

การทำนายระดับการคงรูปของล้อยางต้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Finite analysis for cure level prediction in solid tyre

สิทธิชัย ลิ่มรุ่งเรืองรัตน์¹ และ อริสรา ชัยกิตติรัตน^{2,*}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน – อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

* โทรศัพท์: (66) 02 913 2500 Ext. 8315 โทรสาร: (66) 02 586 9541

E-mail: me.sittichai@gmail.com¹, acn@kmutnb.ac.th²

บทคัดย่อ

กระบวนการอบคงรูปเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตล้อยางต้น ทั้งนี้ระดับการคงรูปในผลิตภัณฑ์จะส่งผลโดยตรงกับสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์เช่น ความแข็ง และการต้านแรงดึง ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์กระบวนการอบคงรูปด้วยวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในล้อยางต้นที่สร้างจากการนำยางสามชนิดมาเรียงซ้อนกัน โดยได้ทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและระดับการคงรูประหว่างการอบคงรูปในแม่พิมพ์และหลังจากนำล้อยางออกจากแม่พิมพ์ (cool down) แล้ว รวมถึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการวัดอุณหภูมิของล้อยางในแม่พิมพ์ระหว่างการอบคงรูป

คำสำคัญ: กระบวนการวัลคาไนเซชัน, การจำลองการคงรูป, ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

The curing process is the final step in solid tyre manufacturing process. Cure level of product affect directly to the mechanical properties of products such as hardness and tensile strength. Hence it plays an important role to the product performance. This study applied the finite element method to analyse curing process of a 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: curing process, Cure Simulation, finite element method

1.บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตล้อยางต้น เป็น อุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการเพิ่มมูลค่าให้กับยางดิบ ซึ่ง มีมากในประเทศไทย อีกทั้งอุตสาหกรรมการผลิตล้อยางต้นยังมีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับหนึ่งในอาเซียน ทว่าปัจจุบันการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมล้อยางต้นมีมากขึ้น เพื่อที่จะให้สามารถแข่งขันกันในตลาดโลกนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาคุณภาพสินค้าและเทคโนโลยีการผลิต เพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลก

ในการผลิตล้อยางต้นจะใช้วิธีขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Moulding) โดย ยางและเส้นลวดเหล็กจะถูกพันเป็นชั้นๆ คล้ายรูปโดนัท เรียกว่า green tire และจะถูกนำเข้าแม่พิมพ์เพื่อทำการกดอัดโดยเครื่องอัด (Press) ภายในแม่พิมพ์นี้ล้อยางจะถูกให้ความร้อนและความดันทำให้เกิดการไหลของยางตามรูปของแม่พิมพ์เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization)

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระดับการคงรูปล้อยางต้น ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการจำลองระดับการคงรูปล้อยางต้น ซึ่งเป็นแนวทางในการหาระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบคงรูป ก่อนที่จะไปทำการอบคงรูปล้อยางต้นจริง ที่จะเป็นการลดจำนวนครั้งในการลองผิดลองถูก และลดค่าใช้จ่าย

การจำลองกระบวนการอบคงรูปของล้อยาง ดังเช่นในเอกสารอ้างอิง 1 ถึง 4 ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ยางภายใต้สองกระบวนการ คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับยางดิบในโมลด์ และ การแปรสภาพของล้อยางดิบไปเป็นยางคงรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ (vulcanization process at constant temperature) เนื่องจากกระบวนการทั้งสอง มีความสัมพันธ์กันแบบจำลองระดับการคงรูปของล้อยางจึงจำเป็นต้องสามารถวิเคราะห์กระบวนการทั้งสองควบคู่กันไป

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับยางดิบในโมลด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการถ่ายความร้อนของวัตถุ (Heat Transfer Equation) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปกับความร้อนที่วัตถุได้รับในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตำแหน่งในตัวเนื้อของวัตถุ 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

ρ คือ ความหนาแน่น (density, 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 คือค่าพลังความร้อนที่ถูกผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเนื่องจากปฏิกิริยาการคงรูป (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 ΔH คือ ค่าพลังความร้อนเนื่องปฏิกิริยาจากการคงรูป (heat of vulcanization (J/kg))

X คือ สถานะของการคงรูป (state of cure)

