

การวิเคราะห์การเกิดความร้อนในยางคงรูปที่มีสารตัวเติมภายใต้สภาวะ การเสียรูปแบบวงรอบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis of Heat Generation in Particle Filled Natural Rubber Vulcanizates During Cyclic Deformation

สถาพร วังฉาย^{1*} ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์² และ อริสรา ชัยกิตติรัตน²

บทคัดย่อ

ยางมีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกเมื่อเสียรูปภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตในลักษณะเป็นแบบวงรอบจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่กึ่งกลางของยางเนื่องจากการสูญเสียพลังงานกล (Hysteresis) เกิดการสะสมและมีการกระจายความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ความร้อนสะสมในยางและอาจทำให้ยางสูญเสียสมบัติเดิม ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำนายการเกิดความร้อนสะสมในยางคงรูปที่มีสารตัวเติมแตกต่างกันสองชนิดคือยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำและยางธรรมชาติผสมผงซิลิกา โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบกับผลจากการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาทำนายการเกิดความร้อนสะสมในยางได้อย่างน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ: ความร้อนสะสม วัสดุยาง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสูญเสียพลังงานกล

Abstract

Natural rubber vulcanized is a viscoelastic material such that it can be appropriately used as vehicle tires. When the material under cyclic-loaded deformation, heat is generated and buildup at the center of the rubber, and then, dissipated to the environment. The heat rises from the viscoelastic behavior, which can be seen as hysteresis loops in the stress-strain curve. This temperature rise causes damage in the rubber components. In this work, the investigation of heat build-up in two rubber compounds of different filler types is carried out. In addition, a methodology to quantify and predict temperature rise in the rubber vulcanized due to mechanical energy dissipation (Hysteresis) via application of finite element analysis (FEA) is devised. The predictions are validated against experimental data with good agreement.

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 8638 E-mail: sathaphonw@kmutnb.ac.th

Keywords: Heat Build-up, Vulcanized Rubber, Finite Element Analysis, Hysteresis

1. บทนำ

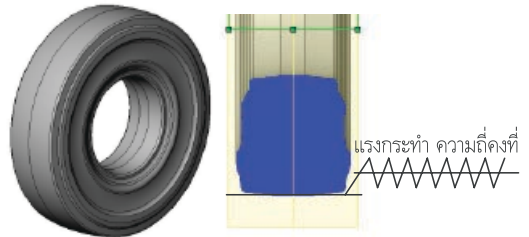
ยางเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ในงานอย่างกว้างขวาง โดยสามารถแบ่งยางได้เป็น 2 ประเภทคือ ยางจากธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ยางที่ผ่านการผสมทางเคมีเรียกว่ายางคอมพาวด์และยางที่ผ่านกระบวนการอบแล้วเรียกว่ายางคงรูป

ยางคงรูปมีสมบัติทั้งความเป็นไฮเปอร์อีลาสติกและวิสโคอีลาสติกหรือเรียกว่าวิสโคไฮเปอร์อีลาสติกจึงเหมาะกับการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ เช่นยางรถยนต์ฐานวางเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ต้องการลดการสั่นสะเทือนโดยการดูดซับพลังงาน ยางดังกล่าวเมื่ออยู่ภายใต้ภาระแบบพลวัตในลักษณะแบบเป็นวงรอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลและกลายเป็นพลังงานความร้อนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิภายในยางเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและเกิดความเสียหายได้

