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะทำให้ในระบบมีกาซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ส่วนกาซคาร์บอนมอนอกไซด์และกาซออกซิเจนเกิดมากขึ้น

3. ในการผลิตกาซไนโตรเจนมอนอกไซด์จากปฏิกริยาระหว่างกาซไนโตรเจนกับออกซิเจนนั้น ถ้าต้องการให้เกิดผลิตภัณฑ์มากควรจะเลือกสภาวะดังนี้

ก. โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เนื่องจากสมการของปฏิกริยานี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเป็นการดูดความร้อน ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ระบบจะพยายามปรับตัวไปในทางที่จะลดอุณหภูมิ โดยการรวมตัวเป็นกาซไนโตรเจนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น

ข. การเปลี่ยนความดันไม่มีผลต่อภาวะสมดุลของระบบ เพราะจำนวนโมลรวมของสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์เท่ากัน

ค. อาจใช้ตะไลส์ช่วยเร่งให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น

7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุล

ครูนำการทดลองที่ 7.5 มาอภิปรายอีก เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ณ ภาวะสมดุล และนำข้อมูลที่มีผู้ทดลองในระบบ $H_2 - I_2$ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์นี้ด้วย และนำไปสู่ค่าคงตัวของสมดุลในที่สุด ต่อไปให้ร่วมกันอภิปรายเพื่อหาค่าคงตัวของสมดุลในปฏิกริยาต่าง ๆ ที่นักเรียนได้เรียนมาแล้ว ตลอดจนอธิบายตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงตัวของสมดุลดังในแบบเรียน พยายามสรุปให้ได้ว่า

1. ในปฏิกริยาทั่ว ๆ ไป $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

เมื่อ a, b, c, d เป็นจำนวนโมลของสารที่เข้าทำปฏิกริยาตามลำดับ

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

2. จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในภาวะสมดุล เราแปลความหมายของค่า K ได้ว่า ถ้าค่าคงตัวของสมดุล(K) มากกว่าหนึ่ง แสดงว่า ณ ภาวะสมดุล ปฏิกริยาเกิดไปทางขวามาก จะมีปริมาณของผลิตภัณฑ์เกิดมาก มีสารตั้งต้นเหลืออยู่น้อย

ถ้าค่าคงตัวของสมดุล (K) น้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่า ณ ภาวะสมดุล ปฏิกริยาไม่เกิดไปทางขวามากนัก ปริมาณของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อย และมีสารตั้งต้นเหลืออยู่มาก

3. ในระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลแล้ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง จนในที่สุดระบบเข้าสู่สมดุลใหม่นั้น ค่าคงตัวของสมดุล (K) ย่อมเท่ากันทุกครั้งไป

เมื่อนักเรียนได้เรียนรู้วิธีหาค่าคงตัวของสมดุลแล้ว จะได้ทำการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการหาค่าคงตัวของสมดุลของระบบนั้นบ้าง

ควรใช้เวลาเฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.4 และสอนหัวข้อ 7.8 ประมาณ 1 คาบ

การทดลองที่ 7.7 การหาค่าคงตัวของสมดุลของไอโอดีนในตัวทำละลายที่ไม่ผสมกัน

เราต้องการให้นักเรียนได้ฝึกหัดหาค่าคงตัวของสมดุลจากปฏิกริยาที่ได้ทดลองจริง ๆ เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการหาค่าคงตัวของสมดุลตามที่ได้เรียนมาแล้ว

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เมื่อทำการทดลองนี้แล้ว นักเรียนควรจะสามารถ

1. หาค่าคงตัวของสมดุลของสารละลายไอโอดีนในเฮกเซน และในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ได้
2. บอกได้ว่าปริมาณของไอโอดีนหาได้โดยใช้สารละลายไธโอซัลเฟต

เวลาที่ใช้ อภิปรายก่อนการทดลอง 10 นาที
ทดลอง 20 นาที
อภิปรายหลังการทดลอง 20 นาที รวม 50 นาที

สารเคมีและอุปกรณ์

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
สารเคมี 1. สารละลายไอโอดีนจากการทดลองที่ 7.4	-	-

รายการ	ต่อ 1 กลุ่ม (3 คน)	ต่อ 15 กลุ่ม (45 คน)
<u>สารเคมี</u>		
2. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 mol/l	20 cm^3	300 cm^3
3. น้ำแป้ง 1%		
<u>อุปกรณ์</u>		
1. หลอดทดลองขนาดกลาง	2 หลอด	30 หลอด
2. หลอดหยดอย่างยาว	1 หลอด	15 หลอด
3. หลอดหยดอย่างสั้น	1 หลอด	15 หลอด

<u>การเตรียมล่วงหน้า</u>

เตรียมสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 1.58 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำเป็นสารละลาย 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าต้องการปริมาณมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ให้เปลี่ยนแปลงปริมาณสารตามส่วน

