

บทที่ 2

ทฤษฎี

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้ ธรรมชาติของเสียง และสมบัติของเสียง สมบัติเชิงเสียงของพอลิเมอร์ การดูดซับเสียง สมบัติเชิงพลวัตของการบิด ยาง ธรรมชาติ สารเคมีสำหรับยาง เส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติ เส้นใยจากลำต้นหมาก เส้นใยลูกตาล การวัดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 ธรรมชาติของเสียงและสมบัติของเสียง (Nature of sound and sound properties)

คลื่นเสียง เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุผ่านตัวกลาง เช่น อากาศเกิดการอัดตัว และขยายตัวของโมเลกุลอากาศและเกิดเป็นคลื่นเสียง ทำให้มนุษย์สามารถได้ยินเสียงที่เกิดจากสั่นของวัตถุ นอกจากอากาศนั้นแล้วยังมีสารอื่น ๆ ที่อยู่ในสถานะก๊าซ ของเหลว และของแข็ง สามารถเป็นตัวกลางให้เสียงเดินทางได้ แต่เสียงไม่สามารถเดินทางผ่านสุญญากาศได้ (กรมสวัสดิการ และแรงงาน, 2549)

2.1.1 อัตราเร็วของเสียง

อัตราเร็วเสียงขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน ได้แก่ ความหนาแน่น ความยืดหยุ่นและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุประกอบด้วยอุณหภูมิเป็นต้น โดยปกติเสียงเดินทางในของแข็งได้ดีที่สุด รองลงมาคือของเหลว และก๊าซตามลำดับ นอกจากนี้อัตราเร็วเสียงยังขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วเสียงจะมีค่ามากขึ้น สำหรับตัวกลางที่เป็นอากาศ อัตราเร็วเสียงที่อุณหภูมิใดๆ หาได้จาก

$$V_T = 331 + 0.6T \quad (2.1)$$

โดยที่ V_T คือ อัตราเร็วของเสียงที่อุณหภูมิเป็นเซลเซียส
 T คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

อัตราเร็วเสียงที่อุณหภูมิคงที่ สัมพันธ์กับความยาวของคลื่นและความถี่ของคลื่น คือ

$$v = f\lambda \quad (2.2)$$

โดยที่ f คือ ความถี่
 λ คือ ความยาวคลื่น

ตารางที่ 2.1 อัตราเร็วของเสียงที่อุณหภูมิ 25 °C

ตัวกลาง	อัตราเร็ว (m/s)
ก๊าซ	
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (0 °C)	258
อากาศ (15 °C)	346
แก๊สไฮโดรเจน	1,339
ของเหลว	
น้ำ	1,498
น้ำทะเล	1,531
ของแข็ง	
แก้ว	4,540
อะลูมิเนียม	5,000
แก้วเหล็ก	5,200

ที่มา: (Osswald, 1996)

2.1.2 ความเข้มเสียง

ความเข้มเสียงนิยามจากพลังงานที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดต่อเวลาที่เรียกว่ากำลัง (P , Watt) ต่อพื้นที่ทรงกลมที่แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ตรงกลาง ($4\pi R$) คือ

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มเสียง มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
 P คือ กำลังของแหล่งกำเนิดเสียง มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
 A คือ พื้นที่ที่เสียงตกกระทบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

หรือ

$$I \propto \frac{1}{R^2} \quad (2.4)$$

ระดับความเข้มเสียง (β) (เดซิเบล, dB) นิยามจากความเข้มเสียงสัมพันธ์ของความเข้มเสียงของมนุษย์เริ่มได้ยิน I_0 คือ

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.2 ระดับเสียงจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

แหล่งกำเนิดเสียง	ระดับเสียง (เดซิเบล, dB)	ผลการรับฟัง
การหายใจปกติ	10	แทบจะไม่ได้ยิน
การกระซิบแผ่วเบา	30	เจ็บบมาก
สำนักงานที่เจ็บบ	50	เจ็บบ
การพูดคุยธรรมดา	60	ปานกลาง
เครื่องดูดฝุ่น	75	ดัง
โรงงานทั่วไป, ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น	80	ดัง
เครื่องเสียงสเตอริโอในห้อง	90	ดัง
เครื่องเจาะถนนแบบอัดลม	90	ดัง
เครื่องตัดหญ้า	100	ดัง
ดิสโก้, การแสดงดนตรีประเภทร็อก	120	ไม่สบายหู
ฟ้าผ่าระยะใกล้	130	ไม่สบายหู
เครื่องดูบินไอพ่นกำลังขึ้นที่ระยะใกล้	150	เจ็บปวดในหู
จรวดขนาดใหญ่ที่กำลังขึ้นระยะใกล้	180	เจ็บปวดในหู

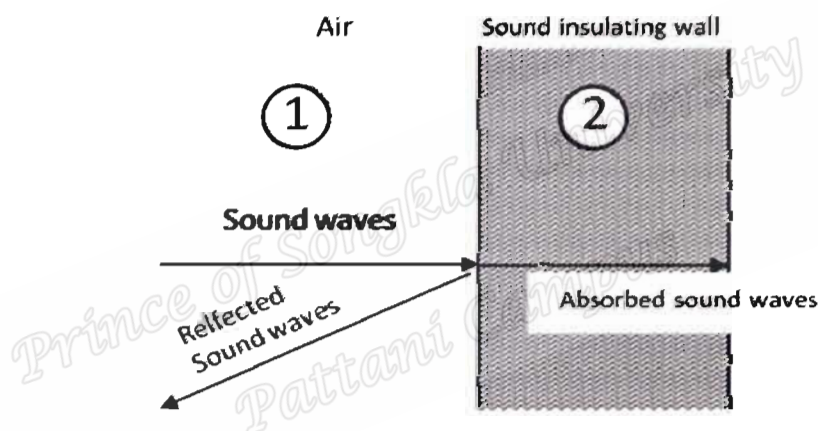
ที่มา: (Osswald, 1996)

2.2 สมบัติเชิงเสียงของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว มีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยย่อย (Monomer) ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) โดยมีโครงสร้างหลากหลาย เช่น พอลิเมอร์แบบเส้นพอลิเมอร์แบบกิ่ง และพอลิเมอร์แบบร่างแห ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกัน พอลิเมอร์จัดเป็นฉนวนกันเสียงที่ดี จึงได้มีการนำพอลิเมอร์มาใช้เป็นฉนวนกันเสียงในรูปแบบต่าง ๆ

2.2.1 การสะท้อนเสียง

การสะท้อนเสียงของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันนั้น มีความสามารถสะท้อนเสียงได้ไม่เท่ากัน การสะท้อนเสียงของพอลิเมอร์นั้นเป็นสมบัติคู่ของตัวกลางที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงการสะท้อนเสียงของพอลิเมอร์นั้นเป็นสมบัติคู่ของตัวกลาง (Osswald, 1996)

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.6)$$

$$R = \rho C_w \quad (2.7)$$

- เมื่อ R คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง
 Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ หรือสมบัติต้านทานเสียง
 ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ
 C_w คือ ความเร็วของเสียงในอากาศ

การสะท้อนเสียงของผนังนั้นสามารถแสดงได้ในเทอมของมวลผนัง M ความถี่ f และ Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของอากาศ

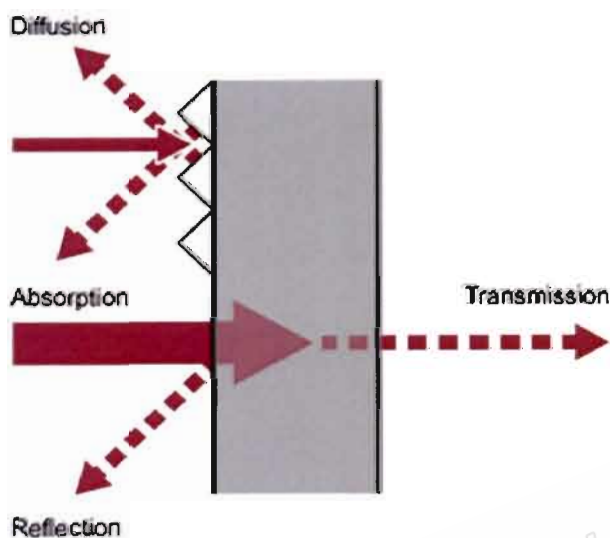
$$R = 20 \log \left[\frac{\pi f M}{Z_0} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อการสะท้อนเสียงมีค่าน้อย นั่นคือมีการส่งผ่านหรือการดูดกลืนมากขึ้น การสะท้อนเสียงมีค่าน้อย นั่นคือ เมื่อ $Z_1 \approx Z_2$ หรือการลด Z_2 โดยหลักการทางฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ (จากสมการที่ 2.8)

2.2.2 การดูดกลืนเสียง

การสะท้อนเสียงมีค่าน้อย เมื่อ $Z_1 \approx Z_2$ หรือการลด Z_2 โดยหลักการทางฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ การดูดกลืนหมายถึงพลังงานที่ผ่านเข้าไปในผิวแรกมีการลดลงไปเมื่อผ่านออกที่ผิวสองนั่นเอง ซึ่งสามารถวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนได้ โดยนิยามสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง α (α อัตราส่วนพลังงานที่ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ ต่อพลังงานที่ตกกระทบ) ดังแสดงในภาพที่ 1.1

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการดูดกลืนเสียง คือ ความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานเสียงและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นๆ โดยวัสดุที่สามารถดูดซับเสียงได้ดีจะเป็นวัสดุจำพวกเส้นใย (Fibrous) และวัสดุพรุน (Porous) เมื่อเสียงกระทบวัสดุใด ๆ เสียงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและส่งผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นทั้งนี้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุนั้นเป็นสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 (SciMath, 2560) ดัชนีที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงของวัสดุแต่ละชนิด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (Acoustic Absorption Coefficient, α) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาณพลังงานสะท้อนต่อปริมาณของพลังงานเสียงตกกระทบบนวัสดุนั้น ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 (มิ่ง และพงษ์ศักดิ์, 2549)



ภาพที่ 2.2 ปรากฏการณ์สะท้อน ดูดกลืน และส่งผ่านเสียงของวัตถุ (SciMath, 2560)

2.3 การดูดซับเสียง (Sound Absorption)

การดูดซับเสียง หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานเสียงและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นๆ โดยวัสดุที่สามารถดูดซับเสียงได้ดีจะเป็นวัสดุจำพวกเส้นใย (Fibrous) และวัสดุพรุน (Porous) เมื่อเสียงกระทบวัสดุใด ๆ เสียงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและส่งผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นทั้งนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบของวัสดุผสมนั้นเป็นสำคัญ

2.3.1 วัสดุดูดซับเสียง (Sound Absorber)

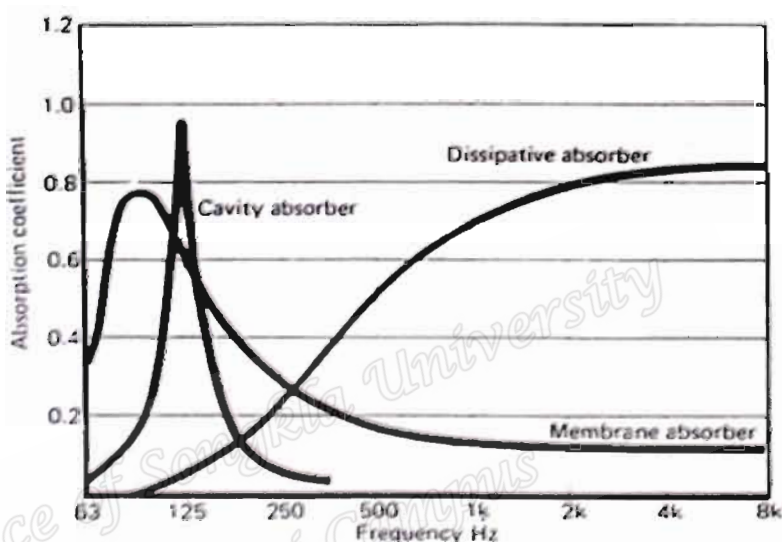
วัสดุดูดซับเสียง คือวัสดุที่ทำหน้าที่ดูดซับเสียง โดยเมื่อเสียงมาตกกระทบ จะมีการดูดซับเสียง ทำให้ไม่เกิดเสียงสะท้อนกลับ ซึ่งใช้แก้ปัญหาเสียงก้อง ลดเสียงสะท้อน ภายในอาคาร สำนักงาน ห้องประชุม ห้องอัดเสียงรวมถึงในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ในระบบ HVAC และในระบบ automotive โดยวัสดุดูดซับเสียงสามารถจำแนกประเภทออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

2.3.1.1 วัสดุดูดซับเสียงประเภทไม่มีรูพรุน (Non-Porous Absorber) เป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน โดยสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภทดังนี้

2.3.1.1.1 วัสดุดูดซับเสียงประเภทโพรงหรือช่อง (Resonator of Cavity Absorber) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะโพรง หรือช่องที่ขนาดแตกต่างกันในผนัง หรือโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งแต่ละช่องเรียกว่า Sound box การดูดซับเสียงจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sound box โดยประสิทธิภาพของการดูดซับเสียงของวัสดุชนิดนี้อยู่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz และ

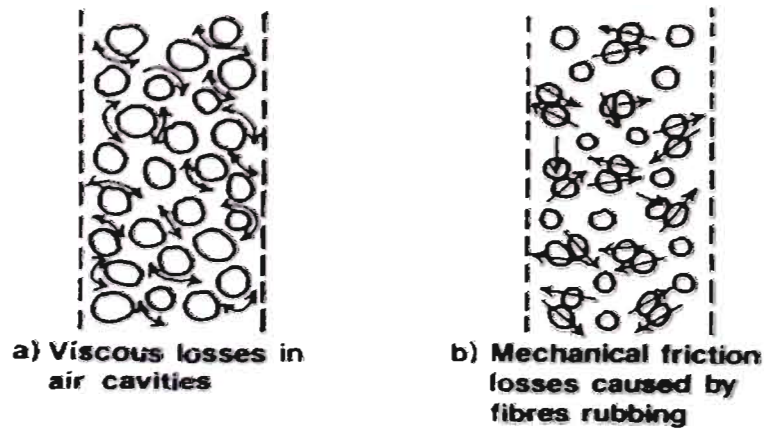
สามารถดูดซับเสียงได้ดีที่สุดในช่วงความถี่ 100-300 Hz และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 แต่หากมีการผสมวัสดุดูดซับเสียงชนิดอื่น เช่น โยแก้วหรือใยหินลงไปในห้องว่างภายใน sound box จำทำให้ความสามารถในการดูดซับเสียงมีช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น

