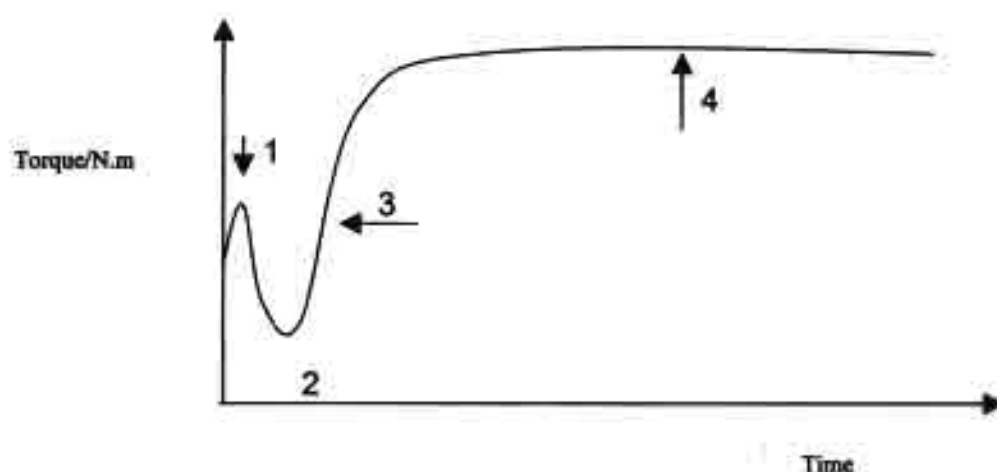


แรง โดย Disc ดังกล่าวจะสามารถเคลื่อนที่ไปกลับด้วยมุมองศาในการเคลื่อนที่ต่ำ เมื่อเวลาที่ควบคุมภายใต้ อุณหภูมิค่าหนึ่งวางอยู่บน Disc ดังกล่าวจะทำให้ค่าแรงเหวี่ยง (Torque) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ในจุดที่ 1 เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงก่อนที่จะ Curing Agent จะเกิดการแตกตัวจะทำให้โมเลกุลอย่างเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ความหนืดลดลง แรงที่ใช้ในการบิด Disc ลดลงดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1 จุดที่ 2 เมื่อ Curing Agent เริ่มแตกตัวอย่างก็จะเพิ่มขึ้นทำให้แรงที่ต้องใช้ในการบิด Disc เพิ่มขึ้นดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1 ช่วงที่ 3 จนกระทั่งการแตกตัวสมบูรณ์ความแรงของยางไม่เพิ่มขึ้นค่า Torque ก็จะคงที่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วงที่ 4



รูปที่ 2.1 Curing curve ที่ได้จากเครื่อง Oscillating Disc Rheometer

โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างยางน้ำหนัก 10 g อย่างน้อย 5 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดของยางในการทดสอบ โดย ตัวแปรในการทดสอบเป็นดังนี้

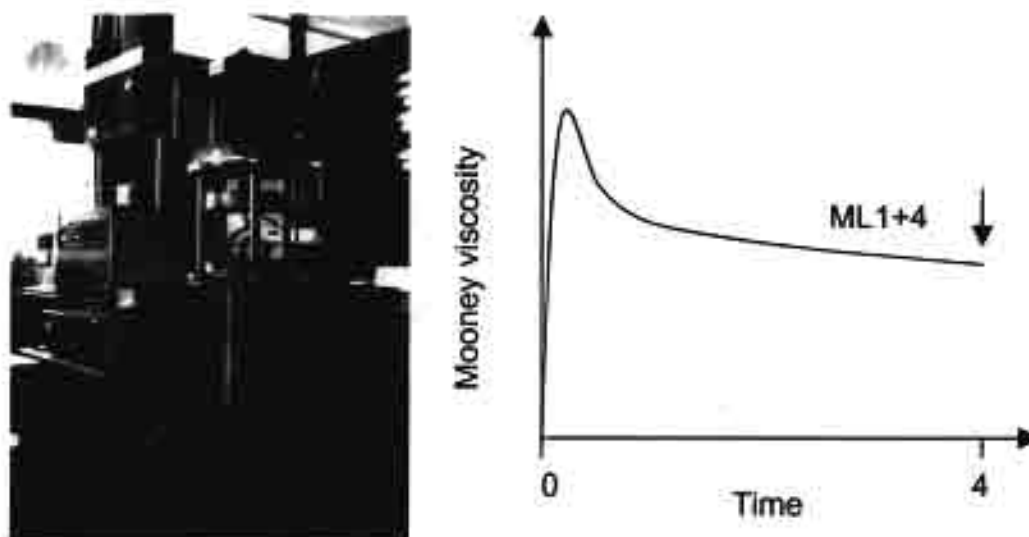
อุณหภูมิในการทดสอบ	160 °C
องศาในการVibrate ของ Disc	1°

โดยจากการทดสอบจะใช้เวลาน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการ Crosslink 100% (Torque สูงสุดมาเป็นเวลาในการขึ้น รูปของขึ้นงานยาง)

2.5 การใช้เครื่อง Mooney Viscometer

เครื่อง Mooney Viscometer ในการศึกษานี้ใช้ประโยชน์ในการเทียบความหนืดของยางที่เตรียมได้ทั้งสองชนิด เพื่อหาเวลาในการ Masticate ที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบจากความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล โดยหลักการของเครื่อง Mooney Viscometer จะค่อนข้างใกล้เคียงกับ ODR แต่จะวัดความหนืดเนื่องจากการหมุน Rotor ไม่โดยรอบ

ในการศึกษานี้ ทำการชั่งยางตัวอย่างน้ำหนัก 15 g จำนวน 2 ชิ้นประกบด้านบนและด้านล่างของ Rotor ก่อนที่จะนำไปวัดค่าความหนืดในเครื่อง Mooney Viscometer โดย Rotor ที่ใช้เป็น Rotor ขนาดใหญ่ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C โดยทั้งในการทดสอบจะปล่อยให้ยางอยู่ในสภาวะอุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 นาที ก่อนที่ Rotor จะหมุน วัดค่าความหนืดหลังจาก Rotor หมุนไป 4 นาที (ML1+4) โดยลักษณะกราฟที่ได้เป็นดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 Curve Mooney viscosity ที่ได้จากเครื่อง Mooney Viscometer

2.6 การขึ้นรูปชิ้นงานยาง

ยางที่ได้จากการผสมจะนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาด 150x150x2 mm³ ในแม่แบบภายในเครื่องอัดความดันที่ควบคุมความร้อน (Compression Moulding) โดยควบคุมความร้อนที่ 160 °C ใช้ระยะเวลาตามที่หาได้จากเครื่อง ODR โดยยางที่ทำการขึ้นรูปแล้วจะถูกเก็บไว้ในสถานที่ที่ไม่มีแสงเพื่อป้องกันการเกิด Degradation ถึงแม้จะมีการเติม Antioxidant ในยางแล้ว

2.7 การหาปริมาณ Crosslinking Density

ในการศึกษานี้เพื่อป้องกันผลที่จะเกิดจากความแตกต่างของปริมาณ Crosslinking Density และผลของน้ำมันต่อ Crosslinking density จึงจำเป็นต้องหาปริมาณ Crosslinking Density ของยาง โดยปกติทั่วไปการหาปริมาณ Crosslinking density สามารถหาได้ 2 วิธีคือ วิธีการทางเคมี และ วิธีการทางฟิสิกส์ โดยในการศึกษานี้จะใช้ ทั้ง 2 วิธี

วิธีการทางเคมี

หลักการในการหาปริมาณ Crosslinking Density วิธีนี้คือยางที่มีปริมาณ Crosslink มากขึ้นเท่าไรการบวมสารละลายก็จะลดลงเท่านั้นเนื่องจากโมเลกุลจะถูกยึดมากขึ้นไม่สามารถเคลื่อนที่เนื่องจากแรงดันจากสารละลายที่ไหลเข้าไปในยางได้โดยในการศึกษานี้สามารถหา Crosslinking Density ได้ดังนี้

ซึ่งยางที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าประมาณ 0.5 g นำยางมาแช่ใน n-Decane แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึม n-Decane และเวลา และหาปริมาณ n-Decane ที่ยางสามารถบวมได้มากที่สุด(M_s) โดยในการศึกษาจะหาปริมาณของเนื้อยางที่อยู่ในยางที่บวมน้ำมัน(V_s)จากความสัมพันธ์

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_{Decane}}$$

สมการที่ 22

เมื่อ V_s คือปริมาตรของ Decane ที่ดูดซับโดยยาง, ρ_{Decane} คือ ความหนาแน่นของ n-Decane ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.89g/cm^3

$$V_{rel} = \frac{M_{rel}}{\rho_r}$$

สมการที่ 23

เมื่อ V_{rel} คือปริมาตรของยางเริ่มต้น, M_{rel} คือน้ำหนักของยางเริ่มต้น และ ρ_r คือความหนาแน่นของยาง

$$V_r = \frac{V_{rel}}{V_{rel} + V_s}$$

สมการที่ 24

นำค่าอัตราส่วนของปริมาตรของเนื้อยางทั้งหมดในน้ำมัน (V_r) มาใช้ในสมการ Flory-Rehner equation เพื่อหาปริมาณ Crosslink density

$$\ln(1 - V_r) + V_r + \chi V_r^2 + 2\rho_r V_0 [x]_r^{\frac{1}{2}} = 0$$

สมการที่ 25

เมื่อ V_0 คือ Molar volume ของ n-Decane ซึ่งมีค่า 195.88 cm^3 , χ คือค่า interaction parameter ระหว่างยาง กับ n-Decane และ $[X]$ คือค่า Crosslink Density

โดยทั่วไปในการแสดงปริมาณ Crosslink Density มักแสดงในรูปน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุด 2 จุดที่เกิด Crosslink (M_c) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$M_c = \frac{l}{2[x]}$$

สมการที่ 26

วิธีการทางฟิสิกส์

ในการศึกษาหาปริมาณ Crosslink density โดยวิธีทางฟิสิกส์นั้น เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างการต้านต่อแรงดึงของยางกับระยะที่ดึงยางชนิดนั้นออกไป Modulus ของยางจะสัมพันธ์กับปริมาณ Crosslink Density โดยอาศัย Mooney Equation ที่แสดงไว้ในสมการที่ 27 โดยในการศึกษานี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ที่หาได้จากการดึงโดยใช้เครื่อง Instron ซึ่งจากกราฟดังกล่าวสามารถแปลงมาใช้สมการของ Mooney Equation ได้

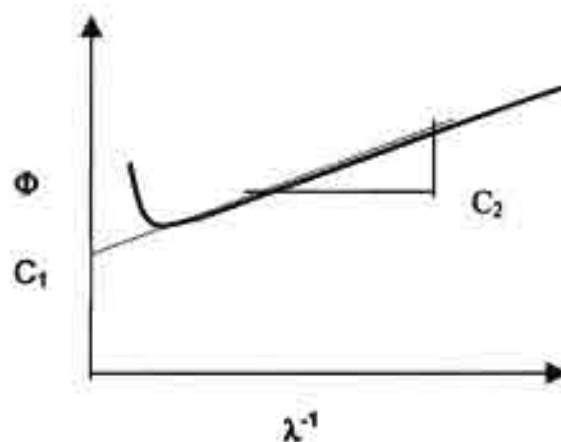
$$\Phi = \frac{F}{2A_0(\lambda - \lambda^{-2})} = c_1 + \frac{c_2}{\lambda}$$

สมการที่ 27

โดย Φ เรียกว่า Reduced Stress, λ คือ ค่า Extension ratio, C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของ Mooney ซึ่งค่า C_1 จะหาได้จากรูปที่ 2.3 และ มีความสัมพันธ์กับ Crosslink Density ดังสมการที่ 28

$$M_c = \frac{\rho RT}{2C_1}$$

สมการที่ 28



รูปที่ 2.3 Mooney plot สำหรับหาค่า Crosslink Density

2.8 การหาสมบัติการดูดซึมน้ำมัน

ลักษณะการหาสมบัติการดูดซึมน้ำมันเหมือนกับหาปริมาณ Crosslink โดยใช้ชนิดของน้ำมันที่จะศึกษาเป็นสารละลายโดยในการศึกษานี้ นำยางน้ำหนัก 0.5 g ซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนก่อนที่จะนำไปแช่ในน้ำมันที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นจับเวลาโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนไปกับเวลาเพื่อนำมาใช้เตรียมยางที่มีปริมาณน้ำมันต่างกัน โดยสมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 โดยจากการศึกษาจะได้ Equilibrium Swelling Curve ดังแสดงในรูปที่ 2.4

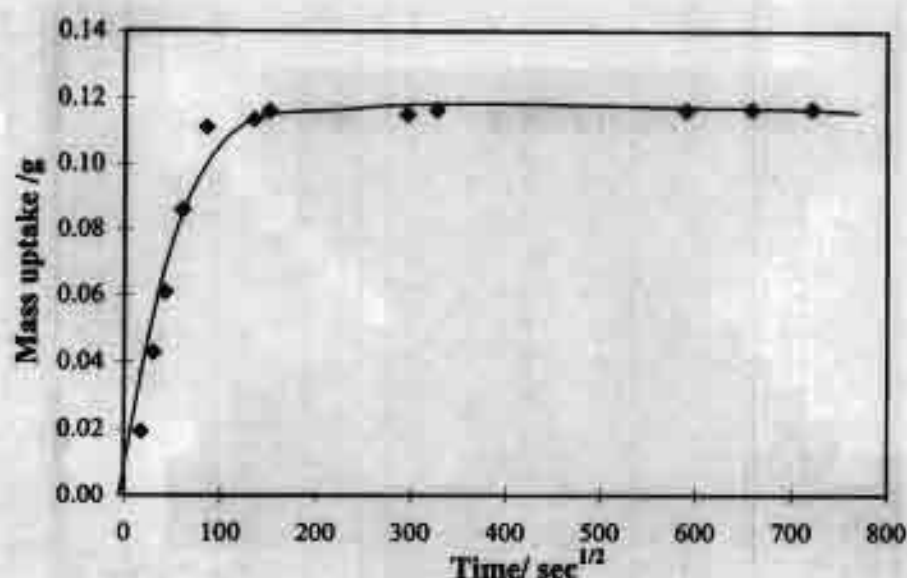
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา

สมบัติของน้ำมัน	Aliphatic Oil
ASTM Type	103
Density 15°C, kg/l	0.901
Viscosity 100cc. CSI	3.7
Flash Point, °C	-42

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเลือกเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมยางที่มีปริมาณน้ำมันต่างๆกัน

2.9 การเตรียมยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ

ในการเตรียมยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่จะศึกษานั้นสามารถเตรียมได้โดย นำยางขนาด $75 \times 75 \times 1 \text{ mm}^3$ มาแช่ในอ่างที่มีน้ำมันตามระยะเวลาที่หาได้จากความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยซึ่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนที่จะนำไปแช่น้ำมันและหลังจากที่แช่ตามระยะเวลาที่กำหนด นำยางมาชั่งกับกระต่ายทิงแล้วเก็บไว้อย่างน้อย 3 วันก่อนที่จะนำมาชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และ Rubber Volume fraction สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 22-24



รูปที่ 2.4 Equilibrium Swelling ของยางในน้ำมัน

2.10 การหาสมบัติทางพลศาสตร์

สมบัติทางพลศาสตร์ในการศึกษานี้เนื่องจากใช้ยางที่มีความนิ่มตัวสูงและมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบทำให้ต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่ต้องประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นคือเครื่อง Oscillating Beam โดยลักษณะของเครื่องดังกล่าวแสดงไว้ในรูป ที่ 2.5

Oscillating beam

Oscillating beam เป็น Balance Beam ที่สร้างขึ้นเพื่อวัดอุปสงค์เพื่อให้สั้นด้วยเวลาที่ของส่วนยางที่ติดเกาะติดอยู่กับ grip ด้านขวาของ beam ส่วนทางด้านขวาของ Beam เป็นแผ่นทองแดงซึ่งแผ่นทองแดงนี้ใช้เป็น reference สำหรับ inductive transducer เพื่อวัดระยะระหว่าง inductive transducer กับแผ่นทองแดงซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อยางสั้น ค่าความเฉื่อยของ Beam มีผลอย่างมากต่อการหาสมบัติทางพลศาสตร์ น้ำหนักที่ทั้งสองด้านของ Beam สามารถเปลี่ยนได้โดยมีน้ำหนักตั้งแต่ 0-100 g และความยาวจากกึ่งกลางของ Beam จนถึง Grip ที่ยางติดอยู่มีระยะ 56 mm



รูปที่ 2.5 เครื่องมือในการตรวจสอบสมบัติทางพลศาสตร์^{13,15,16}

Power Generator (0-30 V)

Power Generator ใช้เปลี่ยนกระแสปกติ 220 V เป็นกระแสที่มีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 12 V ซึ่งใช้สำหรับ Inductive Transducer

Inductive Transducer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจจับโลหะ โดยระยะทางระหว่างโลหะทองแดงและ Inductive Transducer จะอยู่ในรูปกระแสไฟฟ้าโดย Output ที่ได้ก็จะเป็นกระแส แต่เนื่องจาก Recorder ที่ใช้จะรับ Input เป็น Voltage จึงต้องมีการเปลี่ยน Output ของ Transducer โดยใช้ตัวความต้านทานขนาด 500 โอห์มมาต่อไว้

Knife edge

Knife edge เป็นส่วนที่รองรับ Beam ให้อยู่ในสมดุล การออกแบบ Knife edge มีความสำคัญต่อการหาสมบัติทางพลศาสตร์มาก เนื่องจากอาจเป็นส่วนที่จะทำให้เกิดการ damping ได้ทำให้ค่าที่ได้อาจผิดพลาดไป โดย Knife edge ที่ใช้มีขนาด $0.7 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ และมุมที่รองรับมีขนาด 60°

