

การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป Evolution of Temperature Distribution in Rubber during Vulcanization

รัชดา โสภาคะยัง¹ อุดมเกียรติ นนทแก้ว²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถ.สถลมารค์ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

โทร 045-288400-3 ต่อ 3815 โทรสาร 045-288378 E-mail: ratchada.s@ubu.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-29132500 ต่อ 8320 โทรสาร 0-25870026 กด 111 E-mail: unk@kmitnb.ac.th

Ratchada Sopakayang¹ and Udomkiat Nontakaew²

¹Department of Mechanical Engineering, UbonRatchathani University

85 Sathollmark Rd, Warinchamrap UbonRatchathani 34190 Thailand Tel: 045-288400-3 Ext. 3815 Fax: 045-288378

²Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand Tel: 0-29132500 Ext. 8303 Fax: 0-25870026 press 111

บทคัดย่อ

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนของยางผสมมีความสำคัญยิ่งในการผลิตล้อยางตัน เนื่องจากยางผสมมีสมบัติฉนวนเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับการคงรูป สมบัติทางความร้อนของยางแปรปรวนอย่างมากระหว่างกระบวนการอบคงรูปในเบ้าพิมพ์ เนื่องจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโซโมเลกุล ซึ่งมีการคายความร้อนออกมาในช่วงเวลาจำกัดช่วงหนึ่ง การศึกษาในครั้งนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาการจำลองการอบคงรูปล้อยางตัน เริ่มต้นด้วยการทำนายค่าสมบัติการนำความร้อนของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆด้วยการทดลองเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับข้อมูลจากการทดลองอบยางจริง จากนั้นนำค่าสมบัตินำความร้อนที่ได้ มาคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในล้อยางตัน แล้วนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณหาระดับการสุกตัวของยางด้วย ที่ซี-ชาร์ต และเปรียบเทียบผลการจำลองกับวิธีทดสอบการบวมพอง ซึ่งพบว่าผลการคำนวณการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีคุณลักษณะสอดคล้องกับที่วัดได้จากการอบยางจริง

Abstract

Heat transfer information of rubber compound is very important for solid tire manufacturing. Since the insulating property increases with curing level, the thermal properties of compound vary greatly during vulcanization because of cross-linking reaction which releases some amount of heat in a limited period of time. This study is aimed at simulating the curing of

solid tire. The study begins with predicting thermal conductivity of rubber compound based on numerical experiment using FEM and test data. Then, the temperature distribution of solid tire were calculated. The curing level was determined by using the Time Temperature Conversion Chart (TTC-chart) and compared with the swelling test. It was found that the temperature evolution characteristic of both results agreed well.

1. บทนำ

การออกแบบล้อยางตันและเบ้าพิมพ์ต้องการความเข้าใจอย่างถ่องแท้ต่อการถ่ายโอนความร้อนภายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูปภายในเบ้าพิมพ์ ความสามารถในการจำลองคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงการกระจายอุณหภูมิในเนื้อยางให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงจะช่วยให้เราสามารถกำหนดเงื่อนไขการอบคงรูปได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ล้อยางตัน

ขั้นตอนของกระบวนการอบคงรูปยาง มักสร้างปัญหาแฝงเร้นให้กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างมาก เนื่องจากผู้มีส่วนที่รับผิดชอบกระบวนการผลิตขาดความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับการแพร่ความร้อนจากผนังเบ้าพิมพ์เข้าไปในเนื้อยาง ส่งผลให้บางครั้งยางไม่สุกหรือสุกมากเกินไปจนไหม้ หรือสุกเป็นหย่อมไม่สม่ำเสมอ ยางชั้นรอบนอกไหม้ ชั้นกลางสุก ข้างในไม่สุก เป็นต้น ยิ่งยางตันมีขนาดใหญ่จะยิ่งยากต่อการควบคุมเป็นทวีคูณ เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้การแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้พิจารณาศึกษาหาแนวทางวิจัยเพื่อสร้างความเข้าใจ

เกี่ยวกับการแพร่ความร้อนภายในเนื้อเยื่อและการประมาณระดับการสูญเสียของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้การผลิตตัวอย่างต้นเป็นกรณีศึกษา

