

การคลายตัวของยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักร ต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางธรรมชาติ

ดร. ชูเดช ศิประเสริฐกุล และ บุณิสกร ตั้งใจ

1. บทนำ

การใช้งานยางในปัจจุบัน เช่น การผลิตยางล้อ ชิ้นส่วนยานยนต์ ยางรองคอคสะพาน ยางรองแท่นเครื่อง เป็นการใช้งานยางในด้านการรับแรงเชิงวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งผู้ใช้มีความจำเป็นต้องเข้าใจไม่เฉพาะเพียงแต่สูตรยางที่ใช้ในการคอมพาวด์เท่านั้น การประสานความรู้ด้านเทคโนโลยียาง การออกแบบ การไหลของยางในกระบวนการผลิต สมบัติของวัสดุที่ใช้ร่วมกับยาง เช่น เหล็ก การติดกันของวัสดุที่ต่างชนิดกัน และการเข้าใจถึงลักษณะและสภาพการนำวัสดุไปใช้งาน จะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ และสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างเหมาะสม

สภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ยางนั้นโดยทั่วไปยางจะได้รับแรงพลวัตซึ่งเป็นแรงกระทำจากภายนอกเป็นช่วงระยะเวลา มีความสม่ำเสมอในการรับแรงที่แตกต่างกันขึ้นกับสภาพการใช้งาน สมบัติทางพลศาสตร์ของยางสามารถสรุปเป็นนิยามง่าย ๆ ได้ว่าเป็นพฤติกรรมของยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแรงภายนอกที่มากกระทำในช่วงระยะเวลาหนึ่งโดยวัสดุยางจะต้องไม่ถูกทำลายหรือทำให้เสียสภาพภายใต้แรงนั้น [1-3] ในการใช้งานวัสดุยางสำหรับการรับแรงทางพลศาสตร์นั้น สมบัติที่มีความสำคัญ คือ โมดูลัสสะสมเชิงพลวัต (dynamic storage modulus) หรือ E' ซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุ และแทนเดลต้า ($\tan \delta$) ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนพลังงานที่ได้รับจากภายนอกหรือการลดการสั่นสะเทือน โดยสมบัติทั้ง 2 ชนิดจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยปัจจัยภายในซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงสารเคมีในสูตรยาง และปัจจัยภายนอก คือ ความถี่ของแรงที่มากกระทำ อุณหภูมิในการใช้งาน เป็นต้น [4-7]

การศึกษาค่าของน้ำมันที่สัมผัสชิ้นงานยางที่มีต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาในสภาวะดิ่งยึด [8-11] เนื่องจากการใช้งานผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ มักจะได้รับแรงดิ่งยึดหรือแรงกดและมีโอกาสสัมผัสกับน้ำมันเมื่อนำไปใช้งาน โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อยางมีปริมาณน้ำมันมาสัมผัสมากขึ้น ค่า E' และ $\tan \delta$ จะมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น [10, 12] ซึ่งเป็นผลจากการที่น้ำมันมีส่วนช่วยให้โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ดี เนื่องจากไปเพิ่มช่องว่างภายในโครงสร้างยาง (free volume) การเปลี่ยนแปลงความยาวในการดิ่งยึดจะส่งผลให้ E' และ $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเรียงตัวของโมเลกุลของยางเมื่อถูกดิ่งยึด ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงกระทำภายนอกต้องการพลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความเหนียวของน้ำมันมีผลต่อความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของยางอีกด้วย

