

การศึกษาพฤติกรรมการเกิดความร้อนในชิ้นส่วนวัสดุยางภายใต้การรับภาระแบบวงรอบ

Heat generation of particle filled natural rubber components during cyclic deformation

สถาพร ว่างฉาย¹, ผศ.ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตน์² และ ดร.ชานยุท โกลิตะวงษ์²
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
E-mail: sathaphonw@yahoo.com¹, acn@kmitnb.ac.th² and ckw@kmitnb.ac.th²

Mr. Sathaphon Wangchai¹, Asst.Prof. Arisara Chaikittiratana, Ph.D² and Chanyut Kolutawong, Ph.D²
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue,
Bangkok 10800
E-mail: sathaphonw@yahoo.com¹, acn@kmitnb.ac.th² and ckw@kmitnb.ac.th²

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเกิดความร้อนสะสม (Heat Build-up) ในวัสดุยางที่ใช้สารตัวเติมต่างกันสองชนิด อีกทั้งได้นำเสนอขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Fully Couple Temperature-Displacement และทำนายการเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการสูญเสียพลังงานกล (Hysteresis) สุดท้ายผลการจำลองได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

คำหลัก : ความร้อนสะสม, วัสดุยาง, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

In this work, the investigation of heat build-up in two rubber compounds of different filler contents was carried out. In addition, a methodology to quantify and predict temperature rise in rubber components due to mechanical energy dissipation (hysteresis) via application of finite element analysis (FEA) using Fully Couple Temperature-Displacement analysis was devised. The predictions were validated against experimental data.

Keywords: Heat build-up, Rubber, Finite element analysis

1. บทนำ

ยางเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง โดยสามารถแบ่งสารประกอบยางได้เป็น 2 ประเภท คือ ยางธรรมชาติ (Natural Rubber ; NR) และยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีต่างๆ เรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) และยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วเรียกว่ายางคงรูป (Vulcanizate)

ยางคงรูปมีคุณสมบัติความเป็นไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) และวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) จึงเหมาะกับการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์

เช่นยางรถยนต์ ฐานวางเครื่องยนต์ (engine mounts) ที่ต้องการลดการสั่นสะเทือนโดยการดูดซับพลังงาน วัสดุยางดังกล่าวจะอยู่ภายใต้ภาระแบบไดนามิกสโพลด (dynamics load) ในลักษณะเป็นแบบเป็นวงรอบ (cyclic load) ภายใต้ภาระดังกล่าวมักจะเกิดการสูญเสียของพลังงานกลกลายเป็นพลังงานความร้อน (energy loss) ระหว่างการ รับภาระแรง (Load) และ การเอาภาระออก (Unload) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (heat buildup) ในวัสดุยาง ทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและเกิดความเสียหายได้

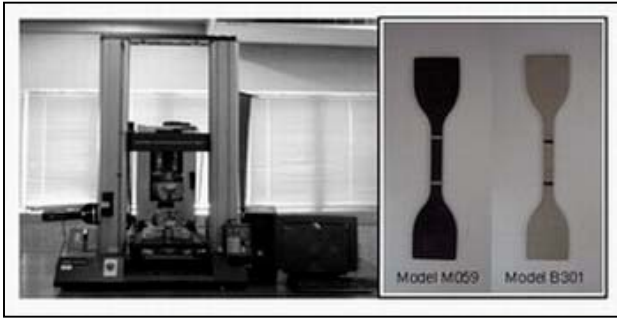
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของความร้อน (Heat buildup) ภายใต้วัสดุยางคงรูปที่มีสารตัวเติมที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ ผงคาร์บอนดำและซิลิกา รับแรงกระทำที่ระดับความถี่ 10 Hz และ 30 Hz แอมพลิจูด 5% และได้ทำการจำลองและทำนายผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (temperature rise) ภายในวัสดุยางโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ABAQUS V6.5 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Fully Couple Temperature-Displacement และนำผลการจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้

2. การทดสอบ (Experimental Work)

การทดสอบในที่นี้มี 2 ส่วนหลักๆ คือ การทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบวัดค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

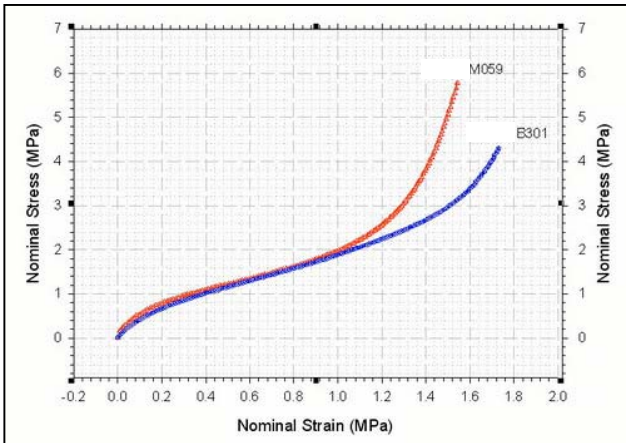
2.1 การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุทำโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Instron 5567 โดยผลการทดสอบจะนำไปหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Hyperelastic (ดูหัวข้อ 3) เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึง Instron 5567 และชิ้นทดสอบแรงดึงทั้งสองชนิด (เติมผงคาร์บอนดำ M059(ซ้าย) และเติม ซิลิกา B301 (ขวา))

