หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕

เคมี
เล่ม ๓

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

ตารางธาตุ

1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9 VIIIB	10	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 H hydrogen 1.01																	2 He helium 4.00
3 Li lithium 6.94	4 Be beryllium 9.01											5 B boron 10.81	6 C carbon 12.01	7 N nitrogen 14.01	8 O oxygen 16.00	9 F fluorine 19.00	10 Ne neon 20.18
11 Na sodium 22.99	12 Mg magnesium 24.30											13 Al aluminium 26.98	14 Si silicon 28.08	15 P phosphorus 30.97	16 S sulfur 32.06	17 Cl chlorine 35.45	18 Ar argon 39.95
19 K potassium 39.10	20 Ca calcium 40.08	21 Sc scandium 44.96	22 Ti titanium 47.87	23 V vanadium 50.94	24 Cr chromium 52.00	25 Mn manganese 54.94	26 Fe iron 55.85	27 Co cobalt 58.93	28 Ni nickel 58.69	29 Cu copper 63.55	30 Zn zinc 65.38	31 Ga gallium 69.72	32 Ge germanium 72.63	33 As arsenic 74.92	34 Se selenium 78.97	35 Br bromine 79.90	36 Kr krypton 83.80
37 Rb rubidium 85.47	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.91	40 Zr zirconium 91.22	41 Nb niobium 92.91	42 Mo molybdenum 95.95	43 Tc technetium	44 Ru ruthenium 101.07	45 Rh rhodium 102.91	46 Pd palladium 106.42	47 Ag silver 107.87	48 Cd cadmium 112.41	49 In indium 114.82	50 Sn tin 118.71	51 Sb antimony 121.76	52 Te tellurium 127.60	53 I iodine 126.90	54 Xe xenon 131.29
55 Cs caesium 132.91	56 Ba barium 137.33	57-71 lanthanoids *	72 Hf hafnium 178.49	73 Ta tantalum 180.95	74 W tungsten 183.84	75 Re rhenium 186.21	76 Os osmium 190.23	77 Ir iridium 192.22	78 Pt platinum 195.08	79 Au gold 196.97	80 Hg mercury 200.59	81 Tl thallium 204.38	82 Pb lead 207.20	83 Bi bismuth 208.98	84 Po polonium	85 At astatine	86 Rn radon
87 Fr francium	88 Ra radium	89-103 actinoids **	104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnerium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Nh nihonium	114 Fl flerovium	115 Mc moscovium	116 Lv livermorium	117 Ts tennessine	118 Og oganesson

กลุ่มธาตุ *แลนทานอยด์	57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium	62 Sm samarium 150.36	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.50	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97
กลุ่มธาตุ **แอกทินอยด์	89 Ac actinium	90 Th thorium 232.04	91 Pa protactinium 231.04	92 U uranium 238.03	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เคมี

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book ครั้งที่ ๑ พ.ศ.๒๕๖๓

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกับหนังสือเรียน สสวท. ฉบับสื่อสิ่งพิมพ์ที่ได้จัดทำตามมาตรฐานหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ทุกประการ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงหนังสือเรียน สสวท. ผ่านเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อให้นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และ ผู้สนใจทั่วไปเข้าถึงได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่างๆ ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่โดยมิได้รับอนุญาต

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๑ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี เล่ม ๑ – เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ – ๖ แล้วก็สามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๑ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี เล่ม ๓ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วย เรื่อง แก๊สและสมบัติของแก๊ส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมดุลเคมี ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบัน และสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี เล่ม ๓ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน จะช่วยให้ผู้เรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่นักเรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งนักเรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว

จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งนักเรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ

ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ชุดคำถามที่ใช้ในการตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน ซึ่งนักเรียนควรตอบคำถามให้ถูกต้องทั้งหมด หากไม่ถูกต้องควรทบทวนเนื้อหานั้นก่อนเริ่มการเรียนรู้เรื่องใหม่ในแต่ละบท

ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา

ตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง

แบบฝึกหัด

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยเสริมให้เกิดทักษะและความรู้ในบทเรียน ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหาและฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง

ตัวอย่าง

การแสดงแนวทางการตอบคำถามหรือการแก้โจทย์ปัญหา ซึ่งนักเรียนสามารถศึกษาเพื่อให้มีความเข้าใจในเนื้อหาบทเรียนมากขึ้น

ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล

รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

แบบฝึกหัดท้ายบท

คำถามท้ายบทเรียนสำหรับให้นักเรียนตรวจสอบความเข้าใจหลังจากเรียนจบบทเรียนแล้ว ซึ่งนักเรียนสามารถใช้เป็นข้อมูลในการทบทวนเนื้อหาที่ยังไม่เข้าใจได้

สารบัญ

7

แก๊สและสมบัติของแก๊ส

บทที่ 7 แก๊สและสมบัติของแก๊ส 1

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมล 7

7.2 กฎแก๊สอุดมคติ และความดันย่อย 28

7.3 ทฤษฎีจลน์และการแพร่ของแก๊ส 38

7.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับแก๊สและสมบัติของแก๊ส 46

แบบฝึกหัดท้ายบท 50

8

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

บทที่ 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี 54

8.1 ความหมายและการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี 57

8.2 แนวคิดเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี 73

8.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี 80

แบบฝึกหัดท้ายบท 91

สารบัญ

9

สมดุลเคมี

บทที่ 9 สมดุลเคมี 94

9.1 สภาวะสมดุล 97

9.2 ค่าคงที่สมดุล 110

9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมดุล 127

9.4 สมดุลเคมีในสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม 140

แบบฝึกหัดท้ายบท 146

ภาคผนวก

คำศัพท์ในหนังสือเรียน เคมี เล่ม 3 154

ชื่อธาตุ 155

บรรณานุกรม 158

ที่มาของรูป 159

คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน 160

บทที่ 7 | แก๊สและสมบัติของแก๊ส

ipst.me/8875

แก๊สขยายตัวเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นภายในโคมลอยน้อยลง และลอยสูงขึ้นไปในอากาศได้

คำถามสำคัญ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊สเป็นอย่างไร
2. ความรู้เกี่ยวกับสมบัติของแก๊สนำไปใช้ประโยชน์อะไรได้บ้าง

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของแก๊ส และคำนวณปริมาตรหรือความดัน โดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎของบอยล์
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊ส และคำนวณปริมาตรหรืออุณหภูมิ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎของชาร์ล
3. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของแก๊ส และคำนวณความดันหรืออุณหภูมิ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎของเกย์–ลูสแซก
4. คำนวณปริมาตร ความดัน หรืออุณหภูมิของแก๊สที่ภาวะต่าง ๆ ตามกฎรวมแก๊ส
5. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊ส และคำนวณปริมาตรหรือจำนวนโมลโดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎของอาโวกาโดร
6. คำนวณปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ จำนวนโมล หรือมวลของแก๊ส โดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎแก๊สอุดมคติ
7. คำนวณความดันย่อยหรือจำนวนโมลของแก๊สในแก๊สผสม
8. อธิบายกฎต่าง ๆ ของแก๊ส โดยใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส
9. อธิบายการแพร่ของแก๊สโดยใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส
10. อธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการแพร่กับมวลต่อโมลของแก๊ส
11. คำนวณและเปรียบเทียบอัตราการแพร่ หรือมวลต่อโมลของแก๊ส โดยใช้กฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม
12. สืบค้นข้อมูล อธิบายปรากฏการณ์ และยกตัวอย่างการนำความรู้เกี่ยวกับแก๊สและสมบัติของแก๊สไปใช้ประโยชน์

ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ใส่เครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง

.....1. แก๊สและของเหลวเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุ แต่แตกต่างกันตรงที่ปริมาตรของแก๊สเปลี่ยนแปลงตามภาชนะที่บรรจุได้

.....2. ความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ

.....3. แก๊ส A 1.0 โมล ผสมกับแก๊ส B 4.0 โมล เศษส่วนโมลของแก๊ส A เท่ากับ 0.25

.....4. ที่ STP แก๊สต่างชนิดกันมีปริมาตรเท่ากันเมื่อมีมวลเท่ากัน

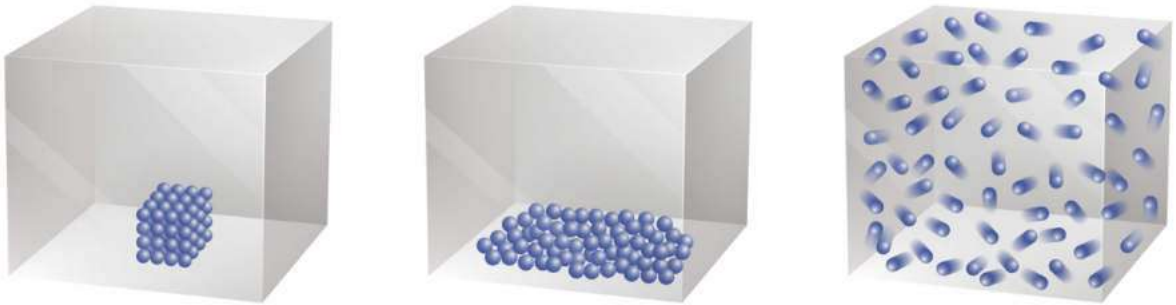
.....5. แก๊สฮีเลียม 2.00 กรัม มีจำนวนโมลเท่ากับแก๊สออกซิเจน 16.00 กรัม

.....6. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 44.01 กรัม มีปริมาตร 22.4 ลิตรที่ STP

.....7. จากสมการ $2H_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2H_2O(g)$ แสดงว่า แก๊สไฮโดรเจน 10 มิลลิกรัม ทำปฏิกิริยาพอดีกับแก๊สออกซิเจน 5 มิลลิกรัม เกิดเป็นไอน้ำ 10 มิลลิกรัม

.....8. จากสมการ $2H_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2H_2O(g)$ แสดงว่า ที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ แก๊สไฮโดรเจน 10 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยาพอดีกับแก๊สออกซิเจน 5 มิลลิลิตร เกิดเป็นไอน้ำ 10 มิลลิลิตร

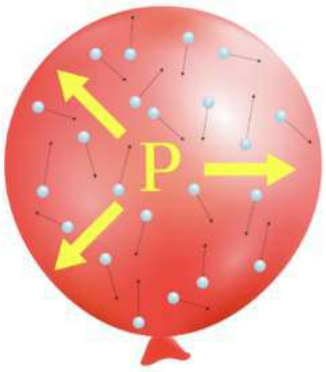
สารในสถานะแก๊สมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยมาก อนุภาคอยู่ห่างกัน และฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ ดังนั้นปริมาตรของสารในสถานะแก๊สจึงเท่ากับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ เมื่อเปรียบเทียบปริมาตรของสารทั้ง 3 สถานะที่มีจำนวนโมลเท่ากัน พบว่า เมื่อสารอยู่ในสถานะแก๊สจะมีปริมาตรมากกว่าเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็ง ทำให้ความหนาแน่นของสารในสถานะแก๊สมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ยังสามารถบีบอัดแก๊สให้มีปริมาตรลดลงได้เนื่องจากมีที่ว่างระหว่างอนุภาคอยู่มาก



ของแข็ง ของเหลว แก๊ส

รูป 7.1 การจัดเรียงอนุภาคของสารชนิดหนึ่งที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

เมื่ออนุภาคแก๊สเคลื่อนที่ชนผนังภาชนะจะทำให้เกิดแรงกระทำต่อพื้นผิวภายในของภาชนะที่บรรจุ ซึ่งผลรวมของแรงทั้งหมดที่อนุภาคแก๊สกระทำต่อพื้นที่เรียกว่า ความดัน (pressure) และหน่วยของความดันในระบบ SI คือ ปาสคัล (pascal; Pa)



รูป 7.2 ความดันของแก๊สที่เกิดขึ้นภายในลูกโป่ง

หน่วยของความดันของแก๊สที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ บรรยากาศ (atmosphere; atm) ซึ่งสัมพันธ์กับหน่วยปาสคัล และหน่วยอื่น ๆ ดังนี้

$1\ atm = 1.01325 \times 10^5\ Pa = 760\ mmHg = 760\ torr = 1\ bar = 14.7\ psi$

รู้หรือไม่

หน่วยมิลลิเมตรปรอท (mmHg) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทอร์ (torr) ตามชื่อของ เอวันเจลิสตา ตอร์รีเชลลี (Evangelista Torricelli) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี ผู้ประดิษฐ์บารอมิเตอร์ปรอท

ความรู้เพิ่มเติม

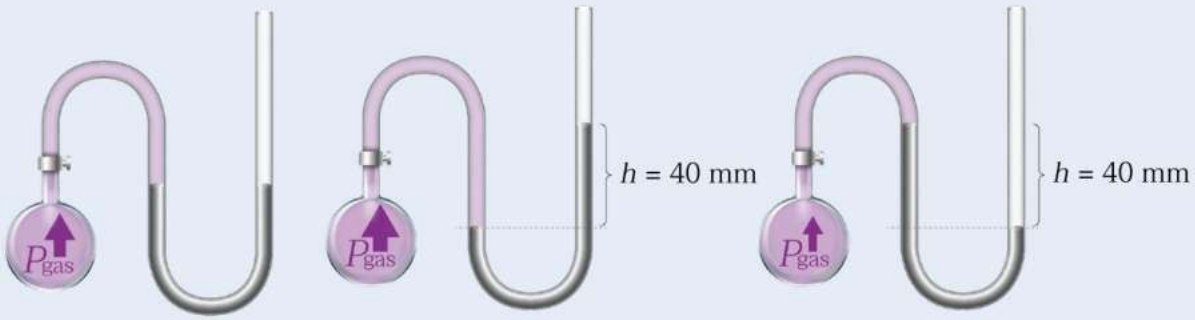
ความดันของแก๊สสามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์ เช่น บารอมิเตอร์ (barometer) แมนอมิเตอร์ (manometer)

บารอมิเตอร์ (barometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันบรรยากาศ บารอมิเตอร์อย่างง่ายประกอบด้วยหลอดแก้วยาวที่มีปลายปิดด้านหนึ่งซึ่งบรรจุปรอทไว้เต็มคว่ำอยู่ในภาชนะที่บรรจุปรอท ปรอทในหลอดแก้วบางส่วนจะไหลออกมาสู่ภาชนะ จึงทำให้ระดับของปรอทลดลงและเกิดสุญญากาศบริเวณด้านปลายปิดของหลอดแก้ว และปรอทจะหยุดไหลออกจากหลอดแก้วเมื่อความดันของปรอทในหลอดแก้วเท่ากับความดันของบรรยากาศที่กระทำต่อผิวหน้าของปรอทที่อยู่ในภาชนะ จึงใช้ความสูงของระดับปรอทในหลอดแก้วระบุความดันบรรยากาศในหน่วยมิลลิเมตรปรอท

บารอมิเตอร์

แมนอมิเตอร์ (manometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันของแก๊สอื่น ๆ นอกเหนือจากความดันบรรยากาศ มีลักษณะเป็นหลอดแก้วรูปตัวยูสำหรับบรรจุของเหลว โดยทั่วไปนิยมใช้ปรอท แมนอมิเตอร์อย่างง่ายมีปลายเปิดทั้งสองด้าน เมื่อเริ่มต้นระดับของของเหลวในหลอดแก้วรูปตัวยูทั้งสองด้านจะเท่ากัน เนื่องจากความดันอากาศที่กระทำต่อของเหลวทั้งสองด้านเท่ากัน เมื่อต่อแมนอมิเตอร์เข้ากับภาชนะบรรจุแก๊ส ระดับของของเหลวในหลอดแก้วรูปตัวยูจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลต่างของระดับความสูงของปรอทระหว่างสองด้านสามารถใช้คำนวณความดันของแก๊ส (P_{gas}) โดยเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ (P_{atm}) ดังนี้

แมนอมิเตอร์



$P_{gas} = P_{atm}$ $\quad$ $P_{gas} = P_{atm} + h$ $\quad$ $P_{gas} = P_{atm} - h$

ถ้า $P_{atm} = 760$ mmHg

ดังนั้น $P_{gas} = 760$ mmHg $\quad$ $P_{gas} = 800$ mmHg $\quad$ $P_{gas} = 720$ mmHg

นอกจากสมบัติของแก๊สที่แตกต่างจากของแข็งและของเหลวดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสมบัติอื่นอีกหรือไม่

นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊สจนได้ความสัมพันธ์เป็นกฎต่าง ๆ ซึ่งนักเรียนจะได้ศึกษาต่อไปนี้

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊ส

7.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของแก๊ส

ความดันและปริมาตรของแก๊สมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 7.1 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของอากาศ

จุดประสงค์การทดลอง

ทดลองและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของอากาศ

วัสดุและอุปกรณ์

กระบอกฉีดยาพลาสติก ขนาด 20 mL

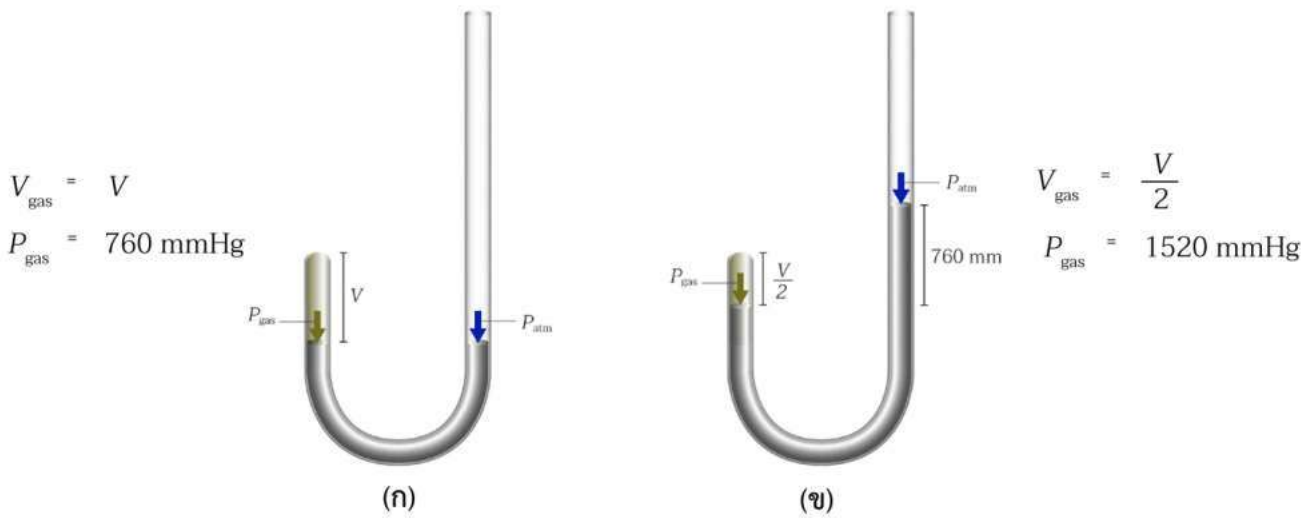
วิธีทดลอง

1. ดึงก้านกระบอกฉีดยาให้มีปริมาตรของอากาศเป็น 10.0 mL ใช้ปลายนิ้วอุดปลายกระบอกฉีดยาไว้ ดังรูป จากนั้นกดก้านกระบอกฉีดยาช้า ๆ จนกระทั่งมีปริมาตรของอากาศเป็น 5.0 mL ปล่อยมือที่กดก้านกระบอกฉีดยา และสังเกตการเปลี่ยนแปลง
2. ดึงก้านกระบอกฉีดยาให้มีปริมาตรของอากาศเป็น 10.0 mL ใช้ปลายนิ้วอุดปลายกระบอกฉีดยาไว้ เหมือนข้อ 1 จากนั้นดึงก้านกระบอกฉีดยาขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีปริมาตรของอากาศเป็น 20.0 mL ปล่อยมือที่ดึงก้านกระบอกฉีดยา และสังเกตการเปลี่ยนแปลง

คำถามท้ายการทดลอง

1. อุณหภูมิและจำนวนโมลของอากาศภายในกระบอกฉีดยา ก่อนและหลังการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
2. ความดันของอากาศในกระบอกฉีดยาเมื่อเริ่มทำการทดลองมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกหรือไม่
3. เมื่อกดก้านกระบอกฉีดยาจนปริมาตรของอากาศเป็น 5.0 mL ความดันของอากาศภายในกระบอกฉีดยามากกว่าหรือน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ทราบได้อย่างไร
4. เมื่อดึงก้านกระบอกฉีดยาจนปริมาตรของอากาศเป็น 20.0 mL ความดันของอากาศภายในกระบอกฉีดยามากกว่าหรือน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ทราบได้อย่างไร

จากการทดลองจะเห็นว่า ปริมาตรของแก๊สมีความสัมพันธ์กับความดันของแก๊ส ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ รอเบิร์ต บอยล์ (Robert Boyle) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของแก๊ส ที่อุณหภูมิและจำนวนโมลคงที่ โดยใช้หลอดแก้วรูปตัวเจ (J) ที่มีปลายเปิดอยู่ด้านบน โดยเมื่อเริ่มการทดลองได้เติมปรอทลงไปจนระดับของปรอทในหลอดแก้วทั้งสองด้านเท่ากัน ดังรูป 7.3 (ก) แสดงว่าแก๊สที่อยู่ในหลอดแก้วด้านปลายปิดในตอนเริ่มต้นนี้มีความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท หรือ 1 บรรยากาศ จากนั้นได้เติมปรอทลงในหลอดแก้วเพิ่มอีกจนระดับปรอทในหลอดแก้วด้านปลายเปิดสูงกว่าด้านปลายปิด 760 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้แก๊สที่อยู่ในหลอดแก้วด้านปลายปิดมีความดันเพิ่มขึ้นเป็น 2 บรรยากาศ หรือ 1520 มิลลิเมตรปรอท และพบว่าปริมาตรของแก๊สจะลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง ดังรูป 7.3 (ข)

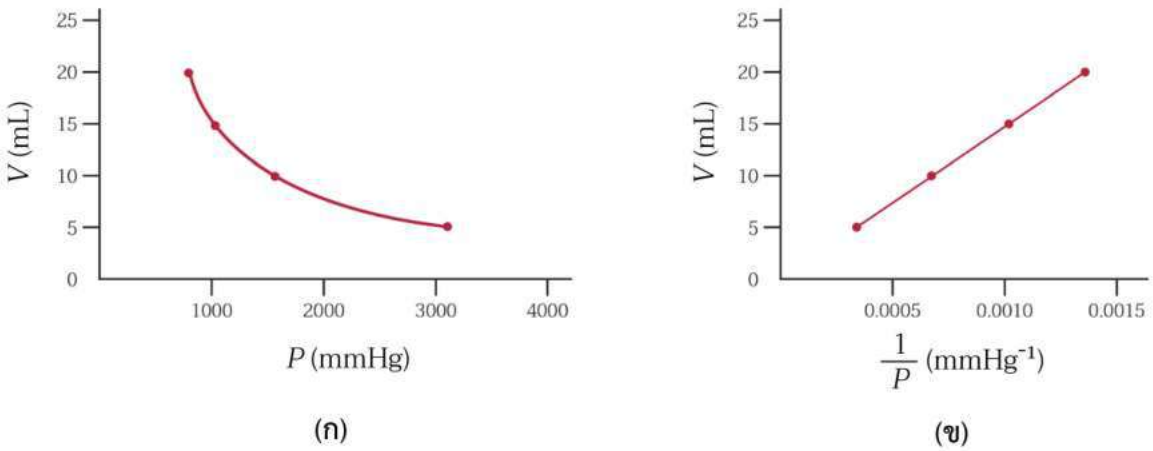


รูป 7.3 ระดับปรอทในหลอดแก้วรูปตัวเจ (ก) เมื่อเริ่มต้น (ข) เมื่อเติมปรอทเพิ่ม

รอเบิร์ต บอยล์ได้ทำการทดลองอีกหลายครั้งที่ระดับความสูงของปรอทต่าง ๆ กันและได้ตัวอย่างผลการทดลองดังตาราง 7.1 ซึ่งพบว่า ผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของแต่ละการทดลองมีค่าเกือบคงที่ และเมื่อนำข้อมูลในตาราง 7.1 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับความดันและปริมาตรกับส่วนกลับของความดัน ได้กราฟดังรูป 7.4

ตาราง 7.1 ข้อมูลความดัน ปริมาตร และการคำนวณจากการทดลองของรอเบิร์ต บอยล์

ความดัน (mmHg)	ปริมาตร (mL)	$\frac{1}{P}$ ($mmHg^{-1}$)	PV (mmHg · mL)
780	20.00	0.00128	1.56×10^4
1038	15.00	0.000963	1.56×10^4
1560	10.00	0.000641	1.56×10^4
3112	5.00	0.000321	1.56×10^4



รูป 7.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ปริมาตรกับความดัน (ข) ปริมาตรกับส่วนกลับของความดัน

จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและจำนวนโมลของแก๊สคงที่ ปริมาตร (V) จะแปรผกผันกับความดัน (P) ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า **กฎของบอยล์** (Boyle's law) และสามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$V \propto \frac{1}{P}$$
$$V = \text{ค่าคงที่} \times \frac{1}{P}$$
$$PV = \text{ค่าคงที่}$$

ความสัมพันธ์ตามกฎของบอยล์ อาจเขียนอยู่ในรูปที่สามารถใช้คำนวณปริมาตรหรือความดันของแก๊สที่สองสภาวะได้ดังนี้

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

เมื่อ P_1 และ P_2 คือ ความดันของแก๊สที่มีปริมาตร V_1 และ V_2 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิและจำนวนโมลคงที่

แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะขนาด 100.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ความดัน 1.0 บรรยากาศ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ้าแก๊สนี้บรรจุในภาชนะขนาด 200.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ณ อุณหภูมิเดิม แก๊สนี้จะมีความดันเท่าใด

วิธีทำ

จาก $P_1V_1 = P_2V_2$

แทนค่าจะได้ $(1.0 \text{ atm})(100.0 \text{ cm}^3) = P_2(200.0 \text{ cm}^3)$

$$P_2 = \frac{(1.0 \text{ atm})(100.0 \cancel{\text{cm}^3})}{200.0 \cancel{\text{cm}^3}}$$

$$= 0.50 \text{ atm}$$

ดังนั้น แก๊สชนิดนี้จะมีความดัน 0.50 บรรยากาศ

ตัวอย่าง 2

แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุอยู่ในกระบอกสูบขนาด 2.0 ลิตร ที่ความดัน 1.5 บรรยากาศ เมื่ออัดกระบอกสูบให้มีความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1520 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะเป็นเท่าใด

วิธีทำ

จาก $P_1V_1 = P_2V_2$

แทนค่าจะได้ $(1.5\ \text{atm})(2.0\ \text{L}) = (1520\ \cancel{\text{mmHg}} \times \frac{1\ \text{atm}}{760\ \cancel{\text{mmHg}}})V_2$

$(1.5\ \text{atm})(2.0\ \text{L}) = (2.00\ \text{atm})V_2$

$V_2 = \frac{(1.5\ \cancel{\text{atm}})(2.0\ \text{L})}{2.00\ \cancel{\text{atm}}}$

$= 1.5\ \text{L}$

ดังนั้น แก๊สมีปริมาตร 1.5 ลิตร

ตรวจสอบความเข้าใจ

ในการทดลองวัดปริมาตรของอากาศในหลอดรูปตัวเจ (J) เมื่อเริ่มต้นอากาศในหลอดรูปตัวเจด้านปลายปิดมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร และมีความดัน 1.0 บรรยากาศ เมื่อเติมปรอทลงในหลอดเพิ่มเติม พบว่า ความดันภายในหลอดเพิ่มเป็น 1.5 บรรยากาศ จงคำนวณปริมาตรของอากาศในหลอดรูปตัวเจหลังเติมปรอท ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิที่ทำการทดลองคงที่

7.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊ส

ปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 7.2 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของอากาศ

จุดประสงค์การทดลอง

ทดลองและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของอากาศ

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. ขวดพลาสติกใสชนิดไม่ยุบตัวเมื่อถูกความร้อน ขนาด 500 mL
2. บีกเกอร์ขนาด 500 mL
3. น้ำ
4. น้ำยาล้างจาน
5. น้ำร้อน (อุณหภูมิประมาณ 60 °C)
6. น้ำแข็ง

วิธีทดลอง

1. ผสมน้ำกับน้ำยาล้างจานในอัตราส่วน 2 : 1 ใส่ในบีกเกอร์ใบที่ 1
2. จุ่มปากขวดพลาสติกลงในบีกเกอร์ใบที่ 1 ดังรูป เพื่อให้เกิดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำยาล้างจานปิดที่ปากขวด สังเกตลักษณะของฟิล์มที่ปากขวด

น้ำผสมน้ำยาล้างจาน

3. เทน้ำร้อนใส่บีกเกอร์ใบที่ 2 โดยให้น้ำร้อนมีระดับความสูงประมาณ 2 cm แล้ววางขวดพลาสติกที่เตรียมไว้ในข้อ 2 ลงในบีกเกอร์ โดยหงายปากขวดขึ้น ดังรูป สังเกตการเปลี่ยนแปลง และบันทึกผลโดยการวาดรูปประกอบ

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2–3 แต่เปลี่ยนจากน้ำร้อนเป็นน้ำผสมน้ำแข็งแทน

คำถามท้ายการทดลอง

1. จำนวนโมลและความดันของอากาศในขวดพลาสติกก่อนทำการทดลองและหลังการทดลองเสร็จสิ้นมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
2. เมื่อวางขวดพลาสติกลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำร้อนและน้ำผสมน้ำแข็ง ปริมาตรและอุณหภูมิของอากาศในขวดพลาสติกเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

จากการทดลองจะเห็นว่า ปริมาตรของแก๊สและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้มีการศึกษาไว้แล้วโดย ชาก-อาแลกซองดร์-เซซา ชาร์ล (Jacques-Alexandre-César Charles) โดยทำการทดลองกับบอลลูนและพบว่า ปริมาตรของแก๊สเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่อมาได้รับการยืนยันโดยผลการทดลองของ โชเซฟ-ลุย เก-ลูซัก[1] (Joseph-Louis Gay-Lussac) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊ส ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

[1]ในปี พ.ศ. 2347 เก-ลูซัก นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ขึ้นไปในบอลลูนที่ความสูง 23,000 ฟุตเพื่อศึกษาองค์ประกอบของอากาศ ทำให้ได้รับสมญานามว่า นักผจญภัย ผลการทดลองต่าง ๆ ของเขาเป็นที่มาของกฎต่าง ๆ ของแก๊ส

กิจกรรม 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊ส

จุดประสงค์ของกิจกรรม

เขียนกราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊ส

วัสดุและอุปกรณ์

กระดาษกราฟ

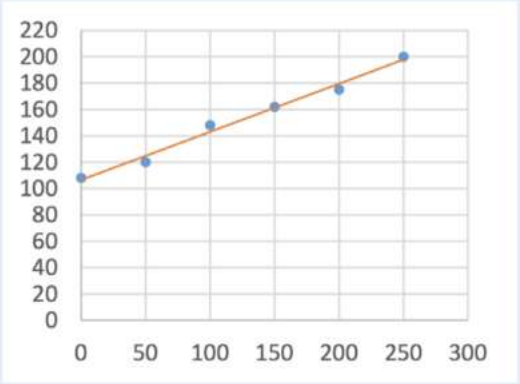
วิธีทำกิจกรรม

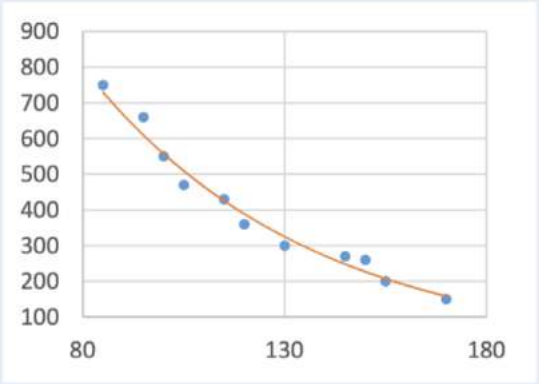
เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (แกน y) และอุณหภูมิของแก๊ส (แกน x) จากข้อมูลการทดลองวัดปริมาตรของแก๊สชนิดหนึ่ง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันและจำนวนโมลคงที่ต่อไปนี้

การทดลองครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาตร (mL)
1	-230	15
2	-170	41
3	-130	54
4	-70	80
5	20	113
6	120	152
7	230	198

ความรู้เพิ่มเติม

การลากเส้นกราฟแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมด ทำได้โดยลากเส้นให้ใกล้เคียงกับจุดข้อมูลมากที่สุด ซึ่งไม่จำเป็นต้องผ่านจุดข้อมูลทุกจุด ดังตัวอย่าง





คำถามท้ายกิจกรรม

1. กราฟที่ได้มีลักษณะอย่างไร
2. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สเป็นอย่างไร
3. จุดตัดแกน x เป็นเท่าใด และที่จุดนี้แก๊สมีปริมาตรเท่าใด

จากกิจกรรมจะเห็นว่า สามารถหาอุณหภูมิที่แก๊สมีปริมาตรเป็นศูนย์ได้จากจุดที่เส้นกราฟตัดแกน x ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (absolute zero) หรือ 0 เคลวิน (K) ที่เสนอโดยวิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือลอร์ดเคลวิน (Lord Kelvin) และมีค่าเท่ากับ -273.15 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสและเคลวิน เป็นดังนี้

$$T(\mathrm{K}) = 273.15 + T(^{\circ}\mathrm{C})$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ หนังสือเล่มนี้จะใช้อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์เท่ากับ -273 องศาเซลเซียส

ชวนคิด

จากตารางข้อมูลในกิจกรรม 7.3 นักเรียนคิดว่า อัตราส่วนระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สในหน่วยองศาเซลเซียสหรือเคลวินแตกต่างกันอย่างไร

ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิในหน่วยเคลวินจะได้จุดตัดแกน x ของกราฟที่ 0 เคลวิน และเมื่อหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สในหน่วยเคลวินจะพบว่าได้ค่าคงที่ ดังนั้น ปริมาตร (V) แปรผันตรงกับอุณหภูมิ (T) ในหน่วยเคลวิน ซึ่งความสัมพันธ์นี้ เรียกว่า **กฎของชาร์ล** (Charles' law) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$V \propto T$$
$$V = \text{ค่าคงที่} \times T$$
$$\frac{V}{T} = \text{ค่าคงที่}$$

ความสัมพันธ์ตามกฎของชาร์ล อาจเขียนอยู่ในรูปที่สามารถใช้คำนวณปริมาตรหรืออุณหภูมิของแก๊สที่สองสภาวะได้ดังนี้

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

เมื่อ V_1 และ V_2 คือ ปริมาตรของแก๊สที่มีอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ ที่ความดันและจำนวนโมลคงที่

ตัวอย่าง 3

แก๊สไนโตรเจน (N_2) ในกระบอกสูบปิด ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน เมื่อทำให้อุณหภูมิลดลงเป็น 273 เคลวิน โดยความดันของแก๊สไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรสุดท้ายของแก๊สเป็นเท่าใด

วิธีทำ

จาก $$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

แทนค่าจะได้ $\frac{250\ \text{mL}}{373\ \text{K}} = \frac{V_2}{273\ \text{K}}$

$$V_2 = \frac{(250\ \text{mL})(273\ \cancel{\text{K}})}{373\ \cancel{\text{K}}}$$

$$= 183\ \text{mL}$$

ดังนั้น แก๊สมีปริมาตร 183 มิลลิลิตร

ตัวอย่าง 4

แก๊สชนิดหนึ่งมีความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส บรรจุไว้ในภาชนะที่ยืดหยุ่นได้ เมื่อนำภาชนะบรรจุแก๊สนี้ไปจุ่มลงในของเหลวที่กำลังเดือด ที่ความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะขยายตัวจาก 70.0 มิลลิลิตร เป็น 90.0 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิกี่องศาเซลเซียส

วิธีทำ

จาก $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{70.0\ \text{mL}}{(2 + 273)\ \text{K}} = \frac{90.0\ \text{mL}}{T_2}$

$$T_2 = \frac{(90.0\ \cancel{\text{mL}})(275\ \text{K})}{70.0\ \cancel{\text{mL}}}$$

$$= 354\ \text{K}$$

เปลี่ยนหน่วยอุณหภูมิให้เป็นองศาเซลเซียสจะได้

$$T(^\circ\text{C}) = 354 - 273\ ^\circ\text{C}$$

$$= 81\ ^\circ\text{C}$$

ดังนั้น แก๊สมีอุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส

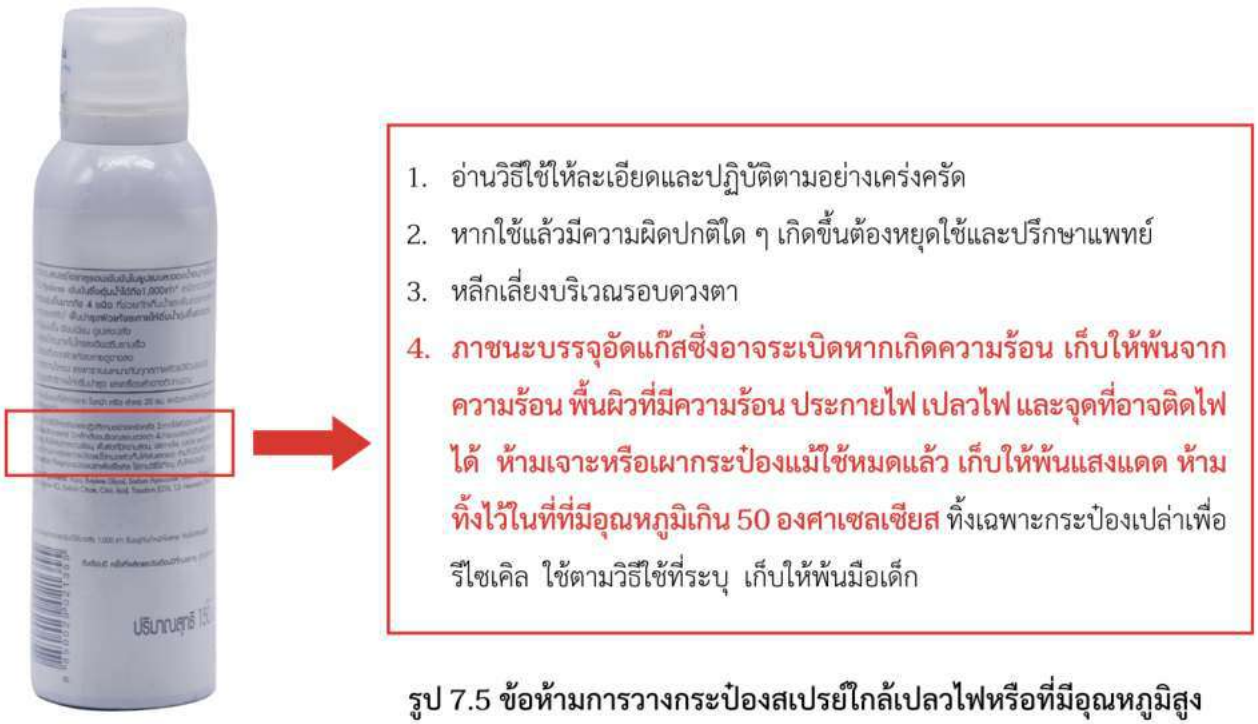
ตรวจสอบความเข้าใจ

1. ถ้าต้องการให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่งที่ความดันคงที่ ต้องทำให้อุณหภูมิของแก๊สเป็นกี่องศาเซลเซียส
2. ถ้าบรรจุแก๊สฮีเลียมในลูกโป่ง 10.0 ลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แล้วนำลูกโป่งนี้ไปไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส ลูกโป่งจะมีขนาดเท่าใด ถ้ากำหนดให้ความดันภายในลูกโป่งคงที่

7.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของแก๊ส

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับความดันของแก๊สตามกฎของบอยล์ และปริมาตรกับอุณหภูมิของแก๊สตามกฎของชาร์ลแล้ว ความดันกับอุณหภูมิของแก๊สยังมีความสัมพันธ์กันด้วย เช่น ข้อความที่ระบุบนกระป๋องสเปรย์ว่า ห้ามวางใกล้เปลวไฟหรือที่มีอุณหภูมิสูงเพราะอาจทำให้กระป๋องสเปรย์ระเบิดได้

นักเรียนคิดว่า ความดันภายในกระป๋องสเปรย์ก่อนการระเบิดเป็นอย่างไร



รูป 7.5 ข้อห้ามการวางกระป๋องสเปรย์ใกล้เปลวไฟหรือที่มีอุณหภูมิสูง

หากนำกระป๋องสเปรย์ซึ่งมีแก๊สบรรจุอยู่วางไว้ใกล้เปลวไฟจะทำให้อุณหภูมิของแก๊สภายในกระป๋องสูงขึ้นซึ่งตามกฎของชาร์ลแก๊สควรมีปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากผนังกระป๋องสเปรย์ไม่สามารถขยายตัวได้ ดังนั้น ความดันภายในกระป๋องจึงเพิ่มขึ้นจนอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ เนื่องจากจำนวนโมลของแก๊สภายในกระป๋องคงที่ ดังนั้นความดันและอุณหภูมิของแก๊สจึงมีความสัมพันธ์กัน ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของแก๊สชนิดหนึ่ง ที่ปริมาตรและจำนวนโมลคงที่ แสดงดังตาราง 7.2

