

บทที่ 2

ทฤษฎี

การนำทางธรรมชาติแบบลวดลายรีเคลมและเศษแผ่นฟิล์ม เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นยางที่นำมาใช้เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากวัสดุองค์ประกอบในการผสมนั้นมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อน จึงคาดว่าสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนภาพรวมของแผ่นยางนี้จะดีขึ้น

2.1 ความร้อนและอุณหภูมิ

ความร้อน (heat) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสสาร พลังงานความร้อนที่ถูกส่งออกมา มนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ล้วนมีประสาทสัมผัสหรือปฏิกิริยาตอบสนองที่ไวต่อความร้อน

ความรู้สึก บอกระดับของความร้อนไม่ได้ ดังนั้น อุณหภูมิเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งใช้บอกระดับความร้อนโดยใช้อุปกรณ์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

ปัจจุบันได้กำหนดหน่วยของอุณหภูมิ เป็น เคลวิน (K) และองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

เมื่อวัตถุได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งโดยทั่วไปจะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้น จึงทำให้เกิดฟองอากาศและเพิ่มปริมาตรอิสระภายในวัสดุ การขยายตัวมีหลายรูปแบบ เช่น การขยายตัวตามเส้น การขยายตัวตามพื้นที่ การขยายตัวตามปริมาตร เป็นต้น

2.2.1 การขยายตัวตามเส้น

พิจารณา เดิมวัตถุมีความยาว l_0 มีอุณหภูมิ t_0 เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มจนอุณหภูมิเป็น t และความยาวเป็น l_t ส่วนที่ยืดออกไป $\Delta l = l_t - l_0$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวเดิมและอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนไปดังสมการ

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t \quad (2.1)$$

โดยที่ α เป็นค่าคงที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น (Linear expansion coefficient)

2.2.2 การขยายตัวตามพื้นที่

พิจารณาวัตถุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง a ยาว b ที่อุณหภูมิใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\text{Area} = ab = [a_0 (1 + \alpha \Delta t)] [b_0 (1 + \alpha \Delta t)] \quad (2.2)$$

$$\text{Area} = a_0 b_0 (1 + 2 \alpha \Delta t + (\alpha \Delta t)^2) \quad (2.3)$$

$$\text{Area} = A_0 (1 + 2 \alpha \Delta t); (\alpha \Delta t)^2 \approx 0 \quad (2.4)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามพื้นที่ มีค่าเท่ากับ 2α

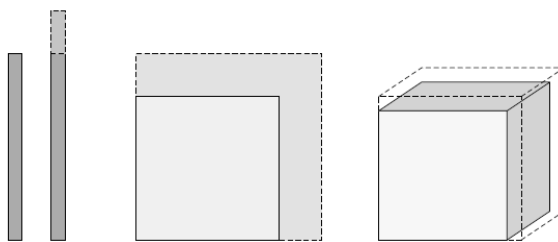
2.2.3 การขยายตัวตามปริมาตร

พิจารณาของแข็งที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง ปริมาตรเดิม V_0 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเป็น Δt สามารถหาปริมาตรใหม่ได้ดังสมการ

$$V_t = V_0 (1 + \beta \Delta t) \quad (2.5)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตร เท่ากับ $\beta = 3\alpha$ โดยที่

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{(V_t - V_0)}{\Delta t} = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.1 แสดงการขยายตัวตามเส้น ตามพื้นที่และตามปริมาตร

2.3 ความเค้นที่เกิดจากความร้อน

แท่งวัตถุที่ถูกตรึงไว้ปลายทั้งสองด้วยความยาว l_0 มีพื้นที่ A ถูกดึงทำให้ความยาวเปลี่ยนไป Δl เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงดันหรือแรงดึง F ขึ้นในวัตถุนั้น ทำให้เกิดความเค้นดึงหรือความเค้นอัดขึ้น เรียกว่าความเค้นที่เกิดจากความร้อน (thermal stress)

$$\text{ความเครียด} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha(t - t_0) = \alpha \Delta t \quad (2.7)$$

$$\text{จากค่ามอดูลัสของยังของวัตถุ} = Y = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (2.8)$$

$$\text{ความเค้นเกิดจากความร้อน} = \frac{F}{A} = Y \alpha \Delta t \quad (2.9)$$

2.4 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal Properties of Polymer)

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสายโซ่ยาว มีพันธะคู่ โดยสายโซ่โมเลกุลสามารถขยับตัวได้หลายระดับ จึงสามารถดูดซับพลังงานที่ผ่านเข้ามาได้ พอลิเมอร์จึงเป็นฉนวนความร้อนที่ดี การจัดเรียงตัวให้มีความเป็นระเบียบทุกบริเวณจึงทำได้ยาก พอลิเมอร์จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ 100% เหมือนสารประกอบโมเลกุลเล็กทั่วไป สามารถจำแนกพอลิเมอร์ตามปริมาณผลึกได้ 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) คือ พอลิเมอร์ที่ไม่มีบริเวณที่เป็นผลึกเลยและพอลิเมอร์กึ่ง

