

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7 แม่โครโมเลกุล

### เนื้อหาประจำบท

1. ชนิดของมวลโมเลกุล
2. วิธีการหาขนาด รูปร่างและมวลโมเลกุลของแม่โครโมเลกุล
3. การนอนกัน
4. ความหนืด
5. การเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้า
6. การกระเจิงแสง

### วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อศึกษาจบบทนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายและทำความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดของมวลโมเลกุลของแม่โครโมเลกุลได้
2. อธิบาย จำแนกและคำนวณหาวิธีการหาขนาด รูปร่างและมวลโมเลกุลของแม่โครโมเลกุลได้
3. สามารถนำเทคนิคของการนอนกันมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้
4. มีความรู้ความเข้าใจ และนำคุณสมบัติความหนืดมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆในชีวิตประจำวันได้
5. อธิบายหลักการเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้าของแม่โครโมเลกุลได้
6. อธิบายและทำความเข้าใจการกระเจิงแสงของอนุภาคแม่โครโมเลกุลได้

### วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. ให้นักศึกษาเลือกประเด็นที่สนใจ แล้วศึกษารายละเอียดจากเอกสารประกอบการสอน และค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อนำมาอภิปราย และสรุปในเวลาที่กำหนด
2. ให้นักศึกษาร่วมอภิปรายในประเด็นที่ผู้สอนสมมติเรื่องแม่โครโมเลกุลในชีวิตประจำวัน
3. ให้ทำกิจกรรมจากประเด็นที่เลือกเรื่องแม่โครโมเลกุลในชีวิตประจำวัน โดยมีอาจารย์มี

การติดตามกิจกรรม

4. ให้นักศึกษาอธิบายประเด็นที่เลือกเรื่องแม่โครโมเลกุลในชีวิตประจำวัน
5. อาจารย์บรรยายสรุปประเด็นเพิ่มเติม

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน วิชาเคมีเชิงฟิสิกส์ 2
2. สื่อเพาเวอร์พอยต์ สำหรับเนื้อหาประจำบท
3. สื่อวีดิทัศน์เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับบทเรียน
4. แบบทดสอบ

5. ตำราและเอกสารอ่านประกอบ
6. ข้อสอบ

#### **การวัดผลและการประเมินผล**

1. สังเกตจากการอภิปรายของนักศึกษา และการมีส่วนร่วมในการเสนอความเห็นในระหว่างการเรียนรู้
2. สังเกตจากความถูกต้องในการตอบปัญหาในระหว่างเรียน
3. สังเกตจากความถูกต้องของกิจกรรมประจำบท
4. ตรวจสอบความถูกต้องจากการทำแบบฝึกหัดประจำบท
5. โดยการทดสอบย่อย

## บทที่ 7 แมโครโมเลกุล (Macromolecules)

แมโครโมเลกุล (macromolecule) เป็นสารเคมีที่มีมวลโมเลกุลสูงในช่วงตั้งแต่  $10^3$  ถึง  $10^9$  หรือ  $10^9$   $\text{gmol}^{-1}$  มักเรียกแมโครโมเลกุลว่า พอลิเมอร์ (polymer) แมโครโมเลกุลมีความแตกต่างจากโมเลกุลปกติที่มีขนาดเล็กจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษในการศึกษาโมเลกุลขนาดใหญ่ แมโครโมเลกุลมีอยู่ทุกหนแห่งทั้งภายนอกและภายในร่างกายของเรา แบ่งได้เป็น 2 พวกคือ

**แมโครโมเลกุลธรรมชาติ** (natural macromolecules) ได้แก่ โปรตีน กรดนิวคลีอิก พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เช่น เซลลูโลสและโพลีไอโซพรีน (ยาง)

**แมโครโมเลกุลสังเคราะห์** (Synthetic macromolecules) ได้แก่ พอลิเมอร์อินทรีย์ เช่น polyhexamethylene adenamide (ไนลอน) polyethylene terephthalate (Dacron), Mylar) และ polymethacrylate (Lucite, Plexiglas) ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาลักษณะของแมโครโมเลกุล

### 7.1 ชนิดของมวลโมเลกุล

#### (Type of molecular weights)

ระบบของสารที่มีโครงสร้าง และมวลโมเลกุลที่แน่นอน เรียกว่า monodisperse เช่น สารละลายของน้ำตาลซูโครส ระบบสารชนิดเดียวกันมีขนาดรูปร่างและมวลโมเลกุล ต่างกันเรียกว่า polydisperse เช่น พอลิเมอร์ โปรตีนบางชนิด DNA ยาง polystyrene และสารพอลิเมอร์อื่นๆ มวลโมเลกุลของสารพวกนี้จึงต้องระบุเป็นค่าเฉลี่ย ( $\bar{M}$ )

มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถนิยามได้หลายแบบ การนิยามสองแบบที่นิยมใช้คือ

**มวลโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน** (number-average molar mass) พอลิเมอร์ที่มี N โมเลกุล ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $M_1$  จำนวน  $n_1$  โมเลกุล โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $M_2$  จำนวน  $n_2$  โมเลกุล และต่อไปเรื่อยๆ

มวลโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนมีนิยามดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{M}_n &= \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} = \frac{\sum_i n_i M_i}{\sum_i n_i} \\ &= \frac{\sum_i n_i M_i}{N}\end{aligned}\tag{7.1}$$

เมื่อ  $\sum_i n_i = N$  ดังนั้น  $\bar{M}_n$  เป็นมัธยฐานเลขคณิต (arithmetic mean) ของมวลโมเลกุลทั้งหมดของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง

มวลโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนัก (weight-average molar mass) มีนิยามดังนี้

$$\bar{M}_w = \frac{n_1 M_1^2 + n_2 M_2^2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} = \frac{\sum_i n_i M_i^2}{\sum_i n_i M_i} \quad (7.2)$$

สำหรับระบบ polydisperse:  $\bar{M}_w > \bar{M}_n$

สำหรับระบบ monodisperse:  $\bar{M}_n = \bar{M}_w$

ดังนั้นการหามวลโมเลกุลจากนิยามทั้งสองนี้ เป็นการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวของระบบ

**ตัวอย่างที่ 7.1** โพรตีนชนิดหนึ่งประกอบด้วย 30% ของโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 20000 40% ของโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60000 จงหาค่า  $\bar{M}_n$  และ  $\bar{M}_w$  ของโปรตีนนี้

**วิธีทำ**

$$\begin{aligned} \bar{M}_n &= (0.3 \times 20,000) + (0.4 \times 30,000) + (0.3 \times 60,000) \\ &= 36,000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_w &= \frac{(30)(20,000)^2 + (40)(30,000)^2 + (30)(60,000)^2}{(30)(20,000) + (40)(30,000) + (30)(60,000)} \\ &= 43,300 \end{aligned}$$

## 7.2 วิธีหาขนาด รูปร่างและมวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุล

(Method of determining the size, shape and molar mass of macromolecule)

วิธีการหาขนาด รูปร่างและมวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุลแบ่งได้เป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การใช้คุณสมบัติการส่งผ่าน วิธีเชิงแสงและการใช้คุณสมบัติคอลลิเกทิฟ ขนาดของโมเลกุลสามารถหาได้จากการทดลองวัดอัตราการเคลื่อนที่ เรียกว่าคุณสมบัติการส่งผ่าน (transport properties) ถ้าการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในสารละลายของน้ำ (aqueous solution) จะเรียกว่าคุณสมบัติอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic properties) คุณสมบัติของการส่งผ่านที่สำคัญได้แก่ การแพร่ (diffusion) ความหนืด (viscosity) และการนอนก้น (sedimentation) การวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสามารถใช้หาขนาดและรูปร่างของแมโครโมเลกุลได้

วิธีเชิงแสงที่ใช้ศึกษา ขนาดและมวลโมเลกุล ของแมโครโมเลกุลจะใช้เทคนิคของ การกระเจิงแสง (light scattering) เนื่องจากแมโครโมเลกุลมีขนาดใหญ่จึงเกิดการกระเจิงแสงได้มาก นิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์สังเคราะห์

สมบัติคอลลิเกทิฟเป็นสมบัติที่ขึ้นกับจำนวนโมเลกุล และสมบัติกายภาพของตัวถูกละลาย แต่ไม่ขึ้นกับสมบัติทางเคมี และชนิดของตัวถูกละลาย ได้แก่ การลดความดันไอในการเพิ่มจุดเดือด การลดจุดเยือกแข็งและความดันออสโมติก การใช้คุณสมบัติคอลลิเกทิฟในการหามวลโมเลกุลในกรณีที่แมโครโมเลกุลมีมวลโมเลกุลสูง ๆ ในอันดับของ  $10^6$  ขึ้นไปจะให้ค่าไม่ถูกต้อง จึงต้องใช้วิธีอื่นแทน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคอลลิเกทิฟกับมวลโมเลกุล โดยใช้อุณหพลศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาลักษณะของแมโครโมเลกุล ดังนี้

- การนอนก้น (Sedimentation)
- ความหนืด (viscosity)
- การเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้า (electrophoresis)
- การกระเจิงแสง (light Scattering)