ตาราง 7.2 ความดัน อุณหภูมิ และอัตราส่วนความดันต่ออุณหภูมิ เมื่อปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊สคงที่

ความดัน (P) mmHg	อุณหภูมิ (T)		$\frac{P}{T}$	
	(°C)	K	mmHg /°C	mmHg /K
703	0	273	-	2.57
753	20	293	38	2.57
805	40	313	20	2.57
856	60	333	14	2.57
908	80	353	11	2.57
959	100	373	9.6	2.57

จากตาราง 7.2 สรุปได้ว่า เมื่อปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊สคงที่ อัตราส่วนความดันต่ออุณหภูมิในหน่วยเคลวินเป็นค่าคงที่ ดังนั้น ความดัน (P) แปรผันตรงกับอุณหภูมิ (T) ในหน่วยเคลวิน ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า **กฎของเกย์-ลูสแซก** (Gay-Lussac's law) ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$P \propto T$$
$$P = \text{ค่าคงที่} \times T$$
$$\frac{P}{T} = \text{ค่าคงที่}$$

ความสัมพันธ์ตามกฎของเกย์-ลูสแซก อาจเขียนอยู่ในรูปที่สามารถใช้คำนวณหาความดันหรืออุณหภูมิของแก๊สที่สองสภาวะได้ดังนี้

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

ตัวอย่าง 5

กระป๋องสเปรย์ปรับอากาศซึ่งมีความดัน 103 กิโลปาสคาล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถูกโยนใส่ในกองไฟจนมีอุณหภูมิ 928 องศาเซลเซียส ภายในกระป๋องจะมีความดันกี่กิโลปาสคาล

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{103\ \text{kPa}}{(25 + 273)\ \text{K}} = \frac{P_2}{(928 + 273)\ \text{K}}$

$$P_2 = \frac{(103\ \text{kPa})(1201\ \cancel{\text{K}})}{298\ \cancel{\text{K}}}$$

$$= 415\ \text{kPa}$$

ดังนั้น ภายในกระป๋องจะมีความดัน 415 กิโลปาสคาล

ตัวอย่าง 6

แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะเหล็กหนาทรงกระบอกขนาด 2.0 ลิตร ที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนได้ความดันเป็น 1500 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิสุดท้ายของแก๊สชนิดนี้เป็นกี่องศาเซลเซียส

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{760\ \text{mmHg}}{(25 + 273)\ \text{K}} = \frac{1500\ \text{mmHg}}{T_2}$

$$T_2 = \frac{(1500\ \cancel{\text{mmHg}})(298\ \text{K})}{760\ \cancel{\text{mmHg}}}$$

$$= 588\ \text{K}$$

เปลี่ยนอุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส

$$T_2 = 588 - 273\ ^\circ\text{C}$$
$$= 315\ ^\circ\text{C}$$

ดังนั้น อุณหภูมิสุดท้ายของแก๊สชนิดนี้เท่ากับ 315 องศาเซลเซียส

ตรวจสอบความเข้าใจ

หลอดไฟที่บรรจุแก๊สมีสกุลที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส มีความดันภายในหลอด 0.74 บรรยากาศ เมื่อหลอดไฟให้แสงสว่าง อุณหภูมิอาจสูงถึง 418 เคลวิน จงคำนวณความดันภายในหลอดไฟที่อุณหภูมิดังกล่าว

7.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิของแก๊ส

เมื่อจำนวนโมล (n) ของแก๊สคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (V) ความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) ในหน่วยเคลวิน สามารถพิจารณาได้ดังนี้

จากกฎของบอยล์ $V \propto \frac{1}{P}$ เมื่อ T และ n คงที่

จากกฎของชาร์ล $V \propto T$ เมื่อ P และ n คงที่

จากกฎของเกย์-ลูสแซก $P \propto T$ เมื่อ V และ n คงที่

เมื่อรวมกฎของบอยล์ กฎของชาร์ล และกฎของเกย์-ลูสแซก จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V \propto \frac{T}{P}$$

$$V = \frac{T}{P} \times \text{ค่าคงที่}$$

$$\frac{PV}{T} = \text{ค่าคงที่}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน และอุณหภูมินี้ เรียกว่า **กฎรวมแก๊ส** (combined gas law) ซึ่งอาจเขียนอยู่ในรูปที่สามารถใช้คำนวณปริมาตร ความดัน หรืออุณหภูมิของแก๊สที่สองสภาวะได้ดังนี้

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

ตัวอย่าง 7

ลูกโป่งบรรจุแก๊สฮีเลียมปริมาตร 30 ลิตร ที่ความดัน 1.5 บรรยากาศ ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาตรของลูกโป่งนี้จะเป็นเท่าใดที่ STP

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{(1.5\text{ atm})(30\text{ L})}{(40 + 273)\text{ K}} = \frac{(1.0\text{ atm})(V_2)}{273\text{ K}}$

$$V_2 = \frac{(1.5\ \cancel{\text{atm}})(30\text{ L})(273\ \cancel{\text{K}})}{(313\ \cancel{\text{K}})(1.0\ \cancel{\text{atm}})}$$

$$= 39\text{ L}$$

ดังนั้น ลูกโป่งจะมีปริมาตร 39 ลิตร ที่ STP

ตัวอย่าง 8

แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ความดัน 1.00 บรรยากาศ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถ้าแก๊สชนิดนี้มีปริมาตรและความดันเปลี่ยนเป็น 1150 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 900 มิลลิเมตรปรอท ตามลำดับ จงหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วยองศาเซลเซียส

วิธีทำ

จาก $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

แทนค่าจะได้

$$\frac{\left(1.00\ \text{atm} \times \frac{760\ \text{mmHg}}{1\ \text{atm}}\right)(1000\ \text{cm}^3)}{(0 + 273)\ \text{K}} = \frac{(900\ \text{mmHg})(1150\ \text{cm}^3)}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{(900\ \cancel{\text{mmHg}})(1150\ \cancel{\text{cm}^3})(273\ \text{K})}{(760\ \cancel{\text{mmHg}})(1000\ \cancel{\text{cm}^3})}$$

$$= 372\ \text{K}$$

จาก $T(\text{K}) = T(^\circ\text{C}) + 273$

$T(^\circ\text{C}) = 372 - 273 = 99\ ^\circ\text{C}$

ดังนั้น อุณหภูมิของแก๊สเปลี่ยนแปลงไป 99 องศาเซลเซียส

ตรวจสอบความเข้าใจ

เมื่อปล่อยลูกโป่งที่มีปริมาตร 6.0 ลิตร ความดัน 1.0 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสขึ้นไปสู่บรรยากาศชั้นบนซึ่งมีความดัน 0.50 บรรยากาศ และอุณหภูมิ -23 องศาเซลเซียส ลูกโป่งจะมีปริมาตรเท่าใด

7.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร และจำนวนโมลของแก๊ส

ปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊สมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 7.4 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊ส

จุดประสงค์การทดลอง

ทดลองและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊ส

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.50 mol/L
3. ลูกโป่ง ขนาด 10 นิ้ว
4. ขวดรูปกรวยขนาด 125 mL
5. กระดาษชั่งสาร
6. กรวยกรอง
7. ช้อนตักสาร
8. บีกเกอร์ขนาด 250 mL
9. กระบอกตวง ขนาด 50 mL
10. หลอดหยด
11. ปากกาเขียนป้าย

วิธีทดลอง

1. นำลูกโป่งที่ตรวจสอบแล้วว่าไม่รั่วจำนวน 3 ลูก มาเขียนหมายเลขกำกับลูกโป่งแต่ละลูก (หมายเลข 1–3)
2. ชั่ง $NaHCO_3$ บนกระดาษชั่งสารปริมาณตามที่กำหนดในตาราง

หมายเลขลูกโป่ง	1	2	3
มวล $NaHCO_3$ (g)	0.10	0.50	1.00

เท $NaHCO_3$ ใส่ลงในลูกโป่งแต่ละหมายเลขผ่านกรวยกรองจนหมด

3. ใส่ HCl 0.50 mol/L ปริมาตร 50.0 mL ลงในขวดรูปกรวยแต่ละขวด
4. ไล่อากาศในลูกโป่งที่เตรียมไว้ในข้อ 2 จากนั้นครอบปากลูกโป่งเข้ากับปากขวดรูปกรวยในข้อ 3 แล้วเขย่าลูกโป่งให้ $NaHCO_3$ ทั้งหมดตกลงมาทำปฏิกิริยากับ HCl ในขวดรูปกรวย เขย่าขวดรูปกรวยเพื่อให้สารทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบปริมาตรของลูกโป่งทั้ง 3 ลูก บันทึกผล

คำถามท้ายการทดลอง

1. สมการเคมีของปฏิกิริยาระหว่าง $NaHCO_3$ และ HCl เป็นอย่างไร
2. จำนวนโมลของแก๊สที่เกิดขึ้นในลูกโป่งแต่ละหมายเลขเท่ากันหรือไม่ ทราบได้อย่างไร
3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและจำนวนโมลของแก๊สเป็นอย่างไร

จากกิจกรรม 7.4 จะเห็นว่า จำนวนโมลกับปริมาตรของแก๊สมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้มีการศึกษาไว้แล้วโดย อเมเดโอ อาโวกาโดร (Amaedeo Avogadro) ซึ่งต่อมาได้ตั้งเป็นกฎเรียกว่า **กฎของอาโวกาโดร** (Avogadro's law) ซึ่งกล่าวว่า เมื่อความดันและอุณหภูมิของแก๊สคงที่ ปริมาตร (V) จะแปรผันตรงกับจำนวนโมล (n) ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V &\propto n \\ V &= \text{ค่าคงที่} \times n \\ \frac{V}{n} &= \text{ค่าคงที่} \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ตามกฎของอาโวกาโดร อาจเขียนอยู่ในรูปที่สามารถใช้คำนวณหาปริมาตร หรือจำนวนโมลของแก๊สที่สองสภาวะได้ดังนี้

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$$

เมื่อ V_1 และ V_2 คือ ปริมาตรของแก๊สที่มีจำนวนโมล n_1 และ n_2 ตามลำดับ ที่ความดันและอุณหภูมิคงที่

ตัวอย่าง 9

เมื่อบรรจุแก๊สฮีเลียม 2.0 โมล ในลูกโป่งจะทำให้ลูกโป่งมีปริมาตร 50 ลิตร ถ้าบรรจุแก๊สฮีเลียมลงไปในลูกโป่งเรื่อย ๆ จนมีปริมาตร 150 ลิตร โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน ลูกโป่งนี้จะมีแก๊สฮีเลียมบรรจุอยู่กี่โมล

วิธีทำ

จาก $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{50\ \text{L}}{2.0\ \text{mol}} = \frac{150\ \text{L}}{n_2}$

$$n_2 = \frac{(150\ \cancel{\text{L}})(2.0\ \text{mol})}{50\ \cancel{\text{L}}}$$

$$= 6.0\ \text{mol}$$

ดังนั้น ลูกโป่งนี้จะมีแก๊สฮีเลียมบรรจุอยู่ 6.0 โมล

ตัวอย่าง 10

ห่วงยางปริมาตร 5.0 ลิตร มีแก๊สไนโตรเจน (N_2) บรรจุอยู่ 0.35 โมล เมื่อเติมแก๊สไนโตรเจนจนมีจำนวน 0.70 โมล ปริมาตรของแก๊สในห่วงยางเป็นเท่าใด

วิธีทำ

จาก $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$

แทนค่าจะได้ $\frac{5.0\ \text{L}}{0.35\ \text{mol}} = \frac{V_2}{0.70\ \text{mol}}$

$$V_2 = \frac{(5.0\ \text{L})(0.70\ \cancel{\text{mol}})}{0.35\ \cancel{\text{mol}}}$$

$$= 10\ \text{L}$$

ดังนั้น ห่วงยางมีปริมาตร 10 ลิตร

ตรวจสอบความเข้าใจ

เมื่อบรรจุแก๊สอาร์กอนจำนวน 2.0 โมลในกระบอกสูบที่มีก้านกระบอกสูบเคลื่อนที่ได้ จะมีปริมาตร 3.0 ลิตร ถ้าเติมแก๊สอาร์กอนเพิ่มไปอีก 1.0 โมล ปริมาตรของแก๊สในกระบอกสูบจะเป็นกี่ลิตร กำหนดให้อุณหภูมิและความดันของแก๊สไม่เปลี่ยนแปลง

แบบฝึกหัด 7.1

1. แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุอยู่ในกระบอกสูบขนาด 1.5 ลิตร จะต้องเลื่อนก้านกระบอกสูบให้มีปริมาตรเป็นเท่าใด จึงจะทำให้แก๊สชนิดนี้มีความดันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า
2. ปั๊มแก๊ส NGV มีแก๊สบรรจุอยู่ในถังขนาด 1.00×10^4 ลิตร ที่ความดัน 300 บาร์ จะสามารถเติมแก๊สให้กับรถยนต์ที่มีถังแก๊สขนาด 70.0 ลิตร ให้มีความดันเป็น 150 บาร์ ได้จำนวนกี่คัน โดยความดันสุดท้ายของแก๊สในถังที่ปั๊มแก๊สต้องไม่น้อยกว่าความดันในถังแก๊สของรถยนต์
3. ขวดน้ำพลาสติกบรรจุน้ำร้อนครึ่งหนึ่งแล้วปิดฝาให้สนิท เมื่อวางไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องพบว่า ขวดมีลักษณะบิดเบี้ยว นักเรียนคิดว่าเป็นเพราะเหตุใด
4. แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 22.4 ลิตร ที่ STP แก๊สนี้จะมีปริมาตรเท่าใดที่ 25 องศาเซลเซียส ถ้ากำหนดให้ความดันของแก๊สคงที่
5. ภาชนะปิดปริมาตรคงที่ขนาด 20.00 ลิตร สามารถทนแรงดันได้สูงสุดเท่ากับ 1.52×10^4 มิลลิเมตรปรอท ถ้านำภาชนะนี้มาบรรจุแก๊สที่มีความดัน 10.00 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ภาชนะนี้จะทนอุณหภูมิได้สูงสุดเท่าใดในหน่วยองศาเซลเซียส
6. พิจารณาข้อมูลจากการทดลองวัดความดัน และอุณหภูมิของแก๊สชนิดหนึ่งที่บรรจุในกระบอกสูบซึ่งคงปริมาตรไว้ที่ 22.4 ลิตร ได้ผลการทดลองดังนี้

การทดลองที่	ความดัน (mmHg)	อุณหภูมิ (°C)
1	760	25
2	806	43
3	707	4

6.1 การทดลองนี้สอดคล้องกับกฎใด เพราะเหตุใด

6.2 ถ้าทำให้ก้านกระบอกสูบเคลื่อนที่จนแก๊สนี้มีความดัน 1.50 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แก๊สนี้จะมีปริมาตรเป็นเท่าใด

6.3 ถ้ากดก้านกระบอกสูบให้มีปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่งของปริมาตรเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แก๊สนี้จะมีความดันเท่าใด

7. เรือเหาะลำหนึ่งจะลอยขึ้นสู่อากาศได้เมื่อมีแก๊สฮีเลียมบรรจุอยู่ 5500 ลิตร ถ้าแก๊สฮีเลียม 110 โมล มีปริมาตร 2620 ลิตร จะต้องเติมฮีเลียมอีกกี่โมลเพื่อทำให้เรือเหาะนี้ลอยได้ ถ้าอุณหภูมิและความดันขณะเติมคงที่

7.2 กฎแก๊สอุดมคติ และความดันย่อย

7.2.1 กฎแก๊สอุดมคติ

แก๊สที่มีสมบัติเป็นไปตามกฎรวมแก๊สและกฎของอาโวกาโดร สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (V) ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) ในหน่วยเคลวิน และจำนวนโมล (n) ของแก๊ส ได้ดังนี้

จากกฎรวมแก๊ส $V \propto \frac{T}{P}$ เมื่อ n คงที่

จากกฎของอาโวกาโดร $V \propto n$ เมื่อ T และ P คงที่

ดังนั้น

$$V \propto \frac{nT}{P}$$

$$V = \text{ค่าคงที่} \times \frac{nT}{P}$$

กำหนดให้ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส[2] ดังนั้น

$$V = R \times \frac{nT}{P}$$

โดยทั่วไปเขียนในรูปของสมการ ดังนี้

$$PV = nRT$$

[2]ค่าคงที่ของแก๊ส ใช้สัญลักษณ์ R เพื่อเป็นเกียรติให้แก่ ออง รี วิกเตอร์ เรโญลต์ (Henri Victor Regnault) นักเคมีชาวฝรั่งเศส

แก๊สใด ๆ ที่มีสมบัติเป็นไปตามสมการข้างต้นจัดเป็น **แก๊สอุดมคติ** (ideal gas) และสมการดังกล่าว เรียกว่า **กฎแก๊สอุดมคติ** (ideal gas law)

ชวนคิด

จากความรู้เรื่องปริมาตรของแก๊สที่ STP จะคำนวณค่าคงที่ของแก๊สได้อย่างไร

ค่าคงที่ของแก๊สที่ใช้ในการคำนวณในบทนี้และบทอื่น ๆ ใช้ค่าเท่ากับ 0.0821 $L \cdot atm \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ทั้งนี้หากตัวแปรที่เกี่ยวข้องใช้หน่วยอื่น ตัวเลขค่าคงที่ของแก๊สจะเปลี่ยนไปขึ้นกับหน่วยที่ใช้ เช่น ในหน่วยเอสไอมีค่า 8.314 $m^3 \cdot Pa \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ หรือ 8.314 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$

ตัวอย่าง 11

บรรจุแก๊สออกซิเจน 0.885 กิโลกรัม ไว้ในถังเหล็กกล้าซึ่งมีปริมาตร 438 ลิตร จงคำนวณความดันของแก๊สออกซิเจนในถังนี้ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

วิธีทำ

จาก $$PV = nRT$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

แทนค่าจะได้

$$P = \frac{\left(0.885\ \cancel{kg} \times \frac{1000\ \cancel{g}}{1\ \cancel{kg}} \times \frac{1\ \cancel{mol}}{32.00\ \cancel{g}}\right)\left(0.0821\ \frac{\cancel{L} \cdot atm}{\cancel{mol} \cdot \cancel{K}}\right)(21 + 273\ \cancel{K})}{438\ \cancel{L}}$$

$$= 1.52\ atm$$

ดังนั้น แก๊สออกซิเจนมีความดัน 1.52 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง 12

ถังแก๊สมีเทนปริมาตร 3.20×10^5 ลิตร บรรจุแก๊สที่ความดัน 150 บรรยากาศ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ในถังแก๊สนี้มีแก๊สมีเทนอยู่กี่กิโลกรัม

วิธีทำ

จาก $PV = nRT$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

แทนค่าจะได้ $$n = \frac{(150\ \text{atm})(3.20 \times 10^5\ \text{L})}{(0.0821\ \text{L·atm/mol·K})(45 + 273\ \text{K})}$$

$$= 1.84 \times 10^6\ \text{mol}$$

หามวล (m) ของ CH_4 ได้ดังนี้

$$m = 1.84 \times 10^6\ \text{mol} \times \frac{16.05\ \text{g}}{1\ \text{mol}} \times \frac{1\ \text{kg}}{1000\ \text{g}}$$

$$= 2.95 \times 10^4\ \text{kg}$$

ดังนั้น ในถังแก๊สนี้มีแก๊สมีเทนอยู่ 2.95×10^4 กิโลกรัม

ตัวอย่าง 13

แก๊สออกซิเจน 1.0 โมล ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส ความดัน 3.45 บรรยากาศ มีความหนาแน่นเท่าใด

วิธีทำ

จาก $PV = nRT$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

แทนค่าจะได้ $$V = \frac{(1.0\ \text{mol})(0.0821\ \text{L·atm/mol·K})(62 + 273\ \text{K})}{3.45\ \text{atm}}$$

$$= 8.0\ \text{L}$$

หาความหนาแน่น (d) ของแก๊ส O_2 ได้ดังนี้

$$d = \frac{32.00\ \text{g}}{8.0\ \text{L}}$$

$$= 4.0\ \text{g/L}$$

ดังนั้น แก๊สออกซิเจนมีความหนาแน่น 4.0 กรัมต่อลิตร

ตัวอย่าง 14

แก๊สชนิดหนึ่งมีมวล 1.50 กรัม บรรจุอยู่ในภาชนะ 0.250 ลิตร ที่ความดัน 1.61 บรรยากาศ อุณหภูมิ 300 เคลวิน แก๊สชนิดนี้มีมวลต่อโมลเท่าใด

วิธีทำ

จาก $PV = nRT$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

แทนค่าจะได้ $$n = \frac{(1.61\ \cancel{\text{atm}})(0.250\ \cancel{\text{L}})}{(0.0821\ \cancel{\text{L}}\cdot\cancel{\text{atm}}/\text{mol}\cdot\cancel{\text{K}})(300\ \cancel{\text{K}})}$$

$$= 0.0163\ \text{mol}$$

หามวลต่อโมลของแก๊สได้ดังนี้

$$\text{มวลต่อโมล} = \frac{1.50\ \text{g}}{0.0163\ \text{mol}}$$

$$= 92.0\ \text{g/mol}$$

ดังนั้น มวลต่อโมลของแก๊สชนิดนี้เท่ากับ 92.0 กรัมต่อโมล

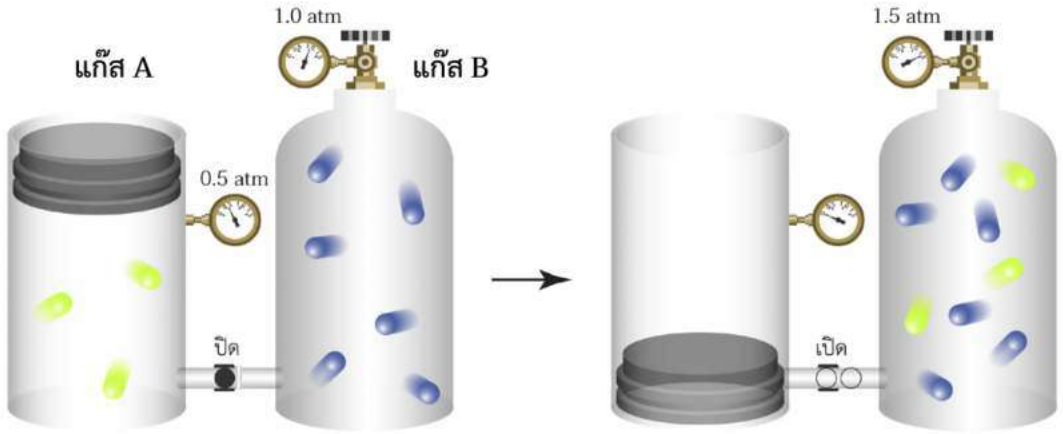
ตรวจสอบความเข้าใจ

1. การเติมแก๊สไนโตรเจนในยางรถยนต์ที่มีความจุ 12 ลิตร ให้มีความดัน 29.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ต้องใช้แก๊สไนโตรเจนกี่กรัม
2. ยางรถยนต์เส้นหนึ่งมีปริมาตร 10 ลิตร อัดอากาศจนมีความดัน 32 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งพบว่า ความดันลดลงเหลือ 28 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิเดียวกัน จำนวนโมลของอากาศที่รั่วออกจากยางรถยนต์เป็นเท่าใด เมื่อกำหนดให้ยางรถยนต์มีปริมาตรคงที่
3. ภาชนะใบหนึ่งมีขนาด 5.0 ลิตร บรรจุแก๊สชนิดหนึ่งได้ 3.25 กรัม ที่ความดัน 1.0 บรรยากาศ อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มวลต่อโมลของแก๊สชนิดนี้เป็นเท่าใด

7.2.2 ความดันย่อยของแก๊ส

ในธรรมชาติแก๊สส่วนใหญ่อยู่รวมกันเป็นแก๊สผสม เช่น อากาศ ประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นหลัก นักเรียนคิดว่า ความดันของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศเท่ากับความดันบรรยากาศหรือไม่ อย่างไร

จอห์น ดอลตัน ได้ศึกษาความสัมพันธ์เกี่ยวกับความดันของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สผสม โดยทดลองเติมไอน้ำเข้าไปในอากาศแห้งในภาชนะปิดที่มีปริมาตรคงที่ พบว่า ความดันภายในภาชนะเท่ากับผลรวมของความดันของอากาศและความดันของไอน้ำที่เติมเข้าไป จึงได้สรุปว่า ความดันของแก๊สผสมที่ไม่ทำปฏิกิริยากันมีค่าเท่ากับผลรวมของความดันของแก๊สแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า **กฎความดันย่อยของดอลตัน** (Dalton's law of partial pressures) แสดงได้ดังรูป 7.6



รูป 7.6 ความดันของแก๊สผสมที่เป็นไปตามกฎความดันย่อยของดอลตัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวมของแก๊สผสม (P_{total}) และความดันของแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งเรียกว่าความดันย่อย (P_1 , P_2 ,.... P_i) ตามกฎความดันย่อยของดอลตัน เขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{total} = P_1 + P_2 + ... + P_i$$

จากความสัมพันธ์ตามกฎแก๊สอุดมคติ จะได้ความดันรวมของแก๊สผสมกับจำนวนโมลของแก๊สดังสมการ

$$P_{total} = \frac{n_1RT}{V} + \frac{n_2RT}{V} + ... + \frac{n_iRT}{V}$$

$$= \frac{(n_1 + n_2 + ... + n_i)RT}{V}$$

$$= \frac{n_{total}RT}{V}$$

แสดงว่า เมื่ออุณหภูมิและปริมาตรคงที่ ความดันของแก๊สผสมจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโมลของแก๊ส

ตัวอย่าง 15

ถ้าผสมแก๊สฮีเลียม 4.00 กรัม และแก๊สอาร์กอน 7.99 กรัม ในภาชนะขนาด 10.0 ลิตร ที่อุณหภูมิ 25.0 องศาเซลเซียส ความดันของแก๊สผสมเป็นกี่บรรยากาศ

วิธีทำ

คำนวณจำนวนโมลของแก๊สแต่ละชนิด

$$\text{จำนวนโมลของแก๊สฮีเลียม} = 4.00 \cancel{\text{g He}} \times \frac{1 \text{ mol He}}{4.00 \cancel{\text{g He}}} = 1.00 \text{ mol He}$$

$$\text{จำนวนโมลของแก๊สอาร์กอน} = 7.99 \cancel{\text{g Ar}} \times \frac{1 \text{ mol Ar}}{39.95 \cancel{\text{g Ar}}} = 0.200 \text{ mol Ar}$$

คำนวณความดันของแก๊สผสม

$$P_{\text{total}} = \frac{n_{\text{total}}RT}{V}$$

$$= \frac{(n_{\text{He}} + n_{\text{Ar}})RT}{V}$$

$$= \frac{(1.00 + 0.200 \cancel{\text{mol}})(0.0821 \cancel{\text{L}}\cdot\text{atm}/\cancel{\text{mol}}\cdot\cancel{\text{K}})(25.0 + 273 \cancel{\text{K}})}{10.0 \cancel{\text{L}}}$$

$$= 2.94 \text{ atm}$$

ดังนั้น ความดันของแก๊สผสมเท่ากับ 2.94 บรรยากาศ

ในการวัดความดันของแก๊สผสมค่าที่วัดได้เป็นความดันรวม ในขณะที่ความดันของแก๊สแต่ละชนิดไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการ ดังต่อไปนี้

จาก

$$P_{\text{i}} = \frac{n_{\text{i}}RT}{V}$$

$$P_{\text{total}} = \frac{n_{\text{total}}RT}{V}$$

ได้อัตราส่วนความดันย่อยต่อความดันรวมดังนี้

$$\frac{P_i}{P_{total}} = \frac{n_i RT/V}{n_{total} RT/V}$$

$$= \frac{n_i}{n_{total}}$$

$$P_i = \frac{n_i}{n_{total}} P_{total}$$

$$P_i = X_i P_{total}$$

เมื่อ X_i คือ เศษส่วนโมล (mole fraction) ของแก๊สแต่ละชนิด มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และผลรวมของเศษส่วนโมลของแก๊สทุกชนิดที่เป็นองค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 1

ตัวอย่าง 16

ถ้าแก๊สผสมที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน 2.02 กรัม และแก๊สฮีเลียม 12.00 กรัม ที่อุณหภูมิ 25.0 องศาเซลเซียส มีความดันรวม 8.00 บรรยากาศ ความดันของแก๊สแต่ละชนิดเป็นเท่าใด

วิธีทำ

คำนวณจำนวนโมลของแก๊สแต่ละชนิด

$$\text{จำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจน} = 2.02 \cancel{\text{ g } H_2} \times \frac{1 \text{ mol } H_2}{2.02 \cancel{\text{ g } H_2}} = 1.00 \text{ mol } H_2$$

$$\text{จำนวนโมลของแก๊สฮีเลียม} = 12.00 \cancel{\text{ g He}} \times \frac{1 \text{ mol He}}{4.00 \cancel{\text{ g He}}} = 3.00 \text{ mol He}$$

คำนวณเศษส่วนโมลของแก๊สแต่ละชนิด

เศษส่วนโมลของ H_2

$$X_{H_2} = \frac{1.00 \text{ mol } H_2}{1.00 \text{ mol } H_2 + 3.00 \text{ mol He}} = 0.250$$

เศษส่วนโมลของ He

$$X_{He} = \frac{3.00 \text{ mol He}}{1.00 \text{ mol } H_2 + 3.00 \text{ mol He}} = 0.750$$

หาความดันของแก๊สแต่ละชนิด

ความดันของแก๊สผสมภายในถัง = 8.00 atm

จาก $P_i = X_i P_{total}$

$P_{H_2} = 0.250 \times 8.00 \text{ atm} = 2.00 \text{ atm}$

$P_{He} = 0.750 \times 8.00 \text{ atm} = 6.00 \text{ atm}$

ดังนั้น แก๊สไฮโดรเจนมีความดันเท่ากับ 2.00 บรรยากาศ และแก๊สฮีเลียมมีความดันเท่ากับ 6.00 บรรยากาศ

แก๊สผสมชนิดหนึ่งประกอบด้วยแก๊ส Y และแก๊ส Z โดยความดันของแก๊ส Y เท่ากับ 0.5 บรรยากาศ และความดันของแก๊ส Z เท่ากับ 1.0 บรรยากาศ ถ้ามีแก๊ส Y อยู่ 3 โมล จะมีแก๊ส Z อยู่กี่โมล

วิธีทำ

จาก $P_Y = X_Y P_{total}$

$$= \frac{n_Y}{n_Y + n_Z}(P_Y + P_Z)$$

$$\frac{n_Y}{n_Y + n_Z} = \frac{P_Y}{P_Y + P_Z}$$

แทนค่าจะได้

$$\frac{3 \text{ mol}}{3 \text{ mol} + n_Z} = \frac{0.5 \text{ atm}}{0.5 \text{ atm} + 1.0 \text{ atm}}$$

$$n_Z = 6 \text{ mol}$$

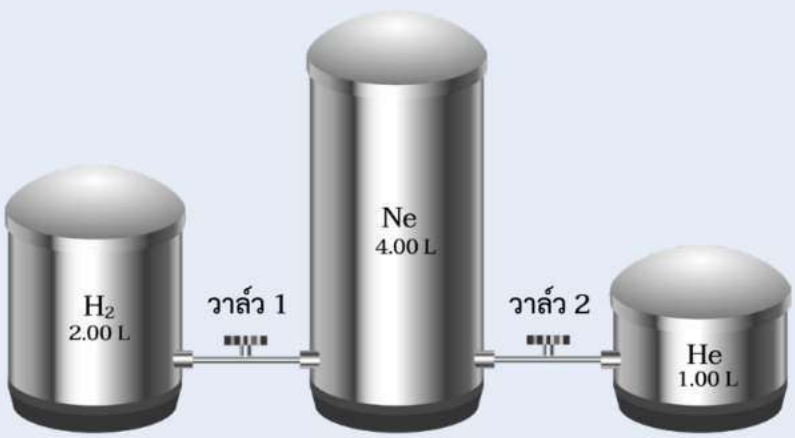
ดังนั้น ในแก๊สผสมจะมีแก๊ส Z อยู่ 6 โมล

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. ถ้าผสมแก๊สไฮโดรเจน (H_2) 1.00 กรัม แก๊สฮีเลียม (He) 2.60 กรัม และแก๊สอาร์กอน (Ar) 11.19 กรัม ในภาชนะขนาด 10.0 ลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จงคำนวณความดันรวมของแก๊สผสม
2. ในถังอากาศดำน้ำจะอัดอากาศผสมที่เรียกว่า Enriched Air Nitrox (EANx) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนจนมีความดัน 200 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ้า Enriched Air Nitrox ถังหนึ่งมีขนาด 11.5 ลิตร และมีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 32 โดยปริมาตร ความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดมีค่าเท่าใด

แบบฝึกหัด 7.2

1. แก๊สชนิดหนึ่งมีมวลต่อโมลเท่ากับ 48.0 กรัมต่อโมล แก๊สชนิดนี้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1.0 บรรยากาศ มีความหนาแน่นเท่าใด
2. อากาศที่ระดับน้ำทะเลที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความดัน 1.00 บรรยากาศ มีความหนาแน่นประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อากาศที่ระดับความสูง 10 กิโลเมตร ซึ่งมีอุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสและความดัน 0.26 บรรยากาศ มีความหนาแน่นเท่าใด
3. ถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจน นีออน และฮีเลียม ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป



ก่อนเปิดวาล์ว แก๊สไฮโดรเจน แก๊สนีออน และแก๊สฮีเลียมมีปริมาตร 2.00 4.00 และ 1.00 ลิตร ตามลำดับ และมีมวล 2.02 30.39 และ 2.00 กรัม ตามลำดับ

3.1 ความดันของแก๊สแต่ละชนิดก่อนเปิดวาวล์เป็นเท่าใด

3.2 เมื่อเปิดวาวล์ 1 และ 2 ความดันของแก๊สผสมเป็นเท่าใด

4. แก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ในภาชนะขนาด 0.50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีความดันรวม 1.0 บรรยากาศ เมื่อผ่านแก๊สผสมนี้ไปบนผงแคลเซียมออกไซด์อุ่น จะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาดังสมการเคมี

$$CaO(s) + SO_2(g) \longrightarrow CaSO_3(s)$$

เมื่อถ่ายเทแก๊สไนโตรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาไปสู่ลูกโป่ง ทำให้ลูกโป่งพองขึ้นจนมีปริมาตร 0.15 ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีความดัน 1.2 บรรยากาศ ความดันย่อยของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแก๊สผสมเป็นเท่าใด

7.3 ทฤษฎีจลน์และการแพร่ของแก๊ส

7.3.1 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

จากที่นักเรียนได้ศึกษาและทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊สมาแล้ว ความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ **ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส** (kinetic theory of gases) ซึ่งกล่าวไว้ดังนี้

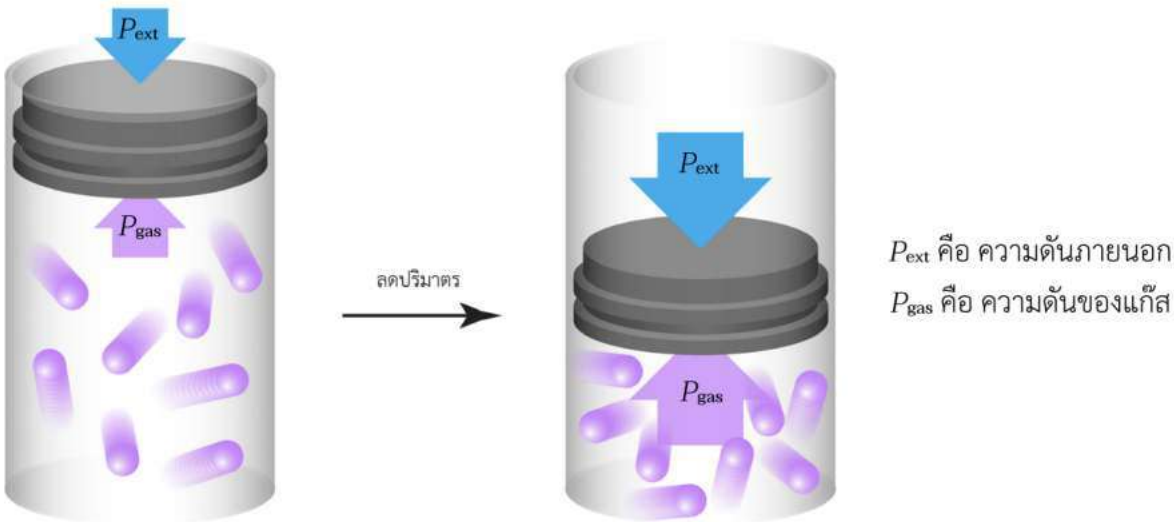
1. แก๊สประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก โดยปริมาตรของอนุภาคเหล่านั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ
2. อนุภาคแก๊สอยู่ห่างกันมาก และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยมากจนถือได้ว่าไม่มีแรงกระทำต่อกัน
3. แก๊สแต่ละอนุภาคเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางที่ไม่แน่นอนด้วยอัตราเร็วคงที่ที่แตกต่างกัน จึงมีพลังงานจลน์ไม่เท่ากัน เมื่อเกิดการชนกันจะมีการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานจลน์รวม ทำให้พลังงานจลน์เฉลี่ยมีค่าคงที่
4. พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับชนิดของแก๊ส ที่อุณหภูมิเดียวกัน แก๊สทุกชนิดมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อนุภาคแก๊สเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงทำให้พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สเพิ่มขึ้น

แก๊สอุดมคติมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีจลน์ของแก๊สทุกประการ สำหรับแก๊สทั่วไปมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติเมื่อมีอุณหภูมิสูงและความดันต่ำ

ทฤษฎีจลน์ของแก๊สอธิบายกฎต่าง ๆ ของแก๊สได้อย่างไร

กฎของบอยล์ ($V \propto \frac{1}{P}$)

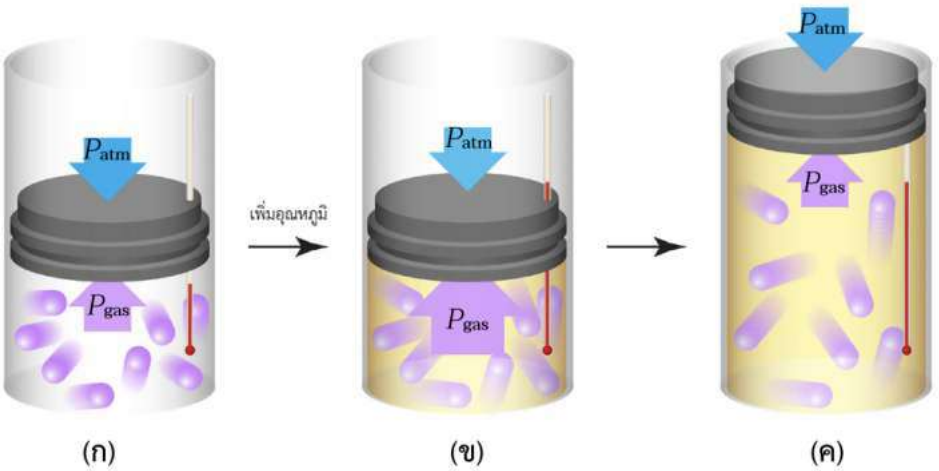
อนุภาคแก๊สมีขนาดเล็กมากและมีระยะห่างระหว่างอนุภาคมาก เมื่อลดปริมาตรภาชนะ เช่น การกดก้านกระบอกฉีดยา ในกิจกรรม 7.1 ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคแก๊สกับผนังภาชนะลดลง ความถี่ที่อนุภาคแก๊สชนกับผนังภาชนะจึงมากขึ้น ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น ดังรูป 7.7 ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มปริมาตรของภาชนะซึ่งทำให้ความดันของแก๊สลดลงสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน



รูป 7.7 ความดันของแก๊สเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาตร

กฎของเกย์-ลูสแซก ($P \propto T$) และกฎของชาร์ล ($V \propto T$)

