

การทดลองที่ 5 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยการเพิ่มขึ้นของจุดเดือด (Determination of molecular weight by increasing the boiling point)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติคอลลิเกทีฟของสารละลาย
2. เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของสารโดยอาศัยสมบัติการเพิ่มสูงขึ้นของจุดเดือด

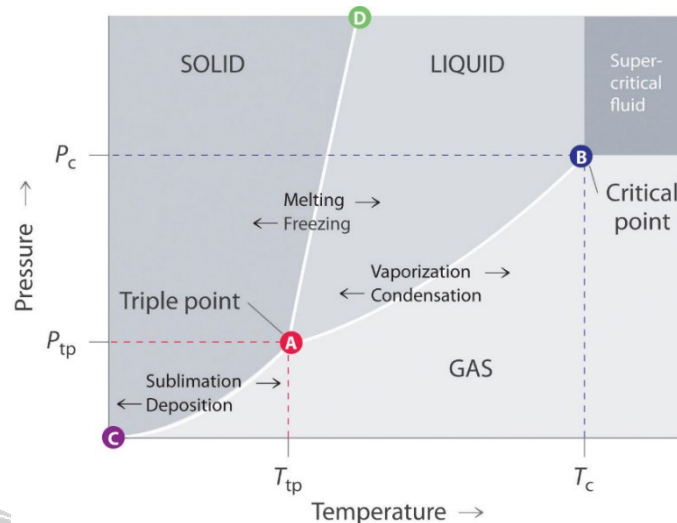
หลักการ

สารละลาย (Solution) หมายถึงของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) ที่เกิดจากการผสมสารสองชนิดขึ้นไป โดยประกอบด้วยตัวทำละลาย (Solvent) และตัวถูกละลาย (Solute) การผสมกันนี้เกิดขึ้นในสัดส่วนที่ไม่แน่นอน การกำหนดว่าสารใดเป็นตัวทำละลายและสารใดเป็นตัวถูกละลายขึ้นอยู่กับสถานะของสารนั้นๆ ว่าเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส อาทิ ถ้าตัวถูกละลายและตัวทำละลายมีสถานะเดียวกัน เช่น ทั้งคู่เป็นของแข็งหรือเป็นของเหลว สารละลายมีปริมาณมากกว่า และมีหน้าที่ละลายตัวถูกละลาย ในกรณีนี้สารที่มีปริมาณมากจะเป็นตัวทำละลาย แต่ถ้าสารทั้งสองมีสถานะแตกต่างกัน เช่น ตัวทำละลายเป็นของเหลว และตัวถูกละลายเป็นของแข็ง สารที่มีสถานะเดียวกันกับสารละลายจะเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น [1, 2] โดยสารละลายถูกแบ่งออกเป็น 3 สถานะได้แก่