โดยทั่วไปรถโฟล์กลิฟท์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 16 – 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นความเร็วที่ไม่สูงมากนัก แต่ความถี่อาจสูงถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อเล็ก และจะทำให้เกิดการเสีรูปบริเวณที่ยางสัมผัสกับพื้นถนน การเสีรูปของล้อยางตันเมื่อรับแรงกระทำแบบวงรอบแสดงตามรูปที่ 1 การเสีรูปของยางก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความร้อนภายในล้อยาง กระบวนการกระจายของอุณหภูมิภายในยางอธิบายได้ด้วยสมการพลังงานดังนี้

$$k\nabla^2 T + \dot{q} = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

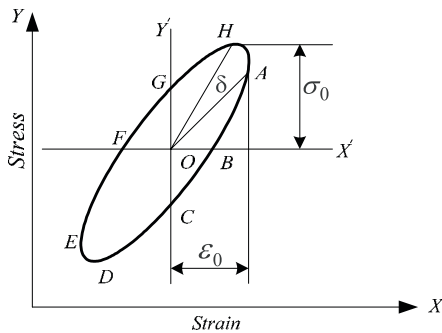
เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ T คืออุณหภูมิภายในเนื้อยางซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา t คือเวลาที่วัสดุเกิดการเสีรูปและ $\dot{q}$ คืออัตราการเกิดความร้อนภายในยางเมื่อชิ้นงานเกิดการเสีรูปต่อหน่วยปริมาตร เทอม $(k\nabla^2 T)$ คืออัตราการนำความ



รูปที่ 1 ล้อยางตันและรูปลักษณะแรงกระทำแบบเป็นวงรอบ

ร้อนภายในยางต่อหน่วยปริมาตรและเทอม $c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t}$ คืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในยางต่อหน่วยปริมาตร จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่ากระบวนการกระจายของอุณหภูมิภายในล้อยางประกอบด้วยสามกระบวนการหลักๆ ได้แก่ การเกิดความร้อนเนื่องจากการเสีรูปของวัสดุ การส่งผ่านความร้อนจากกระบวนการเกิดความร้อนออกไปสู่พื้นผิวภายนอกวัสดุ และการระบายความร้อนจากพื้นผิวของยางออกสู่บรรยากาศแวดล้อม

จากสมการพลังงาน Harwood, S. [1] เคยหาลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ความเครียดและความร้อนที่เกิดขึ้นในล้อยางตัน โดยกำหนดให้ยางมีสมบัติวิสโคไฮเปอร์อีลาสติกกับภาระแบบพลวัตที่ความถี่ 180 รอบต่อนาที โดยสมบัติไฮเปอร์อีลาสติกใช้แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model) อันดับที่ 2 และหาค่าคงที่ของแบบจำลองพหุนามจากการทดสอบยางแบบดึงในหนึ่งแนวแกนแล้วใช้วิธีการของ Turner, D.M. and Brennan, M. [2] ในการหาข้อมูลการดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกนและข้อมูลการทดสอบแบบเฉือนสำหรับสมบัติวิสโคอีลาสติก อธิบายพฤติกรรมด้วยฟังก์ชันการคลายความเค้นที่ขึ้นกับเวลา และวิเคราะห์ผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน ต่อมา Yeong-Jyh Lin, Sheng-Jye Hwang [3] ใช้เครื่อง Dynamic Mechanical Analysis



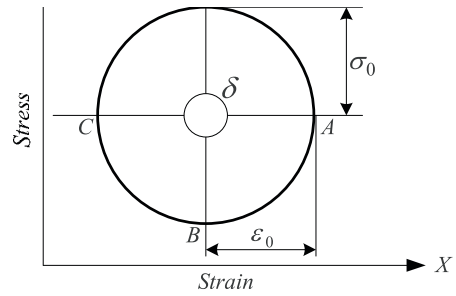
รูปที่ 2 วงรอบฮิสเทียรีซิส (Hysteresis Loop)

(DMA) วัดสมบัติของยาง หาค่าการสูญเสียพลังงานกลที่เกิดขึ้น นำไปสู่การทำนายอัตราการเกิดความร้อนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ชั้นงาน 2 มิติเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง

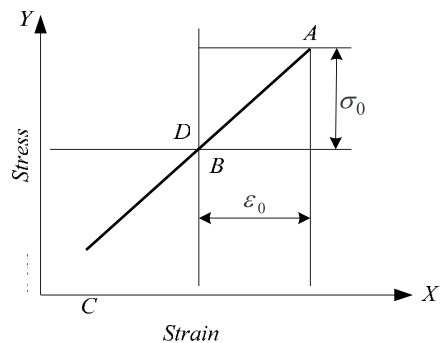
งานวิจัยนี้จะทำนายผลการกระจายของอุณหภูมิ โดยคำนวณมาจากการสูญเสียพลังงานกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) [4]-[6] ด้วยโปรแกรม ABAQUS V6.5 โดยใช้ยางคงรูปที่มีสารตัวเติมแตกต่างกัน 2 ชนิดคือ ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำและยางธรรมชาติผสมซิลิกา กำหนดให้ยางรับแรงกระทำแบบพลวัตเป็นวงรอบที่มีความถี่ 10 Hz และ 30 Hz แอมพลิจูด 5% ของความสูง และนำผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ

2. ฮิสเทียรีซิส (Hysteresis)

ฮิสเทียรีซิส [7] คือการสูญเสียพลังงานกลภายในขึ้นลงที่มีการเสียรูปเป็นแบบวงรอบ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการกดขึ้นลงแบบเป็นวงรอบแสดงตามรูปที่ 2 เส้นโค้ง EFGHA เป็นเส้นโค้งที่เกิดขึ้นขณะรับแรงกด ดังนั้นพื้นที่ใต้เส้นโค้ง EFGHA คือพลังงานที่นำเข้าทั้งหมดและเส้นโค้ง ABCDE เป็นเส้นโค้งที่เกิดขึ้นขณะปล่อยแรงกด ดังนั้นพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ABCDE คือพลังงานที่ปลดปล่อยออกทั้งหมด กราฟมีลักษณะเป็นรูปวงรีบ่งบอกถึงพลังงานที่กระจายและสะสมภายในชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเสียรูปในลักษณะคงที่ความเร็วและอัตราความเครียดเริ่มต้นจากจุดศูนย์ ขึ้นไปสูงสุดและกลับมายังจุดศูนย์เช่นเดิมจะได้ความเครียด



รูปที่ 3 วัสดุที่มีสมบัติการเสียรูปถาวร



รูปที่ 4 วัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นได้ดี

สูงสุดและต่ำสุด มุมเฟส (δ) คือมุมระหว่างความเค้นสูงสุด (เส้น OH) และความเครียดสูงสุด (เส้น OA)

พื้นที่ของวงรอบฮิสเทียรีซิสหรือพลังงานความเครียดที่สูญเสียต่อรอบสามารถคำนวณจากสมการ (2)

$$W = \pi \sigma_0 \epsilon_0 \sin \delta \quad (2)$$

เมื่อ W คือพลังงานความร้อน, σ_0 คือความเค้นสูงสุด และ ϵ_0 คือความเครียดสูงสุด

วงรอบฮิสเทียรีซิสจะมีค่าสูงสุดที่มุมเฟสเท่ากับ 90° สำหรับวัสดุที่มีสมบัติการเสียรูปถาวร (ดูรูปที่ 3) และมีค่าต่ำสุดที่มุมเฟสเท่ากับ 0° สำหรับวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นได้ดี (ดูรูปที่ 4) ตามลำดับ

3. การทดสอบ

ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยค่าความร้อนจำเพาะ

(Specific Heat, c_p) ทดสอบด้วยเครื่อง ดี.เอส.ซี (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ที่อุณหภูมิช่วง 30 – 90 องศาเซลเซียส ที่อัตราเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที ความหนาแน่น (Density, ρ) ทดสอบตามมาตรฐาน B.S 903 Part A1:1971 หาได้จาก

$$\rho = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \times \rho_w \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของชิ้นวัสดุยางทดสอบ (g/cm^3) ρ_w คือค่าความหนาแน่นของน้ำที่ $20^\circ C$ ($1.00 g/cm^3$) W_1 คือน้ำหนักสุทธิของชิ้นยางทดสอบในอากาศ (g) W_2 คือน้ำหนักสุทธิของชิ้นยางทดสอบในน้ำที่ $20^\circ C$ (g) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity, k) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Thermal Conductivity Analysis (TCA) สัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film Coefficient, h) สำหรับล้อยางตันที่ใช้ในรถโฟล์คคลิฟท์ที่หยุดนิ่งความเร็วลมมีค่าเท่ากับ ศูนย์เมตรต่อวินาทีจะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Vladamir Kerchman and Cheng Shaw [8] มีค่าเท่ากับ $6.0 W/m^2K$ สำหรับยางทั้งสองชนิดและสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) แสดงในตารางที่ 1 และ 2 [9]