ในการศึกษาค่าของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีน้ำมันผสมอยู่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า E' และ $\tan \delta$ จะมีค่าลดลง [12] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการที่ยางได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น พลังงานหรือแรงที่ต้องใช้ในการทำให้ยางเปลี่ยนแปลงรูปร่างจึงลดลงรวมทั้งพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุล แต่ในขณะเดียวกันการลดลงของสมบัติทั้งสองอาจไม่ได้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการศึกษาค่าของอุณหภูมิได้ใช้ตุ้บเป็นตัวเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการศึกษา ตุ้บใช้อากาศเป็นตัวนำความร้อนซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานพอสมควรในการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามต้องการ และในการรักษาอุณหภูมิระหว่างการศึกษาให้คงที่ก็ยังมีเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดเวลาในช่วงแคบ ๆ ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงในช่วงแคบ ๆ นี้ อาจส่งผลต่อสมบัติหยุ่นหนืด (viscoelastic properties) ของยาง ซึ่งจะกระทบถึงการลดลงของค่า E' และ $\tan \delta$ มากขึ้นกว่าการลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นการศึกษาค่าผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรต่อสมบัติหยุ่นหนืดซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางพลศาสตร์จึงเป็นงานที่น่าสนใจ โดยนอกเหนือจากผลที่ได้จะช่วยสรุปผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อสมบัติทางพลศาสตร์ได้แล้ว ผลที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในการใช้งานจริงได้ด้วย เนื่องจากในการใช้งานจริง ผลิตภัณฑ์ที่จะต้องประสบกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ กลับไปกลับมาเสมอโดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะการใช้งานในประเทศเรา ซึ่งต้องพบกับอุณหภูมิที่ร้อนในเวลากลางวันและอุณหภูมิต่ำเย็นในเวลากลางคืน หรือสภาพการใช้งานชิ้นส่วนยางในเครื่องยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงเปิดและปิดเครื่องยนต์ หรือสภาพของวัสดุยางที่ใช้ในดาวเทียมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดจากการเปลี่ยนมุมเข้าหาดวงอาทิตย์ การศึกษานี้ได้เลือกสมบัติการคลายตัวของยางเนื่องจากแรงภายนอก (stress relaxation) เป็นตัวแทนสมบัติหยุ่นหนืดในการศึกษาผลิตภัณฑ์ยางเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แรงที่ได้รับจากภายนอกจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากยางมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อได้รับแรงกระทำโมเลกุลของยางจะเคลื่อนที่ตอบสนองต่อแรงภายนอกซึ่งต้องใช้แรงมากในเบื้องต้น หลังจากที่มีโมเลกุลยางสามารถเคลื่อนที่ได้ แรงที่ต้องการจากภายนอกจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งการศึกษการคลายตัวของยางจะเหมาะสมกว่าการศึกษาสมบัติอื่น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ที่ใช้ในเชิงวิศวกรรมมักจะได้รับแรงตลอดเวลา

2. การทดลอง

2.1 การเตรียมยางคอมพาวด์

ยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำและไม่มีเขม่าดำจะผสมร่วมกับสารเคมีตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (brabender) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที และใช้สัดส่วนวัสดุต่อปริมาตรห้องผสม (fill factor) เท่ากับ 0.7 โดยยางคอมพาวด์ที่ได้จะนำมาวัดเวลาสำหรับการขึ้นรูปที่ 155 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ก่อนจะนำยางที่ผสมได้ไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด (compression molding) ให้มีขนาดชิ้นงาน 150 มม x 150 มม x 1 มม

2.2 การศึกษาสมบัติการคลายตัวของยางภายใต้การขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักร

ยางที่ได้จากการขึ้นรูปในหัวข้อ 2.1 จะถูกนำมาเตรียมให้มีขนาด 50 มม x 100 มม x 1 มม เพื่อใช้ในการศึกษาการคลายตัว ยางจะถูกตั้งโดยใช้เครื่องตั้งขนาดเล็กลงแสดงในรูปที่ 1 โดยเครื่องดังกล่าวสามารถบันทึกแรงที่กระทำต่อยางได้ ยางที่ถูกตั้งและปล่อยให้คลายตัวจะถูกควบคุมอุณหภูมิระหว่างการศึกษาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากน้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่าอากาศ น้ำในแต่ละถังจะได้รับการควบคุมให้มีอุณหภูมิแตกต่างกันเมื่อต้องการเปลี่ยนอุณหภูมิในการศึกษาก็จะยกเครื่องตั้งขนาดเล็กไปอยู่ในถังที่มีอุณหภูมิที่ต้องการแสดงในรูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของแรงเมื่อเวลาเปลี่ยนไปจะถูกบันทึกและนำไปศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรต่อสมบัติการคลายตัวของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาพลของเขม่าดำที่ปริมาณต่าง ๆ ต่อสมบัติยาง

ส่วนผสม	สูตรที่ใช้ในการผสม (phr)			
	NR0-CB	NR10-CB	NR30-CB	NR60-CB
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100
เขม่าดำ (N550)	-	10	30	60
ซิงก์ออกไซด์	5	5	5	5
6PPD	3	3	3	3
กรดสเตียริก	2	2	2	2
MBTs	2	2	2	2
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5
กำมะถัน	2	2	2	2