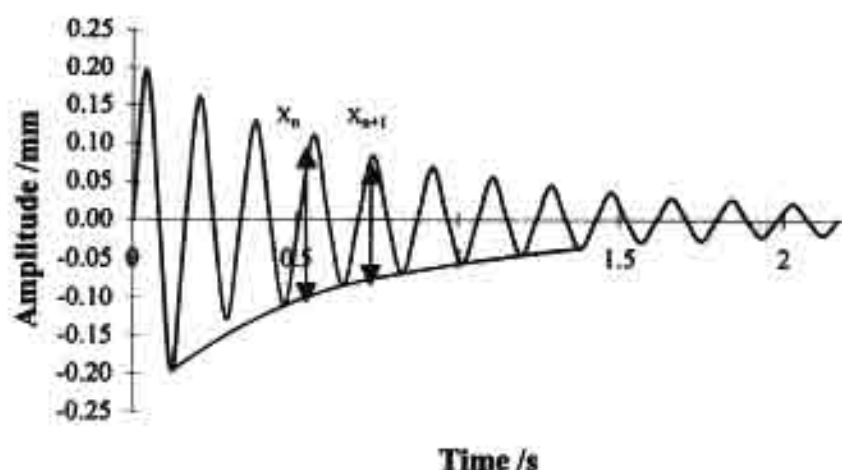
Recorder

เครื่อง Recorder เป็นเครื่องที่ในแกน Y รับค่าเป็น Voltage ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสั่นของยางส่วนแกน X เป็นระยะทางที่เคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อทราบความเร็วในการเคลื่อนที่ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage ที่เปลี่ยนไปกับเวลาได้โดยค่า Sensitivity ในแกน Y อยู่ในช่วง 0.2 mV - 500 V ส่วนความเร็วของ Chart อยู่ในช่วง 0 - 60 mm/min

โดยหลักการเครื่องมือดังกล่าวจะอาศัยหลักการของ Free vibration คือยางจะสั่นด้วยความถี่ของยางและ Amplitude จะลดลงตามเวลาในการสั่นเนื่องจากการสูญเสียของพลังงานในการสั่น ยางจะถูกยึดหัวท้ายเพื่อประโยชน์ในการยึดยาง ยางจะถูกยึดบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานด้วย Grip ด้านหนึ่งของ Beam ซึ่งตั้งสมดุลอยู่บน

Knife Edge ส่วนอีกด้านหนึ่งของ Beam จะเป็นแผ่นทองแดงซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการวัดตำแหน่งระยะห่างของ Beam กับ inductive Transducer ซึ่งเมื่อขดถูกทำให้สั่น Beam จะถูกทำให้สั่นขึ้นลงโดย Amplitude ในการสั่นค่อยๆลดลงซึ่งเราสามารถวัดระยะและความถี่ในการเปลี่ยนแปลงได้จากกราฟที่วัดได้จาก Inductive Transducer

โดยในการศึกษาเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด $50 \times 150 \times 1 \text{ mm}^3$ หลังจากนั้นนำมาวัดการสั่นโดยใช้เครื่อง Oscillating Beam ซึ่งจะได้ลักษณะกราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 โดย การวัดโดยใช้ Recorder มีตัวแปรในการวัดคือ ค่า Sensitivity เป็น 20V และความถี่ในการเคลื่อนที่ของกระดาษเป็น 60 mm/min



รูปที่ 2.6 Oscillating curve ที่ได้จากเครื่อง Oscillating beam

จากกราฟที่ได้จะได้ค่าความถี่ของการสั่นจากความยาวคลื่นของแต่ละลูกคลื่นซึ่งเมื่อคิดความสัมพันธ์กับความถี่ของกระดาษก็จะสามารถหาความถี่ได้ซึ่งจากความถี่ (ω) ที่ได้จะทำการเปลี่ยนเป็นความถี่เชิงมุม (ω) ดังสมการที่ 29

$$\omega = 2 \pi f$$

สมการที่ 29

เราสามารถหาค่า Dynamic Storage Modulus ได้ดังสมการที่ 30-32

$$I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + 2(E' + iE'')\lambda^{-2} r^2 \frac{A_0}{l_{oh}} \theta = 0$$

สมการที่ 30

ได้ค่า Output ที่ไม่

เปลี่ยนแปลงภายใน

ระยะเวลาการสั่น

กับระยะเวลาที่แสดง

$$\theta = \theta_0 e^{-\gamma t} e^{i\omega t}$$

สมการที่ 31

$$E' = \frac{I\omega^2}{2r^2} \frac{l_0}{A_0} \lambda^2$$

สมการที่ 32

โดย E' คือค่า Dynamic storage modulus, I คือ ค่า Moment of Inertia ของ Beam, r คือ ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของ Beam จนถึง Clamp ที่ยึดอย่างตึงไว้, A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของขาง, l_0 คือความยาวครึ่งหนึ่งของขาง และ λ คือ Extension Ratio

สำหรับค่า Dynamic loss modulus สามารถหาได้จากสัดส่วนการลดลงของแอมพลิจูดในลูกคลื่นที่ต่อเนื่องกันโดยนาค่าได้ดังนี้

$$\Lambda = \ln\left(\frac{x_s}{x_{s+1}}\right)$$

สมการที่ 33

โดยค่า Λ คือค่า Logarithmic decrement เป็น Natural log ของอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน โดย x_s คือแอมพลิจูดเริ่มต้นและ x_{s+1} คือแอมพลิจูดของลูกคลื่นถัดไป

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

สมการที่ 34

ในบทต่อไปจะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ Oscillating beam, การหา Parameter ที่จำเป็นและการทดสอบเปรียบเทียบเพื่อความต้องการในการใช้ Oscillating beam วัดค่า dynamic mechanical properties

2.11 การวัดระยะ Linearity ของ Inductive transducer

ในการวัดสมบัติทางศาสตร์ของขางโดยใช้เครื่องมือ Oscillating beam นั้นจำเป็นอย่างยิ่งต้องใช้ตัววัดระยะที่ไม่มีการสัมผัสกับ Beam เนื่องจากการสัมผัสจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานซึ่งทำให้การวัดการสูญเสียพลังงานของขางผิดพลาด โดย inductive transducer จะใช้ในการวัดระยะระหว่างตัวขางมันเองกับแผ่นทองแดง ที่อยู่ทางด้านซ้ายของ Beam แต่ระยะในการวัดนั้นมิใช่อำนาจ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนว่าระยะห่างที่ยังคงทำ

$$F = \left(\frac{mg}{2} \right) \left(\frac{x}{l} \right)$$

สมการที่ 35

ซึ่ง m คือน้ำหนักของ Beam, g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, x เป็นค่าการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงของ beam หลังจากการสั่น, l เป็นความยาวของเชือก

โดยอัตราส่วนของ (x/l) จะให้ค่าของ $\tan \theta$ ถ้าการเคลื่อนที่เชิงมุมของ beam คือ (x/a) โดย a เป็นความยาวครึ่งหนึ่งของ Beam ดังนั้น Angular stiffness สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K = \frac{Fa}{\theta} = \left(\frac{mg}{l} \right) a^2$$

สมการที่ 36

ซึ่งความถี่ในการสั่น (ν) สามารถหาได้ดังนี้

$$2\pi\nu = \left(\frac{K}{I} \right)^{1/2} = \left(\frac{mga^2}{I} \right)^{1/2}$$

สมการที่ 37

โดย I คือ Moment of inertia โดยสมการที่ 17 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I = \left(\frac{mga^2}{4l\pi^2\nu^2} \right)$$

สมการที่ 38

ในการศึกษาความยาวของเชือกทั้งสองเส้นที่แขวนปลายของ Beam ไว้คือ ระยะทางจากปลายที่แขวนเชือก ด้านหนึ่งของ Beam จนถึงจุดกึ่งกลางของ Beam คือ น้ำหนักที่ปลายทั้งสองด้านของ Beam สามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก 0-80g โดยในการศึกษาดังกล่าวน้ำหนักให้สมดุลกันทั้งสองปลายของ Beam ซึ่งจะให้น้ำหนักของ Beam อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-0.28 kg ซึ่งในการศึกษาค้นคว้าค่า Moment of inertia ที่หาได้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่า Moment of inertia ของ oscillating beam ที่มีน้ำหนักที่ปลายทั้งสองข้างตั้งแต่ 0-80 g

น้ำหนักที่ปลายแต่ละข้างของ Beam / g	Moment of Inertia / kg.m ²
0	0.0006
20	0.0075
40	0.0084
60	0.0095
80	0.00105

ในการศึกษานี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการใช้ oscillating beam ตรวจสอบสมบัติทางพลศาสตร์จึงใช้ค่า Moment of inertia ที่มีค่าต่างกันในการทดสอบค่า Dynamic storage modulus เพื่อดูว่ามีผลอย่างไรต่อค่าที่ได้โดยทดสอบกับยางธรรมชาติที่ไม่ถูกดัดยัดซึ่งพบว่าค่า Dynamic storage modulus มีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับน้ำหนักที่อยู่ปลายทั้งสองข้างของ Beam ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ตลอดการวิจัยครั้งนี้ใช้ค่า moment of inertia 0.0015 เนื่องจากยางที่ใช้มีความนิ่มตัวสูงการคันของยางจึงต้องใช้น้ำหนักของ Beam ช่วยเพื่อการแสดงผลที่ได้จาก Inductive transducer ที่มีความละเอียดมากขึ้น

2.13 การทดสอบความถูกต้องของ Oscillating Beam โดยใช้ steel spring

เพื่อความถูกต้องในการใช้เครื่อง Oscillating beam การหา stiffness ของ spring โดยใช้ Oscillating beam ถูกนำมาเปรียบเทียบกับการใช้วิธี Force-extension ซึ่งค่าของ Stiffness ที่หาได้จากสองวิธีนี้ควรมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก steel spring มีพฤติกรรมที่เป็น linearity ภายใต้แรงดึง ซึ่ง spring ตามตัวที่มีค่า stiffness แตกต่างกันถูกใช้ในการศึกษา โดยวิธี Force-extension นั้นใช้เครื่อง INSTRON Extensometer ในการทดสอบ โดยค่า k ของ spring สามารถหาได้จากการใช้ Oscillating beam ดังสมการที่ 39

$$I(2\pi v)^2 = 2kr^2$$

สมการที่ 39

ซึ่ง I คือ ค่า Moment of inertia ซึ่งมีค่าเท่ากับ kg.m^2 ในการศึกษา, r คือระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของ beam จนถึง grip ที่ยึด spring ไว้ซึ่งมีค่า mm และ V คือความถี่ของการคัน ส่วนค่า stiffness ของ spring ที่หาได้จาก Force-extension นั้น ทำการศึกษาโดยการดึง spring แบบ one-dimension แล้วหาค่า stiffness ผ่านความสัมพันธ์ในสมการที่ 40 โดยหาความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางในการยืดของ spring ความสัมพันธ์ได้คือ stiffness ของ Spring

$$F = kx$$

สมการที่ 40

โดย k' คือ stiffness ของ spring ที่หาได้จาก force-extension

ค่าที่ได้จากการศึกษารายงานไว้ในตารางที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองวิธีดังนั้นจากการทำการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด Oscillating beam จึงสามารถนำมาศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางได้

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบค่า k ที่ได้จาก oscillating beam และ ค่า k' ที่ได้จาก Force-extension

ชนิดของ spring	K $/N.m^{-1}$	K' $/N.m^{-1}$
No.1	187.52	186.95
No.2	302.14	302.01
No.3	23.18	23.13

บทที่ 3

การศึกษามลของการใส่น้ำมันก่อนและหลังการผสมต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย

การศึกษาในบทนี้เป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตาข่ายเนื่องจากน้ำมันของยาง ซึ่งในการศึกษามลของน้ำมันต่อสมบัติทางพลศาสตร์นั้น ยางที่เป็นเป้าหมายคือผลิตภัณฑ์ยางที่อยู่ในสถานะที่มีน้ำมันเป็นสภาพแวดล้อมเช่น ยางในห้องเครื่องรถยนต์ ดังนั้นน้ำมันจะถูกดูดซึมหลังจากได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันไปแล้ว อย่างไรก็ตามในการผสมยางโดยทั่วไปนั้นเราสามารถเติมน้ำมันไปในระหว่างการผสมได้ซึ่งเรียกว่า (Oil-extended Rubber) ซึ่งนิยมใช้เช่นกันในการผลิตยางที่ต้องการลดสมบัติเชิงกลโดยมีน้ำมันเป็นตัวช่วยลดสมบัติดังกล่าวซึ่งโครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นจะถูกกระทบด้วยการที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าโครงสร้างตาข่ายของยางที่นำไปบวมน้ำมันหลังจากผ่านกระบวนการ วัลคาไนซ์เซชันมิได้ถูกเปลี่ยนแปลง จึงเป็นสาเหตุในการศึกษามลของการใส่น้ำมันก่อนและหลังการผสมต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย ในการศึกษาให้ใช้ peroxide เป็นสารวัลคาไนซ์เพื่อหลีกเลี่ยงผลการปนเปื้อนที่จะเกิดจากการใช้ sulphur เนื่องจากมีสารเคมีหลายชนิดมาเป็นองค์ประกอบ

3.1 การศึกษามลของการใส่น้ำมันก่อนและหลังการผสมของยางธรรมชาติต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายในยาง ที่ใช้ peroxide ในการวัลคาไนเซชัน

ยางที่ใช้ในการศึกษาเรื่องดังกล่าวจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่ผสมโดยไม่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบตั้งที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.4 ซึ่งยางดังกล่าวเมื่อขึ้นรูปแล้วจะถูกนำมาแช่ไว้ในน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา ที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ดูดซับน้ำมันในปริมาณที่ต่างกัน ก่อนจะนำมาตัดเป็น Dumbbell shape เพื่อศึกษา Stress-strain โดยใช้เครื่อง INSTRON Extensometer ที่ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความสัมพันธ์ของ Stress-strain ที่ได้สามารถหาความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายได้ตามสมการที่ 27-28 และเพื่อให้ง่ายต่อการติดตามจึงแสดงสมการดังกล่าวไว้ในบทนี้ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 41-42

$$\Phi = \frac{F}{2A_0(\lambda - \lambda^{-2})} = C_1 + \frac{C_2}{\lambda}$$

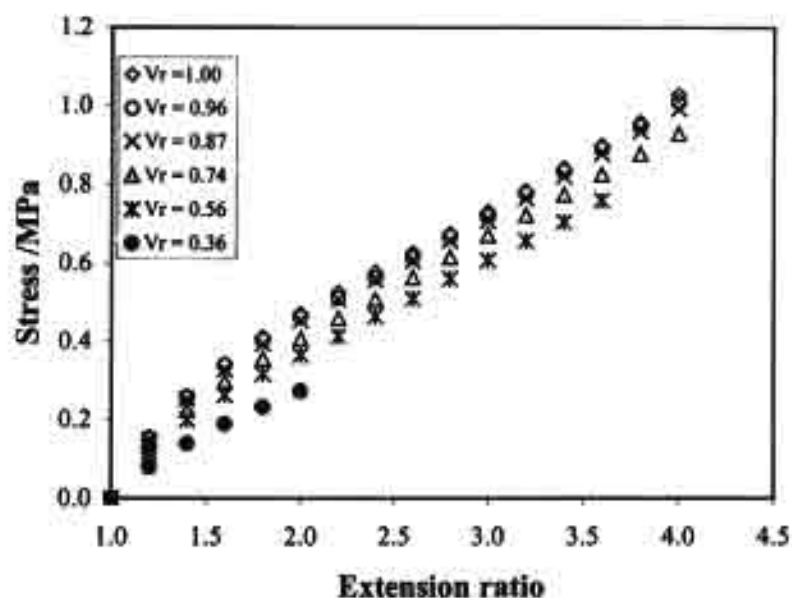
สมการที่ 41

โดย Φ เรียกว่า Reduced Stress, λ คือ ค่า Extension ratio, C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของ Mooney และ มีความสัมพันธ์กับ Crosslink Density ดังสมการที่ 42

$$M_c = \frac{\rho RT}{2C_1}$$

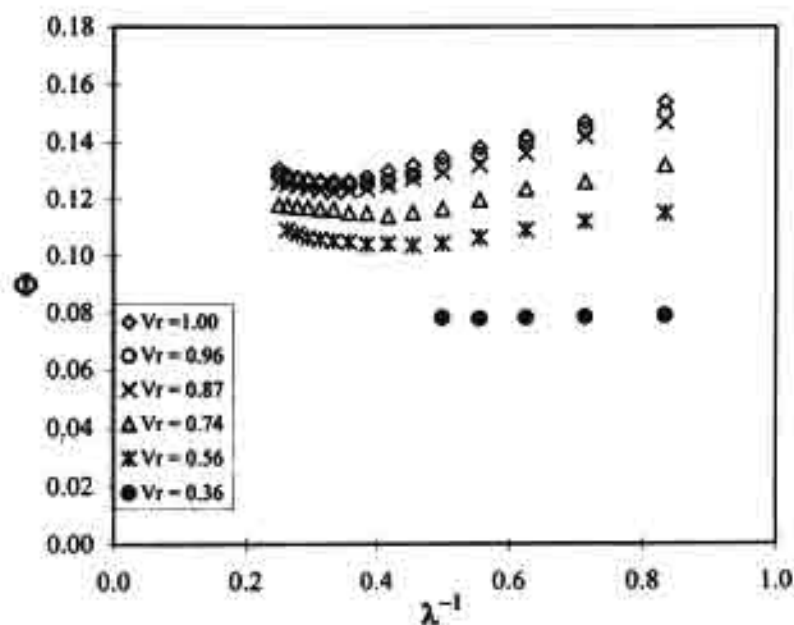
สมการที่ 42

ส่วนยางอีกส่วนหนึ่งจะถูกผสมน้ำมันไปเลยในปริมาณที่ต่างกัน (5-25 phr) ยางส่วนนี้หลังจากขึ้นรูปแล้วจึงนำไปศึกษา ความสัมพันธ์ของ Stress-strain เพื่อนำค่า C_1 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับยางที่ผ่านการบวมน้ำมันซึ่งผลที่