อุปสรรคที่สำคัญที่สุดของการจำลองการอบคงรูปยางด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์คือความถูกต้องของค่าสมบัติทางความร้อนของยาง และลักษณะการผันแปรตามอุณหภูมิ (หรือตามระดับการคงรูป) เนื่องจากวัตถุดิบยางผสมโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนผสม (%โดยประมาณ) ดังเช่น ยางธรรมชาติ (40%) ยางสังเคราะห์ (16%) ผงถ่าน (30-40%) กำมะถัน (1.5%) น้ำมันอะโรมาติก (1.5%) และสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ยางผสมโดยหน้าที่ของมันต้องมีสมบัติไม่เสถียร มีการผันแปรระหว่างกระบวนการ ขณะเปลี่ยนจากยางผสมไปเป็นยางคงรูป การวัดสมบัติการแพร่ความร้อนที่ถูกต้องแม่นยำทำได้ค่อนข้างยาก ในขั้นต้นนี้เราจึงเน้นไปที่การวัดและวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสมบัติการนำความร้อนให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง มากกว่าความถูกต้องของค่าต่างๆ

งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้น คาดว่าเมื่อพัฒนาองค์ความรู้กลไกการแพร่ความร้อนและการวัดหาสมบัติทางความร้อนของยางได้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นในอนาคต เราจะสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิของผนังเบ้าพิมพ์ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นยาง และกำหนดเวลาการอบคงรูปยางที่เหมาะสม รวมทั้งลักษณะการให้ความร้อนที่ควรจะเป็น เช่น ให้อุณหภูมิผนังคงที่ตลอดวัฏจักร (Cycle) หรือให้เป็นจังหวะ (Pulse) หรือค่อย ๆ ลดอุณหภูมิผนังเบ้าพิมพ์ลง เป็นต้น

2. กระบวนการถ่ายโอนความร้อนในเนื้อเยื่อ

2.1 สมการการนำความร้อน

สมการอนุพันธ์บังคับกระบวนการนำความร้อนในของแข็งชนิดที่มีสมบัติทางความร้อนเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic solid) และมีค่าผันแปรตามอุณหภูมิ รวมทั้งมีปรากฏการณ์การคายหรือดูดซับความร้อนระหว่างกระบวนการ มีรูปสมการดังนี้ [1]

$$\frac{\rho}{k_0} \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 \Theta + \frac{Q}{k_0} \quad (1)$$

เมื่อวัสดุมีความหนาแน่น ρ และมี θ เป็นอุณหภูมิชั่วขณะของวัสดุ $k = k(\theta, t)$ เป็นค่าการนำความร้อนของวัสดุ เรานิยามพารามิเตอร์

$$\Theta = \frac{1}{k_0} \int_0^\theta k d\theta \quad \text{ด้วยค่าคงที่อ้างอิง } k_0 = k(0, t) \text{ ซึ่งเป็นค่า } k \text{ ที่}$$

$\theta = 0$ และในที่นี้ให้เป็นขอบเขตล่างของอินทิเกรต ส่งผลให้ Θ มีหน่วยเป็นอุณหภูมิ $U = c\Theta$ เป็นค่าความจุพลังงานต่อหน่วยมวล (เป็นค่าอ้างอิงวัดเทียบกับอุณหภูมิศูนย์ใด ๆ) c เป็นสัมประสิทธิ์ความจุความร้อน $Q = Q(x, y, z, t)$ เป็นอัตราการดูดซับหรือคายความร้อนต่อหน่วยปริมาตรภายในเนื้อวัสดุ

2.2 การจำลองการถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างกระบวนการอบคงรูปของยางผสมในเบ้าพิมพ์ เป็นกระบวนการแพร่ความร้อนที่มีความซับซ้อนมากที่สุด

เนื่องจากค่าสมบัติทางความร้อนของยางผสมผันแปรตามอุณหภูมิ และเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโซโมเลกุลเป็นลำดับต่อเนื่องเป็นลูกโซ่จากบริเวณผนังเบ้าพิมพ์ไปในทิศทางที่อุณหภูมิต่ำกว่า (ใจกลางของชิ้นงาน) เมื่อปฏิกิริยาจบลงยางบริเวณนั้นจะคงรูป มีสมบัติเป็นฉนวนมากขึ้น ข้อเท็จจริงก็คือความร้อนจากเบ้าพิมพ์ต้องไหลผ่านยางที่มีสมบัติฉนวนไปยังบริเวณที่กำลังเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโซโมเลกุล จึงเป็นการยากมากที่เราจะใช้สมการ (1) โดยตรงมาคำนวณเชิงตัวเลขเลยโดยไม่ผ่านการตั้งสมมุติฐานเพื่อทำให้ง่ายขึ้น (Simplification)