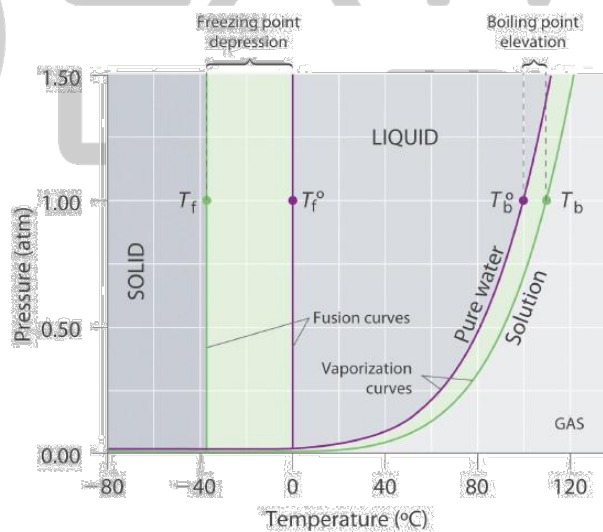
- 1) สารละลายที่เป็นของแข็ง (Solid solution) หมายถึงสถานะที่ของแข็งเป็นตัวทำละลาย โดยที่ตัวถูกละลายอาจเป็นได้ทั้งแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ในกรณีที่ตัวถูกละลายเป็นแก๊ส บางชนิดของของแข็งสามารถรับแก๊สเข้าไปในตัวเอง เช่น ถ่านสามารถดูดแก๊สได้ (กลิ่น) ในกรณีอื่นๆ สารละลายของของแข็งสามารถเกิดจากการทำให้ตัวถูกละลายเข้าไปในของแข็งอื่นๆ โดยไม่ต้องมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายและตัวถูกละลาย ตัวอย่างเช่น ทองเหลืองเป็นของแข็งที่สามารถผสมกับสังกะสีเพื่อให้ได้สารละลายที่เป็นของแข็ง โดยการให้ความร้อนจนทั้งสองผสมกัน โดยไม่ต้องมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างทั้งสอง เป็นต้น
- 2) สารละลายที่เป็นของเหลว (Liquid solution) หมายถึงสถานะที่ของเหลวเป็นตัวทำละลาย โดยที่ตัวถูกละลายอาจเป็นได้ทั้งแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ตัวอย่างเช่น ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ หรือน้ำอัดลม (มีแก๊ส CO_2 ละลายอยู่) การละลายของแก๊สแต่ละชนิดในน้ำมีปริมาณน้อยมาก เช่น ในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน (STP) แก๊ส N_2 ละลายได้เพียง 0.001 โมลในน้ำ 1 ลิตร หรือแก๊ส O_2 ละลายได้เพียง 0.0022 โมลในน้ำ 1 ลิตร เป็นต้น
- 3) สารละลายแก๊ส (Gaseous solution) หมายถึงสถานะที่แก๊สเป็นตัวทำละลาย โดยที่ตัวถูกละลายอาจเป็นได้ทั้งแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง ในกรณีที่ตัวถูกละลายเป็นแก๊ส หมายถึงการผสมแก๊สสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดรวมกัน โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ทำให้แก๊สนี้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งสองส่วนตามสมบัติของแก๊ส เช่น แก๊ส O_2 และ N_2 ในอากาศ เป็นต้น [3, 4, 5]

โดยทั้ง 3 สถานะมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันระหว่างสถานะของสารทั้ง 3 สถานะ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เรียกว่า แผนผังวัฏภาค (Phase diagram) ดังรูปที่ 5.1 แผนผังวัฏภาค (Phase diagram) เป็นกราฟหรือแผนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของสารและเงื่อนไขทางอุณหภูมิและความดัน แผนผังวัฏภาคช่วยในการแสดงวิธีที่สารเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะต่างๆ เมื่ออัตราส่วนอุณหภูมิและความ

ดัชนีที่แตกต่างกัน แผนผังวัฏภาคสามารถแสดงได้รวมถึง (1) สถานะของสาร: แผนผังวัฏภาคแสดงสถานะของสารในเงื่อนไขต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งรวมถึงสถานะของแข็ง เหลว แก๊ส หรือสถานะอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้น (2) ขอบเขตระหว่างสถานะ: แผนผังวัฏภาคจะแสดงขอบเขตระหว่างสถานะต่างๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น แผนผังวัฏภาคของน้ำดังรูปที่ 5.2 แสดงขอบเขตระหว่างสถานะแข็งและเหลวที่เรียกว่าเส้นความดันและเส้นอุณหภูมิคงที่ (3) สถานะที่สมดุล: แผนผังวัฏภาคจะแสดงสถานะที่สมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อสองสถานะมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จากแผนผังวัฏภาค [6]



รูปที่ 5.1 แผนภาพวัฏภาค (Phase diagram) [7]



รูปที่ 5.2 แผนผังวัฏภาคของน้ำ [8]

จากแผนผังวัฏภาคจุดที่ทั้ง 3 เส้นมาตัดกัน ณ จุด A เป็นจุดที่แสดงถึงอุณหภูมิและความดันที่ทำให้ของแข็งของเหลว และแก๊ส อยู่ร่วมในภาวะสมดุลที่จุดเดียวกัน เรียกว่า จุดร่วมสาม (Triple point) ณ จุด B เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical point) เป็นจุดสุดท้ายที่สามารถเห็นขอบเขตสมดุลระหว่างของเหลวกับแก๊สได้ เมื่อพิจารณาจุดที่อยู่เหนือขอบเขตจุดวิกฤตขึ้นไป สารจะมีพฤติกรรมแตกต่างไปจากของเหลวและแก๊ส หรือเรียกว่าของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluid) กล่าวคือไม่สามารถพิจารณาและแบ่งแยกระหว่างของเหลวและแก๊สได้ [9]

