1 ทักษะพื้นฐานปฏิบัติการเคมี

ชีทเรียน+แบบฝึกหัด · ติวเคมี สอวน. ค่าย 1

📝 แบบฝึกหัดเรียงตามหัวข้อจากง่ายไปยาก (ดาวสีบอกระดับความยาก) · เฉลยย่อ+เฉลยละเอียดอยู่ท้ายเล่ม · ฉบับร่าง — รอเจ้าของรีวิว

หมวดนี้คือ "ด่านแรก" ของข้อสอบ สอวน. เคมี — ออกสอบทั้งแบบถามตรงๆ (นับเลขนัยสำคัญ เลือกอุปกรณ์ อ่านบิวเรต) และแบบซ่อนอยู่ในโจทย์คำนวณทุกข้อ เพราะต่อให้คิดเลขถูก แต่ตอบผิดเลขนัยสำคัญหรือเปลี่ยนหน่วยพลาด คะแนนก็หายได้ทันที หมวดนี้จึงเป็นหมวดที่ "ลงทุนน้อย ได้กำไรมากที่สุด" — เข้าใจครั้งเดียว ใช้ได้ทั้งข้อสอบและทุกบทที่เหลือ

---

1. เลขนัยสำคัญ (Significant Figures)

เลขนัยสำคัญคือตัวเลขที่ "มีความหมายจริง" จากการวัด — บอกว่าเครื่องมือของเราละเอียดแค่ไหน หลักการคือ **ตัวเลขที่วัดได้จริงทุกตัว + ตัวเลขที่ประมาณอีก 1 ตัวสุดท้าย** การเขียนเลขนัยสำคัญเกินความจริงเท่ากับโกหกว่าเครื่องมือเราละเอียดกว่าที่เป็น

1.1 กติกาการนับ

กรณี	นับไหม	ตัวอย่าง	จำนวนเลขนัยสำคัญ
เลข 1–9 ทุกตัว	นับ	523	3
เลข 0 ที่อยู่ระหว่างเลขอื่น	นับ	5.02	3
เลข 0 นำหน้า (ซ้ายสุด)	ไม่นับ	0.00420	3
เลข 0 ตามหลังที่มีจุดทศนิยม	นับ	100.0	4
เลข 0 ท้ายจำนวนเต็ม (ไม่มีจุด)	กำกวม	2500	2, 3 หรือ 4

ทริคจำ: **0 นำหน้าไม่มีค่า, 0 ท้ายตัวเลขของจำนวนที่มีจุดทศนิยมมีค่าเสมอ** (ระวัง: ใน 0.00420 เลข 0 สามตัวแรกแม้อยู่หลังจุดทศนิยมแต่เป็น 0 นำหน้า จึงไม่นับ — นับเฉพาะ 0 ตัวท้ายสุด) ส่วนเลขกำกวมอย่าง 2500 ให้เขียนเป็นสัญกรณ์วิทยาศาสตร์เพื่อความชัดเจน:

$$2.5 \times 10^3 \ (2 \text{ s.f.}) \qquad 2.500 \times 10^3 \ (4 \text{ s.f.})$$

ข้อยกเว้นสำคัญ: **เลขนับได้และค่านิยาม** (เช่น นักเรียน 25 คน, $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$) ถือว่ามีเลขนัยสำคัญเป็นอนันต์ — ไม่นำมาจำกัดเลขนัยสำคัญของคำตอบ

1.2 การปัดผลบวก–ลบ: ดูที่ "ตำแหน่งทศนิยม"

ผลลัพธ์ต้องมีตำแหน่งทศนิยม **เท่ากับตัวที่หยาบที่สุด** (ทศนิยมน้อยสุด)

ตัวอย่างที่ 1 จงหาผลบวก $12.11 + 0.3 + 1.234$

วิธีทำ

- บวกตรงๆ ก่อน: $12.11 + 0.3 + 1.234 = 13.644$
- ตัวที่หยาบสุดคือ 0.3 (ทศนิยม 1 ตำแหน่ง) → คำตอบต้องมีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- ปัด $13.644 \to 13.6$

$$12.11 + 0.3 + 1.234 = 13.644 \approx \boxed{13.6}$$

1.3 การปัดผลคูณ–หาร: ดูที่ "จำนวนเลขนัยสำคัญ"

ผลลัพธ์ต้องมีเลขนัยสำคัญ **เท่ากับตัวที่มีเลขนัยสำคัญน้อยที่สุด**

ตัวอย่างที่ 2 จงหาค่า $\dfrac{4.56 \times 1.4}{2.0}$

วิธีทำ

- คำนวณตรงๆ: $4.56 \times 1.4 = 6.384$ แล้ว $6.384 \div 2.0 = 3.192$
- เลขนัยสำคัญ: 4.56 มี 3 ตัว, 1.4 มี 2 ตัว, 2.0 มี 2 ตัว → น้อยสุดคือ 2 ตัว
- ปัด $3.192 \to 3.2$

$$\frac{4.56 \times 1.4}{2.0} = 3.192 \approx \boxed{3.2}$$

ตัวอย่างที่ 3 ชั่งสารได้มวล $25.624\ \mathrm{g}$ ตวงปริมาตรได้ $25.0\ \mathrm{mL}$ จงหาความหนาแน่นพร้อมเลขนัยสำคัญที่ถูกต้อง

วิธีทำ

$$d = \frac{m}{V} = \frac{25.624\ \mathrm{g}}{25.0\ \mathrm{mL}} = 1.02496\ \mathrm{g/mL}$$

- 25.624 มี 5 s.f. แต่ 25.0 มีแค่ 3 s.f. → คำตอบต้องมี 3 s.f.

$$d \approx \boxed{1.02\ \mathrm{g/mL}}$$

กฎเหล็ก: คำนวณหลายขั้นให้ **เก็บทศนิยมเต็มไว้ตลอดทาง แล้วปัดครั้งเดียวตอนตอบ** — การปัดระหว่างทางคือต้นเหตุคำตอบเพี้ยนอันดับหนึ่ง

---

2. คำอุปสรรค SI และการเปลี่ยนหน่วย

2.1 คำอุปสรรค (SI Prefixes) ที่ต้องจำขึ้นใจ

คำอุปสรรค	สัญลักษณ์	ตัวคูณ
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}

เช่น $2.5\ \mu\mathrm{m} = 2.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$ และ $0.35\ \mathrm{mg} = 3.5 \times 10^{-4}\ \mathrm{g} = 3.5 \times 10^{-7}\ \mathrm{kg}$

2.2 วิธีคิดแบบแฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วย (Factor-Label Method)

หัวใจคือ **คูณด้วยเศษส่วนที่มีค่าเท่ากับ 1** (เศษกับส่วนคือปริมาณเดียวกันแต่คนละหน่วย) แล้วจัดให้หน่วยเดิม "ตัดกัน" จนเหลือหน่วยที่ต้องการ — วิธีนี้กันพลาดได้เกือบ 100% เพราะถ้าหน่วยตัดไม่ลงตัว แปลว่าตั้งผิดแน่นอน

ตัวอย่างที่ 4 รถวิ่งด้วยอัตราเร็ว $72\ \mathrm{km/h}$ คิดเป็นกี่เมตรต่อวินาที

วิธีทำ ตั้งแฟกเตอร์ให้ km และ h ตัดทิ้ง:

$$72\ \frac{\cancel{\mathrm{km}}}{\cancel{\mathrm{h}}} \times \frac{1000\ \mathrm{m}}{1\ \cancel{\mathrm{km}}} \times \frac{1\ \cancel{\mathrm{h}}}{3600\ \mathrm{s}} = \frac{72 \times 1000}{3600}\ \mathrm{m/s} = \boxed{20\ \mathrm{m/s}}$$

ตัวอย่างที่ 5 เอทานอลมีความหนาแน่น $0.789\ \mathrm{g/cm^3}$ คิดเป็นกี่ $\mathrm{kg/m^3}$

วิธีทำ ระวัง! หน่วยปริมาตรต้องยกกำลังสามทั้งก้อน: จาก $1\ \mathrm{m} = 100\ \mathrm{cm}$ จะได้ $1\ \mathrm{m^3} = 10^6\ \mathrm{cm^3}$

$$0.789\ \frac{\cancel{\mathrm{g}}}{\cancel{\mathrm{cm^3}}} \times \frac{1\ \mathrm{kg}}{1000\ \cancel{\mathrm{g}}} \times \frac{10^6\ \cancel{\mathrm{cm^3}}}{1\ \mathrm{m^3}} = \boxed{789\ \mathrm{kg/m^3}}$$

จุดสังเกตน่าจำ: $\mathrm{g/cm^3} \to \mathrm{kg/m^3}$ คือ **คูณ 1000** เสมอ

ตัวอย่างที่ 6 เกลือแกง NaCl หนัก $11.7\ \mathrm{g}$ คิดเป็นกี่โมล (Na = 23, Cl = 35.5)

วิธีทำ มวลโมลาร์ NaCl $= 23 + 35.5 = 58.5\ \mathrm{g/mol}$ แล้วใช้แฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วย:

$$11.7\ \cancel{\mathrm{g}} \times \frac{1\ \mathrm{mol}}{58.5\ \cancel{\mathrm{g}}} = \boxed{0.200\ \mathrm{mol}}$$

(ตอบ 3 s.f. ตาม 11.7 — ต้องเขียน 0.200 ไม่ใช่ 0.2 เพื่อประกาศความละเอียดของค่า)

---

3. ความแม่น (Accuracy) กับความเที่ยง (Precision)

สองคำนี้ข้อสอบชอบเอามาหลอกสลับกัน แยกให้ขาด:

- **ความแม่น (accuracy)** = วัดได้ **ใกล้ค่าจริง** แค่ไหน → พังเพราะความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic error) เช่น เครื่องชั่งไม่ได้ปรับศูนย์ อุปกรณ์คลาดจากการสอบเทียบ
- **ความเที่ยง (precision)** = วัดซ้ำแล้วค่า **เกาะกลุ่มกัน** แค่ไหน → พังเพราะความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (random error) เช่น มืออ่านสเกลไม่นิ่ง อุณหภูมิแกว่ง

นึกภาพปาเป้า: ลูกดอกเกาะกลุ่มแน่นแต่ห่างจากกลางเป้า = เที่ยงแต่ไม่แม่น / กระจายรอบกลางเป้า = แม่นเฉลี่ยแต่ไม่เที่ยง / เกาะกลุ่มกลางเป้า = ทั้งแม่นทั้งเที่ยง (สิ่งที่เราต้องการ)

ตัววัดความแม่นที่ใช้บ่อยสุดคือ **ร้อยละความคลาดเคลื่อน**:

$$\%\ \text{error} = \frac{|x_{\text{measured}} - x_{\text{true}}|}{x_{\text{true}}} \times 100\%$$

ตัวอย่างที่ 7 นักเรียน 2 คนตวงน้ำที่ค่าจริง $25.00\ \text{mL}$ คนละ 3 ครั้ง ได้ผลดังตาราง จงวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยง

ครั้งที่	นักเรียน A (mL)	นักเรียน B (mL)
1	24.98	26.10
2	25.02	26.12
3	25.00	26.11
เฉลี่ย	**25.00**	**26.11**

วิธีทำ (วิเคราะห์)

- A: ค่าเกาะกลุ่ม (ช่วงกว้างแค่ $0.04\ \text{mL}$) และค่าเฉลี่ยตรงค่าจริงพอดี → **ทั้งแม่นทั้งเที่ยง**
- B: ค่าเกาะกลุ่มมาก (ช่วงแค่ $0.02\ \text{mL}$) แต่ค่าเฉลี่ยหนีจากค่าจริงไปกว่า $1\ \text{mL}$ → **เที่ยงแต่ไม่แม่น** — ลักษณะนี้ชี้ว่ามี systematic error เช่น อ่านระดับของเหลวผิดวิธีซ้ำแบบเดิมทุกครั้ง หรืออุปกรณ์ไม่ได้สอบเทียบ

