การวิเคราะห์สมบัติวิสโคไฮเปอร์อิลาสติกของยางคงรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

Analysis of Visco-Hyperelastic Properties of Vulcanized Rubber at Various Temperatures

จารุธรณ์ สังข์ปาน อริสรา ชัยกิตติรัตนา
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร 02 5870026 ต่อ 402 / 02 5869541 อีเมล์: acn@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของยางเติมผงคาร์บอนดำ โดยการศึกษานี้ได้พิจารณาแบบจำลองวิสโคไฮเปอร์อิลาสติก ซึ่งพฤติกรรมไฮเปอร์อิลาสติกจะแทนด้วยแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของโพลิโนเมียลอันดับ 2 พฤติกรรมวิสโคอิลาสติกที่ขึ้นกับเวลาและฟังก์ชันการคลายความเค้นแทนด้วยอนุกรมโปรนี่ ซึ่งการขึ้นกับอุณหภูมิอธิบายโดยใช้ฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิจากทฤษฎีของวิลเลียม-แลนเดล-เฟอรี่ ทั้งนี้ได้นำพารามิเตอร์ของแบบจำลองวิสโคไฮเปอร์อิลาสติกข้างต้นมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมอาบาคัสซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยแบบจำลองประสบผลสำเร็จในการจำลองการดึงในแนวแกนและการคลายความเค้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ผลของแบบจำลองพลวัตแบบวงรอบให้ผลการสูญเสียที่น้อยกว่าการทดลอง

Abstract

The aim of this thesis is to study the time and temperature dependent of mechanical property of carbon black filled natural rubber. A visco-hyperelastic material model was employed aiming the hyperelastic response was modeled using the strain energy function which is expressed by a polynomial series N=2. The time dependent response was assumed linear viscoelastic and the relaxation function was represented by a Prony series. The temperature dependent was captured by the temperature-time shift function of Williams-Landel-Ferry. The visco-hyperelastic material model was incorporated into a finite element package ABAQUS and was used to simulate the responses obtained experimentally. The model has some success in modelling the uniaxial tensile response and stress relaxation at different temperatures. The model can depict the hysteresis response but in much lesser extent than that observed experimentally.

1. บทนำ

เนื่องด้วยปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้มีอัตราการเจริญเติบโตและการแข่งขันที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและยางก็เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้วัสดุยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีจึงมีการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุยางกันอย่างต่อเนื่อง เพราะวัสดุยางเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนและพฤติกรรมที่แตกต่างจากของวัสดุอื่นๆ ซึ่งวัสดุยางมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น อุณหภูมิ (Temperature) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ความเค้น (Stress) เป็นต้น ในการวิเคราะห์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุยางให้มีความเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้นั้นต้องการแบบจำลองคอนสติติวทีฟ (Constitutive model) ที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของวัสดุยางที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จึงมีความสนใจที่จะสร้างแบบจำลองคอนสติติวทีฟเพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุยางให้มีความสอดคล้องกับเงื่อนไขที่อุณหภูมิแตกต่างกันให้มีความถูกต้องมากที่สุด

2. แบบจำลองวัสดุ (Material Model)

การศึกษาในที่นี้สมมุติให้วัสดุยางมีคุณสมบัติวิสโคไฮเปอร์อิลาสติก (Viscohyperelastic) ซึ่งจะแบ่งพฤติกรรมออกเป็น 2 แบบคือ พฤติกรรมวิสโคอิลาสติกและพฤติกรรมไฮเปอร์อิลาสติก (Hyperelastic) อธิบายได้ดังนี้

2.1 ไฮเปอร์อิลาสติก (Hyperelastic)

การวิเคราะห์วัสดุประเภทยางจำเป็นต้องหาแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันพลังงานความเครียด $W = W(I_1, I_2, I_3)$ หรือเขียนในรูปของอัตราส่วนการยืดตามแนวแกน $W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ โดยที่อัตราส่วนการยืดตามแนวแกนหลักและสเตรนอินวาเรียนท์ (Strain Invariants) มีความสัมพันธ์ดังนี้ [1]