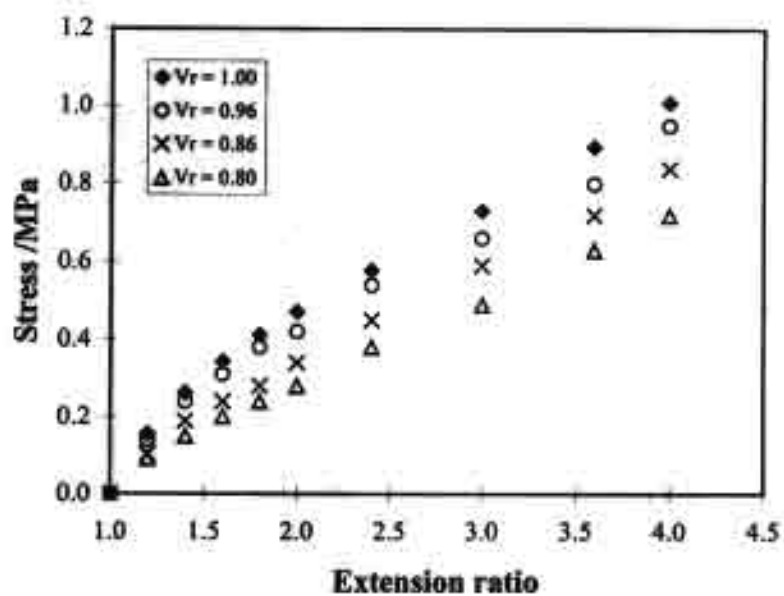


ได้จากการศึกษาดังกล่าวได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.1-3.4

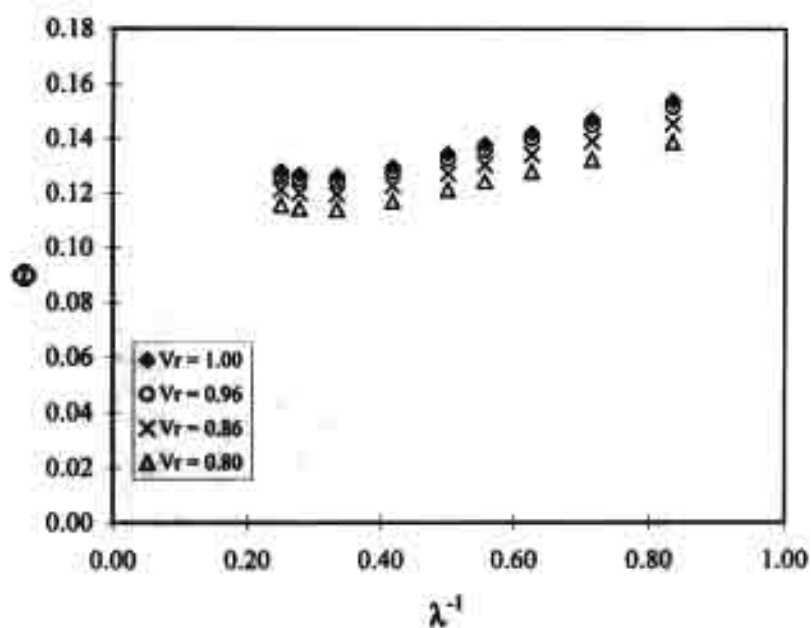
รูปที่ 3.1 stress-strain ของยางที่ผ่านกระบวนการบวมน้ำมัน



รูปที่ 3.2 Mooney plot ของยางที่ผ่านกระบวนการบวมน้ำมัน



รูปที่ 3.3 stress-strain ของยางที่ผ่านกระบวนการผสมน้ำมันก่อนวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.4 Mooney plot ของยางที่ผ่านกระบวนการผสมน้ำมันก่อนวัลคาไนซ์

พบว่าจากรูปที่ 3.1-3.4 stiffness ของยางจะมีค่าลดลงเมื่อเราเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งในยางที่บวมน้ำมันและผสมน้ำมันลงไป ซึ่งจาก Mooney plot เราสามารถหาค่า C_1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

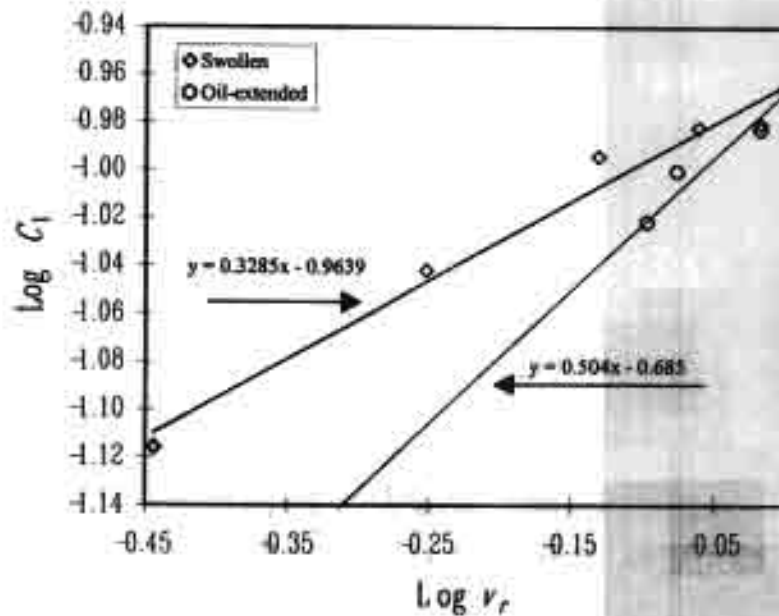
ตารางที่ 3.1 ค่า C_1 จาก Mooney plot ของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ (จากการบวมน้ำมันและจากการผสม)

องค์ประกอบของยางในยางที่มี น้ำมันเป็นองค์ประกอบ (บวมน้ำมัน)	C_1 /MPa	C_2	องค์ประกอบของยางใน ยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ ประกอบ (ผสม)	C_1 /MPa	C_2
1.00	0.1082	0.0571	1.00	0.1082	0.0571
0.96	0.1046	0.0552	0.96	0.1041	0.0523
0.87	0.1042	0.0513	0.84	0.0989	0.0499
0.74	0.1013	0.0348	0.75	0.0952	0.0466
0.56	0.0908	0.0291			
0.36	0.0766	0.0027			

จากตารางที่ 3.1 พบว่า ค่า C_1 ลดลงเมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้นซึ่งจากทฤษฎี simple statistical ค่า C_1 ควรจะลดลงตามปริมาณน้ำมันเป็นไปดังสมการ

$$C_1 = C_{1,dry} v_r^{1/3} \quad \text{สมการที่ 43}$$

ซึ่งเมื่อนำกราฟมาทำเป็น double log plot ระหว่าง C_1 และ v_r ของทั้งยางที่บวมน้ำมันและที่ผสมน้ำมันพบว่ายางที่บวมน้ำมันมีความชันของความสัมพันธ์เท่ากับ $1/3$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบวมน้ำมันสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี simple statistical ซึ่งแสดงว่าความแข็งแรงที่ลดลงนั้นเกิดจากการบวมตัวของน้ำมันไม่ได้มีผลกระทบจากการลดลงของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายแต่อย่างใดดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 แต่สำหรับยางที่ผสมน้ำมันนั้นผลของความชื้นไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งแสดงว่าการลดลงของค่า C_1 ไม่ได้เกิดจากการบวมตัวของโครงสร้างแต่เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของยางซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนของน้ำมันต่อกระบวนการวัลคาไนเซชันทำให้ความหนาแน่นของการเกิดโครงสร้างร่างแหดังกล่าวลดลงไม่เป็นไปตามทฤษฎี



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_1$ และ $\log v_r$ ของยางที่แช่น้ำมันหลังการวัลคาไนซ์และยางที่ผสมน้ำมันในขณะผสม

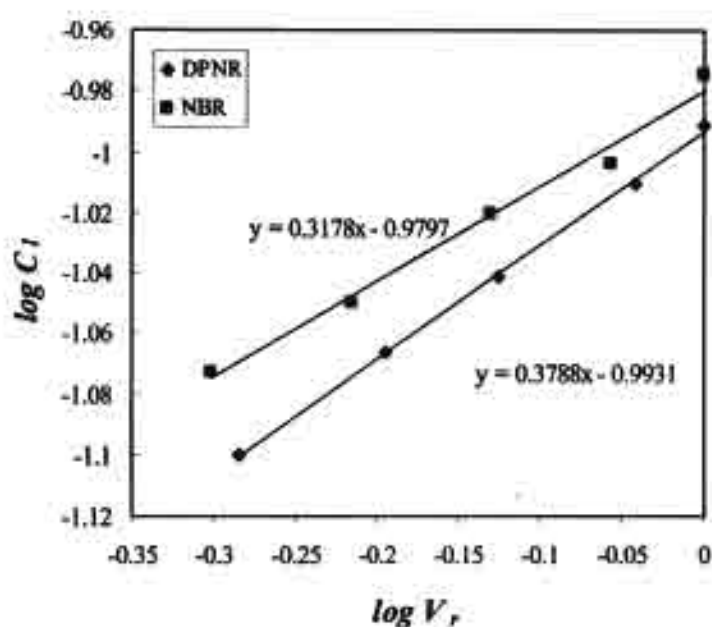
3.2 การศึกษาผลของการใส่น้ำมันหลังผสมของยางต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายในยาง ที่ใช้ peroxide ในการวัลคาไนซ์

จากการศึกษาในข้อ 3.1 พบว่าเมื่อใส่น้ำมันในยางหลังจากการผสมจะไม่ส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย และเนื่องจากยางที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยยางหลายประเภท ดังนั้นเพื่อให้ผลที่ได้จากการศึกษาผลของน้ำมันต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายของยางธรรมชาติสามารถนำไปปรับใช้กับยางชนิดอื่นได้จึงทำการศึกษาลักษณะของยางอีกสองชนิดคือ ยาง deproteinised natural rubber และ ยาง nitrile

ยางทั้งสองชนิดผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานเช่นเดียวกับที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1 โดยศึกษาเฉพาะเมื่อเติมน้ำมันหลังจากการผสมเท่านั้นซึ่งผลการศึกษา Stress-strain behaviour ของยางทั้งสองชนิด เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ Mooney plot ผลที่ได้จึงแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 พบว่าการลดลงของความแข็งแรงของยางทั้งสองชนิดเป็นไปตามทฤษฎีที่แสดงไว้ในสมการที่ 43 ซึ่งจะมีความชันของการลดลงในกราฟ double log plot เป็น 1/3 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.2 ค่า c_1 ของยาง DPNR และ ยาง NBR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบซึ่งใช้วิธีแช่น้ำมันหลังกระบวนการวัลคาไนเซชัน

องค์ประกอบของยางในยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ (DPNR) (น้ำมัน)	C_1 /MPa	องค์ประกอบของยางในยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ(NBR) (น้ำมัน)	C_1 /MPa
1.00	0.1082	1.00	0.1020
0.91	0.0977	0.88	0.0992
0.75	0.0909	0.74	0.0954
0.64	0.0858	0.61	0.0892
0.52	0.0794	0.50	0.0845



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_1$ และ $\log v_r$ ของยางDPNR และ ยางNBRที่แช่น้ำมันหลังการวัลคาไนส์

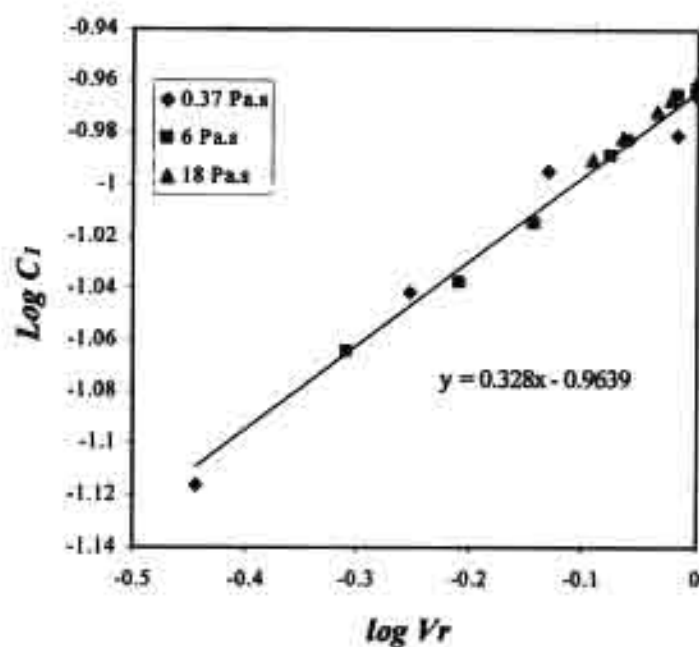
3.3 ผลของความหนืดของน้ำมันต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ

ในการศึกษานี้เพื่อดูผลของความหนืดของน้ำมันต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายของยางที่แช่น้ำมัน หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ โดยการศึกษาทำในยางสองชนิดคือ ยาง NR และ ยาง NBR โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกใช้น้ำมันในการศึกษาค้างนี้ น้ำมันที่มีความหนืดแตกต่างกัน 3 ชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยยางที่ใช้ในการศึกษานี้ผ่านการผสมตามสูตรในตารางที่ 2.4 และผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างและแช่น้ำมันตามที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1 หลังจากผ่านการศึกษา stress-strain behaviour และวิเคราะห์ด้วย Mooney equation แล้วนั้นผลของการลดลงของค่า C_1 ตาม double log plot ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7-3.8 พบว่าความหนืดของน้ำมันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย ของยางธรรมชาติ การลดลงของค่า C_1 เป็นไปตามทฤษฎีในการศึกษากับน้ำมันทั้งสามชนิด แต่สำหรับยาง NBR นั้นพบว่าที่น้ำมันที่มีความหนืดต่ำการลดลงของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายเป็นไปตามทฤษฎี แต่เมื่อเพิ่มความหนืดของน้ำมันการลดลงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากทฤษฎี ซึ่งสิ่งนี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าการเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงค่า C_1 ของ NBR ขึ้นกับชนิดของน้ำมันโดยค่า C_1 จะขึ้นกับสมบัติพูนหนืดของทั้งโครงสร้างของโมเลกุลของยางที่บวมน้ำมัน ซึ่งทั้งโครงสร้างจะตอบสนองต่อการรับแรงจากการดึงเป็นแบบ static จากการศึกษา stress-strain ที่ความเร็วต่ำในช่วงระยะเวลานั้นเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลของน้ำมันและยาง ซึ่งจะพบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำมันมีความหนืดต่ำทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าน้ำมันที่มีความหนืดสูง ดังนั้นในการศึกษาผลของน้ำมันต่อไปจึงเลือกใช้น้ำมันที่มีความหนืดต่ำในการศึกษา

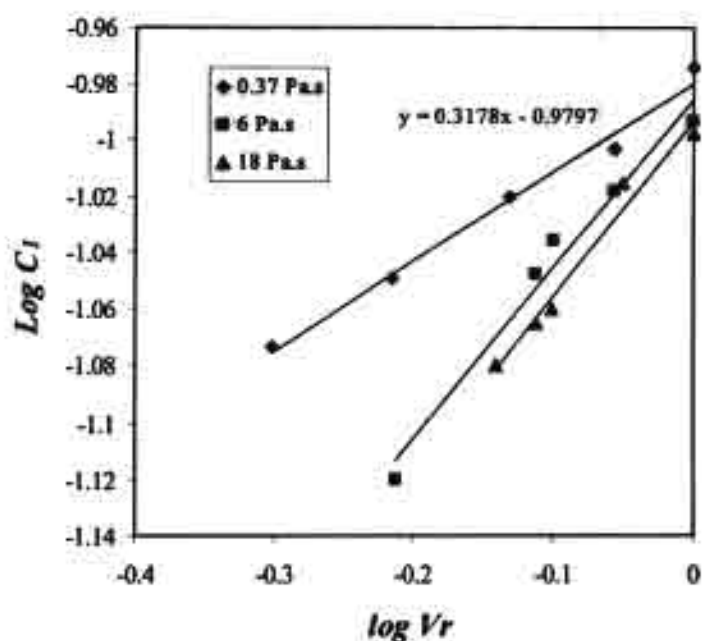
ตารางที่ 3.3 ความหนืดของน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของน้ำมัน	ความหนืด/Pa.s
Aliphatic oil	0.37
Aromatic oil	6.0
Aromatic oil	18.0

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในการศึกษาค้างนี้เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายจึงจะใช้วิธีการแช่น้ำมันหลังจากวัลคาไนซ์ยางโดยน้ำมันที่ใช้นั้นจะใช้น้ำมันที่มีความหนืดต่ำเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการเข้าสู่สมดุลของน้ำมันในยางในขณะทำการทดสอบการรับแรงทั้งในแง่ static และ dynamic



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_1$ และ $\log v_r$ ของยาง DPNR ที่ใช้น้ำมันที่เปลี่ยนแปลงความหนืดหลังการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log c_1$ และ $\log v_r$ ของยาง nitrile ที่ใช้น้ำมันที่เปลี่ยนแปลงความหนืดหลังการวัลคาไนซ์