สมการ (1) มีธรรมชาติไม่เชิงเส้น และค่าการนำความร้อนอ้างอิง k_0 ไม่อาจหาค่ามาได้โดยวิธีง่าย ๆ เนื่องด้วยการศึกษาครั้งนี้ทำขึ้นเพื่อสำรวจแนวคิดและเป็นความพยายามทำความเข้าใจคุณลักษณะของกระบวนการนำความร้อนในยางมากกว่าที่จะคำนวณหาค่าแม่นยำของอุณหภูมิในยาง จึงทำปัญหาให้ง่ายขึ้นโดยใช้อุณหภูมิ θ แทนลงในตำแหน่งของพารามิเตอร์ Θ และให้เทอมการผลิตความร้อนมีค่าคงที่ ฉะนั้นสมการประมาณของ (1) คือ

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla \theta) + Q_s, \quad (x, y, z) \in V, t > 0 \quad (2)$$

สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

$$\theta(x, y, z, t)|_{(x, y, z) \in S} = \theta_s = 155^\circ C, \quad (3)$$

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0 = 32^\circ C \quad (4)$$

ใช้วิธีกัลเลอร์คินแปลงสมการอนุพันธ์ (2) เป็นสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iiint_V \nabla \cdot (-k \nabla \theta) dV + \iiint_V Q_s dV \quad (5)$$

เลือกใช้เอลิเมนต์ 3 มิติทรงสี่เหลี่ยม และจัดสมการพีชคณิตให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$[C] \{\dot{\theta}\} + [K] \{\theta\} = \{Q_s\} \quad (6)$$

โดยที่

$$[C] = \iiint_{V_e} \rho c \{N\} \{N\}^T dV, \quad (7)$$

$$[K] = \iiint_{V_e} [B]^T [k] [B] dV, \quad (8)$$

และ

$$\{Q\} = \iiint_{V_e} Q_s \{N\} dV \quad (9)$$

เนื่องจากเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบไม่เชิงเส้นในสภาวะชั่วขณะ ดังนั้นรูปทั่วไปสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เขียนได้เป็น

$$[C(\theta)] \{\dot{\theta}(t)\} + [K(\theta)] \{\theta(t)\} = \{Q(\theta, t)\} \quad (10)$$

คำนวณค่าอนุพันธ์เทียบเวลาของสมการที่ (10) ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง $\dot{\theta}(t + \Delta t) = (\theta_{t+\Delta t} - \theta_t) / \Delta t = \Delta \theta / \Delta t$ นำไปแทนในสมการ (10) คำนวณค่าอุณหภูมิที่เวลา $t + \Delta t$ ได้ผลเป็น

$$\frac{1}{\Delta t} [C] \{\theta_{t+\Delta t} - \theta_t\} + [K] \{\theta_{t+\Delta t}\} - \{Q(\theta_{t+\Delta t})\} = 0 \quad (11)$$

สมการที่ (11) แทนระบบสมการพีชคณิตไม่เชิงเส้นสำหรับ $\theta_{t+\Delta t}$ ซึ่งสามารถใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน [2] หาผลเฉลย จาก (10) นิยาม

$$R(\theta) = \{Q(\theta)\} - [C(\theta)]\{\dot{\theta}(t)\} - [K(\theta)]\{\theta(t)\} \quad (12)$$

กำหนดให้ θ^m, θ^{m+1} เป็นผลเฉลยจากการคำนวณซ้ำครั้งที่ m และ $m+1$ ตามลำดับ และ $\Delta\theta^{m+1} = \theta^{m+1} - \theta^m$ ฉะนั้น

$$\begin{aligned} \{R(\theta^{m+1})\} &= \{R(\theta^m + \Delta\theta^{m+1})\} = \{R(\theta^m)\} \\ &+ \left[\frac{\partial R}{\partial \theta} \right]_{\theta^m} \{\Delta\theta^{m+1}\} = 0 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\left[\frac{\partial R}{\partial \theta} \right]_{\theta^m} \{\Delta\theta^{m+1}\} = -\{R(\theta^m)\} \quad (13)$$

สำหรับเมตริก $\partial R / \partial \theta$ ได้มาจากการคำนวณอนุพันธ์สมการ (12)

$$\frac{\partial R}{\partial \theta} \bigg|_{\theta^m} = \frac{\partial Q}{\partial \theta} - \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial C}{\partial \theta} \bigg|_{\theta^m} \Delta\theta^m - \frac{\partial K}{\partial \theta} \bigg|_{\theta^m} \theta^m \quad (14)$$

$$\{R(\theta^m)\} = \{Q(\theta^m)\} - \frac{1}{\Delta t} [C(\theta^m)]\{\Delta\theta^m\} - [K(\theta^m)]\{\theta^m\} \quad (15)$$

