



## ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพฤติกรรมการนำความร้อนของสารประกอบยางธรรมชาติ  
ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา

โดย สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ

ตุลาคม 2553

ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพฤติกรรมการนำความร้อนของสารประกอบยางธรรมชาติ  
ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- |                                |                                                 |
|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1. ดร. สมเจตน์ พัชรพันธ์       | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์     |
| 2. นางสาวรัชดาภรณ์ สุดโต       | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์     |
| 3. นายธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนขันธุ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 4. นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว          | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## สารบัญ

|                             | หน้า |
|-----------------------------|------|
| บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร | 1    |
| บทคัดย่อ                    | 4    |
| เนื้อหา                     |      |
| ความสำคัญและที่มาของโครงการ | 6    |
| วัตถุประสงค์                | 7    |
| วิธีการ                     | 7    |
| ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล      | 14   |
| สรุปผล                      | 24   |
| ข้อเสนอแนะ                  | 24   |
| เอกสารอ้างอิง               | 25   |
| ภาคผนวก                     | 26   |

## แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาพฤติกรรมการนำความร้อนของสารประกอบยางธรรมชาติในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา

(ภาษาอังกฤษ): An Investigation of Thermal Conductivity Behavior of Natural Rubber Compounds during Compression molding process: Thick wall moldings

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์/โทรสาร 02-942-8555 ต่อ 2121/02-955-1811 E-mail fengsjpc@ku.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| นางสาวรัชดาภรณ์ สุดโต      | นักศึกษา     |
| นายธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนพันธ์ | ผู้ร่วมวิจัย |
| นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว         | ผู้ร่วมวิจัย |

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2552 ถึงวันที่ 14 เมษายน 2553

### ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

กระบวนการขึ้นด้วยแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาหรือผนังหนาหรือมีความซับซ้อน มักพบปัญหาเปอร์เซ็นต์การสุกตัวที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven Cure) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากค่าการนำความร้อนของสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและสถานะการคงรูป (State of Cure) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของยางคอมพาวด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป รวมทั้งนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพระดับการคงรูปของผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตในการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับยางคอมพาวด์ในกรณีที่เกิดขึ้นงานที่มีความหนา

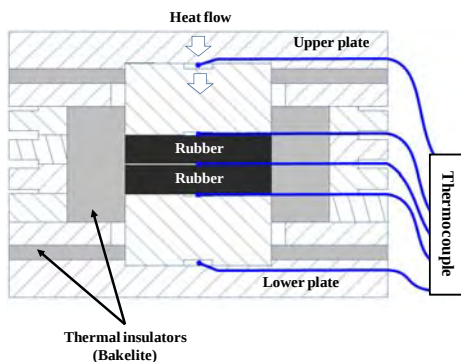
### วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์เข้าสู่สารประกอบยาง โดยใช้ชุดเครื่องมือทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

### ผลการดำเนินงาน

#### 1. วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนของสารประกอบยาง โดยการวัดอุณหภูมิภายในสารประกอบยางในแต่ละชั้นความหนา ดังภาพที่ 1 ซึ่งใช้ร่วมกับเครื่องอัดขึ้นรูปและเก็บข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงานยางโดยใช้ชุดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง (High Speed Data Logging System) เพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสารประกอบยาง และสามารถนำไปคำนวณค่าการนำความร้อนของสารประกอบยางได้ดังสมการ



$$K = \frac{Q}{A} \left( \frac{\Delta x}{\Delta T} \right)$$

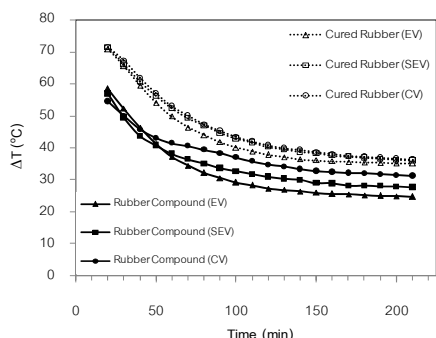
$K$  = ค่าการนำความร้อนของยาง ( $W/m^2.K$ )  
 $Q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่งผ่านยังชั้นความลึกลับ ( $W$ )  
 $A$  = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ( $m^2$ )  
 $\Delta x$  = ระยะห่างระหว่างชั้น ( $m$ )  
 $\Delta T$  = ผลต่างอุณหภูมิ ( $K$ )

ภาพที่ 1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในสารประกอบยาง

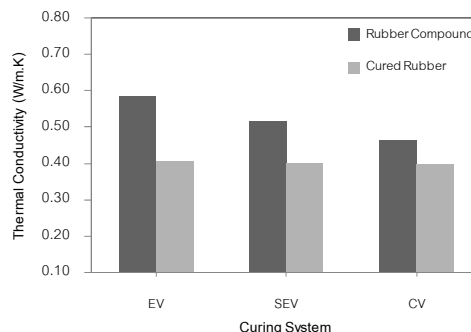
## 2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

### อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อการกระจายตัวของอนุหุมิและค่าการนำความร้อน

จากภาพที่ 2 แสดงถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิของยางที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง (Temperature Difference,  $\Delta T$ ) พบว่าผลต่างของอุณหภูมิยางที่คงรูปแล้ว (Cured Rubber) พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน และมีค่าผลต่างของอุณหภูมิที่สูงกว่ายางที่ไม่ผ่านกระบวนการคงรูป (Uncured Rubber) และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุหุมิของสารประกอบยางในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ พบว่า สารประกอบยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV SEV และ EV มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ซึ่งจากผลต่างของอุณหภูมิ ณ ที่อุณหภูมิคงที่ สามารถนำไปคำนวณค่าการนำความร้อนได้ ดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่า ค่าการนำความร้อนของสารประกอบยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV SEV และ CV มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ในขณะที่ยางซึ่งผ่านการคงรูปแล้วมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงและมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกกระบวนการคงรูป



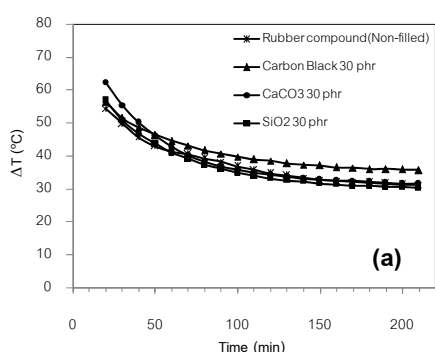
ภาพที่ 2 ผลต่างอุณหภูมิของยางคงรูปและสารประกอบยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบต่างๆ



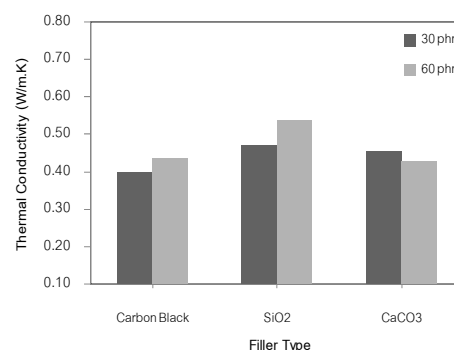
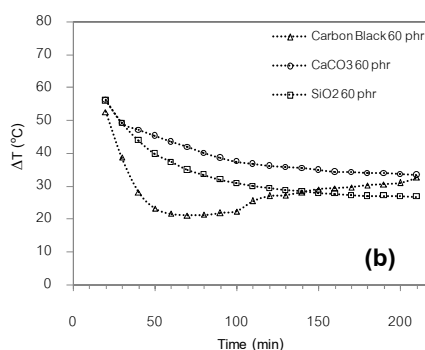
ภาพที่ 3 ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและสารประกอบยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบต่างๆ

### อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุหุมิและค่าการนำความร้อน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อผลต่างอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 4a พบว่า ที่ปริมาณซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr มีผลต่างอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม ในขณะที่การเติมเขม่าดำทำให้มีผลต่างของอุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเขม่าดำ รวมถึงค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าเนื้อยาง อย่างไรก็ตามที่ระดับปริมาณเขม่าดำ 60 phr ดังแสดงในภาพที่ 4b ผลต่างของอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจึงเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณเขม่าดำเข้าไปในสารประกอบยางทำให้การคงรูปเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในบริเวณที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ เป็นสาเหตุให้บริเวณที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เกิดการสุกตัวและหดตัว ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์มีค่าลดลง ผลต่างของอุณหภูมิจึงมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



ภาพที่ 4 อิทธิพลของชนิดและสารตัวเติมที่มีต่อผลต่างของอุณหภูมิในสารประกอบยาง



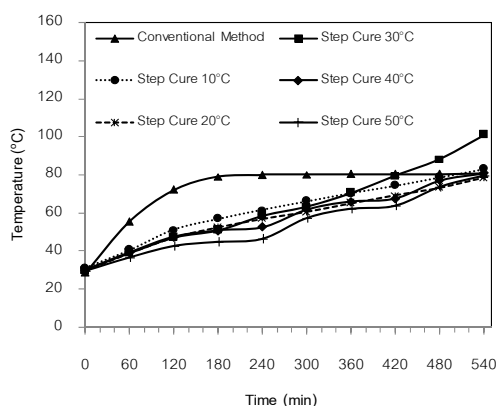
ภาพที่ 5 อิทธิพลของชนิดและสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนในสารประกอบยาง

จากผลต่างของอุณหภูมิของสารตัวเติมชนิดต่างๆ สามารถคำนวณหาค่าการนำความร้อน ดังภาพที่ 5 พบว่า ค่าการนำความร้อนของสารประกอบยางเติมเขม่าดำและซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ยางเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม อย่างไรก็ตามโดยปกติสารประกอบยางเติมเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนและการกระจายตัวของอนุหุมิได้ดี แต่สาเหตุที่ทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากการทดลองนี้ได้ คำนวณค่า

การนำความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งในเวลานั้นสารประกอบยางที่เติมเขม่าดำได้ผ่านกระบวนการคงรูปเกือบสมบูรณ์ ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์ลดลง ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าสารประกอบยางที่เติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต

#### เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในสารประกอบยาง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการคงรูปแบบปกติ (Conventional Method) ไม่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาหรือมีการผสมเขม่าดำในปริมาณที่สูงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดลองใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยมีหลักการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ตามลำดับขั้นครั้งละ  $10^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในสารประกอบยาง ดังภาพที่ 6 ซึ่งพบว่ากระบวนการคงรูปแบบปกติ ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารประกอบยางได้เมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้นครั้งละ  $30^{\circ}\text{C}$  มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนดีที่สุด ส่งผลระดับการสุกตัวที่บริเวณชั้นแกนกลางมีค่ามากที่สุด



| วิธีการคงรูป                              | %Cure |
|-------------------------------------------|-------|
| การคงรูปแบบปกติ                           | 51.79 |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น $10^{\circ}\text{C}$ | 69.53 |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น $20^{\circ}\text{C}$ | 35.32 |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น $30^{\circ}\text{C}$ | 99.29 |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น $40^{\circ}\text{C}$ | 55.49 |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น $50^{\circ}\text{C}$ | 43.49 |

ภาพที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคนาโนในสารประกอบยางและปริมาณการสุกตัว

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระบบการคงรูปและชนิดรวมไปถึงปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนของสารประกอบยาง ซึ่งพบว่าในยางที่ไม่ผ่านการคงรูป ระบบการคงรูปแบบ CV มีค่าการนำความร้อนที่มากกว่าระบบ SEV และ EV ตามลำดับ ในขณะที่ยางที่คงรูปแล้วมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าและใกล้เคียงกันทั้งสามระบบ เมื่อพิจารณาถึงชนิดและปริมาณสารตัวเติมพบว่า การเติมซิลิกาให้ค่าการนำความร้อนของยางที่ดีกว่าเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนของเขม่าดำ เป็นค่าของสารประกอบยางซึ่งผ่านการคงรูปบางส่วนแล้ว จึงทำให้มีค่าที่ต่ำกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ในขณะที่เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้นสามารถเพิ่มปริมาณการสุกตัวของเนื้อยางที่มีความหนาได้

#### ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

ศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในสารประกอบยาง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ยางสุกตัวอย่างทั่วถึงตลอดความหนา ยกตัวอย่างเช่น การปรับสูตรของสารประกอบยางให้มีอัตราส่วนการคงรูปที่แตกต่างกัน โดยที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ใช้สารประกอบยางที่มีอัตราส่วนการคงรูปช้ากว่าบริเวณแกนกลาง เพื่อให้สารประกอบยางมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนจนถึงอนุภาคนาโนในการคงรูป โดยใช้เวลาในการคงรูปที่สั้นที่สุด

#### ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอผลงานแบบปากเปล่า (Oral presentation) ในงาน 6th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT-6) ในหัวข้อเรื่อง “Effect of Curing System and Carbon Black Content on Temperature Profiles during Rubber Compression Molding Process”

- งานวิจัยนี้ได้รับรางวัล Industrial Award for Outstanding Engineering Project and Thesis ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2552

## บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา มักประสบปัญหาเรื่องการสุกตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการคงรูป งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการทดลอง พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพและระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมมีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางที่ดีกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมเซมาดำ และเมื่อนำผลการกระจายตัวของอุณหภูมิไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์และยางคงรูป พบว่า ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมและอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมพาวนด์ที่เติมเซมาดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมพาวนด์เริ่มเกิดการคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การเติมเซมาดำในปริมาณสูงและชิ้นงานมีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้มีการแพร่กระจายอุณหภูมิภายในสารประกอบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: ค่าการนำความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิ ยางคอมพาวนด์ สารตัวเติม ระบบการคงรูป กระบวนการอัดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา

## ABSTRACT

Uneven cure of thick-wall rubber products is regarded as a 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 curing system, filler type and content on the temperature distribution during the compression of thick-wall rubber moldings. A special compression mold was designed and constructed in order to measure the temperature profiles across the thickness of rubber parts. The measured results obtained from this work indicated that the rubber compound filled with carbon black and the efficient vulcanizing system gave the better temperature distribution across the thickness. With regard to the thermal conductivity of rubber compounds and vulcanizates, it was found that the thermal conductivity increased with the increase of filler content and mold temperature. In addition, the thermal conductivity of cured rubber dramatically decreased as compared to uncured compound. Furthermore, it should be noted that the decreasing thermal conductivity of rubber compound, especially for high carbon black loading and thick-wall moldings, directly affected the uneven cure of rubber product. In this work, the step cure was purposed in order 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 conventional cure.

Keywords: Thermal conductivity, Temperature distribution, Rubber compound, Filler, Vulcanizing system, Compression molding process, Thick-wall moldings

## 1. ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบได้มากที่สุดในโลก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกับประเทศคู่แข่ง แต่อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูป ยางดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการ แปรรูปจากยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนิยมขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (Transfer Molding) สำหรับในประเทศไทยกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องมาจากการลงทุนต่ำกว่า กระบวนการอื่นๆ ทั้งในส่วนแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ อย่างไรก็ตามกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่เกิดปัญหาใน กระบวนการผลิตมาก เช่น การเกิดครีบ (Flash) ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เวลาที่ใช้ต่อรอบการทำงาน (Cycle Time) สูง กว่ากระบวนการอื่น การหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage) ที่ควบคุมได้ยากกว่ากระบวนการอื่น หรือเปอร์เซ็นต์การสุกตัว (Degree of Cure) ที่ไม่เท่ากันของผลิตภัณฑ์ที่มีผนังหนา (Thick-Wall Molding) หรือมีความซับซ้อน (Complex Shape) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกระจายตัวของความร้อนหรืออุณหภูมิ (Temperature Distribution) ภายในแม่พิมพ์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ เกิดการสุกตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้การผลิตชิ้นงานที่มีความหนาไม่ได้คุณภาพ

สาเหตุของการสุกตัวของยางที่ไม่เท่ากันตลอดความหนาของชิ้นงาน อาจมีสาเหตุหลักมาจากประสิทธิภาพการ ถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่เนื้อยางที่เปลี่ยนไป โดยในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจาก แม่พิมพ์เข้าสู่เนื้อยาง ทำให้ยางคอมพาวด์เริ่มเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง และใน ขณะเดียวกันสมบัติการนำความร้อนของยางเปลี่ยนไปตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ โดยในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางสูงขึ้นและในบางครั้งไม่สามารถแก้ปัญหาได้ และสำหรับ ภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่บางส่วนเริ่มมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการไหล (Flow Pattern) ภายในแม่พิมพ์ รวมถึงการกระจายตัว ของอุณหภูมิภายในเนื้อยางในขณะขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่ง สำคัญสำหรับการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรม (Input Data) ยกตัวอย่างเช่น ค่าความ หนืด (Viscosity) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน โดยชิ้นงานทดสอบมักแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ หรือมีความ หนาหลายๆ ส่งผลให้อาจเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาปัจจัยสำคัญที่อาจส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ ภายในแม่พิมพ์ที่มีความหนา โดยปัจจัยหลักที่ศึกษา ได้แก่ ระบบ การคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม โดยศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมพาวด์ จาก ชุดทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นให้มีความใกล้เคียงกับการใช้งานในอุตสาหกรรมจริง ซึ่งผลสำเร็จที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ แก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตในการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับ ยางคอมพาวด์ในกรณีที่มีผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์โดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

