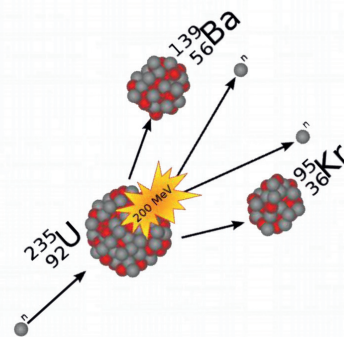
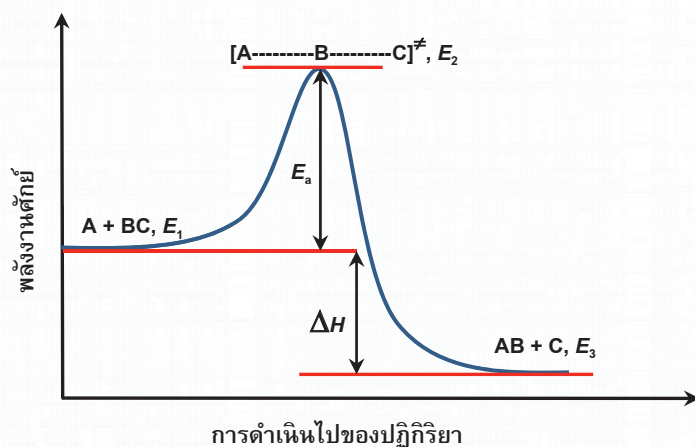
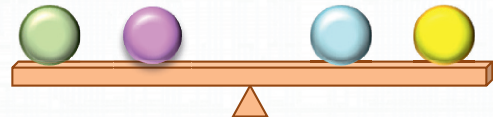
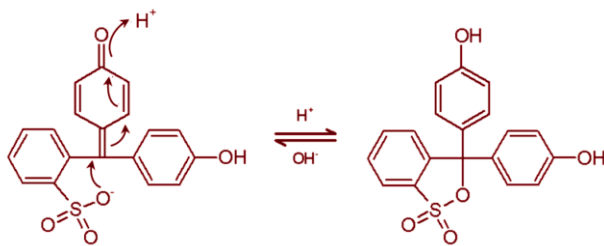
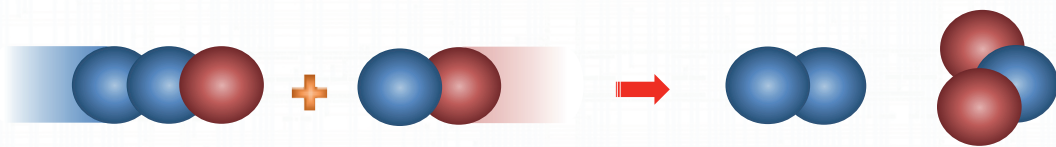




เคมี เล่ม 3

(หลักสูตร สอวน. ค่าย 1 วิชาเคมี)



โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน.

เคมี เล่ม 3

(หลักสูตร สอน. ค่าย 1 วิชาเคมี)



**มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา
ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา
กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ (สอวน.)**

ความเป็นมา

ประเทศไทยส่งนักเรียนเข้าแข่งขันคณิตศาสตร์โอลิมปิกระหว่างประเทศครั้งแรกในปี พ.ศ. 2532 ที่ประเทศเยอรมนี โดยความร่วมมือระหว่างสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และสมาคมคณิตศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา (พระยศในขณะนั้น) ได้พระราชทานเงินส่วนพระองค์ จำนวนหนึ่งเพื่อเป็นค่าใช้จ่าย

การคัดเลือกนักเรียนเพื่อไปแข่งขันคณิตศาสตร์โอลิมปิกระหว่างประเทศ ครั้งที่ 30 สมาคมคณิตศาสตร์แห่งประเทศไทยฯ ได้จัดคณาจารย์มหาวิทยาลัยจำนวนหนึ่งมาช่วยฝึกอบรมรวมเป็นเวลาประมาณสองเดือน เพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้เนื้อหาเพิ่มเติมครอบคลุมหลักสูตรที่จะใช้แข่งขัน ซึ่งอยู่ในระดับชั้นปีที่ 1-2 ของมหาวิทยาลัย จากผลสำเร็จในปีแรก ทำให้รัฐบาลเห็นความสำคัญจึงได้จัดสรรงบประมาณให้กับโครงการนี้ผ่านสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา สมทบกับเงินพระราชทานเป็นรายปีจากสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ เพื่อสนับสนุนการส่งนักเรียนไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศ 5 สาขา จนถึงปัจจุบันรวม 14 ปี นักเรียนไทยได้ทำชื่อเสียงได้เหรียญทองรวม 17 เหรียญ เหรียญเงิน 53 เหรียญ เหรียญทองแดง 93 เหรียญ และเกียรติคุณประกาศอีก 35 ราย รวมทั้งสิ้น 198 รางวัล จากจำนวนนักเรียนที่ส่งไปแข่งขัน 276 คน (72%)

อย่างไรก็ตาม จากการที่ประเทศไทยดำเนินการจัดส่งนักเรียนเข้าร่วมการแข่งขันคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ โอลิมปิกระหว่างประเทศ ตั้งแต่ พ.ศ.2532 จนถึงปัจจุบัน ทำให้เห็นว่ามาตรฐานการศึกษาด้านคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ของไทยยังต่ำกว่ามาตรฐานสากล การเตรียมตัวของนักเรียนยังใช้เวลาน้อยเกินไป