โดยสมการปรับผลลัพธ์ของอุณหภูมิคือ

$$\{\theta_{t+\Delta t}^{m+1}\} = \{\theta_{t+\Delta t}^m\} + \{\Delta\theta^{m+1}\} \quad (16)$$

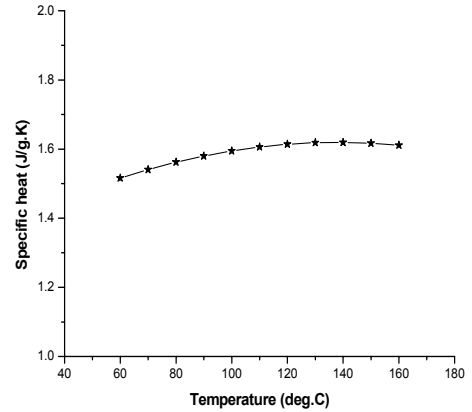
สำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมออบาคัส (Abaqus) ในการคำนวณ เมื่ออุณหภูมิของเบ้าพิมพ์มีค่าคงที่ตลอดการอบยางที่ 155 °C และที่ภาวะเริ่มต้นอย่างตันมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อยางที่ 32 °C สำหรับระยะเวลาในการอบยางที่ทำให้ยางสุกทั่วทั้งเนื้อยางและนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ได้คือเวลา 3.5 ชั่วโมง โดยยางมีความสูงของพื้นที่หน้าตัด 18.3 cm กว้าง 18.5 cm รัศมีภายในของล้อยางคือ 22 cm

เอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์คือเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าใน 3 มิติ (Tetrahedral element) โดยแบ่งเอลิเมนต์เป็น 9231 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดต่อ (Node) 2389 จุด โดยคำนวณเฉพาะส่วนที่สมมาตรกันใน 3 มิติของล้อยางตัน

2.3 การทดสอบหาค่าสมบัติการแพร่ความร้อนของยางผสม

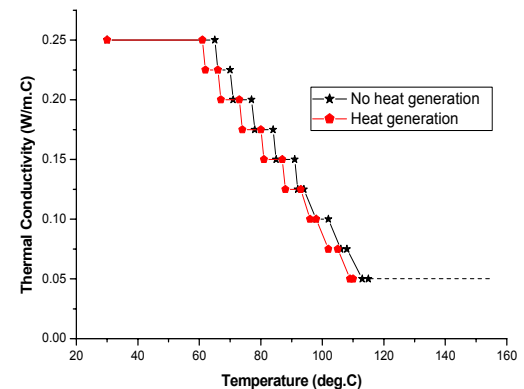
สร้างชุดทดลองการให้ความร้อนแก่ยางเพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยาง และทำการทดลองเชิงตัวเลข (Numerical experiment) กรณีเดียวกันนี้ไปพร้อมๆกัน ใช้ค่าสมบัติทางความร้อนของยางผสมที่ได้จากการทดสอบ เช่นค่าความหนาแน่น (1,120 kg/m³) [3] และค่าความจุความร้อนจำเพาะทดสอบโดยเครื่อง *Differential Scanning Calorimeter* ซึ่งผันแปรตามอุณหภูมิ (แสดงในรูปที่1) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าการนำความร้อนของยางที่อุณหภูมิต่างๆ

โดยแบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณีคือ ไม่คิดค่าความร้อนที่ผลิตขึ้น และกรณีที่คิดค่าความร้อนที่ผลิตขึ้น



รูปที่ 1 ค่าความจุความร้อนจำเพาะแปรผันกับอุณหภูมิ

แนวคิดหลักคือวัดอุณหภูมิในเนื้อยางที่เวลาต่างๆ ทำการจำลองเปรียบเทียบกับให้เวลาการนำความร้อนเท่ากันกับการทดลอง ปรับค่าการนำความร้อนจนอุณหภูมิจากการคำนวณเท่ากับที่วัดได้จริงแล้วบันทึกค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิไว้ ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนยางสุก ได้ผลค่าการนำความร้อนผันแปรตามอุณหภูมิตั้งแสดงในรูปที่2



