บทที่ 9
สมบัติของสสาร

การศึกษาสมบัติของสสารถือเป็นรากฐานสำคัญของการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติ ในบทนี้จะศึกษาโดยเน้นในระดับมหาภาค (Macroscopic level) เพราะสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือและความรู้สึก โดยศึกษาว่าสารชิ้นนี้มีภาพร่างเปลี่ยนแปลงอย่างไร บิดเบี้ยวหรือไม่เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

9.1 สถานะของสสาร (States of Matter)

โดยทั่วไปสสารที่อยู่รอบๆตัวเราจะมีอยู่ 3 สถานะ คือ ของแข็ง (Solids) ของเหลว (Liquids) และก๊าซ (Gases) แต่ถ้าแบ่งสสารตามสถานะทางกายภาพจะมีเพียง 2 ชนิด คือ ของแข็ง (solids) และของไหล (Fluids) โดยของแข็งมีภาพร่างที่แน่นอน เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจะมีแรงต้านไม่ให้ภาพร่างเปลี่ยนไป ในขณะที่ภาพร่างของของไหลจะเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำ

ของไหลสามารถแบ่งได้เป็นของเหลว (Liquids) และก๊าซ (Gases) จะมีสมบัติที่แตกต่างกันเมื่อมีแรงอัด ก๊าซสามารถอัดให้มีปริมาตรลดลงได้ง่าย และอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซจะมีแรงกระทำระหว่างกันน้อยมาก ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้เองที่ทำให้ก๊าซสามารถนำไปบรรจุได้ทุกๆภาชนะ และมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของภาชนะนั้นๆ ในขณะที่อะตอมหรือโมเลกุลของของเหลวและของแข็งจะมีแรงกระทำระหว่างกันมากกว่าก๊าซ โดยแรงดังกล่าวจะทำให้ทั้งของเหลวและของแข็งมีปริมาตรเท่าเดิม ถึงแม้จะมีแรงภายนอกมากระทำก็ตาม

สถานะของสารใดๆ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารนั้นและแรงดันของสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำสามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและก๊าซได้ เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น การแบ่งสถานะของสสารอย่างง่ายๆ ดังกล่าวจะมีบางกรณีที่ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าเป็นของแข็งหรือของเหลว ของแข็งบางชนิดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างช้าๆ ถ้าปล่อยทิ้งไว้นานหลายๆปีภาพร่างของแข็งดังกล่าวจะเปลี่ยนไป เช่น แก้วและพลาสติก เรียกสารนี้ว่า อะมอร์ฟัส (Amorphous) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีสมบัติเหมือนของเหลวมากยิ่งขึ้นเมื่อทำให้ร้อนมากขึ้น และทำนองเดียวกันสารหลายๆ ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงจากก๊าซเป็นของเหลวจะไม่ชัดเจนภายใต้แรงดันสูงๆ

9.2 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and specific gravity)

ความหนาแน่นของสารต่างๆ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของสารต่อปริมาตรของสารนั้นๆ ถ้ากำหนดให้ ρ คือความหนาแน่นของสารที่มีมวลเท่ากับ m และมีปริมาตรเท่ากับ V จะได้

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (9.1)$$

ในระบบ SI ความหนาแน่นมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) และบางครั้งจะใช้กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ตัวอย่างความหนาแน่นของสารชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 ความหนาแน่นของสารชนิดต่างๆ

สาร	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg / m^3)
อากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ	0	1.29
อากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ	20	1.20
ก๊าซฮีเลียมที่ความดัน 1 บรรยากาศ	0	0.179
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	0	1.98
น้ำ	4	1.00×10^3
น้ำ	20	0.998×10^3
น้ำทะเล	20	1.025×10^3
ปรอท	0	13.6×10^3
อะลูมิเนียม	20	2.70×10^3
ทองเหลือง	20	8.70×10^3
ทองแดง	20	8.89×10^3
เหล็ก	20	7.86×10^3
ตะกั่ว	20	11.3×10^3

ที่มา (ปรับปรุงจาก Halliday, 2011, หน้า 360)

โดยทั่วไปสารทุกชนิดจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นของสารมีค่าลดลง ยกเว้นกรณีของน้ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 0 - 4 °C จะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิมากกว่าช่วงดังกล่าวความหนาแน่นจะลดลง สมบัติดังกล่าวของน้ำจะพบเห็นได้จากสิ่งแวดล้อมรอบๆ ตัวเรา โดยเฉพาะในประเทศแถบขั้วโลกที่มีอากาศหนาวมาก น้ำในทะเลสาบและในแม่น้ำจะกลายเป็นน้ำแข็งในฤดูหนาวและกลายเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในฤดูใบไม้ผลิ

สมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น คือ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ถ.พ. ซึ่งนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกับความหนาแน่นของสารมาตรฐานชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปของแข็งและของเหลวจะใช้ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นมาตรฐานส่วนก๊าซจะใช้อากาศเป็นมาตรฐาน

$$\text{ถ.พ.} = \frac{\rho}{\rho_{\text{มาตรฐาน}}} \qquad (9.2)$$

จากสมการ (9.2) พบว่าความถ่วงจำเพาะจะไม่มีหน่วย เช่น ความถ่วงจำเพาะของทองและเหล็กมีค่าเท่ากับ 19.3 และ 7.86 ตามลำดับ

<u>ตัวอย่างที่ 9.1</u> จงหาความหนาแน่นแก๊สโซลีนมวล 51 g ปริมาตร 75 cm^3

<u>วิธีทำ</u> ความหนาแน่น

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$= \frac{0.051}{75 \times 10^{-6}}$$

$$= 680 \text{ kg/m}^3$$

<u>ตัวอย่างที่ 9.2</u> จงหาน้ำหนักของทองแดงปริมาตร 3 m^3 ถ้าทองแดงความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 8.9

<u>วิธีทำ</u> ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทองแดงคือ อัตราส่วนความหนาแน่นของทองแดงต่อความหนาแน่นของน้ำ เพราะฉะนั้นความหนาแน่นของทองแดงเท่ากับ 8.9×10^3 kg/m^3

$$W = mg$$

$$= \rho Vg$$

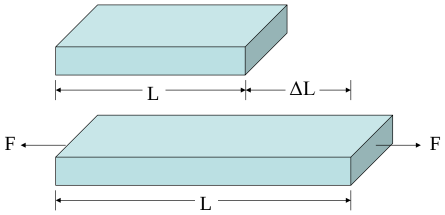
$$= (8.9\times10^3)(3)(9.8) = 261.66 \text{ kN}$$

9.3 ความเค้น ความเครียด และโมดูลัส (stress, strain and modulus)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อสารที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม หรือทองเหลือง จะทำให้ภาพร่างของสารนั้นเปลี่ยนไป ถ้าแรงที่มากระทำมีขนาดน้อยๆ สารดังกล่าวจะสามารถคืนตัวสู่สภาพเริ่มต้นได้เช่นเดียวกับสารประเภทยาง เรียกสมบัติในลักษณะนี้ว่า “ความยืดหยุ่น” (elastic)

สมบัติความยืดหยุ่นของสารแต่ละชนิดจะบอกด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับแรงภายนอกที่มากระทำและขนาดที่เปลี่ยนไปของวัตถุ โดยแรงภายนอกที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของสารดังกล่าวสามารถอธิบายในเทอมของ “ความเค้น (Stress)” และขนาดของวัตถุที่เปลี่ยนไปจะอธิบายได้ในเทอมของ “ความเครียด (Strain)” มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{โมดูลัสของความยืดหยุ่น} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} \qquad (9.3)$$



ภาพที่ 9.1 แสดงแรงภายนอกที่มากระทำต่อแท่งโลหะ
ที่มา (ปรับปรุงจาก Halliday, 2011, หน้า 315)

พิจารณาโลหะแท่งหนึ่งยาว L_0 และมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้ามีแรงดึงจากภายนอก F มากระทำที่ปลายทั้งสองข้างในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ดังภาพที่ 9.1 สามารถหาค่าความเค้นดึงของโลหะแท่งดังกล่าวได้เท่ากับ

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} = \frac{F}{A} \qquad (9.4)$$

ซึ่งมีหน่วยเป็น (N/m^2) หรือ Pascal, Pa ตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์และนักปรัชญาชาวฝรั่งเศส โดย 1 Pa เท่ากับ 1 N/m^2 และหน่วยที่นิยมใช้กันมากอีกหน่วยหนึ่งในระบบอังกฤษ คือ l b/in^2 หรือ psi จะสัมพันธ์กับหน่วยในระบบ SI ดังนี้

$$1\ lb/in^2\ (psi) = 6891\ Pa \qquad \text{และ} \qquad 1\ Pa = 1.454 \times 10^{-4}\ lb/in^2\ (psi)$$

จะสังเกตเห็นว่าหน่วยของความเค้นดึงจะเหมือนกับหน่วยของความดัน

จากภาพที่ 9.1 ถ้าแรงภายนอก F ที่ดึงปลายทั้งสองด้านของแท่งวัตถุแล้วทำให้ความยาวของแท่งวัตถุนี้เปลี่ยนไปเป็น $L = L_0 + \Delta L$ ซึ่งขนาดของสารที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความเค้นดึงจะเรียกว่า “ความเครียดดึง (Strain)” โดยมีนิยามเป็น

$$\text{ความเครียดดึง} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (9.5)$$