สมบัติคอลลิเกทีฟ (Colligative properties) เป็นสมบัติทางกายภาพของสารละลาย ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย (Solvent) และจำนวนโมเลกุลของตัวถูกละลาย (Solute) ที่ไม่ระเหยและไม่แตกตัวในสารละลายโดยไม่ขึ้นกับชนิดของตัวถูกละลาย ซึ่งได้แก่

- 1) การลดต่ำลงของความดันไอ (Vapor pressure) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายที่ไม่ระเหยละลายอยู่ในสารละลาย มีผลให้ค่าความดันไอของตัวทำละลายในสารละลายต่ำกว่าความดันไอของตัวทำละลายเมื่ออยู่ในรูปสารละลายบริสุทธิ์
- 2) ความดันออสโมติก (Osmotic pressure) เป็นความดันที่เกิดขึ้นเมื่อสารละลายถูกกั้นด้วยเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งสารละลายจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อนี้เพื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากัน และความดันออสโมติกนี้จะหยุดการออสโมซิสเมื่อความดันนี้เท่ากับความดันไอของสารละลายที่ถูกกั้นด้วยเยื่อเลือกผ่าน
- 3) การลดต่ำลงของจุดเยือกแข็ง (Freezing point depression) เกิดขึ้นเมื่อจุดเยือกแข็งของสารละลายมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของตัวทำละลายบริสุทธิ์ มักใช้กับน้ำเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง น้ำบริสุทธิ์ที่มีความดันบรรยากาศปกติ (Atmospheric pressure) มีอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง ที่ 0°C
- 4) การเพิ่มสูงขึ้นของจุดเดือด (Boiling point elevation) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ของเหลวบริสุทธิ์จะมีอุณหภูมิจุดเดือดปกติ การเติมตัวถูกละลายที่ไม่ระเหยทำให้ค่าความดันไอของตัวทำละลายในสารละลายนั้นลดลง ดังนั้นถ้าจะทำให้ความดันไอสูงขึ้นถึง 1 บรรยากาศ จุดเดือดจะต้องมีอุณหภูมิสูงขึ้น กล่าวคือ จุดเดือดของสารละลายจะสูงกว่าจุดเดือดปกติของตัวทำละลายบริสุทธิ์ เพราะตัวถูกละลายที่ระเหยยากจะทำให้ความดันไอต่ำลงตามกฎของราอูล (Raoult's Law) [8, 10, 11, 12, 13]

ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาการหาหน้าหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างโดยอาศัยสมบัติคอลลิเกทีฟที่มีการเพิ่มสูงขึ้นของจุดเดือด การศึกษาสมบัติคอลลิเกทีฟของสารละลายนิยมใช้ความเข้มข้นในหน่วย โมแลลิตี (molal; m) ซึ่งเป็นการบอกจำนวนโมลของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย 1 กิโลกรัม เรียกว่า ค่าคงที่ของการเพิ่มขึ้นของจุดเดือด (molal boiling point elevation constant; K_b) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของตัวทำละลายนั้นๆ โดยค่าคงที่ K_b จะขึ้นอยู่กับตัวทำละลายเท่านั้นว่าเป็นสารใดดังตัวอย่างในตารางที่ 1

จุดเดือด (Boiling point; bp) คืออุณหภูมิ ณ จุดที่ความดันไอของของเหลวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล (760 mmHg) หรือ ณ ความดันหนึ่งบาร์ (Bar) ซึ่งเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจากของเหลวให้กลายเป็นก๊าซ (Gas) เมื่อเติมตัวถูกละลายที่ไม่ระเหยและไม่แตกตัวลงไปในของเหลวที่เป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ (Liquid solvent) จะทำให้ความดันไอของของเหลวที่เป็นตัวทำละลายลดต่ำลง สารละลายจึงยังไม่เดือดที่จุดเดือดปกติที่เป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่าจุดเดือดปกติที่เคยเดือดนั้น ความดันไอของของเหลวที่เป็นตัวทำละลายในสารละลายดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่ง เท่ากับความดันบรรยากาศปกติ สารละลายจึงจะเดือด ดังนั้นจุดเดือดของสารละลายที่มีตัวถูกละลายที่ไม่ระเหยและไม่แตกตัว (T_b) จะสูงกว่าจุดเดือดของของเหลวที่เป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ (T_b) ซึ่งจุดเดือดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ [9, 14]