รูปที่ 2 ค่าการนำความร้อนของยางที่วิเคราะห์การทดลองผสมกับการทดลองเชิงตัวเลข

ลักษณะการผันแปรของค่าการนำความร้อนของยางกับอุณหภูมิขณะอบคงรูปมีลักษณะดังนี้คือ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 60 °C ยางจะมีค่าการนำความร้อนอย่างคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิของยางเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 60 – 110 °C จะพบปรากฏการณ์ไม่ปกติ (singular) ของค่าการนำความร้อนของยางจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิในช่วงนี้โครงสร้างโมเลกุลยางผสมไม่เสถียรมากที่สุด โซโมเลกุลของยางจึงเริ่มมีการบิดตัวและเคลื่อนไหวย่างรุนแรงเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเกิดการเชื่อมโยง (Cross-linking) ทัศนวิสัยกลศาสตร์ค่อนข้างคมกว่าการนำความร้อนในเนื้อยางกระทำผ่านโฟนอน (Phonon) ส่งถ่ายพลังงานไปตามโซโมเลกุล ดังนั้นลักษณะการจัดเรียงตัวของโฟนอนจึงมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการนำความร้อน เมื่อโฟนอนที่เคยจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบไปตามโซโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงและปั่นป่วน ไม่เป็นระเบียบทำให้การ

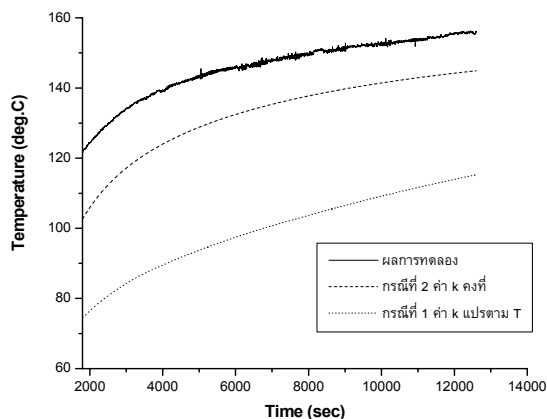
นำความร้อนผ่านโฟนอนเกิดการกระเจิงมาก ส่งผลให้ความสามารถในการนำความร้อนลดลง

ช่วงอุณหภูมิประมาณ 120 – 150 °C เป็นช่วงที่โซโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง เนื่องจากการแตกตัวของสารคงรูปบางชนิดที่อยู่ในยางผสม มีการเปลี่ยนแปลงภายใน โซโมเลกุลที่โซวกันเกิดการจับยึดเป็นร่างแห ส่งผลให้ยางแข็งแรงขึ้น แต่ความยืดหยุ่นน้อยลง

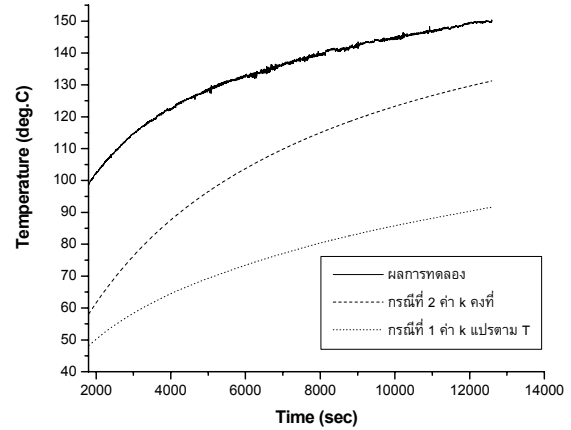
2.4 ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางตัน

ใช้สมบัติต่างๆของยางที่ทดสอบได้มาคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางตันขณะอบคงรูปเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองอย่างจริงในแม่พิมพ์ เนื่องจากการวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงความผันแปรของค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจึงสมมติให้เป็นค่าคงที่ ค่าที่ใช้ได้จากการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเปลี่ยนค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองไปเรื่อยๆ จนได้ค่าเหมาะสม คือให้ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทำให้ยางสุกจนทั่วเมื่ออบยางครบ 3.5 ชั่วโมง ซึ่งค่าเหมาะสมของปริมาณความร้อนที่คายออกคือ 6000 W/m³ แบ่งเงื่อนไขการคำนวณออกเป็น 4 กรณีประกอบด้วย