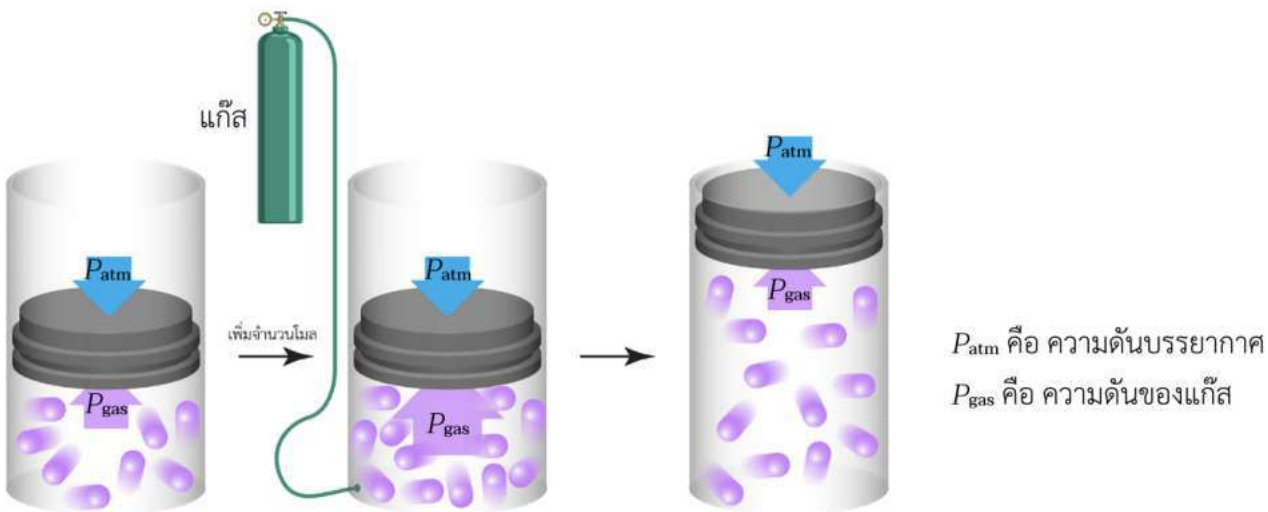
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อนุภาคแก๊สเคลื่อนที่เร็วขึ้นและมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น ดังนั้นความถี่ที่อนุภาคแก๊สชนกับผนังภาชนะจึงมากขึ้น ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น (กฎของเกย์-ลูสแซก) ดังรูป 7.8 (ข) แต่หากผนังภาชนะมีความยืดหยุ่น ความดันที่เกิดขึ้นจะทำให้ปริมาตรของภาชนะเพิ่มขึ้น เพื่อให้ความดันของแก๊สเท่ากับความดันเริ่มต้น (กฎของชาร์ล) ดังรูป 7.8 (ค)



รูป 7.8 ความดันและปริมาตรของแก๊สเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

กฎของอาโวกาโดร ($V \propto n$)

เมื่อจำนวนอนุภาคแก๊สในภาชนะเพิ่มขึ้น ความถี่ที่อนุภาคแก๊สชนกับผนังภาชนะจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น หากผนังภาชนะมีความยืดหยุ่น ความดันที่เกิดขึ้นจะทำให้ปริมาตรของภาชนะเพิ่มขึ้น เพื่อให้ความดันของแก๊สเท่ากับความดันเริ่มต้น ดังรูป 7.9



รูป 7.9 ความดันและปริมาตรของแก๊สเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนโมล

7.3.2 การแพร่ของแก๊ส

การส่งกลิ่นหอมของดอกไม้หรือน้ำหอมเกิดจากสารมีกลิ่นที่อยู่ในสถานะแก๊สเคลื่อนที่หรือแพร่ออกมา ซึ่งการแพร่ของแก๊สจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีพลังงานจลน์และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทางตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

แก๊สแต่ละชนิดแพร่ด้วยอัตราเร็วแตกต่างกันหรือไม่ ศึกษาได้จากการทดลองต่อไปนี้

กิจกรรม 7.5 การทดลองการแพร่ของแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดลองเพื่อศึกษาการแพร่ของแก๊สแอมโมเนียกับแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์
2. เปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊สแอมโมเนียกับแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์
3. บอกความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแพร่ของแก๊สกับมวลต่อโมลของแก๊ส

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
2. สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น (NH_3)
3. หลอดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 cm ยาวประมาณ 30 cm
4. สำลีที่พันกับไม้ที่เสียบอยู่กับจุกยางเบอร์ 1
5. บีกเกอร์ขนาด 50 mL
6. กระจกนาฬิกา
7. หลอดหยด
8. ที่ยึดหลอดแก้วหรือขาตั้งพร้อมที่จับ

วิธีทดลอง

1. นำหลอดแก้วที่แห้งและสะอาด ติดกับขาตั้งให้อยู่ในแนวระดับ
2. ชุบสำลีที่พันกับไม้ที่เสียบอยู่กับจุกยางเบอร์ 1 จำนวน 2 อัน อันหนึ่งชุบ NH_3 และอีกอันหนึ่งชุบ HCl
3. นำสำลีที่พันกับไม้ที่เสียบอยู่กับจุกยางเบอร์ 1 ที่เตรียมไว้จากข้อ 2 สอดเข้าไปในปลายหลอดแก้วด้านละอัน โดยสอดให้พร้อมกันทั้งสองด้าน ดังรูป

การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองการแพร่ของแก๊ส

4. สังเกตและทำเครื่องหมายตรงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น
5. วัดระยะทางจากปลายสำลีทั้งสองถึงตำแหน่งที่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง

คำถามท้ายการทดลอง

1. เขียนสมการเคมีอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหลอดแก้ว
2. แก๊สใดแพร่ได้เร็วกว่า และมีความสัมพันธ์กับมวลต่อโมลของแก๊สอย่างไร

จากการทดลองจะเห็นว่า แก๊สที่มีมวลต่อโมลต่างกันจะมีอัตราเร็วในการแพร่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากทฤษฎีจลน์ของแก๊สที่กล่าวว่า ที่อุณหภูมิเดียวกัน แก๊สทุกชนิดมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากัน และจากความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์ (E_k) กับมวล (m) และอัตราเร็ว (v) ตามสมการ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ จะเห็นว่า อนุภาคแก๊สที่มีมวลมาก จะมีอัตราเร็วในการแพร่น้อย

ทอมัส เกรแฮม (Thomas Graham) นักเคมีชาวสก็อตแลนด์ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแพร่และมวลต่อโมลของแก๊ส โดยให้แก๊สแพร่ผ่าน (effusion) รูเล็ก ๆ ไปยังบริเวณที่เป็นสุญญากาศ ซึ่งการทดลองโดยอาศัยการแพร่ผ่านนี้ ทำให้โมเลกุลแก๊สเคลื่อนที่ผ่านรูเล็ก ๆ โดยไม่เกิดการชนกันกับโมเลกุลข้างเคียงและการวัดอัตราการแพร่ผ่านสามารถทำได้แม่นยำกว่าการศึกษาการแพร่ซึ่งโมเลกุลแก๊สมีการชนกัน

จากการทดลอง เกรแฮม พบว่า ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่แพร่ผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรืออัตราการแพร่ผ่านของแก๊ส (r) แปรผกผันกับรากที่สองของมวลต่อโมล (M) เรียกว่า **กฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม** (Graham's law of effusion) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$r \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบอัตราการแพร่ผ่านของแก๊ส 2 ชนิด ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

ถึงแม้ว่า สมการดังกล่าวจะได้จากการศึกษาการแพร่ผ่านซึ่งอัตราการแพร่ผ่านมักมีหน่วยเป็นจำนวนอนุภาคที่แพร่ผ่านตำแหน่งที่กำหนดต่อเวลา แต่ก็สามารถใช้ในการประมาณอัตราการแพร่ของแก๊สโดยทั่วไปซึ่งมักวัดในหน่วยระยะทางต่อเวลาได้

ตัวอย่าง 18

แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไอน้ำให้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ถ้าปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และไอน้ำจากปลายแต่ละด้านของหลอดแก้วยาว 30 เซนติเมตร บริเวณที่แก๊สทั้งสองทำปฏิกิริยากันห่างจากปลายด้านที่ปล่อยไอน้ำกี่เซนติเมตร

วิธีทำ

คำนวณมวลต่อโมลของแก๊สแต่ละชนิด

มวลต่อโมลของ H_2O = $(2 \times 1.01) + (1 \times 16.00)$ = 18.02 g/mol

มวลต่อโมลของ SO_3 = $(1 \times 32.06) + (3 \times 16.00)$ = 80.06 g/mol

คำนวณบริเวณที่แก๊สทำปฏิกิริยากัน

กำหนดให้ ระยะห่างจากปลายหลอดแก้วด้าน H_2O = x cm

ระยะห่างจากปลายหลอดแก้วด้าน SO_3 = $30 - x$ cm

จาก
$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

$$\frac{r_{H_2O}}{r_{SO_3}} = \sqrt{\frac{M_{SO_3}}{M_{H_2O}}}$$

เนื่องจากใช้เวลาในการแพร่เท่ากัน ดังนั้น

$$\frac{r_{H_2O}}{r_{SO_3}} = \frac{x \text{ cm}}{(30 - x) \text{ cm}} = \sqrt{\frac{M_{SO_3}}{M_{H_2O}}}$$

แทนค่าจะได้

$$\frac{x \text{ cm}}{(30 - x) \text{ cm}} = \sqrt{\frac{80.06 \text{ g/mol}}{18.02 \text{ g/mol}}}$$

$$\frac{x \text{ cm}}{(30 - x) \text{ cm}} = 2.108$$

$$x = 63 - 2.108\, x \text{ cm}$$

$$x = 20 \text{ cm}$$

ดังนั้นบริเวณที่แก๊สทั้งสองทำปฏิกิริยากันอยู่ห่างจากปลายหลอดแก้วด้านที่ปล่อยไอน้ำ 20 เซนติเมตร

สำหรับแก๊ส 2 ชนิดที่มีความหนาแน่น d_1 และ d_2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแพร่และความหนาแน่นได้ โดยพิจารณาจากสมการกฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม ดังนี้

จาก $$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง M กับ d พิจารณาได้จากกฎแก๊สอุดมคติ ดังนี้

จาก $$PV = nRT$$

และ $$n = \frac{m}{M}$$

เมื่อ m คือ มวลของแก๊ส และ M คือ มวลต่อโมลของแก๊ส
แทนค่าจะได้

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

$$M = \frac{mRT}{PV}$$

และเนื่องจาก $\frac{m}{V} = d$

เมื่อ d คือ ความหนาแน่นของแก๊ส

ดังนั้น

$$M = \frac{dRT}{P}$$

แทนค่า M ในรูปของ d ในสมการกฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม จะได้

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{d_2 RT_2 / P_2}{d_1 RT_1 / P_1}}$$

ที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน จะได้อัตราส่วนของอัตราการแพร่และความหนาแน่นเป็นดังนี้

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

ดังนั้น การเปรียบเทียบอัตราการแพร่อาจใช้มวลต่อโมลหรือความหนาแน่นของแก๊สก็ได้

ตัวอย่าง 19

ถ้าแก๊ส A มีความหนาแน่นเป็น 2 เท่าของแก๊ส B จงคำนวณอัตราส่วนของอัตราการแพร่ของแก๊ส A ต่อแก๊ส B ที่สภาวะเดียวกัน

วิธีทำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแพร่กับความหนาแน่นของแก๊สที่สภาวะเดียวกัน

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

ความหนาแน่นของแก๊ส A เป็น 2 เท่าของความหนาแน่นของแก๊ส B นั่นคือ $d_A = 2d_B$ แทนค่าจะได้

$$\frac{r_A}{r_B} = \sqrt{\frac{d_B}{2d_B}}$$

$$= 0.7$$

ดังนั้น อัตราส่วนของอัตราการแพร่ของแก๊ส A ต่อแก๊ส B ที่สภาวะเดียวกันเท่ากับ 0.7

แบบฝึกหัด 7.3

1. ทริเทียม (T) เป็นไอโซโทปหนึ่งของไฮโดรเจน อัตราการแพร่ของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เป็นกี่เท่าของแก๊สทริเทียม (T_2) กำหนดให้ มวลต่อโมลของทริเทียมเท่ากับ 3.02 กรัมต่อโมล
2. การแยกแก๊สผสมระหว่างแก๊สฮีเลียมและแก๊สนีออน โดยการผ่านแก๊สผสมเข้าไปในท่อยาว 50 เซนติเมตร
   2.1 แก๊สชนิดใดจะผ่านท่อออกมาก่อน
   2.2 ถ้าแก๊สฮีเลียมผ่านท่อออกมาโดยใช้เวลา 15.00 วินาที แก๊สนีออนจะผ่านท่อออกมาโดยใช้เวลาเท่าใด
3. เตตระฟลูออโรเอทิลีน (C_2F_4) แพร่ผ่านแผ่นรูพรุนชนิดหนึ่งด้วยอัตรา 2.3×10^{-6} โมลต่อชั่วโมง ส่วนแก๊สตัวอย่างอีกชนิดหนึ่งประกอบด้วยโบรอน (B) กับไฮโดรเจน (H) มีอัตราการแพร่ผ่าน 4.37×10^{-6} โมลต่อชั่วโมง ภายใต้ภาวะเดียวกัน จงคำนวณมวลต่อโมลและเขียนสูตรโมเลกุลที่เป็นไปได้ของแก๊สตัวอย่าง
4. แก๊สชนิดหนึ่งแพร่ผ่านภาชนะออกมาจนหมดภายในเวลา 6.8 นาที ในขณะที่แก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในสภาวะเดียวกันแพร่ผ่านโดยใช้เวลา 8.5 นาที จงหาความหนาแน่นของแก๊สชนิดนี้ที่ STP

7.4 การประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับแก๊สและสมบัติของแก๊ส

ความรู้เกี่ยวกับแก๊สและสมบัติของแก๊ส สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์หรือนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันหรือในอุตสาหกรรมได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับแก๊ส มีดังนี้

รูขนาดเล็กบนฝาถ้วยกาแฟ

รูขนาดเล็กบนฝาถ้วยกาแฟ ในรูป 7.10 ทำให้กาแฟไหลออกจากช่องสำหรับดื่มได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากทำให้อากาศสามารถเข้าไปแทนที่กาแฟได้ หากไม่มีรูบนฝา เมื่อกาแฟไหลออกจากช่องสำหรับดื่ม อากาศภายนอกไม่สามารถเข้ามาแทนที่ได้ จึงทำให้ความดันภายในถ้วยลดลง เมื่อความดันภายในถ้วยลดลงจนเท่ากับหรือน้อยกว่าความดันภายในปาก กาแฟจะหยุดไหล

รูป 7.10 รูขนาดเล็กบนฝาถ้วยกาแฟ

ป๊อบคอร์นจากเมล็ดข้าวโพด

เมื่อให้ความร้อนกับเมล็ดข้าวโพด น้ำในเมล็ดข้าวโพดจะกลายเป็นไอ ทำให้จำนวนโมเลกุลของแก๊สภายในช่องว่างของเมล็ดข้าวโพดเพิ่มขึ้น รวมทั้งความร้อนทำให้โมเลกุลของแก๊สมีพลังงานจลน์มากขึ้น ส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้นจนเปลือกเมล็ดข้าวโพดระเบิดออก นอกจากนี้ความร้อนยังอบแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวโพดเกิดเป็นปุยสีขาวออกมา

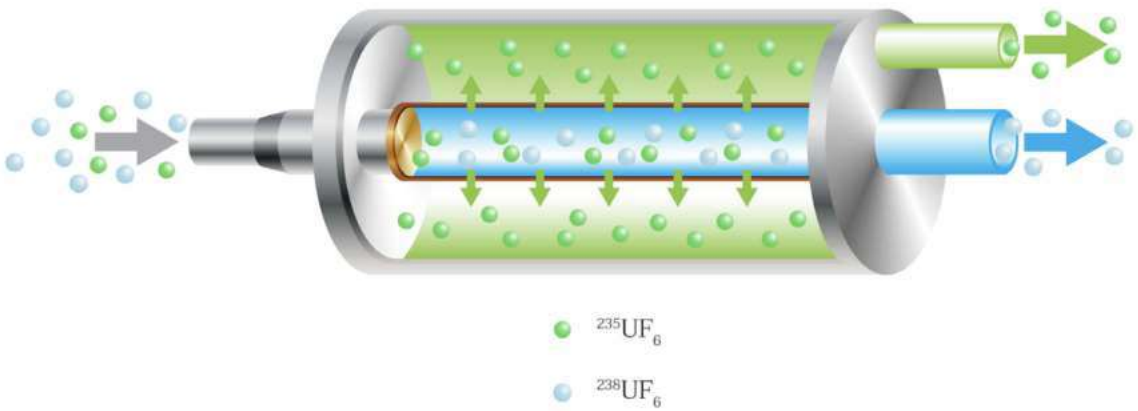
รูป 7.11 ป๊อบคอร์นจากเมล็ดข้าวโพด

กระบวนการเช่นเดียวกันนี้เกิดขึ้นกับการคั่วเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อทำเป็นข้าวตอก

การแยกไอโซโทปยูเรเนียม

ยูเรเนียม-235 (^{235}U) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ไอโซโทปหลักของยูเรเนียมที่พบในธรรมชาติคือ ^{238}U ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 99 ส่วน ^{235}U มีอยู่เพียงร้อยละ 0.720

การใช้หลักการแพร่ผ่านเพื่อแยก ^{235}U ออกจาก ^{238}U ทำได้โดยเปลี่ยนยูเรเนียมให้เป็นสารประกอบยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ซึ่งอยู่ในสถานะแก๊ส สารประกอบที่เกิดขึ้นมีทั้ง $^{235}UF_6$ และ $^{238}UF_6$ ปนอยู่ด้วยกัน เมื่อให้แก๊สทั้งสองชนิดเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกั้นที่มีรูพรุนซึ่งอยู่ในถังขนาดใหญ่ $^{235}UF_6$ มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า $^{238}UF_6$ เล็กน้อย เนื่องจากมีมวลต่อโมลน้อยกว่า ดังนั้นอีกด้านหนึ่งของแผ่นกั้นจึงมีอัตราส่วนของ $^{235}UF_6 : {}^{238}UF_6$ มากกว่าในตอนเริ่มต้น การแยกไอโซโทปทั้งสองออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ต้องทำกระบวนการเช่นนี้ซ้ำนับพันครั้ง



รูป 7.12 การแยกไอโซโทปยูเรเนียม

กิจกรรม 7.6 สืบค้นข้อมูลการใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่องแก๊สและสมบัติของแก๊ส

จุดประสงค์ของกิจกรรม

สืบค้นข้อมูลและนำเสนอข้อมูลการใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่องแก๊สและสมบัติของแก๊ส

วิธีทำกิจกรรม

1. สืบค้นข้อมูลการใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่องแก๊สและสมบัติของแก๊ส
2. นำเสนอข้อมูล และอภิปรายเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ในห้องเรียน

ตรวจสอบความเข้าใจ

จับคู่ความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับกฎของแก๊สให้ถูกต้อง

ความดันภายในยางรถยนต์หลังวิ่งจะสูงกว่าปกติ	กฎของบอยล์ ($V \propto \frac{1}{P}$)
อาการหูอื้อเมื่อขึ้นบนที่สูง	กฎของชาร์ล ($V \propto T$)
บอลลูนตรวจสภาพอากาศขยายตัวเมื่อลอยสูงขึ้น	กฎของเกย์-ลูสแซก ($P \propto T$)
ถุงขนมพองตัวเมื่ออยู่บนภูเขา	กฎของอาโวกาโดร ($V \propto n$)
โคมลอยพองตัวเมื่อจุดไฟ	
ลูกโป่งมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสูบลมเข้าไป	

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊ส อธิบายได้ด้วยกฎของบอยล์ ($V \propto \frac{1}{P}$ เมื่อ T และ n คงที่) กฎของชาร์ล ($V \propto T$ เมื่อ P และ n คงที่) กฎของเกย์–ลูสแซก ($P \propto T$ เมื่อ V และ n คงที่) และกฎของอาโวกาโดร ($V \propto n$ เมื่อ P และ T คงที่) ความสัมพันธ์เหล่านี้นำไปสู่กฎแก๊สอุดมคติ ($PV = nRT$) และกฎต่าง ๆ ของแก๊สสามารถอธิบายในระดับอนุภาคได้ด้วยทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

เมื่อนำแก๊สตั้งแต่ 2 ชนิดที่ไม่ทำปฏิกิริยากันมาผสมกัน ความดันของแก๊สผสมเท่ากับผลรวมของความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดตามกฎความดันย่อยของดอลตัน โดยความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดแปรผันตามเศษส่วนโมลของแก๊สที่มีอยู่ในแก๊สผสม

แก๊สสามารถแพร่จากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งได้ เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีพลังงานจลน์และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทาง โดยอัตราการแพร่ของแก๊สแปรผกผันกับรากที่สองของมวลต่อโมลของแก๊ส ตามกฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม

กฎต่าง ๆ ของแก๊สสามารถนำไปใช้อธิบายสมบัติและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับแก๊สตลอดจนประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรม

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. เติมเครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง

   ..... 1.1 เมื่อลดความดันของแก๊สลงครึ่งหนึ่ง ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ที่อุณหภูมิและจำนวนโมลคงที่

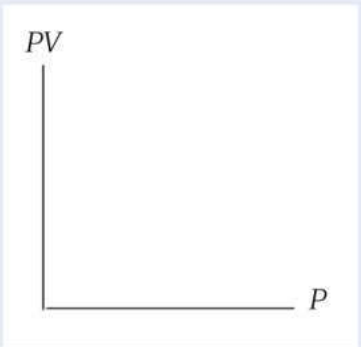
   ..... 1.2 ผลต่างของอุณหภูมิในหน่วยเคลวินเท่ากับผลต่างของอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสเสมอ

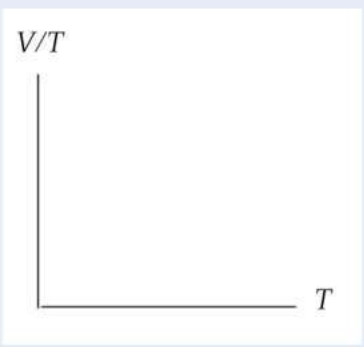
   ..... 1.3 เมื่อนำลูกปิงปองที่บุบไปแช่ในตู้เย็น ลูกปิงปองจะพองกลับขึ้นมาเหมือนเดิม

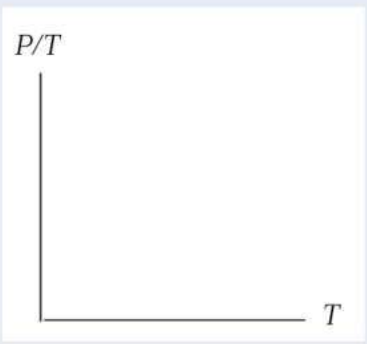
   ..... 1.4 เมื่อหายใจเข้า ปริมาตรของทรวงอกจะเพิ่มขึ้นเพราะจำนวนโมเลกุลของอากาศภายในปอดเพิ่มขึ้น

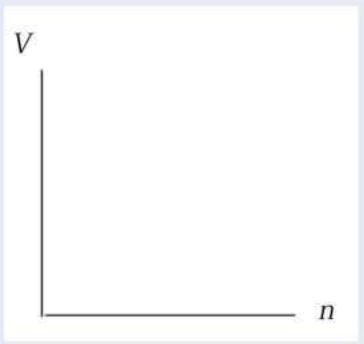
   ..... 1.5 เมื่อ P เป็นความดันของแก๊สในภาชนะปิดที่มีปริมาตรคงที่ และ x เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส จะได้ $\frac{P}{(x + 273)}$ เป็นค่าคงที่

2. เขียนเส้นกราฟลงในแกนที่กำหนดเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับกฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎของเกย์-ลูสแซก และกฎของอาโวกาโดร (P คือ ความดัน V คือ ปริมาตร T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน และ n คือ จำนวนโมล)









3. จากปฏิกิริยา $Mg(s) + 2HCl(aq) \longrightarrow MgCl_2(aq) + H_2(g)$
ถ้าใส่โลหะแมกนีเซียม (Mg) 5.83 กรัม และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 12 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ในภาชนะปิดขนาด 5.0 ลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ ความดันรวมภายในภาชนะนี้เป็นเท่าใด กำหนดให้ ของแข็งและของเหลวมีปริมาตรน้อยมากจนไม่รบกวนปริมาตรของแก๊สในภาชนะ และความดันของอากาศภายในภาชนะเริ่มต้นเท่ากับ 1.0 บรรยากาศ

4. ภาชนะใบหนึ่งบรรจุอากาศ 1.0 ลิตร ความดัน 1.00 บรรยากาศ เมื่อเติมไอร์ออน(II) ไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) และน้ำ ลงในภาชนะ จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน (O_2) ในอากาศ ดังสมการเคมี

$$2Fe(OH)_2(s) + O_2(g) + H_2O(l) \longrightarrow 2Fe(OH)_3(s)$$

เมื่อตั้งไว้จนแก๊สออกซิเจนในภาชนะทำปฏิกิริยาจนหมด ความดันภายในภาชนะเป็นเท่าใด กำหนดให้อากาศในภาชนะมีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร และปริมาตรของแข็งและของเหลวน้อยมากจนไม่รบกวนปริมาตรของแก๊สในภาชนะ

5. ภาชนะใบหนึ่งมีปริมาตร 1.0 ลิตร บรรจุแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ความดัน 1.50 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส เมื่อเติมสารละลายของลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) ปริมาตรน้อยมากพบว่ามีลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) เกิดขึ้น 3.0 กรัม เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับลิเทียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการเคมี

$$CO_2(g) + 2LiOH(aq) \longrightarrow Li_2CO_3(aq) + H_2O(l)$$

ถ้าอุณหภูมิคงที่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือมีความดันเท่าใด

6. ปอดของคนมีความจุประมาณ 4.8 ลิตร ที่อุณหภูมิของร่างกาย 37 องศาเซลเซียส และความดันภายในปอด 1.0 บรรยากาศ ปอดจะมีอากาศบรรจุอยู่กี่กรัม กำหนดให้ อากาศมีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร และที่เหลือเป็นแก๊สไนโตรเจน

7. ในการถลุงทองแดงจากแร่คาลโคไพไรต์ ($CuFeS_2$) มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนดังนี้

$2CuFeS_2(s) + 4O_2(g) \longrightarrow Cu_2S(s) + 2FeO(s) + 3SO_2(g)$ .....(1)

$2Cu_2S(s) + 3O_2(g) \longrightarrow 2Cu_2O(s) + 2SO_2(g)$ .....(2)

$2Cu_2O(s) + Cu_2S(s) \longrightarrow 6Cu(s) + SO_2(g)$ .....(3)

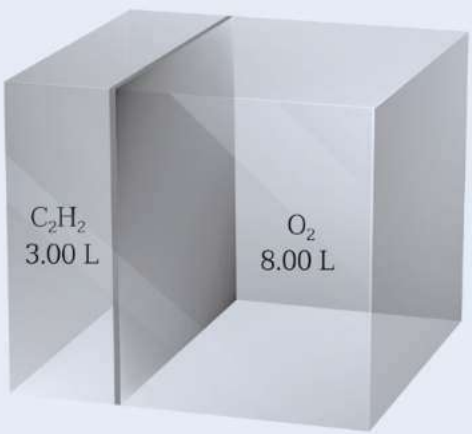
ซึ่งปฏิกิริยารวมเป็นดังสมการเคมี

$$2CuFeS_2(s) + 5O_2(g) \longrightarrow 2Cu(s) + 2FeO(s) + 4SO_2(g)$$

นำแร่คาลโคไพไรต์ 1.00 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะขนาด 10.0 ลิตร จากนั้นอัดแก๊สออกซิเจน (O_2) ลงไป 448.0 กรัม ถ้านำภาชนะไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ภาชนะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต้องทนแรงดันของแก๊สได้อย่างน้อยกี่บรรยากาศ กำหนดให้ ของแข็งมีปริมาตรน้อยมากจนไม่รบกวนปริมาตรของแก๊สภายในภาชนะ

8. แก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งมีสูตรอย่างง่ายคือ CH_2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 293.5 บรรยากาศ มีความหนาแน่น 0.505 กรัมต่อมิลลิลิตร จงหาสูตรโมเลกุลของแก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดนี้

9. แก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) บรรจุในภาชนะที่มีผนังกั้นดังรูป โดยแก๊สแต่ละชนิดมีความดัน 24.5 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



9.1 ถ้าแก๊สทั้งสองชนิดไม่ทำปฏิกิริยากัน เมื่อเปิดผนังกั้น ความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดและความดันรวมของแก๊สผสมเป็นเท่าใด

9.2 ถ้าแก๊สทั้งสองชนิดทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังสมการเคมี

$$2C_2H_2(g) + 5O_2(g) \longrightarrow 4CO_2(g) + 2H_2O(g)$$

เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ความดันรวมของแก๊สผสมและความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดที่เหลืออยู่ภายในถังเป็นเท่าใด

10. แก๊สผสมระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปริมาตร 10.0 ลิตร แพร่ผ่านผนังกั้นโดยใช้เวลา 2.00 นาที ซึ่งใช้เวลาเท่ากับที่แก๊สฮีเลียม (He) ปริมาตร 29.7 แพร่ผ่านผนังกั้นที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน ร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สผสมเป็นเท่าใด

บทที่ 8 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ipst.me/8876

ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ในถุงลมนิรภัยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ถุงลมพองขึ้นในเวลาไม่ถึงหนึ่งวินาที

คำถามสำคัญ

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีคืออะไร หาได้อย่างไร
2. ปัจจัยใดที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
3. ความรู้เกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. บอกความหมายและคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร
2. ทำการทดลอง เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกับเวลา และแปลความหมายจากกราฟ
3. บอกความหมายและคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
4. เขียนกราฟการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยา
5. อธิบายแนวคิดเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยใช้ทฤษฎีการชนและทฤษฎีสถานะแทรนซิชัน
6. ทำการทดลอง และอธิบายผลของความเข้มข้นของสาร พื้นที่ผิวของสาร อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
7. เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
8. สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

1. ดุลสมการเคมีต่อไปนี้ให้ถูกต้อง
   1.1 $CH_4(g) + O_2(g) \longrightarrow CO_2(g) + H_2O(l)$
   1.2 $NO_2(g) \longrightarrow NO(g) + O_2(g)$
   1.3 $NO(g) + NO_3(g) \longrightarrow NO_2(g)$
   1.4 $HCl(aq) + CaCO_3(s) \longrightarrow CaCl_2(aq) + H_2O(l) + CO_2(g)$

2. จากสมการเคมี $Pb(NO_3)_2(aq) + 2KI(aq) \longrightarrow PbI_2(s) + 2KNO_3(aq)$ จงตอบคำถามต่อไปนี้
   2.1 เมื่อผสม $Pb(NO_3)_2$ กับ KI จะสังเกตได้อย่างไรว่ามีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น
   2.2 ในขณะที่มี PbI_2 เกิดขึ้น 4.61 กรัม ปริมาณ KI จะลดลงกี่โมล
   2.3 จากข้อ 2.2 ถ้าเริ่มต้นปฏิกิริยา KI มีความเข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร ในสารละลายผสมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของ KI ที่เหลือเป็นเท่าใด

3. ใส่เครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง
   ..... 3.1 แก๊สประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก ดังนั้นผลรวมปริมาตรของอนุภาคแก๊สเท่ากับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ
   ..... 3.2 อนุภาคแก๊สอยู่ห่างกันมาก จนถือว่าไม่มีแรงกระทำต่อกัน
   ..... 3.3 อนุภาคแก๊สเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่เท่ากันจึงมีพลังงานจลน์ไม่เท่ากัน
   ..... 3.4 เมื่ออนุภาคแก๊สชนกันจะไม่มีการถ่ายเทพลังงานให้แก่กัน
   ..... 3.5 ที่อุณหภูมิเดียวกัน แก๊สแต่ละชนิดมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากัน

การเปลี่ยนแปลงของสารจำนวนมากที่พบเห็นในธรรมชาติและในชีวิตประจำวัน เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต่าง ๆ ในระบบ โดยปริมาณสารตั้งต้นลดลงและปริมาณผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้าต่างกัน การทราบอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงทำให้สามารถนำปฏิกิริยาเคมีไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม เช่น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใช้ในการประดิษฐ์ถุงลมนิรภัยของรถยนต์ การทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดช้าลงหรือชะลอการเน่าเสียของอาหาร

ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้า วัดได้อย่างไร

8.1 ความหมายและการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ถ้าเปรียบการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ซึ่งระยะทางที่รถยนต์เคลื่อนที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลา และระยะทางที่รถยนต์เคลื่อนที่ได้เทียบกับเวลาที่ใช้แสดงถึงอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ นักเรียนคิดว่าปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่อาจมีหลายชนิดจะสามารถวัดอัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีได้อย่างไร

ระยะทางที่รถยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบได้กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมี โดยปริมาณสารตั้งต้นจะลดลงในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น การติดตามการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีจึงอาจทำได้โดยการติดตามการลดลงของสารตั้งต้นหรือการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เทียบกับเวลา โดยการวัดปริมาณสารขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของสาร เช่น ชั่งมวลเมื่อสารเป็นของแข็ง วัดปริมาตรเมื่อสารเป็นแก๊ส วัดความเข้มข้นเมื่อเป็นสารละลาย ส่วนเวลาอาจวัดในหน่วยของวินาที นาที ชั่วโมง หรือวัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาว่าเกิดขึ้นได้ช้าหรือเร็วเพียงใด การวัดปริมาณสารในปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลาสามารถศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 8.1 การทดลองศึกษาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะแมกนีเซียมกับกรดไฮโดรคลอริก

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดลองเพื่อศึกษาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะแมกนีเซียมกับกรดไฮโดรคลอริกในช่วงเวลาต่าง ๆ
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา
3. เปรียบเทียบอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. ลวดแมกนีเซียม (Mg) ยาว 10 cm
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.15 M
3. กระบอกตวงขนาด 10 mL
4. หลอดทดลองขนาดกลาง
5. จุกยางที่เจาะรูให้พอดีกับปลายกระบอกฉีดยา
6. กระบอกฉีดยาขนาด 10 mL
7. นาฬิกาจับเวลาหรือนาฬิกาที่มีเข็มวินาที
8. กระดาษทรายขนาด 3 cm × 3 cm
9. ขาตั้งพร้อมที่จับหลอดทดลอง

วิธีทดลอง

1. ใช้กระดาษทรายขัดลวด Mg ให้สะอาด
2. นำลวด Mg ยาวประมาณ 10 cm ที่ขัดสะอาดแล้วมาขดให้คล้ายสปริง ใส่ลงในหลอดทดลองขนาดกลาง
3. นำกระบอกฉีดยามาต่อกับจุกยาง และกดก้านกระบอกฉีดยาให้อยู่ที่ 0 mL
4. ตวง HCl 0.15 M 10 mL ใส่หลอดทดลองในข้อ 2 พร้อมกับปิดปากหลอดทดลองด้วยจุกยางที่ต่อกับกระบอกฉีดยาในข้อ 3 ดังรูป เริ่มจับเวลาทันทีเมื่อปิดจุกยาง บันทึกเวลาทุกระยะที่ก้านกระบอกฉีดยาเพิ่มขึ้น 1 mL จนกระทั่งถึง 10 mL

อุปกรณ์ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างโลหะแมกนีเซียมกับกรดไฮโดรคลอริก

5. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา

คำถามท้ายการทดลอง

1. การเกิดแก๊สไฮโดรเจนในแต่ละช่วงปริมาตรใช้เวลาเท่ากันหรือไม่ อย่างไร
2. ความชันของกราฟคงที่ตลอดทุกช่วงการทดลองหรือไม่ อย่างไร สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างไร

จากการทดลอง โลหะแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกได้ผลิตภัณฑ์เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการเคมี

$$Mg(s) + 2HCl(aq) \longrightarrow MgCl_2(aq) + H_2(g)$$

การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมี สามารถวัดได้จากปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อเวลา นอกจากนี้อาจวัดมวลหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ลดลงได้ ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารจะเลือกวัดปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีที่สะดวกที่สุด สำหรับการทดลองนี้จะวัดปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อเวลา เนื่องจากการวัดมวลของลวดแมกนีเซียมหรือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีทำได้ไม่สะดวก จากการทดลองนี้พบว่า ปฏิกิริยาเคมีตอนเริ่มต้นเกิดได้เร็วและค่อย ๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป

ตรวจสอบความเข้าใจ

ในการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้ ควรติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารใด พร้อมให้เหตุผลประกอบ

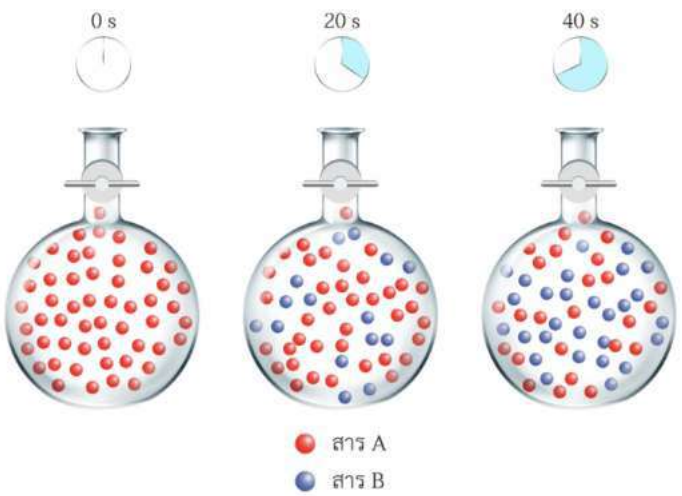
1. $CH_3COCH_3(aq) + I_2(aq) \longrightarrow CH_3COCH_2I(aq) + HI(aq)$
   ไม่มีสี สีน้ำตาลแดง ไม่มีสี ไม่มีสี
2. $CaCO_3(s) + 2HCl(aq) \longrightarrow CO_2(g) + CaCl_2(aq) + H_2O(l)$
3. $S_2O_3^{2-}(aq) + 2H^+(aq) \longrightarrow S(s) + H_2SO_3(aq)$

ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วหรือช้า มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมีต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร

สำหรับปฏิกิริยาเคมีใด ๆ เช่น สาร A เปลี่ยนไปเป็นสาร B ดังสมการเคมีต่อไปนี้

$$A \longrightarrow B$$

เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ปริมาณของสาร A ซึ่งเป็นสารตั้งต้นจะลดลง ส่วนปริมาณของสาร B ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น ดังรูป 8.1



รูปที่ 8.1 การดำเนินไปของปฏิกิริยา $A \longrightarrow B$

การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A สามารถทำได้โดยวัดปริมาณของสาร A เมื่อตอนเริ่มต้นปฏิกิริยา สมมติว่าได้เป็น A_1 ณ เวลา t_1 เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไประยะเวลาหนึ่ง วัดปริมาณของสาร A อีกครั้ง สมมติว่าได้เป็น A_2 ที่เวลา t_2 ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป ปริมาณของสาร A จะลดลง นั่นคือ A_2 จะมีค่าน้อยกว่า A_1 เสมอ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A จึงมีค่าเป็นลบ (-) แต่เพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารมีค่าเป็นบวกจึงเติมเครื่องหมายลบเพื่อแสดงถึงปริมาณสารลดลง ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A} = -\frac{\text{ปริมาณของสาร A ที่เปลี่ยนแปลงไป}}{\text{ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเคมี}}$$

$$= -\frac{\Delta A}{\Delta t}$$

$$= -\left(\frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1}\right)$$

ในทางกลับกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาเคมีดำเนินไป เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร B} = \frac{\text{ปริมาณของสาร B ที่เปลี่ยนแปลงไป}}{\text{ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเคมี}}$$

$$= \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$= \frac{B_2 - B_1}{t_2 - t_1}$$

ให้นักเรียนพิจารณาปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซึ่งมีสีน้ำตาลแดงที่อยู่ในระบบปิด ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) กับแก๊สออกซิเจน (O_2) ดังสมการเคมี

$$2NO_2(g) \longrightarrow 2NO(g) + O_2(g)$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ได้ผล ดังตาราง 8.1

ตาราง 8.1 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ของปฏิกิริยา $2NO_2(g) \longrightarrow 2NO(g) + O_2(g)$

เวลา (s)	$[NO_2]$ (M)	$[NO]$ (M)	$[O_2]$ (M)
0	4.00×10^{-3}	0	0
100	2.83×10^{-3}	1.18×10^{-3}	0.59×10^{-3}
240	2.00×10^{-3}	2.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}
320	1.72×10^{-3}	2.28×10^{-3}	1.14×10^{-3}
500	1.30×10^{-3}	2.70×10^{-3}	1.35×10^{-3}
780	0.94×10^{-3}	3.06×10^{-3}	1.53×10^{-3}
1000	0.78×10^{-3}	3.22×10^{-3}	1.61×10^{-3}
1500	0.55×10^{-3}	3.46×10^{-3}	1.73×10^{-3}
2000	0.43×10^{-3}	3.56×10^{-3}	1.78×10^{-3}