### 7.3 การนอนก้น

#### (Sedimentation)

**การนอนก้น** คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล โดยอำนาจของแรงเหวี่ยง (centrifugal force) ในทางปฏิบัติการนอนก้นมีประโยชน์ในการแยกโมเลกุลให้บริสุทธิ์ โดยโมเลกุลที่มีลักษณะ และน้ำหนักต่างกันจะมีความเร็วของการเคลื่อนที่ต่างกันและเมื่อ นำเอาสารละลายที่มีโมเลกุลเหล่านี้ผสมกันอยู่มาปั่น โมเลกุลเหล่านี้ก็จะแยกออกจากกันเป็นชั้นๆ นอกจากนี้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการนอนก้นยังนำมาหามวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุลได้

#### การหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง (Ultracentrifuge)

การหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง เป็นการหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็วสูงถึงประมาณ 70,000 รอบต่อนาทีให้แรงเหวี่ยงกว่าแสนเท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก

#### ความเร็วในการนอนก้น (Sedimentation velocity)

อนุภาคที่แขวนลอยในสารละลายถูกทำให้นอนก้นโดยแรงโน้มถ่วง แต่ถูกขัดขวางด้วยการลอยตัวของอนุภาคเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นแรงอ่อนสารละลายที่มีแมโครโมเลกุล จึงไม่นอนก้น แต่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระด้วยความร้อนและเป็นเนื้อเดียว อัตราการนอนก้นของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามมวลของอนุภาคและความแรงโน้มถ่วง

พิจารณาสารละลายที่ถูกหมุนในหลอดหมุนเหวี่ยง แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาคของตัวถูกละลายที่มีมวลเท่ากับ  $m$  มีค่าเท่ากับ  $m\omega^2 r$  เมื่อ  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนในหน่วย

เรเดียนต่อวินาที  $r$  คือระยะทางจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงอนุภาค  $\omega^2 r$  คือความเร่งหนีศูนย์กลางของตัวหมุน

นอกจากแรงหนีศูนย์กลางแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงการลอยตัวของอนุภาค อันเนื่องมาจากการที่อนุภาคไปแทนที่โมเลกุลของตัวทำละลาย แรงลอยตัวทางทำให้แรงเหวี่ยงลดน้อยลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\omega^2 r$  คูณกับมวลของตัวทำละลายที่ถูกแทนที่ดังนี้ กระทำต่ออนุภาคมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}\text{แรงลัพธ์} &= \omega^2 r m - \omega^2 r m_s \\ &= \omega^2 r m - \omega^2 r v \rho\end{aligned}\quad (7.3)$$

$v$  คือปริมาตรของอนุภาค

$\rho$  (rho) คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย

ตามกฎข้อที่สองของการเคลื่อนที่ของนิวตัน แรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาคทำให้เกิดความเร่ง ความเร่งเริ่มต้นใช้เวลาสั้นมากอยู่ในอันดับขนาด  $10^{-9}$  s หลังจากนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่คงที่ เนื่องจากมีแรงเสียดทานของตัวกลางกระทำต่ออนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วในการนอนก้น (sedimentation velocity),  $dr/dt$

แรงเสียดทาน = สัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน ( $f$ )  $\times$  ความเร็วของการนอนก้น

แรงเสียดทานมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงลัพธ์ แรงลัพธ์ที่สถานะคงตัวแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$f \frac{dr}{dt} = \omega^2 r m - \omega^2 r v \rho \quad (7.4)$$

การหาปริมาตรของอนุภาคทำได้ยาก จึงใช้พจน์ใหม่ที่ เรียกว่าปริมาตรจำเพาะส่วน (partial specific volume),  $\bar{v}$  หมายถึงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเมื่อตัวถูกละลายที่แห้งหนักเท่ากับ 1 g ละลายในตัวทำละลายที่มีปริมาตรมากๆ เขียนสมการ (7.4) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}f \frac{dr}{dt} &= \omega^2 r m - \omega^2 r \bar{v} \rho \\ &= \omega^2 r m (1 - \bar{v} \rho)\end{aligned}\quad (7.5)$$

จัดสมการ (7.5) ใหม่

$$\begin{aligned}S &= \frac{dr/dt}{\omega^2 r} = \frac{m(1 - \bar{v} \rho)}{f} \\ &= \frac{M (1 - \bar{v} \rho)}{N_A f}\end{aligned}\quad (7.6)$$

$M$  คือมวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย

$N_A$  คือค่าอาโวกาโดร

พจน์  $\frac{dr}{dt}$  หรือ  $s$  เรียกว่าสัมประสิทธิ์การนอนก้น (sedimentation coefficient) มีหน่วยเป็น Svedberg (Sv) ( $1 \text{ Sv} = 10^{-13} \text{ s}$ ) สำหรับโมเลกุลทรงกลมมีค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานตามกฎของสโตกส์ (Stokes law) ดังนี้

$$f = 6\pi\eta r_s \quad (7.7)$$

$r_s$  คือรัศมีของโมเลกุลของตัวถูกละลาย  
แทนค่า  $f$  ลงในสมการ (7.6) แล้วจัดสมการใหม่ให้  $M$  อยู่ทางซ้ายมือดังนี้

$$M = \frac{sN_A f}{(1 - \bar{v}\rho)} = \frac{sN_A 6\pi\eta r_s}{1 - \bar{v}\rho} \quad (7.8)$$

แรงเสียดทานที่เกิดจากตัวกลางของตัวทำละลาย มีผลต่อการแพร่ของโมเลกุลของตัวละลาย ไอออนสไตน์ได้แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$f = \frac{K_B T}{D} \quad (7.9)$$

$D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในตัวกลาง มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

$K_B$  คือค่าที่โบลต์ซมันต์

แทนค่า  $f$  จากสมการ (7.9) ลงในสมการ (7.6) และจัดสมการเพื่อหาค่า  $M$  ดังนี้

$$M = \frac{sN_A K_B T}{D(1 - \bar{v}\rho)} = \frac{sRT}{D(1 - \bar{v}\rho)} \quad (7.10)$$

$$R = N_A \times K_B$$

ค่า  $D$  และ  $\bar{v}$  สามารถทดลองหาค่าได้ ดังนั้นจึงต้องหาค่า  $s$  เพื่อหาค่ามวลโมเลกุลจากนิยามของ  $s$

$$S = \frac{dr}{dt} \\ Sdt = \frac{1}{\omega^2} \frac{dr}{r}$$

อินทิเกรตระยะทางทั้งหมดที่อนุภาคเคลื่อนที่จาก  $r = r_0 (t = 0)$  จนถึง  $r = r (t = t)$

$$\int_0^1 sdt = \frac{1}{\omega^2} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} \\ = \frac{1}{t\omega^2} \ln \frac{r}{r_0} = \quad (7.11)$$

เราสามารถหาระยะทางที่โมเลกุลเคลื่อนที่ที่เวลาใด ๆ จากการวัดค่าดัชนีหักเห และต้องทราบค่าความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) เมื่อทราบค่า  $s$  ก็สามารถหามวลโมเลกุลของสารได้จากสมการ (7.10) เรียกวิธีนี้ว่าความเร็วในการนอนก้น ซึ่งนอกจากจะใช้คุณสมบัติของสาร เช่นมวลโมเลกุลแล้ว ยังมี

ประโยชน์สำคัญในการตรวจความบริสุทธิ์ของสารในสารละลายที่มีสารโมเลกุลใหญ่อยู่มากกว่าหนึ่งอย่าง หากคุณสมบัติทางการนอนกันแตกต่างกัน ส่วนประกอบแต่ละตัวจะวิ่งจากศูนย์กลางของการเหวี่ยงด้วยความเร็วต่างกัน

### สมดุลของการนอนกันและการแพร่

(Sedimentation equilibrium and diffusion)

ในการทดลองเกี่ยวกับการนอนกันด้วยความเร็ว จะทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้นเนื่องจากเมื่อความเร็วของตัวหมุนมีมากพอทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายไปรวมกันที่กันหลอดที่ใช้หมุนเหวี่ยง แต่ถ้าลดความเร็วของตัวหมุนจาก 60,000 rpm (รอบต่อนาที) เหลือเพียง 10,000 rpm จะทำให้เกิดสมดุลระหว่างการนอนกันและการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลาย สำหรับการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ ขณะที่การนอนกันเกิดแบบผันกลับกับการแพร่ เมื่อถึงจุดสมดุลจะไม่มีการไหลเกิดขึ้น

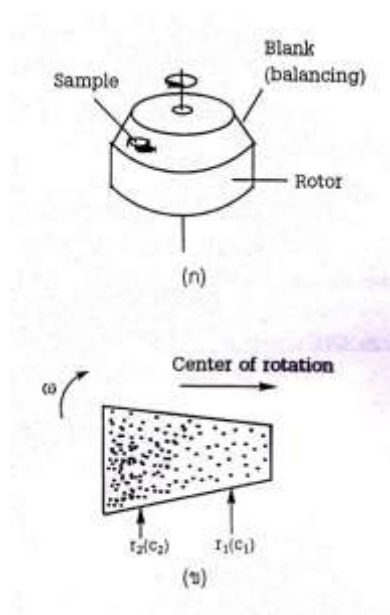
จากกฎของที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law) กล่าวว่าปริมาณของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่แพร่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยต่อเวลาจะแปรผันโดยตรงกับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = D \frac{dc}{dr} \quad (7.12)$$

