

## การทำนายระดับการคงรูปของล้อยางต้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### Finite Element Analysis for Cure Level Prediction of Solid Tyre

สิทธิชัย ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์\* อริสรา ชัยกิตติรัตน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน – อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Sittichai Limrungruangrat\* Arisara Chaikitirana

Department of Mechanical & Aerospace Engineering

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

Tel : 0-2913-2500 Ext. 8315 E-mail: me.sittichai@gmail.com

#### บทคัดย่อ

กระบวนการอบคงรูปเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตล้อยางต้น ทั้งนี้ระดับการคงรูปในผลิตภัณฑ์จะส่งผลโดยตรงกับสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์เช่น ความแข็ง และการต้านแรงดึง ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์กระบวนการอบคงรูปด้วยวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในล้อยางต้นที่สร้างจากการนำยางสามชนิดมาเรียงซ้อนกัน โดยได้ทำการกระจายตัวของอุณหภูมิและระดับการคงรูประหว่างการอบคงรูปในแม่พิมพ์และหลังจากนำล้อยางออกจากแม่พิมพ์ (cool down) แล้ว รวมถึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์กับผลการวัดอุณหภูมิของล้อยางในแม่พิมพ์ระหว่างการอบคงรูป

**คำหลัก** กระบวนการวัลคาไนเซชัน การจำลองการคงรูป ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

Curing process is the final step in solid tyre manufacturing processes. Cure levels of a product affect directly to the mechanical properties of the product such as the hardness and the tensile strength. Therefore, the cure levels play an important role to the product performance. In this study, the Finite Element Method (FEM) is applied to analyse the curing process of a solid tyre composed of three different rubber compound layers. The simulations of temperature and cure level distributions. During the curing and cooling down (the tyre was removed out of the mould) processes are presented. The predicted temperature distributions calculated by using FEM are also compared with the experimental data measured

during the curing process of the solid tyre with three layers of different rubber compounds. The simulations of temperature and cure level distribution during the curing process in the mould and after the tyre was removed from the mould (cool down) are presented. The predicted temperature distribution during the curing process in a mould is also compared with the data measured from the actual process.

**Keywords:** Vulcanization process, cure simulation, finite element method

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตล้อยางตัน เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการเพิ่มมูลค่าให้กับยางดิบ ซึ่งมากในประเทศไทย อีกทั้งอุตสาหกรรมการผลิตล้อยางตันยังมีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับหนึ่งในอาเซียน ทว่าปัจจุบันการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมล้อยางตันมีมากขึ้น เพื่อให้สามารถแข่งขันกันในตลาดโลกนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาคุณภาพสินค้าและเทคโนโลยีการผลิต เพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลก

ในการผลิตล้อยางตันจะใช้วิธีขึ้นรูปแบบกดอัด (compression moulding) โดย ยางและเส้นลวดเหล็กจะถูกพันเป็นชั้นๆ คล้ายรูปโดนัท เรียกว่า green tire และจะถูกนำเข้าแม่พิมพ์เพื่อทำการกดอัดโดยเครื่องอัด (press) ภายในแม่พิมพ์นี้ล้อยางจะถูกให้ความร้อนและความดันทำให้เกิดการไหลของยางตามรูปของแม่พิมพ์เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูป (vulcanization)

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระดับการคงรูปล้อยางตัน ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการจำลองระดับการคงรูปล้อยางตัน ซึ่งเป็นแนวทางในการหาระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบคงรูป ก่อนที่จะไปทำการอบคงรูปล้อยางตันจริง ที่

จะเป็นการลดจำนวนครั้งในการลองผิดลองถูกและลดค่าใช้จ่าย

การจำลองกระบวนการอบคงรูปของล้อยางตัน เช่นในเอกสารอ้างอิง 1 ถึง 4 ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ทางกายได้สองกระบวนการ คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับยางดิบในโมลด์ และ การแปรสภาพของล้อยางดิบไปเป็นยางคงรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ (vulcanization process at constant temperature) เนื่องจากกระบวนการทั้งสอง มีความสัมพันธ์กันแบบจำลองระดับการคงรูปของล้อยางจึงจำเป็นต้องสามารถวิเคราะห์กระบวนการทั้งสองควบคู่กันไป

