

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบยางล้อ

Study of Temperature Distribution in Tires During Curing Process

จิรนุช เอื้ออารียังค์, วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์¹ และ ชัญญุทธ โกลิตะวงษ์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ ๙ 10800 โทร 02-913-2500 ต่อ 8305 โทรสาร 02-586-9541

E-mail: ¹wbln@kmutnb.ac.th

Jiranooch Auearrivong, Wiboon Lertwimolnun¹, Chanyut Kolutawong

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand Tel: 02-913-

2500 Ext. 8305 Fax: 02-586-9541

E-mail: ¹wbln@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบยางล้อของยางโดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เพื่อคำนวณหาอัตราและเปอร์เซ็นต์การอบของยางที่มีองค์ประกอบต่างกัน และจำลองกระบวนการอบของยางโดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของการนำความร้อนในแนวแกนทรงกระบอกแบบสามมิติและการทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านการนำความร้อนต่าง ๆ เช่น ค่าความหนาแน่น ρ , ค่าความจุความร้อน C_p , ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี $\dot{Q}$ เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อยางในกระบวนการอบของยาง โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และโปรแกรม (ABAQUS®) และทำการเปรียบเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางล้อที่วัดได้จริง จากนั้นสามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อ และสถานะที่เหมาะสมในการอบของยางล้อได้โดยใช้ข้อมูลของแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อ

คำหลัก: การอบของยางล้อ, ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน, การนำความร้อนของยาง

Abstract

This paper presents a method using kinetic model to calculate curing state/rate with different rubber components. The simulation process is used to predict a temperature distribution of a rubber tire when the heating rate and time are changed. A finite element program (ABAQUS®) is used to estimate the curing process. The results were compared with experiments. The properties (density ρ , heat capacity C_p and thermal conductivity k) are depended on temperature. The effect of vulcanization reaction of rubber can be measured by Differential Scanning Calorimetry (DSC). Then we can predict temperature distribution in tires, depended on position, time and type of rubbers.

Keywords: Curing of Rubber Tire, Vulcanization Reaction, Heat Conduction of Rubber Tire

1. บทนำ

ในกระบวนการอบยางล้อ ถ้ามีการให้ความร้อนและใช้เวลาที่ไม่เหมาะสมกับชนิด รูปร่างลักษณะ และส่วนผสมของยาง มักสร้างปัญหาให้ผลิตภัณฑ์ค่อนข้างมาก เนื่องจากผู้ที่มีหน้าที่รับผิดชอบในกระบวนการผลิตขาดความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของยางส่งผลให้บางครั้งยางไม่สุก สุกเป็นหย่อม ๆ ไม่สม่ำเสมอหรือบางครั้งก็เกิดการไหม้ได้ทำให้ยางเกิดเป็นของเสียและสิ้นเปลืองเวลาในการผลิตการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการอบยางล้อ จึงเป็นหนทางหนึ่งสำหรับการสร้างองค์ความรู้เพื่อใช้ในการกำหนดตัวแปรในกระบวนการอบยางล้อ

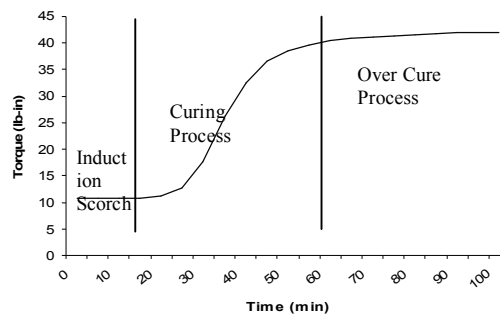
ในงานวิจัยนี้จะเริ่มต้น โดยทำการศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนของยาง จากนั้นจะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำการรวมแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาและใช้คุณสมบัติการนำความร้อนของยางเข้ากับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่เกิดปฏิกิริยา และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการอบยางที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้กรณีที่ยางมีคุณสมบัติและรูปร่างที่ต่างกัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการอบคงรูปยาง ในสภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

การศึกษากระบวนการอบคงรูปยางในสภาวะอุณหภูมิคงที่สามารถทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Oscillating Disc Rheometer (ODR) โดยมีหลักการคือ ยางตัวอย่างจะถูกวางบน Rotor และถูกอัดระหว่างแผ่นอัดที่ร้อนและมีแรงอัด โดยให้อุณหภูมิคงที่ จากนั้น Rotor ก็เคลื่อนที่หมุนไปกลับ (Oscillate) เล็กน้อยจากการขับเคลื่อนของมอเตอร์ เครื่องก็จะวัดแรงบิด (Torque) ของ Rotor ที่ใช้ในการ