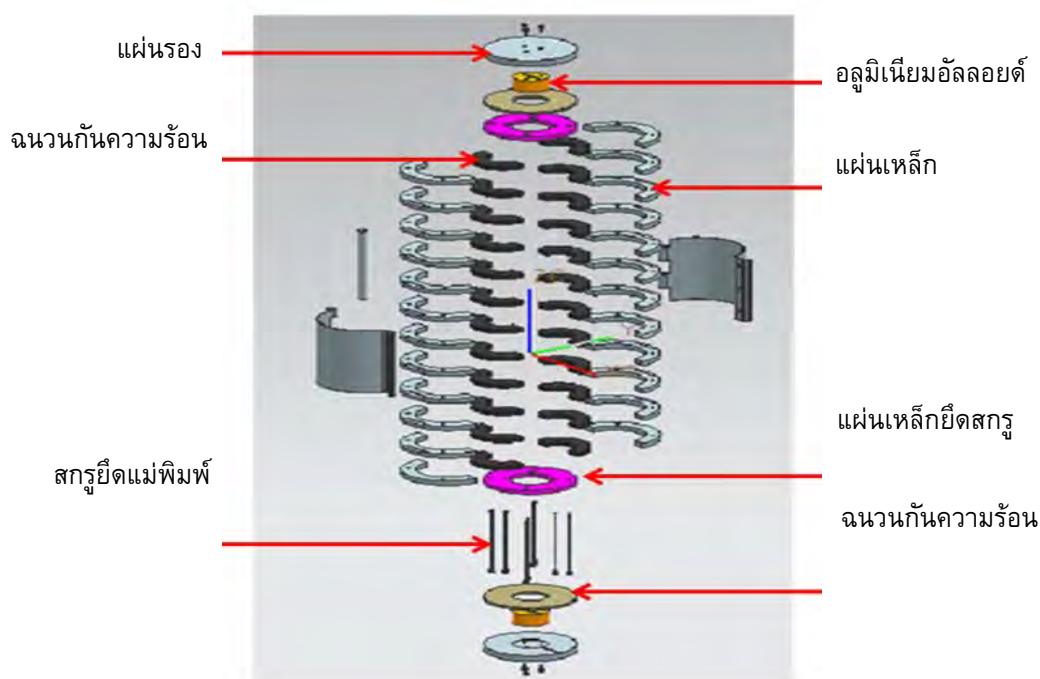
## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมพาวนด์ โดยการใช้ชุดเครื่องมือทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

## 3. วิธีการ

### 3.1 การออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

ออกแบบแม่พิมพ์ทดสอบโดยใช้โปรแกรมยูนิ-กราฟฟิก (Uni-Graphic) โดยสามารถใช้ทำการอัดขึ้นรูปและตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ตลอดความหนา ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป แม่พิมพ์ที่ได้ได้ออกแบบนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนความหนาในการทดสอบได้ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1

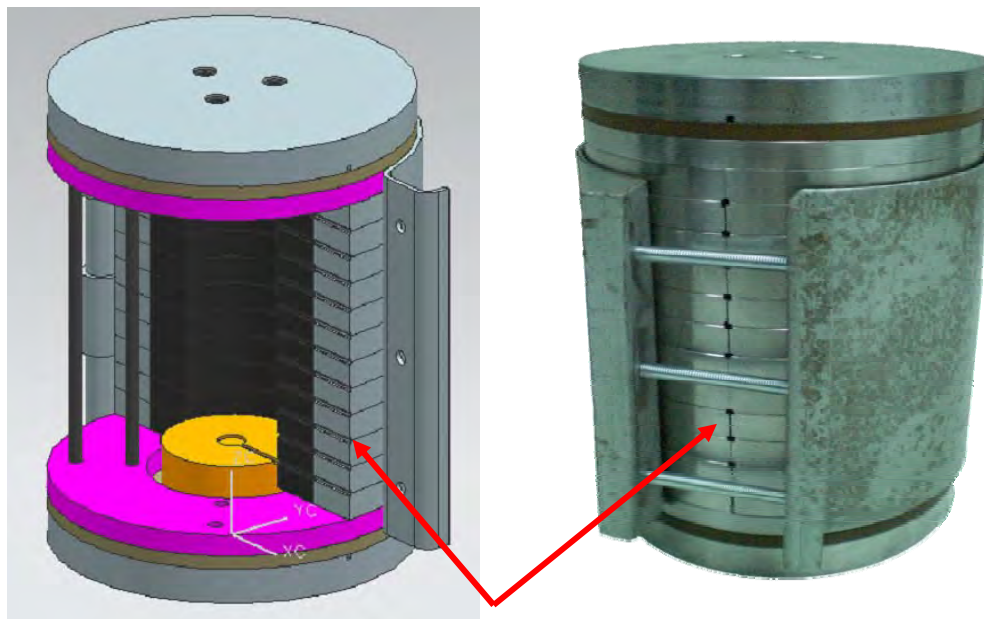


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิ

- แผ่นรอง ผลิตจากเหล็กเกรด S50C ใช้สำหรับรับแรงดันในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป และถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อน เข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 mm และความหนา 10 mm
- อลูมิเนียมอัลลอยด์ เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี ขึ้นรูปง่าย ใช้เป็นตัวถ่ายเทอุณหภูมิจากแผ่นรองเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และความหนา 25 mm
- ฉนวนกันความร้อน ผลิตจากฉนวนใยหิน (Bakelite) เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากอุปกรณ์ให้ความร้อนด้านบนออกสู่สิ่งแวดล้อมด้านข้างของแม่พิมพ์ และให้ความร้อนถ่ายเทในทิศทางเดียวจากอลูมิเนียมอัลลอยด์มายังชิ้นงานทดสอบ (ในแนวดิ่ง)

- แผ่นเหล็ก ผลิตจากเหล็กเกรด S50C ใช้สำหรับเพิ่มความแข็งแรงให้กับแม่พิมพ์ทดสอบสมบัติการนำความร้อนในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป
- แผ่นเหล็กยึดสกรู เป็นชิ้นส่วนที่มีไว้สำหรับเพิ่มความสะดวกในการประกอบชุดแม่พิมพ์ทดสอบสมบัติการนำความร้อน
- สกรูยึดแม่พิมพ์ ใช้สำหรับยึดประกอบแม่พิมพ์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานทดสอบ การประกอบชุดแม่พิมพ์ทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ที่ได้จัดสร้างขึ้น ดังแสดงในรูป