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับยางดิบในโมลด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ (heat transfer equation) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความร้อนที่วัตถุได้รับในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตำแหน่งในตัวเนื้อของวัตถุ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  และเวลา  $t$  และค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1)$$

เมื่อ

$\rho$  คือ ความหนาแน่น (density,  $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat,  $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )

$k_x, k_y, k_z$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )

$Q$  คือค่าพลังงานความร้อนที่ถูกผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเนื่องจากปฏิกิริยาการคงรูป (heat generation due to vulcanization,  $\text{J/(kg m}^3\text{)})$

อัตราการเกิดพลังงานความร้อนเนื่องจากการคงรูป (rate of heat generation) สามารถอธิบายด้วยสมการ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \rho(\Delta H) \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ  $\Delta H$  คือ ค่าพลังงานความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาการ  
คงรูป (heat of vulcanization (J/kg))

$X$  คือ สถานะของการคงรูป (state of cure)

$\frac{dX}{dt}$  คือ อัตราการคงรูปของยาง (rate of state of  
cure)

Toth และคณะ [1] ได้ทำการศึกษารูปแบบหลาย  
รูปแบบเพื่อใช้ในการอธิบายระดับการคงรูปของยางได้  
เช่นสมการระดับการคงรูปแบบเชิงเส้น ภายใต้สภาวะ  
อุณหภูมิคงที่ (isothermal condition)

$$\frac{dX}{dt} = K(1 - X), t \geq t_i \quad (3)$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่สำหรับกระบวนการคงรูปที่  
อุณหภูมิหนึ่ง (rate constant of cure reaction,  $\text{min}^{-1}$ )

$t_i$  คือ ระยะเวลาที่เริ่มปฏิกิริยาการคงรูป  
(induction period of cure reaction, min)

$$X(t) = 1 - \exp(-K(t - t_i)), t \geq t_i \quad (4)$$

ค่า  $K$  และ  $t_i$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแบบ Arrhenius  
ดังสมการที่ 5

$$K = K_0 \exp(-E_a / RT)$$

$$t_i = t_{i0} \exp(E_i / RT) \quad (5)$$

เมื่อ

$K_0$  คือค่าตัวประกอบสำหรับค่าคงที่ปฏิกิริยาการคงรูป  
(frequency factor for rate constant of cure reaction,  
 $\text{min}^{-1}$ )

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับอัตราการคงรูป  
(activation energy for rate constant of cure reaction,  
J/(mol K))

$E_i$  คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาการคง  
รูป (activation energy for induction period of cure  
reaction, J/(mol K))

$t_{i0}$  คือ ค่าตัวประกอบสำหรับระยะเวลาที่เริ่มปฏิกิริยา  
การคงรูป (frequency factor for induction period of  
cure reaction, min)

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (ideal gas constant, 8.314  
J/(mol K))

สมการระดับการคงรูปแบบเชิงเส้น (สมการที่ 3)  
ดังกล่าวไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะ  
ในระยะเวลาเริ่มต้นได้ Toth [1] จึงได้เสนอสมการระดับ  
การคงรูปแบบใหม่คือ

$$\frac{dX}{dt} = KX^{\frac{1}{2}}(1 - X), t \geq t_i \quad (6)$$

โดยจัดรูปสมการระดับการคงรูปแบบใหม่ คือ

$$X(t) = \left\{ \frac{1 - \exp\left[-\int_{t_i}^t K_0 \exp(-E_a / RT(\tau)) d\tau\right]}{1 + \exp\left[-\int_{t_i}^t K_0 \exp(-E_a / RT(\tau)) d\tau\right]} \right\}^2, t \geq t_i \quad (7)$$

โดยที่  $t_i$  หาได้จาก

$$t_{i0} = \int_0^{t_i} \exp(-E_i / RT(t)) dt \quad (8)$$

ซึ่งสามารถอธิบายปฏิกิริยาการคงรูปของยางได้ดี  
มากกว่าแบบเส้นตรงโดยเฉพาะในระยะเวลาช่วงต้นของ  
การคงรูป