2.3 การศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางในสภาวะดิ่งยัด

ในการศึกษานี้ใช้เครื่อง Oscillating beam ในการทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ โดยเครื่องมือดังกล่าวแตกต่างจากเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyser (DMTA) ที่นิยมใช้ทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ทั่วไปตรงที่การสั่นของยางเป็นการสั่นโดยอิสระไม่ถูกควบคุมความถี่และระยะในการสั่น ฉะนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ศึกษายางที่มีความนิ่มตัวสูง ในขณะที่ DMTA เหมาะสำหรับการใช้ในงานทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ทั่วไป เนื่องมาจากการวิจัยนี้เป็นการศึกษายางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ทำให้ตัวอย่างยางมีความนิ่มมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่อง Oscillating beam ในการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์

เตรียมตัวอย่างยางจากหัวข้อ 2.1 ให้มีขนาด 50 มม x 100 มม x 1 มม ก่อนจะนำมาใช้สำหรับศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ในเครื่อง Oscillating beam ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่าที่ได้รับจากเครื่องจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด (amplitude) ในการสั่นของยางเมื่อเวลาเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปที่ 4 สามารถคำนวณค่า E' ของยางได้จากความถี่ในการสั่น และค่า $\tan \delta$ จากการลดลงของแอมพลิจูดในการสั่นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 1-4



รูปที่ 1 เครื่อง micro-tension ในการศึกษาการคลายตัวของยาง
ในตุ้มน้ำที่ปั่น

$$E' = \frac{I\omega^2 I_{ob}}{2r^2 A_0} \lambda^2$$

สมการที่ 1

เมื่อ

- E' คือ ค่าโมดูลัสสะสมเชิงพลวัต
- I คือ moment of inertia ของ Oscillating beam = 2.6×10^{-3} kg.m²
- ω คือ ความถี่เชิงมุมจากการสั่น
- I_{ob} คือ ความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างยาง
- A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างยาง
- r คือ ระยะห่างจากจุดหมุนของ Oscillating beam ถึงจุดที่ยึดยางซึ่งมีค่า 0.068 เมตร
- λ คือ extension ratio ของยางเมื่อถูกดึงยืดซึ่งถ้าไม่ถูกดึงยืดจะมีค่าเท่ากับ 1

$$E'' = \frac{\Lambda}{\pi} E'$$

สมการที่ 2

$$\Lambda = \ln \left(\frac{X_n}{X_{n+1}} \right)$$

สมการที่ 3

เมื่อ

- E'' คือ ค่าโมดูลัสสูญเสียเชิงพลวัต (dynamic loss modulus) ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนพลังงานของยาง
- Λ คือ logarithmic decrement การลดลงของแอมพลิจูดในการสั่น
- X_n คือ แอมพลิจูดในการสั่นรอบที่ n
- X_{n+1} คือ แอมพลิจูดในการสั่นรอบที่ n+1 เมื่อ n คือจำนวนเต็ม

$$\tan \delta = E'' / E'$$

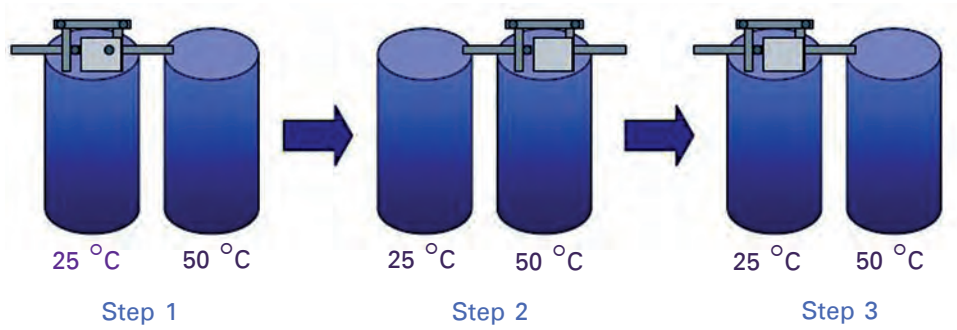
สมการที่ 4

$$\log a_T = \frac{-C_1'(T - T_r)}{C_2' + T - T_r}$$

สมการที่ 5

เมื่อ

- T คือ อุณหภูมิที่ศึกษา
- T_r คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 298 องศาเซลเซียส
- C_1' คือ ค่าคงที่เท่ากับ 6.9
- C_2' คือ ค่าคงที่เท่ากับ 53



Step	Temperature (°C)	Time (min)	Total time (min)
1	25	5	5
2	50	5	10
3	25	5	15
4	50	5	20
5	25	5	25
6	50	5	30
7	25	5	35