พบว่าความเครียดดึงมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเริ่มต้นของสาร จึงทำให้ความเครียดดึงไม่มีหน่วย และเรียกโมดูลัสความยืดหยุ่นนี้ว่า “โมดูลัสของยัง (Yong’s modulus; Y)” มีค่าดังสมการ

$$Y = \frac{\text{ความเค้นดึง}}{\text{ความเครียดดึง}} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \frac{F}{A} \frac{L_0}{\Delta L} \qquad (9.6)$$

โมดูลัสของยังของสารบางชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 9.2 ซึ่งจะพบว่ามีหน่วยเหมือนกับความเค้นดึง การเปลี่ยนแปลงภาพร่างของสารมีค่าโมดูลัสมากๆ จะต้องใช้แรงขนาดใหญ่มากระทำ เช่น เหล็กมี ค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 2.1 x 10^{11} Pa หมายความว่าถ้าต้องการให้เหล็กยาว 1 เมตร ยืดออกไปจากเดิม 1 เซนติเมตร จะต้องมีแรงดึงขนาด 2.1 x 10^{13} N/m^2

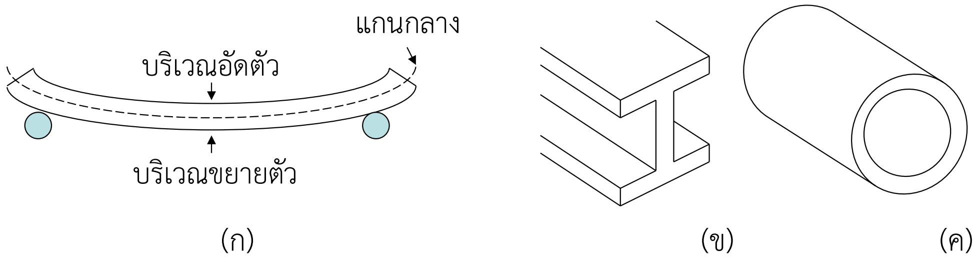
ถ้ามีแรงอัดจากภายนอกมากระทำต่อวัตถุจะทำให้เกิดความเค้นอัด(Compressive stress) และความเครียดอัด (Compressive strain) ซึ่งสามารถนิยามได้เช่นเดียวกับความเค้นดึงและความเครียดดึงดังที่กล่าวมาแล้ว โดยความเครียดอัดจะมีทิศทางตรงข้ามกับความเครียดดึงเท่านั้น ทำให้กฎของฮุคและสมการ (9.6) สามารถใช้ในกรณีที่มีแรงอัดจากภายนอกมีขนาดไม่ใหญ่นัก ดังนั้นสารหลายชนิดจะมีค่าโมดูลัสเท่ากันทั้งกรณีที่มีแรงอัดหรือแรงดึงจากภายนอกมากระทำ

ตารางที่ 9.2 ค่าโมดูลัสของสารชนิดต่างๆ

ชนิดของสาร	โมดูลัสของยัง (10^{11} N/m^2)	โมดูลัสเชิงปริมาตร (10^{11} N/m^2)	โมดูลัสเฉือน (10^{11} N/m^2)
อะลูมิเนียม	0.7	0.75	0.24
ทองเหลือง	0.9	0.60	0.35
ทองแดง	1.1	1.40	0.44
เหล็ก	2.1	1.60	0.77
ตะกั่ว	0.16	0.41	0.06
นิเกิล	2.1	1.70	0.78
เหล็กกล้า	2.0	1.60	0.75

ที่มา (ปรับปรุงจาก Serway, 2008, หน้า 348)

โดยทั่วไปแรงที่มากระทำต่อสารในหลายๆกรณีจะมีทั้งความเค้นอัดและความเค้นดึง เช่น เมื่อนำเหล็กแท่งหนึ่งวางในแนวระดับโดยมีแท่งคอนกรีตรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 9.2 (ก) เนื่องจากน้ำหนักจะทำให้แท่งเหล็กดังกล่าวมีการโค้งงอ จะเกิดแรงอัดบนพื้นผิวด้านบนและมีแรงดึงบนพื้นผิวด้านล่าง เนื่องจากแท่งเหล็กมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่มากนั่นเอง ถ้าต้องการลดความเค้น และการโค้งงอที่เกิดขึ้นจะสามารถลดลงได้โดยเปลี่ยนแท่งเหล็กให้มีภาพทรงอื่นที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง เช่น ภาพทรงแบบตัวไอดังภาพที่ 9.2 (ข) ส่วนเสาไฟฟ้าตามถนนหรือเสาไฟจราจรตามทางแยกต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีภาพทรงเป็นทรงกระบอกดังภาพที่ 9.2 (ค) โดยเสากลวงจะสามารถต้านทานแรงลมและแผ่นดินไหวในทุกทิศทางได้ดีกว่าเสาภาพทรงกระบอกตันซึ่งมีมวลเท่ากันแต่มีขนาดเล็กกว่า



