

## บทที่ 12

### รีแฟรกโตเมตรี (Refractometry)

เมื่อรังสีผ่านตัวกลางโปร่งใส (transparent medium) จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้าของรังสีและอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกสาร อัตราการแพร่ของลำรังสีในตัวกลางอื่น ๆ มีค่าน้อยกว่าสุญญากาศ ดรรชนีหักเห (refractive index) ของสาร  $n_i$  ที่ความยาวคลื่น  $i$  มีความสัมพันธ์

$$n_i = C/V_i \quad \dots\dots(12-1)$$

$V_i$  ความเร็วของการแพร่ของรังสีในตัวกลาง  $C$  ความเร็วของตัวกลางในสุญญากาศ (มีค่าคงที่)  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ดรรชนีหักเหของของเหลวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.3 และ 1.8 ของแข็งอยู่ในช่วง 1.3 ถึง 2.5

ดรรชนีหักเหเป็นค่าคงที่ทางกายภาพที่ใช้อธิบายสปีชีส์ คุณสมบัตินี้ไม่จำเพาะ เพราะสารน้อยชนิดมีดรรชนีหักเหเท่ากันที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นที่กำหนดให้ ค่าคงที่นี้ใช้หาชนิดและความบริสุทธิ์ของสารประกอบ ดรรชนีหักเหยังใช้วิเคราะห์ปริมาณของผสมหลายชนิดที่อยู่ด้วยกัน เมื่อใช้ค่าดรรชนีหักเหร่วมกับค่าคงที่อย่างอื่นจะช่วยหาโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลได้

#### การวัดค่าดรรชนีหักเห (The Measurement of Refractive Index)

ค่าดรรชนีหักเหของสารหาได้จากการวัดการเปลี่ยนทิศทางหรือหักเห (refractive) ของลำรังสีที่วิ่งมาในแนวขนาน (collimated radiation) ขณะที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง ดังรูป 2-8

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad \dots\dots(12-2)$$

$v_1$  ความเร็วของรังสีในตัวกลางที่โปร่ง  $M_1$   $v_2$  ความเร็วของรังสีในตัวกลางทึบ  $M_2$   $n_1$  และ  $n_2$  ดรรชนีหักเหของตัวกลาง 1 และ 2  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  มุมตกและมุมหักเห เมื่อ  $M_1$  เป็นสุญญากาศ  $n_1$  มีค่า 1 เพราะว่า  $v_1$  มีค่าเท่ากับ  $c$  ในสมการ 12.1 ดังนั้น

$$n_2 = n_{vac} = \frac{c}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad \dots\dots(12-2)$$

$n_{vac}$  ดรรชนีหักเหสัมบูรณ์ (absolute refractive index) ของ  $M_2$  ค่า  $n_{vac}$  ได้จากการวัดมุมสองมุม  $\theta_1$  และ  $\theta_2$

การวัดค่าดรรชนีหักเหมักเทียบกับตัวกลางใดตัวกลางหนึ่งมากกว่าสุญญากาศ ดรรชนีหักเหของของเหลวและของแข็งในหนังสืออ้างอิง มักเทียบกับอากาศที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ค่าดรรชนีหักเหของอากาศเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิและความดันน้อยมาก การทดลองที่ไม่ต้องการความเที่ยงสูง จึงไม่ต้องแก้ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าดรรชนีหักเห ค่าดรรชนีหักเห  $n_D$  เป็นค่าที่วัดเทียบกับอากาศโดยใช้รังสีเส้น D จากโซเดียม เมื่อเปลี่ยนเป็นค่าดรรชนีหักเหของสุญญากาศได้

$$n_{vac} = 1.00027n_D \quad \dots\dots(12-4)$$

ปกติดรรชนีหักเหต้องวัดได้แม่นยำถึง  $2 \times 10^{-4}$  การวิเคราะห์สารละลายเป็นงานประจำ วัดได้แม่นยำในช่วง  $6$  ถึง  $7 \times 10^{-5}$  เมื่อต้องการหาว่าสารประกอบบริสุทธิ์หรือไม่ ต้องวัดค่าดรรชนีหักเหของสารตัวอย่างเทียบกับมาตรฐาน ความแตกต่างในการวัดค่าดรรชนีหักเหจะอยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-6}$  หรือดีกว่า

**การหักเหจำเพาะและโมลาร์ (Specific and Molar Refraction)**

อัตราการแพร่ของรังสีขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในตัวกลางและสภาพแวดล้อม ตัวอย่างที่เป็นแก๊สความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยจึงมีอันตรกิริยาน้อย ดรรชนีหักเหของแก๊สจึงมีค่ามากกว่าหนึ่งเล็กน้อยภายใต้สภาวะปกติ เมื่อเพิ่มความดันความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้น ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกรังสีชนเพิ่ม ดรรชนีหักเหจึงเพิ่มขึ้น ดรรชนีหักเหของอากาศจะเพิ่มจาก 1.00027 เป็น 1.03 เมื่อเพิ่มความดันจาก 1 บรรยากาศไปเป็น 100 บรรยากาศ ของเหลวและของแข็งมีความหนาแน่นมากกว่าแก๊สปริมาณอิเล็กตรอนมีมากจึงถูกรังสีชนมาก ดรรชนีหักเหของของเหลวและของแข็งจึงเพิ่มขึ้นมากกว่าแก๊สเมื่อเพิ่มความดัน

นิวตันให้ความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีหักเหและความหนาแน่นไว้ว่า  $(\eta^2 - 1) / d$  ของสารชุดหนึ่งมีค่าคงที่ ที่จริงแล้วดรรชนีหักเหไม่ขึ้นกับความหนาแน่นแต่ขึ้นกับการจัดตัวของอิเล็กตรอนในตัวกลาง ค่าดรรชนีหักเหที่ได้จากการแก้เนื่องจากผลต่างของความหนาแน่นเรียกว่าการหักเหจำเพาะ (specific refraction) ค่านี้ยังใช้หาสภาพแวดล้อมทางอิเล็กตรอนิกส์ในตัวกลาง โลเร็นตซ์ โลเร็นต (Lorentz Lorenz) ให้ความหมายของการหักเหจำเพาะ

$$r = \frac{(\eta^2 - 1) \times 1}{(\eta^2 + 2) d} \dots\dots(12-5)$$

ส่วนการหักเหเป็นโมลาร์ (Molar refraction) R เท่ากับ

$$R = Mr \dots\dots(12-6)$$

M แทนน้ำหนักโมเลกุล

ข้อมูลที่ได้จากการหักเหจำเพาะและการหักเหเป็นโมลาร์ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบว่าอยู่ในหมู่เดียวกันหรือไม่ การหักเหเป็นโมลาร์ ใช้ศึกษาโครงสร้างและชนิดของพันธะ ตาราง 12-1 การหักเหของอะตอม

