



# การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป

รัชดาภรณ์ สุคติ และ สมเจตน์ พัทธพันธ์ \*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 3 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 19 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 พฤษภาคม 2566

**บทคัดย่อ:** กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา มักประสบปัญหาเรื่องการสุกตัวที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของชิ้นงาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของสารประกอบยางที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการคงรูป ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization: EV) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization: CV) และเมื่อนำผลการกระจายตัวของอุณหภูมิไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์และยางคงรูป พบว่า ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมปาวด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณสูงและชิ้นงานมีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการคงรูปแบบลำดับขั้นทำให้มีการกระจายอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ที่ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

**คำสำคัญ:** กระบวนการอัดขึ้นรูป; ยางคอมปาวด์; การกระจายตัวของอุณหภูมิ; ค่าการนำความร้อน; ชนิดและปริมาณสารตัวเติม; ระบบการคงรูป

# Analysis of Temperature Distribution and Thermal Conductivity of Rubber Compound during Compression Molding Process

Rutchadaporn Sudto and Somjate Patcharaphun\*

Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

\* Corresponding author, E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

Received: 14 February 2023; Revised: 3 April 2023; Accepted: 19 April 2023

Online Published: 31 May 2023

**Abstract:** Uneven cure of thick-wall rubber products is regarded as one of the most undesirable phenomena since it results in a significant loss of mechanical properties. The primary objective of this study was to investigate the effect of the curing system, filler type, and content on the temperature distribution and thermal conductivity of rubber compounds during the compression molding process. A special compression mold was designed and constructed to measure the temperature distribution across the thickness of rubber parts. The measured results indicated that the efficient vulcanizing system (EV) gave a better temperature distribution across the thickness than conventional vulcanization (CV). Concerning the thermal conductivity of rubber compounds and vulcanizates, it was found that the thermal conductivity increased with the increase of filler content. In addition, the thermal conductivity of cured rubber dramatically decreased as compared to uncured rubber. Furthermore, it should be noted that the decreasing thermal conductivity of rubber compounds, especially for high carbon black loading and thick-wall moldings, directly affected the uneven cure of rubber products. In this work, the step cure was proposed to enhance the temperature distribution across the thickness of rubber compounds. The results obtained in this measurement showed that the step cure could improve the vulcanization efficiency as compared to the conventional method.

**Keywords:** Compression molding; Rubber Compound; Temperature distribution; Thermal Conductivity; Filler type and content; Vulcanizing system



## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบได้มากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูปของยางดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแปรรูปจากยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนิยมนำขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) [1, 2] สำหรับในประเทศไทยกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุด เนื่องมาจากการลงทุนต่ำทั้งในส่วนแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ อย่างไรก็ตามกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีกบฏปัญหาในระหว่างกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การเกิดครีบ (Flash) ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ที่ยาวนานกว่ากระบวนการอื่น [3] นอกจากนี้ปัญหาการสุกตัว (Cure) ที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven cure) ของผลิตภัณฑ์ยางที่มีผิวนานหรือมีความซับซ้อนมาก ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ [4, 5] โดยทั่วไปการหาเวลาการสุกตัว (Cure time) ของยางคอมปาวด์ สามารถหาได้จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) หรือการใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) [6, 7] อย่างไรก็ตามมาตรฐานของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความหนาประมาณ 2 มม. ซึ่งในทางปฏิบัติจริงอาจไม่แม่นยำในกรณีผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนามาก [8]

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ มักพบปัญหาการสุกตัวของยางที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนา เนื่องจากสมบัติการนำความร้อนของยางเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและสภาวะการคงรูป (State of Cure) [9-11] ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีความซับซ้อนสูง ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง สารตัวเติม และสารเคมีอื่นๆ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการนำความร้อนของยาง โดย Barnett [4] แสดงให้เห็นว่าซิงค์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ และค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทางการจัดเรียงตัวของสารตัวเติมภายในยางคอมปาวด์ และจากงานวิจัยของ Walker [12] ได้ศึกษาค่าการนำความร้อนของยางคงรูป โดยแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink Density) Saxena et al. [13] และ Refei et al. [14] พบว่าค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการคงรูป โดยค่าการนำความร้อนของยางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหรือการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป ปัจจัยหลักที่ศึกษา ได้แก่ ระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงการใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยใช้อุปกรณ์ชุดทดสอบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญแก่ภาคอุตสาหกรรมผลิตในการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนามากได้



นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR5L โดยได้ทำการเตรียมสูตรยางคอมปาวด์ในระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization: CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficient Vulcanization: SEV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization: EV) [1] ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon Black: CB), ซิลิกา (Silica: SiO<sub>2</sub>) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO<sub>3</sub>) สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 โดยขั้นตอนการบดผสมยางคอมปาวด์ เริ่มจากนำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 นาที เติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic Acid) จากนั้นผสมสารตัวเติมและสารกระตุ้น ครั้งละ 1/3 ของทั้งหมด ใช้เวลาในการบด

ผสม 1 นาที ใส่ทั้งหมด 3 ครั้ง บดผสมต่อไปจนครบเวลา 11 นาที แล้วนำยางคอมปาวด์บดต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เติมน้ำแล้วบดผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมน้ำอีก 1 นาที และบดผสมเป็นเวลา 3 นาที สุดท้ายปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้แผ่นยางคอมปาวด์ที่มีความหนาประมาณ 10 มม. และนำยางคอมปาวด์ที่ได้เหลื้ดตัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 ซม. เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้

แม่พิมพ์สำหรับทดสอบการกระจายตัวอุณหภูมิของยางคอมปาวด์แสดงในรูปที่ 1 โดยสามารถวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแม่พิมพ์ได้ และสามารถปรับเปลี่ยนความหนาได้ การเตรียมการทดสอบเริ่มจากนำยางคอมปาวด์ที่เตรียมเป็นแผ่นกลมวางลงในแม่พิมพ์ และวางเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ให้ปลายหัววัดอุณหภูมิอยู่บริเวณตรงกลางของยางคอมปาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) วางยางคอมปาวด์และชุดตรวจวัดอุณหภูมิในแต่ละชั้นจนได้ความหนาตามต้องการจากนั้นนำแม่พิมพ์ทดสอบประกอบเข้ากับ

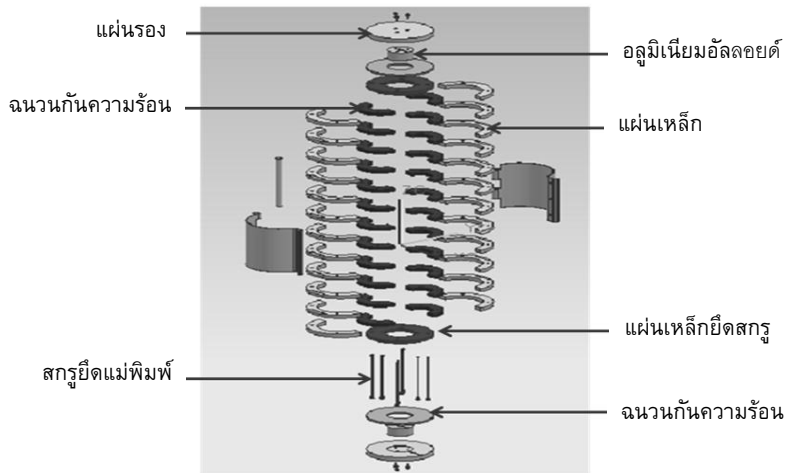
ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)						
	nonS	CV	SEV	EV	CB	Si	Ca
NR(STR5L)	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4	4	4	4
Stearic Acid	2	2	2	2	2	2	2
Carbon Black	-	-	-	-	0, 30, 45, 60	-	-
SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	30, 60	-
CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	30, 60
Sulphur	-	2.4	1.6	0.8	-	2.4	2.4
PEG	-	-	-	-	-	1.44, 3.6	-
CBS	1.6	0.8	1.6	2.4	-	0.8	0.8
Aromatic Oil	-	-	-	-	0, 2, 3, 4	-	-

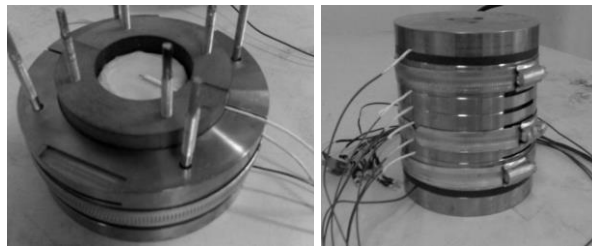
NOTE: phr = part per hundred of rubber by weight

ชุดให้ความร้อนจากภายนอกที่มีลักษณะแบบเข็มขัดรัด (Heater band) ที่บริเวณผิวนอกของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) และเชื่อมต่อเข้ากับชุดจัดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง (Data Logging System) ซึ่ง