ตัวอย่างที่ 8 นักเรียนหาความหนาแน่นของอะลูมิเนียมได้ $2.58\ \text{g/cm}^3$ ค่าจริงคือ $2.70\ \text{g/cm}^3$ จงหาร้อยละความคลาดเคลื่อน

วิธีทำ

$$\%\ \text{error} = \frac{|2.58 - 2.70|}{2.70} \times 100\% = \frac{0.12}{2.70} \times 100\% = 4.44\ldots\% \approx \boxed{4.4\%}$$

เช็กเลขนัยสำคัญ: ผลลบ $|2.58 - 2.70| = 0.12$ เหลือ 2 s.f. (ตามกฎตำแหน่งทศนิยมในหัวข้อ 1.2) ดังนั้นผลหารต้องปัดเหลือ 2 s.f. ตามกฎคูณ–หารในหัวข้อ 1.3 → ตอบ 4.4%

จำให้ขึ้นใจ: **หารด้วยค่าจริงเสมอ** ไม่ใช่ค่าที่วัดได้

---

4. อุปกรณ์วัดปริมาตร: เลือกให้เป็น อ่านให้ถูก

4.1 เลือกอุปกรณ์ตามงาน

อุปกรณ์	ใช้ทำอะไร	ความละเอียดโดยทั่วไป	หมายเหตุ
บิวเรต (burette) 50 mL	ปล่อยสารทีละน้อยในการไทเทรต	$\pm 0.02\ \mathrm{mL}$ ต่อการอ่าน 1 ครั้ง	สเกล **กลับหัว** — เลข 0 อยู่บน
ปิเปตต์ (transfer pipette) 25 mL	ถ่ายปริมาตร **ค่าเดียวคงที่** อย่างแม่นยำ	$\pm 0.03\ \mathrm{mL}$	มีขีดเดียว ปล่อยให้ไหลเอง ห้ามเป่าหยดสุดท้าย
ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)	เตรียมสารละลาย **ความเข้มข้นแน่นอน**	$\pm 0.08\ \mathrm{mL}$ (ขนาด 100 mL, Class A)	เติมตัวทำละลายถึงขีดเดียวที่คอขวด
กระบอกตวง (graduated cylinder) 50 mL	ตวงคร่าวๆ งานที่ไม่ต้องแม่นมาก	$\pm 0.5\ \mathrm{mL}$	หยาบสุดในกลุ่มอุปกรณ์วัด
บีกเกอร์ / ขวดรูปชมพู่	ผสม ถ่ายเท ทำปฏิกิริยา	หยาบมาก	**ห้ามใช้วัดปริมาตร**

หลักการเลือก: ไทเทรต → บิวเรต / ถ่าย $25.00\ \mathrm{mL}$ พอดี → ปิเปตต์ / เตรียมสารละลายมาตรฐาน → ขวดวัดปริมาตร / ตวงคร่าวๆ → กระบอกตวง

4.2 อ่านระดับของเหลวให้ถูก

- ของเหลวส่วนใหญ่ในภาชนะแก้วจะมีผิวโค้งเว้าเรียกว่า **เมนิสคัส (meniscus)** → อ่านที่ **จุดต่ำสุดของส่วนโค้ง** (ยกเว้นปรอทที่โค้งนูน อ่านจุดสูงสุด)
- สายตาต้อง **อยู่ระดับเดียวกับผิวของเหลว** ไม่งั้นเกิดความคลาดเคลื่อนจากมุมมอง (parallax error)
- บันทึกให้ละเอียดถึง **การประมาณ 1 หลักสุดท้าย** เช่น บิวเรตขีดละ $0.1\ \mathrm{mL}$ ต้องบันทึกทศนิยม 2 ตำแหน่ง อย่าง $2.45\ \mathrm{mL}$
- บิวเรตสเกลกลับหัว: ตัวเลขเพิ่มจากบนลงล่าง ปริมาตรที่ใช้ = ค่าอ่านครั้งหลัง – ค่าอ่านครั้งแรก

ตัวอย่างที่ 9 ไทเทรต HCl ปริมาตร $25.00\ \mathrm{mL}$ (จากปิเปตต์) ด้วย NaOH เข้มข้น $0.100\ \mathrm{M}$ อ่านบิวเรตก่อนไทเทรตได้ $2.45\ \mathrm{mL}$ เมื่อถึงจุดยุติอ่านได้ $27.80\ \mathrm{mL}$ จงหาปริมาตร NaOH ที่ใช้ และความเข้มข้นของ HCl

วิธีทำ

ขั้นที่ 1 — ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (อ่านหลัง ลบ อ่านก่อน):

$$V_{\mathrm{NaOH}} = 27.80 - 2.45 = 25.35\ \mathrm{mL}$$

ขั้นที่ 2 — ปฏิกิริยา $\mathrm{HCl} + \mathrm{NaOH} \rightarrow \mathrm{NaCl} + \mathrm{H_2O}$ อัตราส่วนโมล $1:1$ ใช้ $C_1V_1 = C_2V_2$:

$$C_{\mathrm{HCl}} = \frac{C_{\mathrm{NaOH}} \times V_{\mathrm{NaOH}}}{V_{\mathrm{HCl}}} = \frac{0.100 \times 25.35\ \cancel{\mathrm{mL}}}{25.00\ \cancel{\mathrm{mL}}} = 0.1014\ \mathrm{M}$$

ขั้นที่ 3 — เลขนัยสำคัญ: 0.100 มี 3 s.f. (น้อยสุด) → ปัดเหลือ 3 s.f.

$$C_{\mathrm{HCl}} \approx \boxed{0.101\ \mathrm{M}}$$

สังเกตว่าหน่วย mL ตัดกันเองได้เลยไม่ต้องแปลงเป็นลิตรก่อน เพราะอยู่คนละฝั่งของเศษส่วน

---

5. ความคลาดเคลื่อนของการวัด (Measurement Uncertainty)

ทุกการวัดมีความไม่แน่นอนติดมาเสมอ เขียนในรูป $x \pm \Delta x$ เช่น ปิเปตต์ $25.00 \pm 0.03\ \mathrm{mL}$

5.1 ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ vs สัมพัทธ์

$$\text{relative uncertainty} = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Δx) บอกว่า "พลาดได้กี่หน่วย" แต่ตัวที่บอกคุณภาพการวัดจริงๆ คือ **แบบสัมพัทธ์** — พลาด $0.5\ \mathrm{mL}$ จากการตวง $500\ \mathrm{mL}$ ถือว่าเก่งมาก แต่พลาดเท่ากันจากการตวง $5\ \mathrm{mL}$ คือหายนะ

ตัวอย่างที่ 10 จงเปรียบเทียบร้อยละความคลาดเคลื่อนของ 3 กรณี (ก) ปิเปตต์ $25.00 \pm 0.03\ \mathrm{mL}$ (ข) กระบอกตวง 50 mL ตวง $25.0 \pm 0.5\ \mathrm{mL}$ (ค) กระบอกตวงเดียวกันตวงแค่ $5.0 \pm 0.5\ \mathrm{mL}$

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & \frac{0.03}{25.00} \times 100\% = 0.12\% \\ \text{(b)} \quad & \frac{0.5}{25.0} \times 100\% = 2.0\% \\ \text{(c)} \quad & \frac{0.5}{5.0} \times 100\% = 10\% \end{aligned}$$

> **ข้อสรุปที่ข้อสอบชอบถาม:** งานเดียวกัน ปิเปตต์แม่นกว่ากระบอกตวงหลายเท่าตัว และ **ยิ่งตวงปริมาตรน้อยเทียบกับขนาดอุปกรณ์ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ยิ่งบาน** — จึงต้องเลือกอุปกรณ์ขนาดใกล้เคียงปริมาตรที่ต้องการเสมอ

5.2 การสะสมของความคลาดเคลื่อน (ฉบับพอเพียงสำหรับค่าย 1)

- ปริมาณ **บวก/ลบกัน** → ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ **บวกกัน**
- ปริมาณ **คูณ/หารกัน** → ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%) **บวกกัน**

ตัวอย่างที่ 11 ปริมาตรจากบิวเรตในตัวอย่างที่ 9 ($V = 27.80 - 2.45 = 25.35\ \mathrm{mL}$) มีความคลาดเคลื่อนเท่าใด ถ้าการอ่านแต่ละครั้งคลาดได้ $\pm 0.02\ \mathrm{mL}$

วิธีทำ ปริมาตรมาจากการ **ลบ** ค่าที่อ่าน 2 ครั้ง → ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์บวกกัน:

$$\Delta V = 0.02 + 0.02 = 0.04\ \mathrm{mL} \quad \Rightarrow \quad V = 25.35 \pm 0.04\ \mathrm{mL}$$

คิดเป็นร้อยละ:

$$\frac{0.04}{25.35} \times 100\% \approx \boxed{0.16\%}$$

นี่คือเหตุผลที่ความคลาดเคลื่อนของบิวเรตต้องคิด **สองเท่า** ของการอ่านครั้งเดียวเสมอ เพราะทุกการไทเทรตอ่าน 2 ครั้ง (ก่อน–หลัง)

---

6. ความปลอดภัยพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ

ข้อสอบภาคปฏิบัติ (และชีวิตจริง) ให้ความสำคัญเรื่องนี้มาก — หลักคิดคือ "รู้ก่อนทำ ป้องกันก่อนเกิด"

การแต่งกายและพฤติกรรม

- สวมแว่นนิรภัยและเสื้อกาวน์ตลอดเวลา รวบผม ใส่รองเท้าหุ้มส้น
- ห้ามกิน ดื่ม หรือชิมสารเคมีเด็ดขาด และห้ามใช้ปากดูดปิเปตต์ — ใช้ลูกยาง (pipette bulb) เท่านั้น
- การดมสาร: ใช้มือ **โบกไอสารเข้าหาจมูก** (wafting) ห้ามก้มดมปากภาชนะตรงๆ

การจัดการสารเคมี

- กฎทองของการเจือจางกรด: **เทกรดลงน้ำ** ทีละน้อยพร้อมคน ห้ามเทน้ำลงกรดเข้มข้น เพราะการละลายคายความร้อนมหาศาล น้ำที่หยดลงไปจะเดือดทันทีและสะบัดกรดกระเด็นใส่หน้า
- อ่านฉลากและสัญลักษณ์อันตราย (กัดกร่อน ไวไฟ ออกซิไดเซอร์ พิษ) ก่อนใช้ทุกครั้ง
- สารที่เทออกจากขวดแล้ว **ห้ามเทกลับ** — จะปนเปื้อนทั้งขวด ให้ทิ้งตามประเภทของเสีย แยกกรด–เบส–ตัวทำละลายอินทรีย์–โลหะหนัก ห้ามเททิ้งอ่างน้ำโดยพลการ
- สารไวไฟ (เอทานอล อะซิโตน) ต้องอยู่ห่างเปลวไฟ ให้ความร้อนผ่าน water bath หรือ hot plate แทนตะเกียง

เมื่อเกิดเหตุ

- สารเคมีถูกผิวหนังหรือเข้าตา: ล้างด้วยน้ำสะอาดปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที แล้วแจ้งอาจารย์ทันที
- รู้ตำแหน่งอุปกรณ์ฉุกเฉินก่อนเริ่มแล็บ: ฝักบัวฉุกเฉิน ที่ล้างตา ถังดับเพลิง ทางออก