ค่าการหักเหเป็นโมลาร์ขึ้นกับการจัดตัวของอะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในโมเลกุล จำนวนอะตอมที่เพิ่มขึ้นคำนวณได้จากค่าการหักเหเป็นโมลาร์ในสารประกอบที่บริสุทธิ์ ตาราง 12-1 เป็นค่าการหักเหของอะตอมและหมู่ต่าง ๆ

ตาราง 12-1 การหักเหของอะตอม

หมู่	Mrd	หมู่	Mrd
H	1.100	Br	8.865
C	2.418	I	13.900
พันธะคู่ (C = C)	1.733	N (อะลิฟาติกอามีน)	2.322
พันธะสาม (C ≡ C)	2.398	N (เซคอะลิฟาติกอามีน)	2.499
O (คาร์บอนิล) (C = O)	2.211	N (เทอร์อะลิฟาติกอามีน)	2.840
O (ไฮดรอกซิล) (O - H)	1.525	N (ไพรมารีอะโรมาติกอามีน)	3.21
O (อีเทอร์, เอสเทอร์) (C - O-)	1.643	N (เซคอะโรมาติกอามีน)	3.59
S (ไทโอคาร์บอนิล) (C = S)	7.97	N (เทอร์ตอะโรมาติกอามีน)	4.36
S (เมอร์แคปโต) (S - H)	7.69	N (เอไมด์)	2.65
F	1.0	- NO <sub>2</sub> หมู่อะโรมาติก	7.30
Cl	5.697	- C ≡ N หมู่	5.459

ตัวอย่าง จงหาค่าการหักเหเป็นโมลาร์ของกรดแอซีติกและเมทิลฟอร์มเมต ซึ่งมีสูตร  $C_2H_4O_2$

กรดแอซีติก  $CH_3COOH$

$$\begin{aligned} 2 \text{ คาร์บอน } 2 \times 2.418 &= 4.836 \\ 4 \text{ ไฮโดรเจน } 4 \times 1.100 &= 4.400 \\ 1 \text{ คาร์บอนิลออกซิเจน} &= 2.211 \\ 1 \text{ ไฮดรอกซิลออกซิเจน} &= 1.525 \\ &= 12.972 \end{aligned}$$

เมทิลฟอร์มเมต  $HCOOCH_3$

$$\begin{aligned} 2 \text{ คาร์บอน } 2 \times 2.418 &= 4.836 \\ 4 \text{ ไฮโดรเจน } 4 \times 1.100 &= 4.400 \\ 1 \text{ คาร์บอนิลออกซิเจน} &= 2.211 \\ 1 \text{ เอสเทอร์ออกซิเจน} &= 1.643 \\ &= 13.090 \end{aligned}$$

สารทั้งสองมีสูตรเอมพิริคัลเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างต่างกัน จึงมีค่าการหักเหเป็นโมลาร์ต่างกันประมาณร้อยละ 0.90 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์สารนี้ ต้องมีความเที่ยงในการวัดค่าดรรชนีหักเห  $\pm 0.006$  และความหนาแน่น  $\pm 0.005$

ตัวอย่าง จงหาค่าการหักเหเป็นโมลาร์ของไดเอทิลอีเทอร์  $C_2H_5OC_2H_5$

$$\begin{aligned} 4 \text{ คาร์บอน } 4 \times 2.418 &= 9.672 \\ 10 \text{ ไฮโดรเจน } 10 \times 1.10 &= 11.000 \\ 1 \text{ อีเทอร์ออกซิเจน} &= 1.643 \\ &= 22.315 \end{aligned}$$

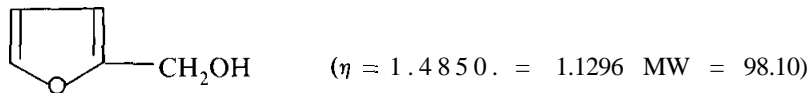
ตัวอย่าง ดรรชนีหักเหของกรดแอซีติกที่ 20 องศาเซลเซียสมีค่า 1.3698 ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียสมีค่า 1.049 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนักโมเลกุล 60.0 จงหาค่าการหักเหจำเพาะ (specific refraction) และการหักเหเป็นโมลาร์ (molar refraction)

$$\begin{aligned} r &= \frac{(\eta^2 - 1) \times 1}{(\eta^2 + 2) \cdot d} \\ &= \frac{(1.3608)^2 - 1 \times 1}{(1.3698)^2 + 2} \cdot \frac{1}{1.049} \\ &= 0.2155 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R &= Mr \\
 &= 60.0 \times 0.2155 \\
 &= 12.93 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล}
 \end{aligned}$$

การหักเหเป็นโมลาร์อาจหาได้จากการหักเหอะตอมดังตัวอย่างก่อนหน้า

ตัวอย่าง ใช้ค่าการหักเหของอะตอมจากราย 12-1 หาค่าการหักเหเป็นโมลาร์ของสารเฟอร์ฟูรอล



R หาได้จากตาราง

5 × C	=	5 × 2.42	12.10
1 × O ใน OH	=	1 × 1.52	= 1.52
1 × O ในอีเทอร์	=	1 × 1.64	= 1.64
6 × H	=	6 × 1.10	= 6.60
2 พันธะคู่	=	2 × 1.7,3	= 3.46
R	=	25.32	

R ที่หาจากการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{(\eta^2 - 1) \times \frac{1}{d}}{(\eta^2 + 2)} \\
 &= \frac{(1.4850^2 - 1) \times \frac{1}{1.1296}}{(1.4850^2 + 2)} \\
 R &= Mr \\
 &= \frac{(1.4850^2 - 1) \times 98.10}{(1.4850^2 + 2) \times 1.1296} \\
 &= 24.89
 \end{aligned}$$

ตัวแปรที่มีผลต่อการวัดค่าดัชนีหักเห

(Variable that affect Refractive Index Measurement)

ตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีหักเหได้แก่ อุณหภูมิ ความยาวคลื่น และความดัน