ที่ 2



ตำแหน่งของชุดวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แม่พิมพ์สำหรับทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

### 3.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ธรรมชาติในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป

นำยางธรรมชาติเกรด STR5L มาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ยางนิ่มและเติม ZnO และ Stearic Acid โดยใช้เวลาในการบดผสม 1 นาที จากนั้นใส่สารตัวเติมและสารกระตุ้นครั้งละ  $1/3$  ของทั้งหมด ใช้เวลาในการบดผสม 1 นาที ใส่ทั้งหมด 3 ครั้ง บดผสมต่อไปจนครบเวลา 11 นาที ได้ยางคอมพาวนด์ดังแสดงในรูปที่ 3 นำยางคอมพาวนด์ธรรมชาติที่ได้มาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ใช้อุณหภูมิลูกกลิ้ง  $70^{\circ}\text{C}$  ใส่สารตัวเร่งแล้วจึงบดผสมเป็นเวลา 1 นาที ต่อมาใส่กำมะถันและบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที โดยในขณะการบดผสมต้องใช้มีดกรีดยางเพื่อให้สารเคมีทั้งหมดผสมเข้ากันทั่วถึง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 การบดผสมยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด



รูปที่ 4 การบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง

เมื่อสารเคมีและยางผสมเข้ากันแล้ว ปรับช่องระหว่างลูกกลิ้งให้ได้ความกว้างและความหนาตามที่ต้องการ (ความหนาประมาณ 9 mm) จากนั้นใช้มีดตัดยางและนำยางที่มีลักษณะเป็นแผ่นยาวออกจากเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5(a) และตัดแบ่งยางเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคอมพาวนด์คือตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5x5 cm เพื่อทดสอบหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูปที่เหมาะสมด้วยเครื่อง ODR โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที และตัดยางคอมพาวนด์เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5x10 cm ดังแสดงในรูปที่ 5(b) เพื่อทดสอบหาความหนืดของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (ผลการทดสอบความหนืดมูนนี่และระยะเวลาคงรูปแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 และ 2) และนำยางคอมพาวนด์ที่เหลือตัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 5(c) เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น สูตรยางและปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5 ยางคอมพาวนด์ที่เตรียมได้จากการบดผสม

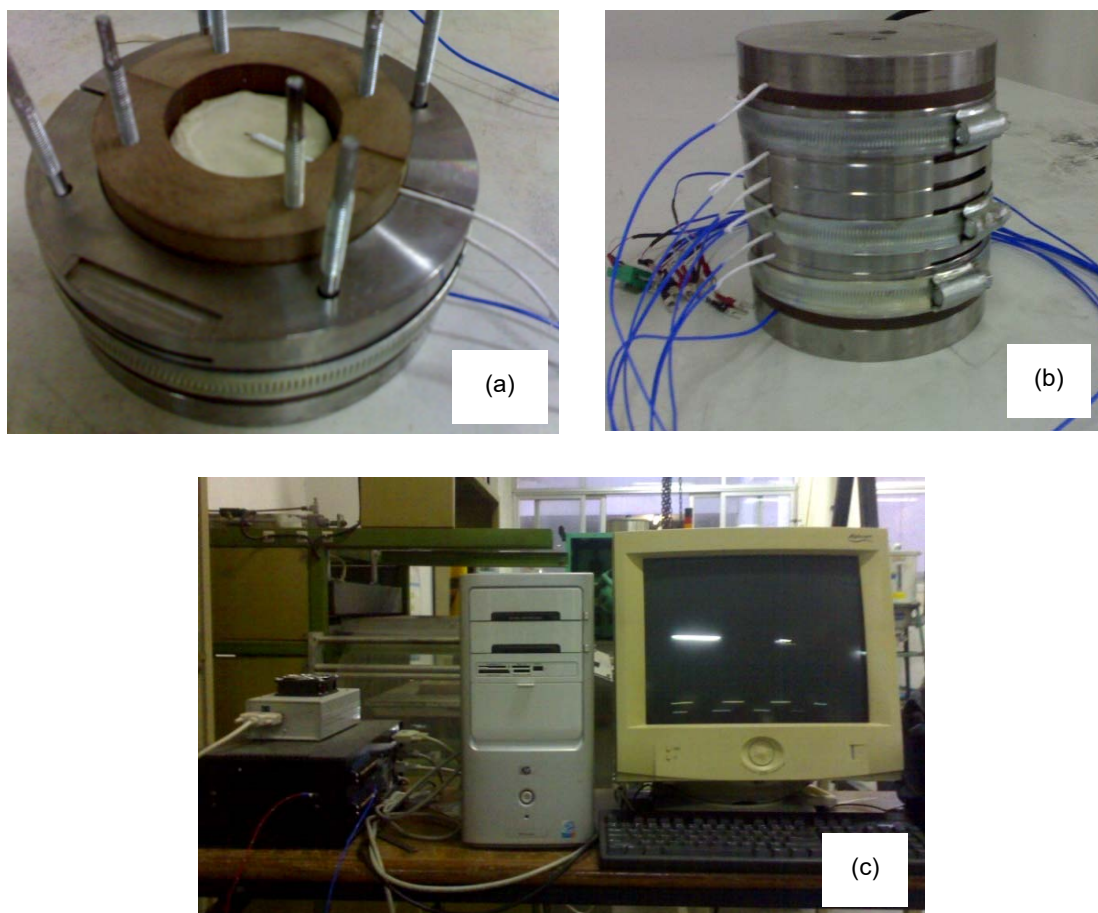
ตารางที่ 1 สูตรยางและปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

| ส่วนประกอบ        | ปริมาณ (phr*) |     |     |     |            |           |                   |
|-------------------|---------------|-----|-----|-----|------------|-----------|-------------------|
|                   | Non-S         | CV  | SEV | EV  | CB         | Silica    | CaCO <sub>3</sub> |
| 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 | -         | -                 |
| Silica            | -             | -   | -   | -   | -          | 30,60     | -                 |
| CaCO <sub>3</sub> | -             | -   | -   | -   | -          | -         | 30,60             |
| Sulphur           | -             | 2.4 | 1.6 | 0.8 | 2.4        | 2.4       | 2.4               |
| PEG               | -             | -   | -   | -   | -          | 1.44, 3.6 | -                 |
| CBS               | 1.6           | 0.8 | 1.6 | 2.4 | 0.8        | 0.8       | 0.8               |
| Aromatic Oil      | -             | -   | -   | -   | 0,2, 3, 4  | -         | -                 |