📌 สรุปสูตรและประเด็นต้องจำ

เรื่อง	สูตร / ค่า	ข้อควรจำ
ปัดบวก–ลบ	ตามตำแหน่งทศนิยมน้อยสุด	ดู "ตำแหน่ง" ไม่ใช่จำนวน s.f.
ปัดคูณ–หาร	ตามจำนวน s.f. น้อยสุด	ปัดครั้งเดียวตอนท้าย
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	$\% \text{ error} = \frac{\lvert x_{\text{meas}} - x_{\text{true}} \rvert}{x_{\text{true}}} \times 100\%$	หารด้วย **ค่าจริง**
ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์	$\frac{\Delta x}{x} \times 100\%$	ตัวชี้คุณภาพการวัดที่แท้จริง
สะสมความคลาดเคลื่อน	บวก/ลบ → สัมบูรณ์บวกกัน; คูณ/หาร → % บวกกัน	บิวเรตอ่าน 2 ครั้ง → ความคลาดเคลื่อนสองเท่า
แปลงความหนาแน่น	$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$	หน่วยกำลังสามต้องยกกำลังทั้งแฟกเตอร์
คำอุปสรรคหลัก	$\text{k} = 10^3,\ \text{c} = 10^{-2},\ \text{m} = 10^{-3},\ \mu = 10^{-6},\ \text{n} = 10^{-9}$	ไล่ทีละ 10^3 ยกเว้น d, c
ค่าคงที่ใช้บ่อย	$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; $R = 0.0821 \text{ L·atm/(mol·K)}$; ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติ $= 22.4 \text{ L/mol}$ ที่ STP (0°C, 1 atm)	ใช้ตลอดทั้งคอร์ส
ความละเอียดอุปกรณ์	บิวเรต ± 0.02; ปิเปตต์ 25 mL ± 0.03; กระบอกตวง 50 mL ± 0.5 (หน่วย mL)	ปิเปตต์/ขวดวัดปริมาตรแม่นสุด
accuracy vs precision	แม่น = ใกล้ค่าจริง; เที่ยง = วัดซ้ำแล้วเกาะกลุ่ม	systematic ทำลายความแม่น, random ทำลายความเที่ยง

⚠️ จุดที่เด็กพลาดบ่อย

- **นับ 0 นำหน้าเป็นเลขนัยสำคัญ** — 0.00420 มี 3 ตัว ไม่ใช่ 5 ตัว วิธีเลี่ยง: แปลงเป็นสัญกรณ์วิทยาศาสตร์ (4.20×10^{-3}) แล้วนับเฉพาะตัวเลขหน้าเครื่องหมายคูณ
- **ใช้กฎคูณหารกับการบวกลบ** — บวกลบดู "ตำแหน่งทศนิยม" คูณหารดู "จำนวน s.f." ท่องสั้นๆ: บวกลบ-ตำแหน่ง คูณหาร-จำนวน
- **ปัดเลขระหว่างทาง** — ทำโจทย์หลายขั้นแล้วปัดทุกขั้น คำตอบสุดท้ายเพี้ยน วิธีเลี่ยง: เก็บทศนิยมเกินไว้ 1–2 หลักตลอดทาง ปัดครั้งเดียวตอนตอบ
- **แปลงหน่วยยกกำลังแต่ลืมยกกำลังตัวคูณ** — 1 m^3 ไม่ใช่ 100 cm^3 แต่คือ 10^6 cm^3 วิธีเลี่ยง: เขียนแฟกเตอร์ $(100 \text{ cm}/1 \text{ m})$ แล้วยกกำลังสามทั้งวงเล็บ
- **หาร % error ด้วยค่าที่วัดได้** — ต้องหารด้วยค่าจริงเสมอ วิธีเลี่ยง: จำประโยค "เทียบกับความจริง จึงหารด้วยความจริง"

- **สลับ accuracy กับ precision** — ข้อมูลเกาะกลุ่มแต่ห่างค่าจริง = เที่ยงแต่ไม่แม่น วิธีเลี่ยง: นึกภาพปาเป้าทุกครั้งก่อนตอบ
- **อ่านบิวเรตเหมือนกระบอกตวง** — บิวเรตสเกลกลับหัว (เลข 0 อยู่บน) และปริมาตรที่ใช้ = ค่าหลังลบค่าก่อน ไม่ใช่อ่านค่าเดียวจบ
- **อ่านเมนิสคัสจากมุมเฉียง** — เกิด parallax error ซ้ำแบบเดิมทุกครั้งจนกลายเป็น systematic error วิธีเลี่ยง: ย่อตัวให้สายตาอยู่ระดับเดียวกับผิวของเหลว อ่านจุดต่ำสุดของส่วนโค้ง
- **บันทึกค่าหยาบกว่าที่อุปกรณ์อ่านได้** — บิวเรตต้องบันทึกทศนิยม 2 ตำแหน่ง เช่น $25.00\ \mathrm{mL}$ ไม่ใช่ $25\ \mathrm{mL}$ เพราะจำนวนหลักที่บันทึกคือการประกาศความละเอียดของการวัด
- **เทน้ำลงกรดเข้มข้น** — อันตรายจริงและเป็นข้อสอบยอดฮิต จำ: "กรดลงน้ำ" เท่านั้น เพราะน้ำปริมาณมากช่วยดูดซับความร้อนที่คายออกมา
- **ใช้ปิเปตต์แล้วเป่าหยดสุดท้าย** — transfer pipette ถูกสอบเทียบแบบ TD (to deliver) คือให้หยดสุดท้ายค้างที่ปลายอยู่แล้ว การเป่าออกทำให้ปริมาตรเกินจริง

📝 แบบฝึกหัดท้ายบท (30 ข้อ — เรียงตามหัวข้อ ง่าย→ยาก)

ความปลอดภัยและสัญลักษณ์อันตราย

ข้อ 1 ★☆☆☆☆

ขวดสารเคมีขวดหนึ่งติดฉลากสัญลักษณ์ GHS เป็นรูปเปลวไฟ (flame) สัญลักษณ์นี้เตือนว่าสารในขวดมีอันตรายประเภทใด

ก. เป็นสารออกซิไดส์ ช่วยให้ไฟลุกลาม
ข. กัดกร่อนผิวหนังและโลหะ
ค. เป็นสารไวไฟ ติดไฟง่าย
ง. มีความเป็นพิษเฉียบพลันรุนแรง

ข้อ 2 ★★☆☆☆

ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดหนึ่งเป็นของเหลวไวไฟสูง และมีฤทธิ์กัดกร่อนผิวหนังอย่างรุนแรง ฉลากขวดสารนี้ควรติดรูปสัญลักษณ์ GHS คู่ใด

ก. รูปเปลวไฟ และ รูปหัวกะโหลกกับกระดูกไขว้
ข. รูปเปลวไฟเหนือวงกลม และ รูปของเหลวหยดกัดกร่อนมือและแท่งโลหะ
ค. รูปเปลวไฟ และ รูปของเหลวหยดกัดกร่อนมือและแท่งโลหะ
ง. รูปเครื่องหมายตกใจ และ รูปถังแก๊สภายใต้ความดัน

ข้อ 3 ★★★☆☆

พิจารณาข้อความเกี่ยวกับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมีต่อไปนี้

(ก) การทดสอบกลิ่นสารเคมี ให้ใช้มือโบกไอสารเข้าหาจมูก ไม่ดมจากปากภาชนะโดยตรง (ข) หากสารละลายเจือจางมาก อนุญาตให้ใช้ปากดูดปิเปตต์ได้เพื่อความรวดเร็ว (ค) สารเคมีที่ตักหรือรินออกมาเกินความต้องการ ให้เทกลับขวดสารเดิมเพื่อประหยัดสารเคมี (ง) การให้ความร้อนสารในหลอดทดลอง ต้องหันปากหลอดออกจากตัวเองและผู้อื่นเสมอ

ข้อความที่ถูกต้องคือชุดใด

ก. (ก) และ (ข)
ข. (ก) และ (ง)
ค. (ข) และ (ค)
ง. (ค) และ (ง)

ข้อ 4 ★★★★☆

พิจารณาข้อปฏิบัติในห้องปฏิบัติการเคมีต่อไปนี้

(ก) สวมแว่นตานิรภัยตลอดเวลาที่ทำการทดลอง แม้ขั้นตอนนั้นจะดูไม่อันตราย (ข) เมื่อกรดหกรดผิวหนัง ให้รีบล้างด้วยน้ำสะอาดปริมาณมากต่อเนื่องอย่างน้อย 15 นาที แล้วแจ้งผู้ดูแล (ค) เก็บขวดตัวทำละลายอินทรีย์ไวไฟไว้ใกล้ตะเกียงแอลกอฮอล์เพื่อหยิบใช้สะดวก (ง) อ่านฉลากและเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (SDS) ของสารเคมีก่อนใช้งานทุกครั้ง (จ) ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้แล้ว ให้เทลงอ่างน้ำแล้วเปิดน้ำตามมาก ๆ

ข้อปฏิบัติที่ถูกต้องคือชุดใด

- **ก.** (ก) (ข) และ (ค)
- **ข.** (ก) (ข) และ (ง)
- **ค.** (ข) (ง) และ (จ)
- **ง.** (ก) (ค) และ (ง)

ข้อ 5 ★★★★★

ระหว่างการทดลอง ขวดสารที่ติดสัญลักษณ์ GHS รูปหัวกะโหลกกับกระดูกไขว้ และรูปเปลวไฟ ล้มแตกบนโต๊ะปฏิบัติการ ของเหลวหกกระจายและส่งกลิ่นแรง พิจารณาการปฏิบัติต่อไปนี้

(ก) แจ้งอาจารย์ผู้ดูแลทันที และดับหรือย้ายแหล่งเปลวไฟทุกจุดที่อยู่ใกล้บริเวณนั้น (ข) รีบใช้กระดาษทิชชูเช็ดสารด้วยมือเปล่าให้เร็วที่สุดก่อนสารจะระเหย (ค) เปิดหน้าต่างหรือเครื่องดูดอากาศเพื่อระบายไอสาร และกันเพื่อนออกจากบริเวณ (ง) ใช้วัสดุดูดซับเก็บสารแล้วทิ้งลงถังขยะทั่วไปของห้องเรียน

การปฏิบัติที่เหมาะสมคือชุดใด

- **ก.** (ก) และ (ค)
- **ข.** (ก) และ (ข)
- **ค.** (ข) และ (ง)
- **ง.** (ค) และ (ง)

เลขนัยสำคัญและการอ่านเครื่องมือวัด

ข้อ 6 ★☆☆☆☆

ตัวเลข 20.50 มีเลขนัยสำคัญกี่ตัว

- **ก.** 1 ตัว
- **ข.** 2 ตัว
- **ค.** 3 ตัว
- **ง.** 4 ตัว

ข้อ 7 ★★☆☆☆

ข้อใดต่อไปนี้มีจำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ 3 ตัว

- **ก.** 0.045
- **ข.** 0.00450
- **ค.** 4.500
- **ง.** 0.005

ข้อ 8 ★★★☆☆

จงหาผลบวกของ $12.11 + 18.0 + 1.013$ โดยรายงานผลลัพธ์ตามหลักเลขนัยสำคัญ

- **ก.** 31.123
- **ข.** 31.12
- **ค.** 31.1
- **ง.** 31

ข้อ 9 ★★★☆☆

นักเรียนชั่งของเหลวชนิดหนึ่งได้มวล 25.35 g และวัดปริมาตรด้วยกระบอกตวงได้ 12.1 mL ความหนาแน่นของของเหลวนี้ตามหลักเลขนัยสำคัญเป็นเท่าใด

ก. $2.0950\ \mathrm{g/mL}$
ข. $2.095\ \mathrm{g/mL}$
ค. $2.1\ \mathrm{g/mL}$
ง. $2.10\ \mathrm{g/mL}$

ข้อ 10 ★★★☆☆

ในการไทเทรต ต้องถ่ายโอนสารละลายตัวอย่างปริมาตร 25.00 mL ลงในขวดรูปชมพู่ให้แม่นยำที่สุด ควรเลือกใช้อุปกรณ์ใด

ก. กระบอกตวงขนาด 25 mL
ข. ปิเปตต์แบบปริมาตร (volumetric pipette) ขนาด 25 mL
ค. บีกเกอร์ขนาด 50 mL ที่มีขีดบอกปริมาตร
ง. ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL

ข้อ 11 ★★★★☆

ในการพิสูจน์ชนิดของก้อนแร่ที่ไม่ทราบชนิด นักเรียนชั่งก้อนแร่ด้วยเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.01 g ได้มวล 22.32 g แล้ววัดปริมาตรด้วยวิธีแทนที่น้ำ พบว่าระดับน้ำในกระบอกตวงเพิ่มจาก 30.0 mL เป็น 38.3 mL เมื่อหย่อนก้อนแร่ลงไป ความหนาแน่นของก้อนแร่นี้ตามหลักเลขนัยสำคัญเป็นเท่าใด