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (1)$$

$$I_2 = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_3\lambda_1)^2 \quad (2)$$

$$I_3 = (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 \quad (3)$$

ค่าความเค้นหลักคอวชี (Cauchy Principle Stress) ที่สมมติฐานให้เป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้อธิบายได้ดังนี้ [2]

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \frac{\partial W(\mathbf{F})}{\partial \mathbf{F}}\mathbf{F}^T \quad (4)$$

เมื่อ p คือความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Pressure)

$\mathbf{F}$ คือเกรเดียนท์การเสียรูป (Deformation Gradient)

แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ใช้อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุยาง ซึ่งจะใช้ในกลุ่มของแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenolagical Model) ได้แก่

แบบจำลองพหุนามอันดับ 2 (Polynomial Model)

$$W = \sum_{i+j+k=1}^{N} C_{ijk}(I_1-3)^i(I_2-3)^j(I_3-3)^k \quad (5)$$

เมื่อ C_{ijk} คือค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่หาจากการทดลอง

2.2 วิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) [3]

ฟังก์ชั่นโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น $g(t)$ สามารถเขียนโดยใช้สมการอนุกรมโพรนี่ (Prony Series Function) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N} g_i(1-\exp(-\frac{t}{\tau_i})) \quad (6)$$

$$g(t) = \frac{G(t)}{G_o} = \frac{E(t)}{E_0} \quad (7)$$

เมื่อ $G(t)$ คือโมดูลัสการเฉือนผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นกับเวลา

G_o คือโมดูลัสการเฉือนผ่อนคลายความเค้นที่ค่าสูงสุด (t = 0)

τ_i คือเวลาการคลายตัว (Relaxation times)

ตัวแปร τ_i และ g_i เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากผลการทดลองการคลายความเค้นโดยใช้สมการอนุกรมโพรนี่แสดงไว้ในตารางที่ 2 จากการทดสอบได้ค่าความเค้นเทียบกับเวลาทำให้สามารถเขียนโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นได้

2.3 การเท่ากันของเวลากับอุณหภูมิ [4]

การเท่ากันของเวลากับอุณหภูมิคือพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกที่อุณหภูมิหนึ่ง โดยเปลี่ยนค่าของเวลาที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น พิจารณาเวลากับอุณหภูมิสามารถวางทับซ้อนกันได้และเป็นค่าที่เท่ากันได้อย่างถูกต้องโดยการแทนผลลัพธ์ที่ได้จากค่าในแนวนอนของกราฟคือค่า $\log a_T$ เมื่อ a_T เรียกว่า ฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ (Shift function) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอรี่ (WLF) ดังสมการ

$$\log a_T = \frac{C_1(T-T_s)}{C_2+(T-T_s)} \quad (8)$$

เมื่อ C_1, C_2 คือค่าคงที่

T คืออุณหภูมิที่อ้างถึง

T_s คืออุณหภูมิที่อ้างอิง

2.4 วิสโคไฮเปอร์อิลาสติก (Viscohyperelastic)

พฤติกรรมของวัสดุในงานวิจัยนี้ได้จำลองให้เป็นไปตามพฤติกรรมวิสโคไฮเปอร์อิลาสติก เพื่อใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของวัสดุยางภายใต้การเปลี่ยนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยพฤติกรรมวิสโคไฮเปอร์อิลาสติกจะรวมเอาพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกที่ขึ้นกับเวลาและพฤติกรรมไฮเปอร์อิลาสติกที่ไม่ขึ้นกับเวลาเข้าด้วยกัน ซึ่งจะพิจารณาสมการคอนสติติวทีฟของพฤติกรรมวิสโคไฮเปอร์อิลาสติกที่เขียนอยู่ในรูปความเค้นคอวชีของการอินทิเกรต [5]