2.3.1.1.2 วัสดุดูดซับเสียงประเภทเมมเบรน (Membrane Absorber) เป็นวัสดุที่มีผิวหน้าเป็นเมมเบรน เช่น ยิปซัมบอร์ด โดยวัสดุชนิดนี้จะสามารถดูดซับเสียงได้น้อยมาก และมีเสียงสะท้อนค่อนข้างสูง จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การดูดซับเสียงของวัสดุที่มีกลไกการดูดซับเสียงแบบต่าง ๆ (Sound Research Laboratories Ltd., 1991)

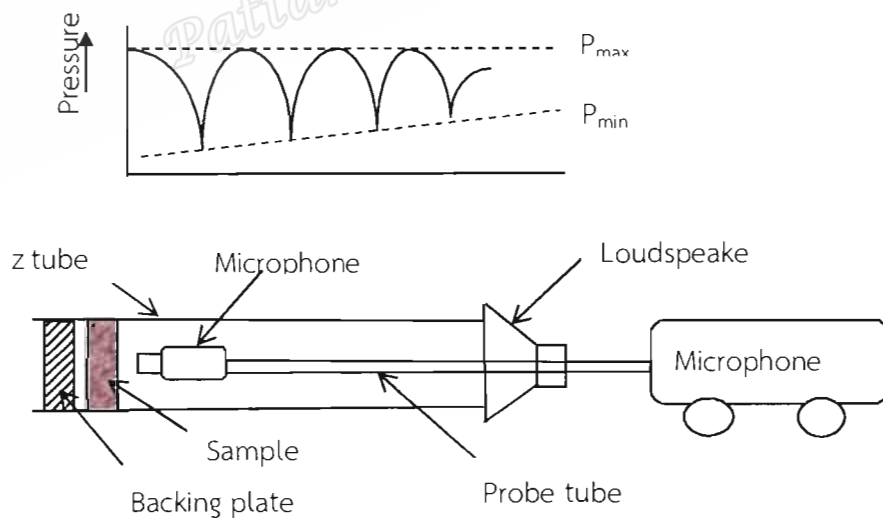
2.3.1.2 วัสดุดูดซับเสียงประเภทเส้นใย (Fiber) หรือวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Dissipative Absorber) เป็นวัสดุดูดซับเสียงที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยวัสดุเหล่านี้จะมีช่องว่างภายในซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1 mm ซึ่งต่ำกว่าขนาดความยาวของเสียงมาก ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงเป็นตัวกลางทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดีโดยกลไกการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุพรุน คือเมื่อเสียงตกกระทบบนวัสดุเหล่านี้โมเลกุลของอากาศจะเกิดการสั่นตัวภายในช่องว่างของวัสดุพรุน โดยมีความถี่ของการสั่นเท่ากับความถี่ของเสียงตกกระทบบน ซึ่งการสั่นตัวของโมเลกุลอากาศนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเสียงเนื่องจากการเสียดทานและความหนืด (Frictional and Viscous Loss) โดยมีการสูญเสียพลังงานแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงกลไกการสลายพลังงานเสียงเนื่องจากความหนืด (a) และแรงเสียดทาน (b)
(Malcolm, 1982)

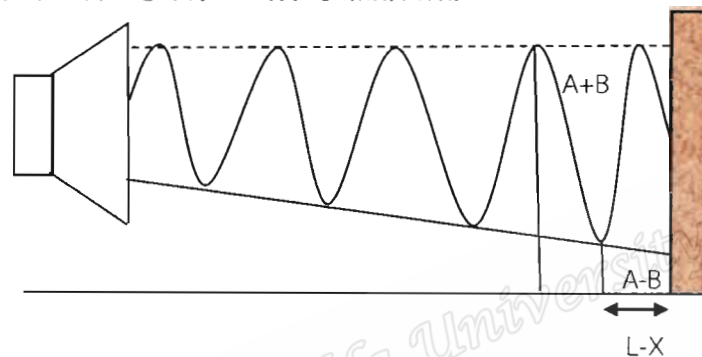
2.3.2 วิธีการวัดการดูดซับเสียงโดยใช้ท่อคลื่นนิ่ง (Impedance Tube Method)

ท่อคลื่นนิ่งประยุกต์ใช้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและวัดได้อย่างแม่นยำ ข้อดีของเครื่องมือนี้คือมีขนาดเล็ก สร้างง่ายและทดสอบที่ใช้มีขนาดเล็ก ลักษณะของเครื่องมือและวิธีการวัดแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของท่อคลื่นนิ่งและวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่เกิดการตกกระทบตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบ (Everest, 2006)

เสียงถูกส่งจากลำโพงซึ่งอยู่ที่ปลายท่อด้านหนึ่ง ส่วนปลายท่อด้านหนึ่งจะวางขึ้น ทดสอบไว้ สัญญาณของคลื่นนิ่งภายในท่อสามารถตรวจวัดได้จาก Microphone probe เมื่อปลาย ท่อข้างหนึ่งติดตั้งวัสดุดูดซับเสียง พลังงานงานเสียงที่ตกกระทบบางส่วนจะถูกดูดซับโดยวัสดุ นั้น ดัง แสดงในภาพที่ 2.6 ดังนั้นแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนจะมีขนาดไม่เท่ากับขนาดของแอมพลิจูดเดิม ใน ทำนองเดียวกัน วัสดุดูดซับเสียงนั้นจะทำให้เฟสของคลื่นสะท้อนเลื่อนไปด้วย แอมพลิจูดที่ความดัน สูงสุดหรือตำแหน่งปฏิบัพของความดัน มีค่าเป็น $A + B$ และแอมพลิจูดที่ความดันต่ำสุดหรือ ตำแหน่งบัพของความดัน มีค่าเป็น $A - B$ การวัดค่า A และ B โดยตรงนั้นทำได้ยาก แต่เราสามารถ วัดค่า $A + B$ และ $A - B$ ได้จากการใช้ท่อคลื่นนิ่ง ดังนี้



ภาพที่ 2.6 ลักษณะคลื่นเสียงที่ตกกระทบวัสดุดูดซับเสียง (ตาริกา, 2552)

นิยามอัตราส่วนของความดันสูงสุดต่อความดันต่ำสุดเป็น Standing wave ratio ; SWR

$$SWR = \frac{A + B}{A - B} \quad (2.9)$$

ซึ่งสามารถจัดสมการอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนเสียง (Sound power reflection coefficient; R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (2.10)$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ

B คือ แอมพลิจูดของคลื่นสะท้อน

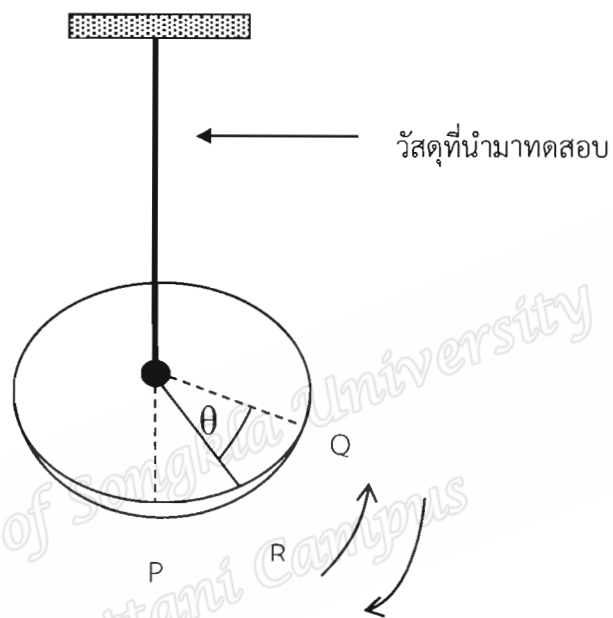
ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในการทดสอบเป็นดังสมการ

$$\alpha = 1 - R^2 = 1 - \frac{(SWR - 1)^2}{(SWR + 1)^2} \quad (2.11)$$

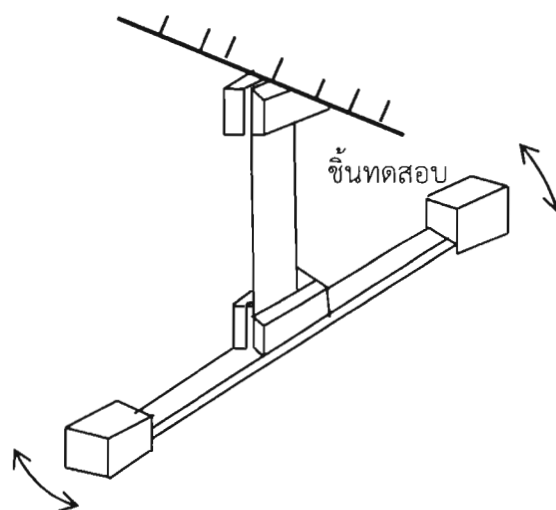
2.4 สมบัติเชิงกลแบบพลวัตของการบิด (Dynamic Mechanical Testing: Torsion)

สมบัติเชิงพลวัตของการบิด หมายถึง การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic test) กระทำได้โดยการเปลี่ยนรูปหรือให้แรงกระทำแก่ระบบที่มีค่าแปรตามเวลาหรือความถี่หรือคาบ

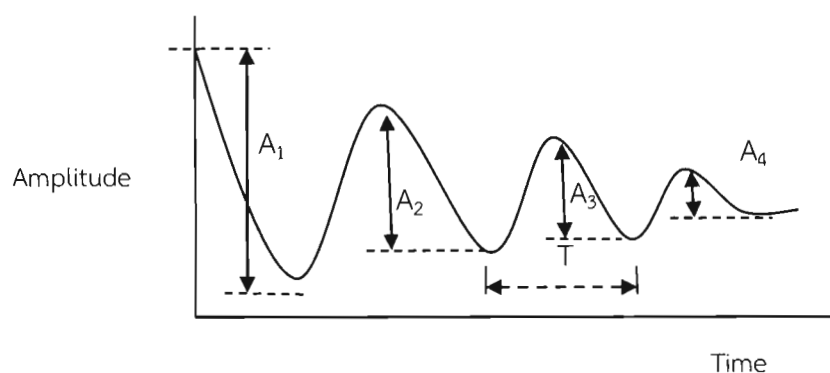
สำหรับการบิดไปมาอย่างอิสระของลูกตุ้มซึ่งติดกับวัสดุที่นำมาทดสอบ จะทำให้แอมพลิจูดของการบิดลดลงตามเวลา เนื่องจากวัสดุที่นำมาทดสอบจะเกิดการสูญเสียพลังงานจากการบิด ที่แสดงถึงสมบัติที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของวัสดุที่นำมาทดสอบนั้น



ภาพที่ 2.7 การบิดไปมาด้วยมุม θ น้อยๆ (ชั้นทดสอบเป็นแท่งกลม) (สมบัติ, 2551)



ภาพที่ 2.8 การบิดไปมาด้วยมุม θ น้อยๆ (ชั้นทดสอบเป็นแท่งกลม) (สมบัติ, 2551)



ภาพที่ 2.9 แอมพลิจูดของการแกว่งที่ลดลงตามเวลา (สมบัติ, 2551)

เมื่อมุมบิดที่มีค่าน้อยจะได้ว่า

$$\tau = -\kappa\theta \quad (2.12)$$

กำหนดให้

τ คือ ค่าทอร์ก

θ คือ มุมบิดไปมาที่มีค่าน้อย

κ คือ ค่าคงที่ Torsion Constant ที่แสดงถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่นำมาบิด (ซึ่งอาจเป็นวัสดุแท่งกลมหรือเป็นแถบแบน)

หรือ

$$\tau = I\alpha \quad (2.13)$$

กำหนดให้

I คือ ค่าความเฉื่อย

$$\tau = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

หรือ

$$\tau = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$-\kappa\theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

หรือ

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \kappa\theta = 0 \quad (2.14)$$

หรือ

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\kappa}{I}\theta = 0 \quad (2.15)$$

ก็คือสมการ Simple Harmonic Motion โดย

$$\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{I}} \text{ (ความถี่เชิงมุม)} \quad (2.16)$$

และคาบเวลา

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad (2.17)$$

หรือ

$$T^2 = (2\pi)^2 \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$I = I_0 + 2mx^2$$

$$T^2 = \frac{(2\pi)^2}{\kappa} (I_0 + 2mx^2) \quad (2.19)$$

การทดลองจะต้องหา I_0 ก่อนเสมอ จากนั้นสามารถเลือกตำแหน่ง x ที่พอเหมาะเพื่อให้การแกว่งที่เกิดขึ้นสามารถวัดค่ามุม θ ได้สำหรับการทดลองสูตรยางต่าง ๆ ที่ต้องการ จากสมการ (2.22) สามารถเขียนได้ในรูปสมการเชิงซ้อนได้คือ

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \kappa(G' + iG'')\theta = 0 \quad (2.20)$$

กำหนดให้ K คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับรูปร่างของวัสดุที่นำมาทดสอบ ($K \approx \kappa G^*$)

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_0 e^{-\varepsilon t} \times e^{i\omega t} \\ &= \theta_0 e^{(i\omega - \varepsilon)t}\end{aligned}\quad (2.21)$$

ε คือ ค่าแสดงสมบัติการแกว่งของวัสดุที่ทดสอบ (attenuation factor)

θ_0 คือ มุมแกว่งสูงสุดของการแกว่งครั้งแรกของการเริ่มนับ

$e^{i\varepsilon t}$ คือ เทอมแสดงสมบัติการแกว่งจากการทดลอง

เมื่อแทนค่าสมการ (2.21) ในสมการ (2.20) แล้วจะได้

$$I(\varepsilon^2 - \omega^2 - 2i\omega\varepsilon) + kG' + iG'' = 0 \quad (2.22)$$