\*Part per hundred of rubber by weight

### 3.3 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันยางคอมพาวนด์จากแม่พิมพ์ทดสอบที่ได้ออกแบบไว้

นำยางคอมพาวนด์ที่เตรียมเป็นแผ่นกลม ดังแสดงในรูปที่ 5(c) ใส่ลงในแม่พิมพ์จากนั้นวางชุดวัดอุณหภูมิโดยให้หัววัดอุณหภูมิอยู่ในบริเวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 6(a) โดยใช้ยางคอมพาวนด์ทั้งหมด 4 ชิ้น แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันยางคอมพาวนด์แสดงในรูปที่ 6(b) จากนั้นจึงนำแม่พิมพ์ทดสอบเข้าเครื่องอัดขึ้นรูปและเชื่อมต่อเข้ากับชุดจัดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 22 จากนั้นโดยตั้งอุณหภูมิที่แผ่นให้ความร้อนด้านบนเท่ากับ 150°C และใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 4 MPa ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 6 (a) การวางยางคอมพาวนด์และตำแหน่งของชุดวัดอุณหภูมิ (b) การตรวจวัดอุณหภูมิตลอดความหนาของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป และ (c) ชุดจัดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง

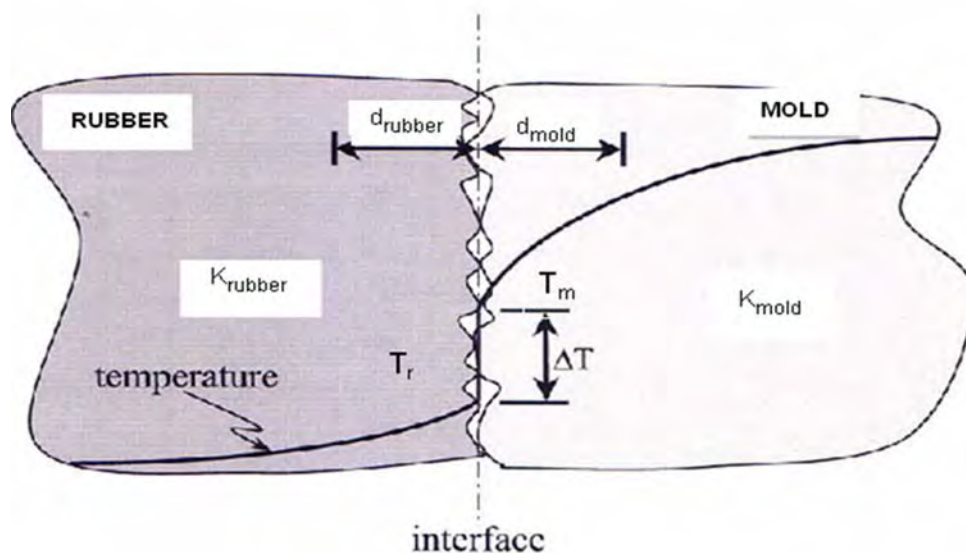
### 3.4 การคำนวณค่าการนำความร้อนจากข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

อัตราการนำความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ชิ้นงานยางสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2 (พิจารณารูปที่ 7 ประกอบ)

$$\dot{Q}_{in} = K_c A (T_m - T_f) \quad (2)$$

โดย  $\dot{Q}_{in}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ชิ้นงานยาง (W)  
 $K_c$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient)  
ระหว่างแม่พิมพ์และยาง ( $W/m^2 \cdot K$ )  
 $A$  = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน ( $m^2$ )  
 $T_m$  = อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (K)

$T_r$  = อุณหภูมิของยาง (K)



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่บริเวณผิวสัมผัสของยางคอมพาวนด์และแม่พิมพ์

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์สู่สิ่งแวดล้อม (Heat Loss) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 (ดูรูปที่ 8 ประกอบ)

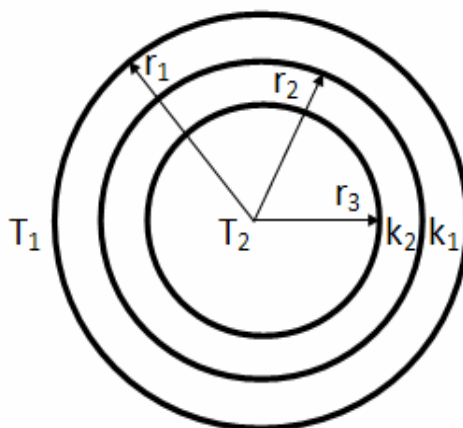
$$\dot{Q}_{outside} = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}} \quad (3)$$

โดย  $\dot{Q}_{outside}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์สู่สิ่งแวดล้อม (W)  
 $T_1$  = อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ด้านนอก (K)  
 $T_2$  = อุณหภูมิภายในเนื้อยาง (K)  
 $R_{tot}$  = ความต้านทานการนำความร้อนรวมผ่านผนังทรงกระบอก (K/W) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$R_{tot} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{2\pi L K_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi L K_2} \quad (4)$$

โดย  $r_1$  = 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)



รูปที่ 8 ตัวแปรต่างๆ ตามแนวรัศมีที่ใช้ในการคำนวณค่าการนำความร้อนของยาง

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป ได้ดังสมการที่ 5

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{outside} \quad (5)$$

โดย  $\dot{Q}_{out}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป (W) และใช้เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับคำนวณค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่มีความหนาต่างๆ