เกรเดียนต์ของความเข้มข้นมีค่าเป็นบวก เนื่องจากความเข้มข้น ( $c$ ) มีค่ามีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.1 เมื่อระยะทาง ( $r$ ) ที่อนุภาคเคลื่อนที่มากขึ้น แทนค่า  $D$  จากสมการ (7.9) ลงในสมการ (7.12) จะได้อัตราการแพร่ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{kT}{f} \frac{dc}{dr} = \frac{RT}{fN_A} \frac{dc}{dr} \quad (7.13)$$





รูปที่ 7.1 (ก) Ultracentrifuge head ด้านหนึ่งใส่สารตัวอย่าง ส่วนด้านตรงข้ามอาจใส่น้ำเพื่อรักษาสมดุลในการหมุนเหวี่ยง

(ข) การหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ, 2549: 290

จากสมการ (7.5) อัตราการนอนกันสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากับ  $c$  มีค่าดังนี้

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\omega^2 r m}{f} = (1 - \bar{v}\rho)$$

หรือ

$$c \frac{dr}{dt} = c \frac{\omega^2 r m}{f} = (1 - \bar{v}\rho)$$

ที่สภาวะสมดุล: อัตราการแพร่ = อัตราการนอนกัน

$$\frac{RT}{fN_A} \frac{dc}{dr} = c \frac{dr}{dt}$$

หรือ

$$\frac{RT}{N_A} \frac{dc}{dr} = c \omega^2 r m (1 - \bar{v}\rho)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$\frac{dc}{c} = \frac{\omega^2 r m (1 - \bar{v}\rho)}{RT} dr \quad (7.14)$$

$$M = mN_A$$

อินทิเกรตสมการ (7.14) ตั้งแต่  $r = r_1$ ,  $c = c_1$  จนถึง  $r = r_2$ ,  $c = c_2$  ดังนี้

$$\int_{c_1}^{c_2} \frac{dc}{c} = \frac{M\omega^2 r m (1 - \bar{v}\rho)}{RT} \int_{r_1}^{r_2} r dr$$

$$\ln \frac{c_2}{c_1} = \frac{M(1 - \bar{v}\rho)\omega^2}{2RT} (r_2^2 - r_1^2) \quad (7.15)$$

เราสามารถ应用技术ทางแสง ในการหาความเข้มข้นของตัวถูกละลาย  $c_1$  และ  $c_2$  ที่ระยะทาง  $r_1$  และ  $r_2$  เมื่อทราบค่า  $\bar{v}$ ,  $\rho$  และ  $\omega$  เราก็สามารถหาค่า  $M$  ได้

ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่จำเป็นต้องทราบรูปร่างของโมเลกุล หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ ) เหมือนกับวิธีการนอนกันด้วยความเร็วและเป็นวิธีที่หาค่ามวลโมเลกุลได้แม่นยำวิธีหนึ่ง

**ตัวอย่างที่ 7.2** จงคำนวณมวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุล จากข้อมูลสมดุของการนอนกัน

ความเร็วของการหมุน	1500 รอบต่อนาที
อุณหภูมิ	12.4 °C
ค่า $1 - \bar{v}\rho$	0.277

ที่ระยะ เท่ากับ 6.827 cm มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 3.52 หน่วย

ที่ระยะ เท่ากับ 7.093 cm มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 13.52 หน่วย

วิธีทำ

$$\omega = 2\pi\nu = 2 \times \frac{22}{7} \times \frac{15000}{60s} = 1.57 \times 10^3 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$M = \frac{2RT}{(1 - \bar{v}\rho)\omega^2} \frac{\ln c_2 / c_1}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$= \frac{2(8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1})(285.6 \text{ K}) \ln 13.52 / 3.52}{0.277(1.57 \times 10^3 \text{ s}^{-1})[(7.032 \text{ m})^2 - (6.827 \text{ cm})^2] \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^2}$$

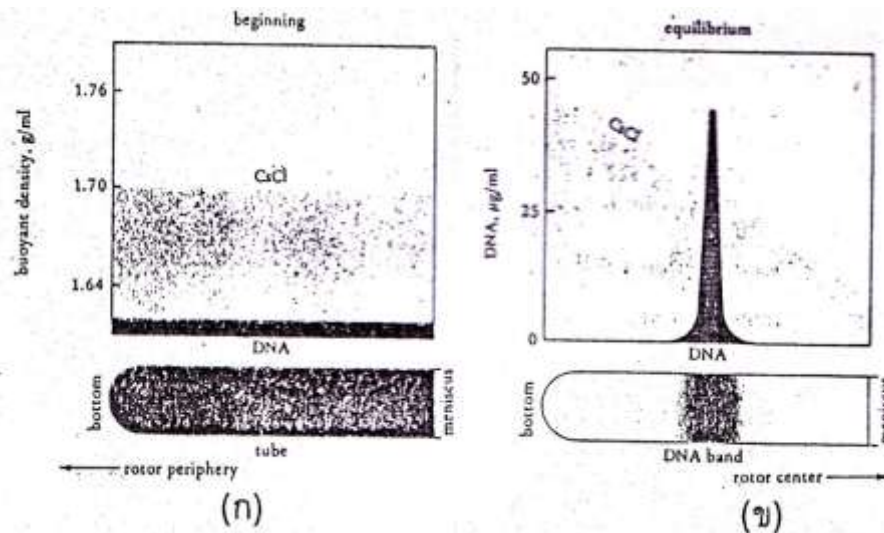
$$= 25.3 \text{ kgmol}^{-1}$$

$$= 25300 \text{ gmol}^{-1}$$

### การร่อนกันด้วยเกรเดียนต์ของความหนาแน่น

#### (Density gradient sedimentation)

เป็นเทคนิคของการเหวี่ยง ด้วยความเร็วสูงโดยใช้สมดุการร่อนกันด้วยซีเซียมคลอไรด์ (cesium chloride Sedimentation equilibrium) โดยการผสมสารแม่โครโมเลกุลกับสารละลาย CsCl เข้มข้นประมาณ 6 M แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงแบบเซลล์อยด์จนกระทั่งถึงจุดสมดุที่จุด สมดุจะเกิดเกรเดียนต์ของความหนาแน่นของ CsCl ขึ้นในหลอดที่ระยะทาง  $l$  บางค่า ความหนาแน่นของสารละลาย ( $\rho$ ) จะเท่ากับส่วนกลับของปริมาตรจำเพาะส่วน ( $\bar{V}$ ) ของแม่โครโมเลกุลนั่นคือ  $\rho = 1/\bar{V}$  เมื่อแทนค่าในสมการ (7.5) อัตราการร่อนกัน ( $dr/dt$ ) จะเท่ากับ 0 แสดงว่าแม่โครโมเลกุลไม่เคลื่อนที่แต่เกิดเป็นแถบแคบๆ ตามเกรเดียนต์ของความหนาแน่น โดยทั่วไปจะเป็นแถบแคบๆ ที่แยกกันชัดเจนของแม่โครโมเลกุลแต่ละชนิด ดังรูปที่ 7.2 บริเวณที่อยู่เหนือแถบซึ่งใกล้กับจุดศูนย์กลางการหมุนจะมีค่า  $\rho < 1/\bar{V}$  และค่าของ  $1 - \bar{V}\rho$  เป็นบวก การร่อนกันจะผลักดันให้แม่โครโมเลกุลเคลื่อนต่ำลงไป หาแถบบริเวณที่ต่ำกว่าแถบจะมีค่า  $\rho > 1/\bar{V}$  และค่า  $1 - \bar{V}\rho$  เป็นลบ ที่บริเวณนี้การลอยตัวทำให้แม่โครโมเลกุลเคลื่อนที่ขึ้นไปหาแถบ ดังนั้นเกรเดียนต์ของความหนาแน่นของ CsCl จะป้องกันไม่ให้เกิดการผสมกันของแม่โครโมเลกุลต่างชนิดกัน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือการรบกวนทางกล เทคนิคนี้สามารถใช้แยกโมเลกุลของ DNA ที่มีไอโซโทป  $^{14}\text{N}$  และ  $^{15}\text{N}$  ซึ่งวิธีการร่อนกันด้วยสมดุแบบธรรมดา ไม่สามารถจะแยกแถบของไอโซโทปทั้งสองนี้ได้ ประโยชน์ของวิธีสมดุการร่อนกันด้วยซีเซียมคลอไรด์ อีกข้อคือเมื่อถึงจุดสมดุสามารถนำหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีแถบต่างๆออกมาเจาะที่ก้นหลอด แล้วแยกแต่ละแถบใส่หลอดทดลองคนละหลอด

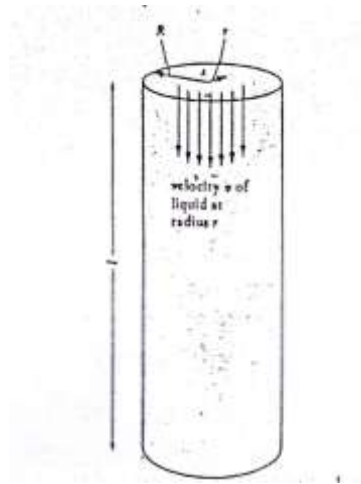


รูปที่ 7.2 การกระจายความเข้มข้นของ DNA และ CsCl ตามแนวแกนของหลอดหมุนเหวี่ยง (ก) ตอนเริ่มต้นมีการแยกชั้นของ CsCl และ DNA (ข) เมื่อสิ้นสุดการหมุนเหวี่ยงเกิดสมดุของเกรเดียนต์ของความหนาแน่นของ CsCl และ DNA

ที่มา: ดัดแปลงจาก G. M. Barrow, 1979: 780.