บทที่ 4

การศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้การดึงยืด

ในบทนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้สภาวะการดึงยืด ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้คือเครื่อง Oscillating beam โดยในการศึกษานี้ได้นำตัวอย่างที่มีขนาด $100 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ ของยางที่ได้ผ่านกระบวนการแช่น้ำมันแล้วมาทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ โดยเมื่อปล่อยให้ยางคืนด้วยความถี่ธรรมชาติ สิ่งที่ได้รับคือ ความถี่ในการสั่นซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งแรงของยาง (Dynamic storage modulus) และการลดลงของ Amplitude ของการสั่นซึ่งสัมพันธ์กับการดูดซับพลังงาน (Dynamic loss modulus) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 32-34

$$E' = \frac{I\omega^2}{2r^2} \frac{l_{os}}{A_0} \lambda^2$$

สมการที่ 32

โดย E' คือค่า Dynamic storage modulus, I คือ ค่า Moment of Inertia ของ Beam, r คือ ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางของ Beam จนถึง Clamp ที่ยึดยางติดไว้, A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของยาง, l_0 คือความยาวครึ่งหนึ่งของยาว และ λ คือ Extension Ratio

สำหรับค่า Dynamic loss modulus สามารถหาได้จากสัดส่วนการลดลงของแต่ละ Amplitude ในลูกคลื่นที่ต่อเนื่องกันโดยหาค่าได้ดังนี้

$$\Lambda = \ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right)$$

สมการที่ 33

โดยค่า Λ คือค่า Logarithmic decrement เป็น Natural log ของอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน โดย x_n คือแอมพลิจูดเริ่มต้นและ x_{n+1} คือแอมพลิจูดของลูกคลื่นถัดไป

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

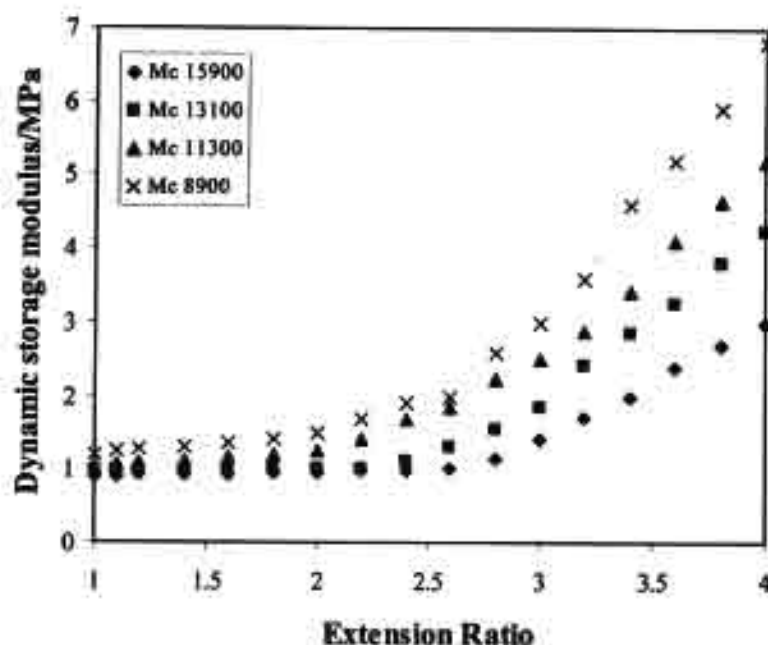
สมการที่ 34

4.1 การศึกษาผลของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางธรรมชาติที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้การดึงยืด

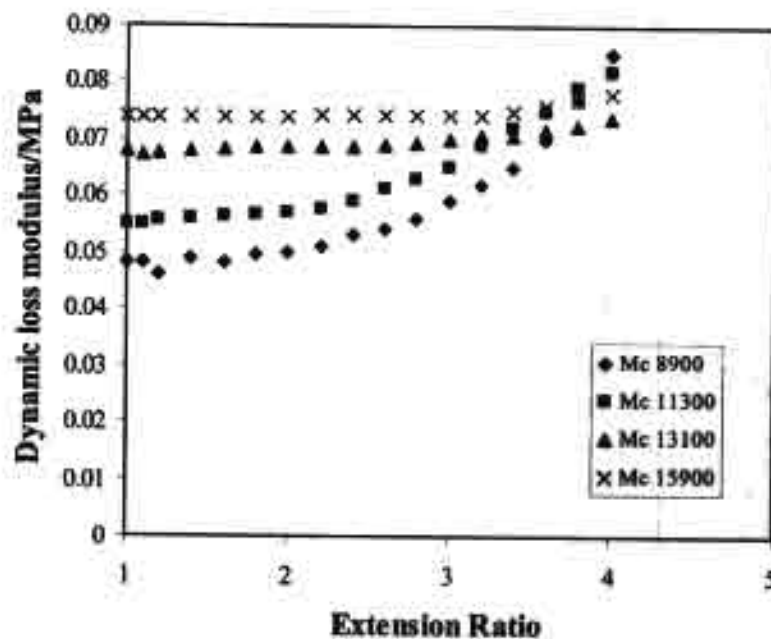
จากบทที่ 3 เราพบว่าเราสามารถควบคุมความหนาแน่นของปริมาณโครงสร้างตาข่ายด้วยกระบวนการแช่น้ำมัน หลังจากการวัลคาไนซ์เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อสมบัติทางพลศาสตร์ที่จะศึกษา ดังนั้นเพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายส่งผลอย่างไรกับสมบัติทางพลศาสตร์ จึงเป็นสาเหตุการศึกษานี้ yangที่ใช้ในการศึกษาคือ Isoprene rubber IR ซึ่งผลมยางโดยใช้สูตรยางในตารางที่ 2.3 ยางที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายที่ได้นำมาขึ้นรูปและเตรียมเป็นชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น โดยค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายของยางแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยในการศึกษาใช้วิธีทางฟิสิกส์คือ ศึกษา stress-strain behaviour แล้ววิเคราะห์ด้วย Mooney equation โดยผลของการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 สูตรยางและความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายของยางที่ใช้ในการศึกษา

ยางและสารเคมี	ปริมาณ/ phr	ปริมาณ/ phr	ปริมาณ/ phr	ปริมาณ/ phr
ยางธรรมชาติ (IR)	100	100	100	100
Antioxidant (6PPD)	3	3	3	3
Di-cumyl Peroxide (DCP)	1	1.5	2	2.5
Molecular Weight between Crosslink M_c	15,900	13,100	11,300	8,900

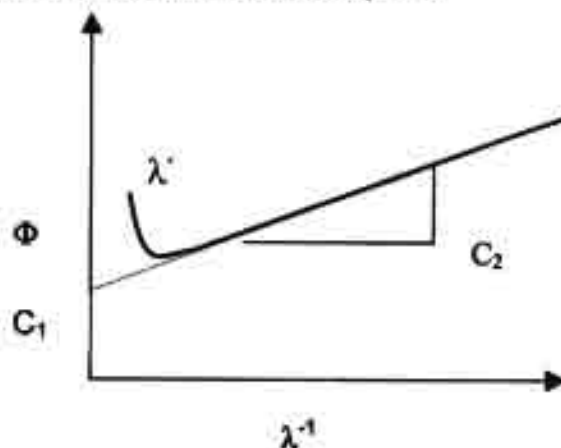


รูปที่ 4.1ความสัมพันธ์ระหว่าง Dynamic storage modulus และความยาวในการดึงยืดของยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายต่างกัน

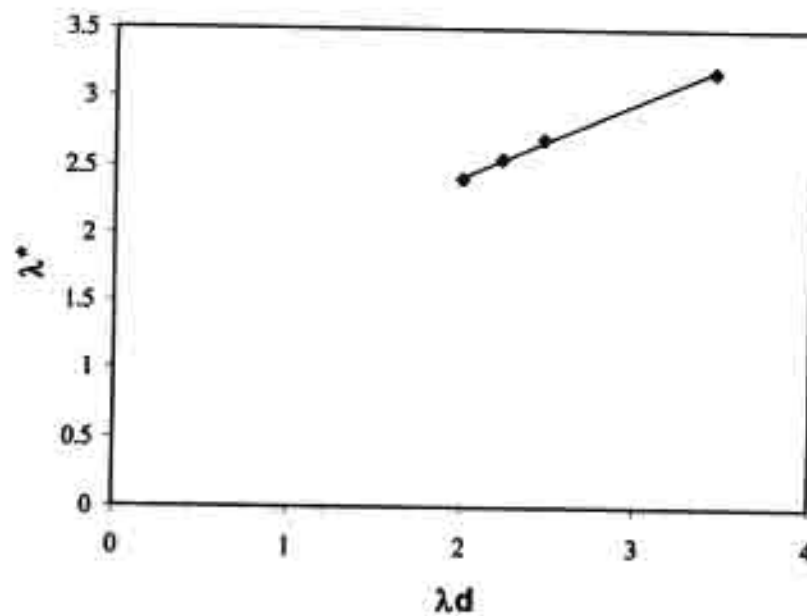


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dynamic loss modulus และความยาวในการดึงยืดของยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายต่างกัน

จากการศึกษาพบว่าค่า Dynamic storage modulus ที่ค่าการดึงยืดต่ำๆ ค่าที่ได้ไม่ขึ้นกับการดึงยืดโดยจะเห็นว่าในช่วงที่คงที่ แต่ค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการดึงยืดมากขึ้นดังแสดงไว้ในรูป 4.1 โดยค่า Dynamic storage modulus จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Dynamic loss modulus ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยที่สภาวะการดึงยืดต่ำๆ ค่า Dynamic loss modulus จะไม่ขึ้นกับการดึงยืดโดยช่วงที่มีค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายมากจะมีค่า Dynamic loss modulus ต่ำกว่าซึ่งเกิดจากโมเลกุลของยางถูกยึดเกาะเป็นโครงสร้างตาข่ายต่ำทำให้สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเนื่องจากสามารถให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลได้มากขึ้น ซึ่งค่าการดึงยืดที่ทำให้ค่า dynamic loss modulus คงที่นี้ จะลดลงเมื่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายสูงขึ้นซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นจุดที่โมเลกุลเริ่มเบี่ยงเบนจากการอธิบายโดย Gaussian Statistical theory โดยเป็นจุดที่โมเลกุลของยางบางส่วนเริ่มเกิด finite extensibility (λ') ซึ่งคือจุดที่แสดงในรูปที่ 4.3

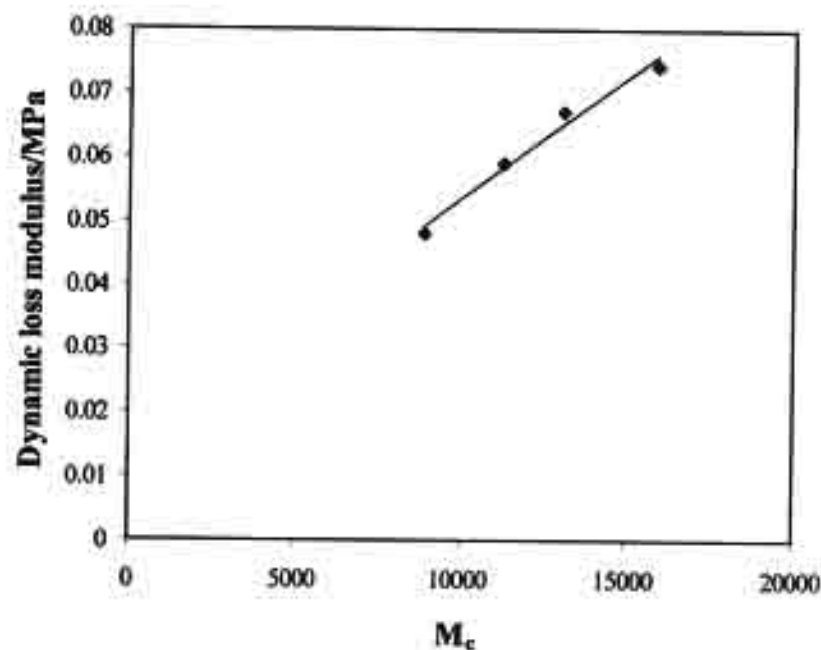


รูปที่ 4.3 λ' ซึ่งหาได้จากการใช้ Mooney equation วิเคราะห์ผลการศึกษา stress-strain behaviour



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ^* ที่หาได้จาก Mooney plot และ λ_0 ที่หาได้จากจุดที่ค่า Dynamic loss modulus เริ่มเปลี่ยนแปลงจากการไม่ขึ้นกับระยะที่ดึงยืด

พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าค่า การดึงยืดที่เริ่มทำให้ค่า Dynamic loss modulus ร้องยางไม่คงที่ (λ_0) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการดึงยืดที่ทำให้โมเลกุลของยางเริ่มเกิด finite extensibility



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่า Dynamic loss modulus ในช่วงที่ไม่ขึ้นต่อระยะทางในการดึงยืดและความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Dynamic loss modulus ในช่วงที่การดึงยืดต่ำกว่า (λ_d) ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.5

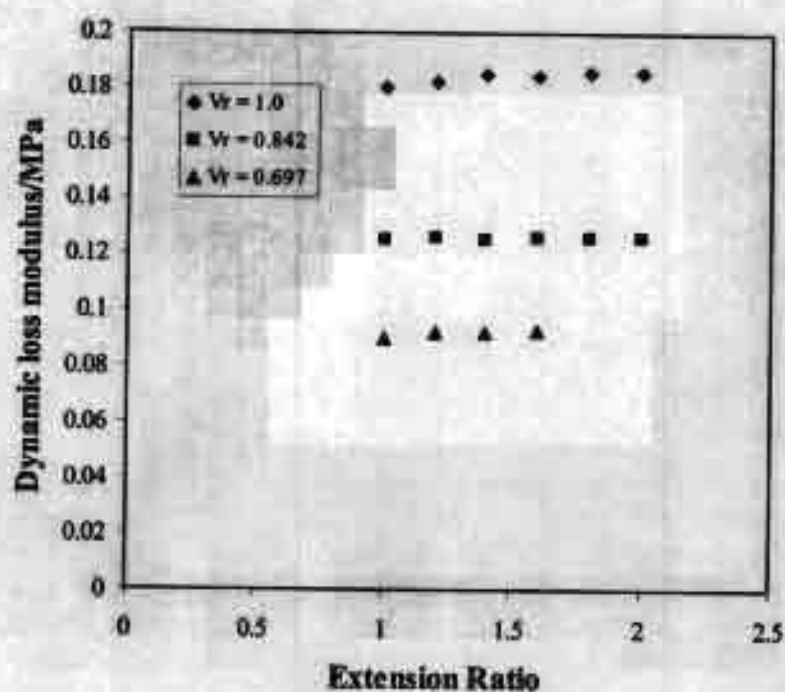
แต่เมื่อศึกษาในสภาวะดึงยืดที่สูงขึ้นจะพบว่าผลที่ได้เปลี่ยนแปลงไปโดยที่ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายสูงจะมีค่า Dynamic loss modulus ที่สูงกว่ายางที่มีค่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายต่ำกว่า ซึ่งอาจเกิดมาจากการมีระยะทางที่ถูกดึงยืดมากขึ้นทิศทางการเรียงตัวของโมเลกุลของยางเริ่มมีความสำคัญต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางโดยมีการศึกษาแล้วพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของการเรียงตัวของโมเลกุลในแนวทิศทางการดึงยืดมากขึ้นเมื่อระบบถูกดึงยืดไปในระยะทางมากขึ้น จะส่งผลต่อการเพิ่มต่อการดูดซับพลังงานของโมเลกุลของยางซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลดังกล่าวจึงสามารถอธิบายได้ว่ายางเมื่อถูกดึงยืดไปในทิศทางเดียวกันโดยมีการยืดติดกันของโมเลกุลจำนวนมากจะส่งผลต่อการดูดซับพลังงานที่มากขึ้นจึงทำให้ยางเมื่อมีปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายสูงจะดูดซับพลังงานมากกว่ายางที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายที่ต่ำเมื่อดึงยืดในระยะทางที่เกินจุดที่เกิด finite extensibility

ดังนั้นจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายมีผลต่อสมบัติทางพลศาสตร์ โดยขึ้นกับระยะทางที่ใช้ในการดึงยืด โดยพบว่าค่า Dynamic storage modulus จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายเพิ่มขึ้นในขณะที่ ค่า Dynamic loss modulus จะขึ้นกับความยาวในการดึงยืดซึ่งสัมพันธ์กับการยืดตัวของโมเลกุลและทิศทางการเรียงตัว โดยมีระยะทางในการดึงยืดสัมพันธ์กับปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายเพิ่มขึ้นจะลดความสามารถในการดูดซับพลังงาน ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะสนใจศึกษาในช่วงการดึงยืดที่สั้นเพื่อให้ศึกษาอยู่ในช่วงที่ทฤษฎี Gaussian statistical ยังสามารถอธิบายได้เพื่อป้องกันการสับสนของหลายตัวแปรต่อการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์