หมุน รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ของแรงบิดที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค ODR



รูปที่ 1. แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดกับเวลาในการทดสอบ Oscillating Disc Rheometer (ODR)

พิจารณาในช่วงที่ยางเกิดปฏิกิริยา (Curing Process ตามรูปที่ 1) โดยเทคนิคนี้สามารถหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{M_t - M_0}{M_\alpha - M_0} \quad (1)$$

เมื่อ M_0 คือ Torque เริ่มต้น, M_t คือ Torque ที่เวลา t และ M_α คือ Torque สูงสุดเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (การอบคงรูปที่สมบูรณ์)

2.2 กระบวนการอบคงรูปยาง ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-Isothermal)

การศึกษากระบวนการอบคงรูปยางในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่สามารถทดสอบโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หาปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermal Reaction) การคำนวณหาอัตราการอบคงรูปยาง หรือ Curing rate นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2) [2]

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q_{\text{reaction}}}{Q_{\text{total}}} \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{reaction}$ คืออัตราการความร้อนที่คายออกมา
และ Q_{Total} คือปริมาณความร้อนรวม

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปอย่าง
อุณหภูมิและเวลาต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ
ที่ (3) ดังนี้

$$c = \frac{Q_{change}}{Q_{total}} \quad (3)$$

โดย Q_{change} คือปริมาณความร้อนที่ออกมาที่
เวลาต่าง ๆ c คือสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา

ในงานวิจัยนี้จะทำการทำนายพฤติกรรมกร
อบคงรูปอย่างภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ Non-
isothermal โดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของ
อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Kamal-Sourour ดังแสดง
ในสมการที่ (4) ดังนี้ [2],[3],[7]

$$\frac{dc}{dt} = (k_1 + k_2 c^m)(1-c)^n \quad (4)$$

เมื่อ m และ n คือ อันดับของปฏิกิริยา, C คือสัดส่วน
การเกิดปฏิกิริยา

ค่า k_1 และ k_2 หาได้จากสมการอาร์เรเนียส
ดังนี้

$$k_1 = a_1 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (5)$$

$$k_2 = a_2 \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad (6)$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือค่าคงที่ของอาร์เรเนียส (Arrhenius
overall constant), a_1 และ a_2 คือค่าคงที่จากการ
Fitting (Fitted rate coefficient), E คือ Activation
Energy และ R คือค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas
law constant)

จากสมการข้างต้นมีตัวแปรไม่ทราบค่า 6 ตัว
คือ m, n, a_1, E_1, a_2, E_2 โดย m, n, a_1, a_2, E_2 สามารถทำ
การประมาณค่าจากผลจาก DSC โดยการทำ
Numerical Fitting ผลการทดสอบ DSC ใน Power
Series โดย m, n, a_1, a_2 เป็นค่าขึ้นกับอุณหภูมิ และ

E_2 เป็นค่าคงที่ดังนี้

$$X_i = \alpha_{i0} + \alpha_{i1}T + \alpha_{i2}T^2 + O(T^3) \quad (7)$$

α_j เป็นค่าที่ได้จากการ Fitting

$$\begin{Bmatrix} m \\ n \\ a_1 \\ a_2 \\ E_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} \\ \alpha_{51} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{Bmatrix} + O(T^3) \quad (8)$$

E_2 สามารถหาได้โดย Kissinger Equation
ดังนี้

$$\frac{E\dot{T}}{RT_{peak}} = An(1-c)_{peak}^{n-1} e^{\frac{E}{RT_{peak}}} \quad (9)$$

$$\frac{d\left(\ln \frac{\dot{T}}{T_{peak}^2}\right)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{E}{R} \quad (10)$$

เมื่อ $\dot{T}$ คืออัตราการความร้อนและ T_{peak} คือ
อุณหภูมิที่จุดสูงสุด

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การนำความร้อนของ
ยาง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การนำความร้อนใน
แกนทรงกระบอกสามมิติในสภาวะการนำความร้อนไม่
คงที่และมีความร้อนจากปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k r \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (11)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของยาง, C_p คือค่า
ความจุความร้อน k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความ
ร้อน และ $\dot{Q}$ คือความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Heat
of reaction or Heat Generation)

หลักการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
(Thermal Conductivity)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ
ยางในงานวิจัยนี้สามารถทำได้โดยทำการสร้างการ
ทดสอบโดยอาศัยหลักการนำความร้อนของวัสดุแบบ

ไม่คงที่ขึ้นกับเวลา (Transient) ในแนวทงกระบอกแบบหนึ่งมิติ โดยการพิจารณาว่าขนาดเดียวกันต้องมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากัน ซึ่งในการทดสอบจะเป็นการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่ตำแหน่งและความหนาต่างกัน แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity) โดยมีสมมติฐานในการคำนวณดังนี้

1. เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Isotropic Material) และเป็นการนำความร้อนในแนวทงกระบอกหนึ่งมิติ
2. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity, D) คงที่ และขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)
3. ไม่คิดความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน (Convection and Radiation)

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ในหนึ่งมิติ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (13)$$

ขอบเขตเริ่มต้น

$$T(x, 0) = f(x) \quad (14)$$

เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity), T คืออุณหภูมิ, t คือเวลา, x และ L คือความหนาของยาง จากสมการที่ (12), (13) และ (14) สามารถหาสมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Exact Solution) ได้ดังนี้ [20,21]

$$T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{L} e^{-D \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 t} \quad (15)$$

$$\text{เมื่อ } A_0 = \frac{1}{L} \int_0^L T(x) dx \quad \text{และ } A_n = \frac{2}{L} \int_0^L T(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$$

เมื่อ $T(t)$ คือ อุณหภูมิที่เวลา t ใด ๆ และ $T(x)$ คืออุณหภูมิที่ระยะ x และเวลา t ใด ๆ

จากผลการทดสอบวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางนำมาทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ (15) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการ [20,21]

$$k = D * \rho * C_p \quad (16)$$

เมื่อ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), ρ คือค่าความหนาแน่น (Density) และ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T

3. การทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายางล้อโมเดล 12.00-24 / Logging ซึ่งจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิดคือดอกยาง T301 (Tread), แก้มยาง T354 (Side Wall) และชั้นผ้าใบ Ply

3.1 การทดสอบเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยาง (% Cure) จาก ODR (Oscillating Disc Rheometer)

การทดสอบโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometer) รุ่น MONSANTO 100S ในยางชนิด T301 และ T354 ที่อุณหภูมิคงที่ 135, 150 และ 165 °C โดยใช้ความถี่ 1.7 Hz. และมุมในการแกว่ง 1 องศา (ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-01) ซึ่งได้ค่า Torque ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

3.2 การทดสอบ Heat of Reaction จาก DSC (Differential Scanning Calorimetry)

การทดสอบดีเอสซี (Differential Scanning Calorimetry) รุ่น DSC RCS/MCA-2910 ในยางชนิด T301 และ T354 โดยใช้อัตราความร้อน 2, 5 และ 10 °C/min โดยผลการทดสอบเป็นค่าความร้อนจากปฏิกิริยา (Heat of Reaction) กับอุณหภูมิ

3.3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของยาง

การทดสอบคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของยาง โดยต้องมีการทดสอบดังนี้

3.3.1 ค่าความจุความร้อนของยางทดสอบโดยเครื่องดีเอสซี (Differential Scanning Calorimetry)

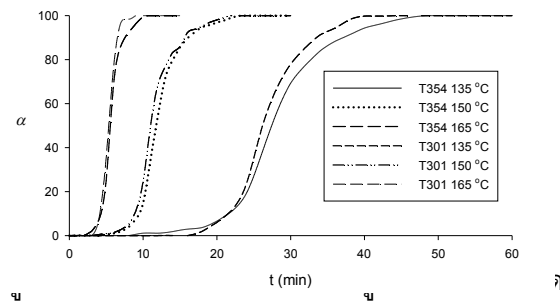
3.3.2 ค่าความหนาแน่นของยาง

3.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางทดสอบโดยการทดสอบหาอัตราการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางแล้วนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสมการ (15) จากนั้นก็นำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังสมการ (16)

4 ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบโอติอาร์ ในสภาวะอุณหภูมิคงที่