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = -p\mathbf{I} + \frac{\partial W_e}{\partial \mathbf{F}}\mathbf{F}^T + \int_0^t \dot{g}(t')\cdot\frac{\partial W}{\partial \mathbf{F}}(t-t')\cdot\mathbf{F}^T(t-t')dt' \quad (9)$$

โดยที่ $\dot{g}(t') = \frac{dg(t')}{dt'}$ และ W_e เป็นฟังก์ชันความเครียดในสภาวะสมดุล

สำหรับกรณีที่คิดผลของอุณหภูมิที่มีต่อวัสดุหรือความเค้นชั่วขณะที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถใช้หลักการเลื่อนเวลาของอุณหภูมิอธิบายได้โดยใช้หลักการลดเวลาสำหรับพฤติกรรมที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้สมการ WLF เป็นฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ ดังสมการ (8) ส่วนสมการโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นดังสมการ (6) ที่ขึ้นอยู่กับเวลาในเทอมของอนุกรมโพรนี่เมื่อใส่ค่าของฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิลงไปสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N} g_i(1-\exp(-\frac{t}{\tau_i a_T})) \quad (10)$$

$a_T(t)$ คือฟังก์ชันเลื่อนเวลา (Time Shift Function)

3. การทดลองและการหาคุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุยาง การทดลองแบบที่หนึ่งเป็นการทดลองการดึงเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมไฮเปอร์อิลาสติกของวัสดุ การทดลองแบบที่สองจะเป็นการทดลองการคลายความเค้น (Stress Relaxation) แล้วนำไปหาค่าสเป็คตรัมการคลายความเค้น (Relaxation Spectrum) ของวัสดุและค่าฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ ส่วนการทดลองแบบที่สามเป็นการทดลองการดึงยางในลักษณะที่เป็นวงรอบฮีสเตอเรซีส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของยางที่ได้รับภาระแบบซ้ำๆ กัน เนื่องจากการสูญเสียพลังงาน

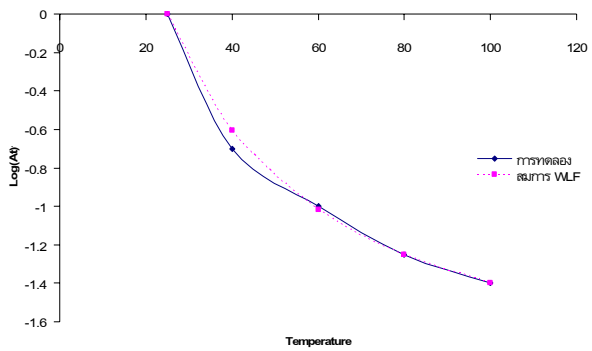
3.1 การทดสอบการดึงในแนวแกน (Uniaxail Tensile)

การทดลองการดึงในแนวแกนจะทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 412-92 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron 6.05 ดังรูปที่ 1 ทดลองภายในห้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 25-100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบคือผลการทดลองครั้งที่ 5 ซึ่งเป็นผลที่ตัดผลของมูลลิน (Mullin effect) ออกไปแล้ว โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองดังรูปที่ 3 – 7

รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.2 การทดสอบการคลายความเค้น (Stress Relaxation)

การทดลองการคลายความเค้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโพรนี่ (Prony Series) กรณีที่กำจัดผลของมูลลิน ซึ่งนำไปใส่ในแบบจำลองเพื่อแทนพฤติกรรมวิสโคอิลาสติก ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 1 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 25-100 องศาเซลเซียส ที่ความเครียดเท่ากับ 25% คงที่ความเครียดไว้เป็นเวลา 600 วินาทีในแต่ละอุณหภูมิการดึง โดยจะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองดังรูปที่ 8 – 12 และนำผลการทดลองคลายความเค้นมาหาค่าฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิเพื่อจะใช้ในการลดเวลา ซึ่งการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและสมการ WLF แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ

3.3 การทดลองดึงแบบวงรอบ

การทดลองการดึงแบบวงรอบจะมีผลกระทบของมูลลิน (Mullins Effect) ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะไม่ซ้ำแนวเดิมส่งผลให้วัสดุมีการกระจายตัวของพลังงานภายในทำให้ในแต่ละรอบของการทดลองจะมีพลังงานที่ไม่สามารถย้อนกลับได้หมดแสดงค่าการสูญเสียด้วยวงรอบฮิสเตอรีซีส ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงด้วยอัตราความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะยืดสูงสุด 70 มิลลิเมตรจำนวน 10 รอบ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ โดยจะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองดังรูปที่ 13 – 17

4.ผลการทดลอง

4.1 แบบจำลองไฮเปอร์อิลาสติก (Hyperelastic Model)

แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดสามารถหาค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรมอาบาคัส โดยการนำข้อมูลที่เราใช้วิธีอัตราส่วนปัวซองมาแปลงเป็นค่าความเค้นวิศวกรรมกับความเครียดวิศวกรรมทั้งสามแบบเพื่อหาค่าพลังงานความเครียดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองพหุนาม อันดับที่ 2 เพื่อจำลองพฤติกรรมของยางเติมผงคาร์บอนดำ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้ไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยาง ในการรับโหลดทั้งสามลักษณะและค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรมอาบาคัส แสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองโพลีโนเมียล

	C_{01}	C_{10}	C_{11}	C_{02}	C_{20}
Polynomial n=2	0.15028	0.5453	-0.03282	0.0055	0.00891

4.2 แบบจำลองวิสโคอิลาสติก (Viscoelasticity)

สมบัติวิสโคอิลาสติกของยางเป็นส่วนที่อธิบายถึงคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอัตราการเสียรูป (Deformation) ตัวแปร τ_i และ g_i เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องหาจากผลการทดลองคลายความเค้นเทียบกับเวลาภายในอนุกรมโพรนี่เพื่ออธิบายพฤติกรรมวิสโคอิลาสติก ซึ่งจะได้ค่าอนุกรมโปรนี่ที่นำมาทำนายผลได้ดีในตารางที่ 2 ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องจากผลการทดลองไดนามิกส์เชิงกลและนำค่าการทดลองคลายความเค้นมาแปลงค่าเป็นค่าโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น เพื่อนำไปหาค่าคงที่ของฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ C_1 และ C_2 ซึ่งจะนำไปทำนายค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สเป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Spectrum)

	g_i	τ_i
Viscoelastic	0.001	0.01
	0.1	0.1
	0.001	1
	0.099	10
	0.03	100
	0.06	1000
	0.001	10000

ตารางที่ 3 ฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิ (Shift Function)

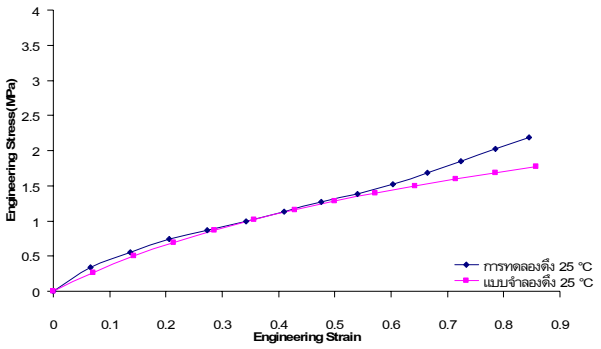
อุณหภูมิที่อ้างอิง	C_1	C_2
25 °C	2.089	36.94

5. การวิจารณ์ผลการวิจัย

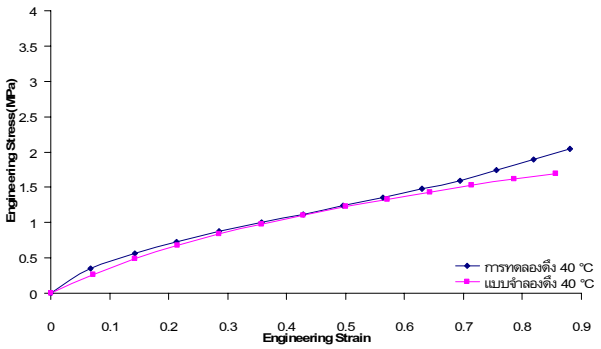
การวิเคราะห์ผลการวิจัยที่ขึ้นกับผลกระทบของอุณหภูมิที่แตกต่างกันของการทดลองการดึง การทดลองการคลายความเค้นและ การทดลองการดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลอง

5.1 ผลการทดลองดึงกับแบบจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์

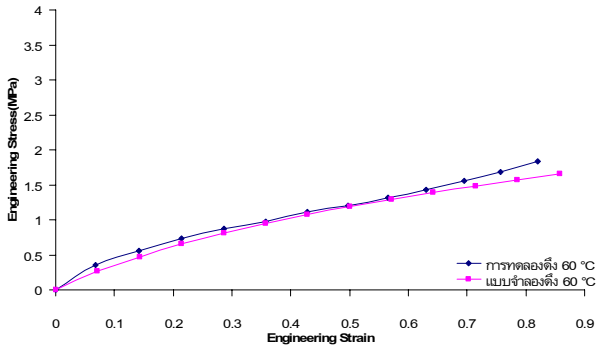
ผลจากแบบจำลองเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างการจับยึดพันธะโมเลกุลที่คอยต้านทานการเปลี่ยนรูปที่มีขนาดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งค่าความเค้นและค่าความเครียดของแบบจำลองในช่วงอุณหภูมิสูงๆ จะสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยแบบจำลองจะทำนายผลได้ดีในช่วงความเครียดที่ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป แต่ที่ค่าความเครียดจาก 70 เปอร์เซ็นต์จะมีความคลาดเคลื่อนบ้าง เพราะแบบจำลองที่ใช้นั้นสามารถทำนายผลที่ดีในช่วงความเป็นเชิงเส้น แต่ผลการทดลองที่ได้อยู่ในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อน



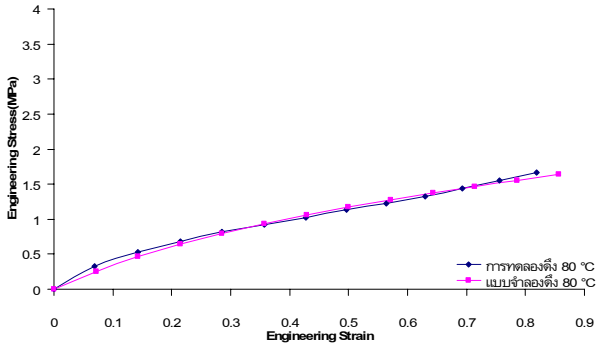
รูปที่ 3 ผลการทดลองกับแบบจำลองการดึงที่อุณหภูมิ 25°C



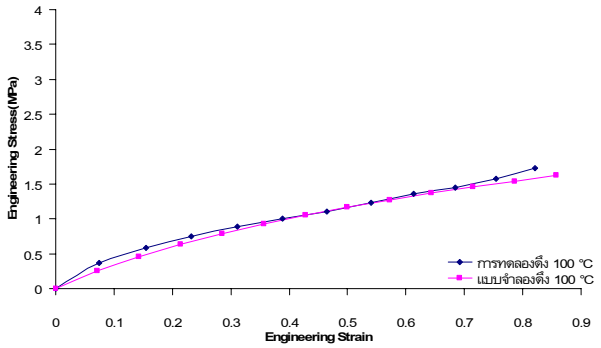
รูปที่ 4 ผลการทดลองกับแบบจำลองการดึงที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 5 ผลการทดลองกับแบบจำลองการดึงที่อุณหภูมิ 60°C