คณะวิจัยข้างต้น [1] ได้สร้างแบบจำลองการคงรูป  
จากสมการ (1), (2) และ (6) เพื่อสร้างแบบจำลองการคง  
รูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ABAQUS  
โดยคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันในทุกทิศทาง

$(k_x = k_y = k_z = k)$  พบว่าสามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการคงรูปของล้อยางได้ในระดับหนึ่ง

Tong และ Yan [2] นำผลการศึกษาของ Toth และคณะ [1] มาขยายผล ในการสร้างแบบจำลองระดับการคงรูปด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยล้อยางถูกจำลองในลักษณะวัสดุประกอบที่สมมาตรในแนวแกน (axisymmetry) กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง  $(k_x \neq k_y \neq k_z)$  ที่คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของส่วนประกอบของยางกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และ cure reaction kinetics ของยางในสมการ (6) ผลจากการสร้างแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการคงรูปของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในล้อยางได้

In-Su Han และคณะ [3] ได้ทำการศึกษามบัตียางคอมปาวด์ที่สมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสถานะของการคงรูป ที่มีความแตกต่างกันมากกว่า 15 ชนิด โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ และแม่พิมพ์ในการวิเคราะห์แบบจำลองการทำนายระดับการคงรูปของล้อยางลง

Pongdhorn Sae-oui and U Thepsuwan [4] ได้ทำการศึกษาระดับการคงรูปด้วยชิ้นงานทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุยางชนิดเดียวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์แล้ว จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองการวัดระดับการคงรูป ผลที่ได้มีความผิดพลาดน้อยกว่าร้อยละ 25 แสดงว่าการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระดับการคงรูปล้อยางที่ทำจากวัสดุยางสามชนิดระหว่างที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์แล้วด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys Polyflow v.12 [5]

## 2. การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์

ในการสร้างแบบจำลองยาง Green tire นี้ จะทำการจำลองแบบสองมิติ (2D) และมีความสมมาตรตามแนวแกน (axisymmetric) ใน polyflow ดังที่แสดงในรูปที่ 1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและเป็นการประหยัดหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองยางล้อสองมิติ (2D) และสมมาตรตามแนวแกน (axisymmetric)

### 2.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

#### (Boundary Condition)

ในการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ระดับการคงรูปของยางนั้นจะเป็นการพิจารณาออกเป็นสามค่าสมบัติเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยที่ใช้เงื่อนไขเดียวกันในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งก้อนที่ 75 องศาเซลเซียส แล้วให้อุณหภูมิบริเวณขอบยางที่ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที เมื่อนำออกมาจากแม่พิมพ์แล้วก็นำมาวิเคราะห์การเย็นตัว (cool down) โดยให้บริเวณขอบยางมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 180 นาที เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงรูปว่ามีลักษณะการเกิดขึ้นอย่างไร

### 2.2 สมบัติของยางคอมปาวด์

ในการศึกษาการคงรูปของล้อยางต้นนั้นต้องทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ ซึ่งการหาค่าสมบัติดังกล่าวเป็นไปตามเอกสารอ้างอิงที่ [3] ที่ศึกษาสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิและสถานะของการคงรูป

สมบัติของวัสดุยางคอมปาวด์ที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง คือ  $C_p, \rho, k, K_0, E_a, t_{i0}, \Delta H$  และ  $E_i$

ในบทความนี้ การหาค่า  $k, \rho$  ได้กำหนดเป็นค่าคงที่ สำหรับค่า  $C_p$  เป็นไปตามสมการเชิงเส้น คือ

$$C_p(T) = a + bT \quad (9)$$

ค่า  $\rho$  ของยางคอมปาวด์แต่ละชนิดได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัท การทดสอบหาค่า  $C_p$  ใช้ Differential Scanning Colorimeter รุ่น DSC 822e ยี่ห้อ Mettler Toledo ค่า  $k$  ใช้เครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser (TCA) ระดับการคงรูปของยางคอมปาวด์ทำการศึกษาโดยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ค่าสมบัติของยางคอมปาวด์ข้างต้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติของยางคอมปาวด์สำหรับล้อยางตัน