ผลึก (semi-crystalline polymer) ซึ่งประกอบด้วยผลึกบางส่วน ปริมาณผลึกในพอลิเมอร์นี้ส่งผลถึงสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point temperature, T_m) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวคล้ายกับการหลอมเหลวของของแข็งชนิดอื่นและสมบัติทางความร้อนที่สำคัญอีกประการของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)

ตาราง 2.1 ค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (ชูศักดิ์, 2554)

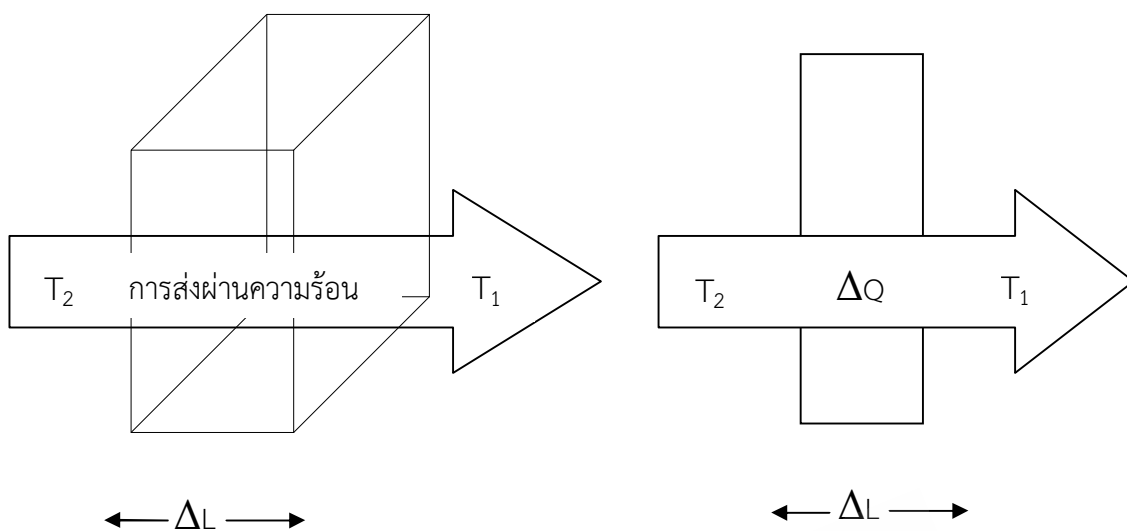
Polymers	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)
High Density Polyethylene (HDPE)	-90	137
Low Density Polyethylene (LDPE)	-110	115
Polypropylene (PP)	-18	175
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	-97	327
Polyvinyl chloride (PVC)	87	212
Polystyrene (PS)	100	-
Polycarbonate (PC)	150	265
Nylon 6,6	57	265

2.5 การส่งผ่านความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งจะส่งผ่านหรือถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการส่งผ่านความร้อนอาจจำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการส่งผ่านหรือไม่จำเป็นก็ได้ การถ่ายเทความร้อนมีสามแบบคือ การนำ (conduction) การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiation)

2.5.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ความร้อนจะไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูง โดยไหลผ่านตัวกลางซึ่งเชื่อมต่อสู่แหล่งที่มีระดับอุณหภูมิต่ำกว่า การนำความร้อนเป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปในเนื้อวัสดุ เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ โดยที่เนื้อวัสดุหรือตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ อัตราการส่งถ่ายพลังงานแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัด A ผลต่างอุณหภูมิ ΔT และแปรผกผันกับความหนาของตัวกลาง ดังรูป



ภาพที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทพลังงานความร้อน

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta L} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta L} \quad (2.10)$$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อน (thermal conductivity)

2.5.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยมีตัวกลางพาความร้อนดังกล่าวไป การพาความร้อนอาจเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น อากาศบริเวณใกล้พื้นโลกในเวลากลางวันจะได้รับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นดิน ทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลงจึงลอยตัวพาความร้อนขึ้นจากพื้นดิน อากาศส่วนที่เย็นกว่าจะไหลมาแทนที่ เป็นต้น

2.5.3 การแผ่รังสี (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ความร้อนจะถูกส่งไปแบบคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อไปกระทบวัตถุใดพลังงานบางส่วนอาจสะท้อน บางส่วนอาจผ่านทะลุส่วนที่เหลือ จะถูกดูดกลืนเข้าสู่ภายในวัตถุ

2.6 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุนั้น นอกจากจะได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัตถุด้วยและสมบัติที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย

2.6.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity; k)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัตถุใดๆ ซึ่งจะแปรผันตรงกับปริมาณความร้อนและความหนา แต่จะแปรผกผันกับความต่างระวางอุณหภูมิทั้งสองด้าน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีหน่วยในระบบ SI คือ W/m.K

2.6.2 การนำความร้อน (Thermal conductance; C)

การนำความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่แปรผันตรงกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและแปรผกผันกับความหนาของพื้นที่ 1 หน่วย มีหน่วยในระบบ SI คือ W/m²K