เมื่อแยกจำนวนจริงและจินตภาพจะได้ว่า

$$G' = \frac{I}{k}(\omega^2 - \varepsilon^2) \quad (2.23)$$

$$G'' = \frac{2\varepsilon I\omega}{k} \quad (2.24)$$

การสั่นจะกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมทุกเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็นคาบ T คือ

$$e^{i\omega t} = e^{i\omega(t+T)} \quad (2.25)$$

นิยาม Logarithmic Decrement , Δ

$$\begin{aligned}\Delta &= \ln\left[\frac{\theta_1}{\theta_2}\right] = \ln\left[\frac{\theta_0 e^{-\varepsilon t} \times e^{i\omega t}}{\theta_0 e^{-\varepsilon(t+T)} \times e^{i\omega(t+T)}}\right] = \varepsilon T \ll 1 \\ &= \ln\left[\frac{\theta_n}{\theta_{n+1}}\right]\end{aligned}\quad (2.26)$$

และ

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.27)$$

แทนค่า (2.27) (2.26) และ (2.24)

$$G' = \frac{I}{kT^2} (4\pi^2 - \Delta^2) \quad (2.28)$$

$$G'' = \frac{I}{kT^2} \Delta 4\pi \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) จะได้ว่า

$$\frac{G''}{G'} = \frac{4\pi\Delta}{4\pi^2 - \Delta^2} \quad (2.30)$$

$\frac{G''}{G'} = \tan\delta$ ซึ่งแสดงสัดส่วนการเกิดปริมาณความร้อน หรือการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้น

ขณะการแกว่ง นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta = \pi \tan\delta$

โดย K คือ shape factor หาได้โดย

$$k = \frac{l}{3bh^2(1-0.63h/b)} \quad \text{สำหรับวัตถุสี่เหลี่ยม} \quad (2.31)$$

$$\frac{h}{b} < 0.5$$

b คือ ความกว้างของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

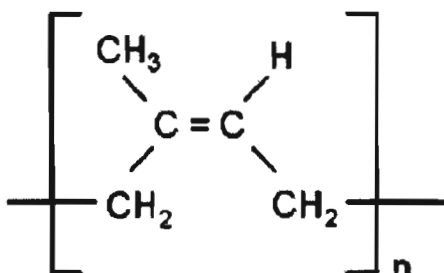
h คือ ความหนาของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

l คือ ระยะระหว่างการยึดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

2.5 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นพืชรubber Hevea brasiliensis ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มน้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_n) สูง ประมาณสองแสนถึงห้าแสน และมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 g/cm^3 โครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยหน่วยซ้ำคือ ไอโซพรีน (C_5H_8) (Isoprene) โดยมีน้ำหนักตั้งแต่ $50,000 - 3,000,000 \text{ g/mol}$ การจัดเรียงตัวโมเลกุลของยาง

ธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด cis-isomer มากกว่า 99.99% และมี trans- isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงเรียกยางธรรมชาติว่า cis 1,4-polyisoprene



ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

สมบัติของยางธรรมชาติมีอิทธิพลจากสูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติมีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันพืช แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรงทำให้สายโซ่โมเลกุลเลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ส่งผลให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ดี ที่อุณหภูมิต่ำ มีค่า $T_g = -72^\circ\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอินและยางซิลิโคนเท่านั้น

2.6 สารเคมีสำหรับยาง

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปINYาง เพื่อต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์จากยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียต่าง ๆ ของยาง โดยยางสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ด้วยความร้อนYangที่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีแล้ว เรียกว่า Cured compound หรือ Cured rubber หรือ Vulcanized rubber

โดยสารเคมีที่นำมาผสมINYาง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก กำมะถัน สารตัวเร่ง สารแอนติออกซิแดนท์ สารตัวเติม เป็นต้น

2.6.1 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาYangคงรูป (Accelerator activators)

เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซYangให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จะไปเร่งอัตราการวัลคาไนซYangให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้Yangมีมอดูลัส (Modulus) สูงขึ้น โดยสารกระตุ้นมี 2 ประเภท คือพวกอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide,

ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) และพวกอินทรีย์ที่สำคัญคือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดลอริก (Lauric acid) เป็นต้น

2.6.2 สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant)

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถเสื่อมสลายได้เมื่อตั้งทิ้งไว้ หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสลายในลักษณะนี้เรียกว่า Degradation โดยกระบวนการเสื่อมสลายของยางแบ่งออกเป็นได้ 6 ประเภท คือ เสื่อมสลายเนื่องจากทิ้งไว้นาน ถูกออกซิไดซ์เนื่องจากการกระตุ้นของโลหะคะตาไลต์ เสื่อมสลายเนื่องจากความร้อน เสื่อมสลายเนื่องจากแสง เสื่อมสลายเนื่องจากการหักงอไปมา และเกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (เนรัฐชรา, 2561)

อย่างไรก็ตาม ออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสลายของยางโดยจะมีโลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดของยางเป็นตัวเร่งทำให้ยางเสื่อมสลายได้เร็วขึ้นซึ่งสารเคมีที่จะช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสลาย เรียกว่า สารแอนติออกซิแดนซ์ (พรพรรณ, 2528)

2.6.3 สารตัวเติม

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยาง ใส่ลงไปนยาง ตัวอย่างเช่น เขม่าดำ ดินเหนียว แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเส้นใยจากธรรมชาติ เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ กันดังนี้

2.6.3.1 เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมจะมีราคาถูกกว่ายาง เมื่อใส่สารตัวเติมแล้วสมบัติของยางสามารถใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ก็จะเป็นการลดต้นทุน

2.6.3.2 เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง โดยทั่วไปแล้วการใส่สารตัวเติมเข้าไปนยางจะทำให้ความแข็งของยางและสารตัวเติมและมอดูลัสของยางสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่น ๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มหรือลดลงขึ้นกับชนิดของยางและสารตัวเติม เช่น ถ้ายางธรรมชาติใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม จะให้ยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูงเช่นกัน แต่ถ้าใส่เขม่าดำมากเกินไปค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความต้านทานการสึกหรอ อาจลดลงได้เช่นกัน

2.6.3.3 เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต ในกระบวนการผลิตของยางถ้าไม่มีสารตัวเติม อาจทำให้กระบวนการผลิตยุ่งยาก เช่น Calendering, Extrusion เป็นต้น ถ้ายางล้วน ๆ หรือมีสารตัวเติมน้อย การ Extrusion จะได้ผิวที่ไม่เรียบ หรือการ Calendering จะมีปัญหาเรื่องยางหนาหรือบาง โดยไม่สามารถควบคุมได้ การใส่สารตัวเติมจะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