ผลเฉลี่ยที่ได้จากการดิ่งสารประกอบยางจากจำนวน 7 ครั้ง ดิ่งด้วยความเร็ว 200 min/sec ตัดผลจากการเกิด mulin effect ในการดิ่งครั้งที่ 1 ถึง 3 ออก ผลลัพธ์ที่ได้ดิ่งแสดงในรูปที่ 2 วัสดุยางชนิด M059 และชนิด B301



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด จากการดิ่งวัสดุยางในหนึ่งแนวแกน

2.2 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat, C_p)

ค่าความจุความร้อนจำเพาะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในหน่วยมวลวัสดุในฟังก์ชันของอุณหภูมิของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

การทดสอบจากเครื่อง ดี.เอส.ซี(Differential Scanning Calorimeter, DSC) ณ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ทดสอบที่อุณหภูมิช่วง 30 – 90 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.3 ความหนาแน่นของวัสดุ (Density, ρ)

การทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุยางโดยที่ทดสอบที่อุณหภูมิของน้ำที่ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ตามมาตรฐาน B.S 903 Part A1:1971

$$\rho = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \times \rho_w \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นวัสดุทดสอบ (g/cm^3)

ρ_w คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่ 20°C ($1.00\text{g}/\text{cm}^3$)

W_1 คือน้ำหนักสุทธิของชิ้นส่วนยางทดสอบในอากาศ (g)

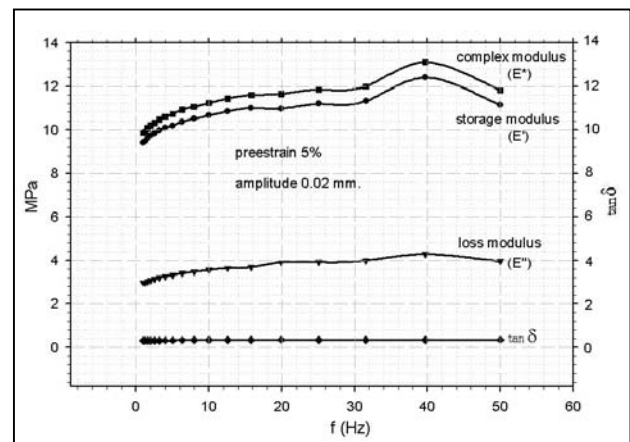
W_2 คือน้ำหนักสุทธิของชิ้นส่วนยางทดสอบในน้ำที่ 20°C (g)

2.4 Dynamic mechanical analyzer

ค่าคอมเพล็กซ์โมดูลัส (Complex Modulus) ของวัสดุวัดโดยใช้เครื่อง DMA ณ. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา) ที่การเปลี่ยนแปลงความถี่ 1 ถึง 50 Hz ที่อุณหภูมิ 22°C ได้ค่าโมดูลัสสะสม (E') และโมดูลัสการสูญเสีย (E'') แพคเตอร์การสูญเสีย

(loss factor) $\tan \delta = \frac{E''}{E'}$ ตัวอย่างของค่าคอมเพล็กซ์โมดูลัสที่ได้

แสดงไว้ในรูปที่ 3

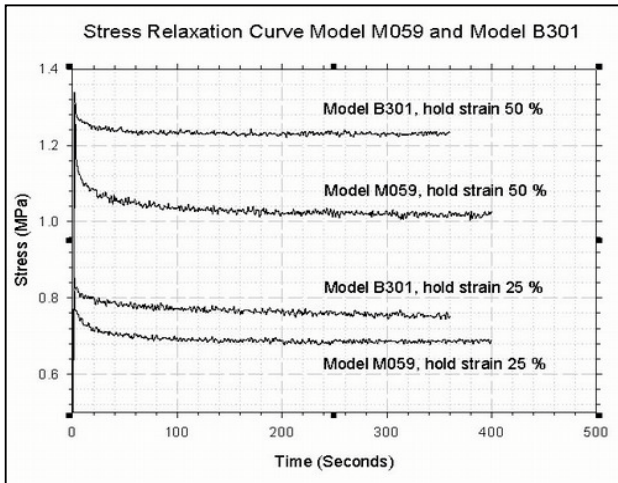


รูปที่ 3 ค่าคอมเพล็กซ์โมดูลัสของวัสดุยางชนิด M059 ที่ได้จากเครื่อง DMA

2.5 การผ่อนคลายความเค้น (Stress Relaxation)

ได้ทำการทดสอบด้วยการดิ่งวัสดุยางด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึง Instron 5567 และชิ้นงานทดสอบ การดิ่งชิ้นงานทดสอบได้ทำอย่างรวดเร็วที่ความเครียดเท่ากับ 25% และ 50 % คงที่ความเครียดไว้เป็นเวลา 400 วินาที