2.6.2.1 กฎเบื้องต้นของการนำความร้อน

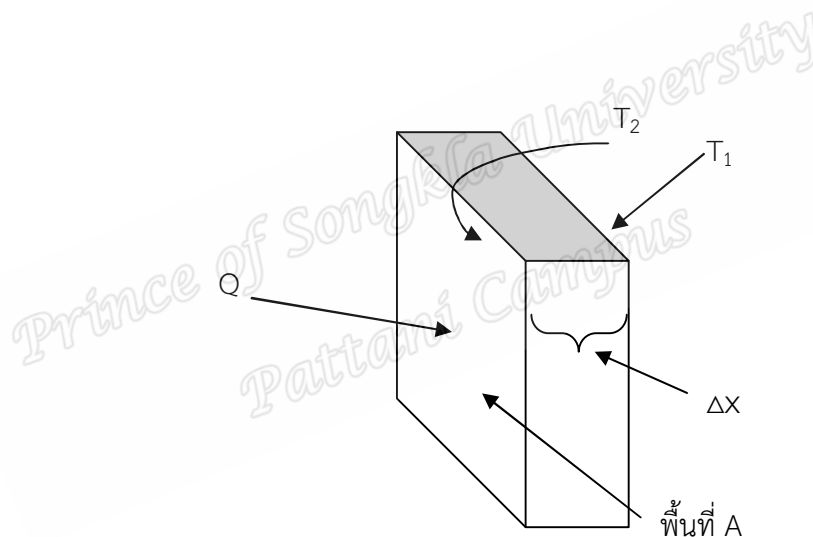
ความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทโดยการนำจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ผ่านตัวกลางที่มีพื้นที่ A ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ ดังรูปที่ 2.1 วัสดุที่มีความหนา Δx ผิวด้านหนึ่งมีอุณหภูมิตั้งที่ T_1 ส่วนอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิตั้งที่ T_2 ซึ่งถ้าทำให้อุณหภูมิตั้งที่ T_1 สูงกว่าผิวด้านตรงข้าม T_2 แล้ว จะได้

$$Q = kAt \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.11)$$

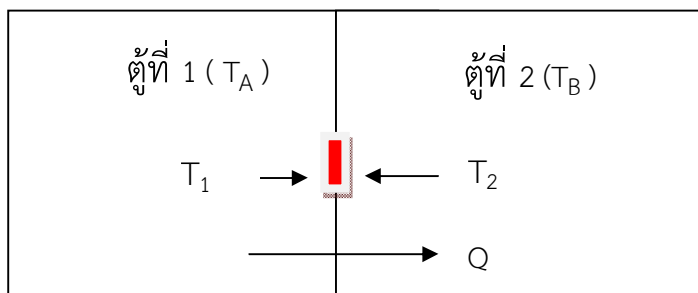
$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad ; \quad q = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} \quad (2.12)$$

โดยที่

- Q คือ ปริมาณความร้อนความร้อนทั้งหมด (J)
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)
- A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของฟลักความร้อน (m^2)
- ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวทั้งสอง (K)
- q คือ Heat flux (W/m^2)
- x คือ ความหนาของวัตถุ (m)



ภาพที่ 2.3 การนำความร้อนของวัตถุผ่านเนื้อวัสดุ พื้นที่ A หนา Δx



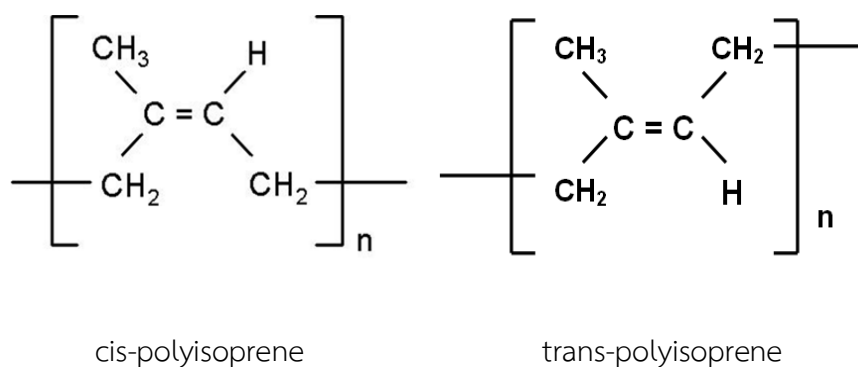
ภาพที่ 2.4 แผนผังตำแหน่งอุณหภูมิของชุดทดลองสมมติการเป็นฉนวน

ตาราง 2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (ประยูร สุรินทร์, 2544)

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)
อะลูมิเนียมบริสุทธิ์	201
ทองเหลือง	110
ทองแดง	385
เหล็กหล่อสีเทา	75
ตะกั่ว	35
เงิน	419
เหล็กผสมคาร์บอนต่ำ	63
ดีบุก	65
สังกะสี	111
ไนลอน	0.25
พอลีสไตรีน	0.08
ยาง	0.15
ไม้	0.15

2.7 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติที่ได้จากยางพาราฮีเวียบราซีเลียสซิส (*Hevea brasiliensis*) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบหลักร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบที่เหลือเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออินทรีย์อื่นๆ เช่น ซีลี้า และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น มีหน่วยซ้ำกันเป็นไอโซพรีน (C_5H_8) ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 g/mole โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด cis-isomer มากกว่า 99.99% และมี trans-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงเรียกกยางธรรมชาติว่า cis-1, 4- polyisoprene