เตรียมสารละลายน้ำแป้ง 1% โดยใช้แป้งมัน 1 กรัม ละลายน้ำข้น ๆ แล้วเติมลงในน้ำเดือด ให้บริมาตรทั้งหมดประมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

<u>อภิปรายก่อนการทดลอง</u>

1. ชี้แจงให้นักเรียนทราบว่า จะนำผลการทดลองที่ 7.4 ซึ่งเป็นสารละลายที่อยู่ในภาวะสมดุลของไอโอดีนในเฮกเซน (สารละลายชั้นบน) และไอโอดีนในโปตัสเซียมไอโอไดด์ (สารละลายชั้นล่าง) มาทดลอง

2. เนื่องจากในการทดลองนี้มีการวิเคราะห์หาบริมาตรของไอโอดีนอย่างเคร่า ๆ เป็นครั้งแรก ดังนั้น การวัดบริมาตรสารละลายไอโอดีนให้ทำอย่างละเอียดเท่าที่จะทำได้ และการวัดบริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้หลอดหยดจะต้องระวังให้ขนาดของหยดเท่า ๆ กัน เพราะเราต้องการจะวัดปริมาณของสาร ควรใช้หลอดหยดขนาดเท่า ๆ กันทุกกลุ่ม

3. เมื่อคำนวณค่า K ได้แล้ว นำไปเฉลี่ย หรือนำจำนวนหยดของโซเดียมไธโอซัลเฟตในแต่ละขั้นเฉลี่ยเสียก่อน แล้วนำไปหาค่า K ก็ได้

ตัวอย่างผลการทดลอง

สารละลายไอโอดีน		สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (หยด)
หลอดที่	ชั้นของสารละลาย	
1	ชั้นบน	9
	ชั้นล่าง	89
2	ชั้นบน	11
	ชั้นล่าง	93

การหาค่า K จากผลการทดลอง เมื่อใช้สารละลายไอโอดีนหลอดที่ 1

$$K = \frac{[I_2(KI(aq))]}{[I_2(Hexane)]}$$

แทนค่า $= \frac{89}{9}$

$= 9.89$

เมื่อใช้สารละลายไอโอดีนหลอดที่ 2

แทนค่า K $= \frac{93}{11}$

$= 8.54$

เฉลี่ย $= \frac{9.89 + 8.54}{2}$

K $= 9.215$

อภิปรายหลังการทดลอง

ครูรวบรวมข้อมูล คือ K จากนักเรียนทุกกลุ่ม แล้วช่วยกันอภิปรายสาเหตุที่ทำให้แต่ละกลุ่มได้ค่า K ต่างกัน ซึ่งคงจะช่วยกันสรุปได้ว่า เป็นข้อผิดพลาดเนื่องจากการทดลอง ในการวัดบริมาตรของสารละลายที่นำมาทดลองและการวัดบริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้หลอดหยดขนาดต่าง ๆ กัน ขนาดของหยดอาจไม่เท่ากัน หรือถ้าใช้หลอดหยดขนาดเดียวกัน การบีบหลอดหยดไม่สม่ำเสมอก็ทำให้ขนาดหรือบริมาตรของสารต่างกันก็ได้

ต่อไปให้นักเรียนพิจารณาค่า K ที่ได้ เพื่อจะใช้บอกว่าไอโอดีนละลายในตัวทำละลายชนิดใดได้ดีกว่ากัน ซึ่งครูควรจะแนะนำให้นักเรียนพิจารณาผลการทดลองที่ได้ทำมาแล้ว และดูจากค่า K ในที่สุด ควรจะสรุปได้ว่า ไอโอดีนละลายในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ได้ดีกว่าละลายในเฮกเซน

ควรใช้เวลาสำหรับการทดลองที่ 7.2 ประมาณ 1 คาบ

ข้อแนะนำเพิ่มเติม

นอกจากนี้ ครูอาจอธิบายเหตุผลเพิ่มเติมแก่นักเรียนว่า การที่เราใช้จำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตคำนวณหาค่า K แทนความเข้มข้นของไอโอดีน เพราะ

โซเดียมไธโอซัลเฟตทำปฏิกริยาพอดีกับไอโอดีน เขียนสมการแสดงปฏิกริยาได้ดังนี้

$$2S_2O_3^{2-}(aq) + I_2(aq) \longrightarrow S_4O_6^{2-}(aq) + 2I^-(aq)$$

2 โมล 1 โมล 1 โมล 2 โมล

สมมติว่า ใช้สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 โมล/ลิตร จำนวน X ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำปฏิกริยาพอดีกับสารละลายไอโอดีนส่วนที่ละลายในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์

$$\text{ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้} = \frac{0.1 \times X}{1000} \text{ โมล}$$

$$= X \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการจะเห็นว่า จำนวนโมลของไธโอซัลเฟตที่ใช้เป็นสองเท่าของจำนวนโมลของไอโอดีน

$$\text{ปริมาณไอโอดีนในสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์} = \frac{X \times 10^{-4}}{2} \text{ โมล}$$

เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 โมล/ลิตร จำนวน y ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำปฏิกริยาพอดีกับสารละลายไอโอดีนส่วนที่ละลายในเฮกเซนนั้น

$$\text{ปริมาณโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้} = \frac{0.1 \times y}{1000} \text{ โมล}$$

$$= y \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกัน คือจำนวนโมลของไธโอซัลเฟตที่ใช้เป็นสองเท่าของจำนวนโมลของไอโอดีน

$$\text{ปริมาณไอโอดีนในเฮกเซน} = \frac{y \times 10^{-4}}{2} \text{ โมล}$$

นำมาหาค่าคงตัวของสมดุลได้ดังนี้

$$K = \frac{[I_2(KI(aq))]}{[I_2(Hexane)]}$$

$$K = \frac{\frac{x}{2} \times 10^{-4}}{\frac{y}{2} \times 10^{-4}}$$

$$= \frac{x}{y}$$

ถ้าสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต x ลูกบาศก์เซนติเมตรมีปริมาณ a หยด และสารละลายนี้ y ลูกบาศก์เซนติเมตร b หยด จึงอาจใช้จำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตคำนวณหาค่า K ได้

เฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.5

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสารตั้งต้นที่ภาวะสมดุลหาได้ดังนี้

ก. $$K = \frac{[CO_2]\,[NO]}{[CO]\,[NO_2]}$$

ข. $K = \frac{[Cu^{2+}]}{[Ag^{+}]^2}$

ค. $K = [Pb^{2+}]\ [I^{-}]^2$

ครูอาจย้ำถึงค่าของ $[Cu]$, $[Ag]$ ซึ่งเป็นโลหะของแข็ง ถือว่าความเข้มข้นคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และได้คิดรวมอยู่ในค่าคงตัวของสมดุลแล้ว สำหรับ $[PbI_2]$ เป็นตะกอน ซึ่งเป็นของแข็ง ก็คิดทำนองเดียวกัน

2. $K = \frac{[PCl_3]\ [Cl_2]}{[PCl_5]}$

แทนค่าในสูตร $K = \frac{0.2 \times 0.3}{1.5}$

$= 0.04 = 4.0 \times 10^{-2}$

3. ถ้า $K = 0.04$

$[PCl_5] = 0.2$ โมล/ลิตร

$[PCl_3] = 0.01$ โมล/ลิตร

แทนค่าในสูตรดังข้อ 2

$0.04 = \frac{0.01\ [Cl_2]}{0.2}$

ฉะนั้น $[Cl_2] = \frac{0.04 \times 0.2}{0.01}$

$= 0.8$ โมล/ลิตร

4. $K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3}$

แทนค่าในสูตร $1.85 = \frac{(0.1)^2}{[N_2]\ (0.2)^3}$

ฉะนั้น $[N_2]$ $\frac{1.85 \times (0.2)^3}{(0.1)^2} = 0.148$ โมล/ลิตร

7.9 ประโยชน์ของค่าคงตัวของสมดุล

มีความมุ่งหมายที่จะให้นักเรียนพิจารณาค่าคงตัวสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์

นำหัวข้อ 7.9.1 และ 7.9.2 มาอภิปราย ดังรายละเอียดในแบบเรียน แล้วพยายามสรุปให้ได้ว่า

1. การเปลี่ยนแปลงแฟคเตอร์ใด ๆ ของระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล เป็นต้นว่า ความเข้มข้น หรือความดันให้แก่ระบบ ไม่ทำให้ค่าคงตัวของสมดุลเปลี่ยนแปลง ถ้าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยน ค่าคงตัวของสมดุลย่อมเปลี่ยนแปลงด้วย

2. ถ้าหราบค่า K จากหนังสือรวมข้อมูล อาจใช้ทำนายปฏิกริยานั้น ๆ ได้ ถ้า K มีค่ามาก (ตั้งแต่ 1 ขึ้นไป) แสดงว่ามีผลิตภัณฑ์เกิดมาก มีสารตั้งต้นเหลืออยู่น้อย ถ้า K มีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 1) แสดงว่าผลิตภัณฑ์เกิดน้อย และมีสารตั้งต้นเหลืออยู่มาก

3. ค่าคงตัวของสมดุลนั้นใช้เป็นเครื่องวัดว่าปฏิกริยาเคมีดำเนินไปได้แค่ไหน มีผลิตภัณฑ์เกิดมากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้บอกให้หราบว่าปฏิกริยานั้นเกิดเร็วหรือช้าแค่อย่างใด

ควรใช้เวลาเฉลยแบบฝึกหัดที่ 7.5 และสอนหัวข้อ 7.9, 7.9.1 และ 7.9.2 ประมาณ 1 คาบ