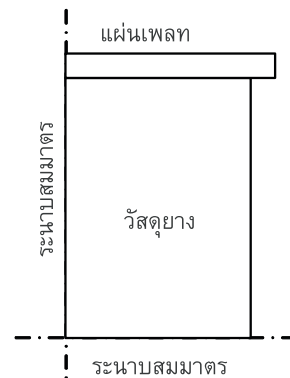
ชิ้นงานทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8 มม. และสูง 25.5 มม. ทดสอบด้วยเครื่อง Goodrich Flexometer [9]

4. การจำลองการเกิดความร้อนสะสมภายในยางคงรูป

การจำลองการรับภาระแบบเป็นวงรอบและการเกิดความร้อนสะสมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีหลักการและขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

1. สร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับความเป็นจริงของปัญหาเนื่องจากวัสดุยางทดสอบมีความสมมาตรทางด้านลักษณะรูปร่างและแรงที่กระทำ ดังนั้น จึงพิจารณาแบบจำลองของวัสดุยางเป็นแบบแผ่นเรียบสมมาตรรอบแกนมีลักษณะเป็น 2 มิติ (ดูรูปที่ 5)

2. กำหนดสมบัติของวัสดุเป็นยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำและยางธรรมชาติผสมผงซิลิกาสมมุติ



รูปที่ 5 แบบจำลองชิ้นงาน 2 มิติ

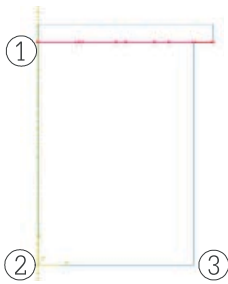
เป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คุณสมบัติของวัสดุยางแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ในส่วนของแผ่นเพลทเป็นเหล็กกล้าและผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับวัสดุยางฉาบด้วยฉนวนกันความร้อนและผิวสัมผัสยึดแน่นตลอดเวลา ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากวัสดุยางไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านข้ามไปยังแผ่นเพลทได้

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบโพลีโนเมียลอันดับ 2 ของยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำและยางธรรมชาติผสมผงซิลิกา

ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำ (MPa)					ยางธรรมชาติผสมผงซิลิกา (MPa)				
C_{01}	C_{01}	C_{11}	C_{02}	C_{20}	C_{01}	C_{10}	C_{11}	C_{02}	C_{20}
0.1336	0.5076	-0.0226	0.0033	0.0010	0.1282	0.4879	-0.0221	0.0033	0.0013

ตารางที่ 2 สมบัติของยางทั้งสองชนิดชนิดวัสดุ

ชนิดของวัสดุ สมบัติของวัสดุ	ยางธรรมชาติผสมผงซิลิกา	ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน W/m^2C	0.2246	0.2918
ความหนาแน่น (ρ) g/cm^3	1.1851	1.1752
ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p) $J/g.^{\circ}C$	1.5318	1.5646
สัมประสิทธิ์ฟิล์ม (h) W/m^2K	6.0	6.0



รูปที่ 6 โครงสร้างและขอบเขตของปัญหาตัวอย่าง

3. กำหนดให้วัสดุเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกไอโซโทรปิก (Isotropic) และไม่สามารถอัดตัวได้

4. ชิ้นตัวอย่างงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ จากรูปที่ 5 เลือกกำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ DCAX4 (4-node Linear Axisymmetric Heat Transfer Quadrilateral) จำนวน 70 เอลิเมนต์