ภาพที่ 9.2 (ก) แสดงตัวอย่างการเกิดแรงดึงและแรงอัดพร้อมๆกัน (ข) เหล็กภาพทรงแบบไอ (ค) ท่อเหล็กทรงกระบอกกลวง
ที่มา (ปรับปรุงจาก Halliday, 2007, หน้า 375)

<u>ตัวอย่างที่ 9.3</u> ลวดโลหะเส้นหนึ่งยาว 75.0 cm และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.130 cm ยืดออก 0.0350 cm เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมวล 8.00 kg ห้อยอยู่ที่ปลายข้างหนึ่ง จงหาความเค้น ความเครียด และมอดูลัสของยังของวัสดุที่ใช้ทำเป็นลวดนี้

<u>วิธีทำ</u>

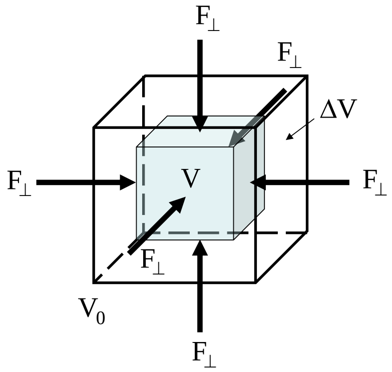
$$\text{ความเค้น} = \frac{F}{A} = \frac{(8.00)(9.81}{\pi(6.50\times10^{-4})^2} = 5.91\times10^{7}\ \text{N/m}^2 = 5.91\times10^{7}\ \text{Pa}$$

$$\text{ความเครียด} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0.0350}{75.0} = 4.67\times10^{-4}$$

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{5.91\times10^{7}}{4.67\times10^{-4}} = 1.27\times10^{11}\ \text{Pa} = 127\ \text{GPa}$$

9.4 ความเค้น ความเครียด และโมดูลัสเชิงปริมาตร (Stress strain bulk modulus)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อสาร นอกจากภาพร่างของสารจะเปลี่ยนแปลงแล้วปริมาตรก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ในกรณีของไหลเช่นน้ำและอากาศ เมื่อถูกแรงอัดจะทำให้เกิดความเค้นกระทำต่อทุกด้านอย่างสม่ำเสมอจึงทำให้ปริมาตรลดลง และแรงอัดที่มากระทำต่อพื้นผิวจะอธิบายในเทอมของความเค้นเชิงปริมาตร (Volume stress) หรือ ความเค้นบัลค์ (Bulk stress) และปริมาตรที่เปลี่ยนไปจะอธิบายในเทอมของความเครียดเชิงปริมาตร (Volume strain) หรือความเครียดบัลค์ (Bulk strain)



ภาพที่ 9.3 แสดงแรงผลักดันภายนอกกระทำต่อของเหลว
ที่มา (ปรับปรุงจาก Serway, R. A., 2008, หน้า 349)

พิจารณาของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะภาพลูกบาศก์ ดังภาพที่ 9.3 ถ้ามีแรงภายนอกมากระทำปลายเปิดของภาชนะจะทำให้เกิดแรงดันกระทำในทิศทางตั้งฉากกับผิวภาชนะทุกๆ ด้าน เมื่อนำของแข็งชิ้นหนึ่งหย่อนลงในภาชนะนี้ แรงภายนอกจะส่งผ่านของเหลวไปกระทำต่อของแข็งตามกฎของพาสคาล (Pascal’s law) ถ้าแรงดันเนื่องจากความลึกของของเหลวมีค่าแตกต่างกันน้อยมากทำให้ของแข็งสามารถลอยนิ่งอยู่ได้ แสดงว่าแรงดันของของเหลวที่กระทำต่อของแข็งจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของของแข็ง และแรงลัพธ์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ จึงเรียกแรงที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ว่า “ความดัน (Pressure, P)” นิยามได้ดังสมการ

$$P = \frac{F}{A} \tag{9.7}$$

ความดันจะมีหน่วยเหมือนกับความเค้น โดยทั่วไปนิยมใช้หน่วย Pa (N/m^2) หรือ lb/in^2 (psi) หรือความดันบรรยากาศ (Atmosphere หรือ atm) ซึ่งเป็นความดันเฉลี่ยของบรรยากาศของโลกที่ระดับน้ำทะเล โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