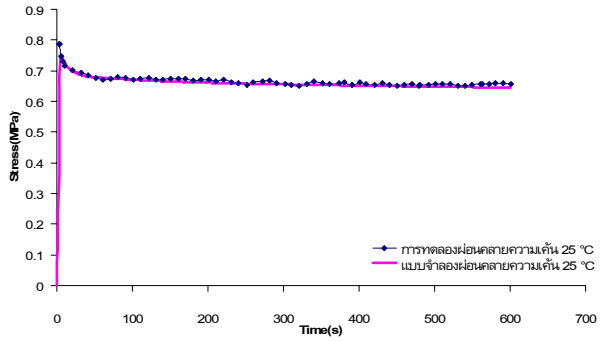
รูปที่ 6 ผลการทดลองกับแบบจำลองการดึงที่อุณหภูมิ 80°C



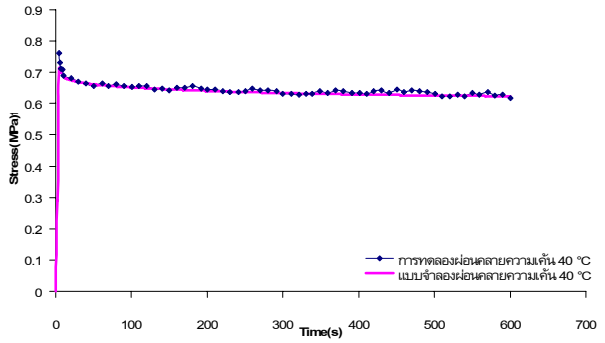
รูปที่ 7 ผลการทดลองกับแบบจำลองการดึงที่อุณหภูมิ 100°C

5.2 ผลการทดลองคลายความเค้นกับแบบจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์

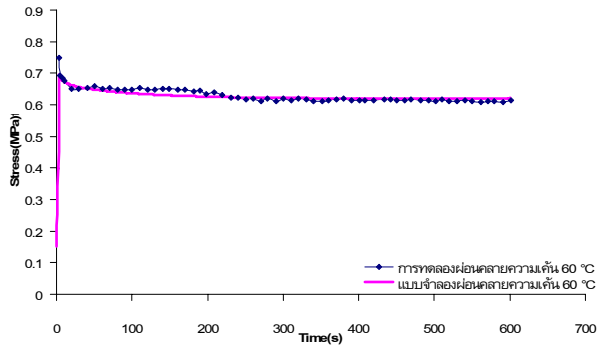
พิจารณาผลที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการคลายความเค้นจะเพิ่มสูงขึ้นและค่าความแข็งแรงของวัสดุก็จะลดลง โดยแบบจำลองสามารถทำนายผลได้ดีในช่วงอุณหภูมิน้อยๆ จะสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้ใกล้เคียงมากกว่าค่าความเค้นในช่วงอุณหภูมิสูงๆ เป็นผลจากการทดลองที่กำหนดให้มีค่าการยืดตัวน้อย จากแบบจำลองเมื่อเวลาผ่านไป 200 วินาที ค่าการคลายความเค้นจะเริ่มคงที่จนจบการจำลองในทุกๆ อุณหภูมิ ซึ่งจะมีผลใกล้เคียงกับการทดลอง



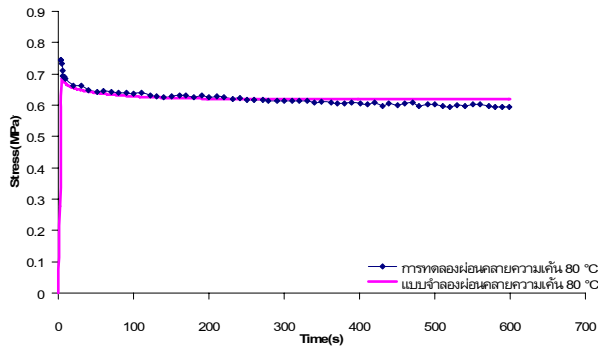
รูปที่ 8 ผลการทดลองกับแบบจำลองคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 25°C