สัญลักษณ์ [ ] แทนความเข้มข้นของสาร ในหน่วยโมลต่อลิตร (M)

จากข้อมูลในตาราง 8.1 จะเห็นว่า เมื่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดการสลายตัว ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ } NO_2 = -\frac{\Delta[NO_2]}{\Delta t}$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถใช้คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ในช่วงเวลา 0 – 100 วินาที ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ } NO_2 = -\frac{[NO_2]_{t_{100}} - [NO_2]_{t_0}}{t_{100} - t_0}$$

$$= -\frac{0.00283\ \text{M} - 0.00400\ \text{M}}{100\ \text{s} - 0\ \text{s}}$$

$$= - \frac{(-0.00117)\ M}{100\ s}$$

$$= 1.17 \times 10^{-5}\ M\ s^{-1}$$

ถ้าพิจารณาจากสารที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาที่กำหนดให้ จึงเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ NO} = \frac{\Delta[NO]}{\Delta t}$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ } O_2 = \frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

จากข้อมูลในตาราง 8.1 สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สออกซิเจนในช่วงเวลา 0–100 วินาที ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ NO} = \frac{[NO]_{t_{100}} - [NO]_{t_0}}{t_{100} - t_0}$$

$$= \frac{0.00118\ M - 0.00000\ M}{100\ s - 0\ s}$$

$$= \frac{0.00118\ M}{100\ s}$$

$$= 1.18 \times 10^{-5}\ M\ s^{-1}$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ } O_2 = \frac{[O_2]_{t_{100}} - [O_2]_{t_0}}{t_{100} - t_0}$$

$$= \frac{0.00059\ M - 0.00000\ M}{100\ s - 0\ s}$$

$$= \frac{0.00059\ M}{100\ s}$$

$$= 5.9 \times 10^{-6}\ M\ s^{-1}$$

กิจกรรม 8.2 การคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่เวลาต่าง ๆ

จุดประสงค์ของกิจกรรม

1. คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในแต่ละช่วงเวลา
2. เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแต่ละชนิดในช่วงเวลาเดียวกัน

วิธีทำกิจกรรม

คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สออกซิเจนที่ช่วงเวลาอื่น ๆ จากข้อมูลในตาราง 8.1

คำถามท้ายกิจกรรม

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแต่ละชนิดที่เวลาเดียวกันเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

ข้อมูลที่คำนวณได้จากการทำกิจกรรม 8.2 พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในช่วงเวลาเดียวกันอาจเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในปฏิกิริยาเคมีใด ๆ ปริมาณของสารที่เปลี่ยนแปลงจะมีความสัมพันธ์กับเลขสัมประสิทธิ์ในสมการเคมีที่ดุลแล้ว ตัวอย่างเช่น เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารแต่ละชนิดในปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้น จะได้ค่าดังตาราง 8.2

ตาราง 8.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในช่วงเวลาต่าง ๆ เมื่อหารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้นของปฏิกิริยา $2NO_2(g) \longrightarrow 2NO(g) + O_2(g)$

ช่วงเวลา (s)	$-\frac{1}{2}\frac{\Delta[NO_2]}{\Delta t}$ ($M\ s^{-1}$)	$\frac{1}{2}\frac{\Delta[NO]}{\Delta t}$ ($M\ s^{-1}$)	$\frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$ ($M\ s^{-1}$)
0–100	5.85×10^{-6}	5.90×10^{-6}	5.90×10^{-6}
100–240	2.96×10^{-6}	2.93×10^{-6}	2.93×10^{-6}
240–320	1.75×10^{-6}	1.75×10^{-6}	1.75×10^{-6}
320–500	1.17×10^{-6}	1.17×10^{-6}	1.17×10^{-6}
500–780	6.43×10^{-7}	6.45×10^{-7}	6.43×10^{-7}
780–1000	3.64×10^{-7}	3.64×10^{-7}	3.64×10^{-7}
1000–1500	2.30×10^{-7}	2.40×10^{-7}	2.40×10^{-7}
1500–2000	1.20×10^{-7}	1.00×10^{-7}	1.00×10^{-7}

จากข้อมูลในตาราง 8.2 พบว่า ค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ NO_2 NO และ O_2 แสดงได้ดังนี้

$$-\frac{1}{2}\frac{\Delta[NO_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2}\frac{\Delta[NO]}{\Delta t} = \frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

เนื่องจาก NO_2 NO O_2 เป็นสารในปฏิกิริยาเดียวกัน ถึงแม้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดอาจจะไม่เท่ากัน แต่เมื่อหารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้น จะได้ค่าเท่ากัน ซึ่งอัตราที่เท่ากันนี้เรียกว่า **อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี** (rate of chemical reaction; *r*) ดังนั้นจึงสามารถติดตามการดำเนินไปของปฏิกิริยาโดยใช้สารใดก็ได้ ดังแสดง

$$r = -\frac{1}{2}\frac{\Delta[NO_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2}\frac{\Delta[NO]}{\Delta t} = \frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

สรุปได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเป็นโมลหรือโมลาร์ของสารแต่ละชนิด หารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้น

ตัวอย่าง 1

เชื้อเพลิงสะอาดชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ในเครื่องยนต์ในอนาคตคือ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เขียนสมการเคมีได้ดังนี้

$$2H_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2H_2O(g)$$

1. จงเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมี
2. ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สออกซิเจน (O_2) เป็น 0.23 โมลาร์ต่อวินาที อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ไอน้ำ (H_2O) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นเท่าใด

วิธีทำ

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในปฏิกิริยาเคมีเขียนความสัมพันธ์แสดงได้ดังนี้

$$r = -\frac{1}{2}\frac{\Delta[H_2]}{\Delta t} = -\frac{\Delta[O_2]}{\Delta t} = \frac{1}{2}\frac{\Delta[H_2O]}{\Delta t}$$

2. คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ H_2 H_2O และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้
อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ H_2

$$-\frac{1}{2}\frac{\Delta[H_2]}{\Delta t} = -\frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta[H_2]}{\Delta t} = 2 \times 0.23 \text{ M s}^{-1}$$

$$= 0.46 \text{ M s}^{-1}$$

ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 0.46 โมลาร์ต่อวินาที

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ H_2O

$$\frac{1}{2}\frac{\Delta[H_2O]}{\Delta t} = -\frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta[H_2O]}{\Delta t} = 2 \times 0.23 \text{ M s}^{-1}$$

$$= 0.46 \text{ M s}^{-1}$$

ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 0.46 โมลาร์ต่อวินาที

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

$$r = -\frac{\Delta[O_2]}{\Delta t}$$

$$= 0.23 \text{ M s}^{-1}$$

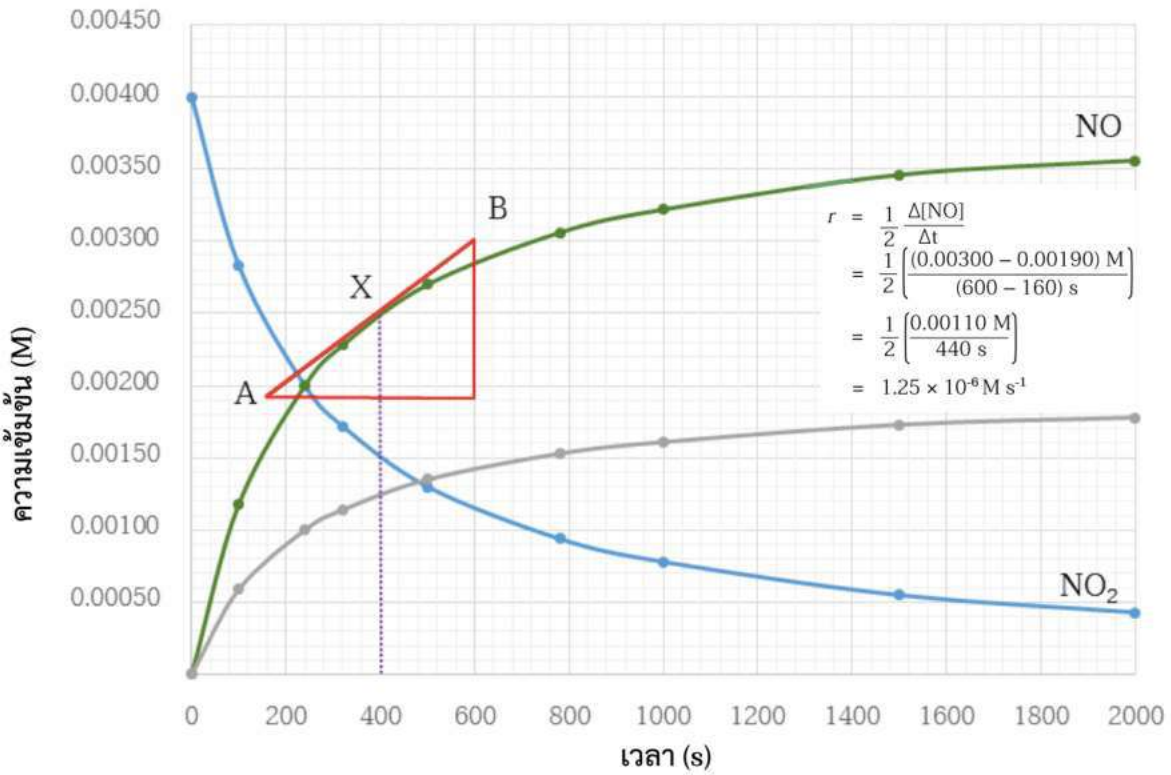
ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าเท่ากับ 0.23 โมลาร์ต่อวินาที

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. กำหนดให้ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างแก๊สมีเทน (CH_4) กับแก๊สออกซิเจน (O_2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) โดยมีอัตราการเผาไหม้เป็น 0.936 M s^{-1}
   1.1 เขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
   1.2 คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ
2. กำหนดให้ปฏิกิริยาเคมีหนึ่ง มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้น A เท่ากับ 3/2 เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้น B เท่ากับ 2 เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของผลิตภัณฑ์ C จงเขียนสมการเคมีและหาว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร B เป็นกี่เท่าของสาร C

จากที่ทราบแล้วว่า ข้อมูลในตาราง 8.2 เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดในช่วงเวลาที่กำหนดนี้ เรียกว่า **อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ย** (average rate of reaction) ในช่วงเวลานั้น สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เวลาใดเวลาหนึ่ง เรียกว่า **อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่ง** (instantaneous rate of reaction) สามารถหาได้จากค่าความชัน ณ จุดใดจุดหนึ่งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลา หารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารในสมการเคมี เช่น

จากข้อมูลในตาราง 8.1 เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลาจะได้ดังรูป 8.2 ถ้าต้องการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เวลา 400 วินาที จากกราฟของ NO ทำได้โดยหาความชัน (slope) ของกราฟด้วยการลากเส้นตรงจากที่เวลา 400 วินาที ขึ้นไปตัดเส้นกราฟของ NO ที่จุด X แล้วลากเส้นสัมผัสจุด X จากนั้นหาความชันโดยสร้างรูปสามเหลี่ยมมุมฉากใต้เส้นสัมผัส แล้วหารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของ NO



รูป 8.2 กราฟแสดงการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เวลา 400 วินาที

ความชันของเส้นสัมผัส AB ที่เวลา 400 วินาที หาได้ดังนี้

$$\text{slope} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$= \left[\frac{(0.00300 - 0.00190)\ \text{M}}{(600 - 160)\ \text{s}}\right]$$

$$= \frac{0.00110\ \text{M}}{440\ \text{s}}$$

$$= 2.50 \times 10^{-6}\ \text{M s}^{-1}$$

เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NO มีค่าเท่ากับความชันของเส้นสัมผัส AB อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เวลา 400 วินาที หาได้ดังนี้

$$r = \frac{1}{2}\frac{\Delta[\text{NO}]}{\Delta t}$$

$$= \frac{1}{2}\text{slope}$$

$$= \frac{1}{2}(2.50 \times 10^{-6}\ \text{M s}^{-1})$$

$$= 1.25 \times 10^{-6}\ \text{M s}^{-1}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เวลา 400 วินาที เท่ากับ 1.25×10^{-6} M s^{-1}

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยในช่วงเวลาแคบ ๆ มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่ง ที่จุดกึ่งกลางของช่วงเวลานั้น เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยสำหรับช่วงเวลา 320–500 วินาที จากข้อมูลในตาราง 8.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.17×10^{-6} M s^{-1} ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เวลา 410 วินาที และแตกต่างเล็กน้อยกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เวลา 400 วินาที และความแตกต่างนี้จะมากขึ้นเมื่อเวลาที่ต้องการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่งอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางออกไป

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่งแตกต่างกันอย่างไร
2. โลหะสังกะสีทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ได้ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนที่ STP ณ เวลาต่าง ๆ ดังตาราง

เวลา (s)	10	20	30	40	50	60	70	80
ปริมาตร H_2 (mL)	25	45	60	70	75	78	80	80

2.1 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแก๊สกับเวลา
2.2 เขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
2.3 คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดปฏิกิริยา ในหน่วยโมลต่อวินาที
2.4 คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เวลา 40 วินาที ในหน่วยโมลต่อวินาที

จากที่ทราบแล้วว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี สามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารใดสารหนึ่งด้วยวิธีที่สะดวกที่สุด สำหรับสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยาจะสามารถหาความเข้มข้นหรือเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณต่อเวลาได้อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 8.3 การเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยาเคมี และการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จุดประสงค์ของกิจกรรม

เขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยาเคมี และคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

วิธีทำกิจกรรม

1. เขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ A และ B ของปฏิกิริยา $2A \longrightarrow 4B + C$ ที่เริ่มต้นปฏิกิริยาเคมีด้วยสาร A 0.0200 M และวัดความเข้มข้นของสาร C ที่เวลาต่าง ๆ ดังตาราง

เวลา (s)	[C] (M)
0	0.0000
100	0.0016
200	0.0029
300	0.0040
400	0.0049
500	0.0057
600	0.0064

2. คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วง 0–600 วินาที จากสาร A และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เวลา 340 วินาที จากสาร B

เมื่อทราบความเข้มข้นของสารหนึ่ง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของสารอื่น ๆ ในปฏิกิริยาเคมีจากความสัมพันธ์ของเลขสัมประสิทธิ์ในสมการเคมี และสามารถเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยาเคมีที่เวลาต่าง ๆ ได้

แบบฝึกหัด 8.1

1. จากการทดลองศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี $2A + B \longrightarrow C$ โดยการวัดความเข้มข้นของสาร A ได้ผลดังนี้

เวลา (s)	0.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
[A] (M)	1.00	0.64	0.44	0.27	0.22	0.22	0.22

1.1 คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A ในช่วงเวลา 0.0–5.0 5.0–10.0 และ 10.0–20.0 วินาที และเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A ในช่วงเวลาดังกล่าว

1.2 คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร A และ C ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเคมี

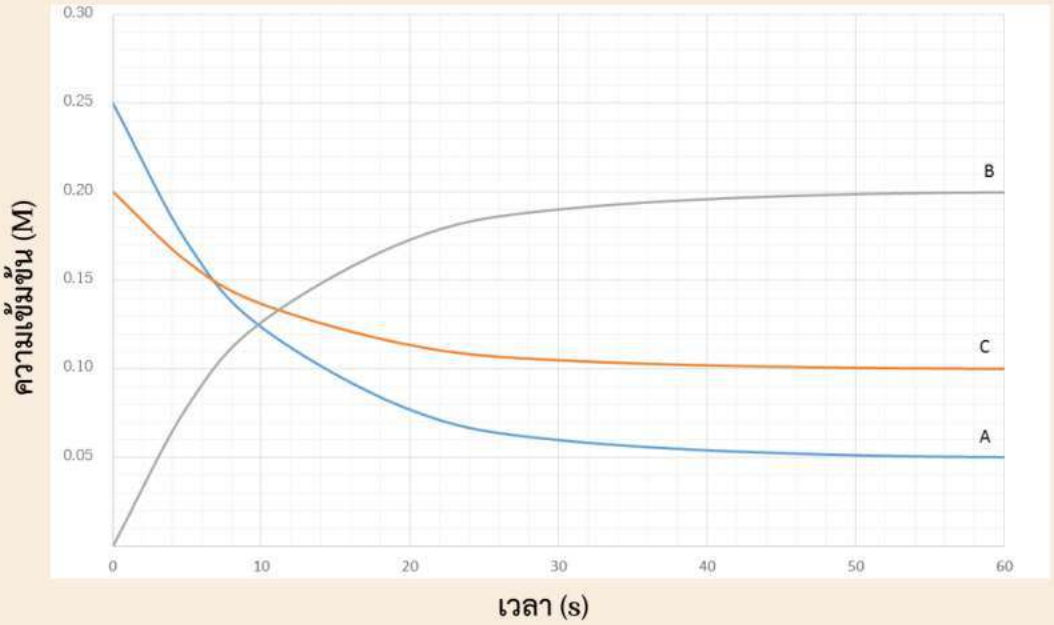
1.3 คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ย ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเคมี

1.4 หาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เวลา 11 วินาที

2. ถ้าสาร P ทำปฏิกิริยากับสาร Q เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสาร W จากการทดลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็น $\frac{1}{2}$ เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร P และเป็น $\frac{1}{4}$ เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร Q และเป็น $\frac{1}{3}$ เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร W จงเขียนสมการเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

3. สาร A สลายตัวเป็นสาร B ดังสมการเคมี $3A \longrightarrow 5B$ เมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยามีสาร A 3.00 โมลาร์ เมื่อเวลาผ่านไป 30.0 นาที มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยเท่ากับ 0.0150 โมลาร์ต่อนาที สาร A และสาร B จะมีความเข้มข้นเท่าใด

4. พิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารและเวลา เพื่อตอบคำถามต่อไปนี้



4.1 ระบุความเข้มข้นของสาร A B และ C เมื่อเริ่มต้นและเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น

4.2 สารใดเป็นสารผลิตภัณฑ์

4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแต่ละชนิด ตั้งแต่เริ่มต้นปฏิกิริยาจนความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง มีค่าเท่าใด

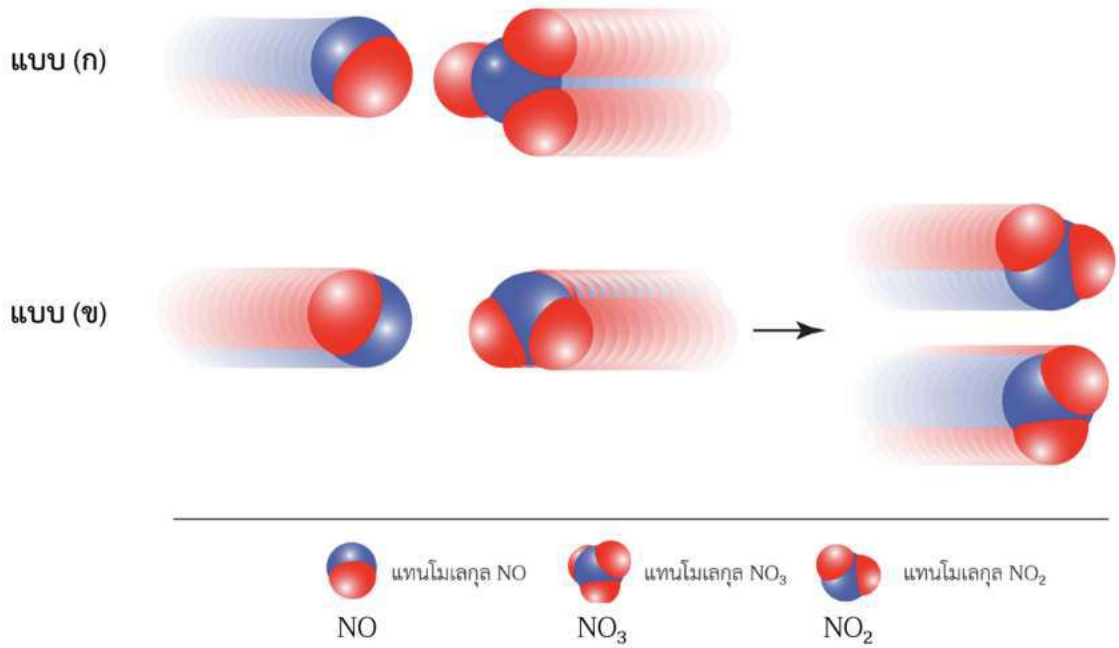
4.4 สมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีเป็นอย่างไรและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีตั้งแต่เริ่มต้นปฏิกิริยาจนความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง มีค่าเท่าใด

8.2 แนวคิดเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถอธิบายได้โดยอาศัย **ทฤษฎีการชน** (collision theory) ซึ่งมีพื้นฐานจากทฤษฎีจลน์ของแก๊สโดยกล่าวว่า เมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นเคลื่อนที่มาชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี การชนนั้นต้องมีทิศทางที่เหมาะสมและอนุภาคที่ชนกันต้องมีพลังงานจลน์มากพอ เช่น ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) กับแก๊สไนโตรเจนไตรออกไซด์ (NO_3) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ดังสมการเคมี

$$NO(g) + NO_3(g) \longrightarrow 2NO_2(g)$$

ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้โมเลกุลของ NO กับ NO_3 ต้องมีการชนกัน โดยอาจจัดตัวขณะชนกันได้ดังรูป 8.3



รูป 8.3 ทิศทางการชนกันของโมเลกุลที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี

เมื่อพิจารณาการชนกันของโมเลกุล NO กับ NO_3 การชนกันแบบ (ข) น่าจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ผลิตภัณฑ์ NO_2 มากกว่าแบบ (ก) เนื่องจากทิศทางการชนกันของโมเลกุลทั้งสองมีความเหมาะสม

ตรวจสอบความเข้าใจ

ให้นักเรียนวาดรูปแสดงทิศทางการชนกันของแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) กับแก๊สโอโซน (O_3) ที่มีผลต่อการเกิดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) กับแก๊สออกซิเจน (O_2)

จากความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีจลน์ของแก๊สที่ได้ศึกษามาแล้วอธิบายได้ว่า อนุภาคแก๊สแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิต่ำอนุภาคแก๊สมีพลังงานจลน์เฉลี่ยต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิสูงอนุภาคแก๊สมีพลังงานจลน์เฉลี่ยสูง หากอนุภาคแก๊สที่ชนกันในทิศทางที่เหมาะสมมีพลังงานจลน์ที่สูงพอการชนอาจทำให้เกิดการสลายพันธะในสารตั้งต้นแล้วสร้างพันธะใหม่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งค่า

พลังงานน้อยที่สุดที่จะทำให้การชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า **พลังงานก่อกัมมันต์** (activation energy ; E_a) ดังนั้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ปฏิกิริยาเคมีที่มีพลังงานก่อกัมมันต์สูงจะเกิดได้ยากหรือช้ากว่าปฏิกิริยาเคมีที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำ โดยพลังงานก่อกัมมันต์หาได้จากการทดลองและเป็นค่าเฉพาะของแต่ละปฏิกิริยาโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

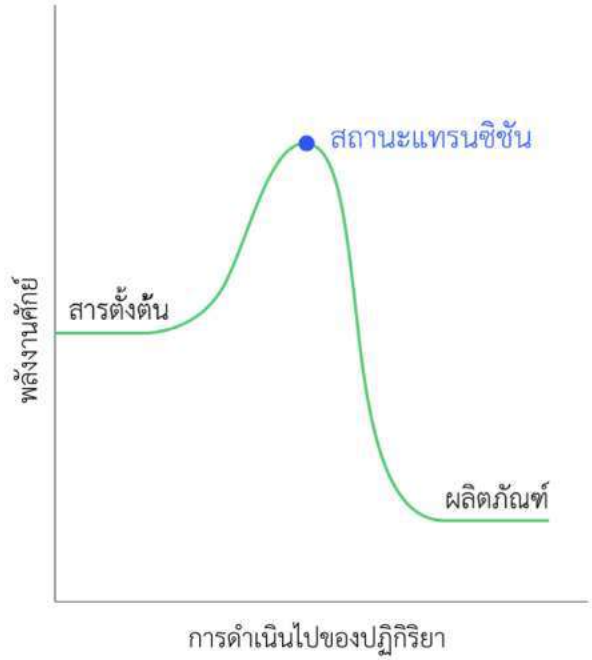
ผลของพลังงานจลน์ของอนุภาคและพลังงานก่อกัมมันต์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอาจเปรียบเทียบได้กับการเดินทางข้ามภูเขาดังรูป 8.4

โดยจำนวนคนที่ข้ามภูเขาได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ (1) จำนวนคนที่แข็งแรงหรือมีพลังงานมากพอ และ (2) ความสูงของภูเขา

รูป 8.4 การเดินทางข้ามภูเขา

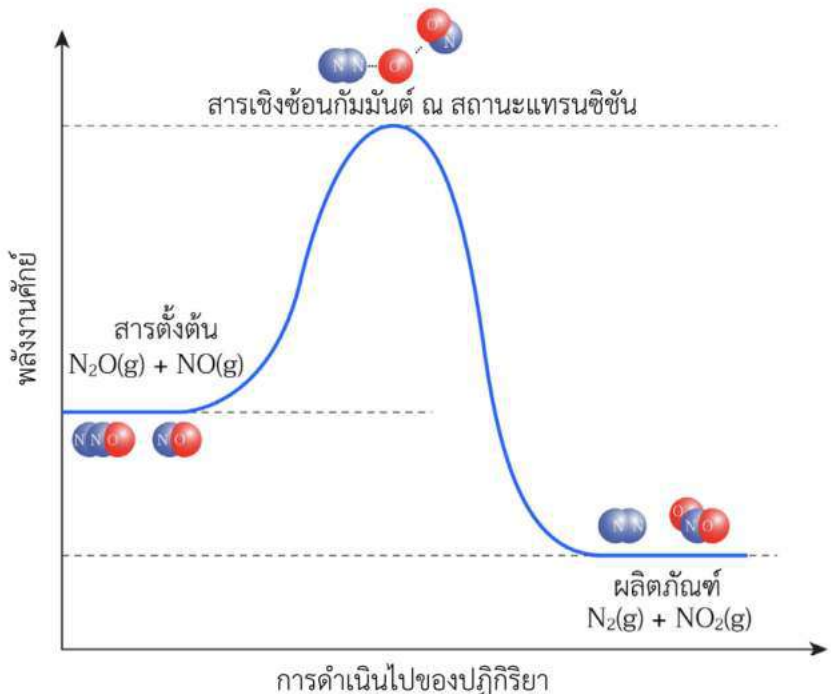
ถ้าเปรียบเทียบจำนวนคนเป็นจำนวนอนุภาค และความสูงของภูเขาเป็นค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเคมี อธิบายได้ว่าในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดช้ามากอาจเป็นเพราะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์สูงหรือมีจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูงพออยู่น้อย ในทางตรงข้ามถ้าปฏิกิริยาเคมีมีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำหรือมีจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูงพออยู่เป็นจำนวนมาก ปฏิกิริยาเคมีนั้นก็จะเกิดได้เร็ว

นอกจากพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แล้ว อนุภาคของสารยังมีพลังงานศักย์ที่เกี่ยวข้องกับแรงกระทำภายในอนุภาค เช่น พันธะเคมี เมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นชนกัน พลังงานจลน์บางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ทำให้พลังงานศักย์รวมของสารเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยา ดังรูป 8.5 แสดงให้เห็นว่า ขณะอนุภาคของสารเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน พลังงานศักย์ของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดของเส้นกราฟที่เรียกว่า **สถานะแทรนซิชัน** (transition state) ซึ่งเป็นสถานะที่อนุภาคชนกันแล้วมีการจัดเรียงตัวอย่างเหมาะสมและมีพลังงานศักย์มากพอที่จะสามารถเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้ โดยผลต่างของพลังงานศักย์ที่สถานะแทรนซิชันและสถานะเริ่มต้นก่อนการชนใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ตาม**ทฤษฎีสถานะแทรนซิชัน** (transition state theory) ดังจะได้กล่าวในตัวอย่างต่อไป



รูป 8.5 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยา

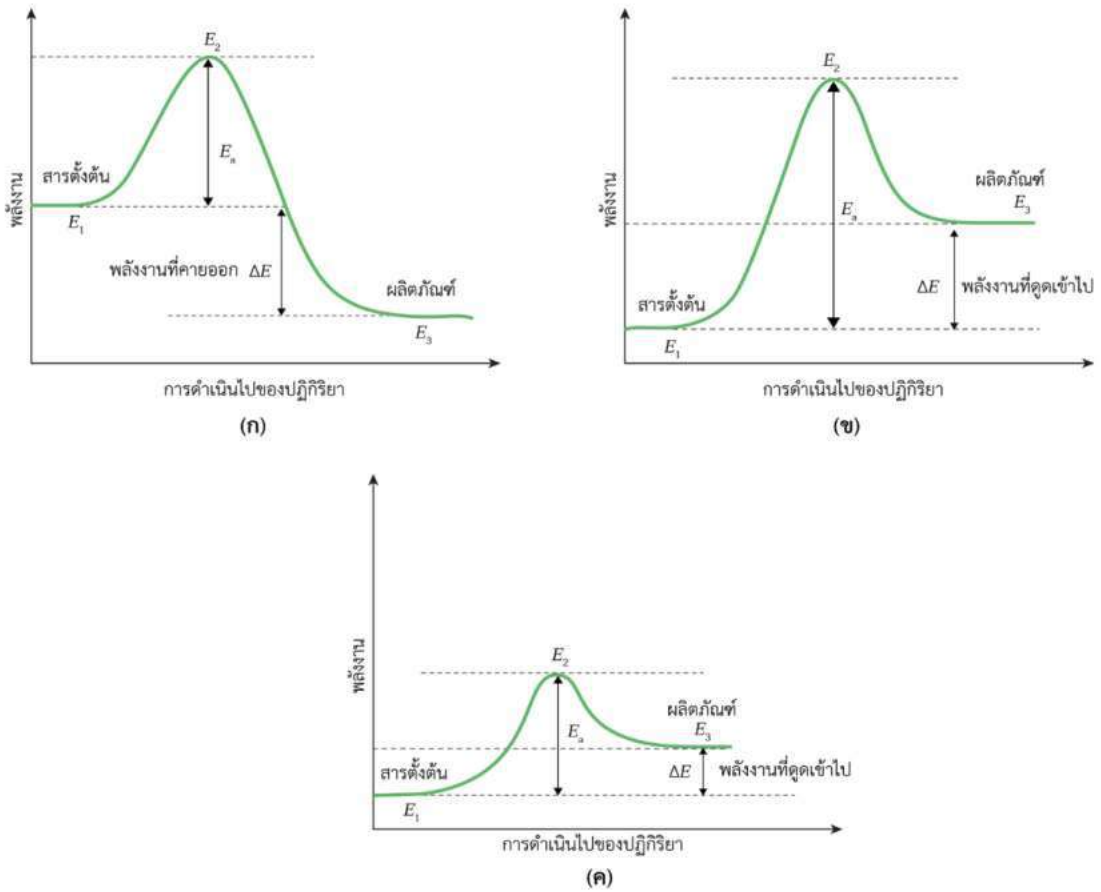
ตัวอย่างแผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไดไนโตรเจนมอนอกไซด์ (N_2O) กับแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) เกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และมีการจัดเรียงตัวของสาร ณ สถานะแทรนซิชัน ดังรูป 8.6



รูป 8.6 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยา $N_2O(g) + NO(g) \longrightarrow N_2(g) + NO_2(g)$

จากแผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาในรูป 8.6 เมื่อโมเลกุล N_2O ชนกับโมเลกุล NO พลังงานจลน์บางส่วนจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลของสารตั้งต้นลดลง และเริ่มมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม O ของ N_2O กับอะตอม N ของ NO พลังงานศักย์รวมจึงเพิ่มขึ้นจนถึงสถานะแทรนซิชันซึ่งมีลักษณะพันธะอยู่ระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่อะตอม O มีแรงยึดเหนี่ยวกับอะตอม N ทั้งสองด้าน แต่แรงยึดเหนี่ยวนี้ยังน้อยกว่าพันธะโคเวเลนต์ปกติ

หากให้สารตั้งต้นมีพลังงานเท่ากับ E_1 สถานะแทรนซิชันมีพลังงานเท่ากับ E_2 และผลิตภัณฑ์มีพลังงานเท่ากับ E_3 แผนภาพการดำเนินไปของปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังรูป 8.7 ซึ่งพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) คือ ผลต่างระหว่างพลังงาน E_2 กับ E_1 และพลังงานของปฏิกิริยา (ΔE) คือ ผลต่างระหว่างพลังงาน E_3 กับ E_1



รูป 8.7 แผนภาพการดำเนินไปของปฏิกิริยา

จากแผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาในรูป 8.7 สามารถบอกได้ว่า ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วหรือช้าโดยพิจารณาจากค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีที่พลังงานก่อกัมมันต์สูงจะเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาเคมีที่พลังงานก่อกัมมันต์ต่ำ โดยปฏิกิริยาเคมีในรูป 8.7 (ก) เกิดได้เร็วกว่า (ข) แต่ช้ากว่า (ค)

นอกจากนี้ผลต่างระหว่างพลังงานของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะบอกว่า ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายพลังงาน ในรูป 8.7 (ก) พลังงานของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยกว่าพลังงานของสารตั้งต้น ΔE จึงมีค่าเป็นลบ (-) ปฏิกิริยานี้จัดเป็น ปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermic reaction) ส่วนในรูป 8.7 (ข) และ (ค) พลังงานของผลิตภัณฑ์มีค่ามากกว่าพลังงานของสารตั้งต้น ΔE จึงมีค่าเป็นบวก (+) ปฏิกิริยานี้จัดเป็น ปฏิกิริยาดูดพลังงาน (endothermic reaction)

ตรวจสอบความเข้าใจ

ปฏิกิริยาเคมีที่ 1 คายพลังงานเท่ากับ 20 kJ/mol มีพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 52 kJ/mol ปฏิกิริยาเคมีที่ 2 ดูดพลังงานเท่ากับ 30 kJ/mol มีพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 45 kJ/mol ปฏิกิริยาเคมีใดเกิดได้เร็วกว่ากัน เพราะเหตุใด

แบบฝึกหัด 8.2

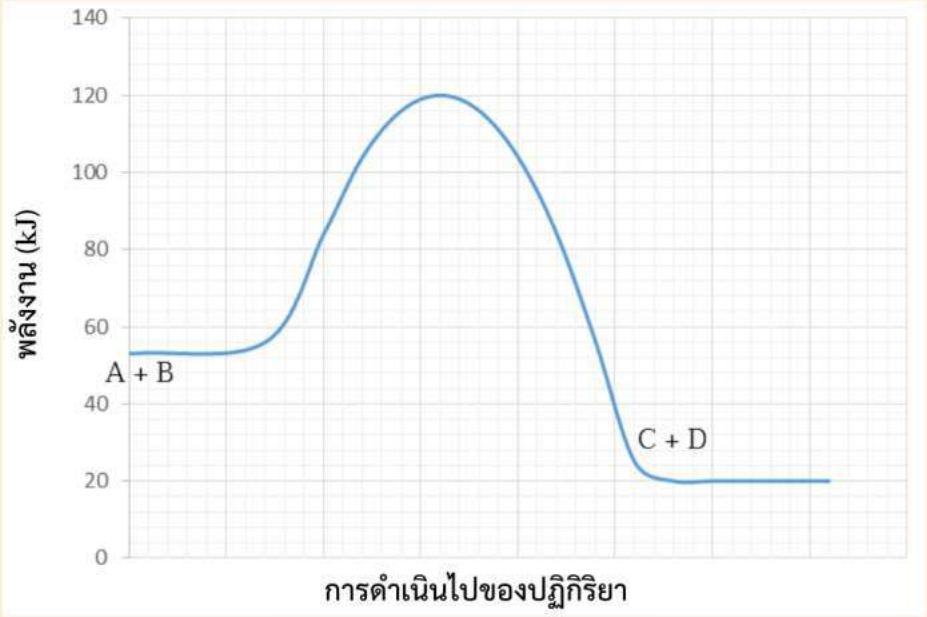
1. เติมเครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง

.....1.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งกับของเหลว ไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีการชน

.....1.2 ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ ถ้าอนุภาคของสารตั้งต้นชนกันด้วยทิศทางที่เหมาะสมและมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์

.....1.3 อนุภาคของสารที่ชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่ละอนุภาคไม่จำเป็นต้องมีพลังงานเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์

2. พิจารณาแผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของปฏิกิริยาต่อไปนี้



2.1 พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา A + B ⟶ C + D มีค่าเท่าใด

2.2 พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา C + D ⟶ A + B มีค่าเท่าใด

2.3 ปฏิกิริยา A + B ⟶ C + D เป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายพลังงาน และพลังงานของปฏิกิริยามีค่าเท่าใด

3. จากข้อมูลในตารางต่อไปนี้

ปฏิกิริยาที่	สมการเคมี	พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)	พลังงานของปฏิกิริยา (kJ/mol)
1	A ⟶ B	50.56	-70.00
2	C + D ⟶ E	70.45	+45.23
3	H ⟶ I + J	110.00	-25.33

3.1 เรียงลำดับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของทั้งสามปฏิกิริยาจากมากไปหาน้อย
3.2 ปฏิกิริยาที่ 1 สารตั้งต้นมีพลังงานมากหรือน้อยกว่าผลิตภัณฑ์เท่าใด

4. ปฏิกิริยา A $\longrightarrow$ C เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน 36 กิโลจูลต่อโมล โดยมี B เป็นสารที่สถานะแทรนซิชัน ซึ่งมีพลังงานมากกว่า A 45 กิโลจูลต่อโมล
4.1 เขียนแผนภาพการดำเนินไปของปฏิกิริยา
4.2 เปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา A $\longrightarrow$ C กับ C $\longrightarrow$ A

8.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีในชีวิตประจำวันอาจเกิดได้เร็วขึ้นหรือช้าลงเมื่อมีการเปลี่ยนภาวะ เช่น อาหารเน่าเสียได้ช้าลงเมื่อเก็บไว้ในตู้เย็น นักเรียนคิดว่าปัจจัยใดที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเน่าเสียของอาหาร และยังมีปัจจัยอื่นอีกหรือไม่ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 8.4 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
2. อธิบายผลของความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แบบผง
2. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แบบเม็ด
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.2 M
4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.5 M
5. กระบอกตวงขนาด 10 mL

6. บีกเกอร์ขนาด 100 mL
7. นาฬิกาจับเวลาหรือนาฬิกาที่มีเข็มวินาที
8. ตะเกียงแอลกอฮอล์พร้อมที่กั้นลม

วิธีทดลอง

1. ชั่ง $CaCO_3$ แบบผง 0.1 g ใส่ในบีกเกอร์ใบที่ 1 2 และ 4
2. ชั่ง $CaCO_3$ แบบเม็ด 0.1 g ใส่ในบีกเกอร์ใบที่ 3
3. เติม HCl 0.2 M ปริมาตร 10 mL ลงในบีกเกอรใบที่ 1 จับเวลาจนกระทั่งปฏิกิริยาเคมีสิ้นสุด บันทึกผลการทดลอง
4. เติม HCl 0.5 M ปริมาตร 10 mL ลงในบีกเกอร์ใบที่ 2 จับเวลาจนกระทั่งปฏิกิริยาเคมีสิ้นสุด บันทึกผลการทดลอง
5. เติม HCl 0.2 M ปริมาตร 10 mL ลงในบีกเกอร์ใบที่ 3 จับเวลาจนกระทั่งปฏิกิริยาเคมีสิ้นสุด บันทึกผลการทดลอง
6. นำ HCl 0.2 M ปริมาตร 10 mL แช่ในน้ำอุ่น 1 นาที จากนั้นเติมลงในบีกเกอร์ใบที่ 4 จับเวลาจนกระทั่งปฏิกิริยาเคมีสิ้นสุด บันทึกผลการทดลอง

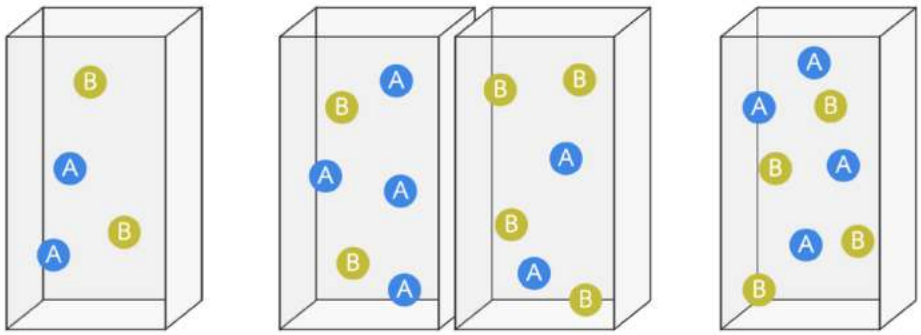
คำถามท้ายการทดลอง

1. ในแต่ละบีกเกอร์ปฏิกิริยาสิ้นสุดโดยใช้เวลาเท่ากันหรือไม่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในบีกเกอร์ใบที่ 2 3 และ 4 เป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับบีกเกอร์ใบที่ 1
2. ความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างไร