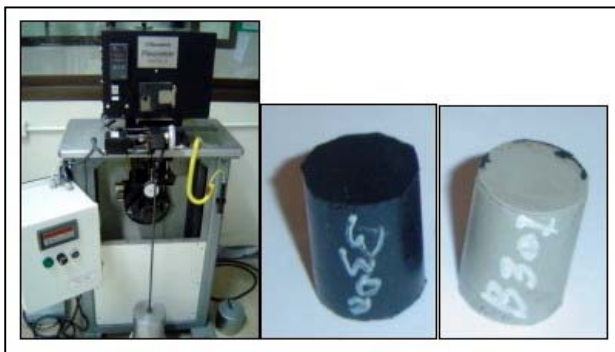
ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเทียบกับเวลาแสดงในรูป 4



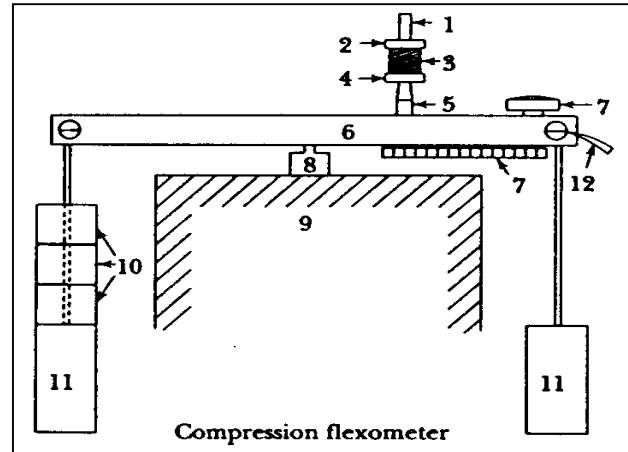
รูปที่ 4 การผ่อนคลายความเค้นของวัสดุยางชนิด M059 และชนิด B301

2.6 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในสารประกอบยางโดยใช้เครื่อง Goodrich Flexometer

ในที่นี้ได้ทำการทดสอบในสภาวะที่วัสดุยางได้รับการแบบกดเป็นวงรอบ (Cyclic Load) ที่ระดับความถี่ (frequency) คงที่ ทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D623-99 [1] โดยการใส่แรงกระทำแบบสถิตย์ 245 นิวตัน ได้ระยะยุบตัว 2.97 มม. และตามด้วยแรงกระทำแบบไดนามิกสโพลด์ที่ระยะซีก 1.02 มม. ด้วยความถี่ 10 Hz และ 30 Hz กระทำกับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8 มม. และสูง 25.5 มม. อุณหภูมิเริ่มต้น 31 องศา วัดที่ตำแหน่งฐานของวัสดุยาง และอุณหภูมิห้อง 23 องศา แสดงเครื่องทดสอบและชิ้นงานทดสอบในรูปที่ 5 และแสดงการติดตั้งชิ้นงานทดสอบในรูปที่ 6 (หมายเลข 3 แสดงชิ้นงานทดสอบ)



รูปที่ 5 เครื่อง Goodrich Flexometer และชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 6 schematic diagram เครื่อง Goodrich Flexometer

2.7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity, K) และสัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient, H)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity, K) ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity Analysis (TCA) ใช้บริการ ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), สัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient) อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [2],

3. แบบจำลองวัสดุ (Material Modeling)

ในการศึกษาที่นี้สมมุติให้วัสดุยางมีคุณสมบัติวิสโค-ไฮเปอร์อีลาสติก (Visco-Hyperelastic) และเป็นวัสดุไอโซโทรปิก (isotropic material) และวัสดุยางไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible material)

3.1 ไฮเปอร์อีลาสติกของยาง

ในการศึกษาที่นี้สมมุติให้วัสดุยางมีคุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) ในช่วงที่เป็น Instantaneous Response โดยสมการพลังงานความเครียดสามารถเขียนให้เป็นฟังก์ชันของอินแวเรียนต์ของการเสียรูป (I_1, I_2, I_3) หรือเขียนเป็นสมการทั่วไปได้เป็น $W = W(I_1, I_2, I_3)$ หรือเขียนในรูปของอัตราส่วนการยืดตามแนวแกน $W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ โดยที่อัตราส่วนการยืดตามแนวแกนหลักและอินแวเรียนต์มีความสัมพันธ์ดังนี้ [3]

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

$$I_2 = (\lambda_1 \lambda_2)^2 + (\lambda_2 \lambda_3)^2 + (\lambda_3 \lambda_1)^2 \quad (3)$$

$$I_3 = (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2 \quad (4)$$

พลังงานความเครียด W ซึ่งแบ่งออกเป็น สองกลุ่ม ได้แก่ แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตและแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมโครงสร้างจุลภาค จากการศึกษาในครั้งนี้จะใช้แบบจำลองที่อยู่ในกลุ่มแรก ได้แก่แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model) โดยเลือกใช้ $N=2$