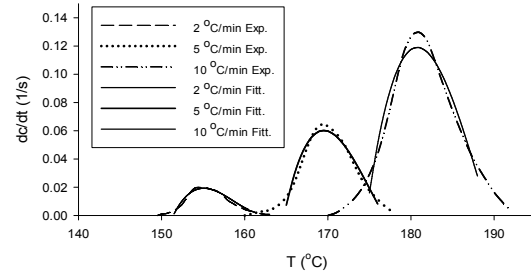
การทดสอบโอติอาร์ในสภาวะอุณหภูมิคงที่ในยางชนิด T301 และ T354 พบว่ายางทั้งสองชนิดนี้ก็มีเปอร์เซ็นต์การบวมรูปใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2 ดังนี้



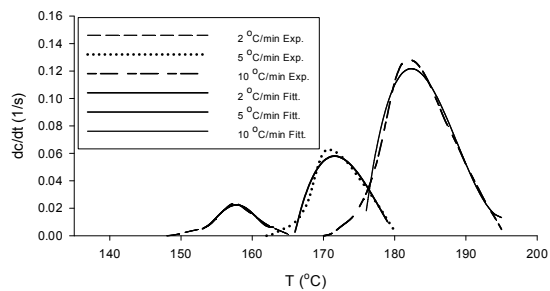
รูปที่ 2 Tread และ Inner Liner ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับเวลา

4.2 ผลการทดสอบดีเอสซี ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

ผลการทดสอบดีเอสซีจะสามารถหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของยางเพื่อนำไปหาอัตราการบวมรูปจากสมการที่ 2 และจากการทำ Numerical Fitting ได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ดังนี้

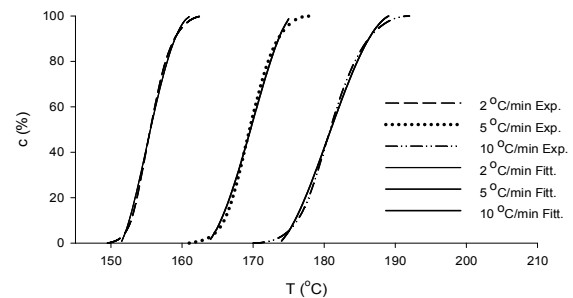


รูปที่ 3 แสดงอัตราการบวมรูป dc/dt ยางชนิด T301 จากการทดสอบและการทำ Numerical Fitting

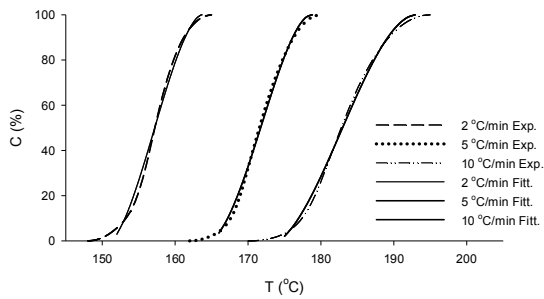


รูปที่ 4 แสดงอัตราการบวมรูป dc/dt ยางชนิด T354 จากการทดสอบและการทำ Numerical Fitting

นอกจากนี้การทดสอบดีเอสซียังสามารถหาเปอร์เซ็นต์การบวมรูปยางได้จากสมการที่ 3 และจากการทำ Numerical Fitting ได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ดังนี้



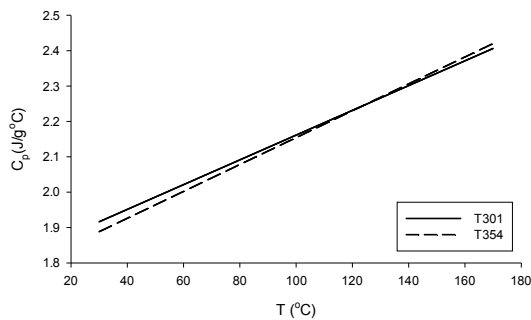
รูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมรูป c ยางชนิด T301 จากการทดสอบและการทำ Numerical Fitting



รูปที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การอบคงรูป c ของชนิด T354 จากการทดสอบและการทำ Numerical Fitting

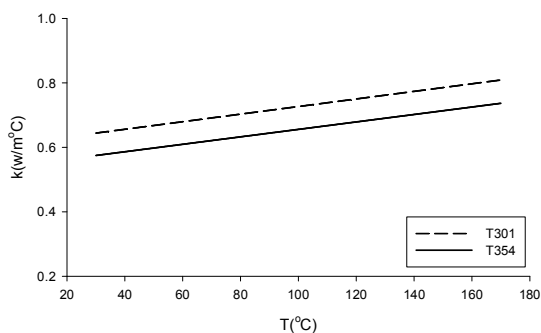
4.3 ผลการทดสอบค่าคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของยาง

ค่าความจุความร้อนของยางสามารถหาได้โดยเครื่องดีเอสซี



รูปที่ 7 แสดงค่าความจุของยาง

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางโดยการคำนวณจากการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ



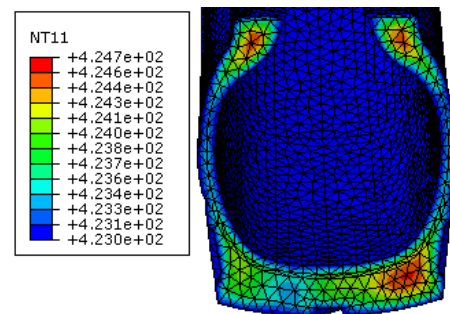
รูปที่ 8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยาง

สำหรับค่าความจุความร้อนของชั้นผ้าใบ กำหนดให้มีค่า 2.0067 จูลต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ค่าการนำความร้อนของชั้นผ้าใบกำหนดให้มีค่า 0.671 วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส และความหนาแน่นของชั้นผ้าใบมีค่า 1115 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [17]

ความหนาแน่น (Density) ของยางทั้งชนิด T301 และ T354 มีค่า 1120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและค่าความร้อนจากปฏิกิริยาจากการทดสอบดีเอสซีมีค่า 6160 วัตต์ต่อตารางเมตร

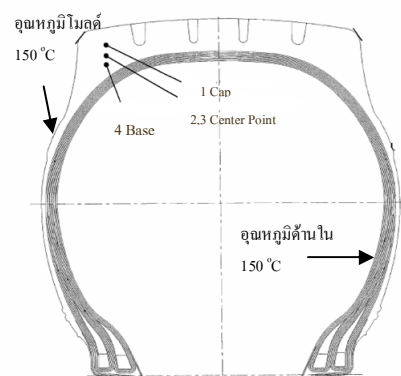
4.4 ผลการวัดค่าและการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อ

การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อโมเดล 12.00-24 / Logging แสดงได้ดังนี้



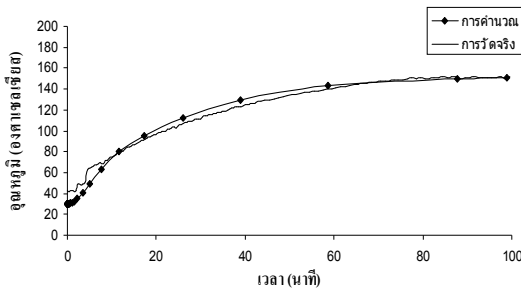
รูปที่ 9 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อที่เวลา 99 นาที

การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 10 แสดงตำแหน่งของการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อ

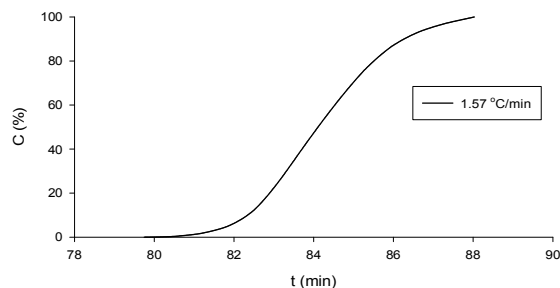
การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองที่ตำแหน่งเดียวกัน (ตำแหน่งที่4) โดยพบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันดังนี้



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการวัดจริงและจากการจำลอง

4.5 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางล้อ

ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อพิจารณาตำแหน่งที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิซ้ำที่สุด (เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุด) รูปที่ 10 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยเฉลี่ย 1.57 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยการหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปของยางที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.2 แล้วนำมาทำการประมาณค่าในช่วงและนอกช่วงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางล้อที่ตำแหน่งที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1.57 องศาเซลเซียสต่อนาทีได้ดังนี้



รูปที่ 11 แสดงผลจากการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางจุดที่หนาที่สุดของยางล้อ

จากการประมาณค่ารูปที่ 11 พบว่ายางล้อจะมีเปอร์เซ็นต์การอบคงรูป 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลาที่ 88.73 นาที