ก. $2.7\ \mathrm{g/mL}$
ข. $2.69\ \mathrm{g/mL}$
ค. $2.689\ \mathrm{g/mL}$
ง. $0.37\ \mathrm{g/mL}$

ข้อ 12 ★★★★☆

ในการไทเทรต นักเรียนอ่านค่าบิวเรตก่อนเริ่มไทเทรตได้ 0.45 mL และอ่านค่าเมื่อถึงจุดยุติได้ 24.85 mL ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไปควรรายงานเป็นเท่าใด (บิวเรตนี้ประมาณค่าได้ละเอียดถึง 0.01 mL)

ก. $24.40\ \mathrm{mL}$
ข. $24.4\ \mathrm{mL}$
ค. $25.30\ \mathrm{mL}$
ง. $24.85\ \mathrm{mL}$

ข้อ 13 ★★★★★

นักเรียนต้องการหามวลของสารละลายที่ปล่อยจากบิวเรต โดยอ่านค่าบิวเรตก่อนปล่อยได้ 1.25 mL และหลังปล่อยได้ 26.75 mL หากสารละลายนี้มีความหนาแน่น $1.19\ \mathrm{g/mL}$ มวลของสารละลายที่ปล่อยออกมาตามหลักเลขนัยสำคัญเป็นเท่าใด

ก. $30.345\ \mathrm{g}$
ข. $30.3\ \mathrm{g}$
ค. $30.35\ \mathrm{g}$
ง. $25.5\ \mathrm{g}$

ความเที่ยงและความแม่นของข้อมูล

ข้อ 14 ★☆☆☆☆

ในการวัดปริมาณทางวิทยาศาสตร์ "ความเที่ยง (precision)" หมายถึงข้อใด

- **ก.** ค่าที่วัดซ้ำหลายครั้งมีความใกล้เคียงกันเอง
- **ข.** ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง
- **ค.** เครื่องมือวัดมีสเกลละเอียดที่สุด
- **ง.** การวัดที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนใด ๆ เลย

ข้อ 15 ★★☆☆☆

ปริมาตรที่แท้จริงของสารละลายตัวอย่างคือ 25.00 mL นักเรียนสองคนวัดซ้ำคนละ 3 ครั้ง ได้ผลดังนี้

นักเรียนคนที่ 1: 24.98, 25.01, 25.02 mL นักเรียนคนที่ 2: 25.60, 25.58, 25.61 mL

ข้อสรุปใดถูกต้อง

- **ก.** คนที่ 2 มีทั้งความเที่ยงและความแม่นสูงกว่าคนที่ 1
- **ข.** คนที่ 1 มีความเที่ยงสูง แต่คนที่ 2 มีความแม่นสูงกว่า
- **ค.** ทั้งสองคนมีความเที่ยงสูงใกล้เคียงกัน แต่คนที่ 1 มีความแม่นสูงกว่า
- **ง.** ทั้งสองคนมีความแม่นสูงใกล้เคียงกัน แต่คนที่ 1 มีความเที่ยงสูงกว่า

ข้อ 16 ★★★☆☆

ในการไทเทรตครั้งหนึ่ง ปริมาตรที่แท้จริงของสารละลายที่ต้องใช้คือ 20.00 mL นักเรียนคนหนึ่งทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลเป็น 21.10, 21.12, 21.09 และ 21.11 mL ข้อสรุปเกี่ยวกับผลการทดลองของนักเรียนคนนี้ข้อใดถูกต้อง

- **ก.** ความแม่น (accuracy) สูง และความเที่ยง (precision) สูง
- **ข.** ความแม่น (accuracy) สูง แต่ความเที่ยง (precision) ต่ำ
- **ค.** ความแม่น (accuracy) ต่ำ แต่ความเที่ยง (precision) สูง
- **ง.** ความแม่น (accuracy) ต่ำ และความเที่ยง (precision) ต่ำ

ข้อ 17 ★★★★☆

นักเรียนวัดความหนาแน่นของโลหะอะลูมิเนียมได้ $2.60\ \mathrm{g/cm^3}$ หากค่าที่แท้จริงคือ $2.70\ \mathrm{g/cm^3}$ ร้อยละความคลาดเคลื่อน (percent error) ของการวัดครั้งนี้เป็นเท่าใด (ตอบเป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง)

- **ก.** 0.10%
- **ข.** 3.70%
- **ค.** 3.85%
- **ง.** 37.0%

ข้อ 18 ★★★★★

นักเรียน 4 คนวัดความหนาแน่นของทองแดง (ค่าจริง $8.96\ \mathrm{g/cm^3}$) คนละ 3 ครั้ง ได้ผลดังนี้ (หน่วย $\mathrm{g/cm^3}$)

นักเรียน A: 8.94, 8.95, 8.96 นักเรียน B: 8.50, 8.99, 9.40 นักเรียน C: 8.42, 8.43, 8.41 นักเรียน D: 7.9, 9.1, 10.0

พิจารณาข้อสรุปต่อไปนี้

(ก) นักเรียน A มีทั้งความเที่ยงและความแม่นสูง (ข) นักเรียน B มีค่าเฉลี่ยใกล้ค่าจริง แต่ความเที่ยงต่ำ (ค) นักเรียน C มีความเที่ยงสูง แต่ความแม่นต่ำ โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยประมาณ 6% (ง) นักเรียน D มีความเที่ยงสูงกว่านักเรียน B

ข้อสรุปที่ถูกต้องคือชุดใด

- **ก.** (ก) และ (ข) เท่านั้น
- **ข.** (ก) และ (ค) เท่านั้น
- **ค.** (ข) (ค) และ (ง)
- **ง.** (ก) (ข) และ (ค)

การแปลงหน่วยและคำนวณความหนาแน่น

ข้อ 19 ★☆☆☆☆

ยาเม็ดหนึ่งมีตัวยาสำคัญ 500 mg มวลนี้เท่ากับกี่กรัม

ก. $5\ \mathrm{g}$
ข. $0.5\ \mathrm{g}$
ค. $0.05\ \mathrm{g}$
ง. $50\ \mathrm{g}$

ข้อ 20 ★★☆☆☆

โลหะก้อนหนึ่งมีมวล 54.0 g และมีปริมาตร 20.0 mL ความหนาแน่นของโลหะนี้เป็นเท่าใด

ก. $2.70\ \mathrm{g/mL}$
ข. $0.370\ \mathrm{g/mL}$
ค. $27.0\ \mathrm{g/mL}$
ง. $1080\ \mathrm{g/mL}$

ข้อ 21 ★★★☆☆

ปั๊มของเครื่องมือวิเคราะห์เครื่องหนึ่งส่งสารละลายด้วยอัตราการไหล $2.50\ \mathrm{mL/s}$ อัตราการไหลนี้เท่ากับกี่ลิตรต่อนาที เมื่อรายงานตามหลักเลขนัยสำคัญ (กำหนด $1\ \mathrm{L} = 1000\ \mathrm{mL}$ และ $1\ \mathrm{min} = 60\ \mathrm{s}$)

ก. $0.0417\ \mathrm{L/min}$
ข. $1.50\ \mathrm{L/min}$
ค. $150\ \mathrm{L/min}$
ง. $0.150\ \mathrm{L/min}$

ข้อ 22 ★★★☆☆

ต้องการเก็บสารละลายอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่น $0.85\ \mathrm{g/mL}$ มวล 340 g ไว้ในขวดเก็บสารใบเดียว ควรเลือกขวดขนาดเล็กที่สุดในข้อใดจึงจะบรรจุสารได้ทั้งหมด

ก. ขวดขนาด 250 mL
ข. ขวดขนาด 300 mL
ค. ขวดขนาด 500 mL
ง. ขวดขนาด 1000 mL

ข้อ 23 ★★★☆☆

ไมโครปิเปตต์ดูดสารละลายได้ปริมาตร 250 μL ปริมาตรนี้เท่ากับกี่มิลลิลิตร (กำหนด $1\ \mu\mathrm{L} = 10^{-6}\ \mathrm{L}$ และ $1\ \mathrm{mL} = 10^{-3}\ \mathrm{L}$)

ก. $0.250\ \mathrm{mL}$
ข. $2.50\ \mathrm{mL}$
ค. $0.0250\ \mathrm{mL}$
ง. $25.0\ \mathrm{mL}$

ข้อ 24 ★★★★☆

ความดัน 1 พาสคาล (Pa) เมื่อเขียนในรูปหน่วยฐาน SI จะตรงกับข้อใด

ก. $\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-2}}$
ข. $\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$
ค. $\mathrm{kg\,m^{-2}\,s^{-2}}$
ง. $\mathrm{kg\,m^{2}\,s^{-3}}$

ข้อ 25 ★★★★★

ของเหลวชนิดหนึ่งปริมาตร 25.0 mL มีมวล 19.75 g ความหนาแน่นของของเหลวนี้ในหน่วย $\mathrm{kg/m^3}$ ตามหลักเลขนัยสำคัญเป็นเท่าใด (กำหนด $1\ \mathrm{mL} = 1\ \mathrm{cm^3}$ และ $1\ \mathrm{g/cm^3} = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$)

- **ก.** $0.790\ \mathrm{kg/m^3}$
- **ข.** $79.0\ \mathrm{kg/m^3}$
- **ค.** $7.90 \times 10^2\ \mathrm{kg/m^3}$
- **ง.** $7.90 \times 10^5\ \mathrm{kg/m^3}$

วิธีการทางวิทยาศาสตร์และการเจือจางกรด

ข้อ 26 ★☆☆☆☆

ในการเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น วิธีปฏิบัติที่ถูกต้องและปลอดภัยที่สุดคือข้อใด

- **ก.** เทน้ำลงในกรดเข้มข้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้เจือจางทันที
- **ข.** เทน้ำลงในกรดเข้มข้นช้า ๆ โดยไม่ต้องกวน
- **ค.** เทกรดเข้มข้นและน้ำลงในภาชนะพร้อมกัน
- **ง.** ค่อย ๆ เทกรดเข้มข้นลงในน้ำทีละน้อยพร้อมกวนตลอดเวลา

ข้อ 27 ★★☆☆☆

นักเรียนต้องการศึกษาว่าอุณหภูมิของน้ำมีผลต่ออัตราการละลายของเกลือแกงหรือไม่ จึงละลายเกลือแกงมวลเท่ากันในน้ำปริมาตรเท่ากัน โดยใช้น้ำอุณหภูมิ 20, 40 และ 60 องศาเซลเซียส แล้วจับเวลาจนเกลือละลายหมด ตัวแปรต้น (ตัวแปรอิสระ) ของการทดลองนี้คือข้อใด

- **ก.** เวลาที่ใช้จนเกลือละลายหมด
- **ข.** มวลของเกลือแกง
- **ค.** ปริมาตรของน้ำ
- **ง.** อุณหภูมิของน้ำ

ข้อ 28 ★★★☆☆

ต้องการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.5 mol/L ปริมาตร 250 mL จากกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 mol/L จะต้องตวงกรดเข้มข้นมาใช้กี่มิลลิลิตร

- **ก.** $20.8\ \mathrm{mL}$
- **ข.** $3.13\ \mathrm{mL}$
- **ค.** $31.25\ \mathrm{mL}$
- **ง.** $62.5\ \mathrm{mL}$

ข้อ 29 ★★★★☆

นักเรียนเจือจางกรดซัลฟิวริกสองขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1: ตวงกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 18 mol/L ปริมาตร 25.0 mL เจือจางด้วยน้ำจนได้ปริมาตรรวม 500 mL ขั้นที่ 2: ตวงสารละลายที่ได้จากขั้นที่ 1 มา 50.0 mL แล้วเจือจางด้วยน้ำจนได้ปริมาตรรวม 250 mL