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

พฤติกรรมทางกลของยางที่ได้จากการทดสอบการดึงในหนึ่งแนว แกนตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 ได้นำมาใช้สร้างข้อมูลการดึงในสองแนว แกนและสภาวะ Pure Shear โดยใช้วิธีการPoisson's Ratio [4] ข้อมูล ความเค้นและความเครียดที่ได้จากวัสดุที่รับโหลดทั้งสามกรณีได้นำมา ทำการ Fit curve เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลองวัสดุ โดยใช้ โปรแกรม ABAQUS V 6.5

3.2 คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelasticity)

คุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของยางเป็นส่วนที่อธิบายถึงคุณสมบัติที่ ขึ้นอยู่กับเวลาและอัตราการเสียรูป (deformation rate)

ฟังก์ชันการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นกับเวลา (Stress relaxation) สามารถเขียนได้ในรูปแบบของ Prony Series ดังนี้ [3]

$$g(t) = 1 - \sum_{k=1}^n g_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (6)$$

$$; g(t) = \frac{G(t)}{G_u} \quad (7)$$

โดยที่ $G(t)$ โมดูลัสการเฉือนที่ขึ้นกับเวลา, G_u โมดูลัสการเฉือนที่ เกิดขึ้นทันทีทันใดก่อนเกิดการผ่อนคลายความเค้น (Unrelaxed Modulus) และ τ_k คือ Relaxation times ตัวแปร τ_k และ g_k เป็น พารามิเตอร์ที่ต้องหาจากผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าของ τ_k และ g_k โดยใช้ข้อมูลจาก การทดสอบการผ่อนคลายความเค้น (Stress relaxation) ดังแสดงไว้ใน หัวข้อ 2.5

จากการทดสอบได้ค่าความเค้นเทียบกับเวลาทำให้สามารถเขียน โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นได้

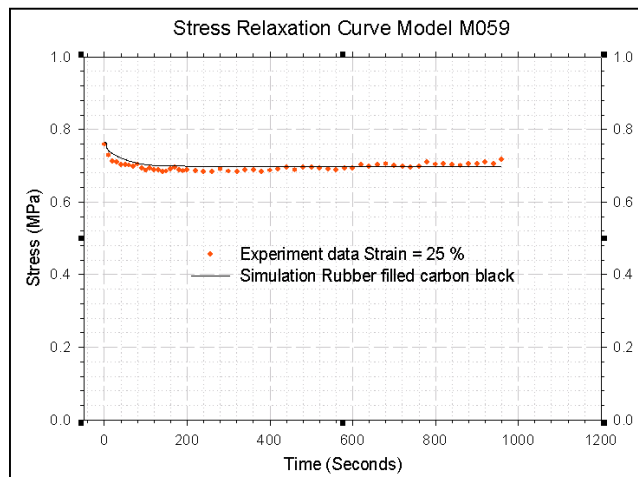
$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_o} \quad (8)$$

จากสมมุติฐานวัสดุยางมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic material) คุณสมบัติยืดหยุ่นเขียนความสัมพันธ์ได้

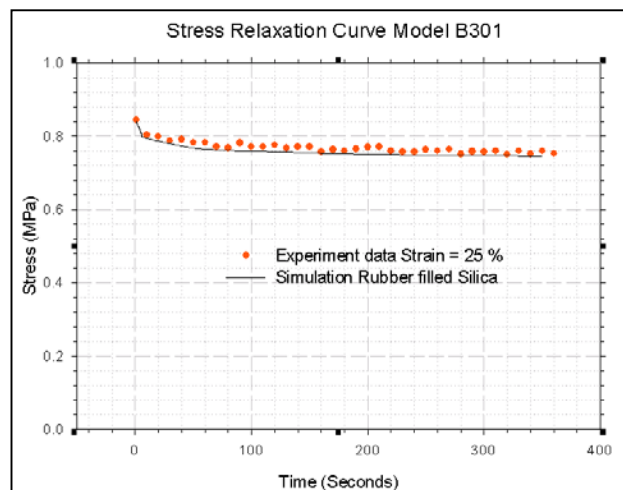
$$E(t) = 2G(t)(1 + \nu) \quad (9)$$

$E(t)$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นและ $G(t)$ คือ โมดูลัสการเฉือน โดยที่ $\nu = 0.5$ สำหรับวัสดุอัดตัวไม่ได้

ค่าของ τ_k และ g_k ที่เหมาะสม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และผล การจำลองการผ่อนคลายความเค้น (Stress relaxation) โดยใช้ Prony Series ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 แบบจำลองพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุ ยางชนิด M059 เทียบกับผลการทดสอบ



รูปที่ 8 แบบจำลองพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุ ยางชนิด B301 เทียบกับผลการทดสอบ

คอมเพล็กซ์โมดูลัส (Complex Modulus) ของวัสดุสามารถเขียน ได้ในเทอมของความถี่โดยใช้แบบจำลอง Generalised Maxwell ดังนี้ [5]