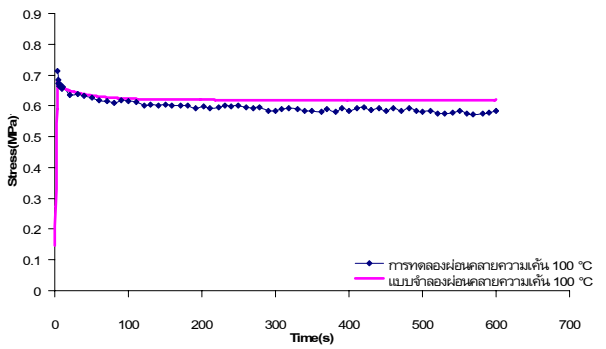
รูปที่ 9 ผลการทดลองกับแบบจำลองคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 10 ผลการทดลองกับแบบจำลองคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 60°C



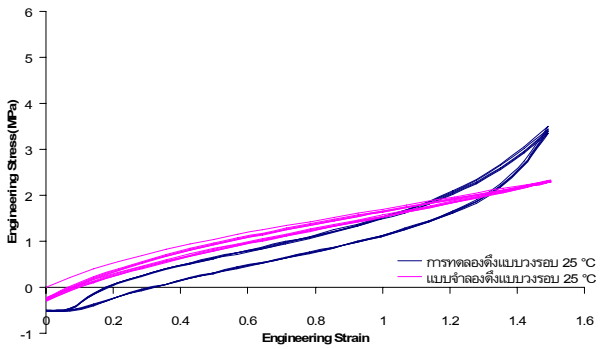
รูปที่ 11 ผลการทดลองกับแบบจำลองคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 80°C



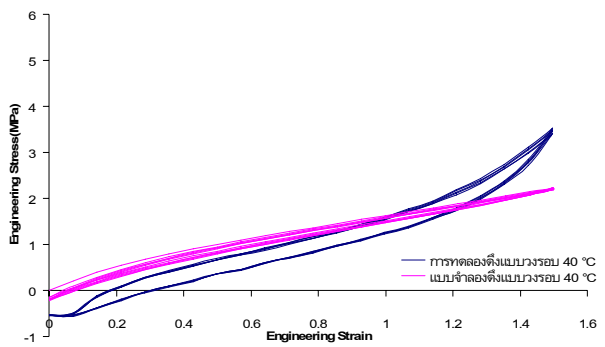
รูปที่ 12 ผลการทดลองกับแบบจำลองคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 100°C

5.3 ผลการทดลองดึงแบบวงรอบกับแบบจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์

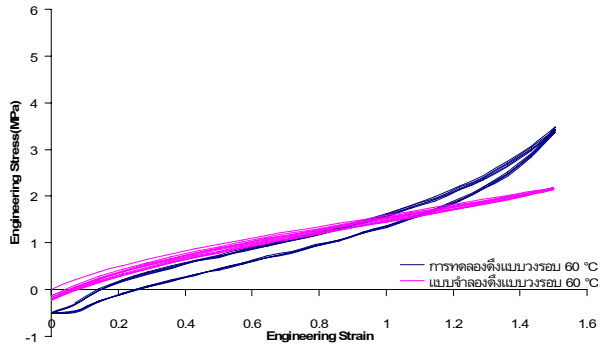
จากผลการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ มีการสูญเสียพลังงานมากกว่าที่อุณหภูมิสูงๆ อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าเวลาการคลายตัว (Relaxation Time) ลดลง จากแบบจำลองในช่วงอุณหภูมิสูงๆ จะทำนายพฤติกรรมของวงรอบฮิสเตอรีซีสได้ใกล้เคียงมากกว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียพลังงานที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากค่าความผิดพลาดของแบบจำลองไฮเปอร์อิลาสติกที่ทำนายได้แค่ 80 เปอร์เซ็นต์ เพราะวิธีอัตราส่วนปัวซองนั้นสามารถใช้ในการทำนายผลที่สามารถเชื่อถือได้อยู่ในช่วง 0-80 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเครียดวิศวกรรม ดังนั้นแบบจำลองจึงสามารถทำนายผลให้มีความถูกต้องในช่วงค่าความเครียดวิศวกรรมที่ 0-80 เปอร์เซ็นต์และแบบจำลองวิสโคอิลาสติกที่เลือกใช้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงเชิงเส้นแต่ผลของการทดลองนั้นไม่เป็นเชิงเส้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งสามารถทำนายผลการทดลองกับแบบจำลองได้ใกล้เคียงในช่วงที่มีค่าเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความเครียดวิศวกรรมที่ 0-80 เปอร์เซ็นต์