#### 7.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของของไหล (fluid) ใด ๆ เช่น แก๊ส ของเหลวบริสุทธิ์ หรือสารละลายเป็นเครื่องชี้ถึงความต้านทานการไหลของของไหลนั้น ในบทที่หนึ่งได้แสดงการ หาค่าความหนืดของแก๊สโดยใช้ทฤษฎีจลน์อย่างง่ายแล้ว ในที่นี้จะพิจารณาถึงความหนืด ของของเหลว ให้ของเหลวปริมาณหนึ่งไหลผ่านหลอดรูเล็ก (capillary tube) ที่มีรัศมี  $R$  ความยาว  $l$  ภายใต้ความดัน  $P$  ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 การไหลของของเหลวผ่านหลอดรูเล็กที่มีรัศมีเท่ากับ  $R$

ที่มา: ดัดแปลงจาก G, M. Barrov, 1981: 269.

การไหลของของเหลวเป็นแบบแผ่นแบน (laminar) โดยอนุภาคทั้งหมด เคลื่อนที่ขนานกับหลอด ความเร็วของของของเหลวจะเท่ากับศูนย์ที่ผนังของหลอดและจะ เพิ่มขึ้นๆจนมีค่าสูงสุดเมื่อถึงศูนย์กลางของหลอด ใหนักภาพว่าขณะนี้ มีทรงกระบอก 2 อัน ซ้อนกันอยู่ โดยมีรัศมีเป็น  $r$  และ  $r + dr$  แรงลากของเหลว ( $F$ ) เนื่องจากความเสียดทานระหว่างชั้นของทรงกระบอก

$$F \propto A \frac{dv}{dr}$$

เนื่องจากความเร็ว ( $v$ ) มีค่าลดลงขณะที่  $r$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น  $\frac{dv}{dr}$  จะมีค่าเป็นลบ แต่  $F$

เป็นปริมาณที่เป็นบวกจึงต้องใส่เครื่องหมายลบ หน้า  $\frac{dv}{dr}$  เมื่อ  $A = 2\pi rl$  ดังนั้น

$$F = -\eta(2\pi rl) \frac{dv}{dr}$$

$\eta$  อ่านว่า อีต้า (eta) เป็นค่าคงที่ตัวแปรที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความหนืด

สำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอ แรงลากของเหลว (F) เนื่องจากความเสียดทานจะต้องสมดุลกับแรงดึงลงซึ่งเป็นผลคูณของผลต่างของความดัน  $\Delta P$  กับพื้นที่  $\pi r^2$

$$\Delta P = \pi r^2 = -\eta(2\pi r l) \frac{dv}{dr}$$

$$dv = -\frac{\Delta P}{2\eta l} r dr$$

อินทิเกรตระหว่าง  $v=0$  (ที่  $r = R$ ) กับ  $v = v$  (ที่  $r = r$ )

$$\int_0^v dv = -\frac{\Delta P}{2\eta l} \int_r^R r dr$$

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (7.16)$$

ต่อไปคำนวณหาอัตราการรวมของการไหลของของเหลวผ่านหลอดรูเล็ก ที่เป็นฟังก์ชันของ  $\eta$  ปริมาตรของของเหลวที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  $2\pi r dr$  ต่อวินาที มีค่าเท่ากับ  $(2\pi r l dr)$  ปริมาตรทั้งหมดของของเหลวที่ไหลผ่านใน 1 วินาที (Q) มีค่าดังนี้

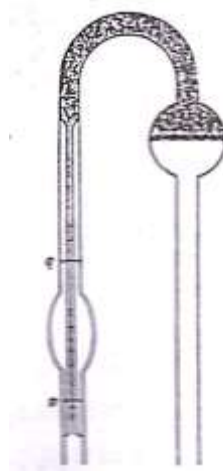
$$Q = \frac{V}{t} = \int_0^R v(2\pi r dr) \quad (7.17)$$

แทนค่า  $v$  จากสมการ (7.16) ลงในสมการ (7.17) จะได้สมการ (7.18) ดังนี้

$$\frac{V}{t} = \frac{2\pi r dr}{4\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr \quad (7.18)$$

$$\frac{V}{t} = \frac{4\pi r^4 \Delta P}{8\eta l} \quad (7.19)$$

$v$  คือปริมาตรทั้งหมดของของเหลวที่ไหลผ่านในเวลา  $t$  เรียกสมการ (7.19) ว่า Poiseuille's law เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดแบบง่ายๆคือ มาตรฐานวัดความหนืดแบบออสวอลด์ (Oswald Viscometer) โดยบันทึกเวลาที่ของเหลวปริมาตรเท่ากับ  $v$  ตั้งแต่ขีด  $a$  ถึงขีด  $b$  ในหลอดรูเล็กตามแนวยืนภายใต้แรงโน้มถ่วง ดังรูปที่ 7.4 P คือผลต่างความดันที่ปลายทั้งสองของหลอดด้วย และสมมติให้แปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นของของเหลว



รูปที่ 7.4 มาตรวัดความหนืดแบบออสวอลด์ (Oswald viscometer) โดยวัดเวลาที่ระดับของเหลวไหลผ่านขีดบนถึงขีดล่าง

ที่มา: ดัดแปลงจาก R. Chang. 1981: 74.

จัดสมการ (7.19) ใหม่ให้  $\eta$  อยู่ทางซ้ายมือดังนี้

$$\eta = \frac{4\pi r^4 \Delta P}{8vl} \quad (7.20)$$

แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะวัดค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลวจากสมการ (7.20) เนื่องจากความไม่แน่นอนของการวัดค่า (R) และความยาวของหลอดรูเล็ก (l) ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้วัดเปรียบเทียบกับของเหลวที่ทราบค่าความหนืดแล้ว เราเรียกว่าความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity)

อัตราส่วนของความหนืดของของเหลวทั้งสองมีค่าดังนี้

$$\frac{\eta_{\text{sample}}}{\eta_{\text{reference}}} = \frac{\pi R^4 (\Delta Pt)}{8vl} \times \frac{8vl}{\pi R^4 (\Delta Pt)_{\text{reference}}}$$

ค่า v, l และ R ของของเหลวที่ต้องการวัดกับของเหลวอ้างอิงมีค่าเท่ากัน ถ้าใช้มาตรวัดความหนืดอันเดียวกัน

$$\frac{\eta_{\text{sample}}}{\eta_{\text{reference}}} = \frac{(\Delta Pt)_{\text{sample}}}{(\Delta Pt)_{\text{reference}}} \quad (7.21)$$

เนื่องจาก  $\Delta P = \rho gh$  โดย h คือ ab ในรูปที่ 7.4

$$\frac{\eta_{\text{sample}}}{\eta_{\text{reference}}} = \frac{(\text{Pt})_{\text{sample}}}{(\text{Pt})_{\text{reference}}} \quad (7.22)$$

เราสามารถหา ความหนืดของของเหลวชนิดหนึ่ง ได้จาก ความหนาแน่น ของของเหลว และ เวลาในการไหลถ้าทราบค่าความหนืดของของเหลวอ้างอิง ( $\eta_{\text{ref}}$ ) ของเหลวส่วนใหญ่ มักจะมีความหนืดลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นเพราะของเหลวมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้โมเลกุลเคลื่อนเข้าไปในช่องว่างเหล่านี้ตลอดเวลา โดยวิธีนี้ของเหลวจึงมีคุณสมบัติไหลได้ แต่ในการไหลต้องใช้พลังงานซึ่งเรียกว่าพลังงานกระตุ้น (พลังงานส่วนเกินจากค่าพลังงานเฉื่อย) เพื่อเอาชนะหรือผลักดันให้โมเลกุลที่อยู่รอบๆ ช่องว่างนี้ออกไปที่อุณหภูมิสูง จะมีจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานกระตุ้นค่านี้มากขึ้น ของเหลวจึงไหลได้ง่ายขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง ๆ ของของเหลวกับอุณหภูมิดังนี้

$$\eta = Ae^{E/RT} \quad (7.23)$$

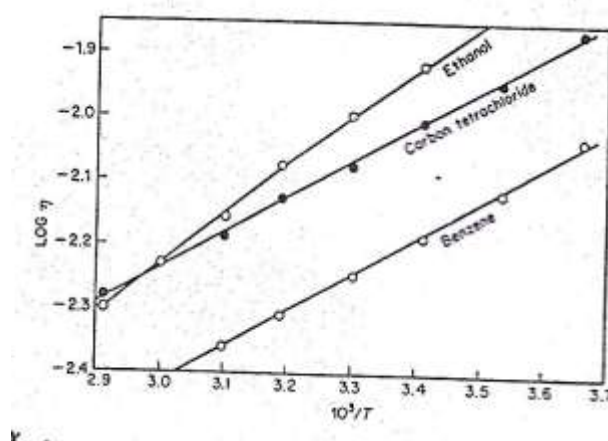
หรือ

$$\log \eta = \frac{B}{T} + C \quad (7.24)$$

A, B, E และ C เป็นค่าคงที่ของของเหลวที่กำหนดให้

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

กราฟระหว่าง  $\log \eta$  กับ  $1/T$  จะได้เป็นกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 7.5 เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สจะได้ผลตรงข้าม กล่าวคือความหนืดของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 7.5 การขึ้นกับอุณหภูมิของความหนืดแสดงเป็นกราฟของ  $\log \eta$  กับ  $1/T$

ที่มา: ดัดแปลงจาก W. J. Moore. 1983: 691.