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

Toth และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาสมการหลายรูปแบบเพื่อใช้ในการอธิบายระดับการคงรูปของยางได้เช่นสมการระดับการคงรูปแบบเชิงเส้น ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal condition)

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

เมื่อ K คือ ค่าคงที่สำหรับกระบวนการคงรูปที่อุณหภูมิหนึ่ง (rate constant of cure reaction, min^{-1})

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

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

ค่า K และ t_i ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแบบ Arrhenius ดังสมการที่ 5

$$\begin{aligned} K &= K_0 \exp(-E_a/RT) \\ t_i &= t_{i0} \exp(-E_i/RT) \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ

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

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

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

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

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

สมการระดับการคงรูปแบบเชิงเส้น(สมการที่ 3)ดังกล่าวไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนสถานะในระยะเวลาเริ่มต้นได้ Toth [1] จึงได้เสนอสมการระดับการคงรูปแบบใหม่คือ

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

โดยจัดรูปสมการระดับการคงรูปใหม่ คือ

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

โดยที่ t_i หาได้จาก

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

ซึ่งสามารถอธิบายปฏิกิริยาการคงรูปของยางได้ดีมากกว่าแบบเส้นตรงโดยเฉพาะในระยะเวลาช่วงต้นของการคงรูป

คณะวิจัยข้างต้น[1] ได้สร้างแบบจำลองการคงรูปจากสมการ(1), (2) และ (6) เพื่อสร้างแบบจำลองการคงรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ABAQUS โดยคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันในทุกทิศทาง ($k_x = k_y = k_z = k$) พบว่าสามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการคงรูปของยางได้อย่างดีในระดับหนึ่ง

Tong และ Yan [2] นำผลการศึกษาของ Toth และคณะ [1] มาขยายผล ในการสร้างแบบจำลองระดับการคงรูปด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองในลักษณะวัสดุประกอบที่สมมาตรในแนวแกน (axisymmetry) กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ($k_x \neq k_y \neq k_z$) ที่คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของส่วนประกอบของยางกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และ Cure Reaction Kinetics ของยางในสมการ (6) ผลจากการสร้างแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการคงรูปของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในยางได้

In-Su Han และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ที่สมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสถานะของการคงรูป ที่มีความแตกต่างกันมากกว่า 15 ชนิด โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้พิจารณาผลของอุณหภูมิและแม่พิมพ์ในการวิเคราะห์แบบจำลองการทำนายระดับการคงรูปของล้อยางลม

Pongdhorn Sae-oui and U Thepsuwan [4] ได้ทำการศึกษาการจำลองระดับการคงรูปด้วยชิ้นงานทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุยางชนิดเดียวกันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์แล้ว จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองการวัดระดับการคงรูป ผลที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าการวิเคราะห์ทางไฟไนต์มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองระดับการคงรูปล้อยางที่ทำจากวัสดุยางสามชนิดระหว่างที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์แล้ว ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ 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 ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งก่อนที่ 75 องศาเซลเซียส แล้วให้อุณหภูมิบริเวณขอบยางที่ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที เมื่อนำออกมาจากแม่พิมพ์แล้วก็นำมาวิเคราะห์การเย็นตัว (Cool down) โดยให้บริเวณขอบยางมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 180 นาที เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการคงรูปว่ามีลักษณะการเกิดขึ้นอย่างไร

2.2 สมบัติของยางคอมปาวด์

ในการศึกษาการคงรูปของล้อยางต้นนั้นต้องทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ ซึ่งการหาค่าสมบัติดังกล่าวเป็นไปตามเอกสารอ้างอิงที่ [3] ที่ศึกษาสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิและสถานะของการคงรูป

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

ในบทความนี้ การหาค่า k, ρ ได้กำหนดเป็นค่าคงที่ สำหรับค่า C_p เป็นไปตามสมการเชิงเส้น คือ

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

ค่า ρ 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

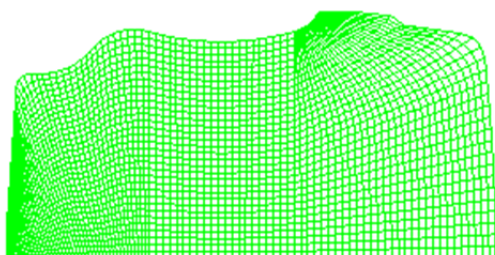
คุณสมบัติ	ยางชั้นใน	ยางชั้นกลาง	ยางชั้นนอก
ρ	1175	1145	1150
C_p	1144.7+ 6.5T	1455.2+ 5.7T	1644.9+0.8T
k	19.968	17.826	18.228
ΔH	15370	10520	7600