ถ้าให้ ΔT_b คืออุณหภูมิจุดเดือดที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารละลายและตัวทำละลายบริสุทธิ์ ซึ่งพบว่า ΔT_b แปรผันโดยตรงกับโมแลลิตีของสารละลาย

จาก	$\Delta T_b \propto m$	
จะได้	$\Delta T_b = K_b m$	(5.1)

เมื่อ ΔT_b = จุดเดือดที่สูงขึ้นของสารละลายมีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
 K_b = ค่าคงที่เฉพาะสำหรับตัวทำละลายหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}/\text{m}$
 m = ความเข้มข้นของสารละลายมีหน่วยเป็นโมแลล (mol/kg)
 และ $m = \frac{\text{mol of Solute}}{\text{kg of Solvent}} = \frac{g_2/M_2}{g_1/1000} = \frac{1000g_2}{M_2g_1}$

แทนค่า m ลงในสมการที่ 5.1

$$\Delta T_b = K_b \frac{1000g_2}{M_2g_1}$$

จะได้ $M_2 = K_b \frac{1000g_2}{\Delta T_b g_1}$ (5.2)

เมื่อ M_2 = น้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย
 g_2 = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวถูกละลาย (Solute)
 g_1 = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวทำละลาย (Solvent)



ตารางที่ 1 ค่า K_b ของตัวทำละลายบางชนิด [8]

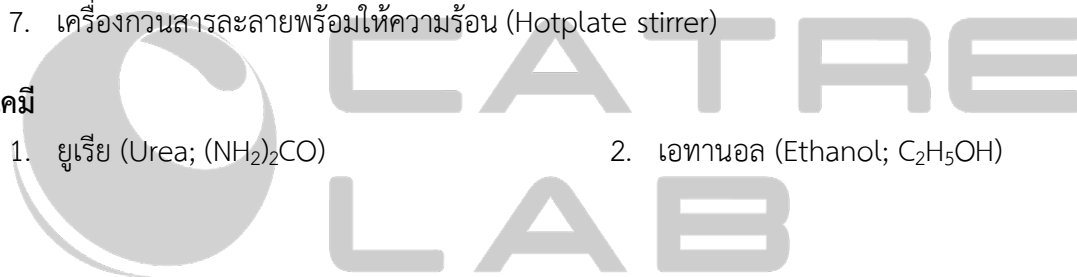
ชนิดตัวทำละลาย (Solvent)	จุดเดือด (Boiling point; °C)	K_b (°C/m)
กรดแอสซิติค (CH_3COOH)	118.1	3.07
น้ำ (H_2O)	100.0	0.512
เบนซีน (Benzene)	80.09	2.64
เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	78.5	1.22
คลอโรฟอร์ม (CHCl_3)	61.17	3.80

อุปกรณ์

1. เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล
2. ปีกเกอร์ขนาด 250 mL
3. กระจกตวงขนาด 10 mL
4. หลอด Capillary สำหรับหาจุดเดือด (Capillaries tube)
5. ขาตั้ง และที่ยึดอุปกรณ์ (Stand and Clamp)
6. หลอดทดลอง (Test tube)
7. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate stirrer)