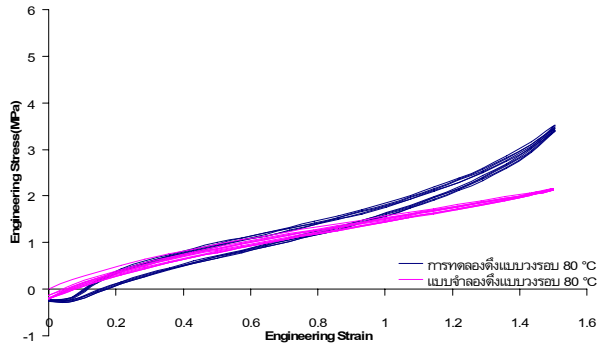
รูปที่ 13 ผลการทดลองกับแบบจำลองดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิ 25°C



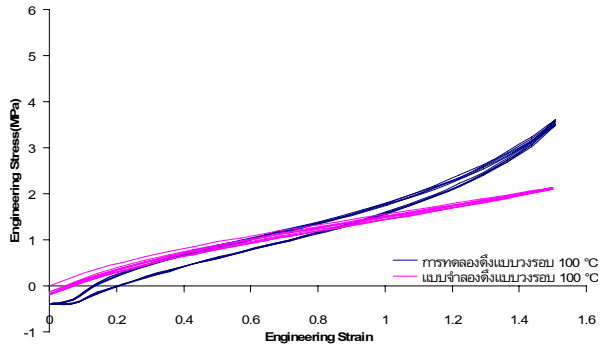
รูปที่ 14 ผลการทดลองกับแบบจำลองดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 15 ผลการทดลองกับแบบจำลองดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 16 ผลการทดลองกับแบบจำลองดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 17 ผลการทดลองกับแบบจำลองดึงแบบวงรอบที่อุณหภูมิ 100°C

6. สรุปผล

จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง วงรอบการสูญเสียก็จะสูญเสียน้อยลงและอัตราการคลายความเค้นจะเร็วขึ้น แต่ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส พฤติกรรมเชิงกลจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งแบบจำลองพฤติกรรมวิสโคไฮเปอร์อิลาสติกของวัสดุที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง จากการใช้ฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิทำนายผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่อุณหภูมิแตกต่างกันค่าความเค้นและความเครียด อัตราการคลายความเค้นสามารถทำนายผลได้ดี แต่การสูญเสียพลังงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันนั้นไม่สามารถทำนายได้ดีเท่าที่ควร โดยแบบจำลองทั้งสามแบบมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลของแบบจำลองกับการทดลองนั้นเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์บางตัวที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองในส่วนล่างของชิ้นทดลองที่มีการยึดให้คงที่ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ แต่ในการทดลองจริงสามารถเคลื่อนตัวได้นิดหน่อย

7. เอกสารอ้างอิง

1. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5. : ABAQUS, c2005.
2. Holzapfel, G. A. Nonlinear Solid Mechanics. New York : Oxford University Press, 2000.
3. Ferry, J. D. Viscoelastic Properties of Polymers. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons. Inc, 1980.
4. Ward, I. M. An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers. New York : Oxford University Press, 1992.
5. Shim, V. P. W., L. M. Yang. and J. Yuan. "A Thermo-Visco-Hyperelastic Approach to Model the Constitutive Behaviour of Polyester Elastomer." JSME/ASME International Conference on Materials and Processing. Honolulu, (October. 2002):15-18.