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา *Hevea brasiliensis* และ *Guayule* อยู่ในรูป cis-form ส่วนยางที่ได้จากยางชนิด Gutta – percha และ Balata อยู่ในรูป trans-form คำว่า cis และ trans ต่างกันตรงความสามารถในการเรียงตัวให้เป็นระเบียบ ทำให้เกิดการตกผลึกคือ trans-form จะตกผลึกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง ส่วน cis-form เมื่อโมเลกุลจัดตัวจะทำให้เกิดการตกผลึกบางส่วน ดังนั้น trans-form จะแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสมบัติเป็นยาง แต่ cis-form ยังมีสมบัติเป็นยาง

จากสูตรโครงสร้างของยาง จะเห็นว่ายางมีพันธะคู่และพันธะเดี่ยวอยู่ในโมเลกุล ลักษณะคล้ายว่ามีส่วนเป็นของแข็งและส่วนอ่อนอยู่ในโมเลกุล และการจัดเรียงตัวเป็นโมเลกุลยาวแบบนี้ ทำให้ยางมีสมบัติยืดหยุ่นได้ การที่มีพันธะคู่ ทำให้ไฮโดรเจนตรงใกล้พันธะนั้นแข็งแรงและเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับสารประกอบกำมะถัน หรือ peroxide ได้ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง methyl group เป็นกลุ่มที่ส่งอิเล็กตรอนเข้าไปยังพันธะคู่ จึงเป็นตัวกระตุ้นให้พันธะคู่แสดงประสิทธิภาพแรงขึ้น ก็ยิ่งทำให้ไฮโดรเจนตรงใกล้พันธะคู่ มีสถานะแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติจึงทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถันหรือ peroxide ได้ไว

2.8 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

การรีเคลมเป็นกระบวนการเปลี่ยนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว (เกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ) โดยใช้สารเคมีและความร้อนตัดพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง ให้เกิดเป็นยางที่มีสมบัติที่ไหลและขึ้นรูปใหม่ได้ อย่างไรก็ตามยางรีเคลมที่ถูกนำมาวัลคาไนซ์ใหม่จะมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ายางใหม่ ดังนั้นยางรีเคลมจึงมักจะถูกนำไปผสมร่วมกับยางใหม่เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมให้ดีขึ้น

โดยทั่วไปยางล้อหนึ่งเส้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นยางร้อยละ 50-55 เขม่าดำร้อยละ 30 น้ำมันร้อยละ 8-10 และสารเคมีอื่นๆ ร้อยละ 6-8 การผสมยางรีไซเคิลลงไปใหม่ๆ จะไม่ทำให้สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป แต่จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

2.9 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีนผลิตจากแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่าง ๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

2.9.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

LDPE เป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (0.910 - 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุกรมอิสระมีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อการกรอกรอบแตก มีความนิ่ม ความใสแต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP (polypropylene, สัญลักษณ์เลข 5) โครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งสาขา (branching) มากกว่าโครงสร้างทางเคมีของ HDPE (high-density polyethylene, สัญลักษณ์เลข 2) จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำกว่า และมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE LDPE ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง 80°C และทนอุณหภูมิสูงถึง 95°C ในช่วงสั้น ๆ) แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (autoclave) เท่าพลาสติกชนิด PP และทนต่อสารเคมีน้อยกว่า HDPE เริ่มหลอมตัวที่ 120°C ทนความเย็นได้ถึง - 50°C ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ LDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสงมีความลื่นมันในตัวมีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้

2.9.2 การนำไปใช้

LDPE มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่างๆ เช่น วัสดุสำหรับบรรจุหีบห่ออาหาร ซองอาหาร ถุงใส่ของ และเคลือบด้านในของถังกระดาษ

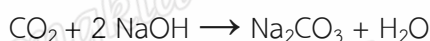
2.10 โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือสารก่อกอง (Sodium bicarbonate)

ผงฟูมีชื่อเรียกทางเคมีว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (sodium bicarbonate or sodium hydrogen carbonate) เป็นสารประกอบที่มีสูตรทางเคมี NaHCO_3 ผงฟูมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีโครงสร้างเป็นผลึก แต่ปรากฏในรูปผงละเอียด มีคุณสมบัติเป็นเบส ผงฟูมีชื่อทางการค้าที่เรียกกันทั่วไปหลายชื่อด้วยกัน เช่น เบรกกิ้งโซดา (baking soda) เบรดโซดา (bread soda) คุกกิ้งโซดา (cooking soda) และ ไบคาร์บอเนตโซดา (bicarbonate of soda)

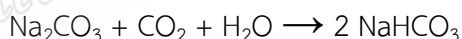
2.10.1 กระบวนการผลิตโซเดียมไบคาร์บอเนต

NaHCO_3 เตรียมได้จากกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process) โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมคาร์บอเนตและน้ำ



2. จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนตก็จะได้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต หรือผงฟูตกตะกอนลงมาเมื่อมีความเข้มข้นมากเพียงพอ

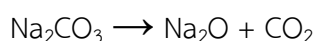


2.10.2 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน

เมื่อผงฟูได้รับความร้อนมากกว่า 70°C จะค่อยๆ สลายตัวไปเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปฏิกิริยาการสลายตัวนี้เกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิ 250°C



หากเผาโซเดียมคาร์บอเนตต่อที่อุณหภูมิ 1000°C ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์



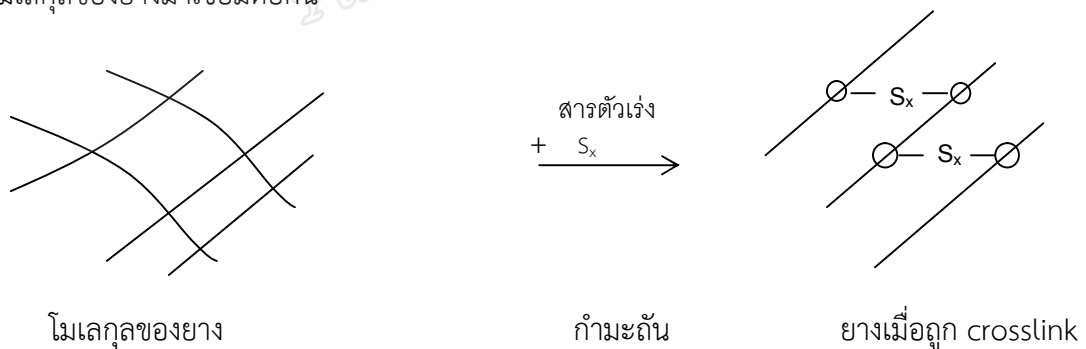
2.10.3 การนำไปใช้

ที่พบได้ทั่วไปคือใช้ในการทำอาหาร ทำเบเกอรี่ ซึ่งผงฟูนี้จะใช้เป็นแหล่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการสลายตัว ในขั้นตอนการอบเบเกอรี่ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายใน ทั้งนี้สามารถผสมผงฟูเป็นส่วนประกอบของเบเกอรี่ชนิดต่าง ๆ และสามารถทิ้งส่วนผสมนี้ไว้โดยที่ไม่เกิดก๊าซ CO₂ ก่อนขั้นตอนการอบได้ นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพสระว่ายน้ำ หรือตู้ปลาให้มีความเป็นกลาง เนื่องจากการเติมคลอรีนที่มากเกินไปทำให้สระว่ายน้ำมีความเป็นกรดมากเกินไป

2.11 การวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน

การวัลคาไนซ์ คือขบวนการเปลี่ยนแปลงที่อยู่สภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล ซึ่งเรียกว่าเกิดการ crosslink

การวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ สารที่นิยมใช้วัลคาไนซ์จะเป็นกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) และเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (พรพรรณ, 2527) โดยเมื่อใส่กำมะถันในยางแล้วนำยางมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว และไม่ละลายในตัวทำละลายเป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน



ภาพที่ 2.6 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2527)

2.12 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

การวัดความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) จัดเป็นวิธีที่ง่ายในการตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของยาง ยางผสมสารเคมี หรือสารเคมีต่างๆที่ใช้ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายสะดวกและไม่ต้องการเครื่องมือที่ซับซ้อน สามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าเชิงทฤษฎีได้

2.12.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ดังนั้นความหนาแน่นจึงเป็นค่าที่บอกปริมาณเนื้อสารชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรสารเนื้อเดียวกันจะมีความหนาแน่นที่สามารถใช้บอกชนิดของวัตถุได้ ความหนาแน่นของสารจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพราะการเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ปริมาตรของสารเปลี่ยนแปลงไป หน่วยมาตรฐานสากลของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หน่วยปฏิบัติที่นิยมใช้คือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.12.2 การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ

วิธีนี้ใช้หลักการคิมิตีส์ที่ว่า แรงพยุงของของเหลวมีค่าเท่ากับมวลของของเหลวที่ถูกแทนที่เมื่อชั่งวัตถุในของเหลวนั้นจะทำให้สามารถหาปริมาณของวัตถุได้ดังนี้

ชั่งวัตถุในอากาศได้ W กรัม

ชั่งในน้ำได้ W_1 กรัม

น้ำหนักวัตถุหายไปในน้ำเท่ากับ $W - W_1$ กรัม ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัตถุ
นั้นที่ถูกแทนที่อยู่