เพื่อให้การส่งเสริมและสนับสนุน โครงการจัดส่งผู้แทนประเทศไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สมเด็จพระเจ้า พี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ จึงมีพระดำริให้จัดตั้งมูลนิธิ สอวน. และได้รับอนุมัติจากกระทรวงมหาดไทยเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2542 โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ

วัตถุประสงค์

1. ส่งเสริมให้นักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายทั่วประเทศที่มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มีโอกาสได้รับการพัฒนาศักยภาพทางด้านคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ตามความถนัดทั้งด้านทฤษฎีและทักษะด้านปฏิบัติ ให้สามารถคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ โดยจัดให้มีศูนย์อบรมทั่วประเทศเป็นการเพิ่มเวลาฝึกอบรม เพื่อช่วยให้นักเรียนมีความพร้อมที่จะเข้ารับการคัดเลือกไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศให้ได้ผลดียิ่งขึ้น ตามพระดำริของสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ องค์ประธานมูลนิธิ สอวน.
2. เพื่อนำประสบการณ์ที่ได้จากการแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมาพัฒนามาตรฐานคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษาของไทยให้สูงขึ้นเทียบเท่าระดับสากล

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน.

มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ (สอวน.) ได้ร่วมมือกับคณาจารย์มหาวิทยาลัยของรัฐ 20 แห่ง และกระทรวงศึกษาธิการ ดำเนินการจัดตั้งศูนย์ สอวน. ในภูมิภาค 12 ศูนย์ และในกรุงเทพฯ 1 ศูนย์ (5 โรงเรียน) เพื่อพัฒนาศักยภาพทางปัญญาของนักเรียนที่มีความพร้อมในด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์จากทั่วประเทศ เพื่อให้นักเรียนได้มีความรู้ความสามารถเทียบเท่ามาตรฐานสากล และพร้อมที่จะสอบคัดเลือกเป็นผู้แทนประเทศไทยไปร่วมการแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศในสาขาวิชาต่างๆ ได้ และเพื่อขยายผลจากประสบการณ์ที่ได้เข้าแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศมาพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยให้สูงขึ้นเทียบเท่าสากล

ในการอบรมนักเรียนของศูนย์ สอวน. มูลนิธิ สอวน. ได้พิจารณาเห็นว่าตำราที่มีความสมบูรณ์ของเนื้อหาตามหลักสูตรของ สอวน. จะช่วยพัฒนาศักยภาพของนักเรียนในศูนย์สอวน. ให้สูงขึ้นได้ นอกจากนั้นตำราเรียนในวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่มีความสมบูรณ์ถูกต้องยังขาดแคลน นักเรียนและครูสามารถนำตำราที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้เป็นหนังสืออ้างอิงประกอบการเรียนการสอนได้อีกด้วย มูลนิธิ สอวน. จึงได้มี “โครงการจัดทำตำราส่งเสริมพัฒนาศักยภาพของนักเรียนด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์” ขึ้น เพื่อผลิตตำราคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ชีววิทยาและฟิสิกส์ที่มีเนื้อหาหลักสูตรตามมาตรฐานสากล โดยมีวัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นที่ระลึกในมหามงคลสมัยที่สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ ทรงเจริญพระชนมายุ 80 พรรษา ซึ่งพระองค์ทรงมีพระมหากรุณาธิคุณต่อโครงการจัดส่งผู้แทนประเทศไทยไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศและทรงสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อพัฒนามาตรฐานการศึกษาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยอย่างหาที่สุดมิได้

2. เพื่อผลิตหนังสือคณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ เคมี ชีววิทยาและฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายถึงระดับชั้นปีที่ 1 ของคณะวิทยาศาสตร์ในมหาวิทยาลัยให้มีคุณภาพเทียบเท่าสากล เรียบเรียงโดยคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยของรัฐที่มีประสบการณ์สูง และที่มีส่วนรวมในการฝึกอบรมนักเรียนในค่าย สอวน. ค่าย สสวท. และควบคุมนักเรียนไปแข่งขันโอลิมปิกวิชาการระหว่างประเทศ เนื้อหาในหนังสือเน้นกระบวนการคิดแบบวิทยาศาสตร์ เพื่อฝึกฝนให้นักเรียนสามารถคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่ซับซ้อนทั้งในเชิงทฤษฎีและประยุกต์ได้โดยจัดพิมพ์บนกระดาษอาร์ตอย่างดีและมีภาพสีประกอบคำบรรยาย

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของมูลนิธิ สอวน. มีเป้าหมายในการผลิตตำราคณิตศาสตร์ รวม 5 เล่ม คอมพิวเตอร์ 3 เล่ม เคมี 4 เล่ม ชีววิทยา 5 เล่ม และฟิสิกส์ 3 เล่ม โดยหนังสือชุดแรกจะนำขึ้นทูลเกล้าถวายในวันที่ 6 มิถุนายน 2547 ซึ่งเป็นวันประชุมสามัญประจำปี พ.ศ. 2547 ของคณะกรรมการบริหาร และสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ เสด็จเป็นองค์ประธานที่ประชุม ส่วนที่เหลือคาดว่าจะจัดพิมพ์ให้แล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2547 นี้ นอกจากนั้นคณะกรรมการโครงการผลิตตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. มีเป้าหมายจะผลิตตำราที่มีคุณภาพสูงนี้ในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โดยคณาจารย์จากมหาวิทยาลัย เพื่อวางรากฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์พื้นฐานและเพื่อสร้างแรงบันดาลใจและความสนใจทางด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์แก่เยาวชนอีกด้วย หากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านงบประมาณจากภาครัฐและเอกชน

คณะจัดทำหนังสือคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์หวังว่าโครงการตำราคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ของมูลนิธิ สอวน. จะมีส่วนร่วมในการปฏิรูปการเรียนรู้และยกระดับมาตรฐานวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ของไทยให้เทียบเท่ากับระดับสากลเพื่อสนองพระดำริของสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์

คณะกรรมการโครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน.