ตารางที่ 7.1 ความหนืดของของเหลวทั่วไปที่อุณหภูมิ 293 K

ของเหลว	$\eta, P$ (dyns cm <sup>-2</sup> ) CGS units	$\eta$ (N sm <sup>-2</sup> ) SI units
อะซิโตน	0.0316 (298 K)	0.000316
เบนซีน	0.00652	0.000652
เอทานอล	0.01200	0.001200
น้ำ	0.0101	0.00101
พลาสมา	0.015 (310 K)	0.0015
เลือดทั้งหมด	0.04 (310 K)	0.004

ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ. 2549: 296.

การวัดความหนืดเป็นเทคนิคที่ง่ายและถูกที่สุดในการหาลักษณะของแมโครโมเลกุล จึงมีการศึกษาทั้งทฤษฎีและปฏิบัติเกี่ยวกับความหนืดของสารละลายแมโครโมเลกุล ซึ่งมักจะวัดในพจน์ของความหนืดสัมพัทธ์ ( $\eta_{rel}$ ) ดังนี้

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \quad (7.25)$$

$\eta$  คือความหนืดของสารละลาย

$\eta_0$  คือความหนืดของตัวทำละลายบริสุทธิ์

$t$  คือเวลาในการไหลผ่านระหว่างขีดมาตรฐานของสารละลาย

$t_0$  คือเวลาในการไหลผ่านระหว่างขีดมาตรฐานของตัวทำละลายบริสุทธิ์

เนื่องจากตัวถูกละลายหรือแมโครโมเลกุล จะไปรบกวนการไหลของของเหลวบริสุทธิ์ ทำให้ค่าของ  $\eta_{rel}$  ของสารละลายแมโครโมเลกุลมีค่ามากกว่า 1 จึงกำหนดพจน์ต่างๆ ของความหนืดขึ้นดังนี้

ความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity),  $\eta_{sp}$  วัดค่าของความหนืดสัมพัทธ์ ( $\eta_{rel}$ ) ที่เกิน 1

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \quad (7.26)$$

ค่าของความหนืดจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นของสารละลาย ( $c$ ) เรียกว่า ความหนืดลดทอน (reduced viscosity),  $\eta_{red}$

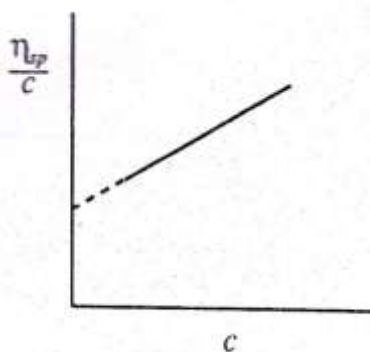
$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (7.27)$$



เนื่องจากว่า  $\eta_{sp}$  ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายค่าของ  $\frac{\eta_{sp}}{c}$  เมื่อ  $c = 0$  ความเข้มข้น  
 เจือจางเป็นอนันต์ เรียกว่าความหนืดในตัว (intrinsic viscosity),  $[\eta]$

$$[\eta] = \lim(\eta_{sp} / c)_{c \rightarrow 0} \quad (7.28)$$

เมื่อ  $c$  เป็นความเข้มข้นในหน่วย  $g \text{ mL}^{-1}$  หรือ  $g/100 \text{ mL}$  ค่า  $[\eta]$  หาได้จากการต่อเส้นกราฟไปตัด  
 แกนตั้ง (ซึ่งเป็นค่าของ  $\eta_{sp} / c$  ที่  $c = 0$ ) ดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 การหาค่าความหนืดในตัว (intrinsic viscosity)

ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ. 2549: 297.

ตารางที่ 7.2 สรุปพจน์ต่างๆของความหนืดที่ใช้กับแมโครโมเลกุล

พจน์ความหนืด	สัญลักษณ์ $\eta$	cgs units P
ความหนืดสัมพัทธ์	$\eta_{rel}$	ไม่มีหน่วย
ความหนืดจำเพาะ	$\eta_{sp}$	ไม่มีหน่วย
ความหนืดลดทอน	$\eta_{sp} / c$	$\text{cm}^3/\text{g}$
ความหนืดในตัว	$[\eta]$	$\text{cm}^3/\text{g}$

$c$  คือ  $\text{cm}^3/\text{g}$

ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ. 2549: 297.

ในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลของความหนืดกับขนาดของโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุล  
 ไอน์สไตน์ได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับในสารละลายเจือจางของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นทรงกลม (hard  
 spherical molecules) จะมีค่าความหนืดในตัวดังนี้

$$[\eta] = \frac{10N_A \pi r^3}{MV} \quad (7.29)$$

$N_A$  ค่าคงที่อาโวกาโดร

$V$  ปริมาตรของสารละลาย

$r$  รัศมีของโมเลกุลทรงกลม (spherical molecule)

$M$  มวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย

Standinger ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดในตัวกับมวลโมเลกุลของโมเลกุลที่ไม่เป็นทรงกลม (nonspherical molecules) ดังนี้

$$[\eta] = KM^\alpha \quad (7.30)$$

$K$  คือค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลอง

$\alpha$  คือเลขยกกำลังซึ่งมีค่าขึ้นกับรูปร่างของแมโครโมเลกุลดังนี้

$\alpha = 0$  สำหรับโมเลกุลทรงกลม (Spherical molecule)

$\alpha = 0.5$  สำหรับ random coil

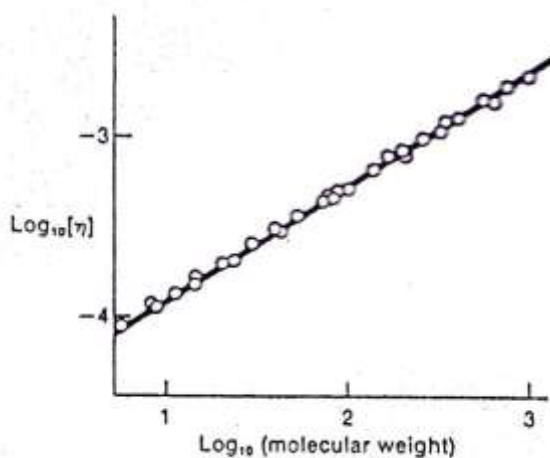
$\alpha = 1.8$  สำหรับ long rigid rod

$M$  คือมวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย หรือเรียกว่า  $\bar{M}_v$  (Viscosity-average molecular weight)

ลอการิทึมของสมการ (8.30) เขียนดังนี้

$$\log[\eta] = \alpha \log M + K \quad (7.31)$$

กราฟของ  $\log[\eta]$  กับ  $\log M$  จะเป็นเส้นตรง เช่นรูปที่ 7.7 เป็นกราฟของสารละลายพอลิไบทีลีนหลายชนิดในตัวทำละลายของไดโอไซบิวทีน ซึ่งสามารถใช้เป็นกราฟมาตรฐาน สำหรับหามวลโมเลกุลของสารตัวอย่างได้ โดยการวัดความหนืดในตัวของสารตัวอย่างนั้น



รูปที่ 7.7 ลอการิทึมของความหนืดในตัวกับลอการิทึมของมวลโมเลกุลสำหรับ สารละลายของ พอลิบิวทิลีน (polybutylenes) ในไดไอโซบิวทีน (disobutene) ที่อุณหภูมิ 20 °C  
ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ. 2549: 298.

ตารางที่ 7.3 ค่าความหนืดในตัวของแมโครโมเลกุลบางชนิด

โมเลกุล	รูปร่าง	$[\eta](\text{mL g}^{-1})$	น้ำหนักโมเลกุล ( $\text{g mol}^{-1}$ )
Myoglobin	Globular	3.1	17800
Hemoglobin	Globular	3.6	64450
Collagen	Rod	1150	350000
Polystyrene (in toluene)	Random coil	130	500000

ที่มา: ดัดแปลงจาก R. Chang. 1981: 593.