เมื่อความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัตถุ ถ้าปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลง ΔV จากปริมาตรเริ่มต้น V_0 สามารถหาความเครียดเชิงปริมาตรได้

$$\text{ความเครียดเชิงปริมาตร} = \frac{\Delta V}{V_0} \tag{9.8}$$

จากสมการ (9.7) และ (9.8) ถ้าความดันที่กระทำต่อวัตถุเพิ่มขึ้น ΔP ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป ΔV จะได้โมดูลัสเชิงปริมาตรเป็น

$$\text{โมดูลัสเชิงปริมาตร (B)} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0} \tag{9.9}$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าถ้าแรงดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาตรลดลง นั่นคือ ΔP มีค่าเป็นบวก ส่วนค่า ΔV มีค่าเป็นลบ ทำให้ค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรมีค่าเป็นบวกเสมอ

ในกรณีของแข็งและของเหลวเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งถือว่าโมดูลัสเชิงปริมาตรของของแข็งและของเหลวมีค่าคงที่ ส่วนก๊าซจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงภายนอกที่มากระทำและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป เรียกสมบัติดังกล่าวว่า “สภาพอัดได้ของสาร (Compressibility, K)” ซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร ดังสมการ

$$K = \frac{1}{B} = -\frac{\Delta V / V_0}{\Delta P} = -\frac{1}{V_0}\frac{\Delta V}{\Delta P} \tag{9.10}$$

สภาพอัดได้ของสารจะสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาตรเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น และมีหน่วยเป็นส่วนกลับของแรงดันคือ Pa^{-1} หรือ atm^{-1} เช่น น้ำมีค่าสภาพอัดได้ $K = 46.4 \times 10^{-6}\ atm^{-1}$ หมายความว่า ถ้าเพิ่มแรงดันครั้งละหนึ่งบรรยากาศจะทำให้ปริมาตรของน้ำลดลง 46.4 ส่วนในหนึ่งล้านส่วนแสดงว่าสารมีค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรต่ำจะง่ายต่อการอัด ในขณะที่สารที่มีค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรสูงจะไม่สามารถอัดได้ หรืออัดได้น้อยมาก

<u>ตัวอย่างที่ 9.4</u> มอดูลัสเชิงปริมาตรของน้ำมีค่า 2.1 GPa จงคำนวณหาปริมาตรที่หดตัวของน้ำ 100 mL เมื่อมีความดัน 1.5 MPa กระทำโดยรอบ

<u>วิธีทำ</u> จาก

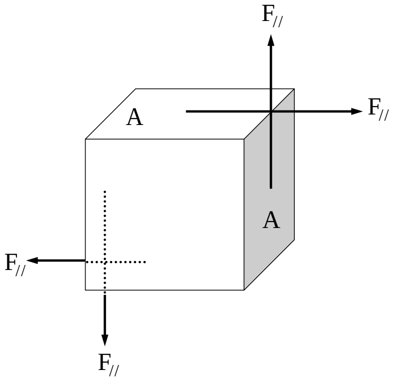
$$B = -\Delta P / (\Delta V / V_0) \quad \text{เราได้ว่า}$$

$$\Delta V = -\frac{V_0 \Delta P}{B} = -\frac{(100)(1.5 \times 10^6)}{2.1 \times 10^9} = -0.071\ \text{mL}$$

9.5 ความเค้น และความเครียดเฉือน (Shear Stress and Strain)

ถ้ามีแรงภายนอกกระทำในทิศทางขนานกับพื้นผิวของวัตถุ ($F_{//}$) ดังภาพที่ 9.4 ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงภาพร่างไป จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นเรียกว่า “ความเค้นเฉือน (Shear stress)” มีค่าดังสมการ

$$\text{ความเค้นเฉือน} = \frac{F_{//}}{A} \tag{9.11}$$



ภาพที่ 9.4 แสดงแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุทำให้เกิดความเค้นเฉือน
ที่มา (ปรับปรุงจาก Halliday, 2007, หน้า 374)

ภาพที่ 9.5 แสดงการบิดของวัตถุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ
ที่มา (ปรับปรุงจาก Halliday, 2007, หน้า 374)