คณะกรรมการที่ปรึกษา

- | | |
|---|------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ นายแพทย์จรัส สุวรรณเวลา | รองประธานมูลนิธิ สอวน. |
| 2. ศาสตราจารย์ศักดิ์ ศิริพันธ์ | กรรมการมูลนิธิฯ (อดีต) |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.กำจัด มงคลกุล | กรรมการมูลนิธิฯ |
| 4. รองศาสตราจารย์เย็นใจ สมวิเชียร | กรรมการมูลนิธิฯ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร. คุณหญิงสมณทา พรหมบุญ | กรรมการมูลนิธิฯ |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. ชัยณูสร สวัสดิวัฒน์ | กรรมการมูลนิธิฯ |

คณะกรรมการดำเนินงานตำราเคมี

- | | |
|--|---------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.พนิตี ระตะนากุล | ประธานคณะกรรมการ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.นันทมน คุณแสง | กรรมการ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา แต้มบรรจง | กรรมการ |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรรณี รัตนชัยสิทธิ์ | กรรมการ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา จุฬนุวัฒนกุล | กรรมการ |
| 6. ดร.บัณฑิต ลีละศาสตร์ | กรรมการ |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ อาร์คีโรปัญญา | กรรมการและเลขานุการ |

คณะผู้เขียนตำราเคมี เล่ม 3

- | | |
|--|---|
| 1. ดร.บัณฑิต ลีละศาสตร์ | Ph.D. (Biochimie Microbienne),
Université de Nancy I, France |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะ จิตมณี | Ph.D. (Analytical Chemistry)
Okayama University, Japan |
| 3. ดร.เอกพงษ์ สุวัฒนมาลา | Doutor (Quimica) Universidade do Porto, Portugal |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ อาร์คีโรปัญญา | Ph.D. (Physical Chemistry), Bradford University, UK
(ผู้ประสานงาน) |

ผู้อำนวยการตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาตำราเคมี เล่ม 3

- | | |
|---|----------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.อุดม ศรีโยธา | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประศักดิ์ ถาวรยติการต์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.สุศักดิ์ วัฒนเสถ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |

คำนำ

หนังสือเคมี เล่ม 3 นี้ได้จัดทำและเรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้ประกอบการอบรมนักเรียนที่ได้ผ่านการคัดเลือกเข้าค่าย 1 ศูนย์ สอวน. เพื่อให้นักเรียนสามารถติดตามการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะตำราประกอบไปด้วยเนื้อหาที่จะทำการอบรมในการเตรียมความพร้อมสำหรับการคัดเลือกเพื่อเข้าค่าย 2 ต่อไป

เนื้อหาวิชาในหนังสือเคมี เล่ม 3 ฉบับใหม่นี้ได้มีการปรับปรุงให้ทันสมัยยิ่งขึ้น และมีสาระที่สอดคล้องกับการอบรมในค่าย 1 มีการเรียบเรียงเนื้อหาต่างๆ เพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจง่ายขึ้น ตลอดจนการสอดแทรกแบบฝึกหัดเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้เรียนได้ฝึกทักษะความรู้

นอกจากนั้นหนังสือเคมี เล่ม 3 นี้ ยังเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาแสวงหาความรู้เพิ่มเติมวิชาเคมีระดับพื้นฐาน และต้องการเตรียมความพร้อมสำหรับการเรียนในหัวข้อถัดไปที่ต้องใช้ความรู้พื้นฐานทางเคมีในการทำความเข้าใจ และอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ทางเคมีต่อไปได้

ทางมูลนิธิ ฯ หวังว่า หนังสือเคมี เล่ม 3 นี้จะให้ความรู้ต่อนักเรียน ตลอดจนผู้ที่สนใจในการเพิ่มพูนความรู้พื้นฐานวิชาเคมีและเป็นประโยชน์ต่อการเรียนวิชาเคมีในระดับสูงต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.พินิติ รตะนากุล

ISBN : 978-616-8242-04-9

สงวนลิขสิทธิ์

จัดพิมพ์โดย มูลนิธิ สอวน.

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2562 (2019)

พิมพ์ที่ บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด

แยกสี/เพลท บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด

จัดจำหน่ายโดย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

CALL CENTER โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

ร้านค้า ติดต่อแผนกขายส่ง สาขาหัวหมาก โทร. 0-2374-1374-5 โทรสาร 0-2374-1377

สารบัญ

บทที่		หน้า
9	จลนพลศาสตร์เคมี	1
9.1	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	2
9.2	ประเภทของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	5
9.3	อันดับของปฏิกิริยาและกฎอัตรา	9
9.4	กฎอัตราดิฟเฟอเรนเชียล	15
9.5	กฎอัตราอินทิเกรต	15
9.5.1	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	16
9.5.2	ปฏิกิริยาอันดับสอง	20
9.5.3	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	25
9.6	ทฤษฎีจลนพลศาสตร์	30
9.6.1	ทฤษฎีการชน	30
9.6.2	ทฤษฎีการเกิดสารเชิงซ้อนกัมมันต์	30
9.7	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา	32
9.7.1	ธรรมชาติของสารตั้งต้น	32
9.7.2	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	33
9.7.3	อุณหภูมิ	33
9.7.4	พื้นที่ผิวของสารตั้งต้น	34
9.7.5	ตัวเร่งและตัวยับยั้งปฏิกิริยา	35
9.8	สมการอาร์เรเนียส	36
9.9	กลไกการเกิดปฏิกิริยา	38
9.9.1	ปฏิกิริยาเบื้องต้นและโมเลกุลาริติ	39
9.9.2	ปฏิกิริยาหลายขั้นตอนและโมเลกุลาริติ	39
9.9.3	กฎอัตราและขั้นกำหนดอัตรา	40
9.9.4	ปฏิกิริยาลูกโซ่	48
9.10	การเร่งปฏิกิริยา	49
9.10.1	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	50
9.10.2	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์	52
	แบบฝึกหัด	56