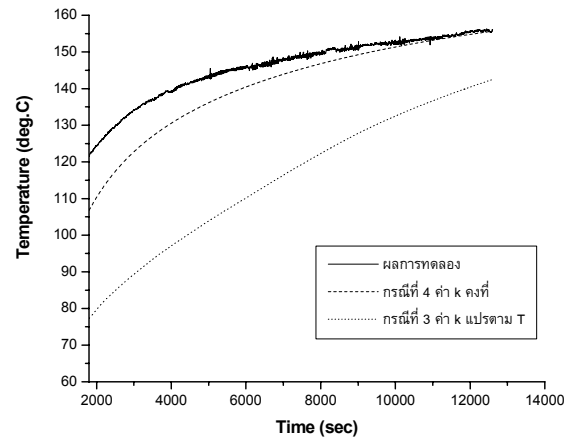
- (1) ไม่คิดค่าคายความร้อนที่ผลิตขึ้น (No heat generation) และค่าการนำความร้อนของยางผันแปรกับอุณหภูมิ (k(T))
- (2) ไม่คิดค่าความร้อนที่คายออก (No heat generation) และค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็น 0.25 W/m.°C (k=0.25 W/m.°C)
- (3) ค่าความร้อนที่คายออกมีค่าเป็น 6000 W/m³ (Heat generation = 6000 W/m³) และค่าการนำความร้อนของยางผันแปรกับอุณหภูมิ (k(T))
- (4) ค่าความร้อนคายออกมีค่าเป็น 6000 W/m³ (Heat generation = 6000 W/m³) และค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็น 0.25 W/m.°C (k=0.25 W/m.°C)



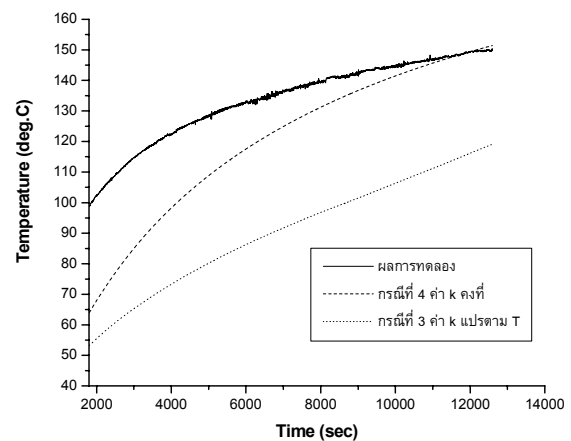
รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณกรณี (1) และ (2) ณ ตำแหน่งความลึกจากผิวล้อยาง 2 cm



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณกรณี (1) และ (2) ณ ตำแหน่งความลึกจากผิวล้อยาง 4 cm



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณกรณี (3) และ (4) ณ ตำแหน่งความลึกจากผิวล้อยาง 2 cm



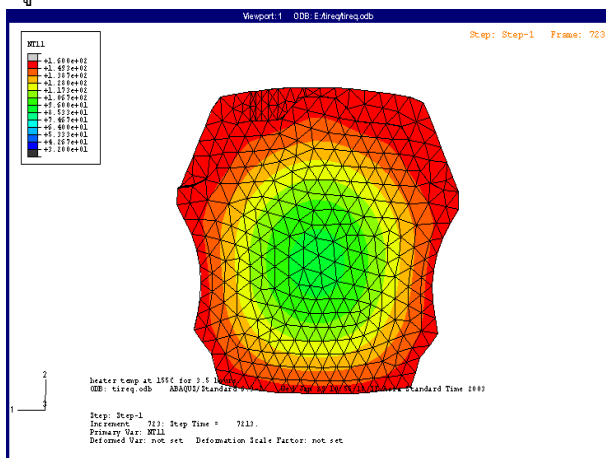
รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณกรณี (3) และ (4) ณ ตำแหน่งความลึกจากผิวล้อยาง 4 cm

สำหรับการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางตันขณะอบคงรูปในแม่พิมพ์แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดได้

จริง ณ ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 3 และ 4 พบว่าผลคำนวณที่สมมุติให้ค่าการนำความร้อนของยางคงที่ ให้ค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่ากรณีคำนวณโดยให้ค่าการนำความร้อนผันแปรตามอุณหภูมิ แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพบว่าผลการคำนวณโดยใช้ค่าการนำความร้อนที่ผันแปรกับอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดลองมากกว่า จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองเข้าไปในสมการการคำนวณแล้ว ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองยังคงให้ผลเช่นเดียวกับกรณีไม่คิดค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองในการคำนวณ แต่อุณหภูมิที่คำนวณได้จะมีค่าสูงขึ้นและเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่าเช่นกัน