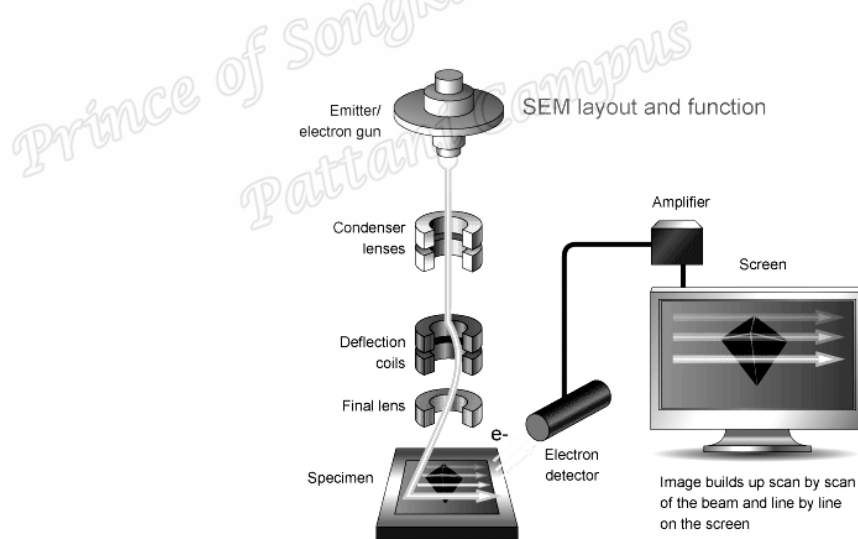
$$\text{ดังนั้น ปริมาตรวัตถุ } V = \frac{W - W_1}{d_w} \quad (2.13)$$

$$\text{นั่นคือ } \text{ถ.พ. ของวัตถุ} = \frac{W}{(W - W_1)_1} \times d_w \quad (2.14)$$

เมื่อ d_w เป็นความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ $t^\circ\text{C}$

2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากและเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตรและให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 10^5 เท่าและสามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง SEM (Nada, 2015)

2.14 สมบัติการต้านการดึง (Tensile test)

สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรง dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่นกรณีที่มี

เป็นยางก็จะได้จากการตัดแผ่นยางเป็นรูป dumbbell (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ในเครื่องอัดเข้า)

ในขณะที่ทดสอบจะใช้เครื่อง Universal testing machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีการรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสถานะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนำมาคำนวณค่า tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.14.1 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ (deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำซึ่งคือการตอบสนองของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากระทำต่อวัสดุนั้นและทำให้มีการเคลื่อนที่ภายในเนื้อของวัสดุนั้น รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูป dumbbell สำหรับการทดสอบแรงดึง โดยในการ คำนวณค่าความเครียด (strain) จะใช้ค่า Δl ต่อ l_0 ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.15)$$

โดยที่

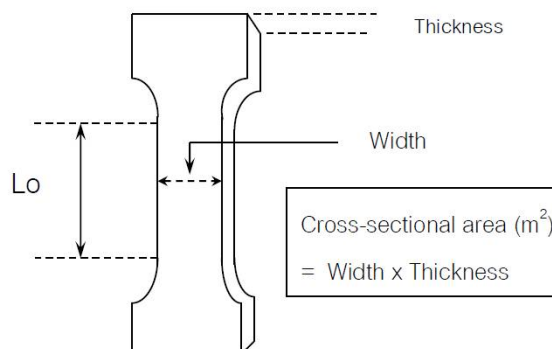
- ε คือ ความเครียด
- Δl คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)
- l_0 คือ ความยาวเริ่มต้น (m)

การเปลี่ยนรูปของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

2.14.1.1 การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะคงรูปร่างเดิมเอาไว้หรือวัสดุจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมเมื่อหยุดให้แรงกระทำ

2.14.1.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น กล่าวคือ เมื่อมีแรงกระทำต่อ

วัสดุให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะไม่เคลื่อนที่กลับเข้ามาในตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 2.8 แสดงขนาดและรูปทรงของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

2.14.2 ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือ แรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ว่าการวัดแรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วความเค้นมักถูกกล่าวถึงในแง่ของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เนื่องจากแรงภายในเนื้อวัสดุคือปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ซึ่งแรงทั้งสองนี้มีขนาดเท่ากัน สามารถคำนวณหาค่าความเค้นได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.16)$$

โดยที่

- σ คือ ความเค้น (MPa)
- F คือ แรงที่มากระทำต่อวัสดุ (N)
- A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

โดยทั่วไปแล้วความเค้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับแรงภายนอกที่มากระทำ คือ

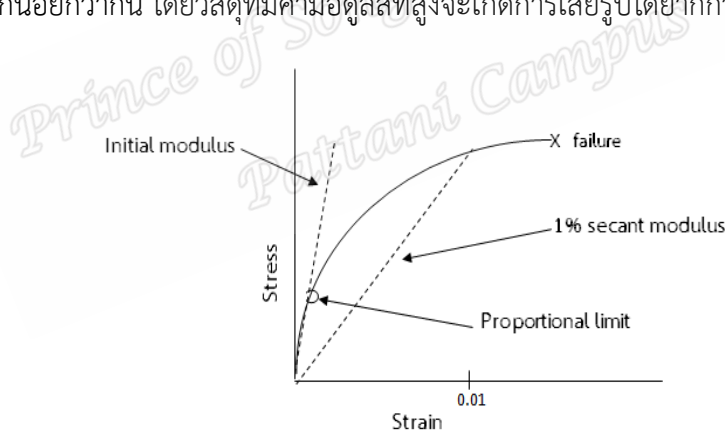
2.14.2.1 ความเค้นแรงดึง (tensile stress) เมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามให้วัสดุยืดออกและแยกออกจากกัน