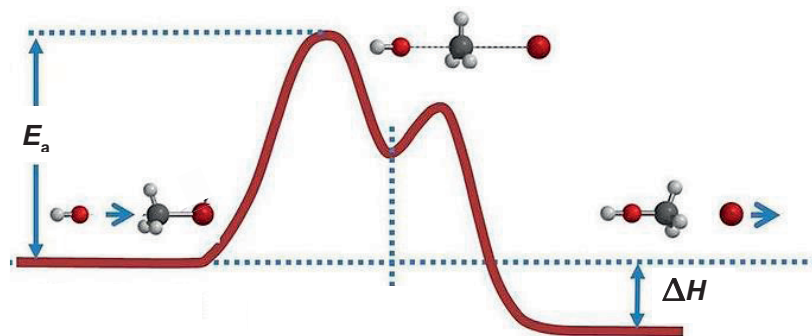
บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	63
10 สมดุลเคมี	65
10.1 ลักษณะทั่วไปของปฏิกิริยาเคมีในสภาวะสมดุล	66
10.2 ค่าคงที่สมดุล	67
10.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความดันกับค่าคงที่อัตรา	67
10.2.2 ค่าคงที่สมดุล K_p และ K_c	68
10.3 การทำนายทิศทางของการเปลี่ยนแปลงเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล	73
10.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมดุลเคมีและหลักของเลอชาเตอลิเอร์	76
10.4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อสมดุล	77
10.4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความดันต่อสมดุล	78
10.4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อสมดุล	80
10.5 ค่าคงที่สมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ และสมการแวนต์ฮอฟฟ์	82
10.6 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับสมดุล	84
แบบฝึกหัด	88
บรรณานุกรม	93
11 สมดุลไอออน	95
11.1 ทฤษฎีกรด-เบสอาร์เรเนียส	96
11.2 ทฤษฎีกรด-เบสเบรินสเตด-ลาวรี	97
11.3 ความแรงของกรดและเบส	101
11.3.1 โครงสร้างโมเลกุลและความแรงของกรด	101
11.3.2 ความแรงของคู่กรดและคู่เบส	102
11.4 ทฤษฎีกรด-เบสลิวอิส	105
11.5 การแตกตัวของน้ำและฟิเอช	109
11.5.1 การแตกตัวของน้ำ	109
11.5.2 ฟิเอช	112
11.6 การแตกตัวของกรดและเบส	115
11.6.1 การแตกตัวของกรดแก่และเบสแก่	115
11.6.2 การแตกตัวของกรดอ่อนและเบสอ่อน	117
11.6.3 การแตกตัวของเบสอ่อน	123
11.6.4 การแตกตัวของกรดพอลิโปรติก	126
11.6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของคู่กรด-คู่เบส	129

บทที่		หน้า
11.7	ปฏิกิริยาของกรดและเบส	131
11.7.1	ปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเบส	131
11.7.2	ปฏิกิริยาของกรดหรือเบสกับสารบางชนิด	132
11.8	ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสารละลายเกลือ	135
11.8.1	เกลือที่เกิดจากกรดแก่และเบสอ่อน	135
11.8.2	เกลือที่เกิดจากกรดอ่อนและเบสแก่	135
11.8.3	เกลือที่เกิดจากกรดแก่และเบสอ่อน	136
11.8.4	เกลือที่เกิดจากกรดอ่อนและเบสอ่อน	137
11.8.5	เกลือที่เกิดจากกรดอ่อนพอลิโปรติกกับเบสแก่	138
11.9	สารละลายบัฟเฟอร์	140
11.10	อินดิเคเตอร์สำหรับกรด-เบส	146
11.11	การไทเทรตระหว่างสารละลายกรด-เบส	150
11.11.1	การคำนวณความเข้มข้นและปริมาณสารจากการไทเทรต	150
11.11.2	การไทเทรตระหว่างกรดแก่และเบสแก่	152
11.11.3	การไทเทรตระหว่างกรดอ่อนและเบสแก่	155
11.11.4	การไทเทรตระหว่างเบสอ่อนกับกรดแก่	158
11.11.5	การไทเทรตระหว่างกรดอ่อนพอลิโปรติกกับเบสแก่	161
11.12	สมดุลการละลาย	164
11.13	การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับสมดุลการละลาย	166
11.14	การทำนายการตกตะกอน	169
11.15	ปัจจัยที่มีผลต่อสมดุลการละลาย	173
11.16	สมดุลของสารเชิงซ้อน	178
	แบบฝึกหัด	183
	บรรณานุกรม	189
12	เคมีนิวเคลียร์	191
12.1	กัมมันตภาพรังสี	191
12.1.1	การแผ่รังสีแอลฟา	193
12.1.2	การแผ่รังสีบีตา	193
12.1.3	การแผ่รังสีแกมมา	194
12.1.4	การแผ่รังสีโพซิตรอนและการจับยึดอิเล็กตรอน	194
12.2	การสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีในธรรมชาติ	197
12.3	เสถียรภาพของนิวเคลียส	199