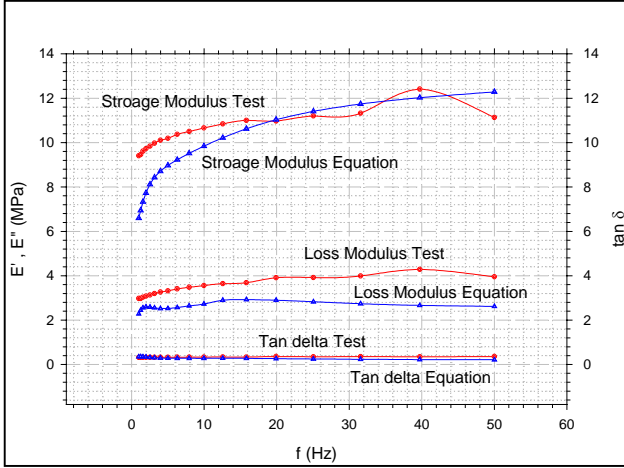
$$E'(\omega) = E_R + \sum_{i=1}^n \frac{E_i \omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (10)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (11)$$

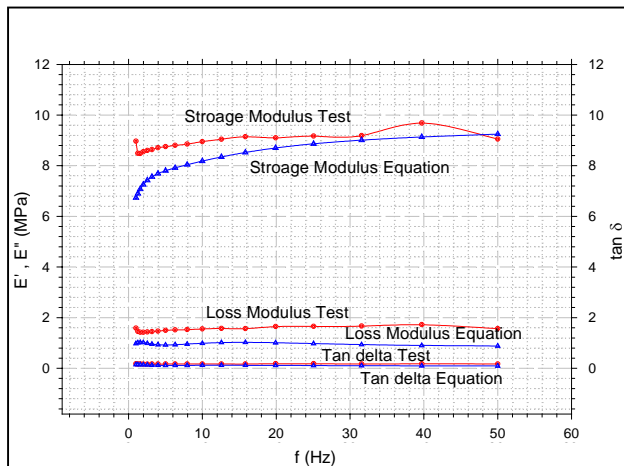
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

เมื่อ $E''(\omega)$ คือโมดูลัสการสูญเสีย และ $E'(\omega)$ คือโมดูลัสสะสม E_R คือโมดูลัสการผ่อนคลาย (relaxed modulus) E_i และ τ_i คือโมดูลัสและเวลาการผ่อนคลาย (modulus and relaxation time) ω คือ ความเร็วเชิงมุม

เมื่อนำค่าสเปกตรัม (Spectrum) ของ τ_k และ g_k ข้างต้น มาทำนายคอมเพล็กซ์โมดูลัส (Complex Modulus) และนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเครื่อง DMA ได้ผลดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลคอมเพล็กซ์โมดูลัสของวัสดุชนิด M059



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลคอมเพล็กซ์โมดูลัสของวัสดุชนิด B301

4. การจำลองการรับภาระแบบเป็นวงรอบและการเกิดความร้อนสะสมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์

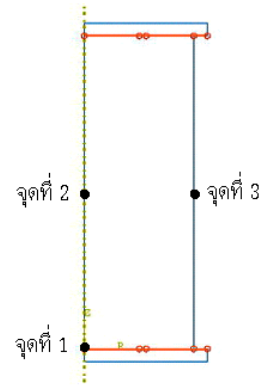
การจำลองการรับภาระแบบเป็นวงรอบและการเกิดความร้อนสะสมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการและขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

1. สร้างแบบจำลองจะต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงของปัญหา และเนื่องจากวัสดุยางทดสอบมีความสมมาตรทางด้านลักษณะรูปร่าง และแรงที่กระทำ ดังนั้นจึงพิจารณาแบบจำลองของวัสดุยางเป็นแบบแผ่นเรียบสมมาตรรอบแกนได้ ดังแสดงในรูปที่ 11

2. วัสดุยางสมมติเป็นวัสดุวิสโค-ไฮเปอร์อีลาสติก (Visco-Hyperelastic) คุณสมบัติของวัสดุยางแสดงดังในตารางที่ 1 คือคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางความร้อน

3. อัตราส่วนการสูญเสียของความร้อน (Inelastic heat fraction)

ข้อมูลสำหรับการคำนวณโดยโปรแกรมออบาคัส คำนวณหาค่าพลังงานที่เก็บสะสมหรือการสูญเสียพลังงาน ภายในเนื้อวัสดุยางเมื่อมีการเสียรูปเป็นการประเมินค่าของความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในเนื้อวัสดุยางคิดเป็นร้อยละของพลังงานที่เกิดการสูญเสียความร้อน กำหนดอยู่ที่ 0.99 (99%)



รูปที่ 11 โครงสร้างและขอบเขตของปัญหาตัวอย่าง

4. ชิ้นตัวอย่างงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ 2 มิติ แสดงตามรูปที่ 11 เลือกเอลิเมนต์แบบ CAX4HT เป็นเอลิเมนต์สำหรับวัสดุที่มีความสมมาตรรอบแกน (axisymmetric) และอัดตัวไม่ได้ วิเคราะห์โดยใช้ Couple Temperature Displacement จำนวนอีลิเมนต์ 140 อีลิเมนต์