ความเข้มข้นของสารละลายสุดท้ายเป็นกี่โมลต่อลิตร

- **ก.** $0.36\ \mathrm{mol/L}$
- **ข.** $0.18\ \mathrm{mol/L}$
- **ค.** $0.90\ \mathrm{mol/L}$
- **ง.** $4.5\ \mathrm{mol/L}$

ข้อ 30 ★★★★★

นักเรียนวางแผนเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.30 mol/L ปริมาตร 500 mL จากกรดเข้มข้น 6.0 mol/L พิจารณาขั้นตอนที่นักเรียนเสนอต่อไปนี้

(ก) ต้องตวงกรดเข้มข้นมาใช้ 25.0 mL (ข) เทน้ำกลั่นลงบนกรดเข้มข้นในขวดวัดปริมาตรโดยตรงเพื่อลดการฟุ้งของไอกรด (ค) ใช้ปิเปตต์แบบปริมาตรตวงกรดเข้มข้น แล้วค่อย ๆ ปล่อยกรดลงในน้ำกลั่นที่เตรียมรองรับไว้ก่อน (ง) หลังผสมกรดกับน้ำแล้ว ให้ปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรทันทีขณะสารละลายยังอุ่น

ขั้นตอนที่ถูกต้องคือชุดใด

ก. (ก) และ (ค)

ข. (ก) และ (ข)

ค. (ข) และ (ง)

ง. (ค) และ (ง)

เฉลยย่อ บทที่ 1

1. ค	2. ค	3. ข	4. ข	5. ก	6. ง	7. ข	8. ค	9. ง	10. ข	11. ก	12. ก	13. ข
14. ก	15. ค	16. ค	17. ข	18. ง	19. ข	20. ก	21. ง	22. ค	23. ก	24. ก	25. ค	26. ง
27. ง	28. ค	29. ข	30. ก									

เฉลยละเอียด บทที่ 1

ข้อ 1 — ตอบ ค.

เป็นสารไวไฟ ติดไฟง่าย

> **หลักคิด:** สัญลักษณ์ GHS แต่ละรูปสื่ออันตรายคนละประเภท

- **รูปเปลวไฟ (flame)** → สาร**ไวไฟ** ติดไฟง่าย เช่น เอทานอล อะซีโตน ✓
- รูปเปลวไฟ**เหนือวงกลม** → สาร**ออกซิไดส์** (ตัวมันไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟลุกลามรุนแรงขึ้น)
- รูปของเหลวหยดกัดกร่อนมือและแท่งโลหะ → สาร**กัดกร่อน**
- รูปหัวกะโหลกกับกระดูกไขว้ → สาร**พิษเฉียบพลันรุนแรง**

> **ระวัง:** คู่ที่สับสนบ่อยที่สุดคือ "เปลวไฟ" กับ "เปลวไฟเหนือวงกลม" — รูปแรกคือตัวสารเองติดไฟ (ไวไฟ) ส่วนรูปหลังคือสารที่เร่งให้สิ่งอื่นติดไฟ (ออกซิไดส์) ต้องดูว่ามีวงกลมอยู่ใต้เปลวไฟหรือไม่

ข้อ 2 — ตอบ ค.

รูปเปลวไฟ และ รูปของเหลวหยดกัดกร่อนมือและแท่งโลหะ

จับคู่สมบัติอันตรายกับสัญลักษณ์ GHS ทีละสมบัติ

สมบัติที่ 1: ของเหลวไวไฟสูง → สัญลักษณ์คือ **รูปเปลวไฟ** (flame)

สมบัติที่ 2: กัดกร่อนผิวหนังรุนแรง → สัญลักษณ์คือ **รูปของเหลวหยดจากหลอดทดลองกัดกร่อนมือและแท่งโลหะ** (corrosion)

ดังนั้นคู่ที่ถูกต้องคือ รูปเปลวไฟ + รูปการกัดกร่อน

> **ที่มาของตัวลวง**

- **รูปเปลวไฟเหนือวงกลม** หมายถึงสาร**ออกซิไดส์** (ช่วยให้ไฟติดหรือลุกลาม) ไม่ใช่สารไวไฟ — เป็นคู่สัญลักษณ์ที่นักเรียนสับสนบ่อยที่สุด เพราะมีเปลวไฟเหมือนกัน
- **รูปหัวกะโหลกกับกระดูกไขว้** หมายถึงสารที่มี**ความเป็นพิษเฉียบพลันรุนแรง** (กิน/สูด/สัมผัสแล้วอาจถึงตาย) ไม่ใช่สารกัดกร่อน — ความกัดกร่อนกับความเป็นพิษเป็นอันตรายคนละประเภท
- **รูปเครื่องหมายตกใจ** ใช้กับอันตรายระดับต่ำกว่า เช่น ระคายเคืองผิวหนัง/ดวงตา ไม่ใช่กัดกร่อนรุนแรง ส่วน**รูปถังแก๊ส** ใช้กับแก๊สภายใต้ความดัน ซึ่งไม่เกี่ยวกับโจทย์

ข้อ 3 — ตอบ ข.

(ก) และ (ง)

พิจารณาทีละข้อความ

(ก) ถูกต้อง — การดมสารเคมีต้องใช้วิธี wafting คือใช้มือโบกไอสารเข้าหาจมูกจากระยะห่าง เพราะการดมจากปากภาชนะโดยตรงอาจสูดไอสารเข้มข้นเข้าไปจนเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

(ข) ผิด — ห้ามใช้ปากดูดปิเปตต์**โดยเด็ดขาดไม่ว่ากรณีใด** ต้องใช้ลูกยางดูด (rubber bulb/pipette filler) เสมอ แม้สารละลายจะเจือจางเพียงใดก็อาจพลาดกลืนสารหรือสูดไอสารได้ ตัวลวงนี้มาจากความเข้าใจผิดว่า "เจือจาง = ปลอดภัย" ซึ่งใช้เป็นข้อยกเว้นไม่ได้

(ค) ผิด — ห้ามเทสารเคมีที่เหลือกลับขวดสารเดิม เพราะสารที่ออกมาแล้วอาจปนเปื้อนจากภาชนะหรืออากาศ การเทกลับจะทำให้สารทั้งขวดปนเปื้อนและใช้ในการทดลองต่อไปไม่ได้ วิธีที่ถูกคือตักออกมาแต่พอดี ส่วนที่เหลือให้ทิ้งในภาชนะทิ้งสารที่จัดไว้ ตัวลวงนี้มาจากความเข้าใจผิดว่าการประหยัดสารสำคัญกว่าความบริสุทธิ์ของสาร

(ง) ถูกต้อง — ขณะให้ความร้อน ของเหลวในหลอดทดลองอาจเดือดพุ่ง (bumping) กระเด็นออกจากปากหลอด จึงต้องหันปากหลอดออกจากตัวเองและผู้อื่นเสมอ

ดังนั้นข้อความที่ถูกต้องคือ **(ก) และ (ง)**

ข้อ 4 — ตอบ ข.

(ก) (ข) และ (ง)

> **หลักคิด:** พิจารณาทีละข้อความ

(ก) ถูก — แว่นตานิรภัยต้องสวมตลอดเวลา เพราะอุบัติเหตุอาจมาจากโต๊ะข้างเคียง ไม่ใช่เฉพาะจากการทดลองของตนเอง

(ข) ถูก — การปฐมพยาบาลกรดหกรดผิวหนังคือล้างด้วยน้ำปริมาณมากต่อเนื่องอย่างน้อย 15 นาที เพื่อเจือจางและชะกรดออกให้หมด แล้วแจ้งผู้ดูแลทันที

(ค) ผิด — สารไวไฟต้องเก็บ**ห่างจากแหล่งความร้อนและเปลวไฟ**เสมอ ไอของตัวทำละลายอินทรีย์หนักกว่าอากาศและลอยไปติดไฟจากเปลวไฟที่อยู่ไกลได้ ความสะดวกไม่ใช่เหตุผลที่ยอมรับได้

(ง) ถูก — ต้องรู้สมบัติอันตรายและวิธีจัดการสารก่อนใช้ทุกครั้ง ข้อมูลนี้อยู่ในฉลากและ SDS

(จ) ผิด — ตัวทำละลายอินทรีย์ห้ามเทลงอ่างน้ำ เพราะหลายชนิดไม่ละลายน้ำ ไวไฟ และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ต้องเทลงภาชนะรวบรวมของเสียอันตรายที่จัดแยกประเภทไว้

ดังนั้นข้อที่ถูกคือ **(ก) (ข) และ (ง)**

> **ระวัง:** ตัวลวง (จ) มาจากความเข้าใจผิดว่า "เปิดน้ำตามมาก ๆ = เจือจางจนปลอดภัย" ซึ่งใช้กับของเสียอินทรีย์ไม่ได้

ข้อ 5 — ตอบ ก.

(ก) และ (ค)

> **หลักคิด:** อ่านสัญลักษณ์ก่อนตัดสินใจ — หัวกะโหลกกับกระดูกไขว้ = **พิษเฉียบพลันรุนแรง** (ห้ามสัมผัส/สูดดม) และรูปเปลวไฟ = **ไวไฟ** (ไอสารติดไฟได้) การตอบโต้จึงต้องจัดการทั้งสองความเสี่ยงพร้อมกัน

(ก) ถูก — แจ้งผู้ดูแลคือขั้นแรกของทุกอุบัติเหตุ และเพราะสารไวไฟกำลังระเหย ไอสารอาจลอยไปถึงเปลวไฟแล้วติดไฟย้อนกลับมา จึงต้องดับ/ย้ายแหล่งไฟทันที

(ข) ผิด — สารมีพิษเฉียบพลันรุนแรง การใช้มือเปล่าสัมผัสคือรับพิษทางผิวหนังโดยตรง ต้องสวมถุงมือและอุปกรณ์ป้องกันก่อนเสมอ ความรีบไม่ใช่เหตุผลให้ข้ามการป้องกัน

(ค) ถูก — สารส่งกลิ่นแรงแปลว่าไอสารกระจายในอากาศ ต้องระบายอากาศเพื่อลดความเข้มข้นของไอพิษ/ไอไวไฟ และกันคนออกจากพื้นที่

(ง) ผิด — สารพิษที่ดูดซับแล้วเป็น**ของเสียอันตราย** ต้องทิ้งในภาชนะของเสียอันตรายที่แยกไว้ ห้ามทิ้งถังขยะทั่วไปเพราะพิษและความไวไฟยังอยู่ครบ

ดังนั้นข้อที่เหมาะสมคือ **(ก) และ (ค)**

> **ระวัง:** โจทย์แบบสถานการณ์ต้องเชื่อมสัญลักษณ์บนฉลากเข้ากับการตอบโต้ — ถ้าสารไม่ไวไฟ การจัดการเปลวไฟจะไม่ใช่ประเด็นเร่งด่วนอันดับแรก

ข้อ 6 — ตอบ ง.

4 ตัว

> **หลักคิด:** นับทีละหลักตามกฎเลขนัยสำคัญ

- 2 — เลขที่ไม่ใช่ศูนย์ **นับ**
- 0 (ตัวกลาง ระหว่าง 2 กับ 5) — ศูนย์ที่ขนาบด้วยเลขนัยสำคัญ **นับ**
- 5 — **นับ**
- 0 (ตัวท้าย อยู่หลังจุดทศนิยม) — ศูนย์ท้ายที่มีจุดทศนิยม **นับ** เพราะบอกความละเอียดของการวัด

รวมได้ 2, 0, 5, 0 = **4 ตัว**

> **ระวัง:** อย่าสับสนกับศูนย์**นำหน้า** (เช่น 0.045) ซึ่งไม่นับ — ศูนย์ตัวท้ายหลังจุดทศนิยมนั้นผู้วัดตั้งใจเขียนเพื่อบอกว่าอ่านค่าได้ละเอียดถึงหลักนั้น จึงต้องนับเสมอ

ข้อ 7 — ตอบ ข.