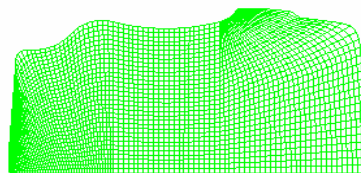
| คุณสมบัติ                      | ยางชั้นใน     | ยางชั้นกลาง   | ยางชั้นนอก    |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 1175          | 1145          | 1150          |
| $C_p$<br>(J/kg °C)             | 1144.7 + 6.5T | 1455.2 + 5.7T | 1644.9 + 0.8T |
| $k$<br>(W/m °C)                | 19.968        | 17.826        | 18.228        |
| $\Delta H$<br>(J/kg)           | 15370         | 10520         | 7600          |

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ได้จากการ fit curve ที่ได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

| ยางคอมปาวด์ | อัตราคงที่<br>(Rate constant) |                    | ค่าเวลาเริ่มต้น<br>(Induction Period) |                    |
|-------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|
|             | $K_0$<br>(1/min)              | $E_a / R$<br>(1/K) | $t_{i0}$<br>(1/min)                   | $E_i / R$<br>(1/K) |
| ยางชั้นใน   | $8.02 \times 10^7$            | 7920.4             | $4.4405 \times 10^{-15}$              | 1773.03            |
| ยางชั้นกลาง | $1.81 \times 10^9$            | 9158               | $1.42503 \times 10^{-14}$             | 1719.99            |
| ยางชั้นนอก  | $5.1602 \times 10^{12}$       | 12736              | $1.63371 \times 10^{-10}$             | 1253.54            |

## 2.3 กระบวนการเมช (Mesh)

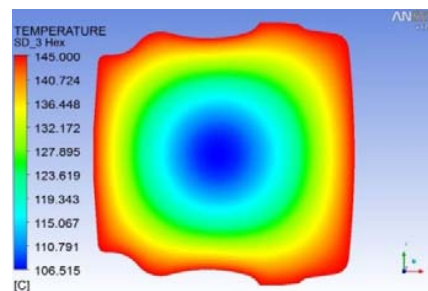
การสร้างเมชในแบบจำลองนี้จะใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม แบบ First order โดยใช้เอลิเมนต์ทั้งหมด 2970 เอลิเมนต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูป 2



รูปที่ 2 การตีเมชที่ใช้ในแบบจำลอง

## 3. ผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.1 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิเปรียบเทียบกับทดลอง



รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางเมื่อทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ได้จากโปรแกรม Ansys Polyflow

จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างในแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3

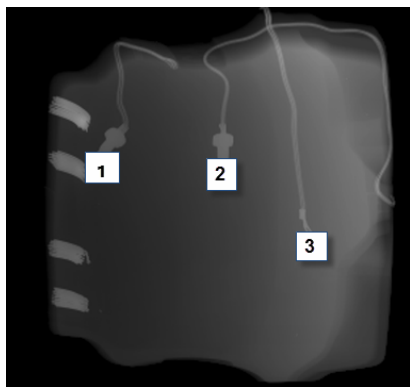
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในล้อยางตันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างการอบคงรูปในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียสคงที่ โดยทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งของยางชั้นใน ยางชั้นกลาง และยางชั้นนอกตามลำดับโดยวิธีนี้จะไม่ทำให้เทอร์โมคัปเปิ้ลถูก

ตันออกจากเนื้อยางเนื่องจากแรงดันภายในแต่จะมีการเคลื่อนที่ของเทอร์โมคัปเปิลภายในเนื้อยางขณะทำการอบคงรูป

ผลจากการวัดอุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการอบคงรูปด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