5. การกำหนดแรงกระทำต่อวัสดุยางโดยแรกเริ่มเป็นแบบคงคดลงที่ระยะ 2.97 มม. ก่อนเริ่มมีแรงกระทำแบบไดนามิกสโกลดระดับความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ระยะชัก 1.02 มม.เป็นเวลา 1500 วินาที และการกำหนดขอบเขตเนื่องจากสมมุติฐานในงานวิจัยได้กำหนดให้สารประกอบยางยึดติดกันตลอดเวลากับแผ่นเพลท ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขการบังคับ (Constrain) ให้กับผิวสัมผัสเป็นแบบยึดติดกันตลอดเวลา โดยเลือกการบังคับแบบยึดติดกัน (Tie)

5. ขั้นตอนการวิเคราะห์ เลือกใช้ขั้นตอนที่มีมาให้กับ โปรแกรม ABAQUS V6.5 คือ Fully Couple Temperature Displacement เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ควบคุมกันระหว่างการเคลื่อนที่ทำให้เสียรูปและการวิเคราะห์ทางความร้อนคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุยาง

ชนิดวัสดุ	B301		M059 (ผสมผงคาร์บอนดำ)		
Conductivity $W/m^{\circ}C$	0.2246		0.2918		
Density (ρ) g/cm^3	1.1851		1.1752		
Specific Heat $J/g^{\circ}C$	1.5318		1.5646		
Film Coefficient W/m^2K	6.0		6.0		
Hyperelastic	M059				
Polynomial n=2	C_{01}	C_{10}	C_{11}	C_{02}	C_{20}
Moduli=instantaneous	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	133626.462	507643.645	-22670.4850	3353.18405	1079.12634
	B301				
	C_{01}	C_{10}	C_{11}	C_{02}	C_{20}
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	128216.679	487910.452	-22149.1483	3308.88542	1393.37584
Viscoelastic	แบบจำลอง M059		แบบจำลอง B301		
	g_k	τ_k	g_k	τ_k	
	0.025	0.001	0.015	0.001	
	0.012	0.01	0.011	0.01	
	0.001	0.1	0.001	0.1	
	0.0001	1	0.0001	1	

4.2 ผลการวิเคราะห์

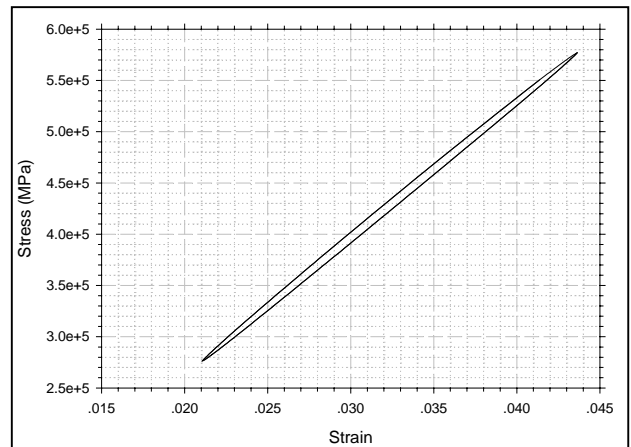
4.2.1 ฮีสเทรีซิส (Hysteresis) [5]

ฮีสเทรีซิส (hysteresis) คืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัสการสูญเสีย (loss modulus) ส่วนด้วยโมดูลัสสะสม (storage modulus) เป็นการวัดการสูญเสียของพลังงานในวัสดุยางระหว่างที่วัสดุยางเกิดการเสียรูปแบบเป็นวงรอบ โดยพลังงานที่สูญเสียนี้คือพลังงานที่ไม่สามารถย้อนกลับได้หมดเมื่อปล่อยภาระ (Unloading)

กราฟความเค้นและความเครียดที่ได้จากการใช้โปรแกรมอบาคัสจำลองสภาวะรับแรงกระทำเป็นแบบไดนามิกสโพลด์ที่ความถี่ 10 Hz และ 30 Hz จะได้กราฟออกมาในลักษณะวงรีดังแสดงในรูปที่ 12

พื้นที่ภายในรูปวงรีคือพลังงานไม่สามารถย้อนกลับได้หมดเมื่อปล่อยภาระ (Unloading)

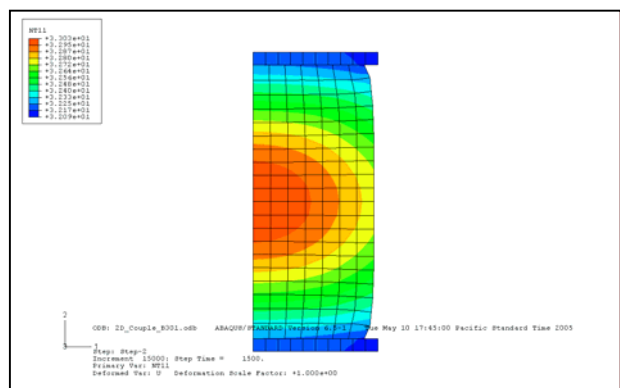
วงรอบฮีสเทรีซิสเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุยาง ยิ่งสูงปริมาณของความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะสูงตาม



รูปที่ 12 วงรอบฮีสเทรีซิสของสารประกอบยางชนิด M059 ระยะยวบตัว 2.97 mm. ความถี่ 10 Hz ระยะชัก 1.02 mm.