ติดตั้งร่วมกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองต่อไป ซึ่งตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเนื้อยางและที่บริเวณผิวแม่พิมพ์ แสดงในรูปที่ 3



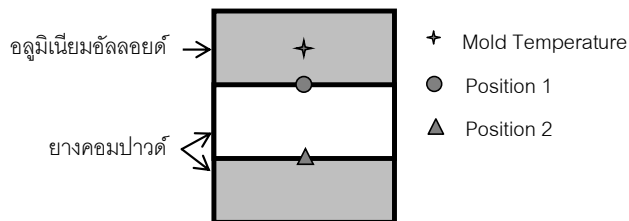
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ทดสอบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น



ก.

ข.

รูปที่ 2 การประกอบแม่พิมพ์ทดสอบ (ก) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและ (ข) แม่พิมพ์ที่ประกอบแล้ว



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ



### 3. การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน

อัตราการนำความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ชิ้นงาน  
ยังสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\dot{Q}_{in} = K_c A (T_m - T_r) \quad (1)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{in}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์  
เข้าสู่ชิ้นงานยาง (W)

$K_c$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat  
Transfer Coefficient) ระหว่างแม่พิมพ์และยาง  
(W/m<sup>2</sup>·K)

$A$  = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ  
ความร้อน (m<sup>2</sup>)

$T_m$  = อุณหภูมิแม่พิมพ์ (K)

$T_r$  = อุณหภูมิยางคอมปาวด์ (K)

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์สู่  
สิ่งแวดล้อม (Heat Loss) สามารถคำนวณได้ดัง  
สมการที่ 2

$$\dot{Q}_{outside} = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}} \quad (2)$$

โดย  $\dot{Q}_{outside}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจาก  
แม่พิมพ์สู่สิ่งแวดล้อม (W)

$T_1$  = อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ด้านนอก (K)

$T_2$  = อุณหภูมิภายในเนื้อยาง (K)

$R_{tot}$  = ความต้านทานการนำความร้อนรวมผ่าน

ผนังทรงกระบอก (K/W) สามารถคำนวณได้  
จากสมการที่ 3

$$R_{tot} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{2\pi L K_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi L K_2} \quad (3)$$

เมื่อ  $R_{tot}$  = ความต้านทานการนำความร้อนรวมผ่าน  
ผนังทรงกระบอก (K/W)

$r_1$  = รัศมีของแม่พิมพ์ (m)

$r_2$  = รัศมีของฉนวนใยหิน (m)

$r_3$  = รัศมีของชิ้นงานยาง (m)

$L$  = ความหนาของชิ้นงานยาง (m)

$K_1$  = ค่าการนำความร้อนของเหล็กแม่พิมพ์ S50C  
(W/m.K)

$K_2$  = ค่าการนำความร้อนของฉนวนใยหิน (W/m.K)

ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน  
จากชิ้นงานยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป ได้ดัง  
สมการที่ 4

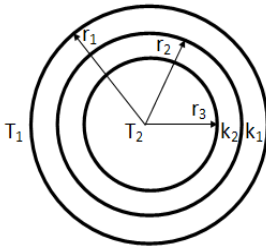
$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{outside} \quad (4)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{out}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงาน  
ยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป (W) ใช้เป็นอัตรา  
การถ่ายเทความร้อนสำหรับคำนวณค่าการนำความ  
ร้อนของยางคอมปาวด์ที่ความหนาต่างๆ โดยค่าการ  
นำความร้อนของยางที่ความหนาต่างๆสามารถ  
คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$K_r = \frac{\dot{Q}_{out}}{A} \left( \frac{\Delta X}{\Delta T} \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $K_r$  = ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์  
(W/m.K)

สำหรับตัวแปรในการคำนวณค่าการนำความร้อน  
แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณค่าการนำความร้อน