บทที่	หน้า
12.4	ปฏิกิริยานิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสีเหนี่ยวนำ
12.5	ธาตุแทรนส์ยูเรเนียม
12.6	อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี
12.7	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงานของปฏิกิริยานิวเคลียร์
12.8	นิวเคลียร์ฟิชชันและนิวเคลียร์ฟิวชัน
12.8.1	นิวเคลียร์ฟิชชัน
12.8.2	นิวเคลียร์ฟิวชัน
12.9	ประโยชน์ของไอโซโทปกัมมันตรังสี
แบบฝึกหัด	228
บรรณานุกรม	233
คำตอบแบบฝึกหัด	235
ดรรชนี	247

บทที่ 9

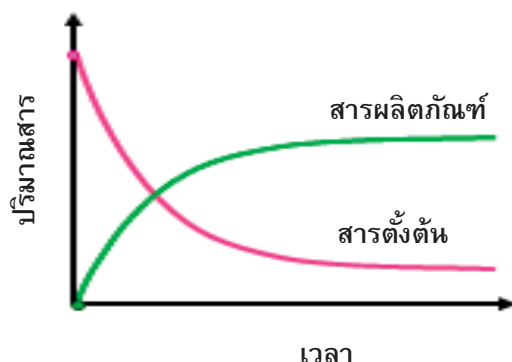
จลนพลศาสตร์เคมี



การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ส่วนมากเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วแตกต่างกันตามเหตุและปัจจัยที่ต่างกัน เช่น การเกิดสนิมเหล็กเกิดได้ช้าและใช้เวลานาน การสลายตัวของพลาสติกยิ่งใช้เวลานานกว่า ส่วนการจุดไม้ขีดไฟ การระเบิดของวัตถุระเบิด ดอกไม้ไฟ พลุไฟส่องแสงหรือผงดินปืน จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว บางปฏิกิริยาเกิดได้เร็ว แต่สามารถติดตามและจับเวลาได้ เช่น การตกตะกอนสีขาวของ AgCl โดยหยดสารละลาย AgNO_3 ลงในสารละลายกรด HCl หรือในน้ำประปาที่มีคลอรีน หรือการสังเกตการละลายของโลหะโดยใส่แผ่น Mg ลงในสารละลายกรด HCl ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วหรือช้าขึ้น ขึ้นกับความเข้มข้นของกรดที่ใช้ อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เรียกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา (**reaction rate, r**) ส่วนการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตรา รวมทั้งกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า จลนพลศาสตร์เคมี (**chemical kinetics**) ซึ่งเป็นเคมีที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดจากอนุภาคของสารซึ่งเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ต่าง ๆ กันและมีพลังงานจลน์มากพอจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นได้ ดังนั้นการศึกษาเคมีด้านนี้จึงมีความสำคัญและจำเป็น ทำให้สามารถวัดและควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้นำไปใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์หรือผลิตสารเคมีในระดับอุตสาหกรรม กำหนดอายุของการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ เช่น อายุของยารักษาโรค และ/หรือค้นหาแนวทางในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อผลิตสารใหม่ ๆ รวมทั้งการดำเนินไปของปฏิกิริยาว่าจะเกิดนานเท่าใด

9.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี สารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารใหม่หรือสารผลิตภัณฑ์ ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณหรือความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.1



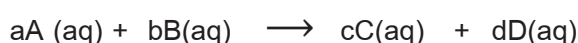
รูปที่ 9.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์กับเวลา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ใช้บอกปริมาณสารตั้งต้น หรือ สารผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นสำหรับปฏิกิริยา $A \rightarrow B$

$$\begin{aligned}\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา } (r) &= \frac{\text{ปริมาณสารตั้งต้นที่ลดลง } (\Delta A)}{\text{ช่วงเวลา } (\Delta t)} \\ &= \frac{\text{ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น } (\Delta B)}{\text{ช่วงเวลา } (\Delta t)}\end{aligned}$$

หน่วยของอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับหน่วยปริมาณสารและหน่วยเวลา โดยหน่วยปริมาณสารขึ้นกับสถานะของสารเช่น ของแข็งมักใช้หน่วยมวล (g) หรือโมล (mol) ของเหลวและแก๊สมักใช้หน่วยปริมาตร (L หรือ dm^3 , mL หรือ cm^3) หรือโมล ส่วนสารละลายมักใช้หน่วยความเข้มข้น (mol L^{-1} , mol dm^{-3} หรือ M) สำหรับหน่วยเวลาอาจเป็นวินาที (s) นาที (min) หรือชั่วโมง (h) ตัวอย่างหน่วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเช่น g s^{-1} , mL s^{-1} , $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$ หรือ M s^{-1} , mol s^{-1}

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาเคมีทั่วไป กรณีที่ทุกสารอยู่ในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นในหน่วย mol L^{-1} ซึ่งแสดงโดยใส่สัญลักษณ์ของสารนั้นในวงเล็บก้ามปู เช่น สารละลาย A จะเขียน [A] และมีสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ของสาร (a, b, c และ d) ดังสมการเคมี



ถ้าสัมประสิทธิ์ a, b, c และ d มีค่าต่างกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแต่ละสารจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนี้

$$-\frac{\Delta[A]}{\Delta t} \neq -\frac{\Delta[B]}{\Delta t} \neq \frac{\Delta[C]}{\Delta t} \neq \frac{\Delta[D]}{\Delta t}$$