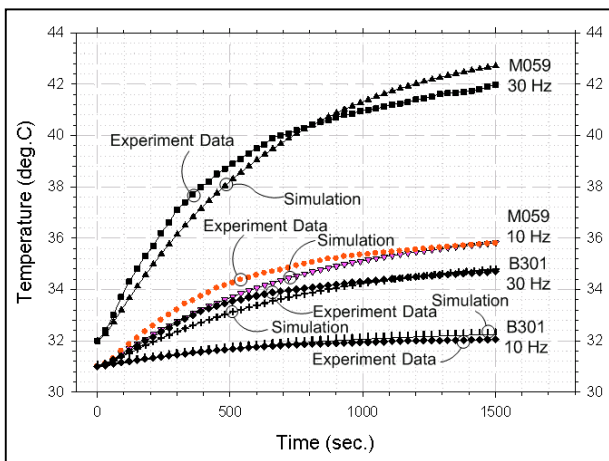
4.2.2 การเกิดความร้อนสะสม (Heat Build Up)

ผลการวิจัยในที่นี้ประกอบด้วย ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองจากการใช้วิธี FEA ที่ระดับความถี่ 10 Hz และ 30 Hz วัสดุประกอบด้วย 2 ชนิดคือ ชนิดที่ผสมผงคาร์บอนดำและผสมซิลิกา ในส่วนของการใช้ FEA ได้ทำการวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกน ตัวอย่างผลการจำลองการเกิดขึ้นของอุณหภูมิภายในวัสดุยางชนิด M059 (ผสมผงคาร์บอนดำ) ความถี่ 10 Hz ที่เวลา 1500 วินาทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่งที่เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของวัสดุยางที่มีลักษณะทรงกระบอกกลม



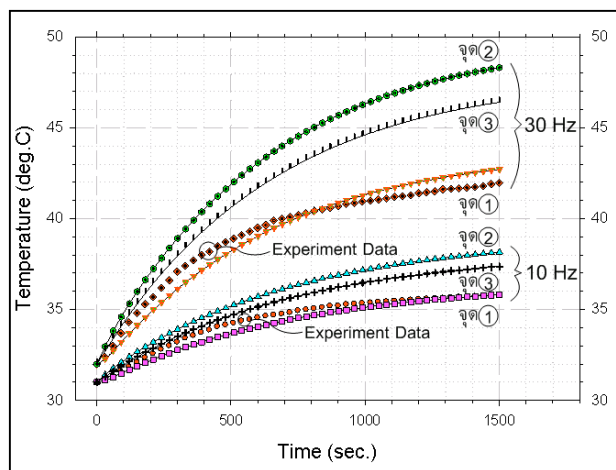
รูปที่ 13 การเกิดขึ้นของอุณหภูมิภายในวัสดุยางชนิด M059 (ผสมผงคาร์บอนดำ) ความถี่ 10 Hz ที่เวลา 1500 วินาที

การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดที่ 1 (ที่ฐาน) ระหว่างผลการจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่ความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ได้แสดงไว้ในรูปที่ 14

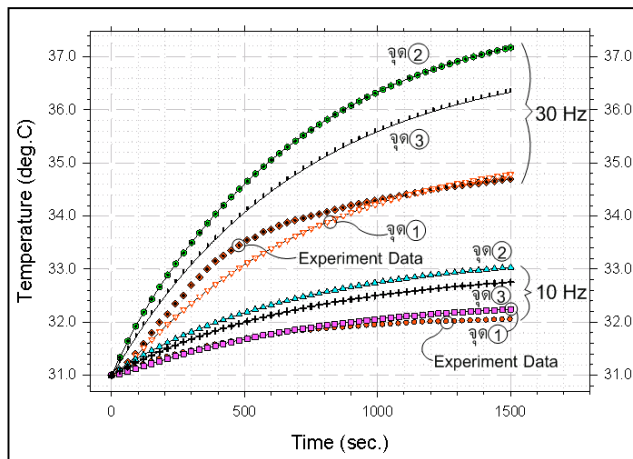


รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของวัสดุยางชนิด M059 (ผสมผงคาร์บอนดำ) และชนิด B301 (ผสมซิลิกา) ที่ความถี่ 10 Hz, 30 Hz ที่ได้จากการจำลองและผลจากการทดสอบ เป็นเวลา 1500 วินาที ที่ตำแหน่งฐานของวัสดุยาง