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ได้จากการ fit curve ที่ได้จาก
เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

ยาง คอม ปาวด์	อัตราคงที่ (Rate constant)		ค่าเวลาเริ่มต้น (Induction Period)	
	K_0	E_a	t_0	E_i
ยางชั้น ใน	8.02×10^7	7920.4	4.4405×10^{-15}	1773.03
ยางชั้น กลาง	1.81×10^9	9158	1.42503×10^{-14}	1719.99
ยางชั้น นอก	5.1602×10^{12}	12736	1.63371×10^{-10}	1253.54

2.3 กระบวนการเมช (Mesh)

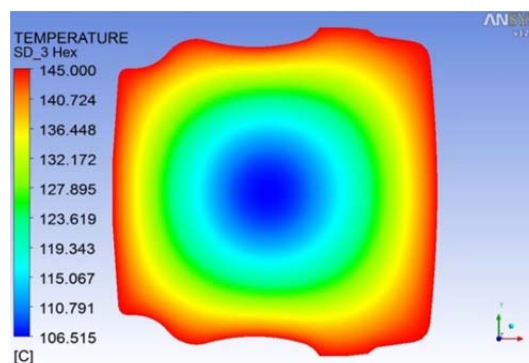
การสร้างเมชในแบบจำลองนี้จะใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม แบบ First order โดยใช้เอลิเมนต์ทั้งหมด 2970 เอลิเมนต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูป 2



รูปที่ 2 แสดงการตีเมชที่ใช้ในแบบจำลอง

3. ผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยาง
เมื่อทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ได้จากโปรแกรม
Ansys Polyflow

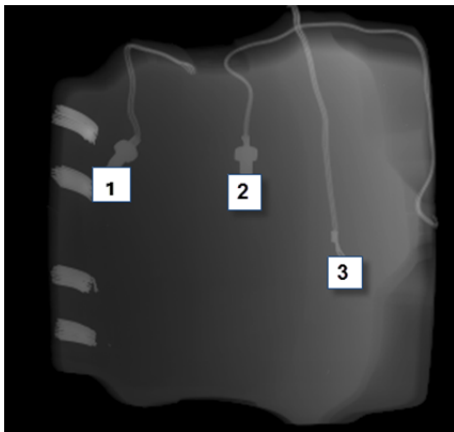
จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิล้อยางในแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3

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

ผลจากการวัดอุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการอบคงรูปด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

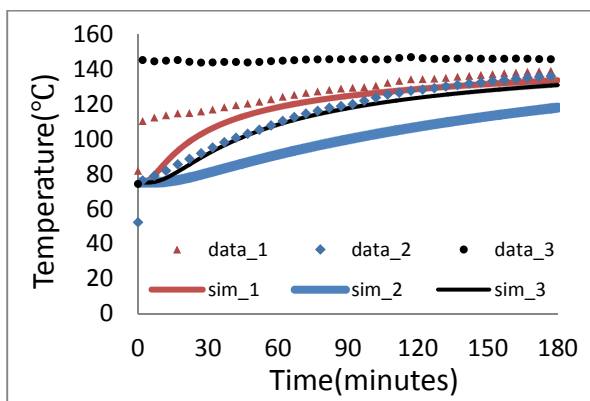


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ภาพแสดงตำแหน่งที่ฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลใน
ล้อย่างต้นก่อนการอบคงรูป (ข) ภาพแสดงตำแหน่ง
ของเทอร์โมคัปเปิ้ลหลังที่ย่างอบสุกแล้วที่ได้จาก
ภาพถ่าย x-ray

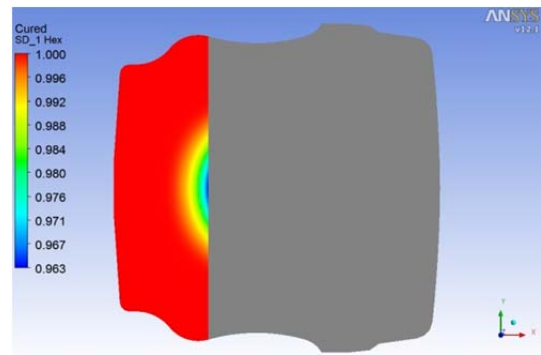


รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิระหว่าง
การทดลองกับแบบจำลองการอบคงรูปด้วยโปรแกรม
Ansys Polyflow