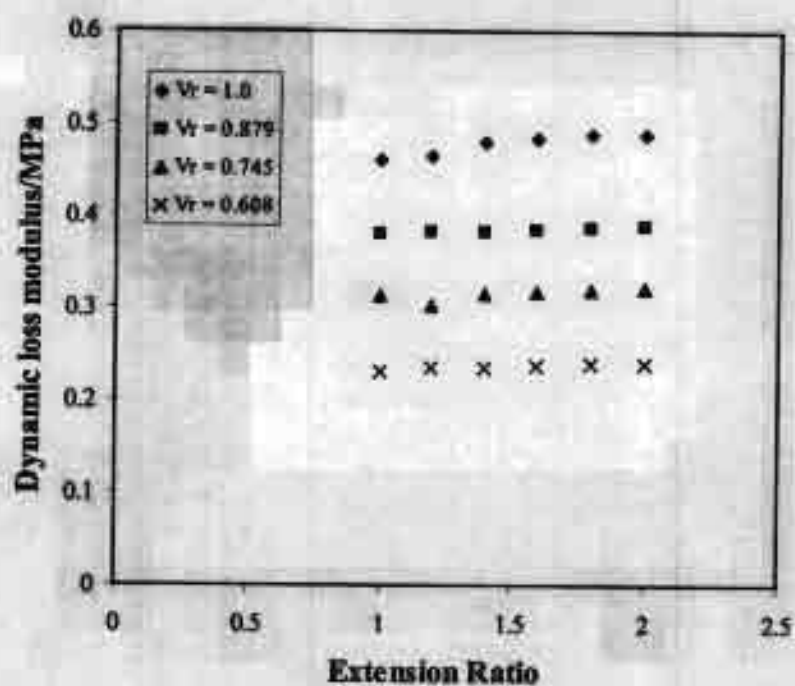
4.2 การศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้การดึงยืด

การศึกษานี้เป็นการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางหลายชนิดที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้สภาวะการดึงยืดเพื่อศึกษาดูว่าภายใต้สภาวะที่มีน้ำมันยางสามารถตอบสนองอย่างไรต่อแรงที่เป็นพลศาสตร์นอกจากนี้ในบทนี้จะใช้ทฤษฎี Free volume เพื่อทำนายผลการรับแรงทางพลศาสตร์ของยางชนิดต่างๆ ในการถูกดึงยืดที่ค่าตามเหตุผลที่อธิบายในการศึกษาที่ผ่านมา

โดยยางที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยาง DPNR ยาง Isoprene ยาง SBR ยาง NBR โดยใช้สูตรในการคำนวณจากตารางที่ 2.1 ซึ่งต้องนำมาปรับควบคุมปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายให้มีความใกล้เคียงกันอยู่ที่ $M_c = 8,000-11,000$ โดย NR และ DPNR สามารถเตรียมยางที่มี M_c อยู่ในช่วง 8000 ในขณะที่ IR, SBR และ NBR อยู่ในช่วงประมาณ 10,000-11,000 แล้วจึงนำมาขึ้นรูปและแช่น้ำมันตามกระบวนการที่อธิบายในบทที่ 3 แล้วจึงนำมาทดสอบทางพลศาสตร์ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.6-4.11



รูปที่ 4.10 ค่า Dynamic loss modulus ของยาง SBR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในการศึกษาที่ระยะการดึงยืดไม่เกิน Extension Ratio = 2



รูปที่ 4.11 ค่า Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในการศึกษาที่ระยะการดึงยืดไม่เกิน Extension Ratio = 2

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเข้าไปในยาง ยางจะมีค่าการดูดซับพลังงานลดลงในยางทุกประเภทโดยตามทฤษฎีของ Free volume นั้นของเหลวมี Free volume มากกว่าของแข็งดังนั้นเมื่อเราเพิ่มปริมาณ Free volume ให้มากขึ้นโดยเพิ่มปริมาณน้ำมันทำให้ที่ว่างที่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนที่มีมากขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องดูดซับพลังงานจากภายนอกมาใช้ในการเคลื่อนไหวส่งผลต่อการลดลงของค่า Dynamic loss modulus ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าในยางทุกตัวเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันยางจะมีค่า dynamic loss modulus ลดลง รวมถึงความแปรปรวนเนื่องจากการดัดยัดจะลดลงด้วย จะเห็นได้จากค่า dynamic loss modulus จะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะการดัดยัดเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันในระบบ ยางบางชนิดในที่นี้คือ SBR เมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้นความแข็งแรงลดลงทำให้ไม่สามารถรับการดัดยัดที่เพิ่มขึ้นได้ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.10

จากผลดังกล่าวที่ได้จะนำสมการที่ มาตรวจสอบว่าให้ค่าเดียวกันหรือไม่ โดยสมการที่ คือสมการที่ใช้ทำนายผลทางพลศาสตร์ของยางโดยใช้ความสัมพันธ์จากค่าเริ่มต้นของยางที่ยังไม่ได้ทำการบวมน้ำมัน

$$E_s^* = E_0^* v_r \exp\left(\frac{1 + kv_r(1-v_r)}{f_0 v_r + f_L(1-v_r) + kv_r(1-v_r)} - \frac{1}{f_0}\right)$$

สมการที่ 44

ซึ่งค่า E_s^* คือ ค่า dynamic loss modulus ของยางที่บวมน้ำมัน E_0^* คือ ค่า Dynamic loss modulus ของยางปกติ v_r คือ ปริมาตรของยางในระบบของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ f_0 คือ free volume ของยาง f_L คือ free volume ของน้ำมัน และ k คือ additional free volume เกิดขึ้นจากการส่วนที่ผสมกันของยางกับน้ำมัน ซึ่งค่า f_0 เราสามารถหาได้ดังนี้

$$f_0 = 0.025 + \Delta\alpha(T-T_g)$$

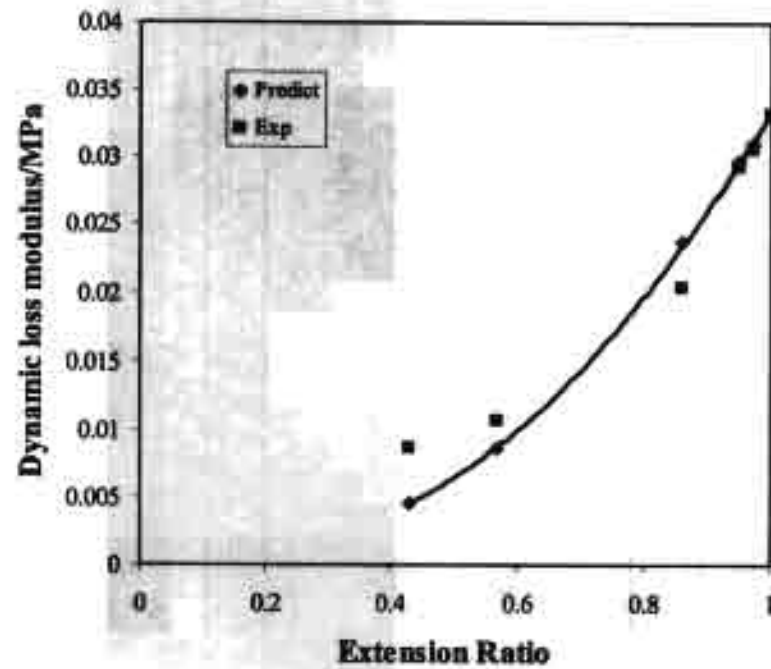
สมการที่ 45

ซึ่ง $\Delta\alpha$ คือความแตกต่างของ thermal expansion coefficient ที่อุณหภูมิที่ศึกษาและที่ T_g ซึ่งเราสามารถศึกษาโดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) ส่วนค่า free volume ของน้ำมันนั้นสามารถหาได้จาก Simha-Cowie theory ซึ่งค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

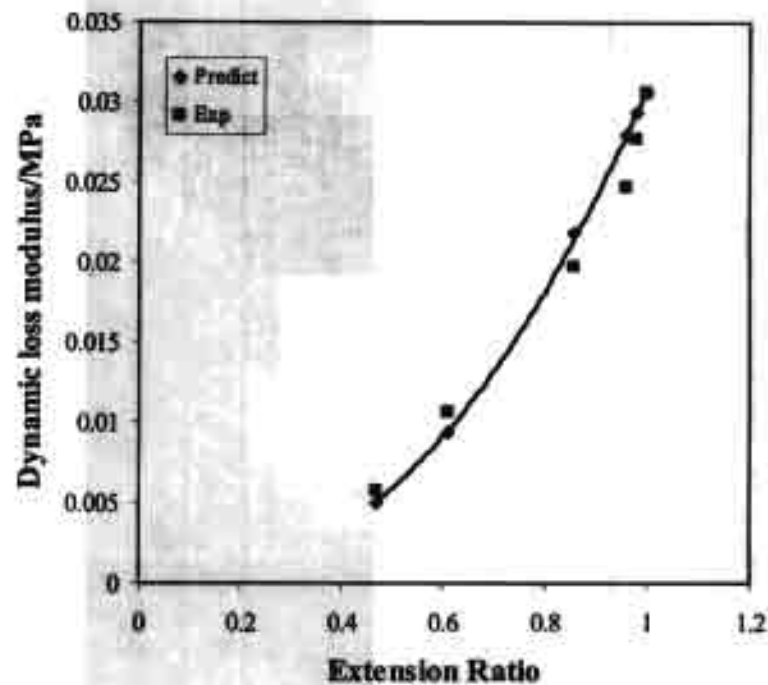
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ที่ใช้ในการทำนายผลค่า Dynamic loss modulus เมื่อยางมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ¹⁵

ชนิดของยาง	Rubber Free Volume	Oil Free Volume	additional free volume
NR	0.08655	0.1100	-0.0169
DPNR	0.08655	0.1100	-0.0169
IR	0.08655	0.1100	-0.0169
SBR	0.06709	0.0755	-0.0060
NBR	0.04714	0.05	-0.034

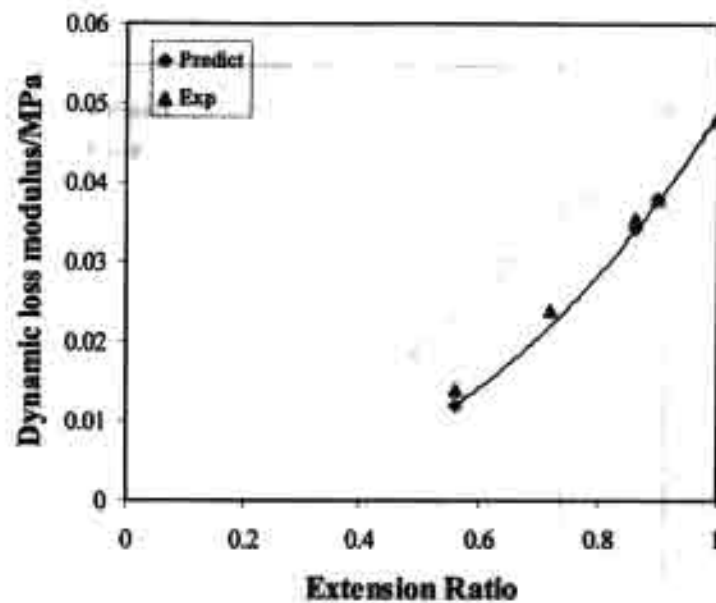
ซึ่งจากการศึกษาผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12-4.16



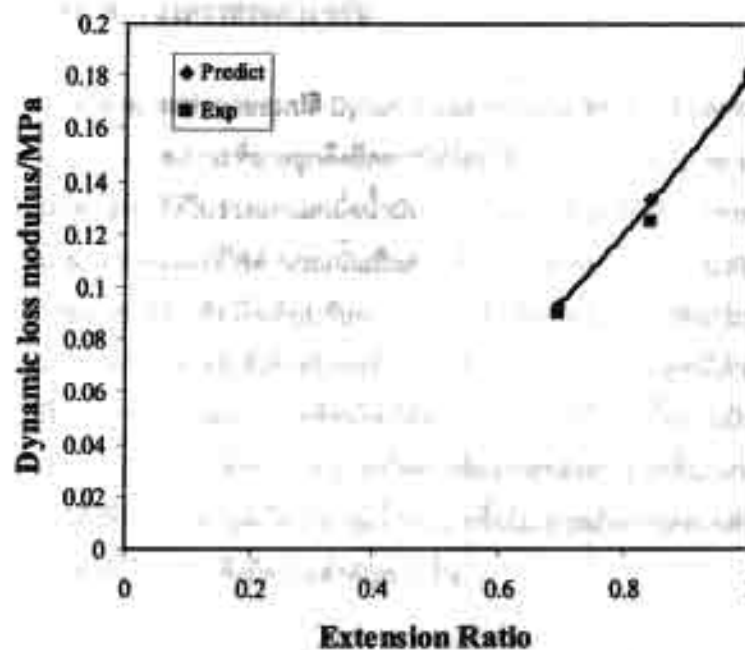
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและการศึกษาสมบัติ Dynamic loss modulus ของยางธรรมชาติที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างๆกัน



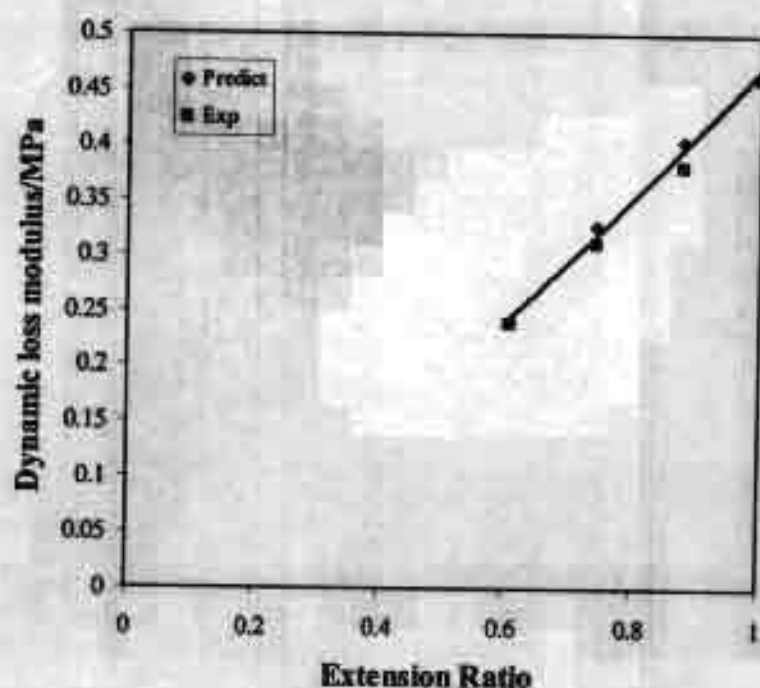
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและการศึกษาสมบัติ Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างๆกัน



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและการศึกษาสมบัติ Dynamic loss modulus ของยาง IR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและการศึกษาสมบัติ Dynamic loss modulus ของยาง SBR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน



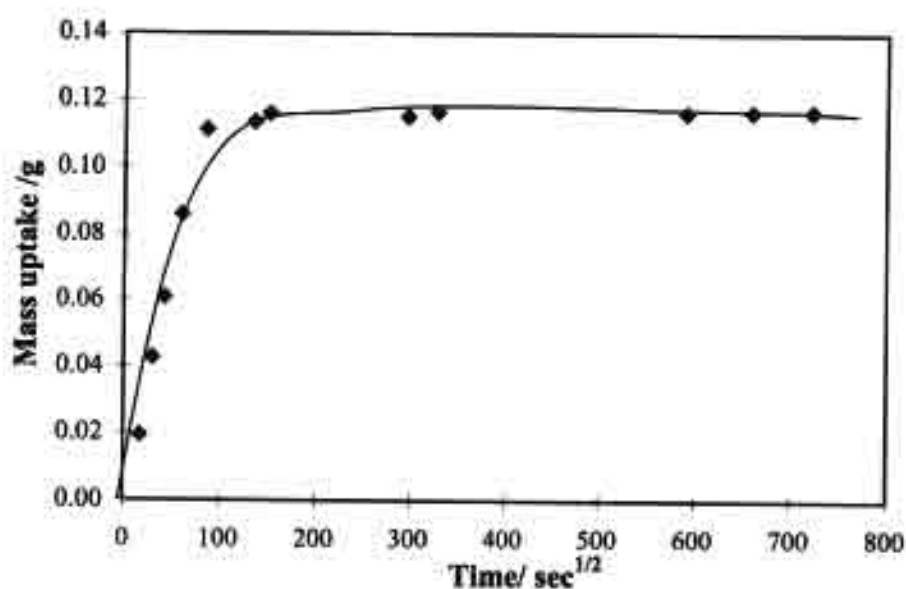
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและการศึกษาสมบัติ Dynamic loss modulus ของยาง NBR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างๆกัน

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าเราสามารถทำนายสมบัติ Dynamic loss modulus ของยางสังเคราะห์รวมถึงยาง DPNR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในสถานะที่ยางถูกดึงยืดต่ำๆได้โดยใช้ทฤษฎี Free volume แต่สำหรับยางธรรมชาติจะพบว่าสามารถทำนายได้ดีในช่วงแรกแต่เมื่อน้ำมันมีปริมาณมากขึ้นผลที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าการทำนาย อาจเนื่องมาจากตัวแปรที่ใช้คำนวณนั้นเป็นค่าที่ศึกษามาจากยาง IR ซึ่งใน IR ไม่มีองค์ประกอบของส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางธรรมชาติอยู่ ซึ่งเมื่อเทียบกับยาง DPNR ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำโปรตีนออกจากยางธรรมชาติแล้วเราจะพบว่าการทำนายได้ใกล้เคียงกับผลที่เกิดขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวอาจพิสูจน์ได้ว่าเมื่อยางมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ถึงแม้โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้นแต่ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลให้ยางลดความสามารถในการเคลื่อนไหวลงส่งผลให้ยางต้องการพลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนไหว ซึ่งอาจเห็นไม่ชัดนักเมื่อน้ำมันมีปริมาณน้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้นโมเลกุลเกิดการคลายตัวสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้นการยึดติดกับส่วนที่ไม่ใช่ยางจึงมีความสำคัญมากขึ้น