ดังนั้นจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าสมบัติของยางที่ทำให้การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ ให้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริงในธรรมชาติมากที่สุดคือเมื่อคำนวณโดยให้ค่าการนำความร้อนของยางผันแปรกับอุณหภูมิและพิจารณาค่าความร้อนที่คายออกด้วย

แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะ 4 กรณีที่ทำหาคำนวณในงานวิจัยนี้พบว่ากรณีที่ให้ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ส่งผลให้ยางสุกทั่วทั้งเนื้อยางเมื่ออบยางครบ 3.5 ชั่วโมง (วิเคราะห์โดยใช้ที่ชีชาร์ต) คือกรณีที่ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็น $0.25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ และ ค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองมีค่าเป็น 6000 W/m^3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในทางอุตสาหกรรมแล้วสามารถประมาณให้ค่าการนำความร้อนของยางระหว่างกระบวนการอบคงรูปที่ค่าคงที่ที่อุณหภูมิห้องได้และค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองควรมีค่าประมาณ 6000 W/m^3 ซึ่งแสดงตัวอย่างของลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางต้นดังรูปที่ 7



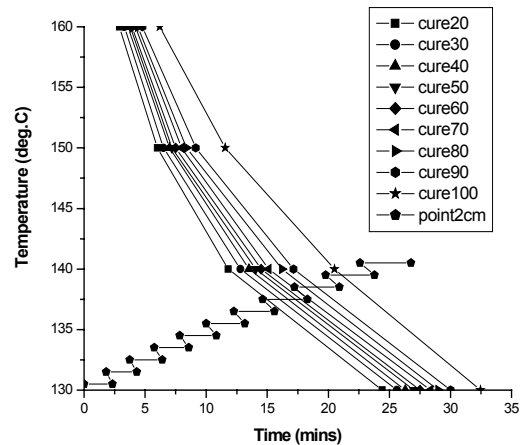
รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางต้น กรณี $k = 0.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, heat generation = 6000 W/m^3 เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง

2.5 การวิเคราะห์ระดับการสุกตัวของยาง

วิเคราะห์ระดับการสุกตัวของยางที่ตำแหน่งลึกจากผิวล้อยางต้น 2 cm และที่ตำแหน่งกึ่งกลางของล้อยางต้น โดยใช้ผลการคำนวณกรณีค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองมีค่าเป็น 6000 W/m^3 และค่าการนำ

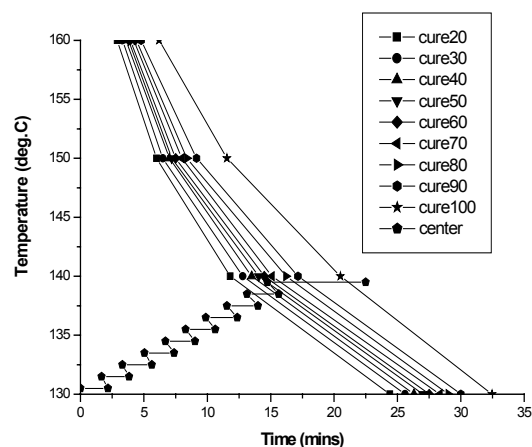
ความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็น $0.25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ 2 วิธีเพื่อเปรียบเทียบกันดังนี้

การวิเคราะห์โดยใช้ที่ชีชาร์ต (Time – Temperature Conversion Chart)



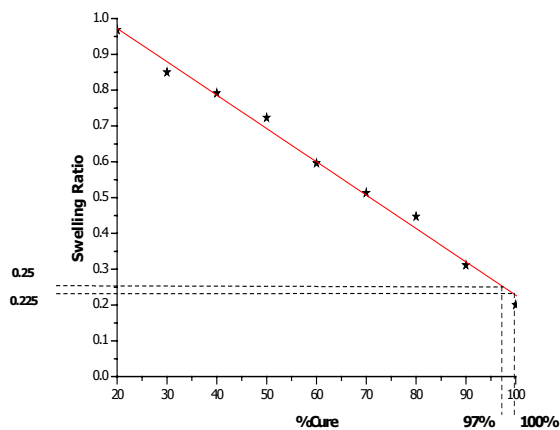
รูปที่ 8 ระดับการสุกตัวของยาง ณ ตำแหน่งที่ลึกจากผิวล้อยาง 2 cm