จากกิจกรรมพบว่า ความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิ มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการชน ดังนี้

ความเข้มข้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนอนุภาคของสารตั้งต้นในระบบ ดังนั้นเมื่อทำการทดลองโดยให้ปริมาตรของสารตั้งต้นคงที่ การเพิ่มความเข้มข้นของสารจะทำให้จำนวนอนุภาคในระบบเพิ่มขึ้น จึงมีโอกาสชนกันมากขึ้น ดังรูป 8.8 ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น



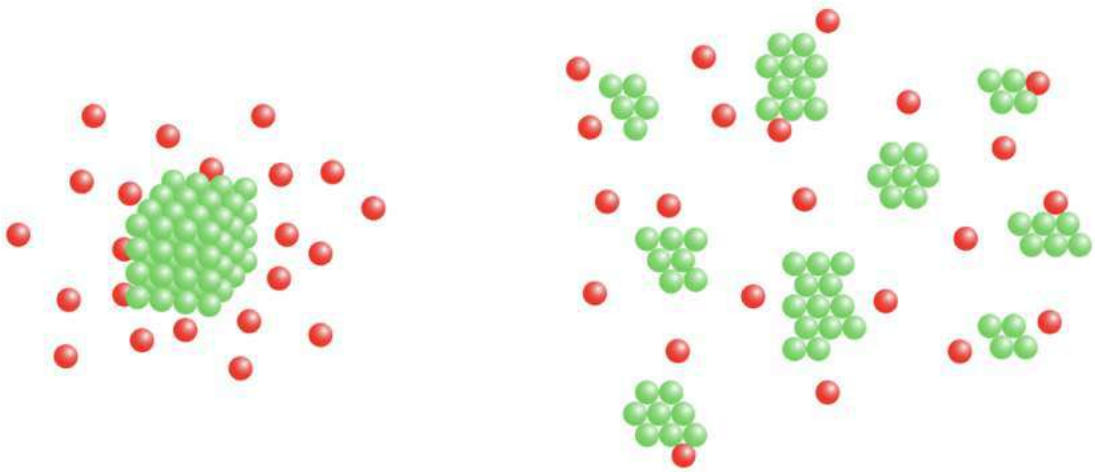
รูป 8.8 ผลของความเข้มข้นต่อโอกาสของการชนกันของอนุภาค

โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอาจขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นบางชนิดแต่ไม่ครบทุกชนิด และมีบางปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นใดเลย เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดแอลกอฮอล์ออกจากกระแสเลือด โดยร่างกายจะกำจัดออกทั้งในรูปแอลกอฮอล์โดยตรงและการสลายตัวเป็นสารอื่น ซึ่งอัตราการสลายตัวของแอลกอฮอล์เป็นสารอื่นจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์หากมีแอลกอฮอล์มากพอ ดังนั้นหากร่างกายได้รับแอลกอฮอล์มากจนถึงระดับหนึ่ง ร่างกายจะเปลี่ยนแอลกอฮอล์เป็นสารอื่นด้วยอัตราที่คงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในเลือดว่ามีอยู่มากน้อยเพียงใด

สำหรับปฏิกิริยาเคมีใด ๆ หากทราบชนิดของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะสามารถเขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยานั้นได้ แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วหรือช้า หรือสารใดมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี การที่จะทราบว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วหรือช้าและขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารใดนั้น ต้องได้จากการทดลองเท่านั้น

พื้นที่ผิวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ของแข็งแต่ละชนิดที่มีมวลเท่ากัน เมื่อเป็นผงละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเมื่อเป็นก้อนหรือเม็ด ซึ่งพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี การเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกัน ดังรูป 8.9 ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น

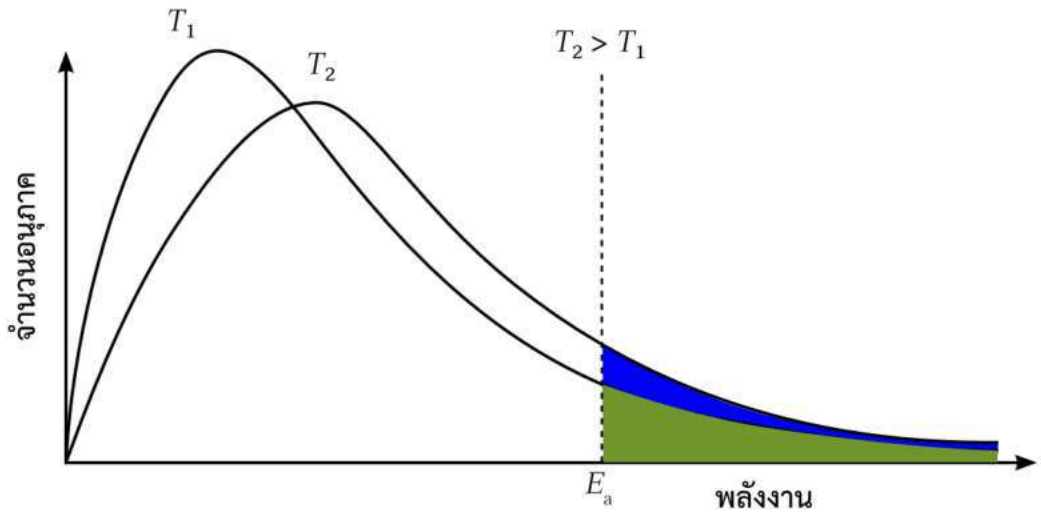


รูป 8.9 ผลของพื้นที่ผิวต่อโอกาสในการชนกันของอนุภาค

ความรู้เกี่ยวกับผลของพื้นที่ผิวที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่นำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน เช่น ยาลดกรดบางชนิดที่ต้องเคี้ยวให้ละเอียดก่อนกลืน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของยาให้ทำปฏิกิริยากับกรดในกระเพาะอาหารได้เร็วขึ้น

อุณหภูมิกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอนุภาคสารตั้งต้นจะมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายของจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานจลน์ต่าง ๆ เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูป 8.10



รูป 8.10 การกระจายของจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานจลน์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2

เนื่องจากอนุภาคที่ชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ต้องมีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับ E_a จากรูป 8.10 ที่อุณหภูมิสูง (T_2) มีพื้นที่ใต้กราฟทางด้านขวาที่มีพลังงานมากกว่าค่า E_a มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (T_1) แสดงว่าที่อุณหภูมิ T_2 มีจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่า E_a มากกว่าที่อุณหภูมิ T_1 ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ความรู้เกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่นำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันทั่วไป เช่น การเก็บรักษาอาหารหรือผลไม้ไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้อยู่ได้นานและคงความสดใหม่ การอบขนมปังที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผงฟูเกิดการสลายตัวได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แทรกตัวในเนื้อขนมปังได้เร็วขึ้น

ชวนคิด

1. เมื่อใส่ผงแมกนีเซียม 0.5 กรัม (หนึ่งเมล็ดถั่วเขียว) ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายทั้งสองต่างกันหรือไม่ อย่างไร
2. หากทำการทดลองดังข้อ 1 โดยใช้สารละลาย ดังต่อไปนี้
   - สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
   - สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
   - สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

   อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายใดมีค่ามากที่สุด เพราะเหตุใด

นอกจากความเข้มข้น พื้นที่ผิว และอุณหภูมิ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังจะได้ศึกษาจากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 8.5 การออกแบบและทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่ออัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จุดประสงค์การทดลอง

1. ออกแบบและทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่ออัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. อธิบายผลของการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่ออัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร
2. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร้อยละ 8 โดยมวลต่อปริมาตร
3. บีกเกอร์ขนาด 50 mL
4. กระบอกตวงขนาด 10 mL
5. หลอดหยด

วิธีทดลอง

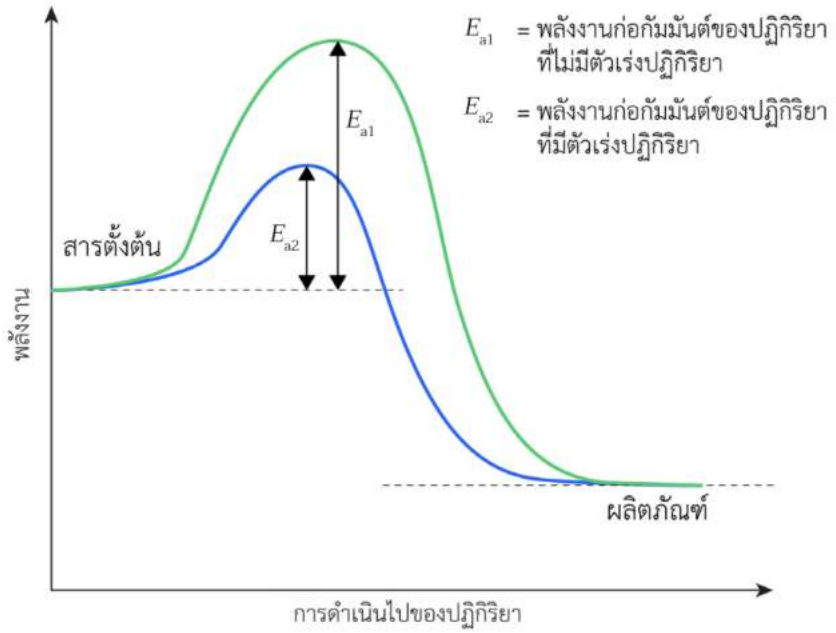
1. ออกแบบและนำเสนอการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติม KI ต่ออัตราการสลายตัวของ H_2O_2 โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่กำหนดให้
2. ทำการทดลอง และเขียนรายงานการทดลอง

คำถามท้ายการทดลอง

1. การเกิดปฏิกิริยาเคมีและการสิ้นสุดของปฏิกิริยาเคมี สังเกตได้อย่างไร สอดคล้องกับสมการเคมีอย่างไร
2. KI ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือไม่ อย่างไร
3. การเติม KI มีผลต่อสีของสารละลายระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีและหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาเคมีหรือไม่ อย่างไร

สารที่เติมลงไปแล้วทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้น เรียกว่า **ตัวเร่งปฏิกิริยา** (catalyst) มีผลให้พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเคมีต่ำลง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยา แต่เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมาเหมือนเดิม

แผนภาพแสดงพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเดียวกันที่ไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงได้ดังรูป 8.11



รูป 8.11 แผนภาพพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเดียวกันที่ไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยามีประโยชน์มากทั้งในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรม เช่น การย่อยอาหารในร่างกายใช้เอนไซม์หลายชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตแอมโมเนียใช้เหล็กหรือรูทิเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตเนยเทียมจากน้ำมันพืชใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเป็นพิษ ประสิทธิภาพ ราคา ความยากง่ายในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์

นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ยังมีสารบางชนิดที่ใช้เติมลงไปในปริมาณเล็กน้อยเพื่อทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีลดลง สารที่เติมลงไปนี้เรียกว่า ตัวหน่วงปฏิกิริยา ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ เช่น สารกันบูดที่ใช้ในกระบวนการถนอมอาหารหรือยืดอายุผลิตภัณฑ์ สารหน่วงไฟที่ใช้เติมในวัสดุเพื่อลดอัตราการเผาไหม้

นอกจากความเข้มข้น พื้นที่ผิว อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว ธรรมชาติของสารยังส่งผลให้สารแต่ละชนิดมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกัน เช่น การเผาไหม้ของถ่านและเพชรซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีอัญรูปแตกต่างกัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่เท่ากัน

จากที่ทราบแล้วว่าการเคี้ยวยาลดกรด การเก็บอาหารไว้ในตู้เย็น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตปุ๋ยแอมโมเนียและการผลิตเนยเทียม เป็นตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมอื่นอีกหรือไม่ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 8.6 สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จุดประสงค์ของกิจกรรม

สืบค้นข้อมูลและนำเสนอตัวอย่างกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

วิธีทำกิจกรรม

1. สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
2. นำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่สามารถสร้างความเข้าใจให้กับผู้อื่นได้ดี เช่น แผนผัง แผ่นพับ วีดิทัศน์ และอภิปรายเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ในห้องเรียน

แบบฝึกหัด 8.3

1. ปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับกรดไฮโดรคลอริกเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน ข้อสรุปเกี่ยวกับปฏิกิริยาต่อไปนี้ ถูกต้องหรือไม่ เพราะเหตุใด
   1.1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น
   1.2 เมื่อใช้แผ่นเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วกว่าผงตะไบเหล็กที่มีมวลเท่ากัน
   1.3 เมื่อใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วกว่า เมื่อใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
   1.4 การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในระบบ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น
   1.5 เมื่อคนสารในระบบ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

2. เมื่อนำสาร A และสาร B ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 10 นาที พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เป็น A_2B ซึ่งมีความเข้มข้น ดังตาราง

การทดลองที่	ความเข้มข้น (M)		
	A เริ่มต้น	B เริ่มต้น	A_2B ที่ 10 นาที
1	1.00	0.50	0.40
2	1.00	1.00	0.40
3	1.00	1.50	0.40
4	0.50	0.50	0.20

   2.1 เขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น
   2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A และ B อย่างไร

3. พิจารณาปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับไอโอดีน (I_2) ที่อุณหภูมิ 458 องศาเซลเซียส ดังสมการเคมี

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

เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเป็น 2 เท่า โดยปริมาตรของภาชนะคงที่ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าลดปริมาตรของภาชนะลงครึ่งหนึ่งโดยปริมาณของแก๊สเท่าเดิมจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างไร เพราะเหตุใด

4. เมื่อเผาโลหะแมกนีเซียมในอากาศจะลุกไหม้อย่างรวดเร็วได้ออกไซด์ของแมกนีเซียม แต่เมื่อวางโลหะแมกนีเซียมไว้ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนอย่างช้า ๆ เป็นเพราะเหตุใด

5. การผลิตเนยเทียมที่เป็นของแข็งจากน้ำมันพืชที่เป็นของเหลวทำโดยเติมแก๊สไฮโดรเจนและโลหะนิกเกิลลงไปในกระบวนการผลิต เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลที่ใส่ลงไปทั้งหมดจะถูกแยกออกจากเนยเทียม โลหะนิกเกิลที่เติมลงไปทำหน้าที่ใด

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีวัดจากการลดลงของสารตั้งต้นหรือการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ในหน่วยโมลหรือโมลาร์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา หารด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้นในสมการเคมี ซึ่งอาจวัดเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่ง

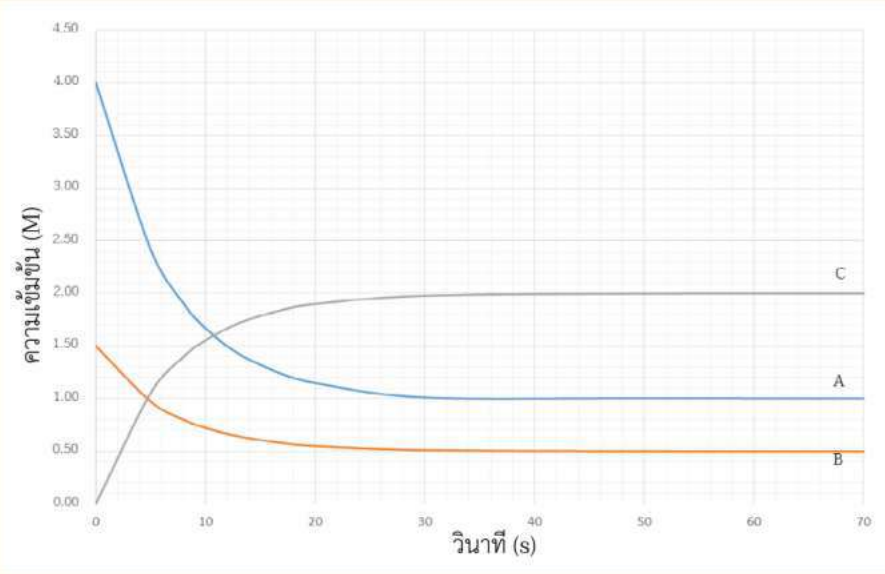
ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นชนกันในทิศทางที่เหมาะสมและมีพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ชนมากพอตามทฤษฎีการชน เมื่ออนุภาคของสารตั้งต้นชนกันจะมีพลังงานศักย์สูงขึ้นจนถึงสถานะแทรนซิชันตามทฤษฎีสถานะแทรนซิชัน ซึ่งพลังงานก่อกัมมันต์เปรียบเทียบได้จากผลต่างของพลังงานศักย์ที่สถานะแทรนซิชันกับสถานะเริ่มต้น

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหนึ่ง ๆ คือ ความเข้มข้น พื้นที่ผิว อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมต่าง ๆ

แบบฝึกหัดท้ายบท

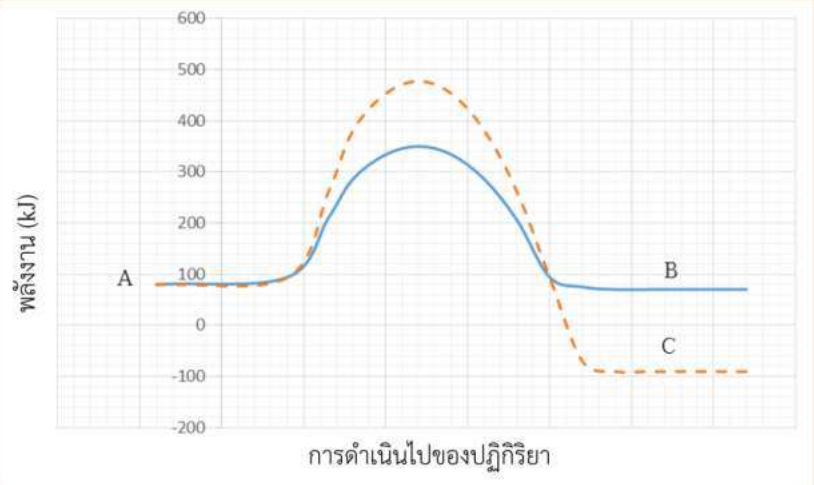
1. ปฏิกิริยา $3A + 2B \longrightarrow 2C$ ถ้าสาร A มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.20 โมลาร์ เมื่อเวลาผ่านไป 90 วินาที ความเข้มข้นของสาร A ลดลงเหลือ 0.05 โมลาร์ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร C ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นเท่าใด

2. พิจารณากราฟต่อไปนี้



จงเขียนสมการเคมีและคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

3. สาร A เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็นสาร B และ C ตามแผนภาพการดำเนินไปของปฏิกิริยาดังแสดง



ถ้าเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมีด้วยความเข้มข้นของสาร A เท่ากัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของ $A \longrightarrow B$ และ $A \longrightarrow C$ เท่ากันหรือไม่ อย่างไร

4. ปฏิกิริยาการสลายตัวของโพแทสเซียมคลอเรต ($KClO_3$) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และแก๊สออกซิเจน (O_2) ดังสมการเคมี

$$2KClO_3(s) \longrightarrow 2KCl(s) + 3O_2(g)$$

ปฏิกิริยาดังกล่าวต้องมีการให้ความร้อนและใช้แมงกานีส(IV)ออกไซด์ (MnO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1 ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีควรติดตามโดยการวัดปริมาณของสารใด เพราะเหตุใด

4.2 ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นอีก ควรทำอย่างไร

4.3 ถ้าทำการทดลองในภาชนะขนาด 10.0 ลิตร เมื่อทำการทดลองผ่านไป 10 นาที ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วัดความดันภายในภาชนะได้เท่ากับ 11.98 บรรยากาศ จงคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ยของปฏิกิริยานี้ เมื่อกำหนดให้ ปริมาตรของโพแทสเซียมคลอเรตและโพแทสเซียมคลอไรด์ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะ

5. ในการจุดเทียนหอม ความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้เนื้อเทียนเป็นของเหลว เนื้อเทียนเหลวจะเคลื่อนที่ไปตามไส้เทียนและเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ เกิดเป็นแสงสว่างและทำให้น้ำมันหอมระเหยในเนื้อเทียนฟุ้งกระจายไป หากต้องการให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงซึ่งจะทำให้จุดเทียนหอมให้สว่างและส่งกลิ่นหอมได้นานขึ้นควรทำอย่างไร

6. จากการศึกษาปฏิกิริยา $A(aq) + B(aq) \longrightarrow P(aq)$ เมื่อทำการจับเวลาที่ใช้ในการเกิดสาร P ให้ได้ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ได้ผลดังตาราง

การทดลองที่	ความเข้มข้นเริ่มต้น (M)		สาร X (g)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (s)
	A	B			
1	0.10	0.10	-	25	30
2	0.10	0.10	-	45	15
3	0.10	0.10	0.01	25	5
4	0.10	0.20	-	25	10
5	0.20	0.10	-	25	15

6.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นใด ทราบได้อย่างไร

6.2 สาร X ทำหน้าที่ใดในปฏิกิริยานี้

6.3 เพราะเหตุใดการทดลองที่ 2 จึงใช้เวลาน้อยกว่าการทดลองที่ 1

7. ในการทดลองทำจรวดจากขวดน้ำพลาสติกทำได้โดยนำขวดน้ำมาตกแต่งเป็นรูปจรวด จากนั้นเติมน้ำส้มสายชู (CH_3COOH) ลงไปประมาณหนึ่งในสี่ของขวด และนำโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ประมาณ 1 ช้อนโต๊ะ มาห่อด้วยกระดาษชำระและอัดไว้ที่ปากขวด ปิดปากขวดให้เรียบร้อย จากนั้นคว่ำขวด น้ำส้มสายชูจะทำให้กระดาษทิชชูเปียกและแตกออก น้ำส้มสายชูจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการเคมี

$$CH_3COOH(aq) + NaHCO_3(s) \longrightarrow CH_3COONa(aq) + H_2O(l) + CO_2(g)$$

การปรับปรุงในข้อใด จะทำให้เกิดแรงดันจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น

7.1 เพิ่มปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

7.2 เพิ่มความเข้มข้นของน้ำส้มสายชู

7.3 เปลี่ยนขวดน้ำพลาสติกให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

บทที่ 9 | สมดุลเคมี

ipst.me/8877

การเกิดหินงอกหินย้อยเกี่ยวข้องกับสมดุลเคมีของปฏิกิริยาระหว่างหินปูนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

คำถามสำคัญ

1. สมดุลเคมีคืออะไร และเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. ค่าคงที่สมดุลมีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาเคมีอย่างไร
3. ปัจจัยใดที่มีผลต่อปริมาณสารที่สมดุลและค่าคงที่สมดุล

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. ทดสอบและอธิบายความหมายของปฏิกิริยาผันกลับได้และสภาวะสมดุล
2. อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เมื่อเริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุล
3. เขียนความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลจากสมการเคมี
4. คำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี
5. คำนวณความเข้มข้นของสารที่สมดุล
6. คำนวณค่าคงที่สมดุลหรือความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาหลายขั้นตอน
7. ระบุปัจจัยที่มีผลต่อสมดุลและค่าคงที่สมดุลของระบบ
8. ใช้หลักของเลอชาเตอลิเอในการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสมดุลของระบบถูกรบกวน
9. ยกตัวอย่างและอธิบายสมดุลเคมีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต ปรากฏการณ์ในธรรมชาติและกระบวนการในอุตสาหกรรม

ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ใส่เครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง

.....1. น้ำแข็งในแก้วเก็บความเย็นเป็นระบบปิด

.....2. ปฏิกิริยาเคมีระหว่างหินปูนกับกรดเกลือในบีกเกอร์เป็นการเปลี่ยนแปลงในระบบเปิด

.....3. ปฏิกิริยาดูดพลังงานมีค่าพลังงานของปฏิกิริยา (ΔE) เป็นบวก

.....4. ปฏิกิริยาคายพลังงาน ให้ผลิตภัณฑ์และพลังงาน

.....5. ปฏิกิริยาคายพลังงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีลดลง

.....6. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วงเริ่มต้นมีค่าน้อย และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

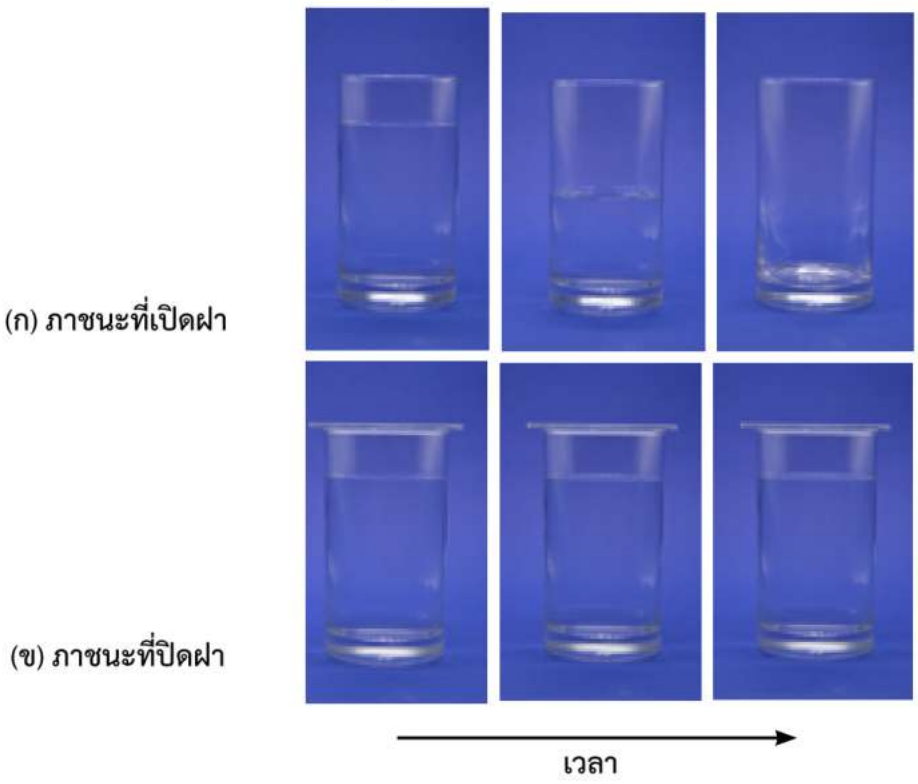
.....7. ปฏิกิริยา $H_2(g) + I_2(g) \longrightarrow 2HI(g)$ เมื่อ H_2 ลดลง 0.5 โมล จะมี HI เกิดขึ้น 0.5 โมล

.....8. ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในน้ำ 4.0 กรัม แล้วเติมน้ำจนสารละลายมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร สารละลายมีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

การเปลี่ยนแปลงของสาร เช่น การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง การบูดเน่าของอาหาร การระเหิดของน้ำแข็งแห้ง เป็นการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ง่ายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วและดำเนินไปในทิศทางเดียว แต่ในธรรมชาติหรือในชีวิตประจำวันยังมีปรากฏการณ์ที่ดูเสมือนว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสารเกิดขึ้น เช่น หินงอกหินย้อยที่พบเห็นในถ้ำ ระดับน้ำที่บรรจุอยู่ในภาชนะปิด ปรากฏการณ์เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงของสารเกิดขึ้นหรือไม่ เพราะเหตุใดจึงไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง และหากต้องการตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสารอยู่หรือไม่ จะทำได้อย่างไร

9.1 สภาวะสมดุล

หากพิจารณาระดับน้ำในภาชนะที่เปิดฝาซึ่งเป็นระบบเปิด และระดับน้ำในภาชนะที่ปิดฝาซึ่งเป็นระบบปิด เมื่อเวลาผ่านไป ดังรูป 9.1



รูป 9.1 น้ำที่อยู่ในภาชนะที่เปิดฝาและปิดฝา เมื่อเวลาผ่านไป

จากรูป 9.1 เมื่อเวลาผ่านไประดับน้ำในภาชนะที่เปิดฝามีปริมาตรลดลงอย่างชัดเจน ส่วนระดับน้ำในภาชนะที่ปิดฝาไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง การลดลงของระดับน้ำที่อยู่ในภาชนะเปิดสามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากน้ำมีการระเหยกลายเป็นไอน้ำตลอดเวลา จึงทำให้ระดับน้ำลดลง ส่วนระดับน้ำในภาชนะที่ปิดฝาสังเกตไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง น้ำในภาชนะปิดมีการระเหยเป็นไอน้ำหรือไม่ มีกระบวนการใดที่ทำให้น้ำในภาชนะที่ปิดฝามีระดับคงที่ ศึกษาได้จากกิจกรรม 9.1

กิจกรรม 9.1 การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้

จุดประสงค์ของกิจกรรม

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ของระบบ

วัสดุและอุปกรณ์

ลวดเสียบกระดาษ จำนวน 40 อัน หรือวัสดุอื่น เช่น ลูกอม เหรียญบาท

วิธีทำกิจกรรม

ตอนที่ 1

1. แบ่งลวดเสียบกระดาษเป็นกลุ่ม A และ B โดยเริ่มต้นกำหนดให้มีลวดเสียบกระดาษในกลุ่ม A จำนวน 30 อัน และ B 10 อัน
2. ย้ายลวดเสียบกระดาษ จากทั้งสองกลุ่มพร้อมกัน โดยย้ายลวดเสียบกระดาษ จำนวนครึ่งหนึ่งของ A ไป B และย้ายลวดเสียบกระดาษจำนวนหนึ่งในสี่ของ B ไป A โดยถ้าจำนวนลวดเสียบกระดาษที่ต้องย้ายเป็นเลขทศนิยมตั้งแต่ 0.5 ให้ปัดขึ้น ส่วนเลขทศนิยมที่น้อยกว่า 0.5 ให้ปัดลง
3. บันทึกจำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายไปและจำนวนรวมของลวดเสียบกระดาษในแต่ละกลุ่ม
4. ทำซ้ำข้อ 2–3 อีก 4 ครั้ง

ตอนที่ 2

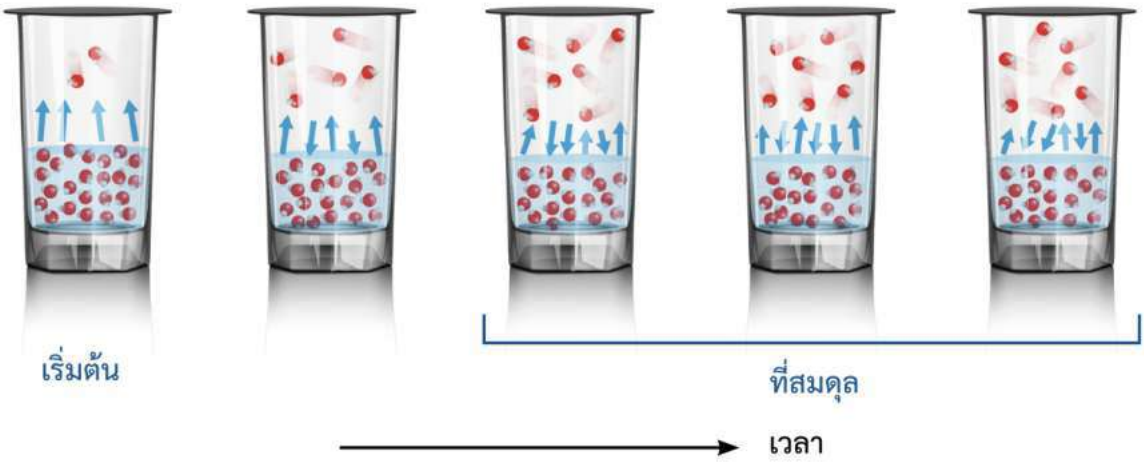
ทำกิจกรรมเช่นเดียวกับตอนที่ 1 โดยเริ่มต้นให้กลุ่ม A มีลวดเสียบกระดาษจำนวน 40 อัน แต่กลุ่ม B ไม่มีลวดเสียบกระดาษ

คำถามท้ายกิจกรรม

1. จำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายจากกลุ่ม A ไปกลุ่ม B ในแต่ละครั้งมีแนวโน้มเป็นอย่างไร
2. จำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายจากกลุ่ม B ไปกลุ่ม A ในแต่ละครั้งมีแนวโน้มเป็นอย่างไร
3. เมื่อจำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายจากกลุ่ม A ไปกลุ่ม B เท่ากับจำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายจากกลุ่ม B ไปกลุ่ม A จำนวนรวมของลวดเสียบกระดาษในแต่ละกลุ่มหลังการย้ายในครั้งต่อ ๆ ไป เป็นอย่างไร
4. หากให้จำนวนลวดเสียบกระดาษในกลุ่ม A และกลุ่ม B เป็นปริมาณสาร A และสาร B และให้จำนวนลวดเสียบกระดาษที่ย้ายจากแต่ละกลุ่มในแต่ละครั้งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าจากสาร A ไปเป็นสาร B และอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจากสาร B ไปเป็นสาร A อาจสรุปได้ว่าปริมาณของสาร A และสาร B คงที่เมื่อใด

จากกิจกรรม ถ้าเปรียบลวดเสียบกระดาษเป็นสาร จะเห็นว่าสารในระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแต่ละชนิดในระบบด้วย จนถึงสภาวะหนึ่งระบบจะมีปริมาณสารแต่ละชนิดคงที่ เรียกสภาวะนั้นว่า **สภาวะสมดุล** (equilibrium state) สภาวะสมดุลที่เกิดขึ้นในกิจกรรม 9.1 สารยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ จึงทำให้ปริมาณสารแต่ละชนิดคงที่ สมดุลลักษณะนี้เรียกว่า **สมดุลพลวัต** (dynamic equilibrium) หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า **สมดุล** (equilibrium)

สมดุลพบได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในรูป 9.1 เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ คือ การเปลี่ยนสถานะ โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าคือน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ และมีการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับคือไอน้ำควบแน่นกลายเป็นน้ำ น้ำที่อยู่ในภาชนะเปิดมีอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่าอัตราการควบแน่นของไอน้ำอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากไอน้ำสามารถฟุ้งกระจายออกนอกภาชนะได้ ระดับน้ำจึงลดลงและไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้ ในขณะที่น้ำในภาชนะปิดเมื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำแต่ไม่สามารถออกจากภาชนะได้ จึงมีปริมาณของไอน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการควบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูป 9.2 เมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราการควบแน่นของไอน้ำเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำ ระบบจะเข้าสู่สมดุล ทำให้ระดับน้ำในแก้วคงที่ หากทำการทดลองและสังเกตอย่างละเอียดอาจพบว่าระดับน้ำในแก้วที่ปิดฝาลดลงเล็กน้อยจากตอนเริ่มต้นแล้วคงที่ที่ระดับนั้น ซึ่งแสดงว่าระบบได้เข้าสู่สมดุลแล้ว



รูป 9.2 การเข้าสู่สมดุลของน้ำและไอน้ำ

ตัวอย่างข้างต้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 9.2 การทดสอบปฏิกิริยาของไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) และไอร์ออน(II)ไอออน (Fe^{2+})

จุดประสงค์ของกิจกรรม

1. ทดสอบปฏิกิริยาระหว่างไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) กับไอโอไดด์ไอออน (I^-) พร้อมทั้งเขียนสมการเคมี
2. ทดสอบปฏิกิริยาระหว่างไอร์ออน(II)ไอออน (Fe^{2+}) กับไอโอดีน (I_2) พร้อมทั้งเขียนสมการเคมี
3. บอกความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาระหว่างไอร์ออน(III)ไอออนกับไอโอไดด์ไอออนกับปฏิกิริยาระหว่างไอร์ออน(II)ไอออนกับไอโอดีน

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

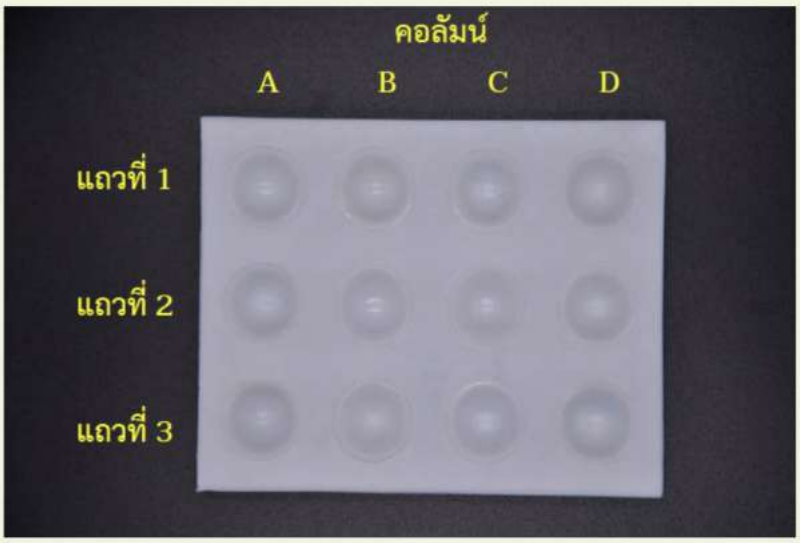
1. สารละลายไอร์ออน(III)ไนเทรต ($Fe(NO_3)_3$) 0.05 mol/L
2. สารละลายแอมโมเนียมไอร์ออน(II)ซัลเฟต ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$) 0.05 mol/L

3. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 0.05 mol/L
4. สารละลายไอโอดีนในเอทานอล (I_2) 1%
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/L
6. สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต(III) ($K_3Fe(CN)_6$) 0.1 mol/L
7. สารละลายซิลเวอร์ไนเทรต ($AgNO_3$) 0.1 mol/L
8. น้ำแป้งสุก 1%
9. หลอดทดลองขนาดเล็ก
10. จานหลุมพลาสติก
11. หลอดหยด
12. ไม้จิ้มฟัน

วิธีทำกิจกรรม

การเตรียมสารสำหรับการทดสอบ

1. เตรียมจานหลุมพลาสติกและติดฉลาก ดังรูป



2. หยดสารละลายที่ใช้ทดสอบตามที่ระบุในแต่ละคอลัมน์ ในทุกแถว หลุมละ 3 หยด ดังนี้

คอลัมน์	A	B	C	D
สารที่เติม (ทุกแถว)	NaOH	$K_3Fe(CN)_6$	$AgNO_3$	น้ำแป้งสุก

ตอนที่ 1 ทดสอบ Fe^{3+} Fe^{2+} I^- และ I_2

1. หยดสารละลายต่อไปนี้ ลงในหลุมของแถวที่ 1 หลุมละ 2 หยด คนสารละลายให้เข้ากัน

คอลัมน์	A	B	C	D
สารที่เติม (แถวที่ 1)	$Fe(NO_3)_3$	$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$	KI	I_2

2. บันทึกการเปลี่ยนแปลงในแต่ละหลุม และเก็บสารไว้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในตอนที่ 2 และ 3

ตอนที่ 2 การทดสอบสารในปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{3+} กับ I^-

1. ใส่ $Fe(NO_3)_3$ ลงในหลอดทดลอง 10 หยด จากนั้นเติม KI ลงไป 10 หยด เขย่าเบา ๆ สังเกตการเปลี่ยนแปลง และบันทึกผล
2. นำสารผสมจากข้อ 1 มาหยดในจานหลุม ในแถวที่ 2 หลุมละ 2 หยด คนสารละลายให้เข้ากัน สังเกตการเปลี่ยนแปลง และบันทึกผล
3. เปรียบเทียบสีหรือตะกอนของสารในแถวที่ 2 กับแถวที่ 1 ของแต่ละคอลัมน์

ตอนที่ 3 การทดสอบสารในปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{2+} กับ I_2

1. ใส่ $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ ลงในหลอดทดลอง 10 หยด แล้วเติม I_2 10 หยด เขย่าเบา ๆ สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผล
2. นำสารผสมจากข้อ 1 มาหยดในจานหลุมในแถวที่ 3 หลุมละ 2 หยด คนสารละลายให้เข้ากัน สังเกตการเปลี่ยนแปลง และบันทึกผล
3. เปรียบเทียบสีหรือตะกอนของสารในแถวที่ 3 กับแถวที่ 1 ของแต่ละคอลัมน์

ความรู้เพิ่มเติม

การดุลสมการเคมี นอกจากต้องดุลจำนวนอะตอมของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ให้เท่ากันแล้ว ต้องดุลจำนวนประจุให้เท่ากันด้วย