การเปลี่ยนแปลงภาพร่างของวัตถุเนื่องจากแรงขนานกับพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 9.5 ทำให้ภาพร่างของหนังสือเปลี่ยนแปลงไป โดยความยาวของหนังสือในแต่ละด้านมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สามารถหาความเครียดเฉือน (Shear strain) ได้จากสมการ

$$\text{ความเครียด เฉือน} = \frac{\Delta x}{L_0} = \tan(\phi) \tag{9.12}$$

เมื่อ Δx เป็นระยะที่วัตถุบิดไป L_0 คือความหนาของหนังสือ และ ϕ คือมุมที่หนังสือเอียงไป โดยทั่วไปขนาดของวัตถุที่บิดไปจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดเริ่มต้นของวัตถุทำให้ $\tan(\phi)$ มีค่าใกล้เคียงกับ ϕ ในหน่วยเรเดียน และเรียกค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นในกรณีนี้ว่า "โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus, S)" มีค่าดังสมการ

$$\text{โมดูลัสเฉือน} = \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{ความเครียดเฉือน}}$$

$$S = \frac{F_{//}/A}{\Delta x/L_0} = \frac{L_0 F_{//}}{\Delta x.A}$$

$$= \frac{F_{//}/A}{\phi} \qquad (9.13)$$

โดยทั่วไปค่าโมดูลัสเฉือนของวัตถุจะมีค่า $\frac{1}{3}$ ถึง $\frac{1}{2}$ ของค่าโมดูลัสของยังดังตาราง 9.2

<u>ตัวอย่างที่ 9.5</u> ขนมวุ้นชิ้นหนึ่งรูปร่างเหมือนกล่องมีพื้นที่ผิวด้านบน 15 cm^2 และสูง 3.0 cm เมื่อมีแรงเฉือน 0.50 N กระทำที่ผิวบน ปรากฏว่าผิวบนเลื่อนไป 4.0 mm เทียบกับผิวล่าง จงหาความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน และมอดูลัสเฉือนของวุ้น

<u>วิธีทำ</u>

$$\text{ความเค้นเฉือน} = \frac{\text{แรงในแนวสัมผัส}}{\text{พื้นที่ผิว}} = \frac{0.50}{15\times10^{-4}} = 0.33 \text{ kPa}$$

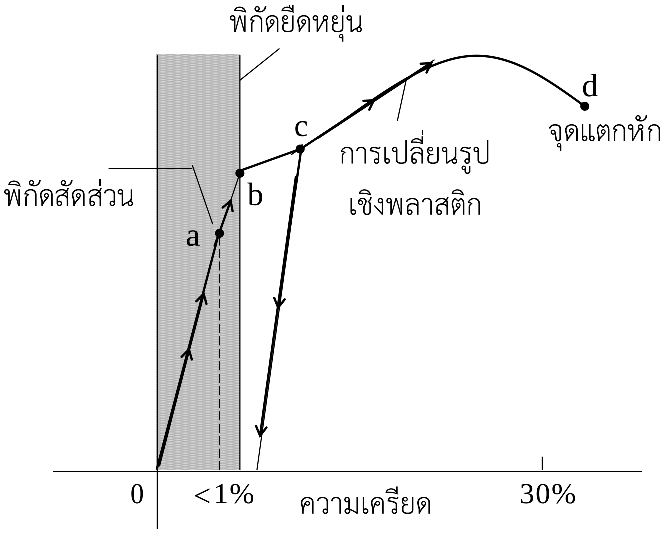
$$\text{ความเครียดเฉือน} = \frac{\text{การกระจัด}}{\text{ความสูง}} = \frac{0.40}{3.0} = 0.13$$

$$\text{มอดูลัสเฉือน} = \frac{0.33}{0.13} = 2.5 \text{ kPa}$$

9.6 สภาพยืดหยุ่น และสภาพพลาสติก (Elasticity and Plasticity)

การศึกษาขีดจำกัดของฮุคสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ถ้าสารยังมีพฤติกรรมตามกฎของฮุคจะได้กราฟเป็นเส้นตรงและความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด สารแต่ละชนิดจะมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างกราฟของโลหะในภาพที่ 9.6 พบว่ากราฟเป็นเส้นตรงในช่วงแรกซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุค โดยมีจุดสิ้นสุดที่จุด a และเรียกจุดนี้ว่า "ขีดจำกัดของความเป็นสัดส่วน (Proportional

limit)” ส่วนความสัมพันธ์จากจุด a ถึง b จะไม่เป็นเส้นตรง ถ้าเอาแรงภายนอกที่มากระทำต่อโลหะดังกล่าวออก โลหะสามารถหดตัวคืนสู่สภาพเริ่มต้นได้ เรียกช่วง ob ว่า “ช่วงยืดหยุ่น (Elastic region)” และเรียกจุด b ว่า “ขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic limit)”