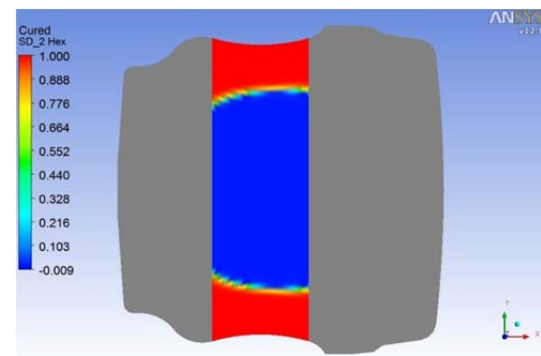
จากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิทั้ง 3 จุดที่ได้จาก
การจำลองและการวัดจริงมีแนวโน้มไปในทิศทาง
เดียวกัน แต่ยังมีค่าแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิที่ได้
จากการจำลองจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง
โดยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 2 จะมีความแตกต่างกัน
มากที่สุด ที่เวลา 180 นาที ณ ตำแหน่งที่ 2 อุณหภูมิที่
วัดได้ (data_2) คือ 136°C แต่อุณหภูมิที่จำลองได้
(sim_2) คือ 118°C ซึ่งแตกต่างกันอยู่ 18°C

4.ผลการทำนายระดับการคงรูปล้อย่างต้นด้วยวิธี ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

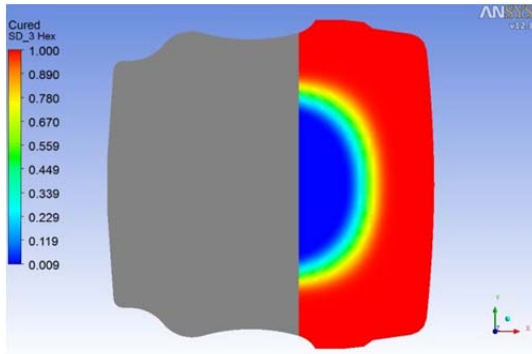
การคำนวณหาระดับการคงรูปล้อย่างต้น ด้วย
โปรแกรม Polyflow ทำโดยใช้สมการที่
(1),(2),(5),(6),(7),(8)และ (9) ซึ่งผลการทำนายระดับ
การคงรูปในแม่พิมพ์เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีได้
แสดงไว้ในรูปที่ 6 และ หลังจากนำล้อย่างออกจาก
แม่พิมพ์เพื่อปล่อยให้เย็นตัวลง(cool down)แล้ว 180
นาทีได้แสดงในรูปที่ 7



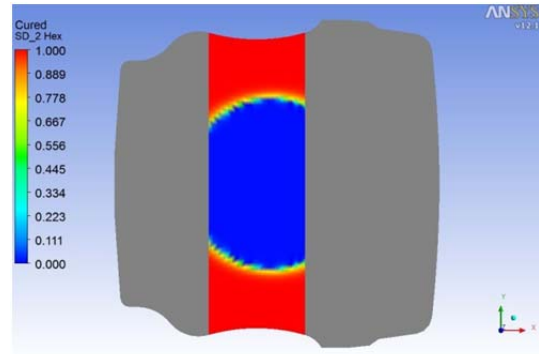
(ก)



(ข)



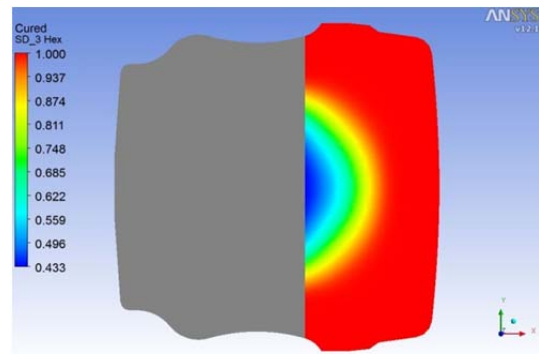
(ก)



(ข)