คำถามท้ายกิจกรรม

1. ในตอนที่ 2 สารที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{3+} กับ I^- มีสารใดอยู่บ้าง
2. สมการไอออนิกสุทธิของปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{3+} กับ I^- เป็นอย่างไร
3. ในตอนที่ 3 สารที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{2+} กับ I_2 มีสารใดอยู่บ้าง
4. สมการไอออนิกสุทธิของปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{2+} กับ I_2 เป็นอย่างไร
5. ปฏิกิริยาเคมีของตอนที่ 2 และ 3 มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ อย่างไร
6. จากตอนที่ 2 และ 3 น่าจะมีสมดุลระหว่างปฏิกิริยา Fe^{3+} กับ Fe^{2+} เกิดขึ้นหรือไม่ ทราบได้อย่างไร

ปฏิกิริยาเคมีบางชนิด สารตั้งต้นสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า **ปฏิกิริยาไปข้างหน้า** (forward reaction) และผลิตภัณฑ์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนกลับไปเป็นสารตั้งต้น ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า **ปฏิกิริยาย้อนกลับ** (reverse reaction) ปฏิกิริยาเคมีที่มีทั้งปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ เรียกว่า **ปฏิกิริยาผันกลับได้** (reversible reaction) ซึ่งเขียนแสดงด้วยลูกศร $\rightleftharpoons$ เช่น

ปฏิกิริยาผันกลับได้ $[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq) \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l)$

ปฏิกิริยาไปข้างหน้า $[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq) \longrightarrow [CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l)$

ปฏิกิริยาย้อนกลับ $[CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l) \longrightarrow [Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq)$

เมื่อให้ปฏิกิริยาผันกลับได้ดำเนินไปในระบบปิด จนกระทั่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ระบบจะเข้าสู่สมดุลที่เรียกว่า **สมดุลเคมี** (chemical equilibrium) ซึ่งเป็นสมดุลพลวัต

ตรวจสอบความเข้าใจ

จากกิจกรรม 9.2 ถ้ากำหนดให้ปฏิกิริยาเคมีในตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้า จงเขียนสมการไอออนิกสุทธิของปฏิกิริยาย้อนกลับและปฏิกิริยาผันกลับได้

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อเริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุลมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 9.3 ความเข้มข้นของสารเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล

จุดประสงค์ของกิจกรรม

อธิบายความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อเริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุล

วัสดุและอุปกรณ์

กระดาษกราฟ

วิธีทำกิจกรรม

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต่อเวลา จากข้อมูลความเข้มข้นของสารที่เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยาเคมีในระบบปิดต่อไปนี้

ระบบที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (mol/L)		
	X_2	Y_2	X_3Y
0	3.00	1.00	0.00
1	2.25	0.75	0.50
2	1.92	0.64	0.72
3	1.71	0.57	0.86
4	1.59	0.53	0.94
5	1.53	0.51	0.98
6	1.50	0.50	1.00
7	1.50	0.50	1.00
8	1.50	0.50	1.00

ระบบที่ 2

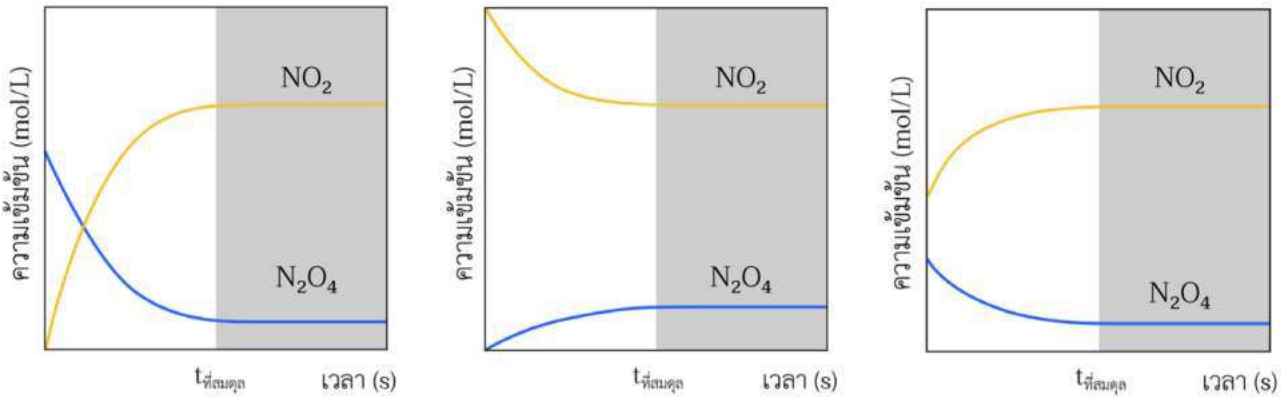
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (mol/L)		
	X_2	Y_2	X_3Y
0	0.00	0.00	2.00
1	0.75	0.25	1.50
2	1.08	0.36	1.28
3	1.29	0.43	1.14
4	1.41	0.47	1.06
5	1.50	0.50	1.00
6	1.50	0.50	1.00
7	1.50	0.50	1.00
8	1.50	0.50	1.00

คำถามท้ายกิจกรรม

1. ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้หรือไม่ ทราบได้อย่างไร และสมการเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร
2. ระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลาใด
3. เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไร
4. ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อเริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

สำหรับปฏิกิริยาผันกลับได้ในระบบปิด เมื่อสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ระบบจะอยู่ในสมดุลซึ่งเป็นสมดุลพลวัต

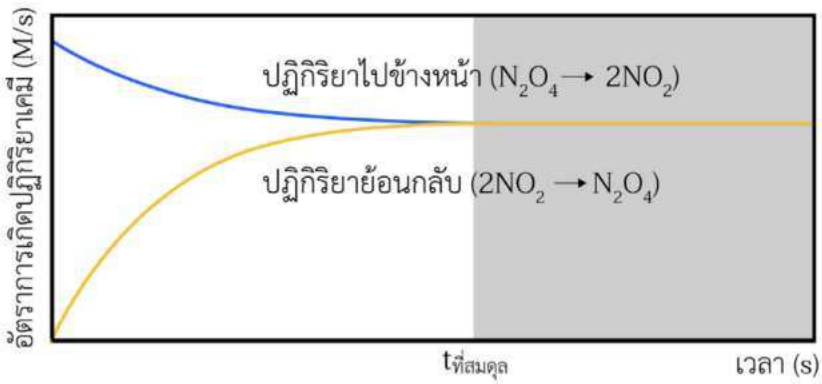
ปฏิกิริยาผันกลับได้ใด ๆ ในระบบปิด เช่น ปฏิกิริยาเคมีของแก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ปฏิกิริยาเคมีนี้ ไม่ว่าจะเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยใช้ N_2O_4 หรือ NO_2 หรือสารทั้งสองชนิด เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลจะพบทั้ง NO_2 และ N_2O_4 ซึ่งมีความเข้มข้นคงที่ ดังรูป 9.3



(ก) เริ่มต้นด้วย N_2O_4 (ข) เริ่มต้นด้วย NO_2 (ค) เริ่มต้นด้วย N_2O_4 และ NO_2

รูป 9.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ N_2O_4 และ NO_2 กับเวลา

จากรูป 9.3 (ก) สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเวลาได้ดังรูป 9.4



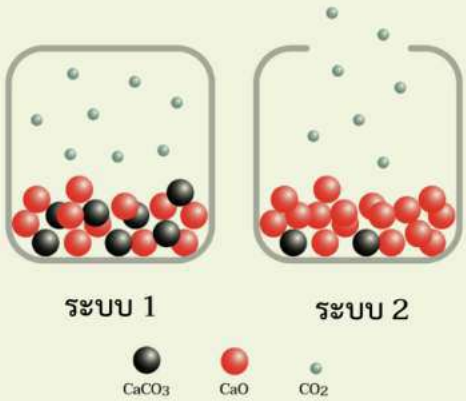
รูป 9.4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเวลาของปฏิกิริยา $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$

จากรูป 9.4 เมื่อสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ในช่วงแรกสารตั้งต้นมีความเข้มข้นมากจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสูง ในขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นน้อยจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับต่ำ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าลดลง ส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ที่เวลา $t_{\text{ที่สมดุล}}$ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ระบบจะอยู่ในสมดุล

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. ระบบใดของปฏิกิริยาต่อไปนี้อยู่ในสมดุล เพราะเหตุใด

1.1 ปฏิกิริยาเคมี $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$



1.2 ปฏิกิริยาเคมี $Pb(NO_3)_2(aq) + 2KI(aq) \rightleftharpoons PbI_2(s) + 2KNO_3(aq)$ ทำในหลอดทดลองที่มีจุกปิดและไม่มีจุกปิด

2. ใส่เครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ถูกต้อง และเครื่องหมาย ✗ หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง

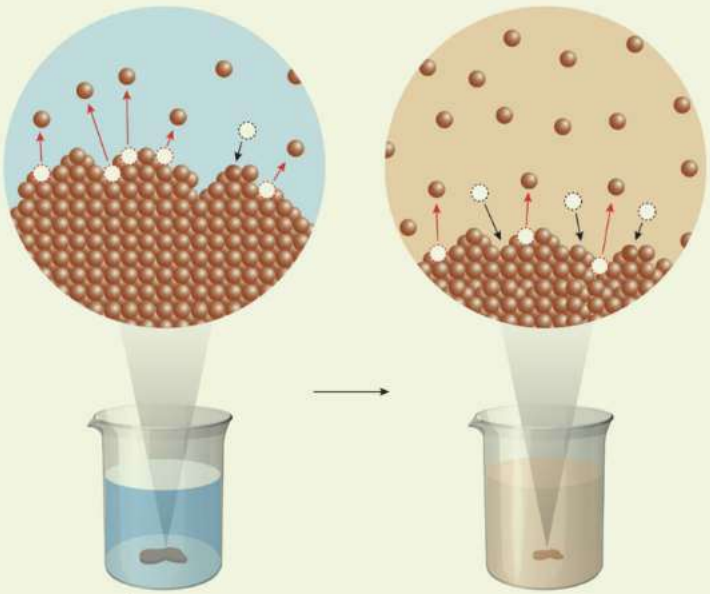
.....2.1 ที่สมดุล อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเท่ากัน

.....2.2 ที่สมดุล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากัน

.....2.3 ที่สมดุล ปริมาณของสารไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

รู้หรือไม่

นอกจากสมดุลระหว่างสถานะและสมดุลเคมีแล้ว ยังมีสมดุลอื่นที่เป็นสมดุลพลวัตด้วย เช่น สมดุลการละลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้



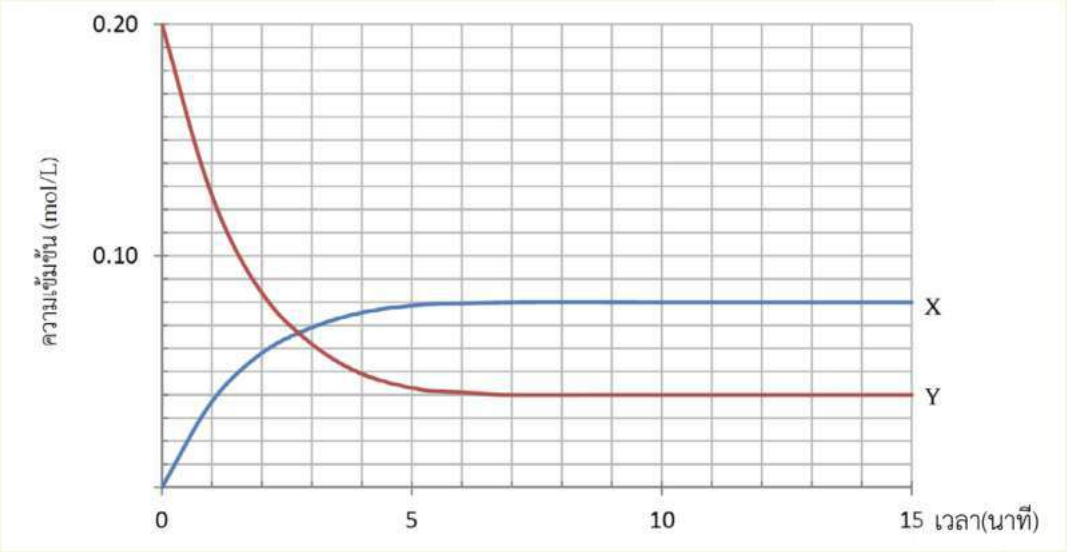
$$I_2(s) \rightleftharpoons I_2(\text{เอทานอล})$$

สารละลายอิ่มตัวของไอโอดีนในเอทานอลในระบบปิด ที่สมดุลมีอัตราการละลายเท่ากับอัตราการตกผลึก ทำให้ผลึกไอโอดีนและไอโอดีนในสารละลายมีปริมาณคงที่

แบบฝึกหัด 9.1

1. ระบบในข้อใดต่อไปนี้อยู่ในสมดุล เพราะเหตุใด
   1.1 ปรอทและไอปรอทในเทอร์มอมิเตอร์ ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
   1.2 หยดสารละลายกรดเกลือลงบนหินปูนในถ้วยกระเบื้อง ทำให้เกิดฟองแก๊สและยังมีหินปูนเหลืออยู่
   1.3 การเผาไม้ทำถ่านในเตาเผาที่มีช่องระบายควัน

2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาในสารละลายแสดงดังรูป



2.1 เขียนสมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

2.2 ระบบเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณเท่าใด

2.3 ที่สมดุล สารละลายมีสารใดอยู่บ้าง

2.4 เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที

3. พิจารณาการทดลองและผลการทดลองต่อไปนี้

เมื่อนำคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ($CuSO_4$) มาละลายน้ำ จะได้สารละลายเตตระอาควาคอปเปอร์(II)ไอออน ($[Cu(H_2O)_4]^{2+}$) ซึ่งมีสีฟ้า และเมื่อนำสารละลายสีฟ้ามาหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเตตระคลอโรคิวเปรต(II)ไอออน ($[CuCl_4]^{2-}$) ซึ่งมีสีเหลือง ส่งผลให้สังเกตเห็นสารละลายเป็นสีเขียว ถ้าแบ่งสารละลายสีเขียวมาหยดน้ำจะได้สารละลายสีฟ้า แต่ถ้าหยดกรดไฮโดรคลอริกจะได้สารละลายสีเหลือง

3.1 การทดลองนี้เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาผันกลับได้หรือไม่ ทราบได้อย่างไร

3.2 เขียนและดุลสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาเคมีในการทดลองนี้

9.2 ค่าคงที่สมดุล

นอกจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อระบบอยู่ในสมดุลเคมีแล้ว ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่สมดุลยังมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้อง ดังจะได้ศึกษาจากตัวอย่างต่อไปนี้

ในการศึกษาปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สไอโอดีนที่ 440 องศาเซลเซียส ดังสมการเคมี

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

ไม่มีสี สีม่วง ไม่มีสี

พบว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้สารที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน แล้ววัดความเข้มข้นของสารที่สมดุล ได้ผลดังตาราง 9.1

ตาราง 9.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นและที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สไอโอดีนที่ 485 องศาเซลเซียส

การทดลองที่	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mmol/L)			ความเข้มข้นที่สมดุล (mmol/L)			$\frac{[HI]}{[H_2][I_2]}$ ที่สมดุล	$\frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$ ที่สมดุล
	$[H_2]$	$[I_2]$	$[HI]$	$[H_2]$	$[I_2]$	$[HI]$		
1	2.000	2.000	0	0.442	0.442	3.116	16.0	49.7
2	0	0	2.000	0.221	0.221	1.560	31.9	49.8
3	0	0.010	0.350	0.035	0.045	0.280	178	49.8

เมื่อทำการหาอัตราส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมดุล ซึ่งยกกำลังด้วยเลขสัมประสิทธิ์ของสารนั้น ($\frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$) ของทุกการทดลองในตาราง 9.1 มีค่าใกล้เคียงกันมากจนถือว่าคงที่ จึงเรียกค่าที่ได้ว่า **ค่าคงที่สมดุล** (equilibrium constant; K) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละปฏิกิริยาเคมี ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ และกำหนดให้เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย เช่น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ มีค่าเท่ากับ 49.8 ที่ 485 องศาเซลเซียส

ชวนคิด

ตัวเลขยกกำลังของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ สอดคล้องกับตัวเลขใดในสมการเคมี

สำหรับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ถ้าสาร A ทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร B ได้สาร C และสาร D ดังสมการเคมี

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

เมื่อ a b c และ d คือ เลขสัมประสิทธิ์ ดังนั้นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีข้างต้น เขียนแสดงในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาเคมี โดยเป็นความเข้มข้นที่สมดุล ได้ดังนี้

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

ตัวอย่าง 1

เขียนค่าคงที่สมดุลในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

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

วิธีทำ

ค่าคงที่สมดุลเขียนในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นได้ดังนี้

$$K = \frac{[NO]^2}{[N_2][O_2]}$$

สำหรับสารที่ความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง เช่น ของแข็ง ของเหลว สารที่เป็นตัวทำละลาย ไม่นำมาคิดในการคำนวณค่าคงที่สมดุล ดังตัวอย่าง 2 และ 3

ตัวอย่าง 2

เขียนค่าคงที่สมดุลของสมการเคมี $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$ ในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาเคมี

วิธีทำ

เนื่องจาก $CaCO_3$ และ CaO เป็นของแข็ง จึงเขียนค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

$$K = [CO_2]$$

จากสมการแสดงว่าค่าคงที่สมดุลขึ้นกับความเข้มข้นของ CO_2 แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณของ $CaCO_3$ และ CaO

ตัวอย่าง 3

เขียนค่าคงที่สมดุลในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาเคมี ดังสมการเคมีต่อไปนี้

$$[CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l) \rightleftharpoons [Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq)$$

วิธีทำ

เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีนี้มีน้ำเป็นตัวทำละลาย จึงไม่ต้องเขียนความเข้มข้นของน้ำในค่าคงที่สมดุล ดังนั้นเขียนค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

$$K = \frac{[[Co(H_2O)_6]^{2+}][Cl^-]^4}{[[CoCl_4]^{2-}]}$$

ตรวจสอบความเข้าใจ

เขียนค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้ในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสาร

1. $CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + H_2(g)$
2. $Fe^{2+}(aq) + Ag^+(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$
3. $2Hg(l) + O_2(g) \rightleftharpoons 2HgO(s)$

โดยทั่วไปค่าคงที่สมดุลบ่งบอกถึงปริมาณสารตั้งต้นเทียบกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสมดุล ดังนี้

- ปฏิกิริยาเคมีที่มี $K>>1$ มีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์มากกว่าสารตั้งต้น หรืออาจกล่าวได้ว่าสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ดี
- ปฏิกิริยาเคมีที่มี $K<<1$ มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ หรือกล่าวได้ว่าสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ไม่ดี

ตัวอย่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ แสดงดังตาราง 9.2

ตาราง 9.2 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ

ปฏิกิริยาเคมี	อุณหภูมิ (K)	ค่าคงที่สมดุล
$H_2(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons 2HCl(g)$	300	1.6×10^{33}
$2NO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$	300	4.2×10^{13}
$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$	800	3.3×10^{4}
$CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons H_2(g) + CO_2(g)$	900	0.64
$CH_4(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + 3H_2(g)$	900	2.4×10^{-4}
$2CO_2(g) \rightleftharpoons 2CO(g) + O_2(g)$	1200	3.1×10^{-18}
$N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g)$	1000	1.0×10^{-30}

ตรวจสอบความเข้าใจ

จากข้อมูลในตาราง 9.2 ปฏิกิริยาเคมีใดมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่สมดุลมากกว่า ถ้าทั้งสองปฏิกิริยาเริ่มต้นจากสารตั้งต้นเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

1. $H_2(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons 2HCl(g)$
2. $2NO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$

ชวนคิด

จากค่าคงที่สมดุลในตาราง 9.2 สามารถเรียงลำดับอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

9.2.1 การคำนวณเกี่ยวกับค่าคงที่สมดุล

ค่าคงที่สมดุลคำนวณได้จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่สมดุล ในทางกลับกัน ถ้าทราบค่าคงที่สมดุลสามารถคำนวณความเข้มข้นของสารที่สมดุลได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 4

ปฏิกิริยา $Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons [FeSCN]^{2+}(aq)$ ที่ 20 องศาเซลเซียส ณ สมดุลมีไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) 0.100 โมลต่อลิตร ไทโอไซยาเนตไอออน (SCN^{-}) 0.200 โมลต่อลิตร และไทโอไซยาเนโตไอร์ออน(III)ไอออน ($[FeSCN]^{2+}$) 2.26 โมลต่อลิตร ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่าใด

วิธีทำ

จากสมการเคมีเขียนค่าคงที่สมดุลแล้วแทนค่าได้ดังนี้

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

$$= \frac{(2.26)}{(0.100)(0.200)}$$

$$= 113$$

ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้เท่ากับ 113

ตัวอย่าง 5

ปฏิกิริยา $FeO(s) + CO(g) \rightleftharpoons Fe(s) + CO_2(g)$ ที่ 1000 องศาเซลเซียส ณ สมดุลมีไอร์ออน(II) ออกไซด์ (FeO) 6.0 กรัม เหล็ก (Fe) 5.6 กรัม แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 0.40 โมลต่อลิตร และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 0.16 โมลต่อลิตร ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่าใด

วิธีทำ

จากสมการเคมีเขียนค่าคงที่สมดุลแล้วแทนค่าได้ดังนี้

$$K = \frac{[CO_2]}{[CO]}$$

$$= \frac{(0.16)}{(0.40)}$$

$$= 0.40$$

ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้เท่ากับ 0.40

ตัวอย่าง 6

ปฏิกิริยา $CH_4(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + 3H_2(g)$ ที่ 1500 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 5.67 และที่สมดุลมีแก๊สมีเทน (CH_4) 0.400 โมลต่อลิตร แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 0.300 โมลต่อลิตร และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) 0.800 โมลต่อลิตร ไอน้ำมีความเข้มข้นกี่โมลต่อลิตร

วิธีทำ

จากสมการเคมีเขียนค่าคงที่สมดุลแล้วแทนค่าได้ดังนี้

$$K = \frac{[CO][H_2]^3}{[CH_4][H_2O]}$$

แทนค่า

$$5.67 = \frac{(0.300)(0.800)^3}{(0.400)[H_2O]}$$

$$[H_2O] = \frac{(0.300)(0.800)^3}{(0.400)(5.67)}$$

$$= 0.0677 \text{ mol/L}$$

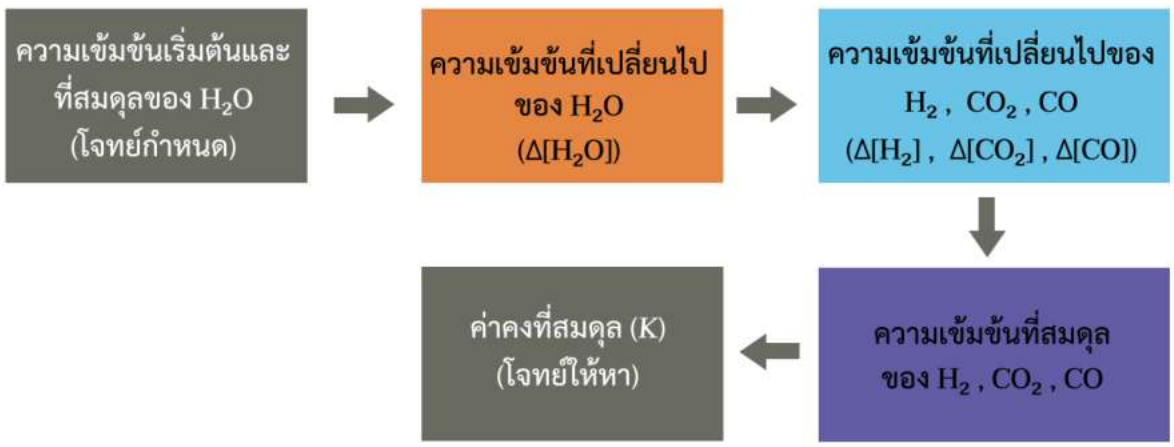
ดังนั้น ที่สมดุล ไอน้ำมีความเข้มข้น 0.0677 โมลต่อลิตร

กรณีที่ทราบความเข้มข้นของสาร ณ จุดเริ่มต้นของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนเข้าสู่สมดุล สามารถใช้ความรู้จากเรื่องปริมาณสัมพันธ์ของสารในปฏิกิริยาเคมีมาคำนวณค่าคงที่สมดุลได้ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 7

ปฏิกิริยา $H_2(g) + CO_2(g) \rightleftharpoons H_2O(g) + CO(g)$ ที่ 700 เคลวิน ที่เริ่มต้นมีแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 0.0150 โมลต่อลิตร และที่สมดุลมีไอน้ำ (H_2O) 3.68×10^{-3} โมลต่อลิตร ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่าใด

แนวคิด



วิธีทำ

ขั้นที่ 1 หาความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปของไอน้ำ ($\Delta[H_2O]$)

$$\Delta[H_2O] = [H_2O] \text{ ที่สมดุล} - [H_2O] \text{ เริ่มต้น}$$
$$= 3.68 \times 10^{-3} \text{ mol/L} - 0.000 \text{ mol/L}$$
$$= 3.68 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

ขั้นที่ 2 หาความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปของ H_2 CO_2 และ CO ($\Delta[H_2]$, $\Delta[CO_2]$, $\Delta[CO]$) ทำได้โดยพิจารณาจากเลขสัมประสิทธิ์เทียบกับ H_2O ดังนี้

$$\Delta[H_2] = -\Delta[H_2O] = -3.68 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$
$$\Delta[CO_2] = -\Delta[H_2O] = -3.68 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$
$$\Delta[CO] = +\Delta[H_2O] = +3.68 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

โดย + หมายถึงปริมาณสารเพิ่มขึ้น และ - หมายถึงปริมาณสารลดลง

ขั้นที่ 3 หาความเข้มข้นที่สมดุล จากความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป

$[H_2] = 0.0150\ mol/L - 3.68 \times 10^{-3}\ mol/L = 1.13 \times 10^{-2}\ mol/L$

$[CO_2] = 0.0150\ mol/L - 3.68 \times 10^{-3}\ mol/L = 1.13 \times 10^{-2}\ mol/L$

$[CO] = 0.000\ mol/L + 3.68 \times 10^{-3}\ mol/L = 3.68 \times 10^{-3}\ mol/L$

ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป และความเข้มข้นที่สมดุล สรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ความเข้มข้น (mol/L)	$H_2(g)$	+ $CO_2(g)$	$\rightleftharpoons$ $H_2O(g)$	+ $CO(g)$
เริ่มต้น	0.0150	0.0150	0.000	0.000
เปลี่ยนไป	-3.68×10^{-3}	-3.68×10^{-3}	$+3.68 \times 10^{-3}$	$+3.68 \times 10^{-3}$
สมดุล	1.13×10^{-2}	1.13×10^{-2}	3.68×10^{-3}	3.68×10^{-3}

ขั้นที่ 4 หาค่าคงที่สมดุล

จากสมการเคมี เขียนค่าคงที่สมดุลแล้วแทนค่าความเข้มข้นของสารที่สมดุลได้ดังนี้

$$K = \frac{[H_2O][CO]}{[H_2][CO_2]}$$

$$= \frac{(3.68 \times 10^{-3})(3.68 \times 10^{-3})}{(1.13 \times 10^{-2})(1.13 \times 10^{-2})}$$

$$= 0.106$$

ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีนี้เท่ากับ 0.106

ตัวอย่าง 8

ปฏิกิริยา $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ ที่ 740 เคลวิน มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 48.8 เมื่อให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) 2.00 โมลต่อลิตร ทำปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สไอโอดีน (I_2) 2.00 โมลต่อลิตร ที่สมดุล แก๊สทั้งสามชนิดมีความเข้มข้นเท่าใด

วิธีทำ

กำหนดให้ $\Delta[H_2] = -x$ mol/L ดังนั้น $\Delta[I_2] = -x$ mol/L และ $\Delta[HI] = +2x$ mol/L ซึ่งนำไปคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลได้ดังตาราง

ความเข้มข้น (mol/L)	$H_2(g)$ +	$I_2(g)$ $\rightleftharpoons$	$2HI(g)$
เริ่มต้น	2.00	2.00	0.00
เปลี่ยนไป	$-x$	$-x$	$+2x$
สมดุล	$2.00 - x$	$2.00 - x$	$2x$

จากค่าคงที่สมดุล แทนค่าได้ดังนี้

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

$$48.8 = \frac{(2x)^2}{(2.00 - x)(2.00 - x)}$$

$$48.8 = \frac{(2x)^2}{(2.00 - x)^2}$$

$$6.99 = \frac{(2x)}{(2.00 - x)}$$

$$x = 1.56$$

นั่นคือ $[H_2] = [I_2] = 2.00 \text{ mol/L} - x$

$= 2.00 \text{ mol/L} - 1.56 \text{ mol/L}$

$= 0.44 \text{ mol/L}$

$$[HI] = 2x \text{ mol/L}$$
$$= 2(1.56 \text{ mol/L})$$
$$= 3.12 \text{ mol/L}$$

ดังนั้น ที่สมดุลแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไอโอดีนมีความเข้มข้น 0.44 โมลต่อลิตร ส่วนแก๊สไฮโดรเจนไอโอไดด์มีความเข้มข้น 3.12 โมลต่อลิตร

ตัวอย่าง 9

ปฏิกิริยาเคมี $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$ ที่ 150 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 4.50 เมื่อให้ความร้อนแก่แก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) 1.00 โมล ที่ 150 องศาเซลเซียส ในภาชนะ 2.0 ลิตร จนถึงสมดุล แก๊สทั้งสองชนิดจะมีความเข้มข้นเท่าใด

วิธีทำ

คำนวณความเข้มข้นของ N_2O_4 เริ่มต้น ในหน่วย mol/L ได้ดังนี้

$$[N_2O_4] = \frac{1.00 \text{ mol}}{2.00 \text{ L}} = 0.500 \text{ mol/L}$$

กำหนดให้ $\Delta[N_2O_4] = -x$ mol/L ดังนั้น $\Delta[NO_2] = +2x$ mol/L ซึ่งนำไปคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลได้ดังตาราง

ความเข้มข้น (mol/L)	$N_2O_4(g) \rightleftharpoons$	$2NO_2(g)$
เริ่มต้น	0.500	0.00
เปลี่ยนไป	$-x$	$+2x$
สมดุล	$0.500 - x$	$2x$

จากค่าคงที่สมดุล แทนค่าได้ดังนี้

$$K = \frac{[NO_2]^2}{[N_2O_4]}$$
$$4.50 = \frac{(2x)^2}{(0.500 - x)}$$

$$4.50(0.500 - x) = 4x^2$$

$$4x^2 + 4.50x - 2.25 = 0$$

สมการนี้อยู่ในรูป $ax^2 + bx + c = 0$ ซึ่งสามารถคำนวณค่า x ได้ดังนี้

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

แทนค่า $a = 4$ $b = 4.50$ และ $c = -2.25$

$$x = \frac{-4.50 \pm \sqrt{(4.50)^2 - 4(4)(-2.25)}}{2(4)}$$

$$= -1.50 \text{ หรือ } 0.375$$

เมื่อแทนค่า x เท่ากับ -1.50 จะได้ $[N_2O_4]$ มากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้น ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น x จึงมีค่าเท่ากับ 0.375

นั่นคือ

$$[N_2O_4] = 0.500 \text{ mol/L} - x$$

$$= 0.500 \text{ mol/L} - 0.375 \text{ mol/L}$$

$$= 0.125 \text{ mol/L}$$

$$[NO_2] = 2x \text{ mol/L}$$

$$= 2(0.375 \text{ mol/L})$$

$$= 0.750 \text{ mol/L}$$

ดังนั้น ที่สมดุล แก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์มีความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มีความเข้มข้น 0.750 โมลต่อลิตร

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ทำปฏิกิริยาเคมีในภาชนะขนาด 250 มิลลิลิตร ดังสมการเคมี

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

ที่ 700 เคลวิน ณ สมดุล พบว่ามีแก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) 0.200 0.750 และ 0.400 โมล ตามลำดับ ค่าคงที่สมดุลมีค่าเท่าใด

2. ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ เท่ากับ 54 ที่ 700 เคลวิน ณ สมดุล ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้พบว่าในภาชนะขนาด 2.0 ลิตร มีแก๊สไฮโดรเจนไอโอไดด์ (HI) 0.6 โมล และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) 0.4 โมล จะมีแก๊สไอโอดีน (I_2) กี่โมลต่อลิตร

3. ปฏิกิริยา $A(g) + 2B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ถ้าผสมสาร A 1.00 โมล กับสาร B 1.50 โมล ในภาชนะขนาด 2.00 ลิตร ที่สมดุลความเข้มข้นของ C เท่ากับ 0.700 โมล ค่าคงที่สมดุลมีค่าเท่าใด

4. ที่อุณหภูมิหนึ่ง ถ้าผสมแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 0.065 โมล กับไอร์ออน(II)ออกไซด์ (FeO) มากเกินพอในภาชนะขนาด 1.0 ลิตร ที่สมดุลมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อย่างละกี่โมล สมการเคมีแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและค่าคงที่สมดุลดังแสดง

$$FeO(s) + CO(g) \rightleftharpoons Fe(s) + CO_2(g) \qquad K = 0.516$$

9.2.2 ค่าคงที่สมดุลกับสมการเคมี

การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของสมการเคมี เช่น การกลับข้างสมการเคมี ซึ่งใช้แสดงปฏิกิริยาเคมีในทิศทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนเลขสัมประสิทธิ์ด้วยการคูณสมการเคมี การรวมสมการเคมีของปฏิกิริยามากกว่า 1 ปฏิกิริยา จะส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลดังต่อไปนี้

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่มีทิศทางตรงกันข้าม

พิจารณาสมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีที่มีทิศทางตรงกันข้าม ต่อไปนี้

$$N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g) \qquad .....(1): \quad K_1 = \frac{[NO_2]^2}{[N_2O_4]}$$

$$2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g) \qquad .....(2): \quad K_2 = \frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2}$$

จะเห็นว่าค่าคงที่สมดุลของสมการเคมี (2) เป็นส่วนกลับของค่าคงที่สมดุลของสมการเคมี (1) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K_2 = \frac{1}{K_1}$$

ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่มีทิศทางตรงกันข้าม (K') จะเป็นค่าที่เป็นส่วนกลับกับค่าคงที่สมดุลเดิม (K)

$$K' = \frac{1}{K}$$

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขสัมประสิทธิ์ด้วยการคูณสมการเคมี

พิจารณาสมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g) \qquad .....(1): \quad K_1 = \frac{[SO_3]^2}{[SO_2]^2[O_2]}$$

เมื่อคูณสมการเคมี (1) ด้วย 2 จะได้สมการเคมี (2) ที่มีค่าคงที่สมดุล (K_2) ดังนี้

$$4SO_2(g) + 2O_2(g) \rightleftharpoons 4SO_3(g) \qquad .....(2): \quad K_2 = \frac{[SO_3]^4}{[SO_2]^4[O_2]^2}$$

จะเห็นว่า ค่าคงที่สมดุล (K_2) เท่ากับค่าคงที่สมดุลเดิม (K_1) ยกกำลังด้วยตัวคูณ ซึ่งในที่นี้คือยกกำลัง 2 ดังนี้

$$K_2 = K_1^2$$

ดังนั้น เมื่อมีการคูณเลขสัมประสิทธิ์ในสมการเคมีด้วย n ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี (K') จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่สมดุลเดิม (K) ยกกำลัง n แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K' = K^n$$

แสดงว่าการเปลี่ยนเลขสัมประสิทธิ์มีผลต่อค่าคงที่สมดุล การระบุค่าคงที่สมดุลจึงควรแสดงสมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีนั้นด้วย หากไม่แสดงถือว่าเป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่มีเลขสัมประสิทธิ์ในสมการเป็นเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุด

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการรวมปฏิกิริยา

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารวมที่เกิดจากปฏิกิริยาหลายขั้นตอน หาได้จากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่นำมารวมกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ถ้าปฏิกิริยาเคมีระหว่าง N_2 กับ O_2 ได้ NO_2 เกิดจากการรวมกันของ 2 ปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g) \qquad .....(1): \quad K_1 = \frac{[NO]^2}{[N_2][O_2]}$$

$$2NO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g) \qquad .....(2): \quad K_2 = \frac{[NO_2]^2}{[NO]^2[O_2]}$$

เมื่อรวมสมการเคมี (1) กับ (2) จะได้สมการเคมีรวม ดังนี้

$$N_2(g) + 2O_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g) \qquad .....(3): \quad K_3 = \frac{[NO_2]^2}{[N_2][O_2]^2}$$

ซึ่ง K_3 มีความสัมพันธ์กับ K_1 และ K_2 ดังนี้

$$K_3 = \frac{[NO_2]^2}{[N_2][O_2]^2} = \frac{\cancel{[NO]^2}}{[N_2][O_2]} \cdot \frac{[NO_2]^2}{\cancel{[NO]^2}[O_2]}$$

$$= K_1 \cdot K_2$$

สรุปได้ว่า ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารวม (K) มีค่าเท่ากับผลคูณของค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีที่นำมารวมกัน แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \ldots \cdot K_n$$

การคำนวณเกี่ยวกับค่าคงที่สมดุลและความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาหลายขั้นตอน แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 10

จากค่าคงที่สมดุลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

$N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g)$ .....(1) : $K_1 = 2.00 \times 10^{-25}$

$NO_2(g) \rightleftharpoons NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g)$ .....(2) : $K_2 = 1.25 \times 10^{-5}$

ปฏิกิริยารวม $2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2(g) + 2O_2(g)$

1. ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารวมมีค่าเท่าใด
2. ถ้าที่สมดุลมีแก๊สไนโตรเจน (N_2) 3.91×10^3 โมลต่อลิตร และแก๊สออกซิเจน (O_2) 2.00×10^3 โมลต่อลิตร ที่สมดุลมีแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) กี่โมลต่อลิตร

วิธีทำ

1. คำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารวม

กลับสมการเคมี (1) $2NO(g) \rightleftharpoons N_2(g) + O_2(g)$ .....(3) : $K_3 = \frac{1}{K_1}$

นำสมการเคมี (2) × 2 $2NO_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g) + O_2(g)$ .....(4) : $K_4 = K_2^2$

รวมสมการเคมี (3) กับ (4) $2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2(g) + 2O_2(g)$ $K' = ?$

$$K' = K_3 \cdot K_4$$

$$= \frac{1}{K_1} \cdot K_2^2$$

$$= \frac{(1.25 \times 10^{-5})^2}{2.00 \times 10^{-25}}$$

$$= 7.81 \times 10^{14}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยารวมเท่ากับ 7.81×10^{14}

2. คำนวณความเข้มข้นของ NO_2 ที่สมดุล

$$K' = \frac{[N_2][O_2]^2}{[NO_2]^2}$$

แทนค่า $7.81 \times 10^{14} = \frac{(3.91 \times 10^3)(2.00 \times 10^3)^2}{[NO_2]^2}$

$$[NO_2]^2 = \frac{(3.91 \times 10^3)(2.00 \times 10^3)^2}{7.81 \times 10^{14}}$$

$$[NO_2] = 4.47 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

ดังนั้น ที่สมดุล แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มีความเข้มข้น 4.47×10^{-3} โมลต่อลิตร

แบบฝึกหัด 9.2

1. เขียนค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้ในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสาร

1.1 $2H_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2H_2O(g)$

1.2 $2Fe(s) + 2NO_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g) + 2FeO(s)$

1.3 $Ag^+(aq) + Fe^{2+}(aq) \rightleftharpoons Fe^{3+}(aq) + Ag(s)$

1.4 $NaHCO_3(s) \rightleftharpoons Na_2CO_3(s) + CO_2(g) + H_2O(g)$

1.5 $H_2SO_4(l) + SO_3(g) \rightleftharpoons H_2S_2O_7(l)$

1.6 $2H_2O(l) \rightleftharpoons H_3O^+(aq) + OH^-(aq)$

1.7 $Cu^{2+}(aq) + 4NH_3(aq) \rightleftharpoons [Cu(NH_3)_4]^{2+}(aq)$

1.8 $2Fe^{3+}(aq) + 3Cu(s) \rightleftharpoons 2Fe(s) + 3Cu^{2+}(aq)$

2. เขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาเคมีซึ่งทุกสารอยู่ในสถานะแก๊ส และมีค่าคงที่สมดุลในรูปอัตราส่วนความเข้มข้นของสารต่อไปนี้

2.1 $\frac{[CH_4][H_2O]}{[CO][H_2]^3}$

2.2 $\frac{[NO_2]^2}{[NO]^2[O_2]}$

2.3 $\frac{[NO]^4[H_2O]^6}{[NH_3]^4[O_2]^5}$

2.4 $\frac{[NO_2]^2[Cl_2]}{[NO_2Cl]^2}$

2.5 $\frac{[CO]^2[O_2]}{[CO_2]^2}$

3. กำหนดค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$Cl_2(g) \rightleftharpoons 2Cl(g)$ .....(1) : $K_1 = 6.40 \times 10^{-39}$

$Cl_2(g) + 2NO(g) \rightleftharpoons 2NOCl(g)$ .....(2) : $K_2 = 3.70 \times 10^{-8}$