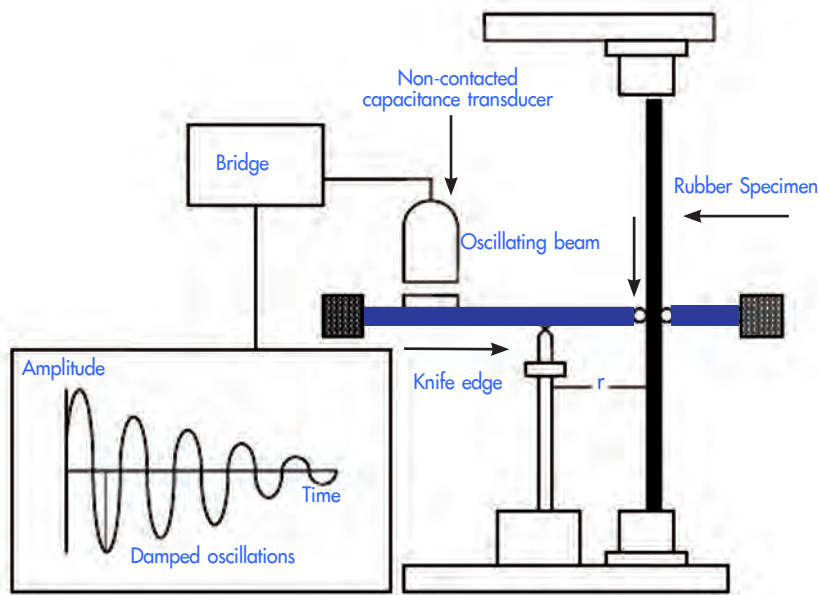
รูปที่ 2 กระบวนการทดสอบการคลายตัวของยางภายใต้การขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักร

3. พลาสมาดลองและการวิเคราะห์

3.1 การศึกษาสมบัติการคลายตัวของยางธรรมชาติเมื่อใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อดูผลของน้ำที่จะใช้เป็นตัวกลางในการให้ความร้อนสำหรับการควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรว่ามีผลต่อสมบัติการคลายตัวของยางหรือไม่ โดยในการศึกษาจะเปรียบเทียบการคลายตัวของยางในน้ำและในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน

ยางที่ไม่มีเขม่าดำขนาด 50 มม x 100 มม x 1 มม ถูกดึงให้มีความยาวเพิ่มขึ้นจากความยาวเริ่มต้นร้อยละ 50 แล้วนำไปวัดแรงที่ใช้ในการดึงเมื่อเวลาผ่านไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสโดยอากาศและน้ำเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 5 จากผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิที่ศึกษาเดียวกัน การลดลงของแรงเมื่อเวลาผ่านไปของการดึงยางในน้ำและในอากาศแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันทั้งในด้านแรงที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงของแรงในแต่ละช่วงเวลา จึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้น้ำเป็นตัวกลางในการศึกษาการคลายตัว แทนการใช้อากาศได้ โดยผลที่ได้สามารถนำมาใช้กับการใช้งานในสภาวะที่ตัวกลางความร้อนเป็นอากาศได้

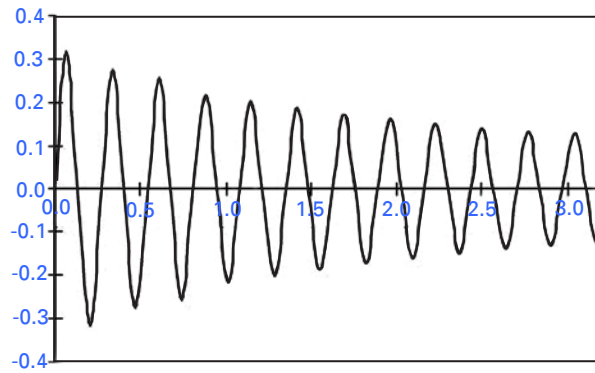


รูปที่ 3 เครื่องมือ Oscillating beam สำหรับทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ของยาง