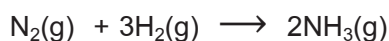
เนื่องจากสาร A และสาร B เป็นสารตั้งต้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วงเวลา Δt ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลาย A และ สาร B ลดลง ทำให้ $\Delta[A]$ และ $\Delta[B]$ มีค่าเป็นลบ ดังนั้นเพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่มีค่าเป็นบวก จึงจำเป็นต้องใส่เครื่องหมายลบข้างหน้าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้น ส่วนความเข้มข้นของสารละลายผลิตภัณฑ์ C และ D มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของผลิตภัณฑ์มีค่าเป็นบวก จึงไม่จำเป็นต้องใส่เครื่องหมายข้างหน้าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารผลิตภัณฑ์

สำหรับสมการเคมีใดที่มีเลขสัมประสิทธิ์แสดงจำนวนโมลของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากันและมีค่ามากกว่า 1 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีค่าเท่ากันในหน่วยเดียวกัน จะต้องนำเลขสัมประสิทธิ์ของแต่ละสารมาเป็นตัวหารของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารนั้น ๆ ด้วย ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเท่ากันเพียงค่าเดียว และค่าที่ได้นี้คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเคมีนั้น จะได้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีค่าเท่ากันดังสมการ (9.1)

$$r = -\frac{1}{a} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{c} \frac{\Delta[C]}{\Delta t} = \frac{1}{d} \frac{\Delta[D]}{\Delta t} \quad \dots(9.1)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาอาจวัดจากปริมาณสารตั้งต้นชนิดใดชนิดหนึ่งที่ลดลง หรือวัดจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่เพิ่มขึ้นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับความสะดวกและเหมาะสมในการวัดค่า ซึ่งอาจทำได้หลายวิธีขึ้นกับลักษณะและสมบัติของสารในปฏิกิริยานั้น เช่น ชั่งมวลของสารเมื่อเป็นของแข็ง วัดปริมาตรเมื่อเป็นแก๊ส วัดความเข้มข้นเมื่อเป็นสารละลาย หรือหาจำนวนโมลของสารได้ทุกสถานะ

ตัวอย่างที่ 9.1 จงเขียนสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้



วิธีคิด เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแต่ละสารที่หารด้วยสัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารนั้นในสมการเคมีที่ดุลแล้ว จะได้

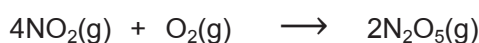
$$r = -\frac{\Delta[\text{N}_2]}{\Delta t} = -\frac{1}{3} \frac{\Delta[\text{H}_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{NH}_3]}{\Delta t}$$

ตัวอย่างที่ 9.2 แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนได้แก๊สไดไนโตรเจนเพนตะออกไซด์ ดังสมการเคมีที่ยังไม่ได้ดุลต่อไปนี้ $\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{N}_2\text{O}_5(\text{g})$ ถ้าปฏิกิริยาเคมีนี้ ใช้แก๊สออกซิเจนด้วยอัตรา 0.028 M s^{-1} ที่ภาวะเดียวกัน จงคำนวณ

(ก) อัตราการลดลงของแก๊ส NO_2

(ข) อัตราการเกิดขึ้นของแก๊ส N_2O_5

วิธีทำ ดุลสมการเคมี แล้วเขียนสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในรูปอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแต่ละสารที่หารด้วยสัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของสารนั้นในสมการเคมีที่ดุลแล้ว จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



$$r = -\frac{1}{4} \frac{\Delta[\text{NO}_2]}{\Delta t} = -\frac{\Delta[\text{O}_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{N}_2\text{O}_5]}{\Delta t}$$

(ก) การหาอัตราการลดลงของ NO_2 จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเคมี ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} -\frac{1}{4} \frac{\Delta[\text{NO}_2]}{\Delta t} &= -\frac{\Delta[\text{O}_2]}{\Delta t} = 0.028 \text{ M s}^{-1} \\ \frac{\Delta[\text{NO}_2]}{\Delta t} &= -0.028 \times 4 \text{ M s}^{-1} \\ &= -0.11 \text{ M s}^{-1} \end{aligned}$$

อัตราการลดลงของ NO_2 คือ 0.11 M s^{-1} (เครื่องหมายลบแสดงถึงการลดลง)

(ข) การหาอัตราการเกิดขึ้นของ N_2O_5 จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเคมี ได้ดังนี้

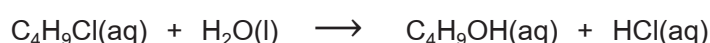
$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{N}_2\text{O}_5]}{\Delta t} &= -\frac{\Delta[\text{O}_2]}{\Delta t} = 0.028 \text{ M s}^{-1} \\ \frac{\Delta[\text{N}_2\text{O}_5]}{\Delta t} &= 0.028 \times 2 \text{ M s}^{-1} \\ &= 0.056 \text{ M s}^{-1} \end{aligned}$$

อัตราการเกิดขึ้นของ N_2O_5 คือ 0.056 M s^{-1}

9.2 ประเภทของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

โดยทั่วไปจะพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยา 2 ประเภท อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย (average rate) และอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ขณะหนึ่ง (instantaneous rate) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยเป็นอัตราที่คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีนั้นในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ขณะหนึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี ณ เวลาขณะนั้นเท่านั้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ขณะหนึ่งนั้นหาได้จากค่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกับเวลา ดังรูปที่ 9.2

ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาระหว่างโพรพิลโบรไมด์ (propyl bromide, C_4H_9Cl) กับน้ำ ดังสมการเคมี