$Cl_2(g) + 2NO_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2Cl(g)$ .....(3) : $K_3 = 1.80$

คำนวณค่าคงที่สมดุลของสมการเคมีต่อไปนี้

3.1 $2Cl(g) \rightleftharpoons Cl_2(g)$

3.2 $2Cl_2(g) + 4NO(g) \rightleftharpoons 4NOCl(g)$

3.3 $2NOCl(g) \rightleftharpoons 2Cl(g) + 2NO(g)$

3.4 $2Cl(g) + 2NO_2(g) \rightleftharpoons 2NO_2Cl(g)$

4. ปฏิกิริยา $N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g)$ ที่อุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 4.1×10^{-4} ถ้าที่สมดุลมีแก๊สไนโตรเจน (N_2) 1.4 กรัม และแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) 0.015 กรัม ในภาชนะ 0.50 ลิตร จะมีแก๊สออกซิเจน (O_2) กี่กรัม

5. ปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นดังสมการเคมี

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

ที่อุณหภูมิ 1000 เคลวิน เริ่มต้นบรรจุแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ 6.09×10^{-3} โมลต่อลิตร ในภาชนะปิด เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ลดลงและมีความเข้มข้นคงที่ที่ 2.44×10^{-3} โมลต่อลิตร ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้ที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าเท่าใด

6. ปฏิกิริยา $HCOOH(aq) + CN^-(aq) \rightleftharpoons HCN(aq) + HCOO^-(aq)$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 4.5×10^5 ถ้าที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) กับฟอร์เมตไอออน ($HCOO^-$) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีกรดไฮโดรไซยานิกและฟอร์เมตไอออนอย่างละ 0.1 โมลต่อลิตร และกรดฟอร์มิก (HCOOH) 2.0×10^{-4} โมลต่อลิตร ไซยาไนด์ไอออน (CN^-) มีความเข้มข้นกี่โมลต่อลิตร

7. จากค่าคงที่สมดุลที่อุณหภูมิหนึ่งของปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

$C(s) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + H_2(g)$ .....(1) : $K_1 = 1.60 \times 10^{-21}$

$CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + H_2(g)$ .....(2) : $K_2 = 23.2$

ปฏิกิริยารวม $C(s) + 2H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + 2H_2(g)$

7.1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารวมมีค่าเท่าใด

7.2 ถ้าที่สมดุลในภาชนะ 1 ลิตร มีคาร์บอน (C) และไอน้ำ (H_2O) อย่างละ 1.00 โมล และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 2.32×10^{-7} โมล ที่สมดุลแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีความเข้มข้นกี่โมลต่อลิตร

9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมดุล

ปฏิกิริยาเคมีที่สมดุล ยังคงมีปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นตลอดเวลาด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เท่ากัน ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์คงที่ ซึ่งสมดุลอาจถูกรบกวนได้ด้วยปัจจัยบางประการที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ปฏิกิริยามีการปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต่างไปจากสมดุลเดิม ปัจจัยใดบ้างที่สามารถรบกวนสมดุล

9.3.1 ความเข้มข้น

การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่สมดุลมีผลต่อสมดุลหรือไม่ อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 9.4 ซึ่งเป็นสมดุลระหว่างสารละลายกรด (H_3O^+) กับสารกลุ่มแอนโทไซยานิน (A) จากดอกอัญชัน ดังสมการเคมี

$$A(aq) + H_3O^+(aq) \rightleftharpoons AH^+(aq) + H_2O(l)$$

สีน้ำเงิน สีแดง

รู้หรือไม่

แอนโทไซยานิน (anthocyanin) เป็นสารสีที่พบในพืช เช่น ดอกอัญชัน กะหล่ำปลีม่วง ทำให้พืชมีสีแดง น้ำเงิน หรือม่วง สารกลุ่มนี้ละลายในน้ำได้ดี และสามารถเปลี่ยนสีได้ตามความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

กิจกรรม 9.4 การทดลองผลของความเข้มข้นของสารต่อสมดุล

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารต่อสมดุล
2. อธิบายการเปลี่ยนแปลงสมดุล เมื่อมีการเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.02 mol/L
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.02 mol/L
3. น้ำดอกอัญชัน
4. น้ำกลั่น
5. กระบอกตวง ขนาด 10 mL
6. หลอดทดลองขนาดเล็ก
7. หลอดหยด

วิธีทดลอง

1. ใส่น้ำดอกอัญชันในหลอดทดลอง 3 หลอด หลอดละ 1.0 mL จากนั้นเติม HCl 0.02 mol/L หลอดละ 5 หยด
2. เติมสารละลายลงในหลอดทดลองในข้อ 1 ดังนี้
   หลอดที่ 1 เติมน้ำกลั่น 5 หยด ผสมให้เข้ากัน แล้วบันทึกสี
   หลอดที่ 2 เติม HCl 0.02 mol/L 5 หยด ผสมให้เข้ากัน แล้วบันทึกสี
   หลอดที่ 3 เติม NaOH 0.02 mol/L 5 หยด ผสมให้เข้ากัน แล้วบันทึกสี
   เปรียบเทียบสีของสารละลายหลอดที่ 2 และ 3 กับหลอดที่ 1
3. สังเกตสีของสารละลายทั้ง 3 หลอดอีกครั้ง เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที

ความรู้เพิ่มเติม

กรดไฮโดรคลอริกเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์แตกตัวในน้ำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังนั้นการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายหลอดที่ 3 จึงมีผลทำให้ความเข้มข้นของ H_3O^+ ลดลง เนื่องจาก H_3O^+ ทำปฏิกิริยากับ OH^- ดังสมการเคมี

$$HCl(aq) + H_2O(l) \longrightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$
$$H_3O^+(aq) + OH^-(aq) \longrightarrow 2H_2O(l)$$

คำถามท้ายการทดลอง

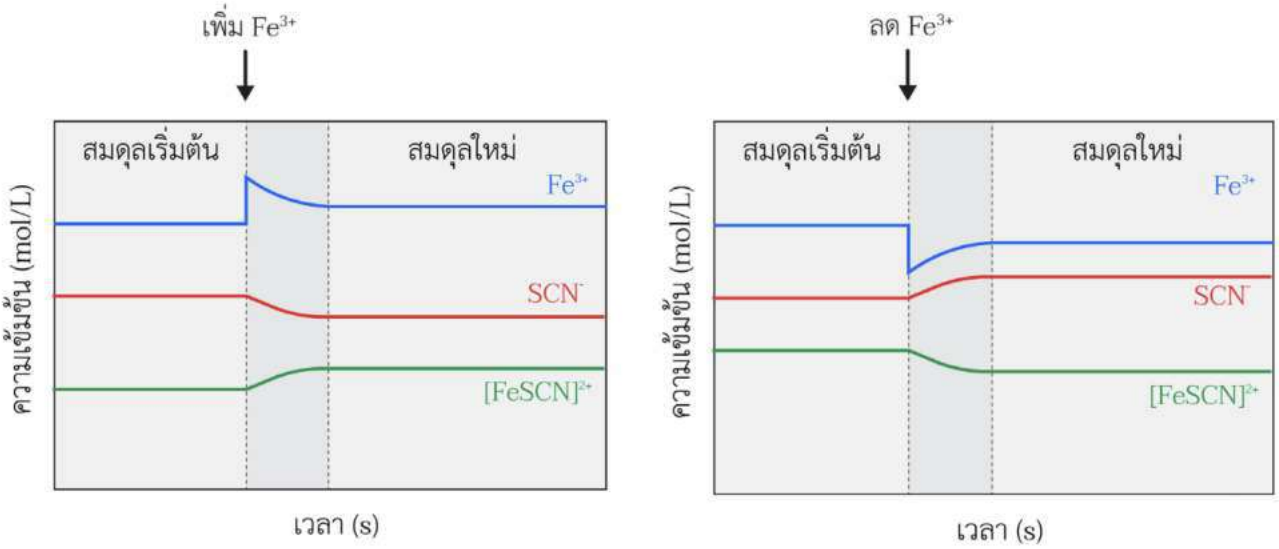
1. สารละลายในหลอดที่ 1 มีสีใด และสีที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับแอนโทไซยานินในรูป A ที่มีสีน้ำเงิน และ AH^+ ที่มีสีแดงอย่างไร
2. เมื่อเทียบกับหลอดที่ 1 การเติม HCl ลงในหลอดที่ 2 เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นใด และส่งผลต่อความเข้มข้นของสารอื่นในสารละลายอย่างไร ทราบได้อย่างไร
3. เมื่อเทียบกับหลอดที่ 1 การเติม NaOH ลงในหลอดที่ 3 เป็นการลดความเข้มข้นของสารตั้งต้นใด และส่งผลต่อความเข้มข้นของสารอื่นในสารละลายอย่างไร ทราบได้อย่างไร
4. เมื่อสมดุลของระบบถูกรบกวน โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่ง ระบบจะเข้าสู่สมดุลใหม่หรือไม่ ทราบได้อย่างไร

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่อยู่ในสมดุล ระบบจะปรับตัวเพื่อเข้าสู่สมดุลใหม่ เช่น สมดุลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) และไทโอไซยาเนตไอออน (SCN^-) ดังสมการเคมี

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

ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในระบบ ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดความเข้มข้นของ Fe^{3+} โดยทำปฏิกิริยาเคมีกับ SCN^- ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของ $[FeSCN]^{2+}$ จึงเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ $[FeSCN]^{2+}$ เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาย้อนกลับจะเกิดเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับเท่ากันอีกครั้ง ซึ่งเป็นการเข้าสู่สมดุลใหม่ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต่างไปจากเดิม ดังรูป 9.5 (ก)

ในทางกลับกัน ถ้าลดความเข้มข้นของ Fe^{3+} ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่เพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} โดย $[FeSCN]^{2+}$ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ Fe^{3+} และ SCN^- จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ ดังรูป 9.5 (ข)



(ก) เพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} **(ข) ลดความเข้มข้นของ Fe^{3+}**

รูป 9.5 ความเข้มข้นของสารต่าง ๆ เมื่อรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา $Fe^{3+}(aq) + SCN^-(aq) \rightleftharpoons [FeSCN]^{2+}(aq)$

ตรวจสอบความเข้าใจ

สมดุลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) และไทโอไซยาเนตไอออน (SCN^-) ถ้ามีการเพิ่มหรือลด $[FeSCN]^{2+}$ จะมีผลต่อความเข้มข้นของสารอื่นที่สมดุลอย่างไร

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารมีผลต่อค่าคงที่สมดุลของระบบหรือไม่ อย่างไร ศึกษาได้จากการรบกวนความเข้มข้นของสารที่สมดุลของปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{3+} และ SCN^- โดยการเพิ่ม Fe^{3+} ซึ่งความเข้มข้นของสารที่สมดุลเดิมและสมดุลใหม่แสดงดังตาราง 9.3

ตาราง 9.3 ความเข้มข้นของสารที่สมดุลของปฏิกิริยา $Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons [FeSCN]^{2+}(aq)$ ที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเพิ่ม Fe^{3+}

ภาวะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mol/L)			$K = \frac{[[FeSCN]^{2+}]}{[Fe^{3+}][SCN^{-}]}$
	Fe^{3+}	SCN^{-}	$[FeSCN]^{2+}$	
สมดุลเดิม	0.200	0.200	5.680	142
สมดุลใหม่	0.325	0.125	5.755	142

จากข้อมูลในตารางจะเห็นว่า ค่าคงที่สมดุล ณ สมดุลเดิมและสมดุลใหม่มีค่าเท่ากัน แสดงว่าการรบกวนสมดุลโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาเคมีทำให้ความเข้มข้นของสารที่สมดุลใหม่เปลี่ยนแปลงไปจากสมดุลเดิม แต่ไม่มีผลต่อค่าคงที่สมดุล เมื่อมีการรบกวนสมดุลโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร จึงสามารถใช้ค่าคงที่สมดุลในการคำนวณความเข้มข้นของสารที่สมดุลใหม่ได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 11

ปฏิกิริยา $Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons [FeSCN]^{2+}(aq)$ ที่ 25 องศาเซลเซียส ถ้าที่สมดุลมีความเข้มข้นของไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) และไทโอไซยาเนตไอออน (SCN^{-}) เท่ากับ 0.200 โมลต่อลิตร และไทโอไซยาเนโตไอร์ออน(III)ไอออน ($[FeSCN]^{2+}$) 5.68 โมลต่อลิตร มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 142 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอร์ออน(III)ไอออนจาก 0.200 โมลต่อลิตร เป็น 0.300 โมลต่อลิตร ที่สมดุลใหม่สารแต่ละชนิดมีความเข้มข้นเท่าใด

วิธีทำ

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในระบบ ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่ลดความเข้มข้นของ Fe^{3+} ถ้ากำหนดให้ $\Delta[Fe^{3+}] = -x$ mol/L ดังนั้น $\Delta[SCN^{-}] = -x$ mol/L และ $\Delta[[FeSCN]^{2+}] = +x$ mol/L ซึ่งนำไปคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลได้ดังตาราง

ความเข้มข้น (mol/L)	$Fe^{3+}(aq)$ +	$SCN^-(aq)$ ⇌	$[FeSCN]^{2+}(aq)$
สมดุลเดิม	0.200	0.200	5.68
เพิ่ม Fe^{3+}	0.300	0.200	5.68
เปลี่ยนไป	$-x$	$-x$	$+x$
สมดุลใหม่	$0.300 - x$	$0.200 - x$	$5.68 + x$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไม่มีผลต่อค่าคงที่สมดุล จึงแทนค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

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

$$142 = \frac{(5.68 + x)}{(0.300 - x)(0.200 - x)}$$

$$142x^2 - 72.0x + 2.84 = 0$$

$$x = \frac{-(-72.0) \pm \sqrt{(-72.0)^2 - 4(142)(2.84)}}{2(142)}$$

$$= 0.0431 \text{ หรือ } 0.464$$

เนื่องจากค่า x เท่ากับ 0.464 มีค่ามากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น x จึงมีค่าเท่ากับ 0.0431

นั่นคือ ที่สมดุลใหม่ มี $[Fe^{3+}] = 0.300 \text{ mol/L} - 0.0431 \text{ mol/L} = 0.257 \text{ mol/L}$

$[SCN^-] = 0.200 \text{ mol/L} - 0.0431 \text{ mol/L} = 0.157 \text{ mol/L}$

$[[FeSCN]^{2+}] = 5.68 \text{ mol/L} + 0.0431 \text{ mol/L} = 5.72 \text{ mol/L}$

ดังนั้น ที่สมดุลใหม่มีความเข้มข้นของไอร์ออน(III)ไอออน 0.257 โมลต่อลิตร ไทโอไซยาเนตไอออน 0.157 โมลต่อลิตร และไทโอไซยาเนโตไอร์ออน(III)ไอออน 5.72 โมลต่อลิตร

สังเกตว่าที่สมดุลใหม่ ความเข้มข้นของสารที่เพิ่มความเข้มข้น (Fe^{3+}) จะอยู่ระหว่างความเข้มข้นของสารนั้นที่สมดุลเดิมกับความเข้มข้นเมื่อเริ่มรบกวนสมดุล เช่นเดียวกับรูป 9.5 (ก) ในทำนองเดียวกันที่สมดุลใหม่ ความเข้มข้นของสารที่ลดความเข้มข้นจะอยู่ระหว่างความเข้มข้นของสารนั้นที่สมดุลเดิมกับความเข้มข้นเมื่อเริ่มรบกวนสมดุล ดังรูป 9.5 (ข)

ตรวจสอบความเข้าใจ

ปฏิกิริยา $Fe^{3+}(aq) + SCN^{-}(aq) \rightleftharpoons [FeSCN]^{2+}(aq)$ ที่ 25 องศาเซลเซียส ถ้าที่สมดุลมีความเข้มข้นของไอร์ออน(III)ไอออน (Fe^{3+}) และไทโอไซยาเนตไอออน (SCN^{-}) เท่ากับ 0.200 โมลต่อลิตร และไทโอไซยาเนโตไอร์ออน(III)ไอออน ($[FeSCN]^{2+}$) 5.68 โมลต่อลิตร เมื่อลดความเข้มข้นของไอร์ออน(III)ไอออนจาก 0.200 โมลต่อลิตร เป็น 0.100 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นที่สมดุลใหม่ของสารแต่ละชนิดมีค่าเท่าใด

ในกรณีที่สารในปฏิกิริยาเคมีเป็นแก๊ส การเปลี่ยนแปลงความดันโดยการเพิ่มหรือลดปริมาตรทำให้ความเข้มข้นของแก๊สเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันจึงมีผลต่อสมดุลของระบบ แต่ไม่มีผลต่อค่าคงที่สมดุลเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ต่างกันที่การเปลี่ยนความดันเป็นการรบกวนระบบโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่เป็นแก๊สทุกชนิดในปฏิกิริยาพร้อม ๆ กัน

พิจารณาสมดุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) กับแก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) ดังสมการเคมี

$$\underset{\text{สีน้ำตาลแดง}}{2NO_2(g)} \rightleftharpoons \underset{\text{ไม่มีสี}}{N_2O_4(g)} \qquad K = \frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2}$$

ถ้าเพิ่มความดันของระบบโดยการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง จะทำให้ความเข้มข้นของทั้ง NO_2 และ N_2O_4 เพิ่มขึ้น 2 เท่า ซึ่งมีผลทำให้ค่าอัตราส่วน $\frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2}$ เมื่อรบกวนระบบมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่สมดุล ดังนั้นระบบจึงปรับตัวโดย NO_2 เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้ N_2O_4 เพิ่มขึ้น เพื่อทำให้อัตราส่วน $\frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2}$ กลับมามีค่าเท่าเดิม ซึ่งสังเกตว่าการรบกวนสมดุลโดยการลดปริมาตรหรือเพิ่มความดันของแก๊ส มีผลทำให้สมดุลปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ ในทิศทางที่ทำให้จำนวนโมลของแก๊สน้อยลง ซึ่งพิจารณาได้จากเลขสัมประสิทธิ์ของสารที่มีสถานะแก๊สในสมการเคมี โดยเลขสัมประสิทธิ์ของ NO_2 มีค่าเท่ากับ 2 ส่วน N_2O_4 มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดัน ระบบจึงปรับตัวไปทิศทางที่ทำให้ N_2O_4 เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม การลดความดันโดยการเพิ่มปริมาตร ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่มีจำนวนโมลของแก๊สมากกว่า ซึ่งทำให้ NO_2 เพิ่มขึ้น

สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่ผลรวมของเลขสัมประสิทธิ์ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะแก๊สมีค่าเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงความดันไม่มีผลในการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา เช่น

$$CO_2(g) + H_2(g) \rightleftharpoons CO(g) + H_2O(g)$$

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความดันไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากกับความเข้มข้นของสารที่มีสถานะเป็นของแข็งและของเหลว

ตรวจสอบความเข้าใจ

1. ปฏิกิริยาเคมี $2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g)$ ที่ 25 องศาเซลเซียส ณ สมดุลมีแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) 0.100 โมลต่อลิตร และแก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) 0.250 โมลต่อลิตร ถ้าลดความดันโดยการเพิ่มปริมาตรของภาชนะที่บรรจุเป็น 2 เท่า ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดที่สมดุลใหม่มีค่าเท่าใด
2. ปฏิกิริยาเคมี $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$ ถ้าเพิ่มความดันของระบบโดยการลดปริมาตรที่สมดุลใหม่ สารแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ชวนคิด

ในปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับแก๊ส การเพิ่มความดันด้วยการเติมแก๊สชนิดอื่นที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารในระบบ โดยปริมาตรของระบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีผลต่อสมดุลของระบบหรือไม่ เพราะเหตุใด

9.3.2 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อสมดุลหรือไม่ อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 9.5 ซึ่งเป็นสมดุลระหว่างแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) กับแก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) ดังสมการเคมี

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

สีน้ำตาลแดง ไม่มีสี

กิจกรรม 9.5 การทดลองผลของอุณหภูมิต่อสมดุล

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมดุล
2. อธิบายการเปลี่ยนแปลงสมดุล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบ

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. แก๊สผสมของไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และแก๊สไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ (N_2O_4) ที่บรรจุในหลอดทดลองขนาดเล็ก
2. น้ำแข็ง
3. บีกเกอร์ ขนาด 250 mL
4. เทอร์มอมิเตอร์
5. ที่ตั้งหลอดทดลอง
6. ขาตั้ง พร้อมที่หนีบหลอดทดลอง
7. ตะเกียงแอลกอฮอล์ พร้อมตะแกรงลวดและที่กั้นลม

วิธีทดลอง

1. สังเกตสีของแก๊สที่เป็นสมดุลของ NO_2 กับ N_2O_4 ในหลอดทดลองที่เตรียมไว้ บันทึกผล
2. นำหลอดทดลองไปจุ่มในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 80 ^{o}C ตั้งไว้สักครู่ สังเกตสีและบันทึกผล
3. นำหลอดทดลองที่จุ่มในน้ำร้อนมาวางไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปจุ่มในน้ำแข็ง ตั้งไว้สักครู่ สังเกตสีและบันทึกผล

คำถามท้ายการทดลอง

1. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของ NO_2 เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทราบได้อย่างไร
2. เมื่ออุณหภูมิลดลง ความเข้มข้นของ NO_2 เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทราบได้อย่างไร

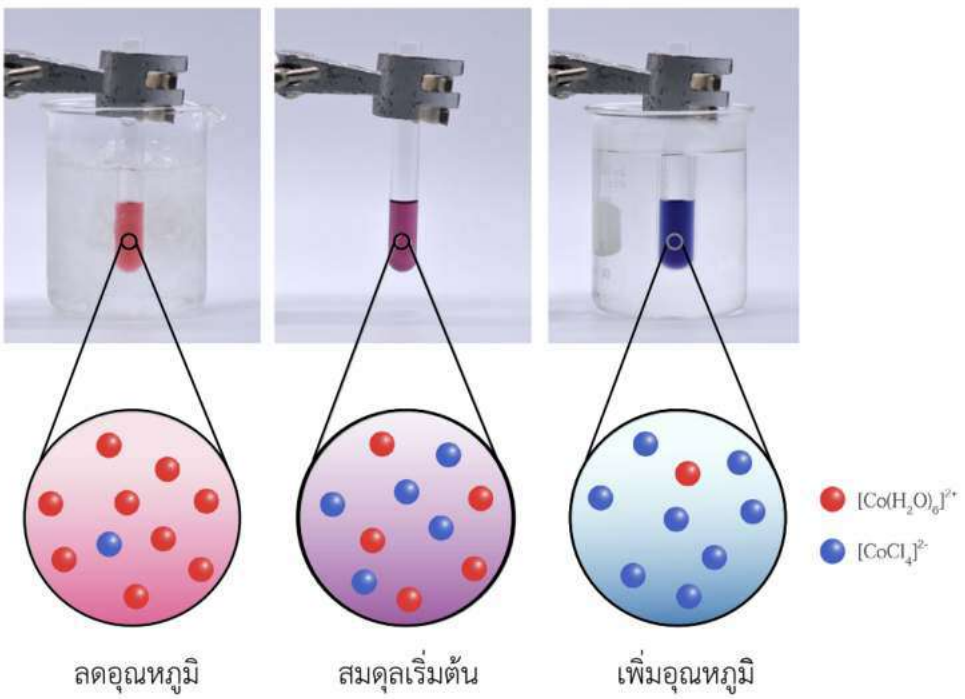
จากกิจกรรมจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อสมดุลของระบบ เนื่องจากการเพิ่มและลดอุณหภูมิเป็นการให้และลดพลังงานของระบบ จึงมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีซึ่งมีทั้งปฏิกิริยาดูดพลังงานและปฏิกิริยาคายพลังงานได้แตกต่างกัน ในกรณีที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน การรบกวนสมดุลของระบบโดยการเพิ่มอุณหภูมิ ระบบจะปรับตัวเพื่อลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยดูดพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาแล้วเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น จนเข้าสู่สมดุลใหม่ซึ่งมีปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้นและปริมาณสารตั้งต้นน้อยลงกว่าที่สมดุลเดิมทำให้ค่าคงที่สมดุลเพิ่มขึ้น แต่ถ้าลดอุณหภูมิ ระบบจะปรับตัวโดยเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมากขึ้น ทำให้ได้สารตั้งต้นมากขึ้นจนเข้าสู่สมดุลใหม่ ทำให้ค่าคงที่สมดุลลดลง

พิจารณาสมดุลของปฏิกิริยาระหว่างเฮกซะอาควาโคบอลต์(II)ไอออน ($[Co(H_2O)_6]^{2+}$) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) เกิดเป็นเตตระคลอโรโคบอลเตต(II)ไอออน ($[CoCl_4]^{2-}$) และน้ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานต่อไปนี้

$$[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq) + \text{พลังงาน} \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l)$$

สีชมพู สีน้ำเงิน

เมื่อรบกวนปฏิกิริยาที่สมดุลโดยการเพิ่มอุณหภูมิ ระบบจะปรับตัวไปทิศทางที่ให้ $[CoCl_4]^{2-}$ เพิ่มขึ้น สารละลายจึงมีสีน้ำเงินเข้มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้ารบกวนสมดุลโดยการลดอุณหภูมิ ระบบจะปรับตัวไปทิศทางที่ให้ $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ เพิ่มขึ้น สารละลายจึงมีสีชมพูเข้มขึ้น และเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ความเข้มข้นของสารในระบบคงที่ สีของสารละลายจึงคงที่ ดังรูป 9.6



รูป 9.6 การเปลี่ยนแปลงของสารเมื่อรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา

$[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq) + 4Cl^-(aq) + \text{พลังงาน} \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-}(aq) + 6H_2O(l)$ **โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ**

สำหรับปฏิกิริยาผันกลับได้ที่มีปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน การรบกวนสมดุลของระบบโดยการเพิ่มอุณหภูมิ จะส่งผลให้ระบบปรับตัวไปในทิศทางที่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมากขึ้น จนเข้าสู่สมดุลใหม่ ซึ่งมีปริมาณสารตั้งต้นมากขึ้นและปริมาณผลิตภัณฑ์น้อยลงกว่าที่สมดุลเดิม ทำให้ค่าคงที่สมดุลลดลง แต่ถ้าลดอุณหภูมิ ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น จนเข้าสู่สมดุลใหม่ ซึ่งมีปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้นและปริมาณสารตั้งต้นลดลงกว่าสมดุลเดิม ทำให้ค่าคงที่สมดุลเพิ่มขึ้น

ตรวจสอบความเข้าใจ

จากข้อมูลความเข้มข้นที่สมดุลของสารในปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในตาราง จงคำนวณค่าคงที่สมดุลและระบุว่าปฏิกิริยานี้มีปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานหรือคายพลังงาน

1. ปฏิกิริยา $N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้น (mol/L)		ค่าคงที่สมดุล
	N_2O_4	NO_2	
298	0.90	0.19	
400	0.55	0.89	
500	0.088	1.9	

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

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้น (mol/L)			ค่าคงที่สมดุล
	H_2	N_2	NH_3	
298	0.014	0.0048	2.1	
400	0.13	0.042	1.9	
500	0.47	0.16	1.7	

จากกิจกรรมจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีผลต่อค่าคงที่สมดุลของระบบ ดังนั้นในการแสดงค่าคงที่สมดุลใด ๆ จึงต้องระบุอุณหภูมิไว้ด้วย

ความรู้เพิ่มเติม

การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมดุลและค่าคงที่สมดุล

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดจะเห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ความดัน และอุณหภูมิของระบบที่สมดุล ระบบจะปรับตัวเพื่อเข้าสู่สมดุลใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับ **หลักของเลอชาเตอลิเอ**[3] (Le Châtelier's principle) ที่ระบุว่า เมื่อระบบที่สมดุลถูกรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อสมดุลของระบบ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่จะลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง

แบบฝึกหัด 9.3

1. ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับแก๊สออกซิเจน (O_2) ได้แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นดังสมการเคมี

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g) + 11.16\ kJ$$

ถ้ารบกวนสมดุลของปฏิกิริยาด้วยวิธีต่อไปนี้จะมีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์อย่างไร

1.1 ลดความดันของระบบ

1.2 เพิ่มความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในระบบ

1.3 ลดความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระบบ

[3]หลักของเลอชาเตอลิเอ ค้นพบโดยออง์รี–ลุย เลอชาเตอลิเอ (Henry Louis Le Châtelier) นักเคมีชาวฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2427 โดยได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ

2. แก๊สฟอสจีน ($COCl_2$) เป็นแก๊สพิษที่ไม่มีสี แต่ยังมีการใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารอินทรีย์ สีย้อม และสารกำจัดแมลง การเตรียมแก๊สฟอสจีนจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์(CO) และแก๊สคลอรีน (Cl_2) แสดงดังสมการเคมี

$$CO(g) + Cl_2(g) + \text{พลังงาน} \rightleftharpoons COCl_2(g)$$

สมดุลของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อรบกวนสมดุลด้วยวิธีการต่อไปนี้

2.1 ลดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

2.2 เพิ่มแก๊สคลอรีน

2.3 ลดอุณหภูมิของระบบ

2.4 เพิ่มความดันของระบบ

3. การกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในไอเสียของรถยนต์ ทำได้โดยให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน (O_2) บนผิวของโลหะบางชนิดที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

$$2CO(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2CO_2(g) + \text{พลังงาน}$$

3.1 ถ้าเพิ่มความดันของระบบโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพราะเหตุใด

3.2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยควบคุมความดันให้คงที่ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

4. ถ้ารบกวนสมดุลของปฏิกิริยาด้วยวิธีต่อไปนี้ จะทำให้ความเข้มข้นของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

4.1 $C_2H_6(g) \rightleftharpoons H_2(g) + C_2H_4(g)$	เติม H_2 (g)
4.2 $2NO_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g) + O_2(g)$	เติม NO_2 (g)
4.3 $CO(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons CH_4(g) + H_2O(g)$	เพิ่มความดัน
4.4 $CO_2(g) + 2SO_3(g) \rightleftharpoons CS_2(g) + 4O_2(g) + \text{พลังงาน}$	ลดอุณหภูมิ
4.5 $PbSO_4(s) + H^+(aq) \rightleftharpoons Pb^{2+}(aq) + HSO_4^-(aq)$	เติม $Pb(NO_3)_2(s)$
4.6 $PbCl_2(s) \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} Pb^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$	เติม $AgNO_3(s)$
4.7 $Fe^{3+}(aq) + 3OH^-(aq) \rightleftharpoons Fe(OH)_3(s)$	เติม HCl(aq)

5. ปฏิกิริยาเคมี $PCl_3(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons PCl_5(g)$ ที่ 25 องศาเซลเซียส ในภาชนะขนาด 2.00 ลิตร ที่สมดุลมีแก๊สฟอสฟอรัสไตรออกไซด์ (PCl_3) และแก๊สคลอรีน (Cl_2) อย่างละ 0.200 โมล และแก๊สฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (PCl_5) 2.60 โมล ถ้าลดปริมาตรของภาชนะที่บรรจุเหลือ 0.500 ลิตร ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดที่สมดุลใหม่มีค่าเท่าใด

9.4 สมดุลเคมีในสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม

ความรู้เกี่ยวกับสมดุลเคมีสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตแก๊สแอมโมเนีย นอกจากนี้สามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการบางอย่างที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตและปรากฏการณ์ในธรรมชาติได้อีกด้วย

9.4.1 การผลิตแก๊สแอมโมเนียในอุตสาหกรรม

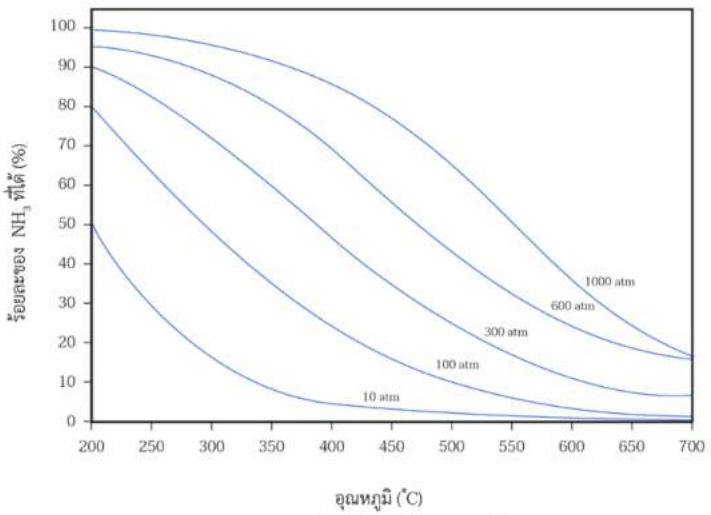
แอมโมเนีย (NH_3) ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ย ยา สีย้อม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และสารเคมีอื่น ๆ ในอุตสาหกรรม ซึ่งผู้ผลิตจะเลือกกรรมวิธีผลิตที่สามารถเปลี่ยนวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด โดยเสียเวลาและค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด จึงมีการนำความรู้เกี่ยวกับสมดุลเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมาใช้ในกระบวนการดังกล่าวด้วย

การผลิตแก๊สแอมโมเนีย ใช้สารตั้งต้นคือแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่แยกได้จากอากาศ และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่ได้จากการนำแก๊สมีเทนจากแก๊สธรรมชาติไปผ่านปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สไนโตรเจนกับแก๊สไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน ดังสมการเคมี

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g) + \text{พลังงาน}$$

หากต้องการผลิตแอมโมเนียให้ได้ปริมาณมาก ควรทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูงหรือต่ำเพราะเหตุใด

ตามหลักของเลอชาเตอลิเอ ปฏิกิริยานี้มีจำนวนโมลรวมของแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความดันทำให้ระบบปรับตัวโดยเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น และปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน การลดอุณหภูมิจะทำให้ระบบปรับตัวโดยเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ดังนั้นการผลิตแก๊สแอมโมเนียให้ได้ปริมาณมากจึงควรทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ซึ่งได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของร้อยละผลผลิตของ NH_3 กับอุณหภูมิและความดัน ได้ข้อมูลดังแสดงในรูป 9.7



รูป 9.7 กราฟแสดงปริมาณแก๊สแอมโมเนียที่สมดุลที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ

เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดได้ช้าที่อุณหภูมิต่ำ และอุปกรณ์ที่ทนความดันสูงมีราคาแพง ดังนั้น การผลิตจริงในอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องเลือกใช้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย กระบวนการผลิตแก๊สแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า **กระบวนการฮาเบอร์**[4] (Haber process) ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมใช้อุณหภูมิประมาณ 400 – 530 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 200 – 300 บรรยากาศ โดยมีไอร์ออน(III)ออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมจะมีกระบวนการแยกแก๊สแอมโมเนียออกจากระบบ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผลิตแอมโมเนียได้มากขึ้น

9.4.2 โรคหายใจเกิน

โรคหายใจเกิน (hyperventilation syndrome) หรือภาวะระบายลมหายใจเกิน เป็นภาวะที่ผู้ป่วยหายใจเร็วและลึกมากกว่าปกติ ตามปกติแล้วร่างกายจะหายใจเข้าเพื่อนำแก๊สออกซิเจน (O_2) เข้าไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เนื้อเยื่อต่าง ๆ แล้วหายใจออกเพื่อนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นออกจากร่างกาย โดย CO_2 ที่เกิดขึ้นในเซลล์จะแพร่เข้าสู่เลือดและลำเลียงไปยังปอด โดย CO_2 สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำในเลือดเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และแตกตัวเป็นไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) กับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ดังสมการเคมี

$$CO_2(g) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_2CO_3(aq)$$

$$H_2CO_3(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$$

ปฏิกิริยารวม $CO_2(g) + 2H_2O(l) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$

ความเข้มข้นของ H_3O^+ มีผลต่อ pH ในเลือด ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำงานของระบบในร่างกาย ร่างกายจึงต้องรักษาดุลยภาพกรด-เบสของเลือดให้เป็นปกติ เมื่อผู้ป่วยมีอาการของโรคหายใจเกิน จะทำให้เกิดการขับ CO_2 ออกจากร่างกายมากกว่าปกติ ความเข้มข้นของ CO_2 ในเลือดจึงต่ำลงกว่าระดับปกติ ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ H_3O^+ ในเลือดลดลง ส่งผลให้เกิดอาการต่าง ๆ เช่น หน้ามืด เวียนศีรษะ ใจสั่น กล้ามเนื้อเกร็ง โดยปกติผู้ป่วยเมื่อเกิดอาการดังกล่าวจะยิ่งหายใจแรงและถี่ขึ้น ทำให้อาการยิ่งกำเริบ ดังนั้นการปฐมพยาบาลจึงอาจให้ผู้ป่วยหายใจในถุงที่ครอบทั้งปากและจมูก เพื่อเพิ่มปริมาณ CO_2 ที่หายใจเข้าไปให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น และเพิ่มความเข้มข้นของ H_3O^+ ในเลือด จนค่า pH ในเลือดกลับสู่ภาวะปกติ ซึ่งสังเกตได้จากอาการดังกล่าวบรรเทาลง

[4]กระบวนการฮาเบอร์ ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2456 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ ฟริตซ์ ฮาเบอร์ (Fritz Haber) และนำมาปรับปรุงโดยวิศวกรเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Karl Bosch บางครั้งจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า Haber – Bosch process

รูป 9.8 การหายใจในถุงเพื่อรักษาอาการของโรคหายใจเกิน

9.4.3 การเกิดหินงอกหินย้อย

เมื่อฝนตก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำได้เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ซึ่งมีสมบัติเป็นกรด และไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) สารละลายกรดจะทำปฏิกิริยาเคมีกับหินปูน ($CaCO_3$) ได้เป็นสารละลายแคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอนเนต ($Ca(HCO_3)_2$) ดังสมการเคมี

$$CO_2(g) + 2H_2O(l) \rightleftharpoons H_3O^+(aq) + HCO_3^-(aq)$$

$$CaCO_3(s) + H_3O^+(aq) \rightleftharpoons Ca^{2+}(aq) + HCO_3^-(aq) + H_2O(l)$$

ปฏิกิริยารวม $\quad CO_2(g) + H_2O(l) + CaCO_3(s) \rightleftharpoons Ca^{2+}(aq) + 2HCO_3^-(aq)$

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ เมื่อสารละลาย $Ca(HCO_3)_2$ ไหลซึมผ่านไปตามผนังหรือหยดลงบนพื้นถ้ำ หากภายในถ้ำมีปริมาณน้ำหรือ CO_2 ลดลง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เป็น $CaCO_3$ ซึ่งเป็นของแข็ง ปรากฏเป็นหินงอกหินย้อยภายในถ้ำ เนื่องจากปริมาณความชื้นและ CO_2 ภายในถ้ำปกติเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย กระบวนการเกิดหินงอกหินย้อยนี้จึงเป็นไปอย่างช้า ๆ ต้องใช้เวลานานกว่าจะได้หินงอกหินย้อยที่มีสภาพใหญ่โตและสวยงาม ดังรูป 9.9

รูป 9.9 หินงอกหินย้อย

กิจกรรม 9.6 สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับสมดุลเคมีในชีวิตประจำวัน สิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม

จุดประสงค์ของกิจกรรม

สืบค้นข้อมูลและนำเสนอเกี่ยวกับสมดุลเคมีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน สิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม

วิธีทำกิจกรรม

1. สืบค้นข้อมูลการใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่องสมดุลเคมีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน สิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม
2. นำเสนอข้อมูล และอภิปรายเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ในห้องเรียน

ตรวจสอบความเข้าใจ

พิจารณาข้อมูลต่อไปนี้ในการตอบคำถาม

โรคเก๊าท์เป็นโรคข้ออักเสบเฉียบพลัน ซึ่งเกิดจากการที่ร่างกายมีกรดยูริก ($C_5H_4N_4O_3$) มากกว่าปกติ แล้วตกตะกอนเป็นผลึกของเกลือยูเรตไปสะสมตามข้อต่าง ๆ ทำให้เกิดการอักเสบขึ้น กรดยูริกเกิดจากการเผาผลาญสารพิวรีนซึ่งเป็นสารที่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นได้เองและยังมีอยู่ทั่วไปในอาหารหลายชนิด เช่น อาหารที่มีโปรตีนสูง เครื่องในสัตว์ น้ำปลา เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ กรดยูริกในกระแสเลือดแตกตัวเป็นยูเรตไอออน ($C_5H_3N_4O_3^-$) ดังสมการเคมี (1) แล้วขับออกทางปัสสาวะ สำหรับผู้ป่วยโรคเก๊าท์พบว่าไตไม่สามารถขับกรดยูริกได้ตามปกติ จึงเกิดการสะสมของเกลือโซเดียมยูเรต ($NaC_5H_3N_4O_3$) ดังสมการเคมี (2) แล้วเกิดการตกตะกอนเป็นผลึกตามข้อต่าง ๆ ในร่างกาย

$$C_5H_4N_4O_3(aq) \rightleftharpoons H^+(aq) + C_5H_3N_4O_3^-(aq) \quad .....(1)$$

$$Na^+(aq) + C_5H_3N_4O_3^-(aq) \rightleftharpoons NaC_5H_3N_4O_3(s) \quad .....(2)$$