ดังนั้นการปรับปรุงสมการในการทำนายจึงมีความสำคัญเพื่อปรับปรุงให้สามารถนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการศึกษากับยางธรรมชาติได้ซึ่งต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ซึ่งการศึกษาดังกล่าวอาจต้องใช้ระยะเวลาและเครื่องมือที่ยังไม่มีอยู่ในขณะที่ทำการศึกษานี้จึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในโอกาสต่อไป

4.4 การศึกษามลของเขม่าดำต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางธรรมชาติที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบภายใต้สภาวะการดึงยืด

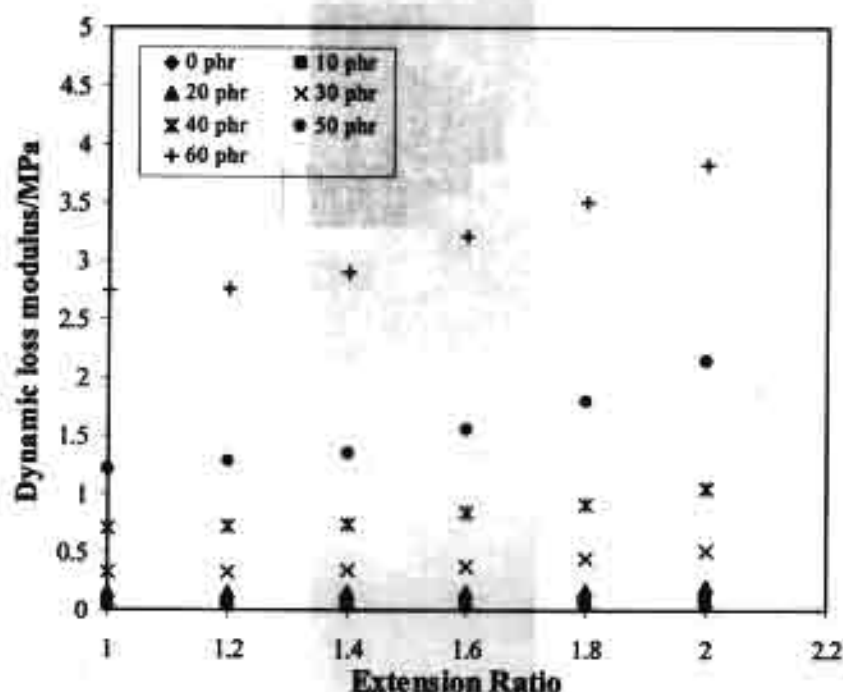
ในการนำยางไปใช้งานจริงทั่วๆไปนั้นจำเป็นต้องเติมสารเสริมแรงเพื่อสามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ในการรับแรงที่มากขึ้นถึงแม้ว่ายางที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้คือ ยาง DPNR และ ยาง IR จะไม่ค่อยใช้ในการรับแรงมากนัก แต่ถือเป็นตัวอย่างที่ดีในการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในยางธรรมชาติซึ่งอาจจะมีผลมาจากส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางเช่นโปรตีนซึ่งจะส่งผลต่อการทำนายผลดังที่ได้แสดงไว้ในเบื้องต้น โดยยางจะถูกผสมโดยใช้สูตรยางในตารางที่ 2.1 นำมาผสมในเครื่องผสมขนาดระบบปิดขนาดเล็กเนื่องจากการทำยาง DPNR ผลิตภัณฑ์ของทดลองจึงไม่สามารถผลิตได้ปริมาณมากพอที่จะผสมในเครื่องผสมขนาดใหญ่ ดังนั้นเครื่องผสม Haake Rheocord internal mixer ซึ่งมีขนาดห้องผสม 79 mm³ จึงถูกใช้ในการศึกษาโดยควบคุมตัวแปรในการผสมเป็นเช่นในเครื่องผสมขนาดใหญ่ โดยในการศึกษานี้ได้พยายามควบคุมความหนาแน่นของโครงสร้างคาข่ายของยาง DPNR และ ยาง IR ที่ ไม่มีเขม่าดำให้มีค่าใกล้เคียงกันที่ $M_c = 8900$ ส่วนยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบใช้ช่วง 10-60 phr นั้นเป็นการยากที่จะควบคุมเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเขม่าดำจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคาข่าย ในที่นี้จึงพยายามควบคุมสูตรในการผสมให้คงที่และควบคุมเวลาให้เกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์ ตัวอย่างในการศึกษาได้ทำการเตรียมดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และในเรื่องที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบจำเป็นต้องหาระยะเวลาสมดุลของน้ำมันในยาง ซึ่งหาจากระยะเวลาที่ไม่เพิ่มการดูดซับน้ำมันเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17



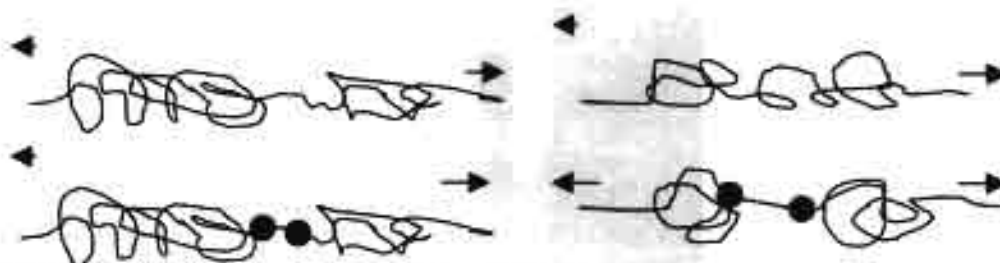
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการดูดซับน้ำมันของยางที่มีเขม่าดำ 30 phr ซึ่งใช้เวลาที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเป็นเวลาที่ยังหลังจากแช่ยางเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล

เมื่อนำยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆมาทดสอบสมบัติทางพลศาสตร์ ค่า Dynamic loss modulus ที่ได้ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 พบว่า การเพิ่มเขม่าดำส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ ค่า Dynamic loss

modulus ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีและที่ได้มีการค้นพบมาก่อนหน้านี้ ซึ่งผลดังกล่าวก็เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในยาง IR ซึ่งการเพิ่มขึ้นมีผลมากจากการที่เมื่อดำเพิ่มแรงยืดเกาะให้แก่โมเลกุลยาง และบางส่วนของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเมื่อได้รับแรงทำให้ยางต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเมื่อดำมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การไม่ขึ้นต่อระยะทางตั้งยืดลดลงเมื่อปริมาณเมื่อดำมากขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือค่า Dynamic loss modulus มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าคงที่เมื่อระยะทางตั้งยืดต่ำลงเมื่อปริมาณเมื่อดำสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าการเกิด finite extensibility ในยางเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเมื่อปริมาณเมื่อดำเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเกิด Strain amplification ซึ่งเกิดจากการที่เมื่อดำเข้าไปยึดอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางไม่ว่าจะเป็นแบบกายภาพหรือเคมี แล้วทำให้บริเวณดังกล่าวเหมือนถูกได้รับแรงดึงอยู่ก่อนแล้วจากการยืดติดของเมื่อดำกับยางซึ่งเมื่อได้รับแรงจากภายนอกในบริเวณดังกล่าวจะถูกยืดไปมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ทั้งระบบได้รับดังรูปที่ 4.19

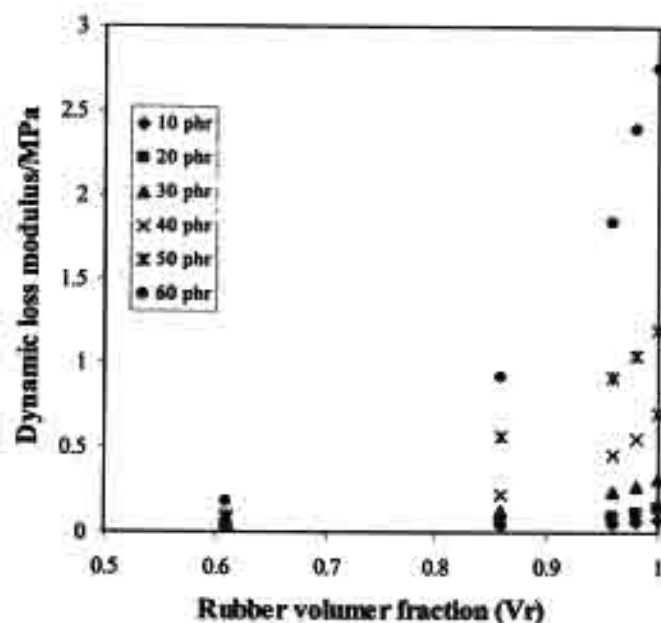


รูปที่ 4.18 ค่า Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีเมื่อดำเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างกัน

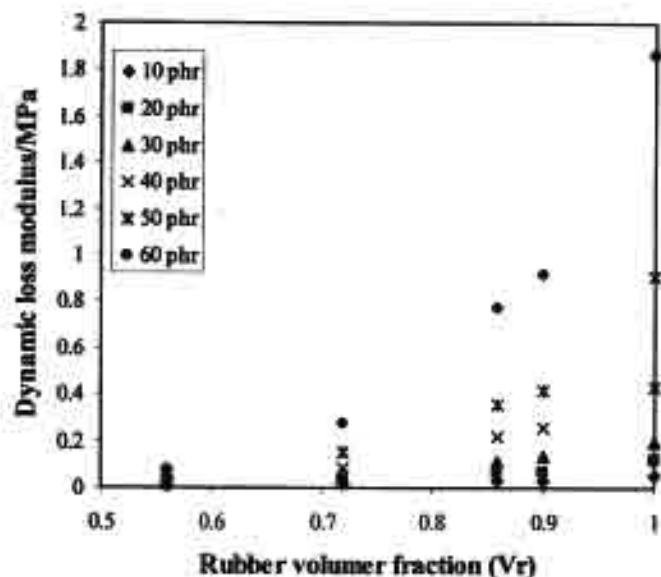


รูปที่ 4.19 การเกิด strain amplification บริเวณที่เมื่อดำยึดติดกับยาง

ดังนั้นในการศึกษานี้เพื่อให้สามารถอธิบายโดย statistical theory ได้จึงเลือกศึกษาที่บริเวณการดัดยัดต่ำๆ โดยศึกษาที่การดัดยัด 20 % ซึ่งค่า Dynamic loss modulus ยังไม่ขึ้นกับระยะทางดัดยัดคือมีค่าคงที่ โดยจากการศึกษามลของน้ำมันในยางทั้งสองชนิดที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 4.20 – 4.21



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบที่ค่า V_r ต่างๆ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Dynamic loss modulus ของยาง IR ที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบที่ค่า V_r ต่างๆ

ซึ่งจากการศึกษาพบเช่นเดียวกับในยางที่ไม่มีเซมาต้าคือ น้ำมันจะช่วยให้เกิดพื้นที่ว่างสำหรับโมเลกุลในการเคลื่อนที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังอาจลดการยึดติดกันระหว่างเซมาต้ากับยางในกรณีที่พื้นนี้เป็นแบบกายภาพทำให้ความต้องการในการดูดซับพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ลดลง โดยเมื่อทำการศึกษาลของน้ำมันต่อเซมาต้าโดยนำค่า Dynamic loss modulus ที่ได้จากยางที่มีเซมาต้าและน้ำมันเป็นองค์ประกอบมาทำการวิเคราะห์โดยการหักส่วนที่เป็นผลมาจากยางอย่างเดียวที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบเท่ากันซึ่งแสดงในตารางที่ ค่าที่ได้จะเป็นอัตราส่วนของ Dynamic loss modulus ที่ส่งผลมาจากเซมาต้าที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆ E'_r / E'' (Matrix swollen)

ตารางที่ 4.3 การหาอัตราส่วนที่ส่งผลมาจากเซมาต้าต่อค่า Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีเซมาต้า 60 phr

Rubber Volume fraction	Dynamic loss modulus ของยางที่มีเซมาต้า 60 phr เมื่อนำไปบวมน้ำมัน	Dynamic loss modulus ของยางที่ไม่มีเซมาต้า เมื่อนำไปบวมน้ำมัน	E'_r / E'' (Matrix swollen)
1	2.75	0.0306	89.87
0.98	2.39	0.0277	86.28
0.96	1.84	0.0247	74.49
0.86	0.92	0.0197	46.70
0.61	0.18	0.0160	16.98

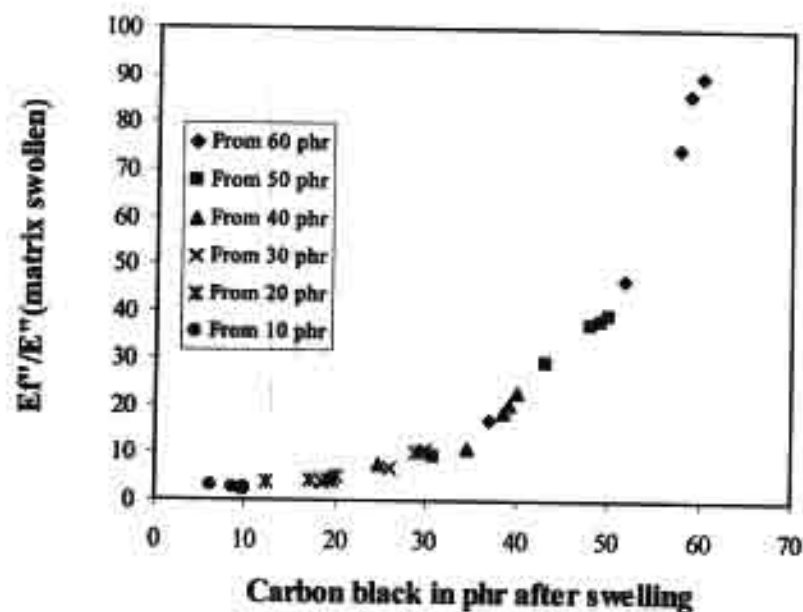
เมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณเซมาต้าที่มีอยู่ในขณะที่ปริมาตรของระบบเพิ่มขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูว่าผลที่เพิ่มขึ้นของ Dynamic loss modulus นี้มีความสัมพันธ์กับเซมาต้าจริงเท่าใด ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบในยางธรรมชาติพบว่าผลที่ทำให้เกิดขึ้นมาจากเซมาต้าโดยน้ำมันที่เข้าไปเพียงทำให้อัตราส่วนของเซมาต้าในระบบลดลง ไม่ได้เข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาหรือปรากฏการณ์อย่างอื่น ๆ เพื่อทำความเข้าใจมากขึ้นจึงเลือกศึกษาในระบบของยาง DPNR และ IR โดยการหาปริมาณเซมาต้าในหน่วย phr ที่ลดลงเนื่องจากปริมาตรของระบบเพิ่มขึ้นนั้น ได้คิดน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 46

$$phr_c = \left(\frac{phr_o}{1 + \left(\left(\frac{1}{v_r} - 1 \right) \times \frac{\rho_{oil}}{\rho_r} \right)} \right)$$

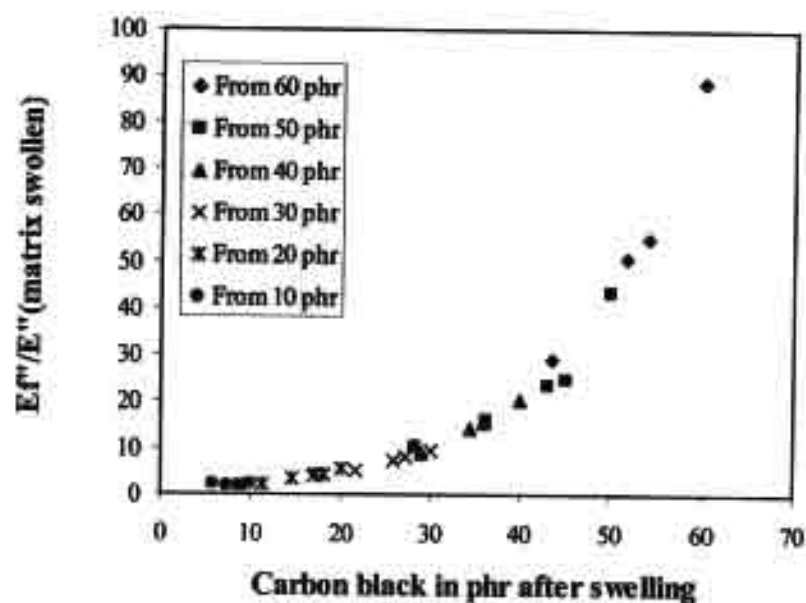
สมการที่ 46

ซึ่ง phr_c คือ ปริมาณของเซมาต้าในหน่วย phr หลังจากที่ยางบวมในน้ำมัน phr_o คือ ปริมาณของเซมาต้าเริ่มต้นในหน่วย phr, v_r คือ ส่วนของยางที่มีในระบบ ρ_{oil} คือ ความหนาแน่นของน้ำมัน และ ρ_r คือความหนาแน่นของ

ยาง ซึ่งความสัมพันธ์ของ E_f'' / E'' (Matrix swollen) และ phr_c ของยางทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.22-4.23