เมื่อทำการทดลองโดยนำ C_4H_9Cl ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.100 M มาทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง จากนั้นวัดความเข้มข้น C_4H_9Cl ที่เวลาต่าง ๆ ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 ความเข้มข้นของ C_4H_9Cl ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (s)	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	300.0	400.0	500.0	800.0
$[C_4H_9Cl]$ (M)	0.1000	0.0905	0.0820	0.0741	0.0671	0.0549	0.0448	0.0368	0.0200

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา หาได้จากความเข้มข้นของ C_4H_9Cl ที่ลดลงหารด้วยช่วงเวลานั้น ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในช่วงเวลา } 0.0 - 50.0 \text{ s} &= -\frac{(0.0905 - 0.1000) \text{ M}}{(50.0 - 0.0) \text{ s}} \\ &= 1.90 \times 10^{-4} \text{ M s}^{-1} \end{aligned}$$

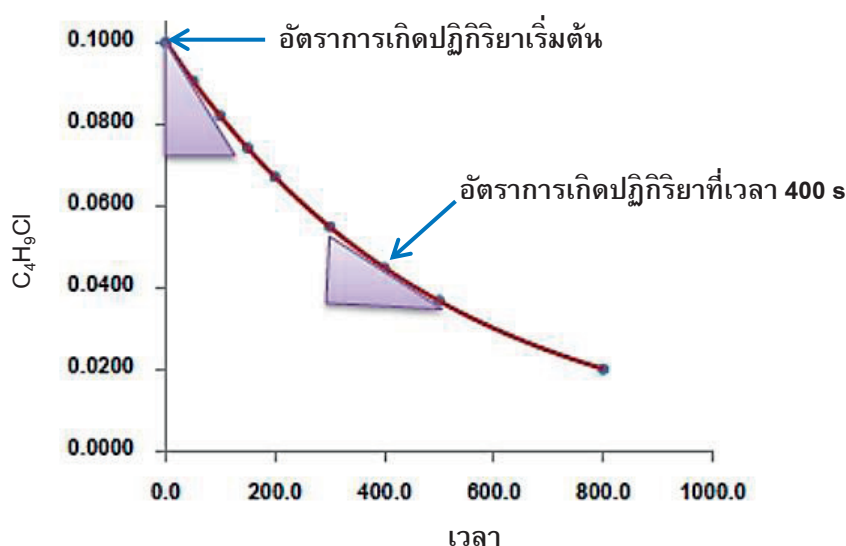
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในช่วงเวลาอื่น ๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา (s)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย ($M s^{-1}$)
0.0 – 50.0	1.90×10^{-4}
50.0 – 100.0	1.70×10^{-4}
100.0 – 150.0	1.58×10^{-4}
150.0 – 200.0	1.40×10^{-4}
200.0 – 300.0	1.22×10^{-4}
300.0 – 400.0	1.01×10^{-4}
400.0 – 500.0	8.00×10^{-5}
500.0 – 800.0	5.60×10^{-5}

 ข้อสังเกต เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของ C_4H_9Cl ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามีค่าลดลงด้วย แสดงว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น C_4H_9Cl

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 9.1 ไปสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาจะสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ขณะหนึ่งได้จากค่าความชันที่เวลาขณะนั้นดังรูปที่ 9.2 ที่แสดงให้เห็นว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (initial rate) สามารถหาได้จากความชันของเส้นสัมผัสเส้นกราฟที่เวลา $t = 0$ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 400 วินาที สามารถหาได้จากความชันของเส้นสัมผัสเส้นกราฟที่เวลา $t = 400$ s

รูปที่ 9.2 กราฟระหว่างความเข้มข้นของ C_4H_9Cl กับเวลา

ตัวอย่างที่ 9.3 กำหนดให้ สาร X สลายตัวดังสมการเคมี $3X \rightarrow 4Y + 5Z$ เมื่อวัดความเข้มข้นของ สาร X ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องที่เวลาต่าง ๆ ได้ข้อมูลของสารตามตารางต่อไปนี้

เวลา (s)	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00
[X] M	1.000	0.900	0.800	0.750	0.700

จงคำนวณ

- (ก) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาทีมีค่าเท่าใด
- (ข) ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยในช่วง 15 – 20 วินาที มีค่าคงที่ ที่เวลา 17 วินาทีจะมีความเข้มข้นของ X เหลือเท่าใด

วิธีทำ จากสมการเคมีที่กำหนดจะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา, } r = -\frac{1}{3} \frac{\Delta[X]}{\Delta t} = \frac{1}{4} \frac{\Delta[Y]}{\Delta t} = \frac{1}{5} \frac{\Delta[Z]}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \text{(ก) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยช่วง } 0 - 20 \text{ s} &= -\frac{1}{3} \times \frac{(0.700 - 1.000) \text{ M}}{(20.00 - 0.00) \text{ s}} \\ &= 5.0 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1} \end{aligned}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยช่วง 0 – 20 วินาที มีค่าเท่ากับ $5.0 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1}$

(ข) สมมุติค่า [X] ที่เวลา 17 วินาทีเป็น $a \text{ M}$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิด X ช่วง } 15 - 17 \text{ s} &= \text{อัตราการเกิด X ช่วง } 15 - 20 \text{ s} \\ -\frac{1}{3} \times \frac{(a - 0.750) \text{ M}}{(17.00 - 15.00) \text{ s}} &= -\frac{1}{3} \times \frac{(0.700 - 0.750) \text{ M}}{(20.00 - 15.00) \text{ s}} \\ \frac{(a - 0.750) \text{ M}}{2 \text{ s}} &= \frac{0.050 \text{ M}}{5 \text{ s}} \\ a &= 0.730 \text{ M} \end{aligned}$$