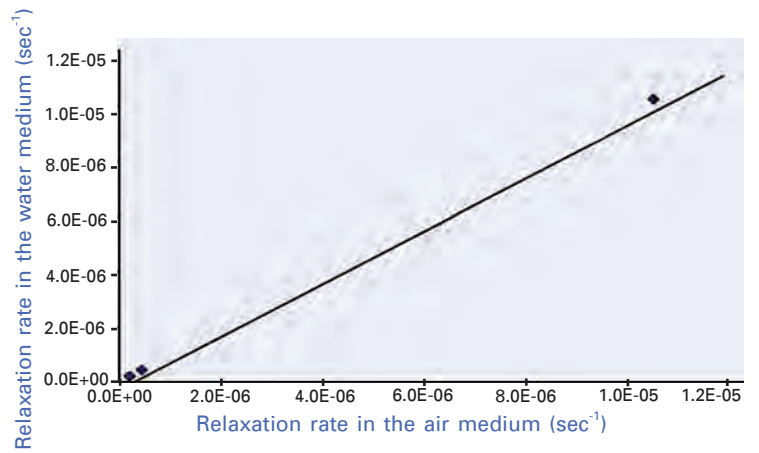
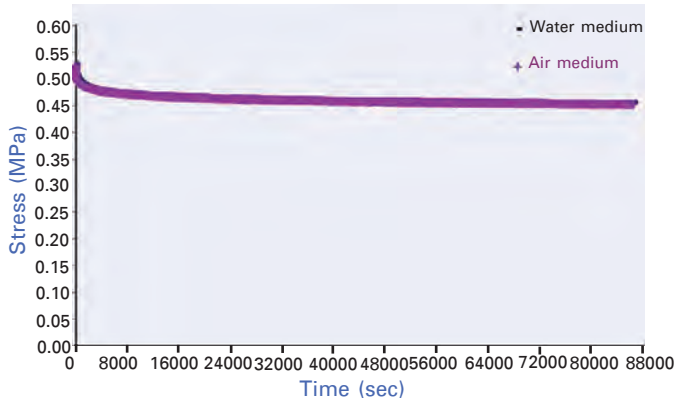
3.2 การศึกษาพลของการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อการคลายตัวของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีเขม่าดำ

นำตัวอย่างยางที่ไม่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบไปแช่ในถังน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วดึงยืดที่ความยาวร้อยละ 50 ของความยาวเริ่มต้น หลังจากนั้นนำไปแช่ในถังน้ำที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วย้ายกลับไปแช่ในถังที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที กลับไปกลับมา ซึ่งตลอดเวลาในการทดสอบนั้นเครื่องจะวัดแรงในการดึงยางให้คงที่ที่ความยาวร้อยละ 50 ของความยาวเริ่มต้น ผลการทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 6 พบว่าโครงสร้างของยางมีการคลายตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังเห็นได้จากการลดลงของแรงดึงในช่วง A เมื่อนำผลดังกล่าวมาเทียบกับการปล่อยให้ยางคลายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าการคลายตัวของยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรเป็นการเร่งกระบวนการคลายตัวเป็น $10^{1.2}$ เท่า เมื่อเทียบกับการปล่อยให้ยางคลายตัวที่อุณหภูมิคงที่ (เทียบระยะเวลาที่ทำให้แรงดึงเท่ากัน)

แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงกลับไป 25 องศาเซลเซียส แทนที่โครงสร้างยางจะกลับไปคลายตัวเหมือนก่อนที่จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ยางกลับมีการคลายตัวที่มากขึ้นดังแสดงในช่วง B ในรูปที่ 6 เมื่อนำผลดังกล่าวมาเทียบกับการปล่อยให้ยางคลายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 8 พบว่าการคลายตัวของยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรเป็นการเร่งกระบวนการคลายตัวเป็น 10^2 เท่า แสดงว่าการลดของอุณหภูมิจะเปลี่ยนสมมูลของการคลายตัวใหม่โดยมีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ผลที่ได้สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรส่งผลต่อโครงสร้างของยางโดยยางถูกเร่งกระบวนการคลายตัวจากการที่อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยาง (rubber-rubber interaction) อาจถูกทำลายลงบางส่วน อย่างไรก็ตามการลดลงเนื่องจากการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรไม่ส่งผลกระทบบากนักต่อยางที่ไม่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการคลายตัวยังเป็นไปตามสมการ WLF (William Landel and Ferry equation) ซึ่งโดยปกติใช้ในการศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยค่า a_T ที่ใช้ในการศึกษานี้ (สมการที่ 5) แสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 4 ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่อง Oscillating beam ความถี่ในการสั่น และการลดลงของแอมพลิจูดในการสั่นเมื่อเวลาผ่านไป