**อุณหภูมิ (Temperature)** อุณหภูมิมีผลต่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนความหนาแน่นของสารเปลี่ยน ของเหลวหลายชนิดสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่มีต่อค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง  $-4$  ถึง  $-6 \times 10^{-4}$  ต่อองศาเซลเซียสสัมประสิทธิ์นี้มีค่า  $-1 \times 10^{-4}$  สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่มีต่อค่าดัชนีหักเหของของแข็งมีค่าน้อยกว่าของเหลวมาก ดังนั้นการวัดค่าดัชนีหักเหที่ต้องการความแม่นยำสูงต้องควบคุมอุณหภูมิให้เปลี่ยนน้อยกว่า  $\pm 0.2$  องศาเซลเซียส ถ้าต้องการความแม่นยำต่ำที่  $\pm 0.02$  องศาเซลเซียส

**ความยาวคลื่นของรังสี (Wavelength of radiation)** ดรรชนีหักเหของตัวกลางโปร่งใสมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นผลนี้เรียกว่าการกระจายปกติ (normal dispersion) ถ้าตรงกับแถบดูดกลืนรังสีค่าดัชนีหักเหของตัวกลางโปร่งใสจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นไปเล็กน้อย ช่วงนี้เรียกว่าการกระจายผิดปกติหรือวิปริต (anomalous dispersion)

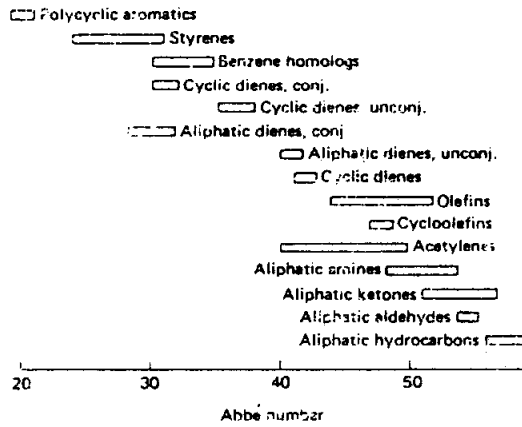
**ปรากฏการณ์การกระจาย (dispersion)** ทำให้ความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดค่าดัชนีหักเหต้องมีค่าคงที่ ปกติใช้เส้น D จากหลอดโซเดียม (ไอ) ( $\lambda = 589$  นาโนเมตร) เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ดรรชนีหักเหของสารที่วัดจากรังสีนี้มีค่า  $n_D$  มักกำหนดอุณหภูมิที่วัดไว้ด้วยจึงเขียน  $n_D^{20}$  แหล่งกำเนิดรังสีปรอท เส้น G ( $\lambda = 436$  นาโนเมตร)

ค่าการกระจายยังใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ ค่านี้เรียก เลขแอบบี (Abbe number)

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \dots\dots(12-7)$$

$n_F$  และ  $n_C$  เป็นค่าดัชนีของเส้น F และ C จากหลอดไฮโดรเจนที่ความยาวคลื่น 486.1 และ 656.3 นาโนเมตรตามลำดับ

รูป 12-1 แสดงความสัมพันธ์ของเลขแอบบีของสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ



รูป 12-1 ความสัมพันธ์ของเลขแอบบีกับหมู่ฟังก์ชัน

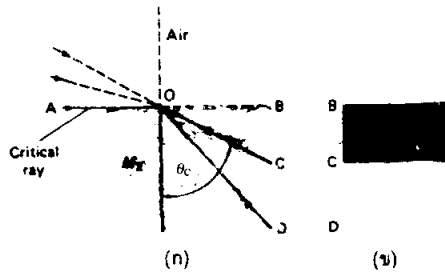
**ความดัน (Pressure)** ดรรชนีหักเหของสารเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันเพิ่มมีผลทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แก๊สได้รับอิทธิพลจากความดันมากที่สุดค่าดรรชนีหักเหเปลี่ยนไปประมาณ  $3 \times 10^{-4}$  ต่อบรรยากาศ ของเหลวตัวเลขนี้มีค่าน้อยกว่า (แฟกเตอร์ 10) ของแข็งมีค่าน้อยกว่าของเหลวมาก การวิเคราะห์ที่ต้องการผลละเอียดต้องควบคุมความดันที่มีต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์

**อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าดรรชนีหักเห (Instruments for Measuring Refractive Index)**

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าดรรชนีหักเหมีสองแบบ มาตรฐานดรรชนีหักเห (Refractometer) มาตรฐานดรรชนีหักเหใช้หลักการวัดมุมวิกฤต (critical angle) หรือใช้หลักการกระจัด (displacement) อินเตอร์เฟอริเตอร์ใช้หลักการแทรกสอด (interference) หาค่าดรรชนีหักเหย่อย ๆ (differential) ด้วยความเที่ยงสูง

1. **มุมวิกฤตของมาตรฐานดรรชนีหักเห (Critical Angle for Refractometer)** อุปกรณ์นี้ใช้วัดค่าดรรชนีหักเหโดยใช้หลักมุมวิกฤต มุมวิกฤต (critical angle) คือมุมหักเหของรังสีในตัวกลางหนึ่งเมื่อรังสีนี้ทำมุมตก 90 องศา นั่นคือ  $\theta_1$  ในสมการ 12-2 มีค่า 90 องศา  $\theta_2$  เป็นมุมวิกฤต  $\theta_c$

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = \frac{1}{\sin \theta_c} \dots\dots\dots(12-8)$$

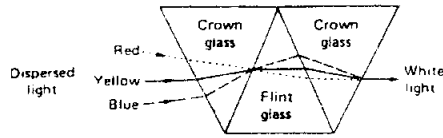


รูป 12-2 (ก) แสดงมุมวิกฤต  $\theta_c$  และลำรังสีวิกฤต AOC (ข) ภาพแสดงขอบเขตมืดสว่างที่เกิดมุมวิกฤต

รูป 12-2 (ก) แสดงมุมวิกฤตที่เกิดเมื่อลำรังสีวิกฤตชนผิวตัวกลาง  $M_2$  ที่มุม  $90^\circ$  องศา กับเส้นปกติและเกิดการหักเหบนผิวที่จุด  $O$  ถ้าสามารถเห็นภาพด้านข้างในตัวกลางจะเห็นภาพดังรูป 12-2 (ข) ลำรังสีวิกฤตจะปรากฏเป็นขอบเขตระหว่างส่วนมืดและสว่าง (critical boundary) จริง ๆ แล้วลำรังสีไม่ได้เข้าไปในตัวกลางตรงจุด  $O$  แต่ลำรังสีเข้าทุกจุดบนผิวและทำให้เกิดลำรังสีวิกฤตเป็นชุดที่มุมเดียวกัน  $\theta_c$  ขอบเขตมืดสว่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้เลนส์รวมแสง ดังรูป 12-2 (ข)