### 7.5 การเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้า (Electrophoresis)

การเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้า เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน ภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าที่กำหนดให้ซึ่งขึ้นกับประจุของตัวถูกละลาย แต่ไม่ขึ้นกับมวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย เทคนิคนี้มีประโยชน์ ในการแยกสารละลายของโปรตีนต่างๆ ให้บริสุทธิ์ โดยการนำสารละลายที่ต้องการศึกษามาทำให้เป็นอนุภาคมีประจุบวกหรือลบ ภายใต้สนามไฟฟ้าอนุภาคที่มีประจุต่างชนิดจะเคลื่อนที่แยกจากกัน ความเร็วของการแยกกลุ่มขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้า

สมมติให้ผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม =  $\mathcal{E}$

แรงที่กระทำบนประจุของโมเลกุลของตัวถูก =  $ez\mathcal{E}$

$e$  คือประจุไฟฟ้า  $z$  คือจำนวนประจุบนโมเลกุล

เมื่อเริ่มผ่านกระแสไฟฟ้า แต่ละไอออนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งในช่วงเวลา สั้นๆ จนกระทั่งแรงไฟฟ้าสถิตสมดุลกับแรงเสียดทานที่เกิดจากตัวทำละลาย ไอออนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ  $v$

$$ez\mathcal{E} = fv \quad (7.31)$$

$f$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานจากกฎของสโตกส์ (Stokes's law),  $f$  มีค่าดังนี้

$$f = 6\pi\eta r \quad (7.32)$$

$\eta$  คือความหนืดของตัวทำละลาย

$r$  คือรัศมีของไอออน

แทนค่า  $f$  ลงในสมการ (7.32) แล้วจัดสมการใหม่ให้พจน์ของ  $v$  อยู่ทางซ้ายมือดังนี้

$$v = \frac{ez\mathcal{E}}{6\pi\eta r} \quad (7.33)$$

กำหนดให้ electrophoretic mobility ( $u$ ) คือความเร็วต่อหน่วยความเข้มของสนามไฟฟ้า มีค่าดังนี้

$$u = \frac{v}{\mathcal{E}} = \frac{ze}{6\pi\eta r} \quad (7.34)$$

หน่วย  $\mathcal{E} = \text{Vm}^{-1}$

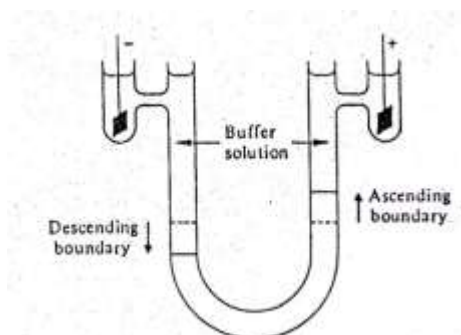
$$u = \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$$

จากสมการ (7.34) การเคลื่อนที่ของไอออนขึ้นอยู่กับประจุและแปรผกผันอย่างผกผันกับ

ขนาดของไอออนและความหนืดของตัวกลาง โดยสมมติให้ไอออนเป็นทรงกลมและไม่คิดถึงอิทธิพลของบรรยากาศไอออนิกที่มีต่อการเคลื่อนที่ของไอออน

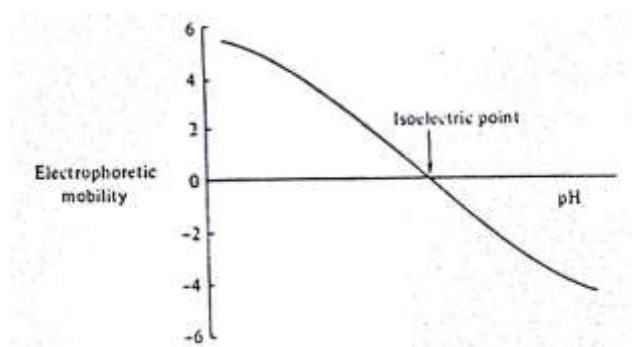
วิธีที่ง่ายที่สุดในการหาค่า electrophoretic mobility คือ moving boundary method ดังแสดงในรูปที่ 8.8 เทสสารละลายที่จะตรวจสอบลงในหลอดรูปตัวยูแล้วค่อยๆ เทสสารละลายบัฟเฟอร์ลงไปจะทำให้เห็นขอบชัดเจน จากนั้นจุ่มขั้วไฟฟ้าลงในแขนทั้งสองข้างที่แยกจากหลอดตัวยู เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรลิซิสตกลงไปตรงบริเวณขอบ แล้วจุ่มเครื่องมือทั้งชิ้นนี้ลงในตัวควบคุมอุณหภูมิ เช่น สารละลายประกอบด้วยโมเลกุลของโปรตีนปริมาณมากและมีประจุที่ผิว เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า ที่ทราบค่าทำให้ขอบเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้าม ทิศทางของการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลโปรตีนขึ้นอยู่กับ pH ของตัวกลาง ที่ pH สูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) โปรตีนจะมีประจุลบขอบจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอนอด ที่ pH ต่ำกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก ประจรวม

ของโปรตีนเป็นบวกขอบเคลื่อนที่ไปที่แคโทด ถ้า pH ของสารละลาย เท่ากับจุดไอโซอิเล็กทริก ไอออนจะหยุดเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.8 เครื่องมือแบบ moving-boundary electrophoresis

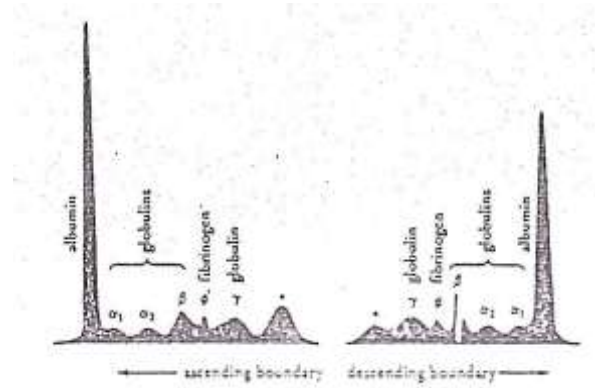
ที่มา: ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ. 2549: 300.



รูปที่ 7.9 การหาจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนโดยการเขียนกราฟของ electrophoretic mobility กับ pH ที่ pH ต่ำกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกโปรตีนเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแคโทด ที่ pH สูงกว่าโปรตีนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด

ที่มา: ดัดแปลงจาก R. Chang. 1981: 594.

เทคนิคการเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้าสามารถใช้แยกคอมโพเนนต์ต่างๆ ในพลาสมาโปรตีนของมนุษย์ที่ pH 8.8 ดังรูปที่ 7.10 เนื่องจากว่าโปรตีนเหล่านี้มีจุดไอโซอิเล็กทริกต่างกัน ค่าของจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนทั่วไปแสดงในตารางที่ 7.4



รูปที่ 7.10 ผลของการเคลื่อนย้ายด้วยไฟฟ้า (electrophoresis) ของโปรตีนพลาสมา จากเลือด  
มนุษย์ที่ pH 8.6

ที่มา: ดัดแปลงจาก G. M. Barrow. 1981: 266.

ตารางที่ 7.4 ค่าของจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนบางชนิด

โปรตีน	pI
Bovine serum albumin	4.9
$\beta$ -Lactoglobulin	5.2
Carboxypeptidase	6.0
Hemoglobin	6.7
Hemoglobin S (sickle-cell hemoglobin)	6.9
Ribonuclease	9.5
Cytochrome c	10.7
Lysozyme	10.7

ที่มา: ดัดแปลงจาก R. Chang. 1981: 595.

จุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point), pI คือ pH ที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเป็น ไอออน  
สองขั้ว (dipolar ion) ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าเช่น ค่า pI หาได้จากค่า pKa ของกรดอะมิโน (amino  
acids) เช่น ไกลซีน (glycine)



$$K_1 = \frac{[H^+][NH_3CH_2COO^-]}{[NH_3CH_2COOH]}$$

$$K_2 = \frac{[H^+][NH_3CH_2COO^-]}{[NH_3CH_2COOH]}$$

$$K_1K_2 = \frac{[H^+]^2[NH_3CH_2COO^-]}{[NH_3CH_2COOH]}$$

$$[NH_3CH_2COO^-] = [NH_3CH_2COO^-]$$

$$K_1K_2 = [H^+]^2$$

$$[H^+]^2 = (K_1K_2)^{1/2}$$

$$-\log[H^+]^2 = \frac{1}{2}(\log K_1 + \log K_2)$$

$$pH = \frac{1}{2}(pK_1 + pK_2)$$

เช่น ไกลซีน :  $PI = pH = \frac{2.36 + 9.60}{2} = 5.97$

ถ้า pH ของสารละลายสูงกว่า PI ไอออนมีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก แต่ถ้า pH ของสารละลายต่ำกว่า PI ไอออนมีประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ แต่ที่ PI = pH ไอออนจะหยุดเคลื่อนที่

## 7.6 การกระเจิงแสง

### (Light scattering)

เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบบนวัตถุ ทำให้การกระจายของอิเล็กตรอนเกิด การแกว่งกวัดแล้วแผ่รังสีออกมา ถ้าเป็นตัวกลางแบบเอกพันธ์ ซึ่งได้แก่ผลึกสมบูรณ์หรือโมเลกุลที่รวมกันเป็นเนื้อเดียวอย่างอิสระ ที่อยู่ในมาตราส่วนของความยาวคลื่นของรังสี เช่น น้ำ คลื่นทุติยภูมิ (secondary waves) จะเกิดการแทรกสอดหักล้างยกเว้นในทิศทางเริ่มต้นของรังสีตั้งนั้นจึงสามารถสังเกตลำแสงได้ เมื่อมองในทิศทางเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดแสง ถ้าเป็นตัวกลางที่ไม่เป็นเอกพันธ์ได้แก่ผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือสารละลาย ที่มีแมโครโมเลกุลในตัวทำละลาย หรือหมอกในอากาศทำให้มีการกระเจิงของรังสีในทิศทางอื่นด้วย ตัวอย่างเช่นการกระเจิงแสงโดยฝุ่นละอองในแสงอาทิตย์