2.14.2.2 ความเค้นแรงกด (compressive stress) เมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามกดให้วัสดุหดตัวลง

2.14.2.3 ความเค้นแรงเฉือน (shear stress) เมื่อมีแรงมากระทำขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านกันโดยที่ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ของแรงเฉือนและพื้นที่ภาคตัดขวางที่ขนานกับแรงเฉือนที่มากระทำ

2.14.3 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)

มอดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ จะได้จากการคิดคำนวณจากกราฟในช่วง linear หรือช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติก (ช่วงการยืดตัวหรือ strain น้อยๆ) และบางครั้งจะเรียกค่ามอดูลัสในแบบดังกล่าวว่า Young's modulus หรือ initial modulus นอกจากนี้ยังมีค่ามอดูลัสอีกลักษณะหนึ่งคือ secant modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่างๆ ในเส้นกราฟ (รูปที่ 2.9) ค่ามอดูลัสยังสามารถบอกแนวโน้มว่าวัสดุชนิดใดมีความต้านทานต่อการเสียรูปมากน้อยกว่ากัน โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่สูงจะเกิดการเสียรูปได้ยากกว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำ



ภาพที่ 2.9 การหาค่ามอดูลัสในแบบต่างๆ

2.15 สมบัติการไหล (Rheology)

คำว่าวิทยาศาสตร์การไหล (Rheology) มีที่มาจากภาษากรีก โดยคำว่า rheo หมายถึง การไหล Bingham และ Crawford ได้เสนอแนะว่าเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแข็ง ความหนืด (viscosity) จึงเป็นความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ความหนืดที่สูงขึ้นก็จะมี ความต้านทานต่อการไหลมากขึ้นด้วย (สมบัติ, 2549) ของเหลวธรรมดา

สามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ ในขณะที่สารกระจายตัวที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีคุณสมบัติการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

2.15.1 การวัดความหนืด

การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงกระทำ (F) ขนานกับพื้นผิว เรียกว่าแรงเฉือน (shear force) เมื่อพิจารณาถึงของไหล ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหลจะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหลได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหลชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็ว (dv/dx , S) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (shear stress, F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงขึ้น ก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม (สಾಯน์ท์และวิรัตน์, 2549) ดังนั้น อัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเฉือน ดังสมการ

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.17)$$

η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\eta = \frac{F'}{S} \quad (2.18)$$

เมื่อ

F' คือ แรงเฉือน (shear stress, τ) ต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น Pascal (Pa)

S คือ อัตราเฉือน (shear rate, γ) การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทาง dx (velocity gradient) มีหน่วยเป็น sec^{-1} หน่วยของความหนืดคือ poise

1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 poise=100 centipoise) ส่วนกลับของความหนืด เรียกว่า fluidity (ϕ)

2.15.2 ลักษณะการไหลของของไหล (Kinematic viscosity)

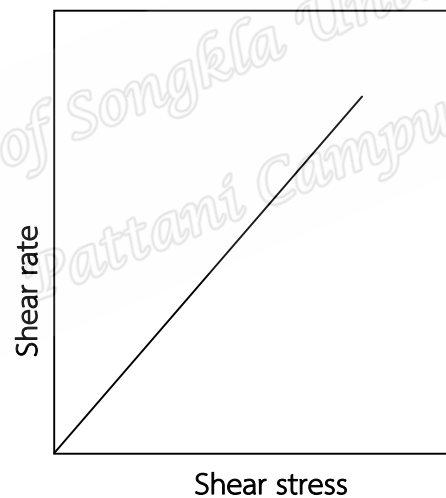
U.S.P จะกำหนดให้แสดงความหนืดในรูปของ kinematic viscosity นั่นคือค่า absolute viscosity (η) หารด้วยค่า density (ρ) ของของเหลวที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ หน่วย stoke (st)

$$\text{Kinematic viscosity} = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.19)$$

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

1. Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คืออุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ที่หลายๆ ค่า จะได้กราฟการไหล (Rheogram) ที่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำเนิด



ภาพที่ 2.10 กราฟการไหลแบบ Newtonian

2. Non Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งออกเป็น 4 แบบ

2.1 Pseudoplastic ของไหลที่เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนค่าความหนืดลดลงพฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น shear thinning (ส่ายันท์และวิรัตน์, 2549) เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