ค่าการนำความร้อนของยางที่มีความหนาต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

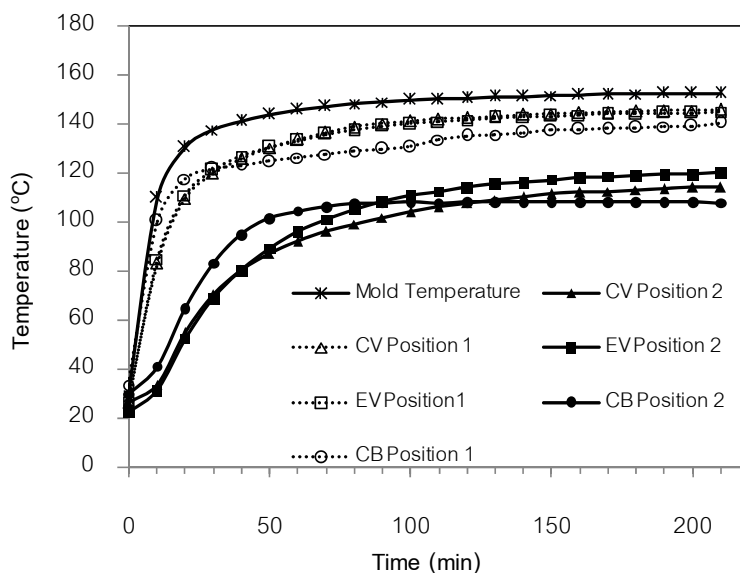
$$K_r = \frac{\dot{Q}_{out}}{A} \left( \frac{\Delta X}{\Delta T} \right) \quad (6)$$

โดย  $K_r$  = ค่าการนำความร้อนของยาง (W/m.K)

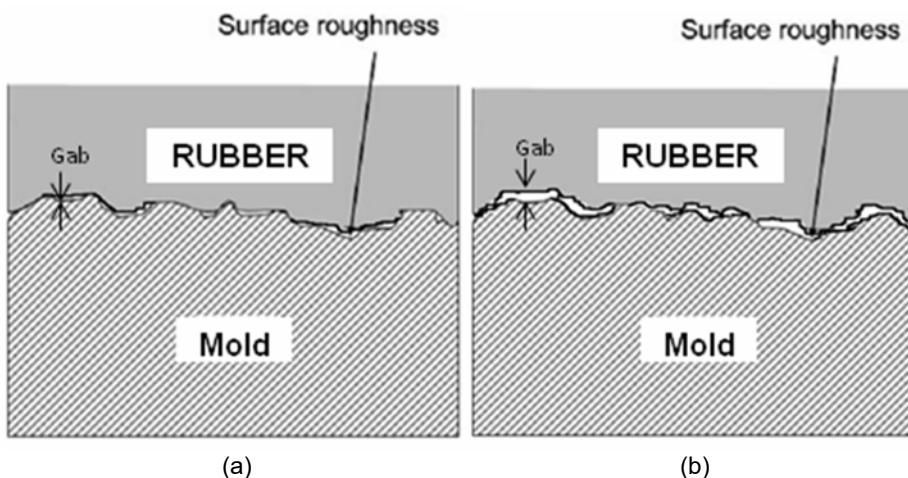
## 4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

จากผลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า เมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ และเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ยางคอมพาวนด์ ในช่วงแรกอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 โดยพบว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ 60 phr มีการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ได้ดีที่สุด แต่หลังจากนั้นเริ่มลดลงและมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที เนื่องจากยางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำสามารถแพร่กระจายความร้อนได้รวดเร็ว ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการบวมเร็วขึ้น (พิจารณาจากเวลาการบวมที่ 90% ในตารางผนวกที่ 2) ส่งผลให้ที่บริเวณสัมผัสระหว่างผิวยางและแม่พิมพ์เกิดช่องว่าง (Air Gab) เนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 10(b) การถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จึงลดลง และเมื่อพิจารณายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV บริเวณตำแหน่งที่ 1 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่แตกต่างกันตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการทดลอง โดยในช่วงแรกการเพิ่มอุณหภูมิของยางคอมพาวนด์มีอัตราที่ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ยางคอมพาวนด์ทั้งสองยังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าว ยางคอมพาวนด์ยังไม่สุกตัวเต็มที่ ผลของการหดตัวของยางคอมพาวนด์ที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์ยังไม่เกิดขึ้นมากนัก ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้มากกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ



รูปที่ 9 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์



**รูปที่ 10** (a) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางคอมพาวนด์และแม่พิมพ์  
และ (b) การเกิดช่องว่างบริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางคอมพาวนด์ที่เริ่มเกิดการคงรูป

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ ณ ตำแหน่งที่ 2 พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่เดิมเขม่าดำมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 1 คือ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจากนั้นเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากตำแหน่งที่ 1 เริ่มเกิดการหดตัว ทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทมาถึงตำแหน่งที่ 2 ได้ อุณหภูมิจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV พบว่า ช่วงเริ่มต้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำกว่าเขม่าดำ และเมื่อเวลาผ่านไปมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิยังคงเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยังคงมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์ได้ดีกว่ายางเดิมเขม่าดำ โดยพบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีเวลาเริ่มคงรูปที่นานกว่า (ดังตารางผนวกที่ 2) เป็นผลให้บริเวณรอยต่อแม่พิมพ์เกิดการหดตัวช้า จึงถ่ายเทความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์ได้ดีกว่า นอกจากนี้จากผลการตรวจวัดอุณหภูมิและการวิเคราะห์ระดับการคงรูปของยาง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Isayev และ Deng (1988) ยังคงแสดงให้เห็นว่า การกำหนดระยะเวลาคงรูปโดยใช้ Rule of Thumb (Sommer, J.G. 2003) เพื่อประมาณค่าเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่มีความหนาซึ่งนิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของยางคอมพาวนด์(โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงาน หรือ ตำแหน่งที่ 2) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของยางคอมพาวนด์ที่บริเวณใกล้ผิวของแม่พิมพ์ (ตำแหน่งที่ 1) ส่งผลให้ชิ้นงานมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดตามความหนาของชิ้นงาน (Uneven Cure) โดยผลของความแตกต่างดังกล่าวยิ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น (ซึ่งจะแสดงในหัวข้อเรื่องอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์)