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

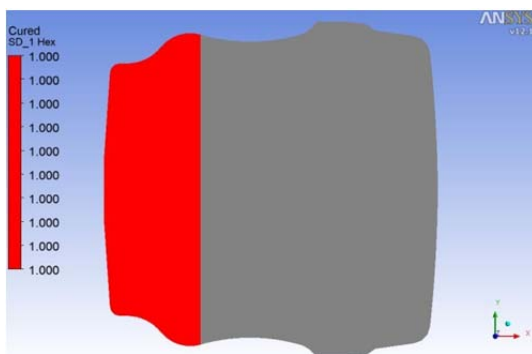
จากรูปที่ 6 (ก) ยางชั้นในเมื่อเวลาอบคงรูปผ่านไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่ายางมีระดับคงรูปไปมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 6 (ข) ยางชั้นกลางจะเห็นว่ายางด้านในสุดนั้นคงรูปไปแค่ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบริเวณขอบนอกจะคงรูปไปหมดแล้ว (100% cure) รูปที่ 6 (ค) ยางชั้นนอกจะเห็นว่าด้านในสุดของยางชั้นนี้จะคงรูปไปได้ประมาณ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



(ค)

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



(ก)

5. อภิปรายและสรุปผล

จากการวิเคราะห์ระดับการคงรูปล้อยางต้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Ansys Polyflow) เพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิของล้อยางต้นสามารถทำนายได้แม่นยำในระดับหนึ่งแต่ยังมีความ

คาดเคลื่อนจากค่าที่วัดจริงประมาณ 13-14 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการสร้างแบบจำลอง 2-มิติและสมมาตรตามแนวแกน นั้นไม่ได้มีเส้นลวดอยู่ภายในเนื้อยางและไม่ได้มีความถี่ของลวดของลายดอกยาง และอีกสาเหตุหนึ่งคือ สมบัติวัสดุตอนที่ทำการทดลองอบคงรูปยางจริง กับ สมบัติที่ได้มาจากการวัดหาสมบัติวัสดุด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2 มาจากยางการผสมยางคนละชุด(Batch)กันและเงื่อนไขของการวัดสมบัติต่าง ๆ ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเท่าที่ควร

ผลการจำลองกระจายตัวของอัตราการอบคงรูปในแม่พิมพ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงยางชั้นกลางจะคงรูปน้อยที่สุด โดยระดับการคงรูปที่บริเวณกึ่งกลางจะมีค่าเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากที่ปล่อยให้ยางเย็นตัวนอกแม่พิมพ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมงระดับการคงรูปจะเพิ่มขึ้นเป็น 6-8 เปอร์เซ็นต์ ค่าดังกล่าวน้อยกว่าความเป็นจริงมาก ความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิข้างต้น ทั้งนี้ความแม่นยำของผลการจำลองจะเพิ่มขึ้นได้ถ้าค่าสมบัติวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและรายละเอียดและส่วนประกอบของหน้าตัดยาง ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ในการผลิตอย่างต้นจริงจะพบปัญหาการไม่สุกของยางที่บริเวณกึ่งกลางหน้าตัดซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น ซึ่งผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและระดับการคงรูปที่แม่นยำจะทำให้สามารถหาระยะเวลาในการอบคงรูปและเวลาในการปล่อยให้ยางเย็นตัวที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีที่สุดก่อนส่งสินค้าออกจำหน่ายได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทโมลด์เมท ที่อนุเคราะห์ให้ตัวอย่างวัสดุเพื่อมาทำการหาค่าคุณสมบัติ และให้เข้าไปทำการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Toth, W.J., Chang, J.P., and Zanichelli, C., "Finite Element Evaluation of the State of Cure in a Tire", Tire Science and Technology, 19(4): 178-212 (1991).
- [2] Tong, J., and Yan, X.Q., "Finite Element Analysis of Tire Curing Process", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 22(11):983-1002 (2003).
- [3] In-Su Han, Chang-Bock Chung, Jin-Hwan Kim, Seung-Jai Kim, Ho-Chul Chung, Choon-Taik Cho, and Se-Chol Oh, "Dynamic Simulation of a Tire Curing Process", Tire Society, 1995.
- [4] Pongdhorn Sae-oui and U Thepsuwan, "Prediction of Cure Level in Thick Rubber Cylinder Using Finite Element Analysis", ScienceAsia, 2002.
- [5] ANSYS, Inc. Engineering Simulation Solutions for the plastic and rubber Industry, Polyflow, URL: www.ansys.com , access on 28/11/2010