สารเคมี

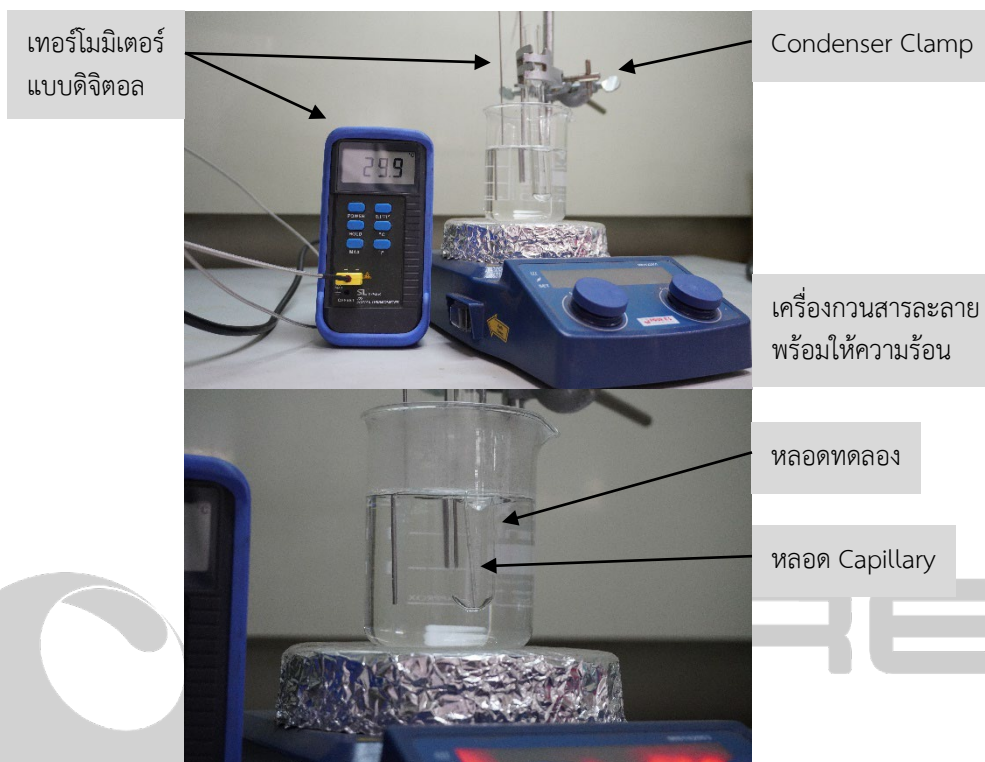
1. ยูเรีย (Urea; $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$)
2. เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)



วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาจุดเดือดของเอทานอล

1. นำหลอดทดลองผูกติดกับเทอร์โมมิเตอร์ โดยให้กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์อยู่ระดับเดียวกับหลอดทดลอง และจัดอุปกรณ์ดังรูป



2. ใช้กระบอกตวงเอทานอล ปริมาตร 6 mL แล้วเทลงในหลอดทดลองที่แห้งและสะอาด หลังจากนั้นทำการใส่หลอด Capillary ปลายปิดข้างหนึ่งวางคว่ำอยู่
3. นำเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล และหลอดทดลองใส่ลงในปิกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ประมาณ 2/3 หรือประมาณ 200 mL ของปิกเกอร์ (ควรระวังไม่ให้กั้นหลอดทดลองและเทอร์โมมิเตอร์ติดด้านล่างปิกเกอร์)
4. ให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate stirrer) และกวนน้ำตลอดเวลา เพื่อให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ
5. เมื่อสังเกตเห็นฟองอากาศผุดออกมาจากหลอด Capillary เป็นสายอย่างรวดเร็วติดต่อกัน ให้หยุดให้ความร้อนทันที (ขณะนี้ความดันในหลอด Capillary จะสูงกว่าความดันของบรรยากาศ อุณหภูมิของของเหลวจะสูงกว่าอุณหภูมิของจุดเดือดของของเหลว) กวนน้ำตลอดเวลา เพื่อให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้จุดเดือดที่หาได้ถูกต้องมากขึ้น
6. เมื่อฟองอากาศที่ผุดออกจากหลอด Capillary ช้าลงๆ จนถึงฟองสุดท้าย ให้บันทึกอุณหภูมิทันที (อุณหภูมิที่อ่านได้คือจุดเดือดของของเหลวนั้น; T_b)

ตอนที่ 2 การหาน้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่าง

1. หลังจากทำการทดลองหาจุดเดือดของเอทานอลตามข้อ 1 แล้ว ทำให้หลอดทดลองเย็นลงโดยการชะก้นหลอดด้วยน้ำประปา เช็ดหลอดด้านนอกให้แห้ง นำหลอด Capillary ออก
2. ชั่งยูเรียหนักประมาณ 0.10 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) เติลงในหลอดทดลองที่มีเอทานอลอยู่ ละลายยูเรียในเอทานอลให้หมด
3. ใส่หลอด Capillary อันเดิมที่สลัดของเหลวที่ค้างอยู่ทิ้งไปแล้ว
4. ทำการทดลองซ้ำตามตอนที่ 1 ข้อ 4 - 6 (อุณหภูมิที่อ่านได้คือจุดเดือดของสารละลาย; T'_b)