การประมาณหาระดับการสุกตัวของยางโดยใช้ที่ชีชาร์ต จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่า ณ ตำแหน่งลึกจากผิวล้อยาง 2 cm เนื้อยางที่ระดับนี้จะสุกเกิน 90 % เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง และที่จุดกึ่งกลางของล้อยางจะสุกเพียง 50 % เมื่ออบยางครบ 3.5 ชั่วโมง แต่ภายหลังจากที่นำล้อยางต้นออกจากแม่พิมพ์แล้วจะเห็นว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางของล้อยางยังคงมีการอบคงรูป (Cure) ของยางต่อเนื่องหนึ่ง จึงทำการประมาณให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็นอุณหภูมิคงที่ที่ 139.5 องศาเซลเซียสต่อไปอีกเป็นเวลา 8 นาทีจึงทำให้ยางสุกเต็มที่ สำหรับการทดสอบการบวมพองเมื่ออบยางจนครบ 3.5 ชั่วโมงและทิ้งไว้จนเย็นให้ผลดังรูปที่ 10 ซึ่งพบว่าตำแหน่งลึกจากขอบยาง 2 cm ยางสุก 100 % และสุก 97% ณ ตำแหน่งกึ่งกลางล้อยางดังนั้นทั้งสองวิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับผลการทดลองคือยางสุกทั่วทั้งเส้นเมื่ออบเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง



รูปที่ 9 ระดับการสุกตัวของยาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของล้อยางต้น

การวิเคราะห์โดยวิธีทดสอบการบวมพอง (Swelling test)



รูปที่ 10 การหาระดับการสุกตัวโดยวิธีทดสอบการบวมพอง

3. สรุป

จากงานวิจัยพบว่าลักษณะการถ่ายโอนความร้อนจากเบ้าพิมพ์สู่ล้อยางต้นขณะอบคงรูป และตัวแทนสมบัติของยางมีลักษณะดังนี้คือ ขณะอบคงรูปล้อยางต้น ยางจะมีความสามารถในการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงก่อนการเกิดเชื่อมโยงโซ่โมเลกุล คือช่วงอุณหภูมิ 60-110 °C หลังช่วงอุณหภูมิคงรูป (120-150 °C) ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่ แต่จะเกิดการคายพลังงานความร้อนออกมาส่วนหนึ่งอันเนื่องมาจากการสลายและสร้างพันธะใหม่ระหว่างโซ่โมเลกุลของยาง

สำหรับการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางต้นขณะอบคงรูปเพื่อทำนายระดับการสุกตัวของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในล้อยาง เพื่อความง่ายและสะดวกต่อการคำนวณจะสามารถสมมติให้ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็นค่าที่อุณหภูมิห้องและค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นเป็นค่าคงที่เท่ากับ 6000 W/m³ จะทำให้ได้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิซึ่งนำมาหาระดับการสุกตัวของยางโดยใช้ที่ชีชาร์ตได้อย่างถูกต้อง

สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้ ต่อไปควรจะต้องคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในยางที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา โดยในการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางขณะอบคงรูปควรมีการศึกษาถึงฟังก์ชันนี้้อย่างละเอียด และควรออกแบบและสร้างการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าการนำความร้อนของยาง ที่ผันแปร

ตามอุณหภูมิขึ้นมาใหม่เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้และจะนำไปสู่ค่าที่ถูกต้องที่แท้จริงของค่าการนำความร้อน เพื่อให้สามารถคำนวณหาลักษณะและค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทโมลด์เมท จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือในการทดสอบค่าต่างๆ รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Carslaw H.S., Jaeger J.C., "Conduction of Heat in Solids", 2nd Edition, Oxford Science Publication, 1995.
- [2] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, "ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [3] Pongthorn Sae-oui and Uthai Thepsuwan, "Cure Simulation of Rubber Components Using Finite Element Analysis (FEA)", The National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Bangkok, 2001
- [4] Indian Rubber Institute (IRI), "Rubber Engineering", Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1998
- [5] P.S. Oubridge, "User Manual for Cure Simulation of Rubber Using Finite Element Analysis", July 1998
- [6] วราภรณ์ ขจรไชยกุล, "เทคโนโลยียาง", ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร, มีนาคม 2541
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, "ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [8] Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. "Abaqus Theory Manual Version 6.2 Hibbitt", Karlsson & Sorensen, Inc., 2001
- [9] D.A.Hills, "Heat Transfer and Vulcanisation of Rubber", Elsevier Publishing Co. Ltd., New York, 1971