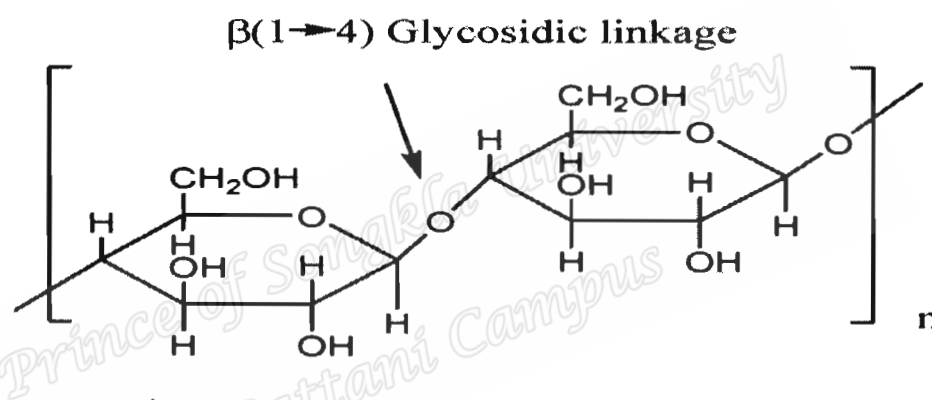
2.6.3.4 ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน ยางจะพองตัวได้ดีในน้ำมันแต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปนยางจะทำให้การพองตัวของยางในน้ำมันลดลง

0
1682
2562

2.6.3.5 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง ปกติยางจะสลายตัวได้ง่ายถ้าแสงแดดซึ่งมีแสงอุลตราไวโอเล็ตอยู่ ถ้าใส่สารที่กันไม่ให้แสงส่องผ่านเข้าไปในเนื้อยางได้ เช่น เขม่าดำก็จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

2.7 เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ (Natural cellulose fibers)

เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติพบมากที่สุดในโลกตามผนังเซลล์พืชและแบคทีเรียทั่วไป เซลลูโลสที่พบในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เส้นใยจากฝ้าย หนุ่น ป่าน ปอ ไยมะพร้าว ลิ้นจี่ ใยสับปะรด เส้นใยเหล่านี้มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นส่วนประกอบอยู่มาก ดังโครงสร้างแสดงในภาพที่ 2.11 ดังนั้นเส้นใยเซลลูโลสจึงมีสมบัติดูดซับความชื้นและก่อให้เกิดการระคายของอากาศได้ดี



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (biomolecule, 2561)

อย่างไรก็ตาม ในธรรมชาติจะพบเส้นใยเซลลูโลสจากส่วนต่าง ๆ ของพืชแตกต่างกันหลากหลายรูปแบบบางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้น ใบ ผล

2.7.1 เส้นใยจากต้นหมาก

ต้นหมากมีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Areca catechu* Linn. เป็นพืชตระกูลปาล์มมีชื่อภาษาอังกฤษ Betel Nuts หรือ Arecanut หรือ Arceanutplam เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ไม่มีรากแก้ว รากฝอย มีส่วนประกอบดังนี้

2.7.1.1 ลำต้นหมาก มีเนื้อเป็นเสี้ยนยาว ๆ จับตัวกันแน่นบริเวณเปลือกนอกสีกเข้าไปประมาณ 2 cm ส่วนกลางลำต้นเป็นเสี้ยนไม้อัดแน่นเหมือนด้าวนอกและมีเนื้อไม้อ่อนนุ่มคล้ายฟองน้ำทำให้ต้นหมากเหนียวและสามารถโยกโอนเอนได้

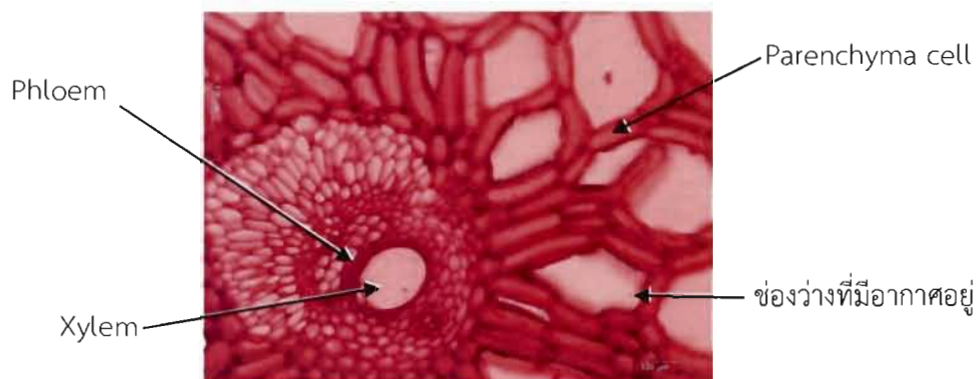
2.7.1.2 ใบ เกิดจากเนื้อเยื่อส่วนปลายยอด ปลายลำต้นประกอบด้วยโคนกาบใบ เรียกว่า กาบหมากหุ้มติดลำต้นเป็นแผ่นใหญ่ ก้านประกอบด้วยใบย่อย เมื่อต้นหมากออกดอก ดอกหรือภาษาถิ่น เรียกว่า จั่นหมาก ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยกาบหมาก เมื่อกาบหมากแก่หลุดร่วงไปจะเห็นดอกหมาก

2.7.1.3 ดอกหมาก เกิดบริเวณซอกโคนก้านใบหรือกาบหมาก ดอกออกรวมกันเป็นช่อใหญ่ประกอบด้วยโคนจั่นยึดติดอยู่ที่ข้อของลำต้น ก้านช่อดอกเป็นเส้นยาวแตกออกโดยรอบ แกนกลางก้านช่อดอกจะมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมีย โดยตัวผู้อยู่ส่วนปลายตัวเมียอยู่ด้านล่างหรือด้านใน ดอกตัวผู้ใช้เวลาบาน 21 วัน หลังจากนั้น 5 วัน ดอกตัวเมียเริ่มบาน

2.7.1.4 ผลหมาก มีลักษณะกลมหรือกลมรี ผลหมากประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก ส่วนเปลือกเป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียด เหนียว เปลือกชั้นกลางเป็นเส้นใยหนาอมองเห็นชัด เมื่อผลอ่อนเส้นใยอ่อน พอแก่จะเหนียวแข็ง เปลือกชั้นในเป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก ส่วนของเมล็ดหรือเนื้อหมากถัดจากเยื่อบาง ๆ เข้าไปเป็นส่วนของเนื้อหมากเมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เนื้อจะมีสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง

2.7.2 การนำไปใช้

นำเส้นใยจากลำต้นหมากใช้เป็นสารตัวเติมในการผสมกับยางธรรมชาติเพื่อเป็นฉนวนดูดซับเสียง เส้นใยจากลำต้นหมากผสมยางธรรมชาติจะมีหลายกลไกการดูดซับพลังงาน เช่น การขยับตัวของโซ่ยาง การเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศภายในช่องว่างของเนื้อเยื่อของสารตัวเติม ส่วนเนื้อเยื่อนั้นมีลักษณะนุ่มคล้ายฟองน้ำ และมีหลายองค์ประกอบคือ เนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem) ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ จากรากขึ้นสู่ลำต้นและใบ เนื้อเยื่อโฟลเอ็ม (phloem) ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารจากใบสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช เนื้อเยื่อพาราเควอซิมา (parenchyma) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีชีวิตทำหน้าที่คำนวณให้ความแข็งแรงและมีช่องว่างอากาศอยู่จึงทำให้เนื้อเยื่อมีสมบัติคล้ายฟองน้ำ ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของเส้นใยภายในต้นหมากถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า มีหลายองค์ประกอบคือ เนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem) โพลเอม (phloem) พาราเควอมา (parenchyma) และช่องว่างที่มีอากาศอยู่ภายใน