0.00450

หลักการนับเลขนัยสำคัญ

1. เลขศูนย์ที่นำหน้าตัวเลข (leading zeros) **ไม่นับ** เป็นเลขนัยสำคัญ
2. เลขศูนย์ที่อยู่ท้ายตัวเลขและอยู่หลังจุดทศนิยม **นับ** เป็นเลขนัยสำคัญ
3. เลขศูนย์ท้ายจำนวนเต็มที่ไม่มีจุดทศนิยม **ไม่นับ** เป็นเลขนัยสำคัญ

พิจารณาทีละตัวเลือก

- 0.045 — ศูนย์นำหน้าไม่นับ เหลือ 4 กับ 5 จึงมี **2 ตัว**
- 0.00450 — ศูนย์นำหน้าไม่นับ แต่ศูนย์ตัวท้าย (หลังจุดทศนิยม) นับ ได้ 4, 5, 0 จึงมี **3 ตัว** ✓
- 4.500 — นับทุกตัว 4, 5, 0, 0 จึงมี **4 ตัว**
- 0.005 — ศูนย์นำหน้าไม่นับทั้งหมด เหลือเพียง 5 จึงมี **1 ตัว**

ดังนั้นคำตอบคือ 0.00450

ข้อ 8 — ตอบ ค.

31.1

หลักการบวก–ลบ: ผลลัพธ์ต้องมีจำนวน**ตำแหน่งทศนิยม**เท่ากับตัวเลขที่มีตำแหน่งทศนิยม**น้อยที่สุด** (ไม่ใช่ดูจำนวนเลขนัยสำคัญ)

1 **ขั้นที่ 1** นับตำแหน่งทศนิยมของแต่ละจำนวน

- 12.11 → ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 18.0 → ทศนิยม 1 ตำแหน่ง (น้อยที่สุด)
- 1.013 → ทศนิยม 3 ตำแหน่ง

2 **ขั้นที่ 2** บวกตามปกติ

$$12.11 + 18.0 + 1.013 = 31.123$$

3 **ขั้นที่ 3** ปัดให้เหลือทศนิยม 1 ตำแหน่งตามตัวที่หยาบที่สุด (18.0)

$$31.123 \approx 31.1$$

ตัวลวง 31.123 คือลืมปัด ส่วน 31.12 กับ 31 เกิดจากใช้จำนวนตำแหน่งทศนิยมผิดตัว

ข้อ 9 — ตอบ ง.

$2.10\ \mathrm{g/mL}$

หลักการคูณ–หาร: ผลลัพธ์ต้องมีจำนวน**เลขนัยสำคัญ**เท่ากับตัวเลขที่มีเลขนัยสำคัญ**น้อยที่สุด**

❶ **ขั้นที่ 1** นับเลขนัยสำคัญ

- มวล $25.35\ \mathrm{g}$ → 4 ตัว
- ปริมาตร $12.1\ \mathrm{mL}$ → 3 ตัว (น้อยที่สุด)

ดังนั้นคำตอบต้องมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว

❷ **ขั้นที่ 2** คำนวณความหนาแน่น

$$d = \frac{m}{V} = \frac{25.35\ \mathrm{g}}{12.1\ \mathrm{mL}} = 2.0950...\ \mathrm{g/mL}$$

❸ **ขั้นที่ 3** ปัดให้เหลือ 3 ตัว

$$d \approx 2.10\ \mathrm{g/mL}$$

ข้อควรระวัง: 2.10 ไม่เท่ากับ 2.1 ในเชิงเลขนัยสำคัญ เพราะ 2.10 มี 3 ตัว แต่ 2.1 มีเพียง 2 ตัว การเขียนศูนย์ตัวท้ายจึงจำเป็นเพื่อบอกความละเอียดของการวัด

ข้อ 10 — ตอบ ข.

ปิเปตต์แบบปริมาตร (volumetric pipette) ขนาด 25 mL

หลักการเลือกอุปกรณ์วัดปริมาตร: ดูทั้ง**ความแม่นยำ**และ**หน้าที่**ของอุปกรณ์ (ส่งถ่ายของเหลว หรือบรรจุของเหลว)

พิจารณาทีละตัวเลือก

1. **กระบอกตวง** — ความละเอียดต่ำ (คลาดเคลื่อนได้ราว ±0.5 mL ที่ขนาด 25 mL) เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง จึงไม่เหมาะ
2. **ปิเปตต์แบบปริมาตร** — ออกแบบมาเพื่อ**ส่งถ่าย (To Deliver, TD)** ของเหลวปริมาตรเดียวที่แน่นอนมาก ความคลาดเคลื่อนเพียงประมาณ ±0.03 mL จึงเหมาะที่สุดสำหรับตวงสารตัวอย่าง 25.00 mL ในการไทเทรต ✓
3. **บีกเกอร์** — ขีดบอกปริมาตรเป็นเพียงค่าประมาณ (คลาดเคลื่อนได้ถึง 5–10%) ห้ามใช้ตวงปริมาตรที่ต้องการความแม่นยำ
4. **ขวดวัดปริมาตร** — เป็นอุปกรณ์แบบ**บรรจุ (To Contain, TC)** ใช้เตรียมสารละลายให้มีปริมาตรรวมที่แน่นอน ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อเทส่งถ่ายของเหลว เพราะเมื่อเทออกจะมีของเหลวค้างในขวด ปริมาตรที่ส่งถ่ายจึงไม่ตรง 25.00 mL

ดังนั้นคำตอบคือปิเปตต์แบบปริมาตรขนาด 25 mL

ข้อ 11 — ตอบ ก.

$2.7\ \mathrm{g/mL}$

❶ **ขั้นที่ 1** หาปริมาตรก้อนแร่จากการแทนที่น้ำ (การลบ ใช้หลัก**ตำแหน่งทศนิยม**)

$$V = 38.3 - 30.0 = 8.3\ \mathrm{mL}$$

ทั้งสองค่ามีทศนิยม 1 ตำแหน่ง ผลลัพธ์จึงมีทศนิยม 1 ตำแหน่ง ได้ 8.3 mL ซึ่งมีเลขนัยสำคัญเพียง **2 ตัว** — จุดสำคัญของข้อนี้คือ แม้ค่าที่อ่านแต่ละครั้ง (38.3 และ 30.0) จะมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว แต่**ผลลบ**เหลือเพียง 2 ตัว

❷ **ขั้นที่ 2** คำนวณความหนาแน่น (การหาร ใช้หลัก**จำนวนเลขนัยสำคัญน้อยที่สุด**)

$$d = \frac{m}{V} = \frac{22.32\ \mathrm{g}}{8.3\ \mathrm{mL}} = 2.6891...\ \mathrm{g/mL}$$

มวลมีเลขนัยสำคัญ 4 ตัว แต่ปริมาตรมี 2 ตัว ผลหารจึงต้องมีเลขนัยสำคัญ 2 ตัว

❸ **ขั้นที่ 3** ปัดเป็น 2 ตัว

$$d \approx 2.7\ \mathrm{g/mL}$$

ที่มาของตัวลวง

- 2.69 g/mL เกิดจากคิดว่าปริมาตร 8.3 ยังมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัวตามค่าที่อ่านจากกระบอกตวง (ลืมว่าการลบทำให้เลขนัยสำคัญลดลง)
- 2.689 g/mL เกิดจากใช้เลขนัยสำคัญ 4 ตัวตามมวล (เลือกตัวมากแทนตัวน้อย)
- 0.37 g/mL เกิดจากตั้งสูตรกลับเป็น V/m ($8.3 \div 22.32 = 0.37$)

ข้อ 12 — ตอบ ก.

$24.40\ \mathrm{mL}$

1 **ขั้นที่ 1** ปริมาตรที่ใช้ = ค่าอ่านสุดท้าย – ค่าอ่านเริ่มต้น

$$V = 24.85 - 0.45 = 24.40\ \mathrm{mL}$$

2 **ขั้นที่ 2** พิจารณาเลขนัยสำคัญของการลบ — ทั้งสองค่ามีทศนิยม 2 ตำแหน่ง ผลลัพธ์จึงต้องรายงานทศนิยม 2 ตำแหน่งด้วย คือ 24.40 mL

เหตุผลที่ต้องเขียนศูนย์ตัวท้าย: บิวเรตอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 mL การเขียน 24.40 บอกว่าเราทราบค่าถึงหลัก 0.01 mL แต่ถ้าเขียน 24.4 จะแปลว่ารู้เพียงหลัก 0.1 mL ซึ่งเป็นการ**ทิ้งความละเอียดของเครื่องมือ**ไปโดยไม่จำเป็น

ตัวลวง

- 25.30 mL เกิดจากเผลอนำค่าทั้งสองมา**บวก**กัน $(24.85 + 0.45)$
- 24.85 mL เกิดจากลืมหักค่าอ่านเริ่มต้น (บิวเรตไม่ได้เริ่มที่ 0.00 mL)

ข้อ 13 — ตอบ ข.

$30.3\ \mathrm{g}$

หลักคิด: โจทย์นี้ใช้กฎเลขนัยสำคัญ**สองกฎต่อเนื่องกัน** — การลบใช้ตำแหน่งทศนิยม การคูณใช้จำนวนเลขนัยสำคัญ

1 **ขั้นที่ 1** หาปริมาตรที่ปล่อย (การลบ → ดูตำแหน่งทศนิยม)

$$V = 26.75 - 1.25 = 25.50\ \mathrm{mL}$$

ทั้งสองค่ามีทศนิยม 2 ตำแหน่ง ผลลัพธ์จึงมีทศนิยม 2 ตำแหน่ง ได้ 25.50 mL ซึ่งมีเลขนัยสำคัญ **4 ตัว**

2 **ขั้นที่ 2** คูณความหนาแน่นหามวล (การคูณ → ดูจำนวนเลขนัยสำคัญน้อยที่สุด)

$$m = d \times V = 1.19 \times 25.50 = 30.345\ \mathrm{g}$$

ความหนาแน่น 1.19 มีเลขนัยสำคัญ **3 ตัว** (น้อยกว่าปริมาตรที่มี 4 ตัว) ผลคูณจึงต้องมี 3 ตัว

3 **ขั้นที่ 3** ปัดเป็น 3 ตัว

$$m \approx 30.3\ \mathrm{g}$$

ระวัง: ตัวลวง 30.345 คือลืมปัด, 30.35 คือปัดตามทศนิยม 2 ตำแหน่ง (เอากฎการบวก–ลบมาใช้กับการคูณ ซึ่งผิดกฎ) ส่วน 25.5 คือตอบปริมาตรแทนมวล

ข้อ 14 — ตอบ ก.

ค่าที่วัดซ้ำหลายครั้งมีความใกล้เคียงกันเอง

หลักคิด: แยกนิยามสองคำนี้ให้ชัด

- **ความเที่ยง (precision)** = วัดซ้ำหลายครั้งแล้วค่าที่ได้**เกาะกลุ่มใกล้เคียงกันเอง** (ดูการกระจายของข้อมูล ไม่เกี่ยวกับค่าจริง) ✓
- **ความแม่น (accuracy)** = ค่าที่วัดได้**ใกล้เคียงค่าที่แท้จริง** (เทียบกับค่าจริง)

ดังนั้นตัวเลือกแรกคือความเที่ยง ส่วนตัวเลือกที่สองคือนิยามของความแม่น

ระวัง: ข้อมูลชุดหนึ่งอาจเที่ยงสูงแต่แม่นต่ำได้ (ค่าเกาะกลุ่มกันแน่นแต่เพี้ยนจากค่าจริงทั้งกลุ่ม เช่น เครื่องมือมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ) และสเกลที่ละเอียดไม่ได้รับประกันทั้งความเที่ยงและความแม่น — ความละเอียดของเครื่องมือเป็นคนละเรื่องกับคุณภาพของข้อมูลที่วัดได้จริง

ข้อ 15 — ตอบ ค.