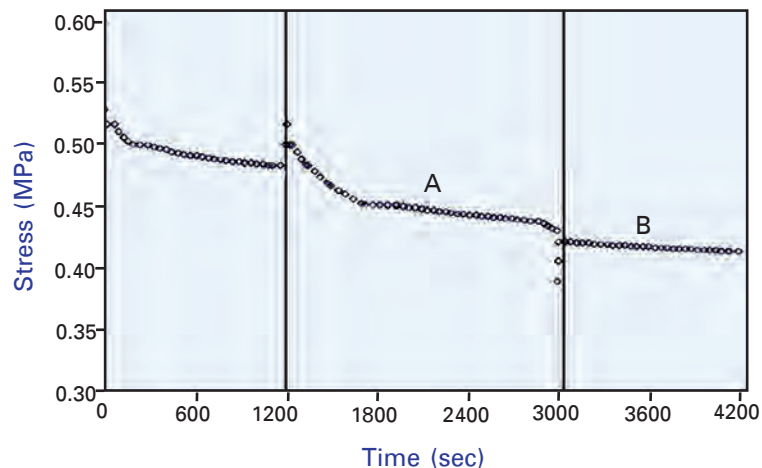


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการคลายตัวและอัตราการคลายตัวในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ของยางธรรมชาติ ที่มีขนาดเป็นองค์ประกอบ 30 phr ในตัวกลางที่เป็นน้ำและอากาศ

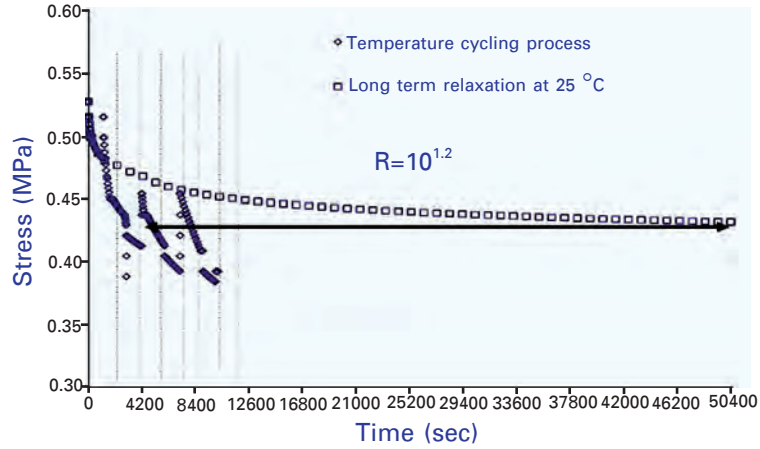
ตารางที่ 2 $\log a_T$ ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา

T (°C)	T (K)	T-T _r	Calculated (log a _T)
25	298	0	-
40	313	15	0.96
50	323	25	1.11
60	333	35	1.19
80	353	55	1.27

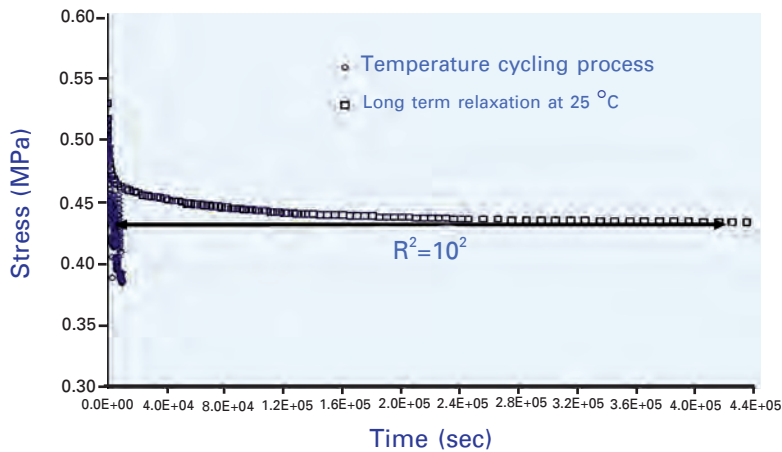
เพื่อให้เข้าใจผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรต่อการคลายตัวของยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบ จึงนำยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบไปทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกันกับยางที่ไม่มีเขม่าดำ โดยยางถูกดึงให้มีความยาวร้อยละ 50 เท่าของความยาวเริ่มต้น เพื่อลดผลกระทบจากอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับเขม่าดำ (Payne effect) แล้วนำไปแช่ในถังน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้ยางอยู่ในสภาวะที่สมดุลก่อนที่จะย้ายไปยังน้ำในถังน้ำที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นย้ายกลับไปแช่ในถังน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที กลับไปกลับมา ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการคลายตัวของยางเกิดขึ้นมากในยางที่มีเขม่าดำ เมื่อทดสอบภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรและเมื่อเทียบกับการคลายตัวภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส แล้วพบว่ายางจะถูกเร่งกระบวนการคลายตัวมากขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการทำลายอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับเขม่าดำและเขม่าดำกับเขม่าดำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ ส่งผลให้เกิดการคลายตัวมากขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงสมดุลของการคลายตัวทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