2.7.3 เส้นใยจากลูกตาลโตนด

ตาลโตนด เป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่งอยู่ในสกุล *Borassus* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer* Linn. ลักษณะพันธุ์พวกปาล์มใบพัด เป็นปาล์มที่ให้น้ำตาล และเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

2.7.3.1 ลำต้น ลำต้นตาลโตนดคล้ายต้นมะพร้าว เปลือกลำต้นขรุขระ และมีสีซีดๆ ออกดำ มีลักษณะลำต้นกลม ตรง สูงชะลูด ความสูงประมาณ 18-25 m หรือมากกว่า บางต้นอาจสูงถึง 30 m ต้นที่มีอายุน้อยจะมีโคนต้นอวบใหญ่ แต่เมื่อสูงได้ประมาณ 4 m ลำต้นจะเรียวยาวประมาณ 10 m และคงขนาดจนถึงยอด เนื้อไม้เป็นเส้นใยแข็ง เหนียว ไม่หักง่าย

2.7.3.2 ใบ มีสีเขียวเข้ม มีลักษณะเป็นรูปพัด ขนาดใหญ่ แข็งและหนา มีใบย่อย เรียกว่า Segment ที่แตกออกจากปลายก้านใบ ใบแตกออกบริเวณเรียวยอดเป็นกลุ่มแน่น ประมาณ 25-40 ใบ ใบแก่จะมีสีน้ำตาลอ่อน ใบกว้างประมาณ 50-70 cm ก้านใบหรือทางตาลยาวประมาณ 1-2 m ด้านขอบทางตาลมีหนามแหลมสั้น ขนาดไม่สม่ำเสมอ อายุใบประมาณ 3 ปี

2.7.3.3 ดอก ดอกตาลโตนดจะออกที่ต้นตัวเมียเท่านั้น แบ่งเป็นดอกตัวผู้ และดอกตัวเมีย ซึ่งอยู่แยกกัน ขอดอกตัวผู้เรียกว่า “งวงตาล” ต้นหนึ่งมีขอดอก 3-9 ข่อ ขอดอกแตกแขนง 2-4 งวงต่อข่อหนึ่งงวงยาวประมาณ 30-40 cm ส่วนขอดอกต้นตัวเมีย เรียก “ปลีตาล” หรือบางที่เรียกงวงตาลเหมือนกัน ออกข่อหลังตัวผู้ หนึ่งต้นมีประมาณ 10 ข่อ

2.7.3.4 ผล ผลตาลโตนดจะออกที่ต้นตัวเมียเท่านั้น ที่เจริญมาจากขอดอก เรียกว่า ทะลาย เก็บผลอ่อนได้ที่ประมาณ 75-80 วัน หลังออกดอก ในแต่ละทะลายมี 10-20 ผล ผลอ่อนมีสีเขียว จาวตาลอ่อนนุ่มหรือด้านในยังเป็นน้ำ ส่วนผลแก่ มีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ ผิวเป็นมัน เนื้อจาวตาลเป็นเส้นใยละเอียด เหนียว มีสีขุ่นขาวจนถึงเหลืองแก่ตามอายุผล

2.7.4 การนำไปใช้

นำเส้นใยจากลูกตาลโตนดใช้เป็นสารตัวเติมในการผสมกับยางธรรมชาติเพื่อเป็นฉนวนดูดซับเสียง เส้นใยลูกตาลผสมยางธรรมชาติจะมีหลายกลไกการดูดซับพลังงาน เช่น การยับยั้งตัวของโซ่ยาง การเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศภายในช่องว่างของเนื้อเยื่อของสารตัวเติม ส่วนเนื้อเยื่อนั้นมีหลายองค์ประกอบคือ เนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem) ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ จากรากขึ้นสู่ลำต้นและใบ เนื้อเยื่อโฟลเอ็ม (phloem) ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารจากใบสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช เนื้อเยื่อพาราไคนิมา (parenchyma) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีชีวิตทำหน้าที่ค้ำจุนให้ความแข็งแรงและมีช่องว่างอากาศอยู่จึงทำให้เนื้อเยื่อมีสมบัติดูดซับเสียงเฉพาะอีกค่าหนึ่ง ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของเส้นใยจากลูกตาลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า มีหลายองค์ประกอบคือ เนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem) โฟลเอ็ม (phloem) พาราไคนิมา (parenchyma) และช่องว่างมีอากาศอยู่ภายใน

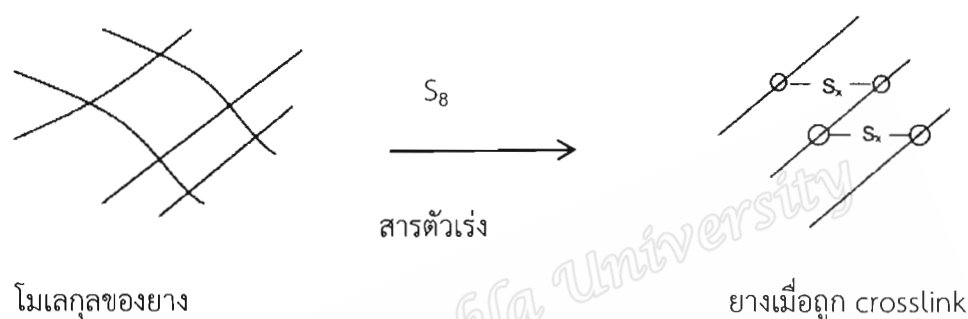
2.7.5 ความแตกต่างของเส้นใยทั้งสองชนิด

ความแตกต่างของเส้นใยทั้งสองชนิด คือ เส้นใยลูกตาลมีสมบัติเหนียว ส่วนเส้นใยจากลำต้นหมากจะอ่อนนุ่มคล้ายฟองน้ำ เนื่องจากสมบัติต่างกันดังกล่าว จะเสริมคุณสมบัติของแผ่นยางให้ดีขึ้นคือ เพิ่มทั้งความเหนียวและดูดซับเสียง

2.8 การวัลคาไนซ์โดยกำมะถัน

กระบวนการเปลี่ยนรูปของยางดิบให้เป็นอย่างที่รักษารูปร่างได้ มีความยืดหยุ่น (elastic) หรือแข็ง โดยให้มีการเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยางด้วยกำมะถันหรือวัลคาไนซ์อื่น เรียกว่า “กระบวนการวัลคาไนซ์” กำมะถันเป็นสารที่สำคัญและนิยมใช้กันมากสำหรับยางธรรมชาติ สารที่ทำให้กำมะถัน (sulphur donor) และเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (พรพรรณ, 2528)

เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น โดยกำมะถันจะเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง เรียกว่า crosslink ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2528)

ยางที่ยังไม่เกิดการ crosslink จะใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ และมีความแข็งแรงต่ำ หลังจากเกิดการ crosslink แล้ว จะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การ crosslink อาจเกิดเป็นแบบ polysulphidic crosslink (X มีค่ามาก) หรือ monosulphidic crosslink (X=1) เมื่อ X คือ จำนวนการ crosslink