ทั้งสองคนมีความเที่ยงสูงใกล้เคียงกัน แต่คนที่ 1 มีความแม่นสูงกว่า

หลักคิด: ตรวจความเที่ยงจากการเกาะกลุ่มของข้อมูล และตรวจความแม่นจากระยะห่างของค่าเฉลี่ยกับค่าจริง

❶ **ขั้นที่ 1** ความเที่ยง — ดูพิสัยของแต่ละคน

- คนที่ 1: $25.02 - 24.98 = 0.04$ mL
- คนที่ 2: $25.61 - 25.58 = 0.03$ mL

ทั้งสองคนข้อมูลเกาะกลุ่มแน่นมากพอ ๆ กัน → **ความเที่ยงสูงใกล้เคียงกัน**

❷ **ขั้นที่ 2** ความแม่น — เทียบค่าเฉลี่ยกับค่าจริง 25.00 mL

$$\bar{V}_1 = \frac{24.98 + 25.01 + 25.02}{3} = 25.00 \text{ mL}$$

$$\bar{V}_2 = \frac{25.60 + 25.58 + 25.61}{3} = 25.60 \text{ mL}$$

คนที่ 1 ตรงค่าจริง ส่วนคนที่ 2 เพี้ยนไปราว 0.60 mL อย่างเป็นระบบ → **คนที่ 1 แม่นสูงกว่า**

ดังนั้น ทั้งสองคนเที่ยงสูงใกล้เคียงกัน แต่คนที่ 1 แม่นสูงกว่า

ระวัง: ข้อมูลของคนที่ 2 เกาะกลุ่มแน่นแต่เพี้ยนทั้งกลุ่ม เป็นลักษณะของ**ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ** (เช่น เครื่องมือเพี้ยนหรืออ่านค่าผิดวิธีแบบเดิมซ้ำ ๆ) — ความเที่ยงสูงจึงไม่ได้แปลว่าแม่นเสมอไป

ข้อ 16 — ตอบ ค.

ความแม่น (accuracy) ต่ำ แต่ความเที่ยง (precision) สูง

นิยาม

- **ความแม่น (accuracy):** ค่าที่วัดได้ใกล้เคียง**ค่าจริง**เพียงใด
- **ความเที่ยง (precision):** ค่าที่วัดซ้ำหลายครั้งใกล้เคียง**กันเอง**เพียงใด

1 **ขั้นที่ 1** พิจารณาความเที่ยง — ข้อมูล 21.10, 21.12, 21.09, 21.11 mL มีพิสัยเพียง

$$21.12 - 21.09 = 0.03 \text{ mL}$$

ค่าทั้งสี่เกาะกลุ่มกันแน่นมาก แสดงว่า**ความเที่ยงสูง**

2 **ขั้นที่ 2** พิจารณาความแม่น — ค่าเฉลี่ย

$$\frac{21.10 + 21.12 + 21.09 + 21.11}{4} = 21.105 \text{ mL}$$

ต่างจากค่าจริง 20.00 mL ถึงประมาณ 1.1 mL ซึ่งมากเมื่อเทียบกับความละเอียดของบิวเรต แสดงว่า**ความแม่นต่ำ** (น่าจะมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เช่น บิวเรตสกปรก อ่านค่าผิดวิธี หรือสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นผิด)

ดังนั้น ความแม่นต่ำ แต่ความเที่ยงสูง

ข้อ 17 — ตอบ ข.

3.70%

สูตร: ร้อยละความคลาดเคลื่อนใช้**ค่าจริง**เป็นตัวหาร

$$\% \text{ error} = \frac{|\text{measured} - \text{true}|}{\text{true}} \times 100$$

1 **ขั้นที่ 1** หาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

$$|2.60 - 2.70| = 0.10 \text{ g/cm}^3$$

2 **ขั้นที่ 2** หารด้วยค่าจริงแล้วคูณ 100

$$\frac{0.10 \cancel{\text{g/cm}^3}}{2.70 \cancel{\text{g/cm}^3}} \times 100 = 3.7037... \approx 3.70\%$$

ตัวลวง

- 3.85% เกิดจากหารด้วย**ค่าที่วัดได้** $(0.10/2.60 \times 100 = 3.85)$ แทนที่จะหารด้วยค่าจริง
- 0.10% เกิดจากนำผลต่างมาตอบตรง ๆ โดยไม่หารด้วยค่าจริง
- 37.0% เกิดจากวางจุดทศนิยมผิดตำแหน่ง

ข้อ 18 — ตอบ ง.

(ก) (ข) และ (ค)

หลักคิด: ประเมินความเที่ยงจากพิสัย และความแม่นจากค่าเฉลี่ยเทียบค่าจริง $8.96\ \mathrm{g/cm^3}$ ทีละคน

(ก) ถูก — นักเรียน A: ค่าเฉลี่ย $\frac{8.94+8.95+8.96}{3} = 8.95$ ใกล้ค่าจริงมาก และพิสัยเพียง 0.02 → เที่ยงสูง แม่นสูง

(ข) ถูก — นักเรียน B: ค่าเฉลี่ย $\frac{8.50+8.99+9.40}{3} \approx 8.96$ ตรงค่าจริง แต่พิสัยกว้างถึง $9.40 - 8.50 = 0.90$ → ค่าเฉลี่ยใกล้ค่าจริงจากการหักล้างกันโดยบังเอิญ ความเที่ยงต่ำ

(ค) ถูก — นักเรียน C: พิสัยเพียง $8.43 - 8.41 = 0.02$ → เที่ยงสูง แต่ค่าเฉลี่ย 8.42 เพี้ยนจากค่าจริงอย่างเป็นระบบ คิดร้อยละความคลาดเคลื่อน

$$\frac{|8.42 - 8.96|}{8.96} \times 100 = \frac{0.54}{8.96} \times 100 \approx 6.03\%$$

ตรงกับที่ระบุประมาณ 6% → แม่นต่ำ

(ง) ผิด — นักเรียน D พิสัย $10.0 - 7.9 = 2.1$ กว้างกว่าของ B (0.90) มาก → D เที่ยง**ต่ำกว่า** B ไม่ใช่สูงกว่า

ดังนั้นข้อสรุปที่ถูกคือ **(ก) (ข) และ (ค)**

ระวัง: กรณี B และ D สอนบทเรียนสำคัญ — ค่าเฉลี่ยที่ใกล้ค่าจริงของข้อมูลที่กระจัดกระจายมากเป็นเพียง**ความบังเอิญ** ไม่ใช่หลักฐานว่าการวัดมีคุณภาพ ต้องดูความเที่ยงประกอบเสมอ

ข้อ 19 — ตอบ ข.

$0.5\ \mathrm{g}$

หลักคิด: คำอุปสรรค milli (m) หมายถึง 10^{-3} ดังนั้น $1\ \mathrm{g} = 1000\ \mathrm{mg}$

แปลงหน่วยโดยการหาร

$$500\ \cancel{\mathrm{mg}} \times \frac{1\ \mathrm{g}}{1000\ \cancel{\mathrm{mg}}} = 0.5\ \mathrm{g}$$

ระวัง: ทิศทางการแปลง — จากหน่วยเล็ก (mg) ไปหน่วยใหญ่ (g) ตัวเลขต้อง**เล็กลง** ถ้าได้ 5 หรือ 50 g แปลว่าใช้แฟกเตอร์ 100 หรือ 10 ผิด (milli คือพันเท่า ไม่ใช่ร้อยหรือสิบเท่า) ส่วน 0.05 g เกิดจากหารด้วย 10000

ข้อ 20 — ตอบ ก.

$2.70\ \mathrm{g/mL}$

หลักคิด: ความหนาแน่นคือมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$d = \frac{m}{V} = \frac{54.0\ \mathrm{g}}{20.0\ \mathrm{mL}} = 2.70\ \mathrm{g/mL}$$

ทั้งมวลและปริมาตรมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว คำตอบจึงรายงาน 3 ตัวคือ 2.70 g/mL (ค่านี้ตรงกับความหนาแน่นของอะลูมิเนียม)

ระวัง: ตรวจสูตรด้วยหน่วยเสมอ — ถ้าตั้งกลับเป็น V/m จะได้ 0.370 ซึ่งหน่วยเป็น mL/g ไม่ใช่ g/mL และถ้า**คูณ**กันจะได้ 1080 หน่วยเป็น $\mathrm{g \cdot mL}$ ซึ่งไม่ใช่หน่วยความหนาแน่น ส่วน 27.0 เกิดจากวางจุดทศนิยมผิด

ข้อ 21 — ตอบ ง.

$0.150\ \mathrm{L/min}$

1 **ขั้นที่ 1** วิเคราะห์ทิศทางการแปลงหน่วย — เวลาอยู่ตัวส่วน จึงต้อง**คูณ** 60 (ใน 1 นาทีไหลได้มากกว่าใน 1 วินาที) และ mL เป็น L ต้อง**หาร** 1000

$$2.50\ \frac{\cancel{\mathrm{mL}}}{\cancel{\mathrm{s}}} \times \frac{60\ \cancel{\mathrm{s}}}{1\ \mathrm{min}} \times \frac{1\ \mathrm{L}}{1000\ \cancel{\mathrm{mL}}} = 0.150\ \mathrm{L/min}$$

2 **ขั้นที่ 2** พิจารณาเลขนัยสำคัญ — ค่าที่วัดได้คือ 2.50 mL/s มีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว ส่วนแฟกเตอร์ 60 s/min และ 1000 mL/L เป็น**ค่านิยามที่แน่นอน** (exact numbers) ไม่จำกัดเลขนัยสำคัญ ผลลัพธ์จึงต้องมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว คือ 0.150 L/min (ต้องเขียนศูนย์ตัวท้ายเพื่อแสดงความละเอียดครบ 3 ตัว)

ที่มาของตัวลวง

- 0.0417 L/min เกิดจากทำผิดสองจุดพร้อมกัน คือ**หาร** 60 แทนที่จะคูณ (สับสนทิศทางการแปลงหน่วยเวลาที่อยู่ตัวส่วน) **และ**ลืมแปลง mL เป็น L ($2.50 \div 60 = 0.0417$)
- 1.50 L/min เกิดจากใช้แฟกเตอร์ $1\ \mathrm{L} = 100\ \mathrm{mL}$ ผิด
- 150 L/min เกิดจากคูณ 60 แล้วลืมแปลง mL เป็น L

ข้อ 22 — ตอบ ค.

ขวดขนาด 500 mL

❶ **ขั้นที่ 1** หาปริมาตรของสารละลายจากความหนาแน่น — ความหนาแน่นคือมวลต่อปริมาตร ดังนั้นปริมาตรหาได้จากมวล**หาร**ความหนาแน่น

$$V = \frac{m}{d} = \frac{340\ \mathrm{g}}{0.85\ \mathrm{g/mL}} = 400\ \mathrm{mL}$$

❷ **ขั้นที่ 2** เทียบกับความจุขวด — ต้องใช้ขวดที่จุได้**อย่างน้อย** 400 mL

- ขวด 250 mL และ 300 mL → เล็กเกินไป บรรจุไม่หมด
- ขวด 500 mL → จุได้ทั้งหมด และเล็กที่สุดในบรรดาขวดที่จุได้ ✓
- ขวด 1000 mL → จุได้ แต่ไม่ใช่ขนาดเล็กที่สุด

ที่มาของตัวลวง

- ขวด 300 mL มาจากการ**คูณ**มวลกับความหนาแน่น ($340 \times 0.85 = 289\ \mathrm{mL}$) ซึ่งเป็น misconception ที่พบบ่อย — สังเกตว่าถ้าคูณ หน่วยจะได้ g^2/mL ไม่ใช่ mL แสดงว่าตั้งสูตรผิด (สารนี้เบากว่าน้ำ $d < 1$ ปริมาตรจึงต้อง**มากกว่า**ตัวเลขมวล ไม่ใช่น้อยกว่า)
- ขวด 1000 mL ลวงคนที่คำนวณถูกแต่ไม่อ่านโจทย์ว่าต้องการขนาด**เล็กที่สุด**ที่พอ

ข้อ 23 — ตอบ ก.