ดังนั้นที่เวลา 17 วินาทีจะมีความเข้มข้นของ X เท่ากับ 0.730 M

ตัวอย่างที่ 9.4 การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ กำหนดให้ในช่วง 1.00 นาทีแรกมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเท่ากับ $1.80 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1}$ ถ้าเริ่มต้นมี H_2O_2 เข้มข้น 1.55 M ปริมาตร 15.0 mL จงคำนวณเพื่อตอบคำถามต่อไปนี้

- (ก) ความเข้มข้นของ H_2O_2 เป็นเท่าใด เมื่อเวลาผ่านไป 10.0 วินาที
- (ข) ต้องใช้เวลากี่วินาที ความเข้มข้นของ H_2O_2 จึงจะลดลงเหลือ 1.45 M
- (ค) ปริมาตรแก๊ส O_2 เป็นเท่าใด ที่ STP เมื่อ H_2O_2 สลายตัวไป 1.00 นาที

วิธีทำ จากสมการเคมีแสดงว่า

$$r = 1.8 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{H}_2\text{O}_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta[\text{H}_2\text{O}]}{\Delta t} = \frac{\Delta[\text{O}_2]}{\Delta t}$$

(ก) สมมุติที่ $t = 10.0 \text{ s}$ มี $[\text{H}_2\text{O}_2] = x \text{ M}$

$$1.80 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1} = -\frac{1}{2} \frac{(x - 1.55) \text{ M}}{(10 - 0) \text{ s}} = -\frac{1}{2} \times \frac{(x - 1.55) \text{ M}}{10 \text{ s}}$$

$$x = 1.51 \text{ M}$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที ความเข้มข้นของ H_2O_2 เท่ากับ 1.51 M

(ข) สมมุติที่เวลา y วินาที มี $[\text{H}_2\text{O}_2] = 1.45 \text{ M}$

$$1.80 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1} = -\frac{1}{2} \times \frac{(1.45 - 1.55) \text{ M}}{(y - 0) \text{ s}}$$

$$y = 28 \text{ s}$$

ดังนั้น ใช้เวลา 28 วินาที ความเข้มข้นของ H_2O_2 จึงลดลงเหลือ 1.45 M

(ค) สมมุติที่เวลา 1 นาที $[\text{O}_2]$ ที่เกิดขึ้น = $z \text{ M}$

$$1.80 \times 10^{-3} \text{ M s}^{-1} = \frac{(z) \text{ M}}{60 \text{ s}}$$

$$z = 0.108 \text{ M}$$

$$\text{จำนวนโมลแก๊ส } \text{O}_2 \text{ ที่เกิดขึ้น} = \frac{0.108 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times 15.0 \text{ mL}$$

$$= 1.62 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

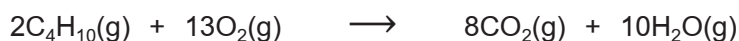
$$\text{ปริมาตรแก๊ส } \text{O}_2 \text{ ที่ STP} = 1.62 \times 10^{-3} \text{ mol} \times \frac{22.414 \text{ L}}{1 \text{ mol}}$$

$$= 0.0363 \text{ L หรือ } 36.3 \text{ mL}$$

ดังนั้นในช่วงเวลา 1 นาที จะเกิดแก๊ส O_2 เท่ากับ 36.3 mL ที่ STP

ตัวอย่างที่ 9.5 แก๊สบิวเทน (C_4H_{10}) เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับ O_2 ได้แก๊ส CO_2 และ H_2O พบว่าในช่วงเวลาหนึ่ง อัตราการลดลงของแก๊สบิวเทนเท่ากับ 0.20 M s^{-1} จงหาอัตราการลดลงของ O_2 และอัตราการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลานั้น

วิธีทำ เขียนสมการเคมีที่ดุลแล้วของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



จากโจทย์อัตราการลดลงของแก๊สบิวเทนเท่ากับ 0.20 M s^{-1} แสดงว่า

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta[C_4H_{10}]}{\Delta t} = -\frac{1}{2}(-0.20) \text{ M s}^{-1} \\ &= 0.10 \text{ M s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } 0.10 \text{ M s}^{-1} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta[C_4H_{10}]}{\Delta t} = -\frac{1}{13} \frac{\Delta[O_2]}{\Delta t} = \frac{1}{8} \frac{\Delta[CO_2]}{\Delta t} = \frac{1}{10} \frac{\Delta[H_2O]}{\Delta t}$$

จะได้อัตราการลดลงของ O_2 อัตราการเกิด CO_2 และอัตราการเกิด H_2O เป็น 1.3 M s^{-1} , 0.80 M s^{-1} และ 1.0 M s^{-1} ตามลำดับ



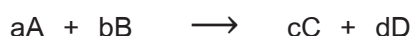
จะเห็นว่าการลดลงของ O_2 การเกิด CO_2 และ H_2O เป็น 13, 8 และ 10 เท่า ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ ซึ่งตรงกับตัวเลขที่ดุลสมการนั่นเอง

สรุป อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ยเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการลดลงของปริมาณสารตั้งต้น หรืออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารผลิตภัณฑ์ ในช่วงเวลาที่ใช้ไป แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ขณะใดขณะหนึ่ง เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการลดลงของปริมาณสารตั้งต้น หรืออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่

9.3 อันดับของปฏิกิริยาและกฎอัตรา

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่วนสารผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) เป็นค่าตัวเลขยกกำลังของความเข้มข้นสารตั้งต้นที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา พิจารณาปฏิกิริยาทั่วไป



ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเขียนได้ดังนี้