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จุดที่1, จุดที่2 และจุดที่3 ที่แสดงในรูปที่ 11 เป็นเวลาทั้งหมด 1500 วินาทีเปรียบเทียบผลการจำลองกับอุณหภูมิที่ฐานของชิ้นทดสอบ (จุดที่ 1) ที่ได้จากการทดสอบของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่ความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 ถึง รูปที่ 16



รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของวัสดุยางชนิด M059 (ผสมผงคาร์บอนดำ) ที่ความถี่ 10 Hz, 30 Hz และผลจากการทดสอบ เป็นเวลา 1500 วินาที ที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 16 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา วัสดุยางชนิด B301 (ผสมซิลิกา) ที่ความถี่ 10 Hz, 30 Hz และผลจากการทดสอบ เป็นเวลา 1500 วินาที ที่ตำแหน่งต่างๆ

5. อภิปรายและสรุปผล

จากผลการทดสอบเชิงกลของวัสดุยางรูปทรงทั้งสองชนิด (แบบเติมผงคาร์บอน และแบบเติมผงซิลิกา) จะเห็นได้จากกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดในรูปที่ 2 ว่า วัสดุยางทั้งสองมีคุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) โกล้เคียงกันมากในช่วงเคี้ยวระหว่าง 0 ถึง 1.0 (100 %) ส่วนคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) นั้น จะเห็นได้จากรูปที่ 4 ว่าวัสดุยางที่เติมผงคาร์บอน (M059) มีการผ่อนคลายความเครียด (Stress relaxation) มากกว่าและเร็วกว่าวัสดุยางที่เติมผงซิลิกา (B301) และจากรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 แสดงว่าวัสดุที่เติมผงซิลิกามีค่าโมดูลัสการสูญเสีย (Loss Modulus) และ Loss Tangent ที่ต่ำกว่าวัสดุยางที่เติมผงคาร์บอนอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนคุณสมบัติเชิงความร้อนจะเห็นได้จากตารางที่ 1 ว่า วัสดุที่เติมผงซิลิกามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity) และความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ต่ำกว่าวัสดุยางที่เติมผงคาร์บอนอยู่เล็กน้อย

เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาทดสอบเพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยเครื่อง Goodrich Flexometer ที่ความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ที่ระยะชัก 1.02 มม. ดังได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 14 พบว่า วัสดุยางที่เติมผงคาร์บอนมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่าและด้วยอัตราที่เร็วกว่าวัสดุที่เติมผงซิลิกาอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้การเกิดความร้อนมีผลจากคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุยางและแปรผันโดยตรงกับค่า Loss Tangent [6]

ในการจำลองพฤติกรรมกการเกิดความร้อนในวัสดุยางภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวงรอบโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แทนพฤติกรรมของวัสดุยางทั้งสองด้วยแบบจำลองวิสโค-ไฮเปอร์อีลาสติก (Visco-Hyper elastic Model) โดยที่คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) ได้เลือกใช้ แบบจำลองพหุนาม อันดับ 2 (Polynomial N=2) ค่าพารามิเตอร์หาจากผลการทดสอบการดึงในแกนเดียว ส่วนคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) นั้นได้จำลองโดยใช้ Linear Generalised Maxwell Model ค่าพารามิเตอร์หาจากผลการทดสอบ

การผ่อนคลายความเค้น (Stress relaxation) ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถทำนายคุณสมบัติไดนามิกส์ (Dynamic properties) ได้ดี

ทั้งนี้ได้จำลองปัญหาเป็นแบบ 2 มิติโดยเลือกใช้ Axisymmetric Element การวิเคราะห์เป็นแบบ Fully Couple Temperature-Displacement โดยสามารถวิเคราะห์การเสียรูปและการเกิดความร้อนได้ภายในเวลาเดียวกัน

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจากเครื่อง Goodrich Flexometer การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ดูรูปที่ 14 ถึง 16) แสดงให้เห็นว่า วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบจำลองวัสดุ (Material Model) แบบวิสโค-ไฮเปอร์อีลาสติก (Visco-Hyperelastic) ที่ได้ใช้นั้นสามารถนำมาทำนายการเกิดความร้อนสะสมในชิ้นส่วนยางได้น่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง ทั้งนี้ แบบจำลองวัสดุที่ใช้ไม่ได้อาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีความคลาดเคลื่อนกันระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM:D623-99,1988,"Standard Test Method for Rubber Property-Heat Generation and Flexing Fatigue in Compression".pp.109-113
- [2] Vladamir Kerchman, Cheng Shaw "Experimental Study and finite element simulation of heat build-up in rubber compounds with application to fracture" Rubber Chemistry and Technology, Vol. 76 pp 387-405
- [3] ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, USA
- [4] Turner D.M. & Brennan M 1990 "The Multiaxial Behaviour of Rubber", Plastics and Rubber Processing and Applications 14(3) pp 183-188
- [5] J.D.Ferry, "Viscoelastic properties of polymers" Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980
- [6] Hiroshi,M.,1996,"Flexometer Predicts Heat Generation." Rubber Word,Vol 214 No.6 pp.24-28