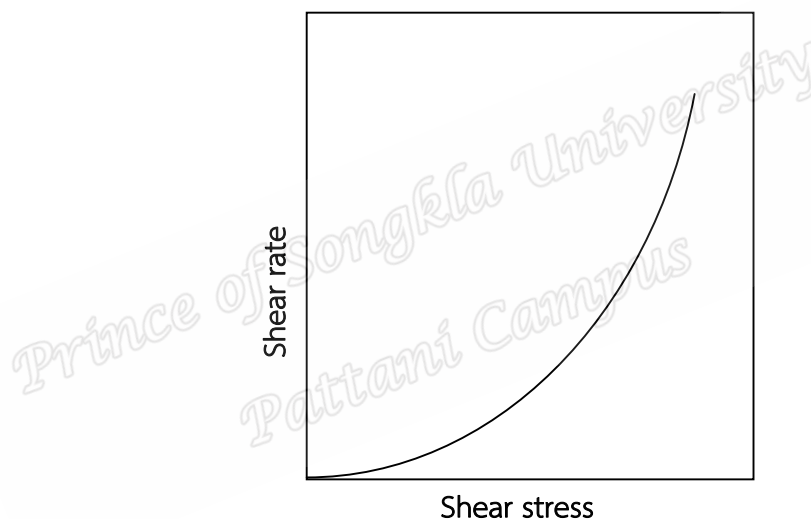
เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate หลาย ๆ ค่า จะได้กราฟไม่เป็นเส้นตรง ความหนืดของสารจะไม่คงที่ ดังนั้นในการเปรียบเทียบความหนืดของสารที่มีการไหลในรูปแบบนี้ต้องใช้การเปรียบเทียบหรือใช้สมการ exponential

หาก N มีค่า 1 ก็จะเท่ากับสมการการไหลแบบ Newtonian เมื่อค่า exponent เพิ่มมากกว่า 1 การไหลจะเป็นแบบ Pseudo plastic

เมื่อแปลงเป็น logarithmic จะได้

$$\log \dot{\gamma} = N \log \tau - \log \eta \quad (2.20)$$

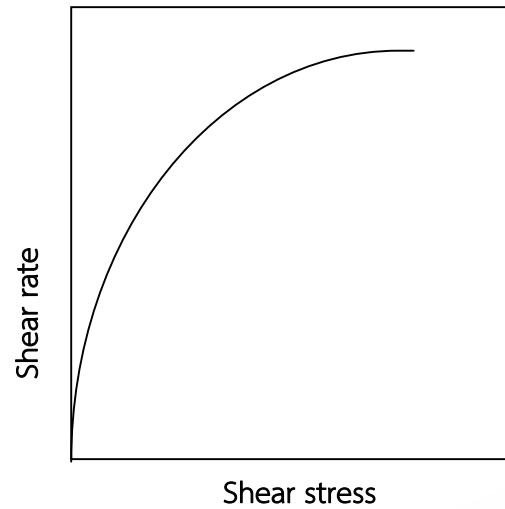
ถ้านำค่า shear stress และ shear rate มาพลอตบนกราฟ log จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน คือ N และจุดตัดแกน y คือ $-\log \eta$



ภาพที่ 2.11 กราฟการไหลแบบ Pseudoplastic

2.2 Dilatant ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น shear thickening ตัวอย่างเช่น ยาน้ำแขวนตะกอนที่มีความเข้มข้นของผงยาสูงกว่า 50% น้ำดินชั้น น้ำแป้ง เป็นต้น

เมื่อเขียนในรูปสมการที่ 2.20 จะได้ค่า N น้อยกว่า 1

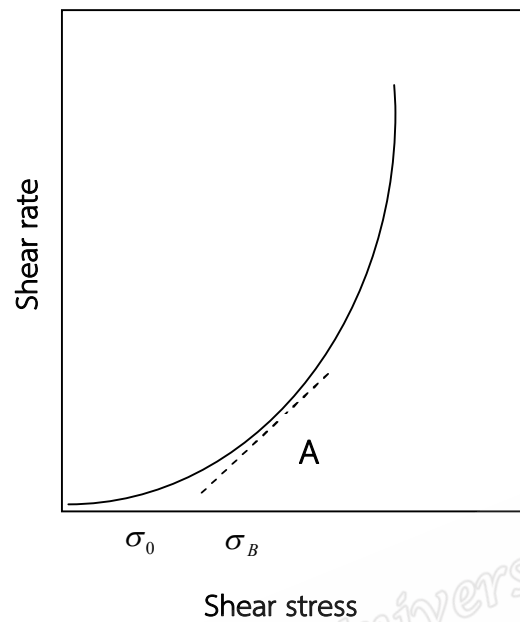


ภาพที่ 2.12 กราฟการไหลแบบ Dilatant

2.3 Bingham fluid ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงมากจนถึงจุดที่เรียกว่า yield value หรือ yield stress จึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian Fluid ตัวอย่างเช่น ยา สีฟัน น้ำเคลือบของเซรามิก นมช็อกโกแลต เป็นต้น

เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ที่หลายๆ ค่า จะได้กราฟการไหล ดังรูป เมื่อลากเส้นต่อจากจุด A ตัดแกน shear stress ที่ τ_B คือค่าของ yield value จากค่าความชันของกราฟ สามารถหาค่าความหนืดได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ได้ เป็น plastic viscosity (U) ตามสมการต่อไปนี้

$$U = \frac{\tau_0 - \tau_B}{\gamma} \quad (2.21)$$



ภาพที่ 2.13 กราฟการไหลแบบ Bingham fluid

2.4 Plastic ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุด yield stress ถึงจะเริ่มไหลได้และจะไหลแบบ Pseudoplastic หรือตามโมเดลของ Herschel-Buckley ตัวอย่างเช่น ซอสมะเขือเทศ สี ดินเหนียว มายองเนส เป็นต้น