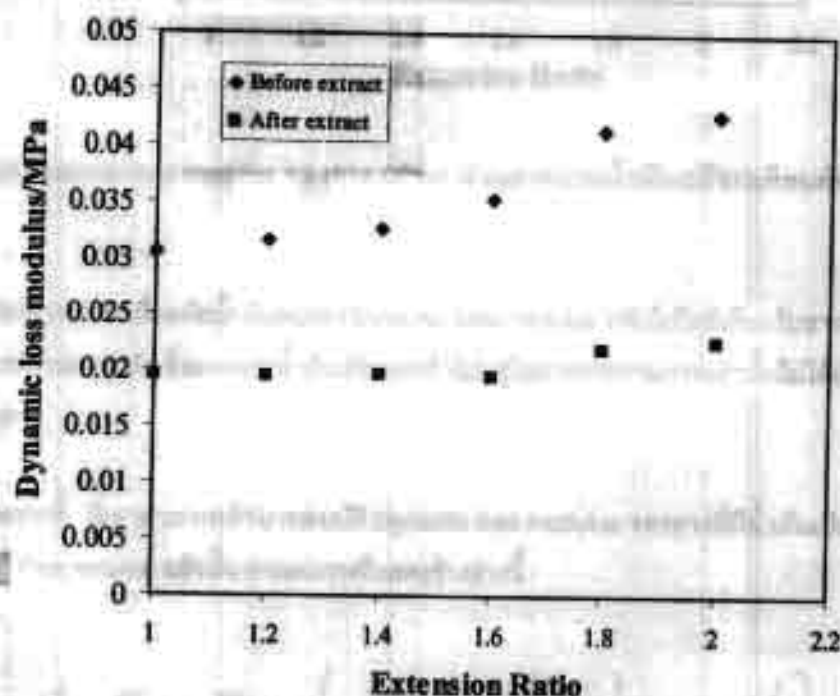


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของ E_f'' / E'' (Matrix swollen) และ phr_c ของยาง DPNR

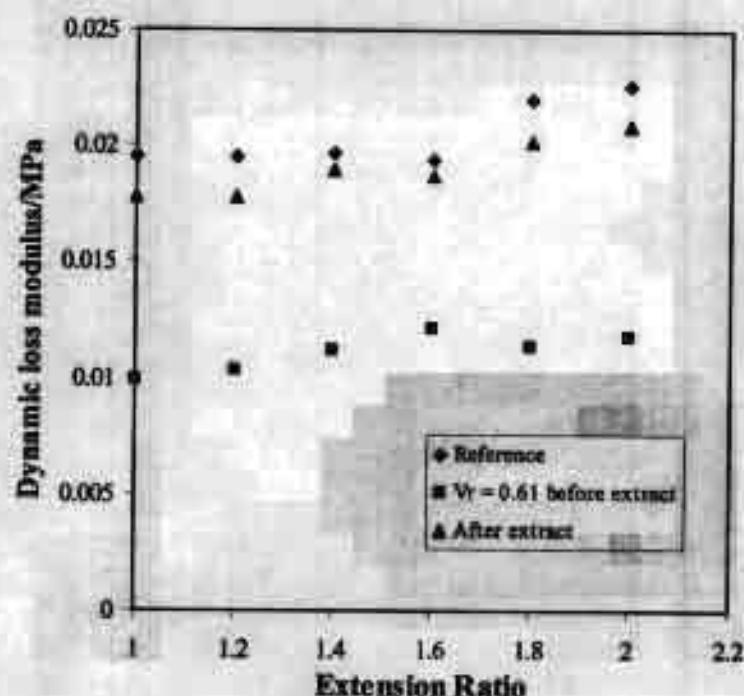


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของ E_f'' / E'' (Matrix swollen) และ phr_c ของยาง IR

ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า E' / E'' (Matrix swollen) และ ϕ_{H_2} มีความสัมพันธ์ในลักษณะฟังก์ชันซึ่งแสดงว่า ส่วนที่เป็นเมมาดำที่ลดปริมาณลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรระบบมีส่วนสัมพันธ์กับการลดลงของค่า Dynamic loss modulus เมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้น ซึ่งอาจกล่าวอีกด้านหนึ่งได้ว่า น้ำมันที่เข้าไปในระบบที่ส่ง ผลต่อสมบัติของยางที่มีเมมาดำนั้น ส่วนหนึ่งเกิดมาจากการลดลงของยางที่เป็น matrix ในระบบอีกส่วนนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากเมมาดำมีปริมาณคงที่ในขณะที่ปริมาตรของยางทั้งระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำมัน น้ำมันมิได้เข้าไปทำปฏิกิริยาอะไรอย่างอื่นที่ทำให้ค่า Dynamic loss ลดลง เช่นทำปฏิกิริยาเคมีกับเนื้อยาง ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ผล ของน้ำมัน ต่อสมบัติทางพลศาสตร์จึงได้ศึกษาการเปรียบเทียบผลของยางก่อนแช่น้ำมันและหลังจากการนำน้ำมันออกโดยนำยาง DPNR ที่ผ่านกระบวนการช่น้ำมันมาทำการสกัดแยกน้ำมันออกโดยใช้ Soxhlet ภายใต้ Gas N_2 โดยใช้โซลันเจนเป็นตัวทำละลาย โดยทำการสกัดที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อผ่าน กระบวนการนี้แล้วได้ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนที่จะนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้ผ่าน กระบวนการบวมน้ำมันแต่ทำการสกัด (เพื่อทำเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ) ผลจากการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.23-4.24



รูปที่ 4.23 Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่ไม่ได้ผ่านการบวมน้ำมันที่ลดลงเนื่องจากกระบวนการสกัด



รูปที่ 4.24 Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ผ่านการบวมน้ำมันเปรียบเทียบกับเมื่อสกัดน้ำมันออก

จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่อสกัดน้ำมันออกจาก Dynamic loss modulus กลับไปใกล้เคียงกับยางที่ไม่ได้บวมน้ำมัน แต่ผ่านกระบวนการสกัด ซึ่งแสดงว่าน้ำมันเพียงแต่เข้าไปอยู่ในยางทางกายภาพเท่านั้นไม่ได้เกิดปฏิกิริยาอันใดกับโมเลกุล

ซึ่งจากสมการที่ 47 ที่เราสามารถทำนายสมบัติ Dynamic loss modulus ของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบได้จากทฤษฎี Free volume แล้วนั้น ตามสมการที่แสดงข้างล่างนี้

$$E_r^* = E_0^* v_r \exp \left(\frac{I + k v_r (1 - v_r)}{f_0 v_r + f_c (1 - v_r) + k v_r (1 - v_r)} \frac{I}{f_0} \right)$$

สมการที่ 47

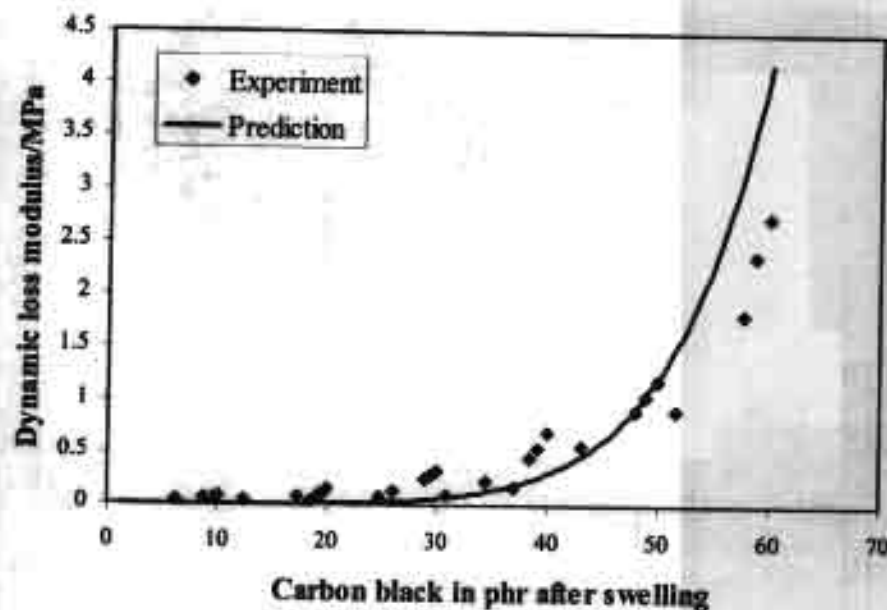
บัดนี้เราสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลต่อเรมาค่ามาปรับปรุงสมการดังกล่าว ซึ่งจะทำได้สมการที่สามารถทำนายสมบัติ Dynamic loss modulus ของยางที่มีเรมาค่าเป็นองค์ประกอบเมื่อบวมน้ำมันได้ด้วย โดยสมการที่ได้ทำการปรับปรุงแสดงในสมการที่ 48

$$E_{\mu}^* = E_0^* v_r \exp \left[\left(\frac{1 + k v_r (1 - v_r)}{f_0 v_r + f_1 (1 - v_r) + k v_r (1 - v_r)} - \frac{1}{f_0} \right) + \left(0.08 \left(\frac{phr_0}{1 + \left(\left(\frac{1}{v_r} - 1 \right) \frac{\rho_{oil}}{\rho_r} \right)} \right) \right) \right]$$

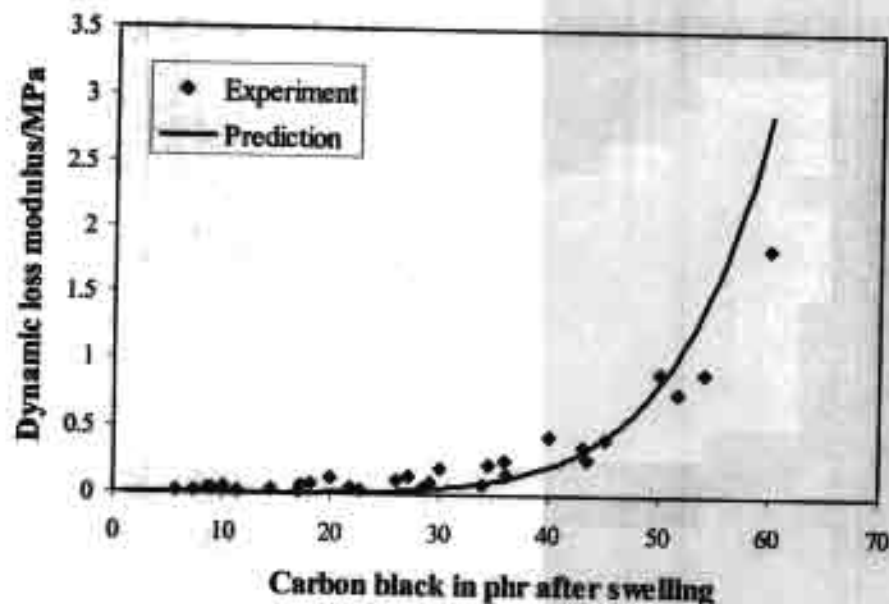
สมการที่ 48

ซึ่ง ค่า E_{μ}^* คือ ค่า dynamic loss modulus ของยางที่มีเมมาดำเป็นองค์ประกอบบวมน้ำมัน E_0^* คือ ค่า Dynamic loss modulus ของยางปกติ v_r คือ ปริมาตรของยางในระบบของยางที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ f_0 คือ free volume ของยาง (คือ free volume ของน้ำมัน และ k คือ additional free volume เกิดขึ้นจากการส่วนที่ผสมกันของยางกับน้ำมัน . phr_0 คือ ปริมาณของเมมาดำเริ่มต้นในหน่วย phr . ρ_{oil} คือ ความหนาแน่นของน้ำมัน และ ρ_r คือความหนาแน่นของยาง

จึงผลการเปรียบเทียบการทำนายผลและการทดลองได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.25-4.26



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบผล Dynamic loss modulus ที่ได้จากการศึกษาและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ปรับปรุงขึ้น ในยาง DPNR



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผล Dynamic loss modulus ที่ได้จากการศึกษาและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ปรับปรุงขึ้น ในยาง IR

ซึ่งจะพบว่าในการศึกษาที่มีส่วนผสมมากผลที่ได้จากการศึกษาต่ำกว่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งอาจเกิดมาจากการที่เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมแล้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งผลจากการศึกษาในระยะการยืดตัวที่ผ่านมาจะพบว่าค่า Dynamic storage modulus จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายเพิ่มขึ้น

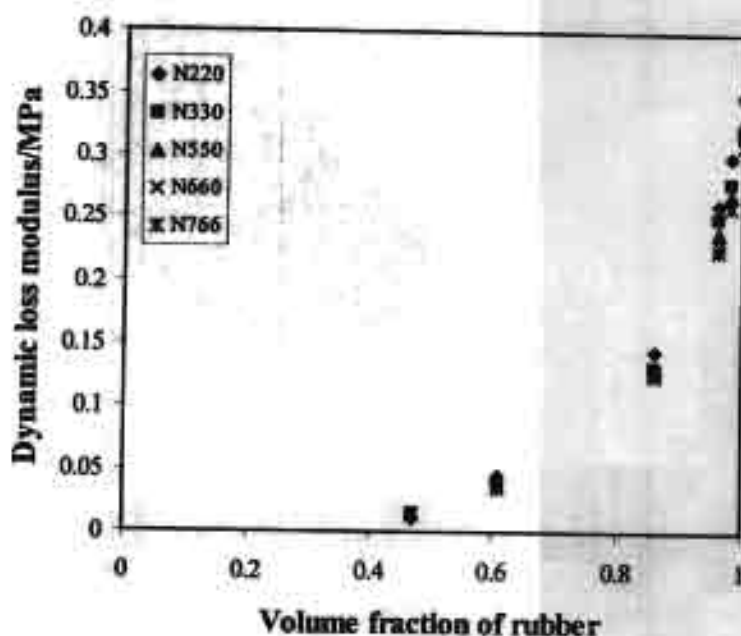
ตารางที่ 4.4 ค่าปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายและความถ่วงจำเพาะของยาง DPNR ที่มีส่วนผสมเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณต่างๆ

ยาง DPNR ที่มีส่วนผสมเป็นองค์ประกอบ / phr	น้ำหนักโมเลกุลของยางที่อยู่ระหว่างจุด 2 จุดที่เกิดโครงสร้างตาข่าย (M_c) (ปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย)	ความถ่วงจำเพาะ (Density)
0	8900	0.927
10	8200	0.942
20	7905	1.002
30	7592	1.024
40	7318	1.036
50	6631	1.119
60	6560	1.128

ค่าคงที่ในสมการที่ ได้จากการทำ Curve fitting ซึ่งการหาความหมายว่าค่าคงที่ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรนั้น อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากชนิดของยาง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง DPNR และ IR ก็ไม่เห็นถึงความแตกต่างซึ่งอาจจะทำการเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ตัวอื่นซึ่งเป็นงานที่น่าสนใจที่จะทำต่อไปในอนาคต แต่ในการศึกษานี้ได้สนใจศึกษามลของเรมาค่าว่าจะมีผลอย่างไรต่อค่าคงที่ดังกล่าว

4.5 การศึกษามลของชนิดของเรมาค่าต่อสมบัติทางพลศาสตร์ของยางธรรมชาติที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ภายใต้การดึงยืด

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจว่าชนิดของเรมาค่ามีผลอย่างไรต่อค่าคงที่ในสมการที่ ซึ่งเรมาค่าที่มีขนาดอนุภาคต่างกันคือ N220, N330, N550, N660, N766 ได้ถูกใช้ในการศึกษาตามสูตรในตารางที่ 2.2 ซึ่งเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่ถูกยืดไปในปริมาณต่างๆพบว่าค่า Dynamic loss modulus ของยางที่มีอนุภาคของเรมาค่าต่างๆกันนี้มีค่าที่ไม่ค่อยต่างกันนักดังรูปที่ 4.27 ดังนั้นผลของอนุภาคเรมาค่าจึงไม่น่าจะส่งผลต่อค่าคงที่ดังกล่าว



รูปที่ 4.27 ค่า Dynamic loss modulus ของยางที่มีเรมาค่าเกรดต่างๆเมื่อรวมน้ำมัน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้สนใจศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีเคมีคาร์บอนและน้ำมันเป็นองค์ประกอบในสภาวะดิ่ง ยึดซึ่งเป็นสภาพที่คล้ายจริงในการนำยางไปใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเราสามารถให้ทฤษฎี Free volume ทำนายผลการลดลงของค่า Dynamic loss modulus ของยางได้เมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้นซึ่งงานดังกล่าวได้ศึกษาโดยใช้ยาง IR เป็นต้นแบบ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เพื่อให้การศึกษาคอบคลุมยางหลายประเภท และสามารถทำนายผลของยางที่มีเคมีคาร์บอนและน้ำมันเป็นองค์ประกอบได้ด้วย

การศึกษานี้เริ่มต้นจากการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงวิธีการให้น้ำมันเข้าไปในยางว่ามีผลอย่างไรต่อความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเข้าใจผิดที่ผิดพลาดเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวซึ่งจากการศึกษาในบทที่ 3 พบว่าเราควรใช้ยางที่ทำการบวมน้ำมันที่หลังกระบวนการวัลคาไนซ์แทนที่ใช้ยางที่เติมน้ำมันในขณะผสมเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตาข่ายอันจะส่งผลต่อค่า Dynamic loss modulus ซึ่งในระยะดิ่งยึดที่สั้น ความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายมากจะมีค่า Dynamic loss modulus ที่ต่ำกว่าความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายน้อย ซึ่งเกิดจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมีมากไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานภายนอก แต่เมื่อการดิ่งยืดยาวขึ้นทำให้ยางไม่สามารถอธิบายด้วยทฤษฎี Gaussian Statistic ได้ ผลของความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่ายต่อค่า Dynamic loss modulus ก็ให้ผลตรงข้ามเนื่องจากการเรียงตัวของโครงสร้างและแนวในการเรียงตัวมีผลต่อการดูดซับพลังงานของโมเลกุลของยาง