ถ้านักเรียนเป็นนักโภชนาการจะให้คำแนะนำแก่ผู้ป่วยโรคเก๊าท์เกี่ยวกับการควบคุมอาหารอย่างไร เพราะเหตุใด

สรุปเนื้อหาในบทเรียน

การเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ในระบบปิด ที่สภาวะสมดุลมีปริมาณสารในระบบคงที่ เนื่องจากมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับเกิดขึ้นต่อเนื่องกันตลอดเวลา เรียกว่า สมดุลพลวัต สำหรับสมดุลพลวัตของปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ เรียกว่า สมดุลเคมี ซึ่งเป็นสภาวะที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

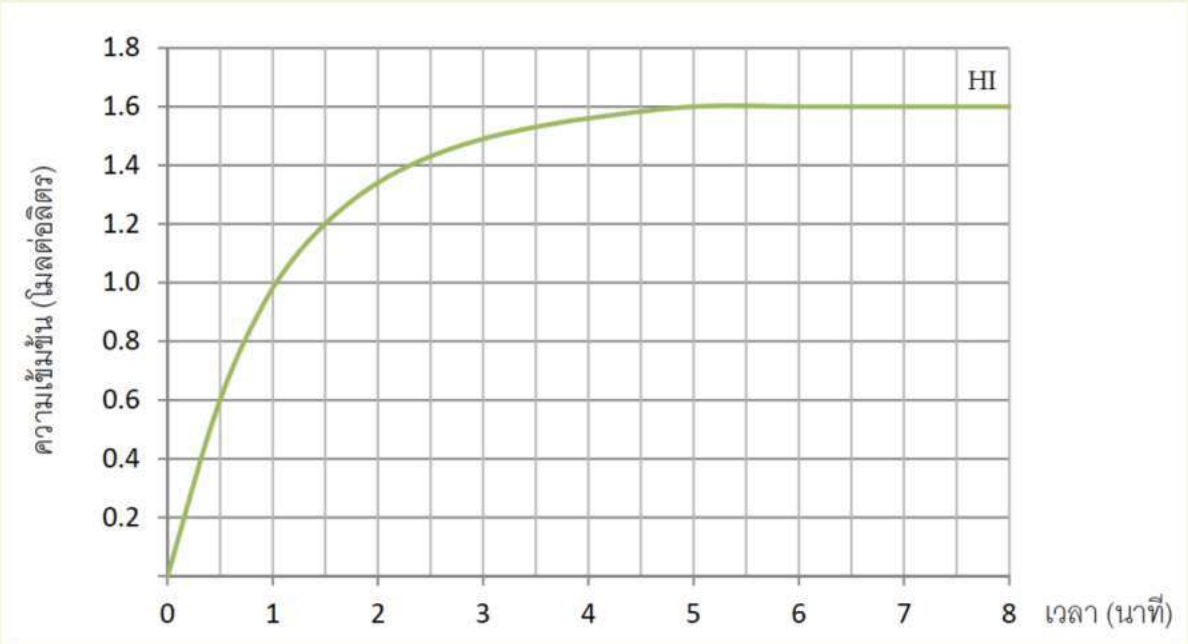
ที่สมดุล ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้นมีความสัมพันธ์ที่เป็นค่าคงที่ เรียกว่า ค่าคงที่สมดุล ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าคงที่สมดุลสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณของผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นที่สมดุลได้ นอกจากนี้ค่าคงที่สมดุลสามารถใช้บ่งบอกว่าปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากหรือน้อยเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ค่าคงที่สมดุลมีความสัมพันธ์กับเลขสัมประสิทธิ์ในสมการเคมี และค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาหลายขั้นตอน หาได้จากผลคูณของค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาย่อยที่นำสมการเคมีมารวมกัน

สมดุลเคมีอาจถูกรบกวนได้โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร ความดัน หรืออุณหภูมิ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีจะปรับตัวไปในทิศทางที่ลดผลของการรบกวนเพื่อเข้าสู่สมดุลอีกครั้งตามหลักของเลอชาเตอลิเอ โดยมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทำให้ค่าคงที่สมดุลเปลี่ยนแปลง

หลักการของสมดุลเคมีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม และใช้อธิบายกระบวนการบางอย่างที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตและปรากฏการณ์ธรรมชาติได้

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. ปฏิกิริยา $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ในภาชนะ 1.0 ลิตร เมื่อผสมแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับแก๊สไอโอดีน (I_2) อย่างละ 1.0 โมล ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนไอโอไดด์ (HI) ตั้งแต่เริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลแสดงดังกราฟต่อไปนี้



1.1 วาดกราฟที่สอดคล้องกับกราฟที่โจทย์กำหนด เพื่อแสดงความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน

1.2 ที่สมดุล แก๊สไอโอดีนมีความเข้มข้นกี่โมลต่อลิตร

1.3 ความดันรวมของแก๊สเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร

1.4 ที่สมดุล ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนไอโอไดด์มากกว่าหรือน้อยกว่าความดันย่อยของสารตั้งต้น

1.5 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้มีค่าเท่าใด

2. พิจารณาปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

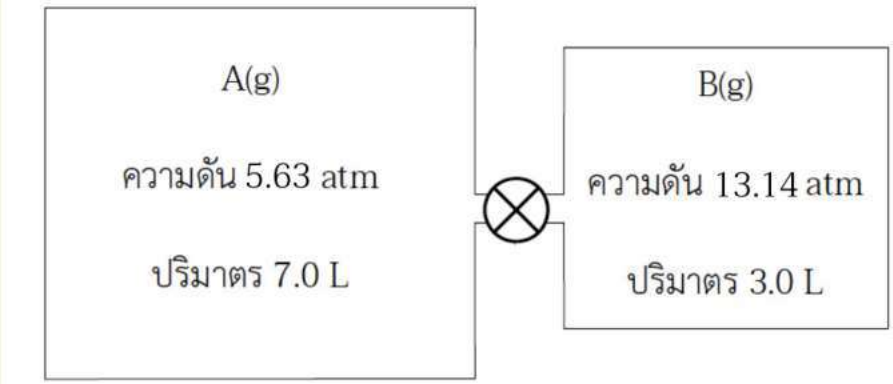
$A_2(g) + B_2(g) \rightleftharpoons 2AB(g)$ .....(1) : K_1

$2AB(g) + B_2(g) \rightleftharpoons 2AB_2(g)$ .....(2) : K_2

$A_2(g) + 2B_2(g) \rightleftharpoons 2AB_2(g)$ .....(3) : K_3

ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อทำการทดลองปฏิกิริยา (2) โดยใช้สาร AB และ B_2 อย่างละ 1.00 โมล บรรจุในภาชนะปิดขนาด 1.00 ลิตร ที่สมดุลพบว่าสาร B_2 ลดลง 0.25 โมล และเมื่อทำการทดลองกับปฏิกิริยา (3) โดยใช้ สาร A_2 และ B_2 อย่างละ 1.00 โมล บรรจุในภาชนะปิดขนาด 1.00 ลิตร ที่สมดุลพบว่ามีสาร AB_2 0.50 โมล ค่าคงที่สมดุลของแต่ละปฏิกิริยามีค่าเท่าใด

3. ปฏิกิริยา $A(g) + B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$ ที่ 27 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเท่ากับ 196 บรรจุแก๊ส A ในภาชนะขนาด 7.0 ลิตร ความดัน 5.63 บรรยากาศ และบรรจุแก๊ส B ในภาชนะขนาด 3.0 ลิตร ความดัน 13.14 บรรยากาศ ดังรูป



เมื่อเปิดวาล์วให้แก๊สทั้งสองทำปฏิกิริยากันที่ 27 องศาเซลเซียส ที่สมดุล แก๊ส C มีความดันกี่บรรยากาศ

4. ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอซีติก (CH_3CO_2H) และเอทานอล (CH_3CH_2OH) ได้เอทิลแอซีเตต ($CH_3CO_2CH_2CH_3$) และน้ำ ดังสมการเคมี

$$CH_3CO_2H(l) + CH_3CH_2OH(l) \rightleftharpoons CH_3CO_2CH_2CH_3(l) + H_2O(l)$$

เนื่องจากสารแต่ละชนิดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และสารทุกชนิดมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจนเข้าสู่สมดุล จึงเขียนค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

$$K = \frac{[CH_3CO_2CH_2CH_3][H_2O]}{[CH_3CO_2H][CH_3CH_2OH]} = 4$$

ถ้าที่สมดุลต้องการให้มีเอทิลแอซีเตต 4 โมล ต้องใช้กรดแอซีติกและเอทานอลอย่างละกี่โมล กำหนดให้กรดแอซีติกและเอทานอลที่สมดุลมีความเข้มข้นเท่ากัน และปริมาตรของของผสมคงที่

5. เมื่อบรรจุแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ความดัน 1.00 บรรยากาศ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการเคมี

$$SO_2(g) + NO_2(g) \rightleftharpoons SO_3(g) + NO(g)$$

พบว่าที่สมดุลแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) มีความดันเท่ากับ 0.65 บรรยากาศ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้มีค่าเท่าใด

6. ปฏิกิริยา $A(aq) \rightleftharpoons B(aq) + C(aq)$ ที่อุณหภูมิหนึ่ง มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 0.80 และพบว่าที่สมดุลมี A 0.20 โมลต่อลิตร เมื่อมีการรบกวนสมดุลโดยการเพิ่มความเข้มข้นของ A อีก 0.20 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ B ที่สมดุลใหม่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า เมื่อรบกวนสมดุลโดยการลดความเข้มข้นของ C ลง 0.20 โมลต่อลิตร

7. ในอุตสาหกรรมมีการใช้ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สมีเทน (CH_4) กับไอน้ำ (H_2O) ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการเคมี

$$CH_4(g) + H_2O(g) + \text{พลังงาน} \rightleftharpoons CO(g) + 3H_2(g)$$

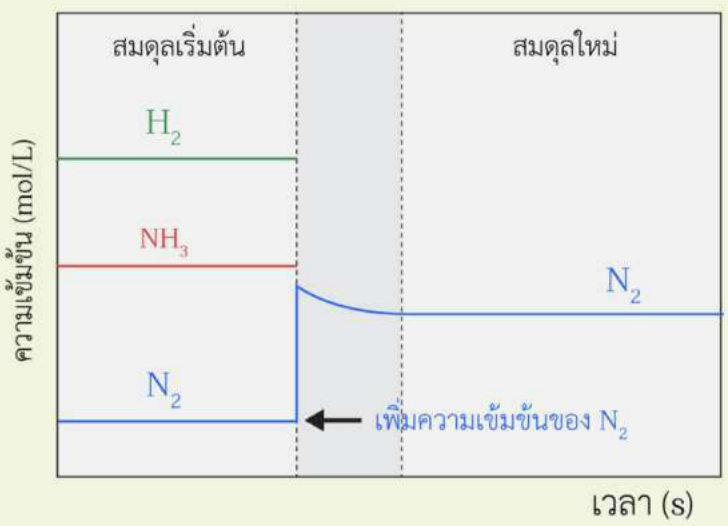
การปรับเปลี่ยนภาวะในการทำปฏิกิริยาต่อไปนี้ จะมีผลต่อปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่สมดุลอย่างไร

7.1 เพิ่มความดัน

7.2 เพิ่มอุณหภูมิ

7.3 เติมตัวเร่งปฏิกิริยา

8. ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แอมโมเนียดังสมการเคมี $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$ เมื่อมีการรบกวนระบบที่อยู่ในสมดุลโดยการเติมแก๊สไนโตรเจน ดังรูป จงเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สแอมโมเนีย



9. ปฏิกิริยา $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$
ไม่มีสี สีม่วง ไม่มีสี
ค่าคงที่สมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นดังนี้

อุณหภูมิ (K)	ค่าคงที่สมดุล
500	160
700	54

สีของแก๊สผสมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพราะเหตุใด เมื่อมีการรบกวนระบบด้วยวิธีต่อไปนี้

9.1 เพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ

9.2 เพิ่มความดัน

10. ปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊ส X_2 และแก๊ส Y_2 เขียนสมการเคมีได้ดังนี้

$$X_2(g) + Y_2(g) \rightleftharpoons 2XY(g) \qquad \Delta E = +250 \text{ kJ/mol}$$

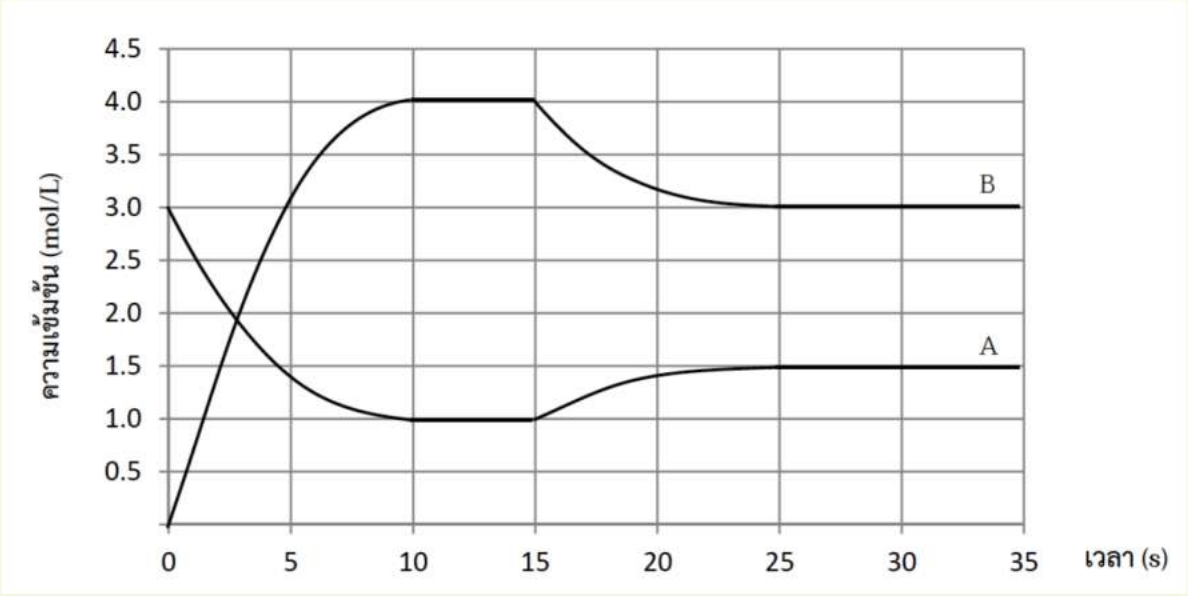
จงเปรียบเทียบค่าคงที่สมดุลของการทดลองต่อไปนี้ พร้อมอธิบายเหตุผล

การทดลองที่ 1 ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ผสม X_2 และ Y_2 อย่างละ 1.0 โมล ในภาชนะปิด 2 ลิตร

การทดลองที่ 2 ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ผสม X_2 และ Y_2 อย่างละ 2.0 โมล ในภาชนะปิด 2 ลิตร

การทดลองที่ 3 ที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน ผสม X_2 และ Y_2 อย่างละ 1.0 โมล ในภาชนะปิด 2 ลิตร

11. ปฏิกิริยา $A(g) \rightleftharpoons 2B(g)$ ในภาชนะปิดปริมาตร 1.0 ลิตร มีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลาดังรูป โดยที่เวลา 15 วินาที ทำการลดอุณหภูมิแล้วปล่อยให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง



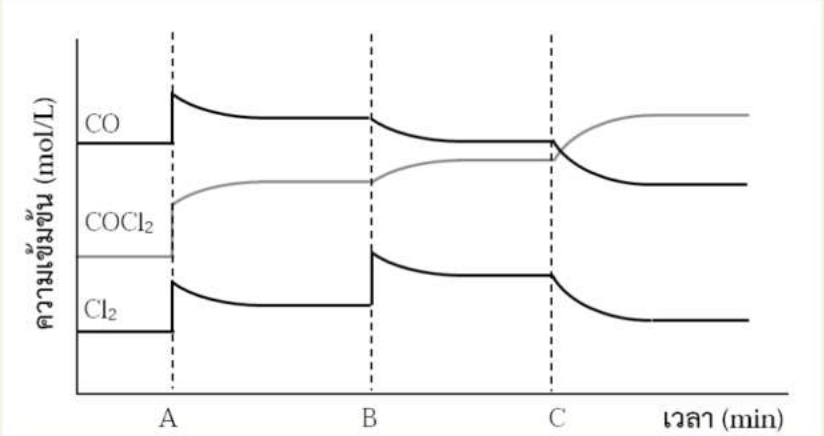
11.1 ค่าคงที่สมดุลก่อนและหลังเวลา 15 วินาที มีค่าเท่าใด

11.2 ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานหรือคายพลังงาน เพราะเหตุใด

12. ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคลอรีน (Cl_2) ได้แก๊สฟอสจีน ($COCl_2$) เป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน เขียนสมการเคมีได้ดังนี้

$$CO(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons COCl_2(g) + \text{พลังงาน}$$

ที่สมดุล เมื่อรบกวนระบบที่เวลา A B และ C จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับเวลาดังนี้



12.1 ที่เวลา A B และ C มีการรบกวนระบบอย่างไร

12.2 การรบกวนระบบที่ช่วงเวลาใดทำให้ค่าคงที่สมดุลมีการเปลี่ยนแปลง เพราะเหตุใด

13. ยูเรีย (NH_2CONH_2) เป็นสารสำคัญที่ใช้ในการผลิตปุ๋ย ซึ่งผลิตได้จากแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการเคมี

$$2NH_3(g) + CO_2(g) \rightleftharpoons NH_2CONH_2(s) + H_2O(g) + 135.7\ kJ$$

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมใช้อัตราส่วน $NH_3 : CO_2$ เท่ากับ 3:1 ทำปฏิกิริยาที่ความดันสูงและอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และกำจัดไอน้ำที่เกิดขึ้นด้วยตัวดูดซับ เหลือเพียงยูเรียซึ่งเป็นของแข็ง

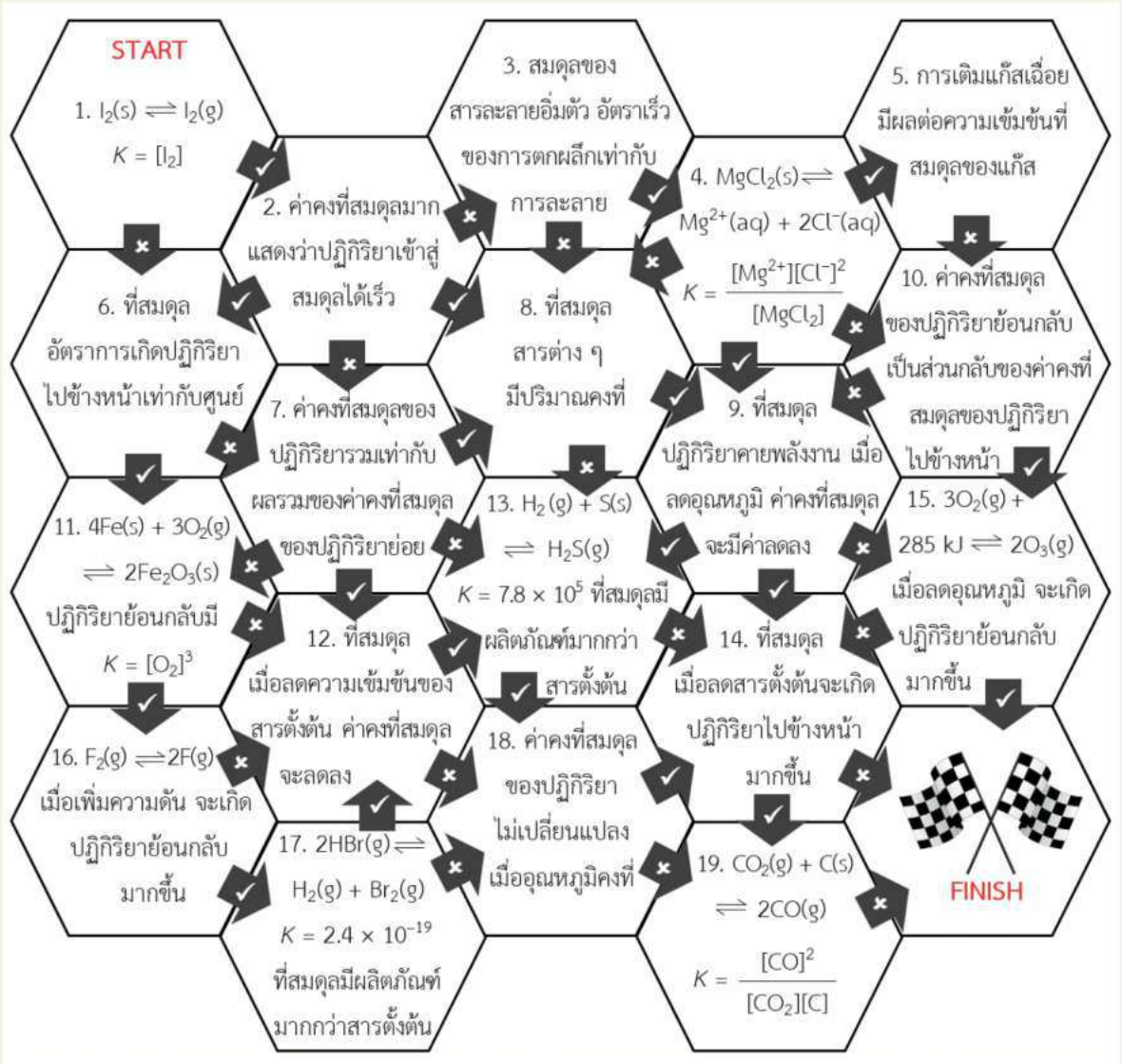
13.1 เพราะเหตุใดจึงทำปฏิกิริยาที่ความดันสูง

13.2 เพราะเหตุใดจึงใช้ $NH_3 : CO_2$ ด้วยอัตราส่วน 3:1 แทนที่จะใช้เท่ากับ 2:1

13.3 ตัวดูดซับไอน้ำมีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตยูเรียอย่างไร

13.4 ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่า 190 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อปฏิกิริยาอย่างไร

14. ลากเส้นจากจุด START โดยพิจารณาข้อความที่อยู่ในกรอบ ถ้าข้อความถูกต้องให้ลากไปทางลูกศรที่มีเครื่องหมาย ✓ ถ้าข้อความไม่ถูกต้องให้ลากไปทางลูกศรที่มีเครื่องหมาย ✗ จนเส้นที่ลากไปถึงจุด FINISH



ภาคผนวก

คำศัพท์ในหนังสือเรียน เคมี เล่ม 3

กฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม	Graham's law of effusion
กฎแก๊สอุดมคติ	ideal gas law
กฎของเกย์–ลูสแซก	Gay–Lussac's law
กฎของชาร์ล	Charle's law
กฎของบอยล์	Boyle's law
กฎของอาโวกาโดร	Avogadro's law
กฎความดันย่อยของดอลตัน	Dalton's law of partial pressures
กฎรวมแก๊ส	combined gas law
กระบวนการฮาเบอร์	Haber process
แก๊สอุดมคติ	ideal gas
ค่าคงที่สมดุล	equilibrium constant
ตัวเร่งปฏิกิริยา	catalyst
ทฤษฎีการชน	collision theory
ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส	kinetic theory of gas
ทฤษฎีสถานะแทรนซิชัน	transition state theory
พลังงานก่อกัมมันต์	activation energy
สถานะแทรนซิชัน	transition state
สภาวะสมดุล	equilibrium state
สมดุล	equilibrium
สมดุลเคมี	chemical equilibrium
สมดุลพลวัต	dynamic equilibrium
หลักของเลอชาเตอลิเอ	Le Châtelier's principle
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	rate of chemical reaction
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ขณะหนึ่ง	instantaneous rate of reaction
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉลี่ย	average rate of reaction

ชื่อธาตุ		สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
ไฮโดรเจน	Hydrogen	H	1	1.01
ฮีเลียม	Helium	He	2	4.00
ลิเทียม	Lithium	Li	3	6.94
เบริลเลียม	Beryllium	Be	4	9.01
โบรอน	Boron	B	5	10.81
คาร์บอน	Carbon	C	6	12.01
ไนโตรเจน	Nitrogen	N	7	14.01
ออกซิเจน	Oxygen	O	8	16.00
ฟลูออรีน	Fluorine	F	9	19.00
นีออน	Neon	Ne	10	20.18
โซเดียม	Sodium	Na	11	22.99
แมกนีเซียม	Magnesium	Mg	12	24.30
อะลูมิเนียม	Aluminium	Al	13	26.98
ซิลิคอน	Silicon	Si	14	28.08
ฟอสฟอรัส	Phosphorus	P	15	30.97
กำมะถัน	Sulfur	S	16	32.06
คลอรีน	Chlorine	Cl	17	35.45
อาร์กอน	Argon	Ar	18	39.95
โพแทสเซียม	Potassium	K	19	39.10
แคลเซียม	Calcium	Ca	20	40.08
สแกนเดียม	Scandium	Sc	21	44.96
ไทเทเนียม	Titanium	Ti	22	47.87
วาเนเดียม	Vanadium	V	23	50.94
โครเมียม	Chromium	Cr	24	52.00
แมงกานีส	Manganese	Mn	25	54.94
เหล็ก	Iron	Fe	26	55.85

ชื่อธาตุ		สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
โคบอลต์	Cobalt	Co	27	58.93
นิกเกิล	Nickel	Ni	28	58.69
ทองแดง	Copper	Cu	29	63.55
สังกะสี	Zinc	Zn	30	65.38
แกลเลียม	Gallium	Ga	31	69.72
เจอร์เมเนียม	Germanium	Ge	32	72.63
สารหนู	Arsenic	As	33	74.92
ซีลีเนียม	Selenium	Se	34	78.97
โบรมีน	Bromine	Br	35	79.90
คริปทอน	Krypton	Kr	36	83.80
รูบิเดียม	Rubidium	Rb	37	85.47
สตรอนเชียม	Strontium	Sr	38	87.62
อิตเทรียม	Yttrium	Y	39	88.91
เซอร์โคเนียม	Zirconium	Zr	40	91.22
ไนโอเบียม	Niobium	Nb	41	92.91
โมลิบดีนัม	Molybdenum	Mo	42	95.95
เทคนีเชียม	Technetium	Tc	43	-
รูทีเนียม	Ruthenium	Ru	44	101.07
โรเดียม	Rhodium	Rh	45	102.91
แพลเลเดียม	Palladium	Pd	46	106.42
เงิน	Silver	Ag	47	107.87
แคดเมียม	Cadmium	Cd	48	112.41
อินเดียม	Indium	In	49	114.82
ดีบุก	Tin	Sn	50	118.71
พลวง	Antimony	Sb	51	121.76
เทลลูเรียม	Tellurium	Te	52	127.60

ชื่อธาตุ		สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
ไอโอดีน	Iodine	I	53	126.90
ซีนอน	Xenon	Xe	54	131.29
ซีเซียม	Caesium	Cs	55	132.91
แบเรียม	Barium	Ba	56	137.33
แลนทานัม	Lanthanum	La	57	138.91
ซีเรียม	Cerium	Ce	58	140.12
เพรซีโอดิเมียม	Praseodymium	Pr	59	140.91
นีโอดิเมียม	Neodymium	Nd	60	144.24
โพรมีเทียม	Promethium	Pm	61	-
ซาแมเรียม	Samarium	Sm	62	150.36
ยูโรเพียม	Europium	Eu	63	151.96
แกโดลิเนียม	Gadolinium	Gd	64	157.25
เทอร์เบียม	Terbium	Tb	65	158.93
ดิสโพรเซียม	Dysprosium	Dy	66	162.50
โฮลเมียม	Holmium	Ho	67	164.93
เออร์เบียม	Erbium	Er	68	167.26
ทูเลียม	Thulium	Tm	69	168.93
อิตเทอร์เบียม	Ytterbium	Yb	70	173.05
ลูทีเชียม	Lutetium	Lu	71	174.97
แฮฟเนียม	Hafnium	Hf	72	178.49
แทนทาลัม	Tantalum	Ta	73	180.95
ทังสเตน	Tungsten	W	74	183.84
รีเนียม	Rhenium	Re	75	186.21
ออสเมียม	Osmium	Os	76	190.23
อิริเดียม	Iridium	Ir	77	192.22
แพลทินัม	Platinum	Pt	78	195.08

ชื่อธาตุ		สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
ทองคำ	Gold	Au	79	196.97
ปรอท	Mercury	Hg	80	200.59
แทลเลียม	Thallium	Tl	81	204.38
ตะกั่ว	Lead	Pb	82	207.20
บิสมัท	Bismuth	Bi	83	208.98
พอโลเนียม	Polonium	Po	84	-
แอสทาทีน	Astatine	At	85	-
เรดอน	Radon	Rn	86	-
แฟรนเซียม	Francium	Fr	87	-
เรเดียม	Radium	Ra	88	-
แอกทิเนียม	Actinium	Ac	89	-
ทอเรียม	Thorium	Th	90	232.04
โพรแทกทิเนียม	Protactinium	Pa	91	231.04
ยูเรเนียม	Uranium	U	92	238.03
เนปทูเนียม	Neptunium	Np	93	-
พลูโทเนียม	Plutonium	Pu	94	-
อะเมริเซียม	Americium	Am	95	-
คูเรียม	Curium	Cm	96	-
เบอร์คีเลียม	Berkelium	Bk	97	-
แคลิฟอร์เนียม	Californium	Cf	98	-
ไอน์สไตเนียม	Einsteinium	Es	99	-
เฟอร์เมียม	Fermium	Fm	100	-
เมนเดลีเวียม	Mendelevium	Md	101	-
โนเบเลียม	Nobelium	No	102	-
ลอว์เรนเซียม	Lawrencium	Lr	103	-
รัทเทอร์ฟอร์เดียม	Rutherfordium	Rf	104	-

ชื่อธาตุ		สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
ดุบเนียม	Dubnium	Db	105	-
ซีบอร์เกียม	Seaborgium	Sg	106	-
โบห์เรียม	Bohrium	Bh	107	-
ฮาสเซียม	Hassium	Hs	108	-
ไมต์เนเรียม	Meitnerium	Mt	109	-
ดาร์มสตัดเทียม	Darmstadtium	Ds	110	-
เรินต์เกเนียม	Roentgenium	Rg	111	-
โคเปอร์นิเซียม	Copernicium	Cn	112	-
นิโฮเนียม	Nihonium	Nh	113	-
ฟลีโรเวียม	Flerovium	Fl	114	-
มอสโกเวียม	Moscovium	Mc	115	-
ลิเวอร์มอเรียม	Livermorium	Lv	116	-
เทนเนสซีน	Tennessine	Ts	117	-
ออกาเนสซอน	Oganesson	Og	118	-

บรรณานุกรม

คณะแพทย์ศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล. (2561) **โรคหายใจเกิน.** สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2561, จาก https://med.mahidol.ac.th/ramamental/generalknowledge/general/05012014-1359.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2554). **คู่มือครู รายวิชาเพิ่มเติม เคมี เล่ม 3.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2559). **คู่มือครู รายวิชาเพิ่มเติม เคมี เล่ม 2.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2559). **หนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติม เคมี เล่ม 2.** พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2559). **หนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติม เคมี เล่ม 3.** พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสค.

Averill, B. & Eldredge, P. (2007). **Chemistry: Principles, Patterns, and Applications.** San Francisco: Benjamin Cummings.

Barke, H.D. & Hazari A. & Yitbarek, S. (2009). **Misconception in Chemistry: Addressing Perceptions in Chemistry.** Berlin: Springer.

Brown, L.S. & Holme, T.A. (2006). **Chemistry for Engineering Students.** California: Thomson Brooks/Cole.

Chang, R. (2010). **Chemistry.** 9th ed. New York: The McGraw-Hill.

Davis, R.E. & other. (2009). **Modern Chemistry.** Texas: Holt, Rinehart and Winston.

Doc Brown's Chemistry Advanced A Level Notes. (2018). **Chemical Equilibrium Notes Index.** Retrieved March 15, 2018, from http://www.docbrown.info/page07/equilibria3.htm.

Gallagher, R.M. & Ingram, P. (2011). **Complete Chemistry for Cambridge IGCSE.** 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.

Kessel, H.V. & other. (2003). **Nelson Chemistry 12.** Ontario: Nelson.

Mortimer, M. & Taylor, P. (2002). **The Molecular World; Chemical Kinetics and Mechanism**. Milton Keyns: The Open University.

Phillips, J.S. & Strozak, V.S. & Wistrom, C. (2005). **Glencoe Science : Chemistry Concept and Applications.** Ohio: Glencoe/McGraw-Hill.

Ryan, L. & Norris, R. (2014). **Cambridge International AS and A Level Chemistry Coursebook.** 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Saptarini, N.M. & Suryasaputra, D. & Nurmalia, H. (2015). **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research.** 7(2), 275 – 280.

Silberberg, M.S. (2009). **Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change.** 5th ed. New York: McGraw-Hill.

Talbot, C. & Harwood, R. & Coates, C. (2010). **Chemistry for the IB Diploma.** London: Hodder Education.

The Chinese University of Hong Kong. (2015). **A Simulation for Teaching Dynamic Equilibrium.** Retrieved February 23, 2015, from http://www3.fed.cuhk.edu.hk/chemistry/files/Simulation.pdf.

The University of North Carolina at Chapel Hill. (2018). **Kinetics: Rates of Reaction.** Retrieved April 23, 2018, from http://cssac.unc.edu/programs/learning-center/Resources/Study/Guides/Chemistry%20102/Rates%20of%20Reactions?fbclid=IwAR3mr2-uf8BixBvgzgipEcTQAZHJiA-_Yl2A3PpbhOZPeELjK7taHLiwxpM.

ที่มาของรูป

รูปปก	จาก shutterstock 481512526
รูปนำบทที่ 7 (หน้า 1)	เอื้อเฟื้อโดย นายสุวิชาญ อังคชัยวนิชย์
รูปนำบทที่ 8 (หน้า 54)	จาก shutterstock 719835124
รูปนำบทที่ 9 (หน้า 94)	เอื้อเฟื้อโดย นางวรพรรณ ทิณพงษ์

คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี เล่ม 3 ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช 2551

คณะที่ปรึกษา

ศ.ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์	ผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 3

ศ.ดร.มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายณรงค์ศิลป์ ธูปพนม	ผู้เชี่ยวชาญพิเศษอาวุโส สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผศ.ดร.จินดา แต้มบรรจง	ผู้ชำนาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวศศินี อังกานนท์	ผู้ชำนาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางกมลวรรณ เกียรติกวินกุล	ผู้ชำนาญ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสุทธาทิพย์ หวังอำนวยพร	ผู้ชำนาญ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวศิริรัตน์ พริกสี	ผู้ชำนาญ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ดร.สนธิ พลชัยยา	ผู้ชำนาญ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ดร.ปุณิกา พระพุทธคุณ	นักวิชาการ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางสาวณัฏฐิกา งามกิจภิญโญ	นักวิชาการ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 3 (ฉบับร่าง)

ศ.ดร.มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วัลภา เอื้องไมตรีภิรมย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.เสาวรักษ์ เฟื่องสวัสดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นางสาวสมศรี เซี๊ยกสาด	นักวิชาการอิสระ
นางชื่นจิตร เดชอุดม	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
นางสุดารัตน์ พรรณแสง	โรงเรียนหันคาพิทยาคม จ.ชัยนาท
นายสุชากรณ์ พวงทอง	โรงเรียนปากเกร็ด จ.นนทบุรี
นายอนุพงศ์ ไพรศรี	โรงเรียนนารีรัตน์จังหวัดแพร่ จ.แพร่
นายขุนทอง คล้ายทอง	โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี จ.ปทุมธานี
นางสาวนิสรีน ดูล๊ะ	โรงเรียนสตรีระนอง จ.ระนอง
ดร.อำไพ เกิดสมบูรณ์	โรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ จ.ราชบุรี

คณะบรรณาธิการ

ศ.ดร.มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วัลภา เอื้องไมตรีภิรมย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.เสาวรักษ์ เฟื่องสวัสดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายณรงค์ศิลป์ ธูปพนม	ผู้เชี่ยวชาญพิเศษอาวุโส สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผศ.ดร.จินดา แต้มบรรจง	ผู้ชำนาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
นางกมลวรรณ เกียรติกวินกุล	ผู้ชำนาญ สาขาเคมีและชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

เคมี เล่ม ๓ **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)**
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ **เวลา ๖๐ ชั่วโมง จำนวน ๑.๕ หน่วยกิต**

ศึกษาความสัมพันธ์และคำนวณปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ จำนวนโมล หรือมวลของแก๊ส โดยใช้กฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎของเกย์–ลูสแซก กฎรวมแก๊ส กฎของอาโวกาโดร และกฎแก๊สอุดมคติ คำนวณความดันย่อยหรือจำนวนโมลของแก๊สในแก๊สผสมโดยใช้กฎความดันย่อยของดอลตัน ศึกษาทฤษฎีจลน์ของแก๊ส การแพร่และคำนวณอัตราการแพร่ของแก๊ส โดยใช้กฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม ศึกษาปรากฏการณ์หรือการแก้ปัญหาในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมโดยใช้สมบัติและกฎต่าง ๆ ของแก๊ส

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารในปฏิกิริยาเคมี คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ศึกษาทิศทางการชนกันของอนุภาคและพลังงานที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ผลของความเข้มข้น พื้นที่ผิวของสารตั้นต้น อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการนำไปใช้ในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรม

ศึกษาความหมายของปฏิกิริยาผันกลับได้และภาวะสมดุล คำนวณค่าคงที่สมดุลและความเข้มข้นของสารที่ภาวะสมดุลของปฏิกิริยาที่มีขั้นตอนเดียวและหลายขั้นตอน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสมดุลและค่าคงที่สมดุลตามหลักของเลอชาเตอลิเอ สมดุลเคมีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต ปรากฏการณ์ในธรรมชาติและกระบวนการในอุตสาหกรรม

โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา ด้านการสื่อสาร สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. อธิบายความสัมพันธ์และคำนวณปริมาตร ความดัน หรืออุณหภูมิของแก๊สที่ภาวะต่าง ๆ ตามกฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎของเกย์–ลูสแซก
๒. คำนวณปริมาตร ความดัน หรืออุณหภูมิของแก๊สที่ภาวะต่าง ๆ ตามกฎรวมแก๊ส
๓. คำนวณปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ จำนวนโมล หรือมวลของแก๊ส จากความสัมพันธ์ตามกฎของอาโวกาโดร และกฎแก๊สอุดมคติ
๔. คำนวณความดันย่อยหรือจำนวนโมลของแก๊สในแก๊สผสม โดยใช้กฎความดันย่อยของดอลตัน
๕. อธิบายการแพร่ของแก๊สโดยใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส คำนวณและเปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊ส โดยใช้กฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม
๖. สืบค้นข้อมูล นำเสนอตัวอย่าง และอธิบายการประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับสมบัติและกฎต่าง ๆ ของแก๊สในการอธิบายปรากฏการณ์ หรือแก้ปัญหาในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรม
๗. ทดลองและเขียนกราฟการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารที่ทำการวัดในปฏิกิริยา
๘. คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และเขียนกราฟการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของสารที่ไม่ได้วัดในปฏิกิริยา
๙. เขียนแผนภาพและอธิบายทิศทางการชนกันของอนุภาคและพลังงานที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
๑๐. ทดลองและอธิบายผลของความเข้มข้น พื้นที่ผิวของสารตั้นต้น อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
๑๑. เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น พื้นที่ผิวของสารตั้นต้น อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา
๑๒. ยกตัวอย่างและอธิบายปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรม
๑๓. ทดสอบและอธิบายความหมายของปฏิกิริยาผันกลับได้และภาวะสมดุล
๑๔. อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เมื่อเริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งระบบอยู่ในภาวะสมดุล
๑๕. คำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา
๑๖. คำนวณความเข้มข้นของสารที่ภาวะสมดุล
๑๗. คำนวณค่าคงที่สมดุลหรือความเข้มข้นของปฏิกิริยาหลายขั้นตอน
๑๘. ระบุปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสมดุลและค่าคงที่สมดุลของระบบ รวมทั้งคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อภาวะสมดุลของระบบถูกรบกวนโดยใช้หลักของเลอชาเตอลิเอ
๑๙. ยกตัวอย่างและอธิบายสมดุลเคมีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต ปรากฏการณ์ในธรรมชาติและกระบวนการในอุตสาหกรรม

รวมทั้งหมด ๑๙ ผลการเรียนรู้

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