การกระเจิงแสงโดยอนุภาค ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าความยาวคลื่นของรังสี ตกกระทบ เรียกว่าการกระเจิงแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ความเข้มของรังสีกระเจิงแบบเรย์ลีขึ้นอยู่กับ  $1/\lambda^4$  ความเข้มของแสงกระเจิงที่มีความยาวคลื่นสั้น จะมีค่ามากกว่าแสงกระเจิงที่มีความยาวคลื่นมาก ท้องฟ้ามีสีฟ้าเนื่องจากการกระเจิงแสง โดยโมเลกุลในบรรยากาศในช่วงสีน้ำเงินด้วยความเข้มที่สูงของแสงสีขาวจากพระอาทิตย์ ความเข้มของแสงกระเจิงขึ้นกับมุมกระเจิง ( $\theta$ ) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับ  $1 + \cos^2 \theta$  เมื่อ ไม่เป็นแสงโพลาไรส์ และจะแปรผันโดยตรงกับ  $\cos^2 \theta$  เมื่อเป็นแสงโพลาไรส์ ความเข้มของแสงกระเจิงยังขึ้นกับความแรงของอันตรกิริยาระหว่างแสงกับโมเลกุล ถ้าโมเลกุลมีสภาพตัวได้สูง (polarizability) จะมีอันตรกิริยากับแสงมาก ความเข้มของแสงกระเจิง ( $I$ ) ที่มุม  $\theta$  มีค่าดังนี้

$$I = A I_0 \bar{M}_w g [P] \quad g = \begin{cases} 1 \cos^2 \theta & \text{สำหรับแสงที่ไม่แสงโพลาไรส์} \\ \cos^2 \theta & \text{สำหรับแสงที่แสงโพลาไรส์} \end{cases} \quad (7.35)$$

$I_0$  คือความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

$[P]$  คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในหน่วยโมลาร์

$\bar{M}_w$  คือมวลโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนัก

$A$  คือค่าคงที่ขึ้นกับดัชนีหักเหของสารละลาย ความยาวคลื่น และระยะห่างระหว่าง เครื่องตรวจหา (detector) กับสารตัวอย่าง

เมื่ออินทิเกรตสมการ (7.35) ในช่วงของมุม  $\theta$  ทั้งหมด เพื่อหาความเข้มข้นทั้งหมดของแสงกระเจิง  $I_{total}$  จะได้ค่าดังนี้

$$I_{total} = I_0 e^{-\tau L} \quad (7.36)$$

$L$  คือความยาวเซลล์ที่บรรจุสารละลายในทิศทางของลำแสงที่ตกกระทบ

$\tau$  (อ่านว่า ทาว (tan) คือความขุ่น (turbidity)

$$\tau = Hc \bar{M}_w \quad (7.37)$$

เมื่อ  $Hc \frac{dn}{dc}$

$n$  คือดัชนีหักเหของสารละลาย

$c$  คือความเข้มข้นในหน่วยมวลต่อปริมาตร

ในกรณีของสารละลายอุดมคติเราสามารถ  $\bar{M}_w$  ของตัวถูกละลายได้จากการเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{Hc}{\tau}$  กับ  $c$  แล้วต่อเส้นกราฟไปที่ความเข้มข้นเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าของ  $\frac{Hc}{\tau}$  ซึ่งนำไปคำนวณหาค่า  $\bar{M}_w$  ได้



สำหรับแมโครโมเลกุลที่มีขนาดปานกลางจะมีค่าความขุ่นที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นโดยมวล ดังสมการ (7.37) ดังนี้

$$\frac{Hc}{\tau} = \frac{1}{\bar{M}_w} (1 + 2Bc + \dots) \quad (7.38)$$

B คือสัมประสิทธิ์ไวยเรียลอสโมติก

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{Hc}{\tau}$  กับ c สามารถหาค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก  $\bar{M}_w$  ได้

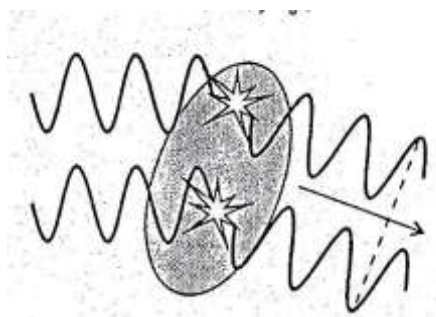
สำหรับของเหลวบริสุทธิ์ที่โปร่งใสมีค่า  $\tau$  อยู่ในอันดับขนาด  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  ส่วนพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่า  $\tau$  อยู่ในอันดับขนาด  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  และ  $10^{-1} \text{ cm}^{-1}$  สำหรับนม

### การกระเจิงแสงของอนุภาคขนาดใหญ่

(Large-particle scattering)

เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับ ขนาดของอนุภาคที่แสงตกกระทบ การกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโมเลกุลดังรูปที่ 7.11 ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ความเข้มของแสงที่กระเจิงจึงแตกต่างไปจากลักษณะของ อนุภาคขนาดเล็กตามการกระเจิงแบบเรย์ลีในสมการ (7.35) ค่าแตกต่างนี้คือ อัตราส่วนของความเข้มของแสงกระเจิงที่วัดได้ ( $I_{\text{observed}}$ ) ที่แต่

ละมูมกับความเข้มของแสงกระเจิงแบบเรย์ลีที่มูมนั้นคือ  $P = \frac{I_{\text{observed}}}{I_{\text{raylight}}}$



**รูปที่ 7.11** แสงที่กระเจิงจากบริเวณต่างๆของโมเลกุลจะมีความยาวคลื่นที่เกิดการ แทรกสอด และตัดแปรจากการกระจายความเข้มข้นของแสงกระเจิงแบบเรย์ลี การตัดแปรสามารถสรุปถึงรูปร่างของแมโครโมเลกุลได้

ที่มา: ดัดแปลงจาก P. M. Atkins. 1994: 801.

ถ้าโมเลกุลประกอบด้วยหลายอะตอม  $i$  ที่ระยะทางเท่ากับ  $R_{ij}$  จากจุดหนึ่งแล้วทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงจากแต่ละคู่อะตอม เราสามารถคำนวณการกระจายแสงจากอนุภาคทั้งหมด โดยพิจารณาจากทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละคู่อะตอม ในแต่ละโมเลกุล ถ้ามี  $N$  อะตอมในแมโครโมเลกุล และสมมติให้การกระจายแสงจากอะตอมทั้งหมดมีกำลังเท่ากัน จะมีค่า  $P$  ดังนี้

$$P = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \frac{\sin s R_{ij}}{s R_{ij}} \quad (7.39)$$

$$\text{เมื่อ } s = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} s$$

$R_{ij}$  คือระยะห่างระหว่างอะตอม  $i$  กับ  $j$

$\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

ความเข้มของแสงที่วัดได้มีค่าเท่ากับ  $P I_{\text{raylight}}$  เมื่อ  $I_{\text{raylight}}$  มีค่าตามสมการ (7.35)

## สรุป

แมโครโมเลกุล (macromolecule) เป็นสารเคมีที่มีมวลโมเลกุลสูงในช่วงตั้งแต่  $10^3$  ถึง  $10^9$  หรือ  $10^9 \text{ g mol}^{-1}$  มักเรียกแมโครโมเลกุลว่า พอลิเมอร์ (polymer) แมโครโมเลกุลมีความแตกต่างจากโมเลกุลปกติที่มีขนาดเล็กจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษในการศึกษาโมเลกุลขนาดใหญ่ แมโครโมเลกุลมีอยู่ทุกหนแห่งทั้งภายนอกและภายในร่างกายของเราแบ่งได้เป็น 2 พวกคือ

1. แมโครโมเลกุลธรรมชาติ (natural macromolecules) ได้แก่ โปรตีน กรดนิวคลีอิก พอลิแซ็กคาไรด์
  2. แมโครโมเลกุลสังเคราะห์ (Synthetic macromolecules) ได้แก่ พอลิเมอร์อินทรีย์
- มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถนิยามได้หลายแบบ นิยมใช้คือ

1. มวลโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (number-average molar mass) พอลิเมอร์ที่มี  $N$  โมเลกุลประกอบด้วยโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $M_1$  จำนวน  $n_1$  โมเลกุล โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $M_2$  จำนวน  $n_2$  โมเลกุล และต่อไปเรื่อยๆ

2. วิธีหาขนาด รูปร่าง และมวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุล แบ่งได้เป็น 3 วิธี ใหญ่ ๆ คือ วิธีการหาขนาด รูปร่างและมวลโมเลกุลของแมโครโมเลกุลแบ่งได้เป็น 3 วิธี ใหญ่ ๆ คือวิธีการใช้คุณสมบัติการส่งผ่าน วิธีเชิงแสงและการใช้คุณสมบัติคอลลิเกทิฟ ขนาดของโมเลกุลสามารถหาได้จากการทดลองวัดอัตราการเคลื่อนที่ เรียกว่า คุณสมบัติ การส่งผ่าน (transport properties) ถ้าการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในสารละลายของน้ำ (aqueous solution) จะเรียกว่าคุณสมบัติอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic properties) คุณสมบัติของการส่งผ่านที่สำคัญได้แก่ การแพร่ (diffusion) ความหนืด (viscosity) และการนอนก้น (sedimentation) การวัดคุณสมบัติการส่งผ่านสามารถ ใช้หาขนาดและรูปร่างของแมโครโมเลกุลได้