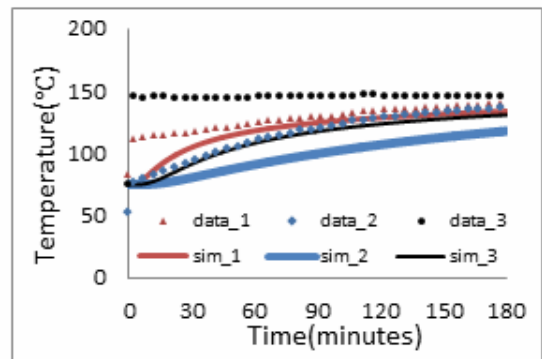


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ภาพแสดงตำแหน่งที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลในล้อยางต้นก่อนการอบคงรูป (ข) ภาพแสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลหลังจากที่ยางอบสุกแล้วที่ได้จากภาพถ่าย x-ray

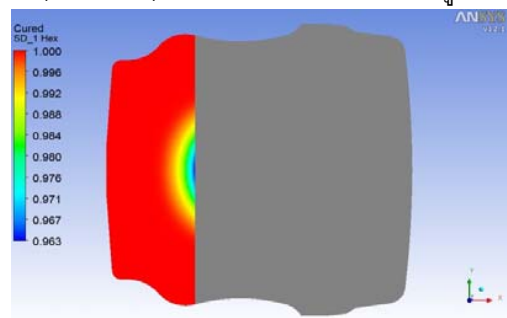


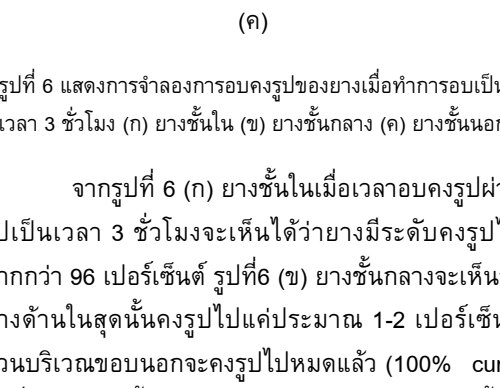
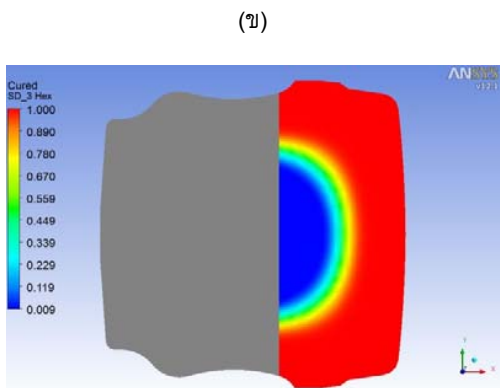
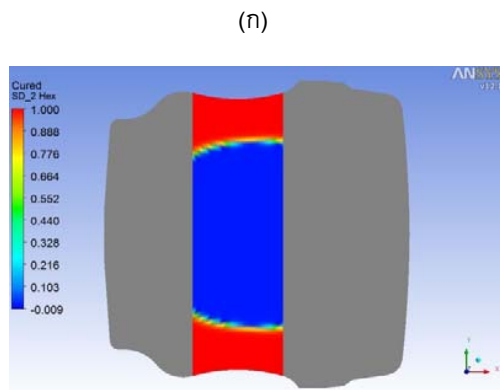
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการอบคงรูปด้วยโปรแกรม Ansys Polyflow

จากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิทั้ง 3 จุดที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ยังมีค่าแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง โดยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 2 จะมีความแตกต่างกันมากที่สุด ที่เวลา 180 นาที ณ ตำแหน่งที่ 2 อุณหภูมิที่วัดได้ (data\_2) คือ 136 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่จำลองได้ (sim\_2) คือ 118 องศาเซลเซียสซึ่งแตกต่างกันอยู่ 18 องศาเซลเซียส