มุมวิกฤตขึ้นกับความยาวคลื่น ถ้าใช้รังสีที่มีหลายความยาวคลื่นจะเห็นขอบเขตมืดสว่างไม่ชัดเจนดังรูป 12-2 (ข) แต่จะเห็นแถบมืดและสว่างพราเนื่องจากการแพร่ของรังสีหลายรงค์ (หลายความยาวคลื่น) ทำให้การหามุมวิกฤตได้ไม่ถูกต้อง มาตรฐานนี้หักเหใช้หามุมวิกฤต จึงใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกรงค์ (ความยาวคลื่นเดียว) มาตรฐานนี้หักเหที่ดีมักมีอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นให้ได้รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว ถ้าใช้มาตรฐานนี้หักเหที่มีแหล่งกำเนิดรังสีจากหลอดทังสแตนต้องมีอุปกรณ์แก้การกระจายรังสีเพื่อให้การหาค่ามุมวิกฤตได้ถูกต้อง อุปกรณ์นี้เรียก อมิซิปริซึม (Amici Prism) ปริซึมนี้เป็นแก้วคราวน์ (Crown glass) 2 ชั้นประกบกับแก้วฟลินต์ (flint glass) ดังรูป 12-3 ปริซึมนี้ทำหน้าที่รวมรังสีที่กระจายให้เป็นแสงสีขาว (white light) มาตรฐานนี้หักเหแบบจุ่ม (The dipping refractometer รูป 12-4 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หามุมวิกฤตแบบง่าย ๆ แต่ไม่ค่อยละเอียดนัก ปริซึมจุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ แสงสีขาวถูกสะท้อนจากกระจกเงาเข้าสู่ผิวหน้าปริซึมแล้วเข้าปริซึมแบบอมิซิ ลำแสงที่ถูกหักเหจะถูกโฟกัสบนสเกลแบบเชิงเส้นและวัดโดยเลนส์ใกล้ตา สเกลนี้มีเวอร์เนียปรับเพื่อให้มองเห็นขอบเขตมืดสว่างชัด

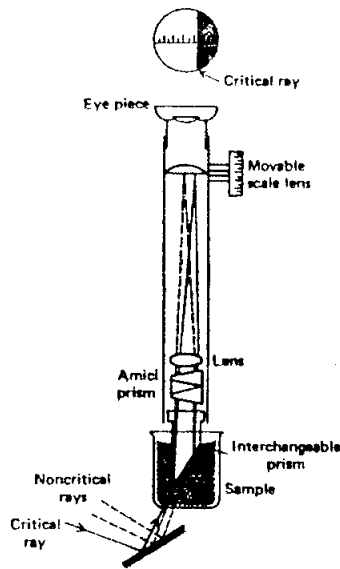




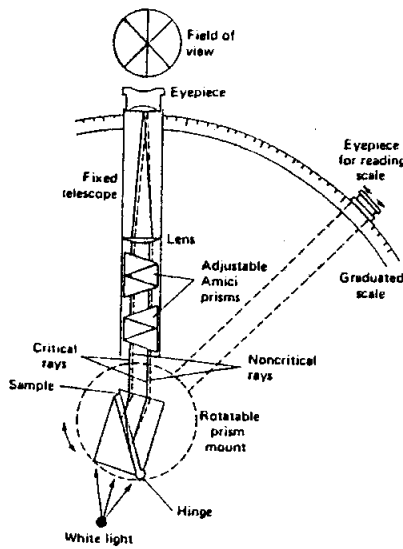
รูป 12-3 อมิชัปรีซึมทำหน้าที่ขจัดผลการกระจายรังสีจากสารตัวอย่างเมื่อใช้แหล่งกำเนิดรังสี (เส้นโซเดียม D ไม่เบี่ยงเบนเมื่อผ่านปรีซึม)

ตัวเลขที่อ่านได้จากมาตรฐานรชนีหักเหแบบจุ่มเปลี่ยนเป็นค่ามาตรฐานรชนีหักเหโดยใช้ตาราง ปรีซึมอันหนึ่งใช้หาช่วงรชนีหักเหของสารได้เพียง 0.04 ถ้าต้องการวัดค่ามาตรฐานรชนีหักเหในช่วง 1.32 และ 1.54 จะต้องเปลี่ยนใช้ปรีซึมหลายอัน เมื่อเปลี่ยนปรีซึมต้องปรับสเกลใหม่โดยใช้สารละลายมาตรฐาน หรือของแข็งที่ทราบค่ามาตรฐานรณีหักเห หรือใช้ของเหลวที่มีค่ามาตรฐานรณีหักเหมากกว่าของแข็งคลุกกับของแข็งและทำให้เป็นแผ่นฟิล์มติดกับผิวปรีซึม

มาตรฐานรชนีหักเหแบบจุ่ม ความต่อเนื่องในการวิเคราะห์หัตถิมีรีโพรติวิตีบิลิตีสูง ( $\pm 1 \times 10^{-5}$ ) ความแม่นยำมีค่าประมาณ  $\pm 4 \times 10^{-5}$  เนื่องจากการปรับสเกลให้เป็นศูนย์ และเปลี่ยนค่าที่อ่านได้เป็นค่ามาตรฐานรณีหักเหไม่ค่อยแน่นอน มาตรฐานรชนีหักเหแบบจุ่มใช้หาปริมาณของเหลวที่มีช่วงรชนีหักเหน้อย เช่นหาความเข้มข้นของของเหลวและแอลกอฮอล์ข้อเสียของอุปกรณ์แบบนี้ต้องใช้สารตัวอย่างมาก การควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก



รูป 12-4 มาตรฐานรชนีหักเหแบบจุ่ม (Dipping Refractometer)