$0.250\ \mathrm{mL}$

❶ **ขั้นที่ 1** เปลี่ยน μL เป็น L แล้วเปลี่ยน L เป็น mL โดยใช้แฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วยและตัดหน่วยทีละขั้น

$$250\ \cancel{\mu\mathrm{L}} \times \frac{10^{-6}\ \cancel{\mathrm{L}}}{1\ \cancel{\mu\mathrm{L}}} \times \frac{1\ \mathrm{mL}}{10^{-3}\ \cancel{\mathrm{L}}} = 0.250\ \mathrm{mL}$$

วิธีคิดลัด: $1\ \mathrm{mL} = 1000\ \mu\mathrm{L}$ ดังนั้น

$$\frac{250}{1000} = 0.250\ \mathrm{mL}$$

ตัวลวงที่พบบ่อย

- 2.50 mL และ 25.0 mL เกิดจากหารด้วย 100 หรือ 10 (จำแฟกเตอร์ระหว่างคำอุปสรรค micro กับ milli ผิด — ต่างกัน 10^3 เท่า ไม่ใช่ 10^2 หรือ 10^1)
- 0.0250 mL เกิดจากหารด้วย 10000

ข้อ 24 — ตอบ ก.

$\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-2}}$

1 **ขั้นที่ 1** เริ่มจากนิยาม — ความดันคือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$1\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{N/m^2}$$

2 **ขั้นที่ 2** แตกนิวตันเป็นหน่วยฐาน — จากกฎของนิวตัน $F = ma$ หน่วยของแรงคือมวลคูณความเร่ง

$$1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$$

3 **ขั้นที่ 3** แทนค่าแล้วรวมเลขชี้กำลังของเมตร

$$1\ \mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{kg\,m^{1-2}\,s^{-2}} = \mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-2}}$$

ที่มาของตัวลวง

- $\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$ คือหน่วยของ**แรง (นิวตัน)** เกิดจากลืมหารด้วยพื้นที่ $\mathrm{m^2}$
- $\mathrm{kg\,m^{-2}\,s^{-2}}$ เกิดจากหารด้วย $\mathrm{m^2}$ โดยลืมว่าในนิวตันมี m อยู่แล้วหนึ่งตัวที่ต้องนำมาหักล้างกัน ($m^1 \div m^2 = m^{-1}$ ไม่ใช่ m^{-2})
- $\mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}}$ คือหน่วยของ**กำลัง (วัตต์)** ซึ่งเป็นปริมาณคนละชนิดกับความดัน

ข้อ 25 — ตอบ ค.

$7.90 \times 10^2\ \mathrm{kg/m^3}$

❶ **ขั้นที่ 1** คำนวณความหนาแน่นในหน่วย g/mL

$$d = \frac{m}{V} = \frac{19.75\ \mathrm{g}}{25.0\ \mathrm{mL}} = 0.790\ \mathrm{g/mL}$$

❷ **ขั้นที่ 2** พิจารณาเลขนัยสำคัญ — มวล 19.75 g มี 4 ตัว ปริมาตร 25.0 mL มี 3 ตัว การหารต้องใช้ตัวที่น้อยกว่า ดังนั้นคำตอบมีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว คือ 0.790 g/mL

❸ **ขั้นที่ 3** เปลี่ยนหน่วย โดยใช้ $1\ \mathrm{mL} = 1\ \mathrm{cm^3}$ และแฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วยที่กำหนด

$$0.790\ \cancel{\mathrm{g/cm^3}} \times \frac{1000\ \mathrm{kg/m^3}}{1\ \cancel{\mathrm{g/cm^3}}} = 790\ \mathrm{kg/m^3}$$

❹ **ขั้นที่ 4** รายงานให้เห็นเลขนัยสำคัญ 3 ตัวอย่างชัดเจน — หากเขียน 790 เป็นจำนวนเต็มที่ลงท้ายด้วยศูนย์โดยไม่มีจุดทศนิยม ศูนย์ตัวท้ายจะไม่นับเป็นเลขนัยสำคัญ (เหลือเพียง 2 ตัว) จึงต้องเขียนเป็นสัญกรณ์วิทยาศาสตร์

$$d = 7.90 \times 10^2\ \mathrm{kg/m^3}$$

ตัวลวง

- 0.790 เกิดจากลืมเปลี่ยนหน่วย (ตอบเป็น g/cm³ แต่ติดหน่วย kg/m³)
- 79.0 เกิดจากใช้แฟกเตอร์ 100 แทน 1000
- 7.90×10^5 เกิดจากใช้แฟกเตอร์ 10^6 (เข้าใจผิดว่าแปลงเฉพาะ cm³ → m³ โดยลืมแปลง g → kg)

ข้อ 26 — ตอบ ง.

ค่อย ๆ เทกรดเข้มข้นลงในน้ำทีละน้อยพร้อมกวนตลอดเวลา

หลักการ: การละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในน้ำเป็นกระบวนการ**คายความร้อนสูงมาก**

เหตุผลทีละขั้น

1. ถ้าเทน้ำลงในกรดเข้มข้น น้ำปริมาณน้อยจะลอยอยู่บนผิวกรด (กรดซัลฟิวริกหนาแน่นกว่าน้ำ) ความร้อนที่คายออกมาจะรวมอยู่ที่ผิวสัมผัสจุดเดียว ทำให้น้ำเดือดฉับพลันและ**กระเด็นพากรดออกมา**ได้ อันตรายมาก
2. วิธีที่ถูกต้องคือ **เทกรดลงน้ำ** ทีละน้อย เพราะน้ำปริมาณมากช่วยดูดซับและกระจายความร้อน อุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นช้า
3. ต้อง**กวนตลอดเวลา**เพื่อกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ ไม่ให้ร้อนเฉพาะจุด

จำง่าย ๆ ว่า "เทกรดลงน้ำ อย่าเทน้ำลงกรด" ดังนั้นข้อที่ถูกคือ ค่อย ๆ เทกรดเข้มข้นลงในน้ำทีละน้อยพร้อมกวนตลอดเวลา

ข้อ 27 — ตอบ ง.

อุณหภูมิของน้ำ

หลักคิด: จำแนกตัวแปรของการทดลองตามบทบาท

- **ตัวแปรต้น (ตัวแปรอิสระ)** = สิ่งที่ผู้ทดลอง**จงใจเปลี่ยน**เพื่อดูผล → ในที่นี้คือ**อุณหภูมิของน้ำ** (เปลี่ยนเป็น 20, 40, 60 องศาเซลเซียส) ✓
- **ตัวแปรตาม** = สิ่งที่**วัดผล** → เวลาที่ใช้จนเกลือละลายหมด
- **ตัวแปรควบคุม** = สิ่งที่**ทำให้คงที่**เพื่อให้การเปรียบเทียบยุติธรรม → มวลของเกลือและปริมาตรของน้ำ

ระวัง: จุดที่สับสนบ่อยคือสลับตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม — ให้ถามว่า "ใครเป็นเหตุ ใครเป็นผล" สิ่งที่เราตั้งค่าเองก่อนเริ่มทดลองคือเหตุ (ตัวแปรต้น) สิ่งที่ต้องรอวัดหลังทดลองคือผล (ตัวแปรตาม)

ข้อ 28 — ตอบ ค.

31.25 mL

หลักคิด: การเจือจางไม่เปลี่ยนจำนวนโมลของตัวถูกละลาย จึงใช้ความสัมพันธ์

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

1 **ขั้นที่ 1** กำหนดค่า — $C_1 = 12$ mol/L (กรดเข้มข้น), $C_2 = 1.5$ mol/L, $V_2 = 250$ mL, หา V_1

2 **ขั้นที่ 2** แทนค่า

$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1} = \frac{1.5 \times 250}{12} = 31.25 \text{ mL}$$

3 **ขั้นที่ 3** ตรวจความสมเหตุสมผล — เจือจางจาก 12 เป็น 1.5 mol/L คือเจือจาง 8 เท่า ดังนั้นปริมาตรกรดที่ใช้ต้องเป็น $\frac{250}{8} = 31.25$ mL สอดคล้องกัน ✓

ระวัง: ตัวลวง 20.8 mL เกิดจากคำนวณ $250 \div 12$ (ลืมคูณความเข้มข้นเป้าหมาย) และ 3.13 mL เกิดจากหารเกินไปสิบเท่า ส่วน 62.5 mL เกิดจากใช้อัตราส่วนเจือจาง 4 เท่าผิด — ทุกครั้งควรตรวจคำตอบด้วยจำนวนเท่าของการเจือจาง

ข้อ 29 — ตอบ ข.

$0.18\ \mathrm{mol/L}$

หลักคิด: ใช้ $C_1V_1 = C_2V_2$ ทีละขั้น โดยความเข้มข้นผลลัพธ์ของขั้นแรกเป็นความเข้มข้นตั้งต้นของขั้นถัดไป

❶ **ขั้นที่ 1** เจือจางครั้งแรก

$$C_2 = \frac{C_1V_1}{V_2} = \frac{18 \times 25.0}{500} = 0.90\ \mathrm{mol/L}$$

❷ **ขั้นที่ 2** เจือจางครั้งที่สอง

$$C_3 = \frac{C_2V_2'}{V_3} = \frac{0.90 \times 50.0}{250} = 0.18\ \mathrm{mol/L}$$

ตรวจสอบด้วยจำนวนเท่ารวม: ขั้นแรกเจือจาง $\frac{500}{25} = 20$ เท่า ขั้นที่สองเจือจาง $\frac{250}{50} = 5$ เท่า รวมเจือจาง 100 เท่า ดังนั้น $\frac{18}{100} = 0.18$ mol/L ✓

ระวัง: ตัวลวง 0.90 คือหยุดที่ขั้นแรก, 4.5 เกิดจากตั้งสัดส่วนขั้นที่สองกลับด้าน ($0.90 \times 250/50$ — การเจือจางต้องทำให้เข้มข้น**ลดลง** ถ้าคำนวณแล้วเพิ่มขึ้นแสดงว่ากลับเศษส่วน) ส่วน 0.36 เกิดจากใช้จำนวนเท่ารวมผิดเป็น 50 เท่า

ข้อ 30 — ตอบ ก.

(ก) และ (ค)

หลักคิด: โจทย์นี้ต้องตรวจทั้ง**การคำนวณ**และ**เทคนิคปฏิบัติ**ไปพร้อมกัน

(ก) ถูก — ใช้ $C_1V_1 = C_2V_2$

$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1} = \frac{0.30 \times 500}{6.0} = 25.0\ \mathrm{mL}$$

ตรวจสอบ: เจือจาง $\frac{6.0}{0.30} = 20$ เท่า ดังนั้น $\frac{500}{20} = 25.0$ mL ✓

(ข) ผิด — ห้ามเทน้ำลงกรดเด็ดขาด การละลายกรดเข้มข้นคายความร้อนสูง น้ำปริมาณน้อยที่ผิวสัมผัสจะร้อนจัดจนเดือดกระเด็นพากรดออกมา หลักคือ **"เทกรดลงน้ำ"** เสมอ เหตุผลเรื่องไอกรดฟังดูน่าเชื่อแต่ใช้แลกกับความเสี่ยงกระเด็นไม่ได้

(ค) ถูก — ปิเปตต์แบบปริมาตรให้ความแม่นยำสูงเหมาะกับการตวง 25.0 mL และการปล่อยกรดลงในน้ำที่รองรับไว้ก่อนเป็นลำดับที่ปลอดภัย

(ง) ผิด — สารละลายที่ยังอุ่นมีปริมาตร**ขยายตัว**มากกว่าปกติ ถ้าปรับถึงขีดตอนอุ่น เมื่อเย็นลงปริมาตรจะหดต่ำกว่าขีด ทำให้ความเข้มข้นจริงเพี้ยน ต้องรอให้สารละลายเย็นถึงอุณหภูมิห้องก่อนแล้วจึงปรับปริมาตรครั้งสุดท้าย

ดังนั้นขั้นตอนที่ถูกคือ **(ก) และ (ค)**

ระวัง: ขวดวัดปริมาตรสอบเทียบไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ราว 20 องศาเซลเซียส) การปรับปริมาตรขณะร้อนจึงเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงระบบที่พบบ่อยในการเตรียมสารละลายจากกรดเข้มข้น