#### 4.ผลการทำนายระดับการคงรูปล้อยางต้นด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

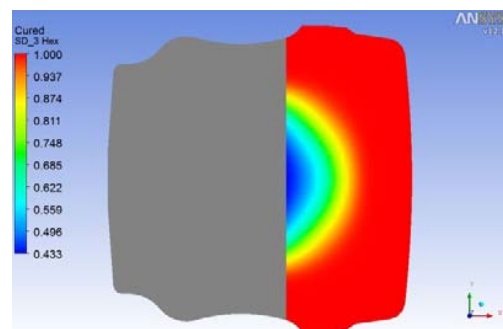
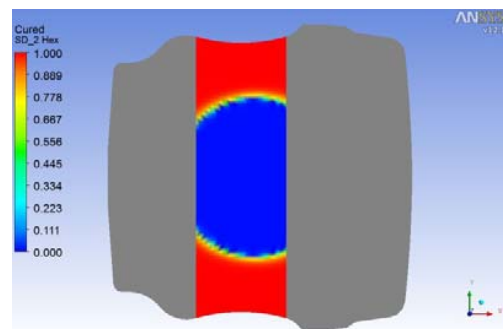
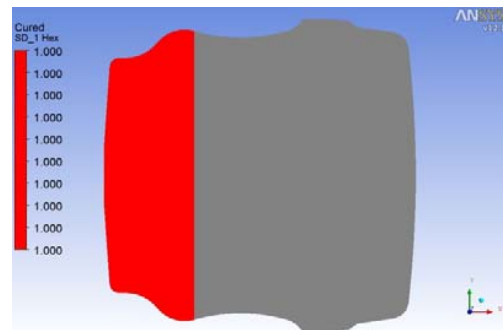
การคำนวณหาระดับการคงรูปล้อยางต้น ด้วยโปรแกรม Polyflow ทำโดยใช้สมการที่ (1),(2),(5),(6),(7),(8) และ (9) ซึ่งผลการทำนายระดับการคงรูปในแม่พิมพ์เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 และนำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์เพื่อปล่อยให้เย็นตัวลง(cool down)เป็นเวลา 180 นาทีที่ได้แสดงในรูปที่ 7





รูปที่ 6 แสดงการจำลองการอบคงรูปของยางเมื่อทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) ยางชั้นใน (ข) ยางชั้นกลาง (ค) ยางชั้นนอก

จากรูปที่ 6 (ก) ยางชั้นในเมื่อเวลาอบคงรูปผ่านไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่ายางมีระดับคงรูปไปมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 6 (ข) ยางชั้นกลางจะเห็นว่ายางด้านในสุดนั้นคงรูปไปแค่ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบริเวณขอบนอกจะคงรูปไปหมดแล้ว (100% cure) รูปที่ 6 (ค) ยางชั้นนอกจะเห็นว่าด้านในสุดของยางชั้นนี้จะคงรูปไปได้ประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งบริเวณถัดไปจนถึงขอบจะมีการสุกตัวของยางตั้งแต่ 25 ไปจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7 แสดงการคงรูปของยาง เมื่อทำการปล่อยให้ล้อยางเย็นตัวลง (Cool down) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) ยางชั้นใน (ข) ยางชั้นกลาง (ค) ยางชั้นนอก

จากรูปที่ 7 เป็นการจำลองเพื่อดูระดับการคงรูปต่อเนื่องภายหลังจากนำล้อยางออกจากแม่พิมพ์เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง รูปที่ 7 (ก) ยางชั้นในจะคงรูป 100 เปอร์เซ็นต์ทั้งชั้น รูปที่ 7 (ข) ยางชั้นกลางจะเห็นว่ามีการ

คงรูปเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 6 (ข) จาก 1-2 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 6-8 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 7 (ค) ยางชั้นนอกจะเห็นว่าคงรูปมากกว่า 43 เปอร์เซ็นต์ และบริเวณที่คงรูปมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 6 (ค)