ภาพที่ 9.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ
ที่มา (ปรับปรุงจาก Douglas, 2009, หน้า 189)

ถ้าออกแรงดึงจากภายนอกเพิ่มขึ้น ความเค้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ถ้าเอาแรงภายนอกที่กระทำต่อแท่งโลหะดังกล่าวออกหลังจากจุด b เช่น ความสัมพันธ์ที่จุด c พบว่าวัตถุจะไม่คืนสู่สภาพเริ่มต้นอีก โลหะจะมีความยาวมากกว่าความยาวเริ่มต้น เมื่อเพิ่มแรงกระทำจากภายนอกเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึงจุด d จะทำให้วัตถุมีความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้ว่าจะลดความเค้นลงแล้วก็ตาม เรียกพฤติกรรมในช่วง cd ว่า “การเปลี่ยนภาพเชิงพลาสติก (Plastic deformation)” โดยจะไม่คืนสภาพเดิมอีกเลย ถ้าออกแรงดึงมากกว่าจุด d โลหะดังกล่าวจะขาดออกจากกัน จึงเรียกจด d ว่า “จุดแตกหัก (Fracture point)”

สรุป

ความหนาแน่นนิยามว่าเป็นมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสสาร

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ความถ่วงจำเพาะ

$$\text{ถ.พ.} = \frac{\rho}{\rho_{\text{มาตรฐาน}}}$$

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

$$\text{โมดูลัสของความยืดหยุ่น} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}}$$

ค่าความเค้น

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} = \frac{F}{A}$$

ความเครียดดึง

$$\text{ความเครียดดึง} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

โมดูลัสของยัง

$$Y = \frac{\text{ความเค้นดึง}}{\text{ความเครียด ดึง}} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \frac{F}{A} \frac{L_0}{\Delta L}$$

ความดัน

$$P = \frac{F}{A}$$

ความเครียดเชิงปริมาตร

$$\text{ความเครียดเชิงปริมาตร} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

โมดูลัสเชิงปริมาตร

$$\text{โมดูลัสเชิงปริมาตร (B)} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0}$$

ความเครียดเฉือน

$$\text{ความเครียดเฉือน} = \frac{\Delta x}{L_0} = \tan(\phi)$$

โมดูลัสเฉือน

$$\text{โมดูลัสเฉือน} = \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{ความเครียดเฉือน}} = \frac{F_{//}/A}{\phi}$$

แบบฝึกหัด

1. ทองเหลืองทรงลูกบาศก์แท่งหนึ่ง มีความยาวของแต่ละด้านเท่ากับ 10.00 cm จงหา

    ก) มวลของทองเหลือง

    ข) ขนาดของน้ำแข็งทรงลูกบาศก์ที่มีมวลเท่ากับทองเหลืองแท่งดังกล่าว

ตอบ ก) 8.7 kg ข) ยาวด้านละ 0.212 m

2. จงหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง ถ้าน้ำมันนี้ 51 g มีปริมาตร 75 cm^3

ตอบ ความหนาแน่น 6.8×10^2 kg/m^3 ความถ่วงจำเพาะ 0.68

3. ปรอท 300 g มีปริมาตรเท่าไร ความหนาแน่นของปรอทเท่ากับ 13600 kg/m^3

ตอบ 22.1 cm^3

4. ความถ่วงจำเพาะของเหล็กหล่อมีค่าเท่ากับ 7.20 จงหาความหนาแน่นและมวลของเหล็กหล่อปริมาตร 60.0 cm^3

ตอบ 0.432 kg

5. มวลของกระติกสำหรับตวงใบหนึ่งมีขนาดเท่ากับ 25.0 g เมื่อว่างเปล่า มีขนาดเท่ากับ 75.0 g เมื่อมีน้ำเต็มและเท่ากับ 88.0 g เมื่อมีกลีเซอรีนเต็ม จงหาความถ่วงจำเพาะของกลีเซอรีน

ตอบ 1.26

6. กระติกสำหรับตวงใบหนึ่งมีมวล 30.0 g เมื่อว่างเปล่า มีมวลเท่ากับ 81.0 g เมื่อมีน้ำเต็ม และเท่ากับ 68.0 g เมื่อมีน้ำมันเต็ม จงหาความหนาแน่นของน้ำมัน

ตอบ 745 kg/m^3

7. ลูกบาศก์อะลูมิเนียมตันก้อนหนึ่งมีด้านยาวด้านละ 2.00 cm ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 2700 kg/m^3 จงหามวลของลูกบาศก์นี้