รูป 12-5 มาตรฐานหักเห แอบบี

### มาตรฐานหักเห แอบบี (The Abbe Refractometer)

มาตรฐานหักเห แอบบี นิยมใช้มาก สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในชั้นบาง ๆ (ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) ระหว่างสองปริซึม ปริซึมบนติดอยู่กับอุปกรณ์ที่หมุนได้ดังรูป 12-5 ปริซึมล่างต่อกับปริซึมบนโดยบานพับ ปริซึมนี้ถ่างออกได้ เพื่อให้ทำความสะดวกได้สะดวกและใส่สารตัวอย่าง ผิวของปริซึมล่างขรุขระเมื่อแสงถูกสะท้อนเข้าสู่ปริซึมผิวนี้เป็นแหล่งให้รังสีจำนวนมากผ่านตัวกลางทุก ๆ มุม รังสีจะถูกหักเหที่ผิวหน้าของสารตัวอย่างและที่ผิวราบของปริซึมบน รังสีจะผ่านเข้ามาในกล้องโทรทรรศน์ (telescope) แบบตรง อมิซีปริซึมสองอันสามารถหมุนได้เทียบกับอีกอันหนึ่ง อมิซีทั้งสองทำหน้าที่รวบรวมรังสีวิกฤตที่ลู่ออกเนื่องจากแสงสีต่าง ๆ เป็นลำเดี่ยวสีขาว ซึ่งตรงกับทางเดินรังสีของเส้น D เลนส์ใกล้ตาของกล้องโทรทรรศน์เป็นแบบเส้นตัดทำหน้าที่วัดมุมของปริซึมที่ต้องเปลี่ยนไปจนส่วนสว่างและมีคระหว่างผิวหน้าเท่ากัน ตำแหน่งของปริซึมอ่านได้จากสเกลที่ตรงและแทนไว้ด้วยหน่วย  $n_D$  การควบคุมอุณหภูมิใช้น้ำไหลเวียนส่วนที่หุ้มอยู่รอบ ๆ ปริซึม มาตรฐานหักเห แอบบีวัด  $n_D$  ได้ช่วงกว้าง (1.3-1.7) ใช้สารตัวอย่างน้อย มีความแม่นยำ  $\pm 0.0002$  และมีความเที่ยง  $\pm 0.0001$  ความผิดพลาดในการวัดเกิดจากลำรังสีที่ใกล้กับมุมวิกฤตหลุดเข้าไป ทำให้ขอบเขตมืดและสว่างชัดน้อยกว่ามาตรฐานหักเห แบบจุ่ม

มาตรฐานหักเห แอบบี ที่มีความเที่ยงมาก (Precision Abbe Refractometer) ให้ผลแม่นยำกว่ามาตรฐานหักเหแบบธรรมดาถึงสามเท่า ความแม่นยำในการวัดดีขึ้นถ้าใช้

แหล่งกำเนิดรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว ปริซึมที่มีขนาดใหญ่และจัดปริซึมผูกติดกันอย่างดี รังสีเอกรงค์ทำให้เห็นขอบเขตมืดสว่างชัดเจน ส่วนปริซึมที่มีขนาดใหญ่ทำให้การหาตำแหน่ง ปริซึมถูกต้อง ตาราง 12-1 เป็นการเปรียบเทียบค่าดรรชนีหักเหที่วัดได้จากมาตรการ หักเหแอบบีกับมาตรการดรรชนีหักเหแบบอื่น ๆ

ตาราง 12-1 คุณสมบัติของมาตรการดรรชนีหักเห แอบบี

หลักการทำงาน และชนิด	การวัดค่าดรรชนีหักเห				ปริมาณของเหลวที่ใช้ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	การใช้งานวิเคราะห์
	สัมบูรณ์		ดิฟเฟอเรนเชียล			
	ช่วง	ความเที่ยง	ช่วง	ความเที่ยง		
<i>มุมวิกฤต</i>						
1. แอบบี	1.30 ถึง 1.7	$\pm 1 \times 10^{-4}$	-	-	0.05-0.10	ใช้กับงานประจำ
2. แอบบีที่เที่ยงมาก (พริซึมชั้นแอบบี)	1.30-1.70	$\pm 3 \times 10^{-5}$	-	-	0.05-0.10	งานที่ต้องการความละเอียด
3. พลัฟริช	1.30-1.60 1.30-1.84	$\pm 8 \times 10^{-4}$	0.05	$3 \times 10^{-5}$	0.5-5	การกระจาย (dispersion) และการวัดแบบดิฟเฟอเรนเชียล
4. แบบจุ่ม	1.325-1.367 1.325-1.647 (10 ปริซึม)	$\pm 3 \times 10^{-5}$	-	-	5.30	งานประจำที่ต้องการความเที่ยง
<i>การกระจัดภาพ</i>						
1. ปริซึมสเปกโตรมิเตอร์	ไม่จำกัด	$\pm 1 \times 10^{-6}$	-	-	10.25	ความเที่ยง
2. ดิฟเฟอเรนเชียล	-	-	0.0001	$\pm 3 \times 10^{-6}$	5	ตีความวัดแบบสัมบูรณ์ ความเที่ยงแบบดิฟเฟอเรนเชียล
3. พิซเซอร์	1.30-1.90	$\pm 2 \times 10^{-3}$	-	-	0.05	วิเคราะห์คุณภาพ
<i>การแทรกสอด (อินเทอร์เฟอเรนซ์)</i>						
1. อินเตอร์เฟอริมิเตอร์	ของเหลวเซลล์สั้น		0.050	$\pm 2 \times 10^{-5}$	0.10	ความเที่ยงดิฟเฟอเรนเชียล
	เซลล์ยาว	0.0006	0.0006	$\pm 2 \times 10^{-7}$	8	
	แก๊สเซลล์ยาว		0.00005	$\pm 3 \times 10^{-8}$		
2. อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (กับกล้องจุลทรรศน์)			0.002	$\pm 2 \times 10^{-6}$	1	ความเที่ยงสูง

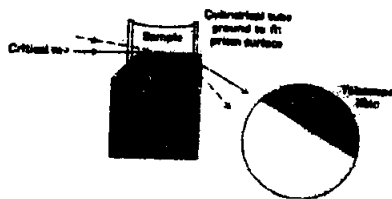
## มาตรดรรชนีหักเห พัลฟริช (Pulfrich Refractometer)

สารตัวอย่างอยู่ที่ผิวราบของปริซึมและอยู่ในแก้วรูปทรงกระบอก ดังรูป 12-6 การจัดอุปกรณ์แบบนี้จะเห็นขอบเขตมืดสว่างชัดเจน เพราะว่าพื้นที่ของปริซึมที่หักเหรังสีมีมาก มาตรดรรชนีหักเหพัลฟริชจึงดีกว่ามาตรดรรชนีหักเหแอบบี ขอบเขตมืดสว่างดูได้จากกล้องโทรทรรศน์ที่มีตัวปรับแบบหมุนได้ ดรรชนีหักเหหาได้จากตำแหน่งกล้องโทรทรรศน์ที่ต่อให้สัมพันธ์กับปริซึม มาตรดรรชนีหักเหพัลฟริชไม่ค่อยนิยมใช้เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก

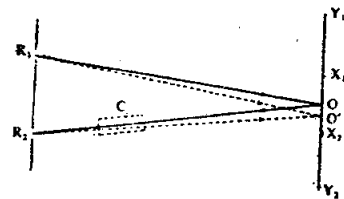
## อุปกรณ์ที่ใช้วัดดรรชนีหักเหแบบอื่น

(Other instruments for Refractive Index Measurement)

มาตรดรรชนีหักเหที่ใช้หลักการกระจัดภาพ (image displacement refractometer) วัดจากมุมตกและมุมหักเห สารตัวอย่างของเหลวอยู่ในภาชนะที่มีรูปร่างคล้ายกับปริซึม และติดตั้งไว้ตรงกลางโต๊ะโลหะกลม ตัวอย่างของแข็งตัดให้เป็นรูปปริซึม และติดตั้งไว้ตรงกลางโต๊ะโลหะกลมเช่นกัน แหล่งกำเนิดรังสี ช่องเล็กยาวและเลนส์รวมรังสีทำหน้าที่ให้ลำรังสีที่ออกจากแหล่งกำเนิดรังสีเดินทางเป็นเส้นขนานขนกับผิวปริซึม ภาพที่หักเหจากปริซึมจะออกจากช่องเล็กยาวและผ่านเข้าสู่กล้องโทรทรรศน์ที่ปรับได้ ความแม่นยำที่วัดได้ขึ้นกับความแม่นยำของมุมที่วัดได้และการควบคุมอุณหภูมิ ความไม่แน่นอนในการวัดมีค่า  $1 \times 10^{-6}$  หรือน้อยกว่านี้ อุปกรณ์นี้ไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์งานประจำอุปกรณ์นี้มีการจัดตัวคล้ายกับตัวทำแสงเอกกรงค์ปริซึมบุนเซน



รูป 12-6 การจัดตัวของปริซึมมาตรดรรชนีหักเห-พัลฟริช



รูป 12-7 หลักการของทางเดินรังสีในอินเตอร์เฟอริเตอร์

มาตรดรรชนีหักเหที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเมื่อรังสีผ่านจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง ค่าที่ได้ไม่ค่อยละเอียด การวัดค่าดรรชนีหักเหให้ละเอียดต้องใช้หลักการแทรกสอดของรังสี ลำรังสีเข้าและออกจากสารละลายที่มุม 90 องศา อินเตอร์เฟอริเตอร์แทนได้ด้วยรูป 12-7

รังสีในแนวขนานผ่านรูเล็กที่เปิดไว้สองรู  $R_1$  และ  $R_2$  ดังรูป 12-7 เนื่องจากระยะ  $R_1O$  และ  $R_2O$  มีค่าเท่ากัน รังสีทั้งสองที่มาจาก  $O$  อยู่ในเฟสเดียวกันทำให้เกิดจุดสว่างที่จุดอื่นบนฉากความยาวคลื่นของรังสีทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ที่บางจุด  $X_1$  ความยาวคลื่นของรังสีทั้งสองต่างกันครึ่งความยาวคลื่น ที่จุดนี้ทำให้เกิดจุดมืดที่สุด  $X_1$  อีกจุดหนึ่งที่อยู่ห่างไปเล็กน้อย  $Y_1$  ลำรังสีทั้งสองต่างกันหนึ่งความยาวคลื่น จึงเกิดการแทรกสอดทำให้เกิดจุดสว่างขึ้น ถ้ารังสีที่ใช้เป็นรังสีเอกรงค์จะเกิดจุดสว่างและมืดสลับกัน ถ้านำสารที่มีค่าดรรชนีหักเหมากกว่าอากาศเล็กน้อยนำไปวางอยู่ที่  $C$  ทางเดินแสงของลำรังสี  $R_2O$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $\Delta b$  เพราะว่าความเร็วของรังสีผ่าน  $C$  ลดลง ขนาดของทางเดินแสงที่เพิ่มขึ้น ขึ้นกับความหนาและดรรชนีหักเหของสารตัวอย่าง

$$\Delta b = b(\eta - \eta_0) \quad \dots\dots(12.9)$$

$b$  ความหนาของสารตัวอย่าง  $\eta$  ดรรชนีหักเหของสารตัวอย่าง และ  $\eta_0$  ดรรชนีหักเหของตัวกลางหรืออากาศ

ลำรังสีทั้งสองที่จุด  $O$  ไม่อยู่ในเฟสเดียวกัน แต่ที่จุด  $O'$  ระยะห่าง  $R_1O'$  และ  $R_2O'$  มีค่าเท่ากัน แแถบสว่างจะเลื่อนไปเท่ากับระยะห่างนี้ ถ้ารังสีที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ระหว่าง  $O$  ระยะห่างระหว่าง  $O$  และ  $O'$  จะวัดเป็นจำนวนของริ้ว (fringe)  $N$  (แต่ละอันจะมีแถบสว่างหนึ่งอัน มีดหนึ่งอัน)

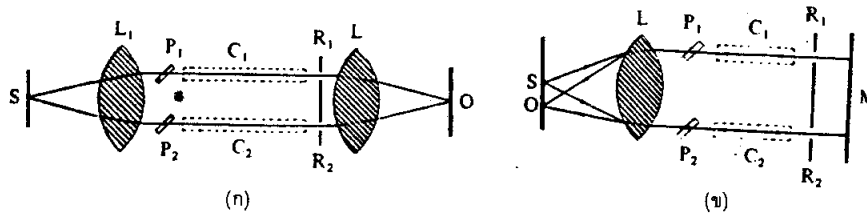
$$N = \Delta b / \lambda \quad \dots\dots(12.10)$$