วิธีเชิงแสง ที่ใช้ศึกษา ขนาดและมวลโมเลกุล ของ แมโครโมเลกุลจะใช้เทคนิคของ การกระเจิงแสง (light scattering) เนื่องจากแมโครโมเลกุลมีขนาดใหญ่จึงเกิดการกระเจิงแสงได้มาก นิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์สังเคราะห์

สมบัติคอลลิเกทิฟเป็นสมบัติที่ขึ้นกับจำนวนโมเลกุล และสมบัติกายภาพของตัวถูกละลาย แต่ไม่ขึ้นกับสมบัติทางเคมี และชนิดของตัวถูกละลาย ได้แก่ การลดความดันไอในการเพิ่มจุดเดือด การลดจุดเยือกแข็งและความดันออสโมติก การใช้คุณสมบัติคอลลิเกทิฟในการหามวลโมเลกุลในกรณีที่แมโครโมเลกุลมีมวลโมเลกุลสูง ๆ ในอันดับของ  $10^6$  ขึ้นไปจะให้ค่าไม่ถูกต้อง จึงต้องใช้วิธีอื่นแทน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคอลลิเกทิฟกับมวลโมเลกุล โดยใช้อุทกพลศาสตร์ การหาลักษณะของแมโครโมเลกุล ดังนี้

**การนอนก้น** คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล โดยอำนาจของแรงเหวี่ยง (centrifugal force) ในทางปฏิบัติการนอนก้นมีประโยชน์ในการแยกโมเลกุลให้บริสุทธิ์ โดยโมเลกุลที่มีลักษณะ และ น้ำหนักต่างกันจะมีความเร็วของการเคลื่อนที่ต่างกันและเมื่อ นำเอาสารละลายที่มีโมเลกุลเหล่านี้ผสมกันอยู่มาปั่น โมเลกุลเหล่านี้ก็จะแยกออก จากกันเป็นชั้นๆ

**ความหนืด** โดยความหนืดของของไหล (fluid) ใดๆ เช่น แก๊ส ของเหลวบริสุทธิ์ หรือ สารละลายเป็นเครื่องชี้ถึงความต้านทานการไหลของของไหลนั้น

$$\text{ความหนืดสัมพัทธ์ } (\eta_{\text{rel}}) \text{ ดังนี้ } \eta_{\text{rel}} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho t}{\rho_0 t_0}$$

ความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity),  $\eta_{\text{sp}}$  วัตถุประสงค์ของความหนืดสัมพัทธ์ ( $\eta_{\text{rel}}$ ) ที่เกิน 1 มีสมการดังนี้  $\eta_{\text{sp}} = \eta_{\text{rel}} - 1$

สำหรับในสารละลายเจือจางของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นทรงกลม (hard spherical molecules) จะมีค่าความหนืดในตัวดังนี้  $[\eta] = \frac{10}{3} = \frac{N_A \pi r^3}{MV}$

ค่าความหนืดในตัวกับมวลโมเลกุลของโมเลกุลที่ไม่เป็นทรงกลม (nonspherical molecules) ดังนี้  $[\eta] = KM^\alpha$

- **การเคลื่อนย้ายสู่ขั้วไฟฟ้า** เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าที่กำหนดให้ซึ่งขึ้นกับประจุของตัวถูกละลาย แต่ไม่ขึ้นกับมวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย

- **การกระเจิงแสง** เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบบนวัตถุ ทำให้การกระจายของอิเล็กตรอนเกิดการแกว่งกวัดแล้วแผ่รังสีออกมา ถ้าเป็นตัวกลางแบบเอกพันธ์

เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับ ขนาดของอนุภาคที่แสงตกกระทบ การกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโมเลกุล

## แบบฝึกหัด

- โพรตีนแบบ polydisperse ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย 10 % ของโพรตีน ที่มีมวลเท่ากับ 10,000 80 % ของโพรตีนที่มีมวลโมเลกุล เท่ากับ 20,000 และ 10 % ของโพรตีนที่มีมวลโมเลกุล เท่ากับ 40,000 จงคำนวณหา  $\bar{M}_n$  และ  $\bar{M}_w$
- โพรตีนชนิดหนึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ มวลโมเลกุลเท่ากับ 30,000 จำนวน 5 โมล มวลโมเลกุล เท่ากับ 60,000 จำนวน 10 โมล จงคำนวณหา  $\bar{M}_n$  และ  $\bar{M}_w$
- สารละลายของแมโครโมเลกุลแบบ polydisperse มีการกระจายของมวลโมเลกุล ดังนี้

จำนวนโมเลกุล	มวลโมเลกุล
10	25,000
7	17,000
24	31,000
16	49,000

จงคำนวณหา  $\bar{M}_n$  และ  $\bar{M}_w$  และ polydispersity ของสารละลายซึ่งนิยามว่าเท่ากับ  $\bar{M}_w / \bar{M}_n$
- สัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ  $200 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ( $200 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  โมเลกุลออกซิเจน จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ในทิศทางหนึ่งเป็นระยะทาง 1 mm นานเท่าไร
- เมื่อ  $f_{\text{eff}} = \frac{kT}{D}$  และ  $f_0 = 6\pi\eta r$  จงคำนวณอัตราส่วนของแรงเสียดทาน ( $f_{\text{eff}}/f_0$ ) ของ bovine serum albumin ซึ่งมีข้อมูลที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  ดังนี้

มวลโมเลกุลเท่ากับ  $66.5 \text{ kg mol}^{-1}$  ( $66,500 \text{ g mol}^{-1}$ )  
ปริมาตรจำเพาะเท่ากับ  $0.734 \text{ mL g}^{-1}$   
สัมประสิทธิ์ของการแพร่ เท่ากับ  $6.97 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ( $6.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ )
- ค่าสัมประสิทธิ์การนอนก้น และการแพร่ในน้ำของฮีโมโกลบิน มีค่าเท่ากับ  $4.41 \times 10^{-13} \text{ s}$  และ  $6.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ถ้า  $\bar{V} = 0.794 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  และ  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.998 \text{ g cm}^{-3}$  จงคำนวณจำนวนอะตอมของเหล็กต่อ 1 โมเลกุลของฮีโมโกลบิน
- จงคำนวณปริมาตรและรัศมีของโมเลกุลของฮีโมโกลบิน ที่สมมติให้เป็นทรงกลมที่ไม่ถูกไฮเดรต กำหนดปริมาตรจำเพาะเท่ากับ  $0.75 \text{ mL g}^{-1}$  และมวลโมเลกุลเท่ากับ  $64,500 \text{ g mol}^{-1}$

8. น้ำ myoglobin และฮีโมโกลบิน globular protein ซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์สำหรับอนุภาคที่เป็นกลม ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของ myoglobin และฮีโมโกลบิน มีค่าเท่ากับ  $11.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ความหนืดของน้ำมีเท่ากับ  $0.00102 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ  $20^\circ \text{C}$  จงคำนวณรัศมีของโมเลกุลของ myoglobin และฮีโมโกลบิน โดยใช้สมการต่อไปนี้
9. สารละลายฮีโมโกลบินจากร่างกายของคนในน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการนอนก้น (s) เท่ากับ 4.48 Svedbergs ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ  $6.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ปริมาตรจำเพาะส่วน ( $\bar{V}$ ) ของโมเลกุลในร่างกายเท่ากับ  $0.749 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  และความหนาแน่นของน้ำที่  $20^\circ \text{C}$  เท่ากับ  $0.998 \text{ g cm}^{-3}$  จงคำนวณหามวลโมเลกุลของฮีโมโกลบินในร่างกาย
10. สารละลายเจือจาง DNA มีความหนืดในตัว (intrinsic viscosity),  $[\eta]$  เท่ากับ 0.069 M เมื่อ M เป็นมวลโมเลกุล จงหาค่า  $[\eta]$  ของ DNA ที่มีค่า M เท่ากับ  $130 \times 10^6$

## เอกสารอ้างอิง

- ปรีชา พหลเทพ. (2547). กรุงเทพฯ ฯ: **เคมีฟิสิกส์ 2**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- สุดจิต สงวนเรืองและคณะ. (2548). **เคมีทั่วไปเล่ม 3**. กรุงเทพฯ ฯ: วี.เจ.พรินติ้ง.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2547). **คู่มือครูสาระการเรียนรู้พื้นฐาน และเพิ่มเติม เคมีเล่ม 3**. กรุงเทพฯ ฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2547). **เคมีเล่ม 3**. กรุงเทพฯ ฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.
- อรรวรรณ ศิริโชติ. (2549). **เคมีเชิงฟิสิกส์เบื้องต้น**. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- G. M. Barrow. (1979). **Physical Chemistry**. 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- G, M. Barrow. (1981). **Physical Chemistry for the Life Sciences**. 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, Inc., Auckland.
- K. J. Laidler. (1978). **Physical Chemistry with Biological Applications**. The Benjamin/Cummings Publishing Co., Inc., California.
- P. M. Atkins. (1994). **Physical Chemistry**. 5<sup>th</sup> ed., Oxford University Press, Oxford, 1994, หน้า 801.)
- R. Chang. (1981). **Physical Chemistry with Applications to Biological System**. 2<sup>nd</sup> ed., Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- W. J. Moore. (1983). **Basic Physical Chemistry**. Prentice/Hall International, Inc., Singapore.