ตอบ 21.6 g

8. จงหามวลและน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดฝ้ายหนึ่งลิตร (1000 cm^3) ซึ่งมีความหนาแน่น 926 kg/m^3

ตอบ มวล 0.926 kg น้ำหนัก 9.08 N

9. ในการเคลือบดีบุกด้วยวิธีแบบอิเล็กโทรไลติกครั้งหนึ่งต้องการเคลือบให้ดีบุกหนา 7.50×10^{-5} cm จงหาว่าจะใช้ดีบุกมวล 0.500 kg เคลือบพื้นได้กว้างเท่าไร ความหนาแน่นดีบุกเท่ากับ 7300 kg/m^3

ตอบ 91.3 m^2

10. มวลของน้ำนมหนึ่งลิตรมีขนาดเท่ากับ 1.032 kg ไขมันเนยบริสุทธิ์ในน้ำนมมีความหนาแน่น 865 kg/m^3 และมีปริมาณเป็น 4 เปอร์เซ็นต์ของน้ำนมโดยปริมาตรพอดี จงหาความหนาแน่นของน้ำนมพร่องไขมัน

ตอบ 1.04×10^3 kg/m^3

11. ถ้านำวัตถุมวล 1000 kg แขวนที่ปลายสายเคเบิลที่ทำด้วยเหล็กกล้ายาว 10 m และมีพื้นที่หน้าตัด 0.50 cm^2 จงหาความเครียด ความเค้น และระยะยืด

ตอบ ความเครียดดึง 1.96×10^8 N/m^2 ความเค้นดึง 9.8×10^{-4} ระยะยืด 9.8×10^{-3} m

12. เครื่องไฮดรอริคใช้น้ำมัน 200 ลิตร จงหาปริมาตรของน้ำมันที่ลดลงเมื่อเพิ่มแรงกดเท่ากับ 100 atm ถ้าโมดูลัสเชิงปริมาตรของน้ำมันเท่ากับ 5.0×10^9 Pa

ตอบ -4.04×10^{-4} m^3

13. จากภาพที่ 9.6 ถ้าวัตถุดังกล่าวเป็นแท่งทองเหลืองที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.04 m^2 และหนา 1 cm จะต้องมีแรงขนานจากภายนอกมากระทำกี่นิวตัน ที่จะทำให้ขนาด Δx = 0.05 cm เมื่อโมดูลัสเฉือนของทองเหลืองเท่ากับ 0.35×10^{11} Pa

ตอบ 3.5×10^8 N

14. ท่อนเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกตันท่อนหนึ่งยาว 4.0 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.0 cm จงหาความยาวที่หดสั้นลงเมื่อมันต้องรับน้ำหนักบรรทุกของมวล 80000 kg
กำหนดให้ $Y = 1.9 \times 10^{11}$ Pa

ตอบ 2.6 mm

15. ความดันบรรยากาศมีค่าประมาณ 1.01×10^5 Pa จงหาว่าบรรยากาศออกแรงกระทำต่อพื้นที่ 2.0 cm^2 บนศีรษะคุณเท่าไร

ตอบ 20 N

16. หญิงคนหนึ่งมวล 60 kg ยืนอยู่บนกล่องลูกบาศก์เบาซึ่งมีขอบยาวด้านละ 5.0 cm กล่องวางอยู่บนพื้น จงหาขนาดของความดันที่กล่องกระทำต่อพื้น

ตอบ 2.4×10^5 N/m^2

เอกสารอ้างอิง

พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ และ วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ. (2549). **ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย เล่ม 1** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.

สมพงษ์ ใจดี. (2548). **ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย 1** (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมชูปถัมภ์. (2543). **ฟิสิกส์ เล่ม 1** (พิมพ์ครั้งที่ 2 ฉบับปรับปรุงแก้ไข). กรุงเทพฯ.

Douglas, C. G. (2009). **Physics for Sciectists & Engineers with Modern Physics** (4th ed.). United States of America. Pearson Education, Inc.

Halliday, D. , Resnick, R. , & Walker, J. (1997). **Fundamental of physics** (5th ed.). New York: John Wiley & Sons.

________ . (2001). **Fundamental of physics** (6th ed.). New York: John Willey & Sons.

________ . (2007). **Fundamental of physics** (8th ed.). New York: John Willey & Sons.

________ . (2011). **Fundamental of physics** (9th ed.). New York: John Willey & Sons.

Serway, R. A. (1996). **Physics for scientists & engineers with modern physics** (4th ed.). Philadelphia: Saunders College.

________ . (2008). **Physics for scientists & engineers with modern physics** (7th ed.). Philadelphia: Saunders College.