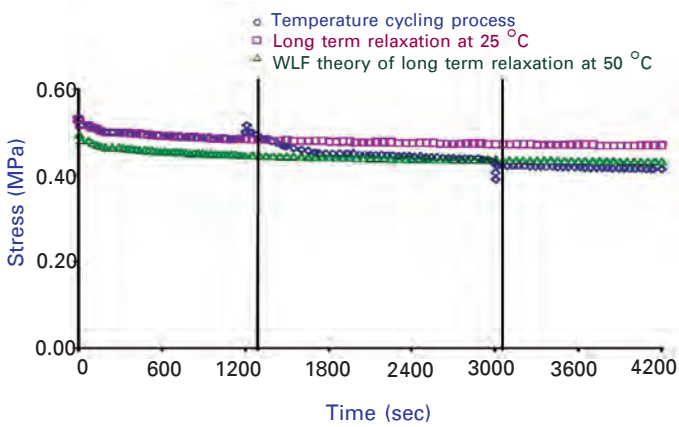
รูปที่ 6 การคลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบภายใต้การขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักร



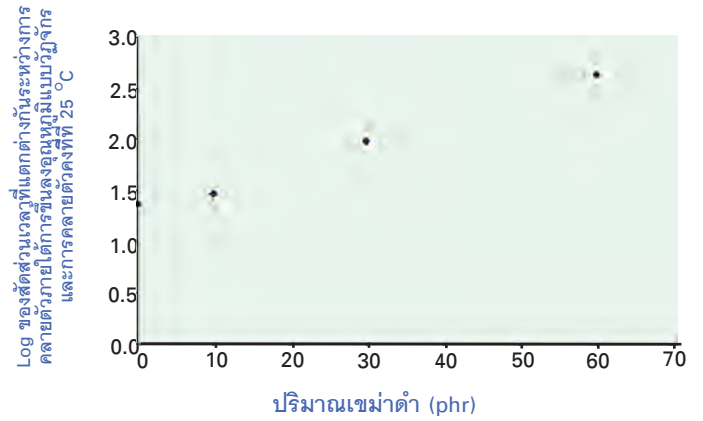
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลการคลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส และผลการคลายตัวของยางเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 50 องศาเซลเซียส ในกระบวนการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักร



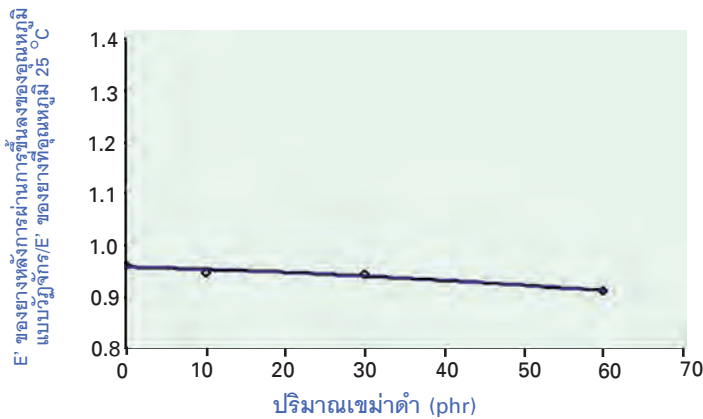
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลการคลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส และผลการคลายตัวของยางเมื่อลดอุณหภูมิจาก 50 เป็น 25 องศาเซลเซียส ในกระบวนการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักร



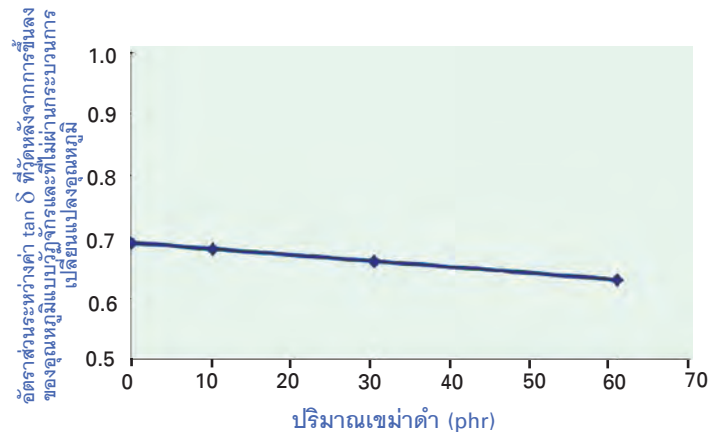
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการคลายตัวที่เกิดขึ้นจากการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรระหว่าง 25-50 องศาเซลเซียสกับการวัดการคลายตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส และการใช้สมการ WLF ในการทำนายการคลายตัวที่ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 10 ผลของเขม่าดำต่ออัตราการเกิดคลายตัวของยาง



รูปที่ 11 ผลของการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อสมบัติ E' ของเขม่าดำที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 12 ผลของการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อสมบัติ tan δ ของเขม่าดำที่ปริมาณต่าง ๆ

3.3 การศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่ผ่านกระบวนการคลายตัวภายใต้การขึ้นลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร

ผลการศึกษาในหัวข้อ 3.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรส่งผลกระทบอย่างมากต่อทั้งโครงสร้างของยางและอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับเขม่าดำ เพื่อให้ผลชัดเจนขึ้นอย่างที่ผ่านกระบวนการขึ้นลงของอุณหภูมิแบบวัฏจักรได้ถูกนำมาศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ ซึ่งในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีปริมาณเขม่าดำต่างกันที่ผ่านการคลายตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่ผ่านกระบวนการขึ้นลงของอุณหภูมิ จาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 50 องศาเซลเซียสและกลับไปที่ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษายืนยันการลดลงของค่า E' และ $\tan \delta$ เมื่อผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากดังแสดงในรูปที่ 11-12 ดังนั้นการคลายตัวของยางเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักรส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยาง

4. unสรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลอย่างยิ่งต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยาง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงแบบวัฏจักรมีผลในการเร่งกระบวนการคลายตัวของยางโดยเฉพาะยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ส่งผลต่อการลดลงของสมบัติการรับแรงพลวัตของยาง ซึ่งผลของอุณหภูมิดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบวัสดุยางเพื่อนำไปใช้งานจริงในการผลิตผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และจากทุนวิจัยประจำปีของสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

1. Davey A.B. and Payne A.R., “Rubber in Engineering Practice” MaClaren & Son, London, 1964.
2. Payne A.R., *Rubber Chem. Technol.*, **39**, 365, (1966).
3. Thomson W.T., “Theory of Vibration with Applications”, Chapman & Hall, 1993
4. Medalia A.I., *Rubber Chem. Technol.*, **60**, 45, (1987).
5. Donnet J.B. and Voet A., “Carbon black- Physics, Chemistry and Elastomer Reinforcement”, Marcel Dekker, 1976
6. Donnet J.P., Bansal R.C. and Wang M.J., “Carbon Black Science and Technology”, 2nd Ed., Marcel Dekker, 1993
7. Medalia A.I., *Rubber Chem. Technol.*, **45**, 11, (1972).
8. Southern E and Thomas A.G., *Trans. Faraday Soc.*, **63**, 1913, (1967).
9. Davies C.K.L, Thomas A.G. and Akutagawa K., *Prog. Rubber and Plastic Technol.*, **12(3)**, 174, (1996).
10. Busfield J. J. C., Deeprasertkul C., Thomas A.G., *Polymer.*, **41(26)**, 9219 (2000)
11. Akutagawa. K., “The effect of liquids on the dynamic properties of natural rubber as a function of strain”, Ph.D Thesis, Queen Mary and Westfield College, University of London (1996).
12. Deeprasertkul C., “Dynamic properties of carbon black filled elastomers containing liquids”, Ph.D. Thesis, Queen Mary and Westfield College, University of London (2000)

ดร. ชูเดช ตีประเสริฐกุล
การศึกษา : ปรินซ์อาเกอ (วิศวกรรมยาง)
Queen Mary College, University of London ประเทศอังกฤษ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน : อาจารย์
ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

บุลลิก ตังใจ
การศึกษา : ปรินซ์นาโก (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน : ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท Kimpai Group จำกัด