2.9 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น (ρ) เป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด และยังเป็นปริมาณที่บอกค่ามวลนั้นในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังสมการที่ 2.32

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.32)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

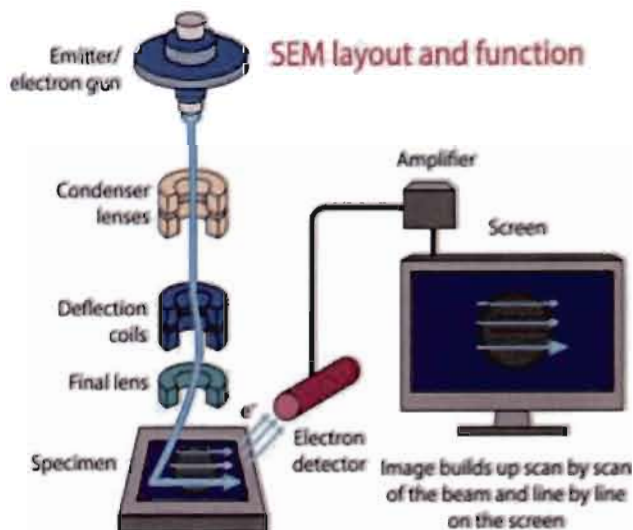
m คือ มวลรวมของวัตถุ (kg)

v คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (m^3)

วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่วนหนึ่งมาจากการมีอากาศถูกขังอยู่ในโครงสร้าง จึงทำให้มีความหนาแน่นต่ำ และโมเลกุลอากาศจะต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ไปมา เช่น พลังงานเสียงที่ตกกระทบ ดังนั้นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ จึงมีโมเลกุลอากาศที่ถูกขังอยู่ในโครงสร้างมาก จึงทำหน้าที่ดูดซับเสียงได้มากขึ้น

2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยมีหลักการทำงานของเครื่อง คือลำอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาผ่านแหล่งกำเนิดอนุภาคอิเล็กตรอน และเมื่อกระทบกับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง จะมีอิเล็กตรอนทั้งส่วนที่ผ่านทะลุออกไปและส่วนที่มีการสะท้อนกลับมา แสดงในภาพที่ 2.15 เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่า ลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษาและกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ $0.2 \mu\text{m}$ และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดเจชัดเนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 300 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 105 เท่า และสามารถแจจแจง รายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 nm



ภาพที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
(จารินทร์ และคณะ, 2560)

2.11 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties)

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ คือสมบัติต้านแรงดึงของพอลิเมอร์โดยชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่จะมีรูปทรง dumbbell ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่น กรณีที่เป็นยางก็จะได้จากการตัดแผ่นยางเป็นรูป dumbbell (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ในเครื่องอัดเบ้า)

ในขณะทดสอบจะใช้เครื่อง Universal testing machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึงจากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนำมาคำนวณค่า tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้ (สิยานา, 2561)

2.11.1 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ (deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งคือการตอบสนองของวัสดุมีความเค้นมากระทำต่อวัสดุนั้นและทำให้มีการเคลื่อนที่ภายในเนื้อของวัสดุนั้น ดังรูปที่ 2.15 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูป dumbbell สำหรับการทดสอบแรงดึงโดยในการคำนวณค่าความเครียด (strain) จะใช้ค่า Δl ต่อ l_0 ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.33)$$

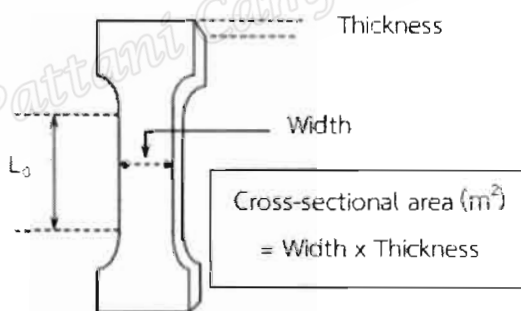
โดยที่

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

การเปลี่ยนรูปของวัสดุสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด

2.11.1.1 การเปลี่ยนรูปแบบโอสติค (elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะคงรูปร่างเดิมเอาไว้หรือวัสดุจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมเมื่อหยุดแรงกระทำ

2.11.1.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น กล่าวคือ เมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะไม่เคลื่อนที่กลับเข้าในตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 2.16 รูปทรงของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

2.11.2 ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือ แรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ว่าการวัดแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วความเค้นมักถูกกล่าวในแง่ของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เนื่องจากแรงภายในเนื้อวัสดุคือปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ซึ่งแรงทั้งสองนี้ มีขนาดเท่ากัน สามารถคำนวณหาความเค้นได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.34)$$

โดยที่

σ คือ ความเค้น (MPa)

F คือ แรงที่มากระทำต่อวัสดุ (N)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

โดยทั่วไปแล้วความเค้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ขึ้นกับแรงภายนอกที่มากระทำ คือ

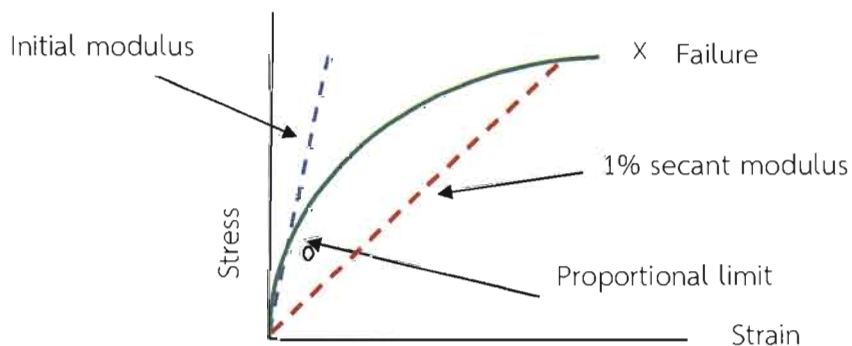
2.11.2.1 ความเค้นแรงดึง (tensile stress) เมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามให้วัสดุยืดออกและแยกออกจากกัน

2.11.2.2 ความเค้นแรงกด (compressive stress) เมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามกดให้วัสดุหดตัวลง

2.11.2.3 ความเค้นแรงเฉือน (shear stress) เมื่อมีแรงมากระทำขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านกันโดยที่ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ของแรงเฉือนและพื้นที่ภาคตัดขวางที่ขนานกับแรงเฉือนที่มากระทำ

2.11.3 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)

มอดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้น ได้จากการคำนวณจากกราฟในช่วง linear หรือ ช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติก (ช่วงยืดตัวหรือ strain น้อย ๆ) และบางครั้งจะเรียกค่ามอดูลัสในแบบนี้ดังกล่าวว่า Young's modulus หรือ initial modulus นอกจากนี้ยังมีค่ามอดูลัสอีก ลักษณะหนึ่งคือ secant modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดได้จากช่วงต่าง ๆ ในเส้นกราฟ (รูปที่ 2.17) ค่ามอดูลัสยังสามารถบอกแนวโน้มว่าวัสดุชนิดใดมีความต้านทานต่อการเสียรูปมาน้อยกว่ากัน โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่สูงจะเกิดการเสียรูปได้ยากกว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสต่ำ



ภาพที่ 2.17 กราฟความเค้นและความเครียด