## 5. อภิปรายและสรุปผล

จากการวิเคราะห์ระดับการคงรูปอย่างตันด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Ansys Polyflow) เพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิของล้อยางตัน สามารถทำนายได้แม่นยำในระดับหนึ่งแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดจริงมากพอสมควร ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อมูลในตำแหน่งที่ 3 จะเห็นว่าแตกต่างกันมากเป็นผลจากการฝังหัวเทอร์มอคัปเปิลในเนื้อยางน่าจะไหลไปอยู่บริเวณใกล้กับแม่พิมพ์ตรงบริเวณร่องดอกยางจึงทำให้ผลการวัดอุณหภูมิที่ได้เกือบคงที่ตลอดทั้งการทดลอง ซึ่งต่างจากการสร้างแบบจำลอง 2-มิติและสมมาตรตามแนวแกนนั้นไม่มีความตื้นลึกของลายดอกยางจึงทำให้ตำแหน่งที่ทำการวัดในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ 3 มีระยะห่างจากแม่พิมพ์มากพอควร และไม่ได้มีเส้นลวดอยู่ภายในเนื้อยาง และอีกสาเหตุหนึ่งคือ สมบัติวัสดุตอนที่ทำการทดลองอบคงรูปยางจริง กับสมบัติที่ได้มาจากการวัดหาสมบัติวัสดุด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2 มาจากยางการผสมยางคนละชุด(batch)กันและเงื่อนไขของการวัดสมบัติต่าง ๆ ยังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเท่าที่ควร ในการที่จะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นนั้นในการทดลองควรหาวิธีติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลใหม่เพื่อไม่ให้หัวเทอร์มอคัปเปิลถูกดันออกห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นในขณะที่ทำการทดลองหรือทำการสร้างแม่พิมพ์สำหรับใช้ทดลองโดยเฉพาะ

ผลการจำลองกระจายตัวของอัตราการอบคงรูปในแม่พิมพ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงยางชั้นกลางจะคงรูปน้อยที่สุด โดยระดับการคงรูปที่บริเวณกึ่งกลางจะมีค่าเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากที่ปล่อยให้ยางเย็นตัวนอกแม่พิมพ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมงระดับการคงรูปจะเพิ่มขึ้นเป็น 6-8 เปอร์เซ็นต์ค่าดังกล่าวน้อยกว่าความเป็นจริงมาก ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ข้างต้น ทั้งนี้ความแม่นยำของผลการจำลองจะเพิ่มขึ้นได้ถ้าค่าสมบัติวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและรายละเอียดและส่วนประกอบของหน้าตัดยางใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ในการผลิตล้อยางตันจริงจะพบปัญหาการไม่สุกของยางที่บริเวณกึ่งกลางหน้าตัดซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น ซึ่งผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและระดับการคงรูปที่แม่นยำจะทำให้สามารถหาระยะเวลาในการอบคงรูปและเวลาในการปล่อยให้ยางเย็นตัวที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีที่สุดก่อนส่งสินค้าออกจำหน่ายได้ โดยวิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับยางบริเวณตรงกลางที่ไม่สุกสามารถแก้ไขโดยการเพิ่มระยะเวลาในการอบคงรูป หรือกลับไปตรวจสอบและแก้ไขสูตรยางให้มีความสามารถในการสุกตัวในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกับยางสูตรที่เหลือที่ใช้ในการผลิตล้อยางตัน

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทโมลด์เมท ที่อนุเคราะห์ให้ตัวอย่างวัสดุเพื่อมาทำการหาค่าคุณสมบัติ และให้เข้าไปทำการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Toth, W.J., Chang, J.P., and Zanichelli, C. 1991. Finite element evaluation of the state of cure in a tire. *Tire Science and Technology*, 19(4): 178-212.
- [2] Tong, J., and Yan, X.Q. 2003. Finite element analysis of tire curing process. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(11):983-1002.
- [3] In-Su Han, Chang-Bock Chung, Jin-Hwan Kim, Seung-Jai Kim, Ho-Chul Chung, Choon-Taik Cho, and Se-Chol Oh. 1995. Dynamic simulation of a tire curing process. *Tire Society*.

- [4] Pongdhorn Sae-oui and U Thepsuwan. 2002  
Prediction of cure level in thick rubber cylinder  
using finite element analysis. ScienceAsia.
- [5] ANSYS, Inc. Engineering simulation solutions for  
the plastic and rubber Industry. Polyflow, URL:  
[www.ansys.com](http://www.ansys.com) , access on 28/11/2010.