รายงานผลการทดลองที่ 5 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยการสูงขึ้นของจุดเดือด
(Molecular weight determination by increasing of the boiling point)

จุดเดือดของเอทานอล (T_b)	80.0°C
น้ำหนักของเอทานอล (ตัวทำละลายบริสุทธิ์) (g_1)	4.734 g
น้ำหนักของยูเรีย (ตัวถูกละลาย) (g_2)	0.1080 g
จุดเดือดของสารละลาย (T'_b)	80.5°C
จุดเดือดที่สูงขึ้นของสารละลาย (ΔT_b)	0.5°C
น้ำหนักโมเลกุลของยูเรียจากการทดลอง (M_2)	55.66
Percentage error	7.32%

วิธีการคำนวณ

กำหนดให้

- K_b ของเอทานอล = 1.22 °C /m
- น้ำหนักโมเลกุลของยูเรีย ((NH₂)₂CO) = 60.0553 g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของเอทานอล (C₂H₅OH) = 46.07 g/mol
- ความหนาแน่นของเอทานอล (C₂H₅OH) = 0.789 g/mL

การหาจุดเดือดที่สูงขึ้นของสารละลาย

จากสูตร $\Delta T_b = T'_b - T_b$

จุดเดือดของสารละลาย (T'_b) = 80.5 °C

จุดเดือดของเอทานอล (T_b) = 80.0 °C

จะได้ $\Delta T_b = 80.5 - 80.0$

$$\Delta T_b = 0.5 \text{ °C}$$

ดังนั้น จุดเดือดที่สูงขึ้นของสารละลาย = 0.5 °C

การหาน้ำหนักโมเลกุลของยูเรียจากการทดลอง

จากสูตร $M_2 = K_b \frac{1000 \times g_2}{\Delta T_b \times g_1}$

น้ำหนักของยูเรียที่ใช้ = 0.1080 g

น้ำหนักของเอทานอลที่ได้ จาก $D = \frac{m}{V}$

เมื่อ D คือความหนาแน่นของเอทานอล

m คือน้ำหนักของเอทานอลที่ต้องการ

V คือปริมาตรของเอทานอลที่ใช้

จะได้ $m = (0.789)(6)$

$$m = 4.734 \text{ g}$$

ฉะนั้น $M_2 = 1.22 \times \frac{1000 \times 0.1080}{0.5 \times 4.734}$

$$M_2 = 55.66$$

ดังนั้น น้ำหนักโมเลกุลของยูเรียจากการทดลอง = 55.66

Percentage error

$$\%Error = \left| \frac{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าจากทฤษฎี}}{\text{ค่าจากทฤษฎี}} \right| \times 100$$

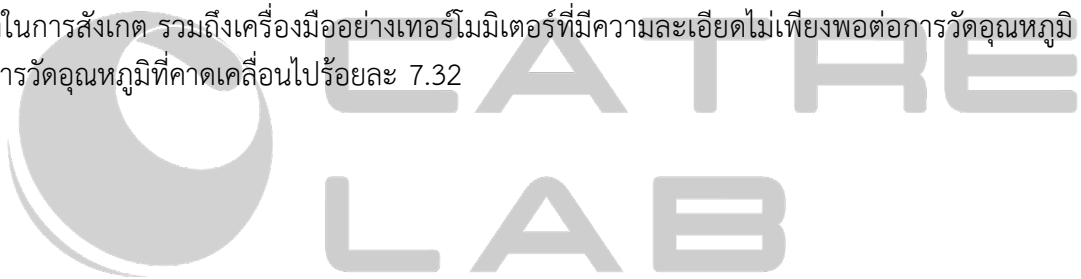
$$\%Error = \left| \frac{55.66 - 60.0553}{60.0553} \right| \times 100 = 7.32\%$$

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองการหาน้ำหนักโมเลกุลโดยการเพิ่มขึ้นของจุดเดือด เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของยูเรีย โดยอาศัยสมบัติคอลลิเกตีฟการเพิ่มสูงขึ้นของจุดเดือด (Boiling point elevation) โดยผ่านความร้อนที่มากกว่าจุดเดือดของตัวทำละลาย และสังเกตจุดเดือดจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในหลอด Capillary จนกระทั่งฟองอากาศหมดไป