$$N = b(\eta - \eta_0) / \lambda \quad \dots\dots(12.11)$$

ถ้า  $N$  มีค่ามากกว่า 1 เราไม่สามารถทราบว่ามีจำนวนแถบมืดและสว่างมากเท่าใด เนื่องจากแถบทั้งหมดเหมือนกัน ปัญหานี้แก้โดยใช้รังสีสีขาวแทนรังสีเอกรงค์ แถบตรงกลางจะขาวบริสุทธิ์ แถบถัดไปทั้งสองข้างจากแถบตรงกลาง (อันดับแรก) จะมีแถบสีน้ำเงินด้านหนึ่งและปลายสุดมีแถบสีแดง แถบสีต่าง ๆ เกิดจากแสงสีขาวประกอบด้วยความยาวคลื่นต่าง ๆ แถบถัดไปจากแถบตรงกลางจะเห็นสีที่ต่างกันเพิ่มขึ้น หลังจากแถบที่ 6 หรือ 7 แถบเหล่านี้จะมีสีขาวเนื่องจากการแพร่มาจนรวมกันเป็นแสงสีขาว ดังนั้น ถ้ามีสาร  $C$  ขวางทางเดินรังสีด้านใดด้านหนึ่ง แถบที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปจากแถบตรงกลางอันเดิม แถบที่เลื่อนไปหาได้จาก  $b(\eta - \eta_0)$  เทอมต่าง ๆ เหล่านี้ หาได้จากข้อมูลของเทอมอื่น ๆ ถ้าวางแผ่นที่มีความหนาเท่ากันสองแผ่นขวางทางเดินรังสีทั้งสอง จำนวนแถบที่เลื่อนไปจากแถบตรงกลาง หาได้จากการคำนวณค่าดรรชนีหักเหของแผ่นใดแผ่นหนึ่ง

**อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Interferometer)** ไม่ใช่วัดค่าดรรชนีหักเห แต่ใช้เปรียบเทียบและหาค่าความเข้มข้นของสารละลายและแก๊ส อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มีอุปกรณ์ดังรูป 12-8 (ก) ทางเดินแสงของลำรังสีทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดยจัดให้แผ่นแก้วในทางเดินแสงของแต่ละลำรังสี  $P_1$  และ  $P_2$  ทำมุมประมาณ 45 องศากับลำรังสี แผ่นแก้วอันหนึ่งปรับไม่ได้ อีกแผ่นหนึ่งปรับได้จึงเพิ่มหรือลดความหนาได้ ตำแหน่งที่เลื่อนไปวัดได้จากไมโครมิเตอร์ การปรับนี้เพื่อให้แถบออร์ค (achromatic) ของลำรังสีทั้งสองได้สมนัยกัน หรือทางเดินแสงของสองลำรังสีมีค่าเท่ากัน การปรับอาจปรับให้แถบหนึ่งมีค่าเป็น  $1/20$  ของอีกแถบหนึ่ง (อ่านค่าจากสเกลไมโครมิเตอร์) อุปกรณ์นี้ใช้วัดองค์ประกอบของแก๊สที่เปลี่ยนไป (ไม่เหมือนกัน) วิธีนี้วัดปริมาณ  $CO_2$  และ  $CH_4$  ในอากาศได้ต่ำถึง 0.02

อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์อีกแบบหนึ่งมีอุปกรณ์ดังรูป 12-8 (ข) รังสีถูกสะท้อนโดยกระจกเงา M เพื่อให้รังสีผ่านช่องใส่สารมากขึ้น (อาจได้แสงมากถึงสองเท่า) แล้ววัดแถบแสงด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดรังสี อุปกรณ์นี้จึงกะทัดรัด



รูป 12-8 ทางเดินแสงของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

(ก) แบบขยาย (extended version)

(ข) แบบทางเดินแสงสั้น (folded type)

### การประยุกต์การใช้มาตรดรรชนีหักเห (Application of Refractometry)

มาตรดรรชนีหักเหใช้หาคุณภาพและปริมาณ อุปกรณ์นี้ต้องปรับเครื่องเป็นประจำ การปรับเครื่องใช้ของเหลวบริสุทธิ์ เช่น น้ำ  $n_D^{20}$  1.330 โทลูอีน  $n_D^{20}$  1.4969 และเมทิลไซโคลเฮกเซน  $n_D^{20} = 1.4231$  สารประกอบสองตัวหลังหาได้จากเนชันแนลบูเรียสแตนดาร์ด ซึ่งค่าทศนิยมยอมรับได้ห้าตำแหน่ง ที่ 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียส แผ่นแก้วทดสอบใช้เป็นสารอ้างอิงกับมาตรดรรชนีหักเห การอ่านสเกลผลต่างระหว่างค่าดรรชนีหักเหของสารมาตรฐานและอุปกรณ์ต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์แก้ไข การปรับค่าดรรชนีหักเหของสารมาตรฐานที่อ่านจากกล้องโทรทรรศน์ให้มีค่าแม่นยำ ปรับได้โดยใช้มือ

**คุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis)** ข้อมูลที่หาได้จากการกระจายและค่าดรรชนีหักเหเมื่อใช้ร่วมกับข้อมูลอื่น ๆ เช่น ใช้ในการชี้ว่าสารประกอบบริสุทธิ์หรือไม่ ข้อมูลที่ได้จากมาตรดรรชนีหักเหไม่จำเพาะ จึงต้องใช้ข้อมูลนี้ร่วมกับจุดหลอมเหลวและจุดเดือด การวิเคราะห์ธาตุทางสเปกโทรค่าดรรชนีหักเหและค่าการกระจายไม่ไวต่อความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่างข้อมูลที่ได้บางครั้งก็เชื่อไม่ได้ การทำคุณภาพวิเคราะห์จึงต้องระวังเรื่องความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่างและการใช้ค่ามุมวิกฤตที่ได้จากหนังสืออ้างอิง ข้อมูลที่ได้จากมาตรดรรชนีหักเหแบบบี ใช้บอกว่าสารประกอบที่กำลังศึกษามีหมู่ฟังก์ชันที่สนใจหรือไม่

**ปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis)** ค่าดรรชนีหักเหวัดได้ง่ายและมีความเชื่อมั่นด้วย ค่านี้ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวหรือแก๊สสองชนิดที่ผสมกันได้รวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีหักเหและความเข้มข้นเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นสั้น ๆ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เป็นกรัมต่อ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ของผสมพวกของเหลวอินทรีย์ ความสัมพันธ์นี้เป็นเส้นตรงเมื่อใช้ปริมาตรเป็นร้อยละ ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงก็วิเคราะห์ปริมาณได้