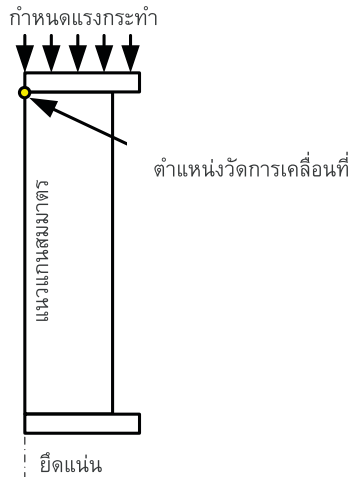
5. กำหนดค่าของความร้อนสะสมภายในชิ้นงาน ซึ่งหาจากการจำลองอย่างทั้งสองชนิด เกิดวงรอบอีทเทียรีซีส์ที่ระดับความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ระยะชัก 1.02 มม.

6. เลือกโหมดการวิเคราะห์เป็นแบบการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

5. การจำลองการเคลื่อนที่และผลอีทเทียรีซีส์

จำลองชิ้นงานที่มีความสมมาตรรอบแกน (2 มิติ) แสดงในรูปที่ 6 รับแรงกระทำเป็นแบบวงรอบที่ระดับความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ระยะชัก 2.97 มม. ระยะชัก 1.02 มม. และระยะชัก 2.04 มม. เขียนกราฟในรูปของความเค้นและความเครียดจะได้กราฟออกมาในลักษณะรูปวงรี แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดพื้นที่ภายในรูปวงรี คือพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปต่อรอบสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) วงรอบอีทเทียรีซีส์เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความร้อนที่สะสมภายในวัสดุ

ผลจากการจำลองการเสียรูปแบบเป็นวงรอบ แสดงในรูปของวงรอบอีทเทียรีซีส์ในตำแหน่งพื้นผิวชิ้นงานด้านบนจากรูปที่ 7 แสดงผลการจำลองในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11 จากรูปที่ 8 – 11 คำนวณหาพื้นที่ภายในเส้นโค้ง



รูปที่ 7 แบบจำลองชิ้นงานสมมาตรรอบแกน 2 มิติ

รูปวงรี เพื่อกำหนดเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานดังตารางที่ 3

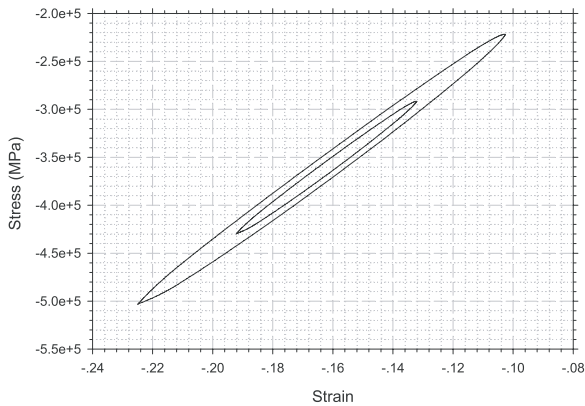
ตารางที่ 3 พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียรูป

แบบจำลอง	พลังงานความร้อน (J/m ³ .sec)
ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน ที่ 10Hz	18,562
ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน ที่ 30Hz	35,566
ยางธรรมชาติผสมซิลิกา ที่ 10Hz	4,620
ยางธรรมชาติผสมซิลิกา ที่ 30Hz	13,907

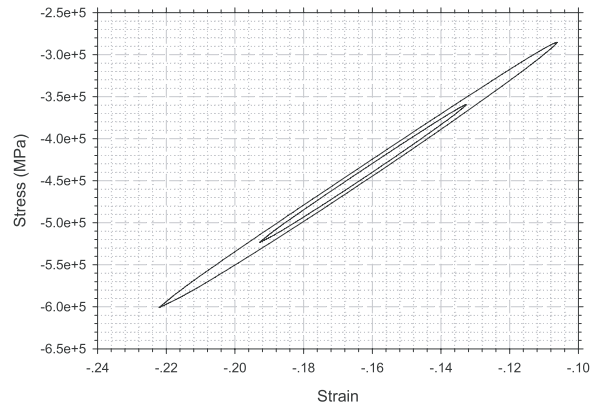
5.1 การเกิดความร้อนสะสม (Heat Build Up)

ผลจากการทดสอบและผลการจำลองจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางทั้ง 2 ชนิด ผลการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิช่วงระหว่าง 32-48.25 จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่งที่เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของยางที่มีลักษณะทรงกระบอกกลม

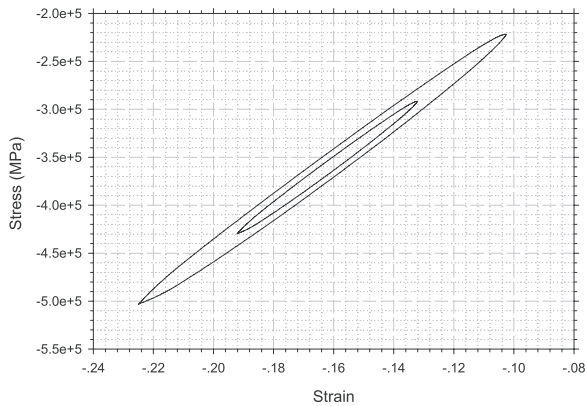
จากรูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงผลของอุณหภูมิจากการจำลองชิ้นยางโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัดผลตำแหน่งผิวด้านบน (จุดที่ 1) ตำแหน่งกึ่งกลาง (จุดที่ 2) และตำแหน่งผิวด้านข้าง (จุดที่ 3) ของแบบจำลองจากรูปที่ 6 เปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ [8]



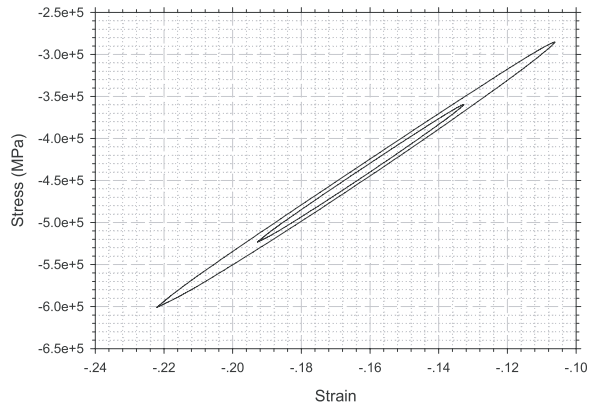
รูปที่ 8 วงรอบฮีสเทรีซิสของยางผสมผงคาร์บอนดำ ความถี่ 10 Hz ระยะชัก 1.02 มม. และ 2.04 มม.



รูปที่ 10 วงรอบฮีสเทรีซิสของยางผสมผงซิลิกา ความถี่ 10 Hz ระยะชัก 1.02 มม. และ 2.04 มม.



รูปที่ 9 วงรอบฮีสเทรีซิสของยางผสมผงคาร์บอนดำ ความถี่ 30 Hz ระยะชัก 1.02 มม. และ 2.04 มม.



รูปที่ 11 วงรอบฮีสเทรีซิสของยางผสมผงซิลิกา ความถี่ 30 Hz ระยะชัก 1.02 มม. และ 2.04 มม.

เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เฉพาะจุดที่ 1 และผลจากการทดสอบพบว่าผลที่ได้จากการจำลองยางมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ

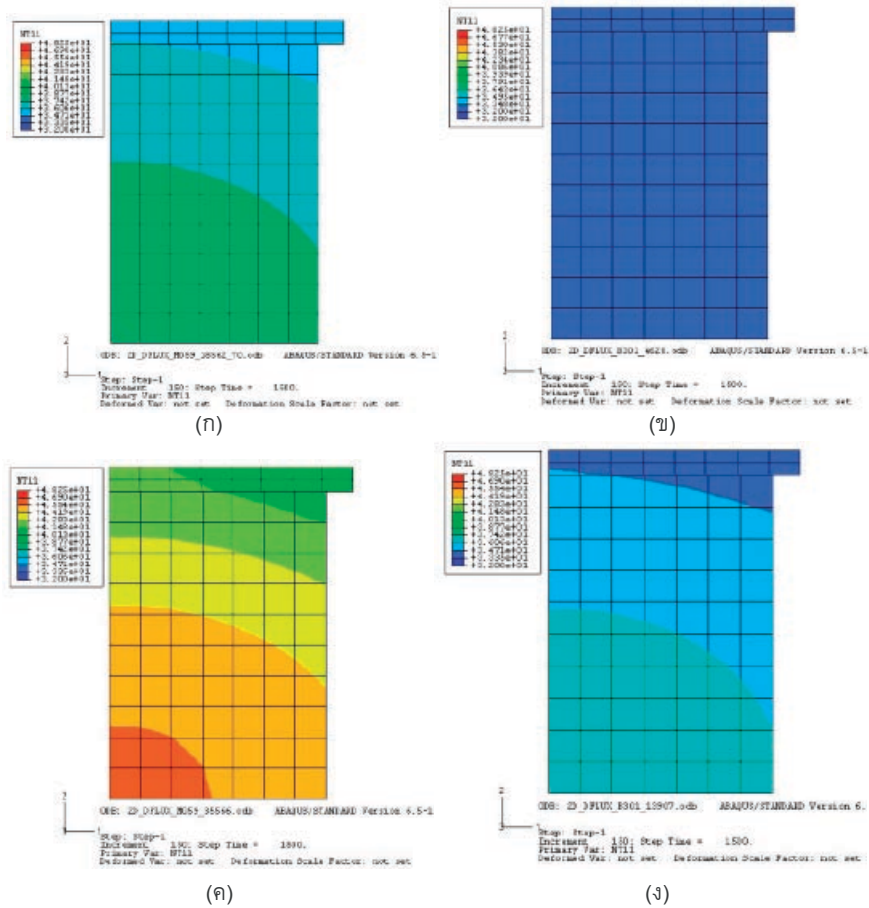
5.2 เปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบและผลจากการจำลองยางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อพิจารณาถึงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (% Error) ที่เกิดขึ้นระหว่างผลจากการทดสอบและผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พิจารณาได้จากสมการ (4) สรุปผลได้ตามตารางที่ 4

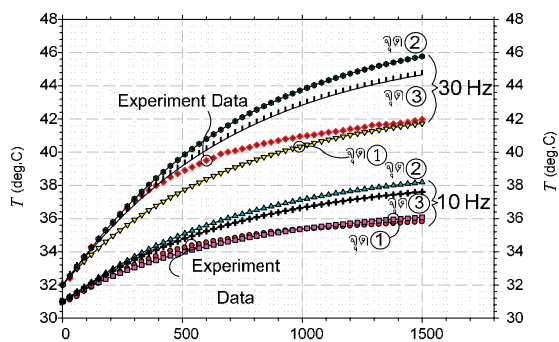
$$\% \text{ error} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{Experiment}_i - \text{Simulation}_i}{\text{Experiment}_i} \right| \times 100 \quad (4)$$

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเปรียบเทียบจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบจำนวน 51 ข้อมูล

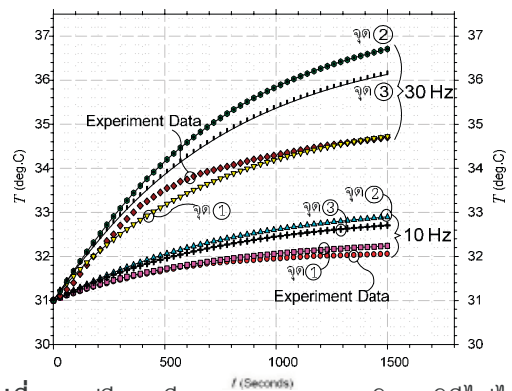
แบบจำลอง	ค่าความผิดพลาด
ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน ที่ 10Hz	0.7254 %
ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน ที่ 30Hz	3.0657 %
ยางธรรมชาติผสมซิลิกา ที่ 10Hz	0.8215 %
ยางธรรมชาติผสมซิลิกา ที่ 30Hz	0.9837 %