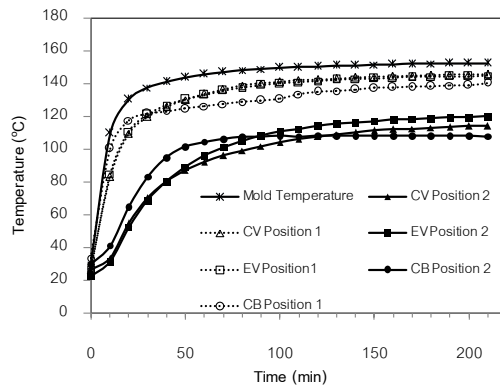
#### 4. ผลการวิเคราะห์

##### 4.1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์

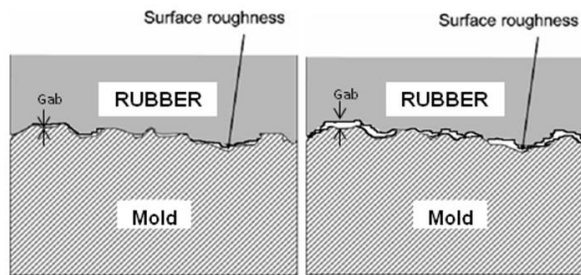
รูปที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ จากผลการตรวจวัดพบว่าเมื่อยางคอมปาวด์ได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ (Mold Temperature) ในช่วง 30 นาทีแรกยางคอมปาวด์ในระบบ CV ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งตำแหน่งที่ 1 (CB Position 1) และตำแหน่งที่ 2 (CB Position 2) หลังจากนั้นเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่น้อยกว่ายางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมเขม่าดำที่ใช้ระบบ CV และ EV โดยหากพิจารณาในตำแหน่งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำเริ่มมีค่าคงที่ภายหลังจากเวลา 50 นาที ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำสามารถแพร่กระจายความร้อนได้รวดเร็วส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปเร็วขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์) เป็นผลให้ที่บริเวณสัมผัสระหว่างผิวยางและผิวแม่พิมพ์เกิดช่องว่างเล็กๆ เนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ของยางคอมปาวด์ที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ที่ลดลง [14] และหากพิจารณาอิทธิพลของ

ระบบการคงรูปพบว่า ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์ (ตำแหน่งที่ 1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่หากพิจารณาในตำแหน่งที่ 2 พบว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่ายางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งมีส่วนผสมของกำมะถันในปริมาณมาก [1] สามารถเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ได้รวดเร็วกว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV จึงเกิดการหดตัวออกจากผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

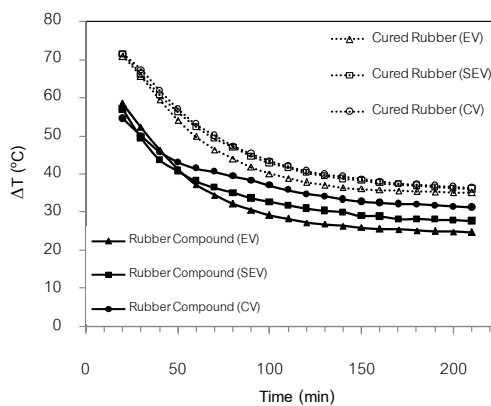
รูปที่ 7 แสดงผลต่างอุณหภูมิ (Temperature Difference:  $\Delta T$ ) ระหว่างบริเวณที่ยางสัมผัสผิวแม่พิมพ์ (Position 1) และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง (Position 2) ของยางคอมปาวด์และยางที่คงรูปแล้ว (Cured Rubber) ที่ความหนา 10 mm จากผลการวิเคราะห์พบว่าในกรณีของยางที่คงรูปแล้วทั้ง 3 ระบบคือ CV, EV และ SEV มีค่าผลต่างของอุณหภูมิต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตร พบว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด รองลงมาคือยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ SEV และ EV ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลผลต่างของอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปทั้ง 3 ระบบ มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ SEV และ CV ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำและยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV



รูปที่ 6 การเกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างบริเวณผิวแม่พิมพ์และยางคอมปาวด์ (ก) ก่อนการเกิดปฏิกิริยาของรูป และ (ข) ขนาดช่องว่างที่เพิ่มขึ้นจากการหดตัวของยางคอมปาวด์ในขณะที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาของรูป

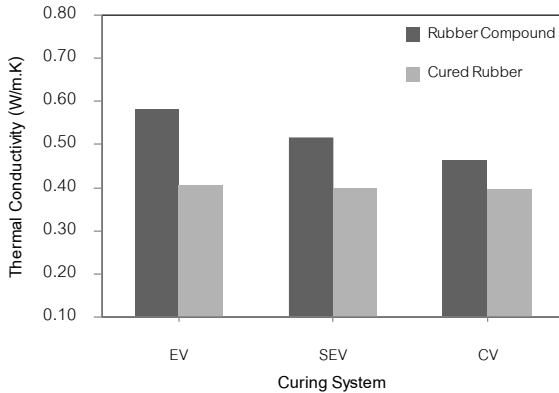


รูปที่ 7 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง ของยางคงรูปและยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV, EV และ SEV