มาตรดรรชนีหักเหนิยมใช้หาความเข้มข้นของสารละลาย ปกติน้ำตาลชนิดต่าง ๆ มีผลต่อดรรชนีหักเหของสารละลายพอ ๆ กัน วิธีนี้จึงใช้หาความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด หาปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในยางที่ยังไม่ได้อบและปริมาณสไตรีนที่อยู่ในยางสังเคราะห์ มาตรดรรชนีหักเหยังใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบว่าอุปกรณ์ที่ใช้หลักการแยก เช่น การกลั่น การสกัด การแพร่และแอบซอร์ปชันโครมาโตกราฟีทำงานดีหรือไม่ เช่น จำนวนแผ่นทางทฤษฎี (theoretical plate) ที่ใช้ในคอลัมน์ที่กลั่นหาได้จากการวัดค่าดรรชนีหักเหของสารที่แยกออกมาจากของผสมสองชนิด เช่น เฮกเซน จุดเดือด 98.4 องศาเซลเซียส และเมทิลไซโคลเฮกเซน จุดเดือด 100.9 องศาเซลเซียส

การหักเหจำเพาะและการหักเหเป็นโมลาร์ใช้ในการทำปริมาณวิเคราะห์ เช่น การหักเหจำเพาะของแก้วซิลิเกตแปรโดยตรงกับโมลเปอร์เซ็นต์ของ  $\text{SiO}_2$  ในช่วงร้อยละ 50-90 ดังนั้น การหาปริมาณ Si ในแก้ว จึงหาได้จากการวัดค่าดรรชนีหักเหและความหนาแน่น การหักเหจำเพาะยังใช้หาน้ำมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวในพืช และกำลังของการเติมฟลูออรีนในน้ำมันพาราฟิน การหักเหเป็นโมลาร์ใช้ในทางอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เช่น หากร้อยละของคาร์บอนที่อยู่ในโครงสร้างสารอินทรีย์และในของผสมไฮโดรคาร์บอน ค่าการหักเหของสารเป็นโมลาร์เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนอะตอมในสารประกอบกลุ่มเดียวกันเพิ่มขึ้น ค่าการหักเหเป็นโมลาร์ของอะตอมเพิ่มขึ้นภายในช่วงที่จำกัด

## แบบฝึกหัด

12-1 สำหรับสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวต่อไปนี้ จงคำนวณการหักเหจำเพาะและโมลาร์  
 สารประกอบ  $n_D^{20}$  ความหนาแน่น 20 องศาเซลเซียส  
 (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

(ก) เอทิลแอซีเตต	1.3701	0.901
(ข) เมทิลไทลีน	1.4998	0.8642
(ค) ไนโตรเบนซีน	1.5524	1.21

12-2 จากข้อมูลของผสมทวิภาคชุดหนึ่ง ระหว่างเบนซีนและไซโคลเฮกเซน ที่ 20  
 องศาเซลเซียส

เบนซีน เฟอร์เซนต์โดยน้ำหนัก	$n_D$
10.86	1.38490
36.48	1.41071
55.98	1.43396
70.41	1.45334
82.83	1.47115

(ก) พล็อตเคอร์ฟจากข้อมูล

(ข) จงหาสมการเส้นตรงจากข้อมูล

(ค) จงคำนวณเฟอร์เซนต์โดยน้ำหนักของเบนซีนในของผสมที่มีค่าดรรชนีหักเห

1.43216

(ง) ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าดรรชนีหักเห ของผสมเบนซีนต่อไซโคลเฮกเซน  
 มีค่า 1.4637 จงหาเฟอร์เซนต์โดยน้ำหนักของเบนซีน

12-3 ของผสมทวิภาคมีสมบัติอุดมคติ (ideal) ดรรชนีหักเหแปรเป็นแบบเส้นตรงกับ  
 เฟอร์เซนต์ปริมาตร เมทิลไทลีนและเพนเทนมีสมบัติดังที่กล่าวนี้ เมทิลไทลีน  $n_D^{20} = 1.4998$   
 น้ำหนักโมเลกุล 120.20 ความหนาแน่น 0.8642 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่ 20 องศา  
 เซลเซียส) เพนเทน  $n_D^{20} = 1.3579$  น้ำหนักโมเลกุล 72.15 ความหนาแน่น 0.6262 กรัมต่อลูกบาศก์  
 เซนติเมตรจงหาโมลาริตีของเพนเทนในของผสมเพนเทนและเมทิลไทลีนที่มีค่าดรรชนีหักเห  
 (ก) 1.3962 (ข) 1.4666



12-4 ของเหลวผสมทวิภาคเป็นสารละลายที่ไม่มีสมบัติอุดมคติ ค่าดรรชนีหักเหของสารละลายนี้กับองค์ประกอบของสารละลายเป็นฟังก์ชันซับซ้อน ฟังก์ชันที่ง่ายที่สุดเป็นสารละลายแอซีโตน/คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ค่าดรรชนีหักเหมีค่า  $n_D^{20} = ac + b c$  แทนความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของแอซีโตน  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ สำหรับแอซีโตน  $n_D^{20} = 1.3588$  น้ำหนักโมเลกุล 58.08 ความหนาแน่น 0.7908 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่ 20 องศาเซลเซียส) สำหรับคาร์บอนเตตระคลอไรด์  $n_D^{20} = 1.4664$  น้ำหนักโมเลกุล 153.82 ความหนาแน่น 1.5942 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จงคำนวณดรรชนีหักเหของแอซีโตนเข้มข้น 300 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตรในคาร์บอนเตตระคลอไรด์

12-5 ถ้าใช้การประมาณอย่างดี การหักเหเป็นโมลาร์ของสารประกอบหนึ่งเป็นผลรวมของการหักเหของแต่ละอะตอมในสารประกอบ ตารางการหักเหของอะตอมต่าง ๆ หาได้จากหนังสืออ้างอิง หนังสือคู่มือเคมีและฟิสิกส์ เช่น คาร์บอนมีค่าการหักเห 2.591 ไฮโดรเจน 1.028 ออกซิเจน (พันธะสอง) 2.122 และคลอรีน 5.844

(ก) จงคำนวณการหักเหเป็นโมลาร์ของแอซีโตนจากข้อมูลในโจทย์ข้อ 4 เปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากสองวิธี

(ข) จงคำนวณการหักเหเป็นโมลาร์ของ  $\text{CCl}_4$  จากค่าการหักเหของอะตอม

(ค) ใช้  $n_D^{20} = 1.4664$  และน้ำหนักโมเลกุล 153.82 คำนวณความหนาแน่น  $\text{CCl}_4$  เปรียบเทียบผลที่คำนวณได้