ในการทดลองนี้เราใช้สารละลายเอทานอล ซึ่งมีจุดเดือดจากการทดลองอยู่ที่ 80.0°C และมีน้ำหนักของเอทานอลที่ใช้ 4.734 กรัม โดยสารเอทานอลเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ และใช้ยูเรียหนักประมาณ 0.10 กรัม ซึ่งเป็นตัวถูกละลาย พบว่ามีจุดเดือดที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 80.5°C

ดังนั้นจุดเดือดที่สูงขึ้นของสารละลาย (ΔT_b) ทั้งสองที่ได้จากการทดลองจึงเท่ากับ 0.5°C ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยูเรียที่ได้จากการทดลอง (M_2) เท่ากับ 55.66 เนื่องจากการสังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นสายรวดเร็วติดต่อกัน และฟองอากาศฟองสุดท้ายที่มีการสังเกตการมองเห็นค่อนข้างยากลำบากจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการสังเกต รวมถึงเครื่องมืออย่างเทอร์โมมิเตอร์ที่มีความละเอียดไม่เพียงพอต่อการวัดอุณหภูมิ ทำให้เกิดการวัดอุณหภูมิที่คาดเคลื่อนไปร้อยละ 7.32



อ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, “สารละลาย (Solution),” [ออนไลน์]. Available: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic7/solution.html>. [เข้าถึง 9 10 2023].
- [2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, “สารละลาย (Solution),” *ตำราเคมีสำหรับวิศวกร Chemistry for Engineers*, กรุงเทพฯ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559, p. 223.
- [3] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ, “รายวิชาเพิ่มเติม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เคมี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 2,” สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ, 2566.
- [4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, “ชนิดของสารละลาย,” *ตำราเคมีสำหรับวิศวกร*, กรุงเทพฯ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559, p. 224.
- [5] มหาวิทยาลัยมหิดล, “ชนิดของสารละลาย,” [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/liquid_solution/solution_trypes.htm. [Accessed 9 10 2023].
- [6] มหาวิทยาลัยมหิดล, “แผนผังวัฏภาค (Phase diagram),” [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/liquid_solution/liquid_phase_diagram.htm. [Accessed 9 10 2023].
- [7] R. Belford, “Phase Diagrams,” Chem Library, [Online]. Available: https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Arkansas_Little_Rock/Chem_1403%3A_A_General_Chemistry_2/Text/12%3A_Solids/12.06%3A_Phase_Changes_Involving_Solids. [Accessed 9 10 2023].
- [8] R. Belford, “Colligative Properties,” Chem Libretexts, [Online]. Available: https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Arkansas_Little_Rock/Chem_1403%3A_A_General_Chemistry_2/Text/13%3A_Solutions/13.04%3A_Colligative_Properties. [Accessed 10 10 2023].
- [9] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, “แผนผังวัฏภาค,” *ตำราเคมีสำหรับวิศวกร*, กรุงเทพฯ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559, p. 217.
- [10] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. นิธิยา รัตนานพนธ์, “Colligative properties / สมบัติคอลลิเกทีฟ,” Food Network Solution, [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0731/colligative-properties-%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B8%9F>. [Accessed 10 10 2023].
- [11] อนุรักษ์ จรรย์รัตน์, “สมบัติของสารละลาย,” *สรุปเคมี A-LEVEL*, 2 ed., กรุงเทพฯ, อนุรักษ์ จรรย์รัตน์, 2566, p. 95.

- [12] มหาวิทยาลัยมหิดล, “สมบัติคอลลิเกทีฟ (colligative properties),” [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/liquid_solution/solution_colligative_properties.htm. [Accessed 10 10 2023].
- [13] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. นิธิยา รัตนานนท์, “Freezing point / จุดเยือกแข็ง,” Food Network Solution, [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1345/freezing-point-%E0%B8%88%E0%B8%B8%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A2%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%81%E0%B8%82%E0%B9%87%E0%B8%87>. [Accessed 10 10 2023].
- [14] NATIONAL GEOGRAPHIC ASIA, “จุดเดือดและจุดหลอมเหลว เป็นคุณสมบัติหนึ่งของสารบนโลกนี้ ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทางกายภาพของโลก เช่น อุณหภูมิ และความดันอากาศ,” NATIONAL GEOGRAPHIC ASIA, 14 12 2022. [Online]. Available: <https://ngthai.com/science/45832/boiling-point-melting-point/>. [Accessed 10 10 2023].