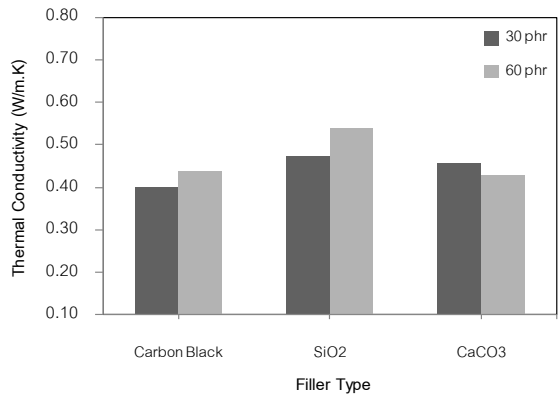




บทความวิจัย



รูปที่ 8 ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและคอมปาวด์ที่ระบบการคงรูปแบบ CV, EV และ SEV



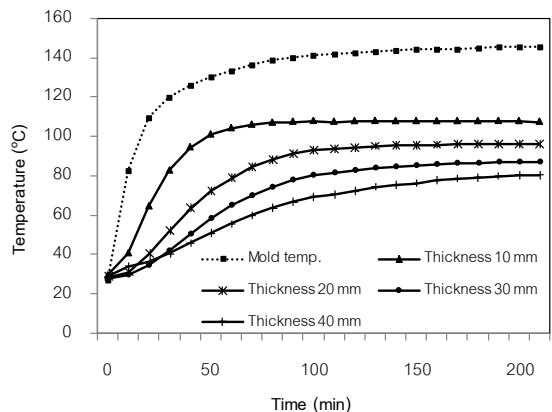
รูปที่ 9 ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติม CB, SiO<sub>2</sub> และ CaCO<sub>3</sub> ปริมาณ 30 และ 60 phr

4.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์

หากพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมได้แก่ เขม่าดำ (CB) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ที่ผสมในยางคอมปาวด์ปริมาณ 30 และ 60 phr ที่มีต่อค่าการนำความร้อนที่วิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 9 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่ผสม CB และ SiO<sub>2</sub> มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณผสม ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ CaCO<sub>3</sub> ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดต่ำลง ทั้งนี้การที่ค่า Thermal Conductivity ของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำมีค่าต่ำกว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมซิลิกา อาจเนื่องมาจากการหดตัวที่มากกว่าซึ่งก่อให้เกิดการลดลงของผิวสัมผัสระหว่างยางคอมปาวด์กับผิวโลหะของแม่พิมพ์

4.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุกรมุภายในยางคอมปาวด์

รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ที่ความหนาต่างๆ กัน จากผลการตรวจวัดพบว่าเมื่อ



รูปที่ 10 อุณหภูมิของยางที่ระดับความหนาต่างๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรนำความร้อนของยางคอมปาวด์

อุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก (0-100 นาที) อุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่หลังจากนั้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นก็ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่บริเวณผิวแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากบริเวณที่ยางคอมปาวด์สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ เกิดปฏิกิริยาของรูปที่ชั้นผิว จึงเกิดการแยกตัวออกจากผิวแม่พิมพ์ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ลดลง



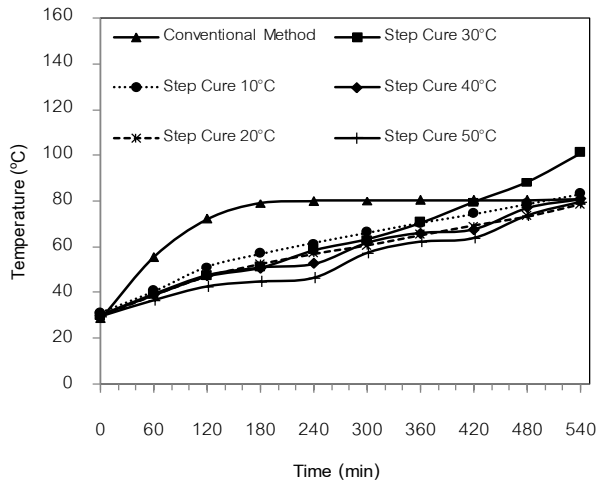
จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่อยู่ในระดับลึกลงจากผิวตามความหนาไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ยางคอมปาวด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาของรูปที่สมบูรณ์ได้ทั่วถึงตลอดความหนาของชิ้นงาน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบปกติ (Conventional Method) ไม่สามารถใช้ในการอัดขึ้นรูปยางที่มีความหนาหรือส่วนผสมของเคมีจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ทดลองใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยมีหลักการ คือ การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ตามลำดับขั้น เพื่อไม่ให้ยางคอมปาวด์ที่บริเวณผิวเริ่มเกิดปฏิกิริยาของรูป โดยมีวิธีการที่ใช้ในการทดลองดัง

แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่คงรูปด้วยวิธีปกติ พบว่ากระบวนการคงรูปแบบปกติที่ช่วงเริ่มต้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนในช่วงสุดท้ายไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ยางคอมปาวด์ได้อีก (อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับศูนย์) ในขณะที่ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้นยังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเช่นเดียวกันตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีการสุกตัวที่สม่ำเสมอ และมีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีขึ้น

ตารางที่ 2 วิธีการที่ใช้ในการอบคงรูปแบบลำดับขั้น

Step Cured	วิธีการ
10°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
20°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 48 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 20°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง 48 นาที จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
30°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 90°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 70°C) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง 15 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 30°C ทุกๆ 2 ชั่วโมง 15 นาที จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
40°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 40°C ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
50°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 80°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 60°C) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50°C ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง



รูปที่ 11 การคงรูปแบบปกติและการคงรูปแบบลำดับขั้น

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์และยางคงรูป พบว่ายางคงรูปมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมปาวด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมปาวด์ที่เติมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การเติมเขม่าดำในปริมาณสูงและชิ้นงานที่มีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้มีการแพร่กระจายอุณหภูมิภายในสารประกอบได้ดีขึ้น

ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Hofmann, Rubber technology handbook, Hanser Publishers, NY, USA, 1989.
- [2] S.P. Johnson, Rubber processing and introduction, Hanser Gardner Publications Inc., OH, USA, 2001.
- [3] D.M. Park, W.H. Hong, S.G. Kim and H.J. Kim, Heat generation of filled rubber vulcanizates and its relationship with vulcanizate network structures, European Polymer Journal, 2000, 36(11), 2429-2436.



- [4] R.L. Fan, Y. Zhang, F. Li, Y.X. Zhang, K. Sun and Y.Z. Fan, Effect of high-temperature curing on the crosslink structures and dynamic mechanical properties of gum and N330-filled natural rubber vulcanizates, *Polymer Testing*, 2001, 20(8), 925–936.
- [5] A. Arrillaga, A.M. Zaldua, R.M. Atxurra, and A.S. Farid, Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds, *European Polymer Journal*, 2007, 43(11), 4783-4799.
- [6] J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich, *Science and technology of rubber*, Elsevier, Inc., VT, USA, 2005.
- [7] J.G. Sommer, *Elastomer molding technology*, Bookmasters Inc., OH, USA, 2003.
- [8] J.G. Sommer, *Materials, process, and design factor” in Troubleshooting rubber problems*, Hanser Publications, OH, USA, 2014.
- [9] W. Amaro, L. Diviani, D. Montorfano, E. Oberrauch, G. Depinto, S. Segalini, M. Levi and S. Turri, Controlling the shrinkage of polymers for customized shoe sole manufacturing, *International Journal of Computer Intergrated Manufacturing*, 2004, 17(7), 633-644.
- [10] M.H.R. Ghoreshy and G. Naderi, A new method for the determination of the thermal conductivity of rubber compound, *Iranian Polymer Journal*, 2001, 10(5), 315-320.
- [11] M. Rafei, M.H.R. Ghoreshy, and G. Naderi, Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process, *Computational Materials Science*, 2009, 47(2), 539-547.
- [12] C.E. Barnett, *Thermal properties of rubber compounds*, *Industrial and Engineering Chemistry*, 1934, 26(3), 303-306.
- [13] R.J.W. Walker, *The effect of crosslink density on the thermal conductivity of rubber*, Thesis, University of Lancaster, United Kingdom, 1982.
- [14] N.S. Saxena, P. Pradeep, G. Mathew, S. Thomas, M. Gustafsson and S.E. Gustafsson, Thermal conductivity of styrene butadiene rubber compound with natural rubber prophylactics waste as filler, *European Polymer Journal*, 1999, 35(9), 1687-1693.
- [15] N.C. Tham, G. Juttner, C. Loser, T. Pham and M. Gehde, Determination of the heat transfer coefficient from short-shots studies and precise simulation of microinjection molding, *Polymer Engineering and Science*, 2010, 50(1), 165-173.