5 สรุป

การวิเคราะห์หาอัตราและเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปของยางสามารถทำได้โดยการทดสอบโอดีอาร์ Oscillating Disc Rheometer (ODR) ในสภาวะอุณหภูมิคงที่และการทดสอบดีเอสซี Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

จากการทดสอบวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อและจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การนำความร้อนพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่าง ๆ และการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายเวลาที่ใช้ในการอบคงรูปยางล้อได้จากการพิจารณาที่ตำแหน่งที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิซ้ำที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) สัญญาหมายเลข RDG5250070 และบริษัทดีเอสโตนจำกัดที่เอื้อเฟื้ออำนวยความสะดวกที่ใช้ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

1. ชัยวุฒิ เกาพัฒนา. วิศวกรรมยานยนต์. สำนักพิมพ์พิทักษ์อักษร : กรุงเทพฯ, 2531.
2. ทะนงศักดิ์ วัฒนา. วิศวกรรมยานยนต์ : ยางรถยนต์. [ออนไลน์] 10 เมษายน 2550 [สืบค้นข้อมูลวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2553] จาก <http://www.bridgestone.co.th>
3. เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการพัฒนาทางไทย. กระบวนการผลิตยาง. [ออนไลน์] 2551. จาก <http://rubber.sc.mahidol.ac.th>

4. เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการพัฒนาทางไทย. กระบวนการผลิตยาง. [ออนไลน์] 2551. จาก <http://rubber.sc.mahidol.ac.th>
5. พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ : (เอ็มเทค), 2547.
6. พลชิต บัวแก้ว. ยางสังเคราะห์ หลักสูตรเทคโนโลยียางสำหรับพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและอุตสาหกรรมยางล้อ. ฝ่ายพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีศูนย์วิจัยยาง : สงขลา, 2536.
7. เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการพัฒนาทางไทย. ยางสังเคราะห์. [ออนไลน์] 2551. จาก <http://rubber.sc.mahidol.ac.th>
8. Camacho Enrique , Juan Hernandez-ortiz P. and Osswald Tim A. *Characterization and Modeling of the Curing Process of Silicone rubber*. University of Wisconsin : USA.
9. ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. หลักเคมี. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2541.
10. Hill D.A. *Heat Transfer and Vulcanization of Rubber*. Elsevier Publishing Co.Ltd : New York, 1971.
11. Isayev A.I. and Sujun Brijesh. *Nonisothermal Vulcanization of Devulcanized GRT with Reversion Type Behavior*. The university of Akron : USA.
12. Ghoreishy M.H.R. and Naderi G. *Three-dimensional Finite element Modeling of Rubber Curing Process*. Iran Polymer and Petrochemical Institute : Iran, 2005.
13. Hamid Mir, Ghoreishy Reza and Naderi Ghasem. *Three Dimensional Finite Element Modelling of Truck Tyre Curing Process in mold*. Petrochemical Institute : Iran.
14. JUMA M. and BAFRNAC M. *Experimental Determination of rubber Curing Reaction Heat Using Transient Heat Conduction Equation*. Slovak University of Technology : Slovak, 2003.
15. รัชดา โสภาคะยัง และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
16. Labban A.El, Mousseau P and Bailleul J.L. *Numerical natural rubber curing simulation obtaining a controlled gradient of the state of cure in a thick-section part*. University de Nantes : France.
17. Tong Jian and Yan Xiangqiao. *Finite Element Analysis of Tire Curing Process*. Harbin Institute of Technology Harbin : China.
18. Bhadeshia.H.K.D.H . *Differential Scanning Calorimetry Introduction*. Material Science and Metallurgy University of Cambridge.
19. Saxena N.S, Pradeep P and Mathew G. *Thermal Conductivity of Styrene Butadiene Rubber Compound with Natural Rubber Prophylactics Waste a Filler*. European Polymer Journal : September, 1998.
20. Zhang X, Hendro W, and Fujii M. *Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Polymer Melts with the Short-Hot-Wire Method*. International Journal of Thermophysics, 2002.
21. ทศนัย บุญเกิดรัตนกุล. การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุด้วยหัววัดแบบขดลวดร้อน. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี : กรุงเทพฯ, 2548.
22. Iwasa M., Ando K. and Hasumura S. *Measurement of epoxy resin thermal curing by the environment controllable SPM*. STM'5/ICSPM13 Sapporo : Japan, 2005.