ดังนั้นจากผลของการดิ่งยึดที่แตกต่างกัน ในการศึกษาจึงเลือกการศึกษาที่ความดิ่งยึดต่ำเพื่อไม่ให้มีผลจากตัวแปรอื่นๆซึ่งจะทำให้การศึกษามีข้อยุ่งยากเกิดขึ้น โดยการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่ถูกดิ่งยึดนั้นจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Oscillating beam เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวสามารถตรวจสอบค่า Dynamic loss modulus ได้ค่อนข้างแม่นยำในวัสดุที่มีความอ่อนตัวสูง และสามารถศึกษาในสภาพที่ถูกดิ่งยึดได้ ซึ่งในการศึกษามลของน้ำมันต่อสมบัติพลศาสตร์นั้นพบเหมือนกันในยางทุกชนิดว่าเมื่อปริมาณน้ำมันมากขึ้น Dynamic loss modulus ของยางจะมีค่าลดลง ซึ่งสามารถทำนายการลดลงได้โดยใช้ทฤษฎี Free volume ในยางทุกชนิดที่ทำการศึกษาซึ่งสมการนั้นได้แก่

$$E_i^* = E_o^* v_r \exp \left(\frac{I + k v_r (I - v_r)}{f_o v_r + f_L (I - v_r) + k v_r (I - v_r)} - \frac{I}{f_o} \right)$$

โดยเมื่อศึกษาในยางธรรมชาติจะพบว่าสมการดังกล่าวไม่สามารถทำนายได้ในช่วงที่มีการบวมน้ำมันมากๆ แต่สมการดังกล่าวสามารถทำนายได้ถูกต้องในยาง DPNR ซึ่งแสดงว่าโปรตีนในยางมีผลต่อการยึดติดกันของโมเลกุลยาง โดยจะแสดงผลเมื่อโมเลกุลถูกทำให้แยกจากกันโดยน้ำมันในปริมาณมาก

เมื่อทำการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีเรมาดำเป็นองค์ประกอบในสภาวะที่มีน้ำมันและถูกดึงยืดค่า พบว่าการลดลงของค่า Dynamic loss modulus มีส่วนสัมพันธ์กับยางและการลดลงของปริมาณเรมาดำในเนื้อยางเมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้นจากส่วนที่เป็นน้ำมันเท่านั้น โดยการศึกษาสามารถปรับปรุงสมการทั่วไปที่ใช้ทำนายค่า Dynamic loss modulus ของยางที่มีเรมาดำและบรรณน้ำมันโดยการเพิ่มแค่ค่า Dynamic loss modulus ของยางเริ่มต้น ปริมาณน้ำมัน และปริมาณเรมาดำ

$$E_h^* = E_0^* v_r \exp \left(\left(\frac{1 + k v_r (1 - v_r)}{f_0 v_r + f_L (1 - v_r) + k v_r (1 - v_r)} - \frac{1}{f_0} \right) + \left(0.08 \left(\frac{p h r_0}{1 + \left(\left(\frac{1}{v_r} - 1 \right) \frac{\rho_{ar}}{\rho_r} \right)} \right) \right) \right)$$

จึงสมการดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการทำนายผลโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบวัสดุต่อไป แต่อย่างไรก็ตามค่าคงที่ในสมการดังกล่าวยังขาดการวิเคราะห์อย่างสมบูรณ์ โดยในการศึกษานี้เพียงแต่สนใจในขนาดอนุภาคของเรมาดำเท่านั้นซึ่งหัวข้อดังกล่าวน่าจะเป็นงานที่น่าสนใจศึกษาต่อไป

บทที่ 6

งานต่อเนื่องที่น่าสนใจศึกษา

จากการศึกษาที่ผ่านมานี้มีเรื่องที่น่าสนใจให้ศึกษาเพิ่มเติมดังนี้คือ

1. ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับตัวแปรอื่นๆเพื่อปรับปรุงสมการที่ใช้ทำนายสมบัติทางพลศาสตร์ของยางที่มีเขม่าดำและน้ำมันให้มีความใกล้เคียงมากขึ้น เช่น ชนิดของยาง และ ชนิดของเขม่าดำ
2. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาซึ่งตั้งใจจะศึกษาในการศึกษาครั้งนี้แต่ไม่สามารถหาเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่สามารถใช้ได้กับเครื่อง Oscillating beam
3. การปรับปรุงสมการให้สามารถใช้ได้อย่างถูกต้องกับยางธรรมชาติเมื่อมีปริมาณน้ำมันในยางมาก

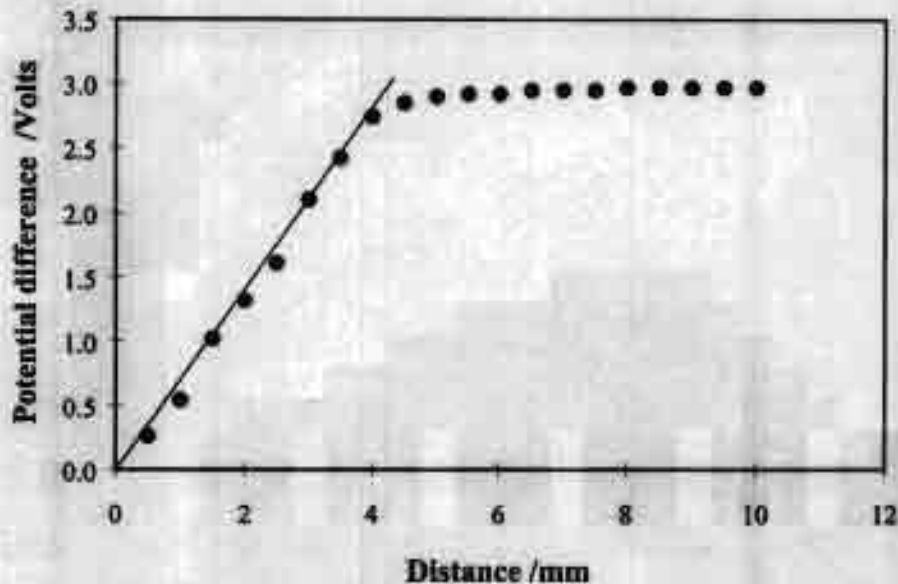
หนังสืออ้างอิง

1. Robert A.D., *Natural Rubber Science & Technology*, Oxford University Press, (1988).
2. Eirich F.R., *Science and Technology of Rubber*, Academic Press, (1978).
3. Treloar L.R.G., *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd Ed., Clarendon Press, Oxford, (1980).
4. Treloar L.R.G., *Trans. Faraday Soc.*, 39,36, (1943).
5. Gee R., *Trans. Faraday Soc.*, 42, 585, (1946).
6. Rivlin R.S., *Trans. Faraday Soc.*, 43, 444, (1947).
7. Fick A., *Ann Phys.*, 94,59, (1855).
8. Southern E. and Thomas A.G., *J. Polym. Sci. A*, 3, 641, (1963).
9. Medalla A.I., *Rubber Chem. Technol.*, 51, 437, (1978).
10. Thomson W.T., *Theory of Vibration with Applications*, Chapman & Hall, (1993).
11. Doolittle A.K., *J. Appl. Phys.*, 28, 901, (1957).
12. Young R.J. and Lovell P.A., *Introduction to Polymer*, 2nd Ed., Chapman & Hall, (1996).
13. Davies C.K.L., Thomas A.G. and Akutagawa K., *Prog. Rubber and Plastic Technol.*, 12(3), 174, (1996).
14. Tankpakdee J and Tanaka Y., *J. nat. Rubb. Res.*, 12(2), 112, (1997).
15. Pond T.J. and Thomas A.G., *J. Nat. Rubber Res.*, 4(4), 288, (1999).
16. Busfield J.J.C., Deeprasertkul C. and Thomas A.G., *Polymer*, 41, 9129, (2000).

ผลงาน (Output)

1. การนำเสนอผลงาน(บรรยาย)ในการประชุมวิชาการ International Symposium of Elastomer (ISE 2003) ณ กรุงเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 2 เมษายน 2546 – 4 เมษายน 2546 โดยหัวข้อและรายละเอียด รวมถึงโลโก้ในการบรรยายได้แสดงไว้ในภาคผนวก
2. บทความที่จะส่งเพื่อตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ ซึ่งมีหัวข้อเรื่องคือ
The prediction of dynamic behaviour of swollen DPNR
ซึ่งบทความดังกล่าวอยู่ในระหว่างการรอการตอบรับของวารสาร Polymer ซึ่งรายละเอียดของเอกสารดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวก

ให้ค่า Output ที่ได้เป็น linearity ในช่วงใด โดยทำการทดสอบโดยตั้ง Transducer ข้างๆเครื่อง INSTRON Extensometer ในขณะที่วาง Beam ไว้บน INSTRON extensometer เมื่อนำคัมให้เครื่อง INSTRON เคลื่อนที่ ขึ้นเราสามารถควบคุมระยะได้อย่างแน่นอน แล้ววัด Output ที่ออกจาก inductive transducer นำมา plot กับระยะทางดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7

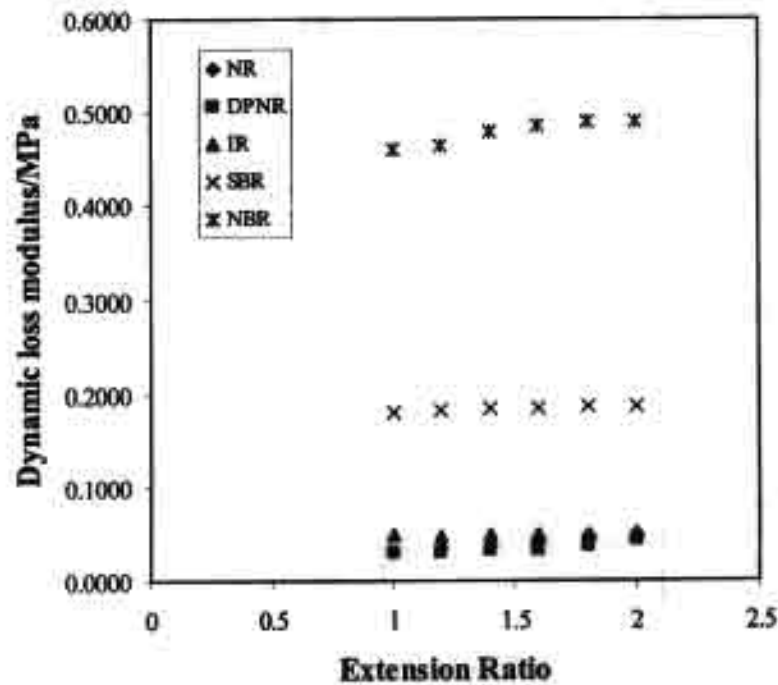


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส Output และระยะทางระหว่างแผ่นทองแดงและ inductive transducer

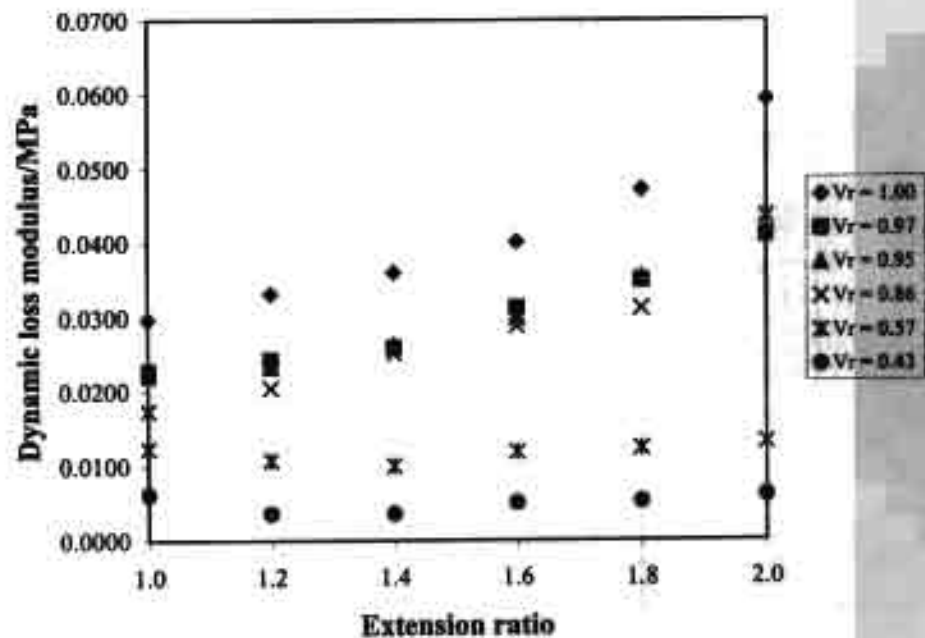
ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและ Inductive transducer ในช่วง 0- 4 มิลลิเมตร ดังนั้นในการศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของยางจึงไม่ควรจัดระยะห่างไว้เกิน 4 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้การศึกษามีภาพเหมือนกับตลอดการศึกษาจึงควบคุมระยะทางให้อยู่ที่ประมาณ 3 มิลลิเมตร

2.12 การวัดค่า Moment of Inertia ของ Beam

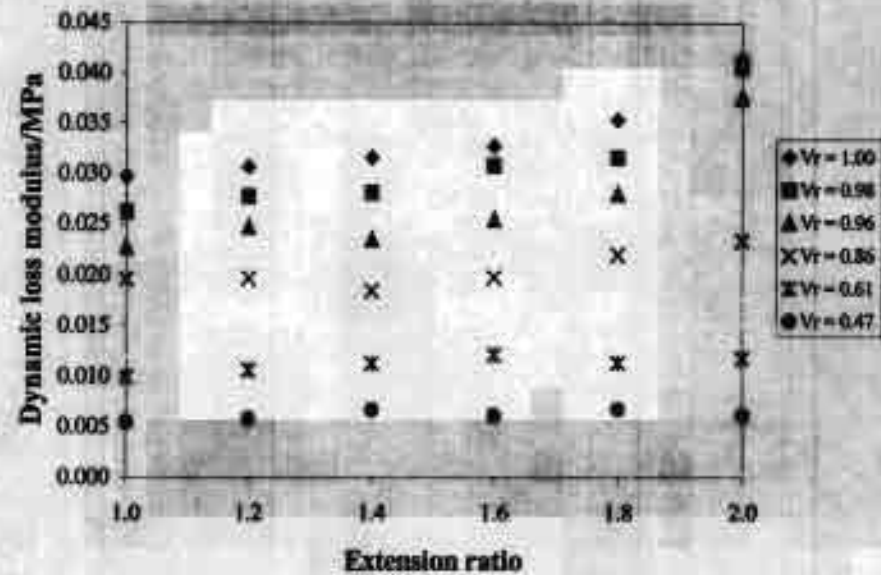
ค่า Moment of Inertia เป็นการวัดค่าความเฉื่อยที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Beam เพื่อให้การวัดค่าการสูญเสียพลังงานจากยางได้มาจากยางจริงจำเป็นอย่างยิ่งต้องคิดถึงความเฉื่อยของอุปกรณ์ดังจะเห็นได้ว่าได้มีการรวม moment of inertia ซึ่งคือค่าความเฉื่อยของ Beam อยู่ในสมการที่ 35 โดยในการทดสอบหาค่า Moment of Inertia ทำได้โดย Beam จะถูกแขวนไว้ด้วยเชือกที่มีน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับ Beam โดยแขวนไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของ Beam หลังจากนั้นทำการแกว่ง Beam ในแนวระนาบแล้ววัดค่าความถี่ของการสั่นว่ามีค่าเท่าใด โดยแรงที่ใช้ในการสั่นสำหรับเชือกแต่ละเส้นสามารถหาได้ดังนี้



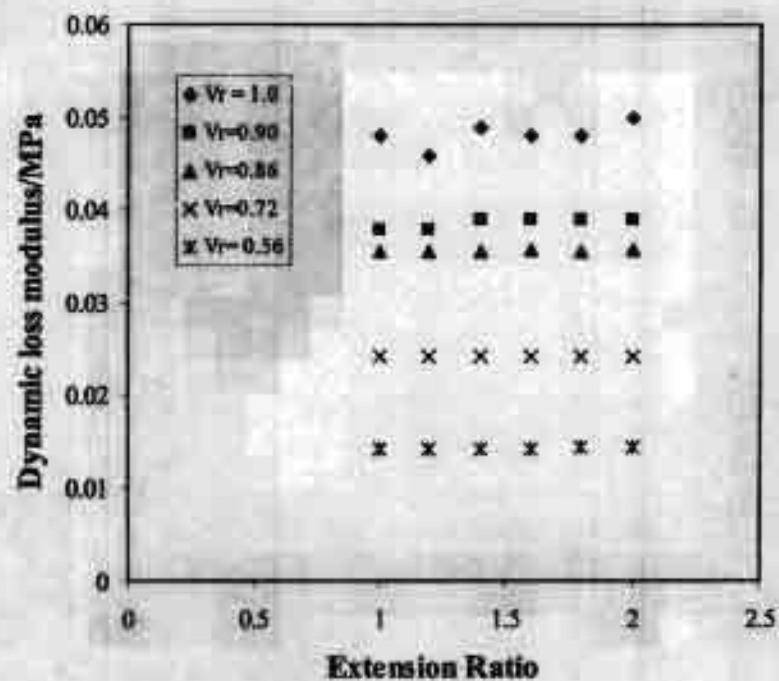
รูปที่ 4.6 ค่า Dynamic loss modulus ของยางแต่ละชนิดที่ไม่ผ่านกระบวนการบวมน้ำมันในการศึกษาที่ระยะการดึงยืดไม่เกิน Extension Ratio = 2



รูปที่ 4.7 ค่า Dynamic loss modulus ของยางธรรมชาติที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในการศึกษาที่ระยะการดึงยืดไม่เกิน Extension Ratio = 2



รูปที่ 4.8 ค่า Dynamic loss modulus ของยาง DPNR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในการศึกษาที่ระยะการดึงยึดไม่เกิน Extension Ratio = 2



รูปที่ 4.9 ค่า Dynamic loss modulus ของยาง IR ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในการศึกษาที่ระยะการดึงยึดไม่เกิน Extension Ratio = 2