รูปที่ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิช่วงระหว่าง 32-48.25°C ที่ระยะชัก 1.02 มม. เป็นเวลา 1500 วินาที (ก) ยางผสมผงคาร์บอนดำความถี่ 10 Hz (ข) ยางผสมผงซิลิกาความถี่ 10 Hz (ค) ยางผสมผงคาร์บอนดำความถี่ 30 Hz (ง) ยางผสมผงซิลิกาความถี่ 30 Hz



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับเวลา ยางผสมผงคาร์บอนดำที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับเวลา ยางผสมผงซิลิกาที่ตำแหน่งต่างๆ

6. อภิปรายและสรุป

การจำลองวิเคราะห์ปัญหาการกระจายของความร้อน ผลจากการใช้วงรอบอีซเทียริสซิกจะใช้เวลาน้อยสุดแต่ให้ผลเฉลยได้ดีเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ปัญหา เป็นแบบ 3 มิติ การจำลองปัญหา 2 มิติ โดยเลือกใช้ Axisymmetric Element วิเคราะห์เป็นแบบ Fully Couple Temperature-Displacement [8]

เปรียบเทียบผลจากการทดสอบเครื่อง Goodrich Flexometer อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 31-35.5 °C และ 31-42 °C สำหรับยางผสมผงคาร์บอนดำความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ตามลำดับและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 31-32° C และ 31 – 34.5 °C สำหรับยางผสมผงซิลิกาความถี่ 10 Hz และ 30 Hz ตามลำดับ กับผลจากการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่า วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาทำนายการเกิดความร้อนสะสมในชิ้นส่วนยางได้น่าเชื่อถือ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงต้นที่ได้จากการทดสอบจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองเนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนที่ใช้นั้นได้กำหนดเป็นค่าคงที่ในความเป็นจริงค่าดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Harwood, “Thermo-Mechanical Analysis of Non-Pneumatic Rubber Tyres,” Master Thesis, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Australia, January 1999.

[2] D. M. Turner and M. Brennan, “The Multiaxial Behaviour of Rubber,” *Plastics and Rubber Processing and Applications*, vol.14, no. 3, pp. 183-188, 1990.

[3] Yeong-Jyh Lin and Sheng-Jye Hwang, “Temperature prediction of rolling tires by computer simulation,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 67, pp. 235-249, 2004.

[4] P. R. Willett, “Heat Generation in Tires due to the Viscoelastic Properties of Elastomeric Components,” *Rubber Chem Technol*, vol. 47, pp. 363, 1974.

[5] Dong Myung Park, Won Hi Hang, Sang Goo Kim, and Hwi Joong Kim, “Heat generation of Filled Rubber Vulcanizates and its Relationship with Vulcanizate Network Structures,” *European Polymer Journal*, vol. 36, pp. 2429-2436, 2000.

[6] Ladimir Kerchman and Cheng Shaw, *Experimental Study and Finite Element Simulation of Heat Buildup in Rubber Compounds With Application to Fracture*, The Goodyear Tire & Rubber Co., Akron, OH 44309

[7] J.D. Ferry, *Viscoelastic properties of polymers*, Third Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.

[8] Vladamir Kerchman and 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, 2003.

[9] สถาพร วังฉาย, ชาญยุทธ โกธิตะวงษ์ และ อริสรา ชัยกิตติรัตนนา “การทำนายผลการเกิดความร้อนสะสมในยางคงรูปที่รับแรงพลวัตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 18, ฉบับที่ 3, หน้า 49-61, กย-ธค. 2551.