**ตารางที่ 2** ผลการตรวจวัดอุณหภูมิและระดับการคงรูปของยางคอมพาวนด์

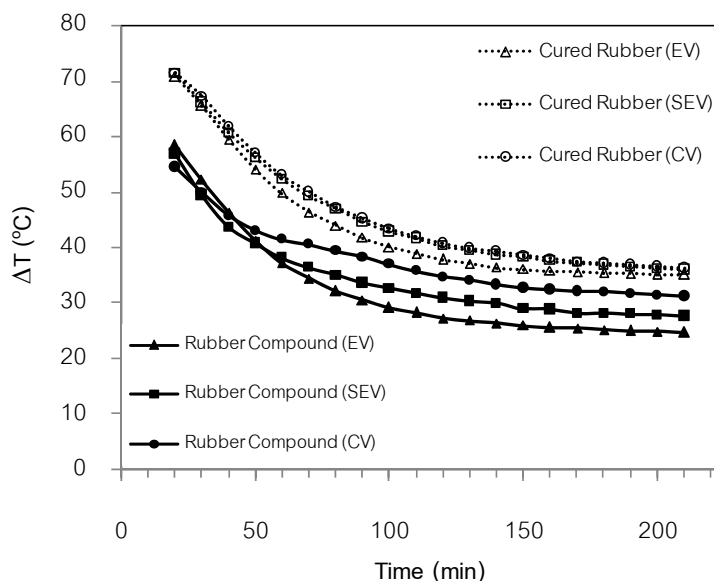
| Position | Compound | Time* (min)<br>(Rule of Thumb) | Temp.<br>(°C) | %Cure | Time (min)<br>(Experiment) | Temp.<br>(°C) | %Cure** |
|----------|----------|--------------------------------|---------------|-------|----------------------------|---------------|---------|
| 1        | CV       | 29.79                          | 118.5         | 29.26 | 200                        | 145.4         | 100.00  |
|          | EV       | 26.02                          | 116.0         | 10.05 | 200                        | 144.5         | 100.00  |
|          | CB       | 22.02                          | 118.0         | 27.42 | 200                        | 139.2         | 99.97   |
| 2        | CV       | 29.79                          | 67.0          | 0.00  | 200                        | 113.9         | 99.84   |
|          | EV       | 26.02                          | 60.0          | 0.00  | 200                        | 119.6         | 99.67   |
|          | CB       | 22.02                          | 68.0          | 0.00  | 200                        | 108.1         | 98.18   |

\* Rule of Thumb กล่าวว่า เมื่อความหนาของยางเพิ่มขึ้น 0.635 mm ต้องเพิ่มเวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูปจากเวลาคงรูปไปอีก 5 นาที

\*\* สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Isayev และ Deng (1988)

#### 4.2 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์และยางคงรูป

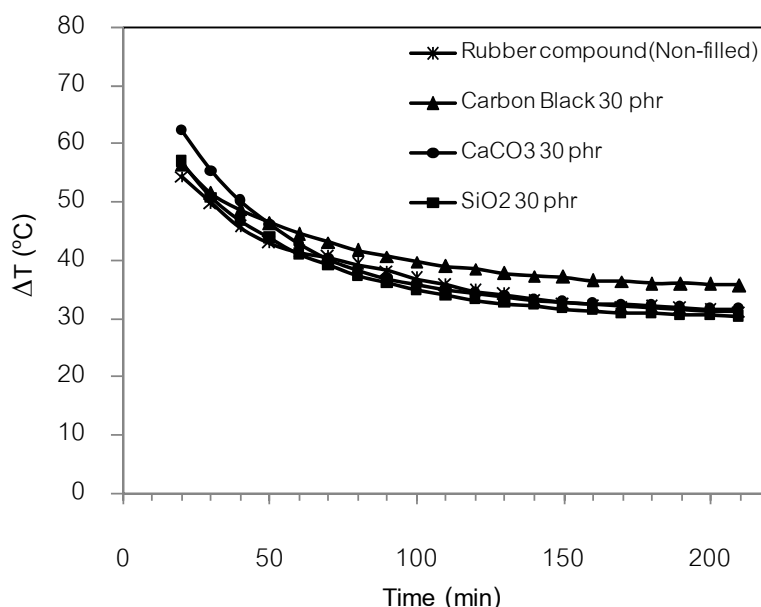
การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์และยางคงรูป สามารถพิจารณาได้จากผลต่างอุณหภูมิระหว่างยางที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง (Temperature Difference,  $\Delta T$ ) ที่ความหนา 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยเมื่อพิจารณาผลต่างของอุณหภูมิยางที่คงรูปแล้ว (Cured Rubber) พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน และมีค่าผลต่างของอุณหภูมิที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผ่านกระบวนการคงรูป (Uncured Compound) เนื่องจากยางที่คงรูปแล้วมีสมบัติความเป็นอีลาสติก (Elastic Properties) เพิ่มขึ้น ความสามารถในการไหลตัวได้ (Flowability) ลดลง ส่งผลให้ไม่สามารถแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ได้ดีเท่ากับยางที่ไม่ผ่านกระบวนการคงรูป ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ไม่ผ่านกระบวนการคงรูป และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางคอมพาวนด์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV SEV และ EV มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปต่างกัน (ผลค่าความหนืดมูนีแสดงในตารางผนวกที่ 1) โดยระบบการคงรูปแบบ CV มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ SEV และ EV มีความหนืดต่ำที่สุด ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดสูง มีความสามารถในการไหลตัวเพื่อเข้าสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ที่ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดต่ำ การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์จึงมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 11 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างยางที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมพาวนด์และยางคงรูป เมื่อใช้ระบบการคงรูปต่างๆ กัน

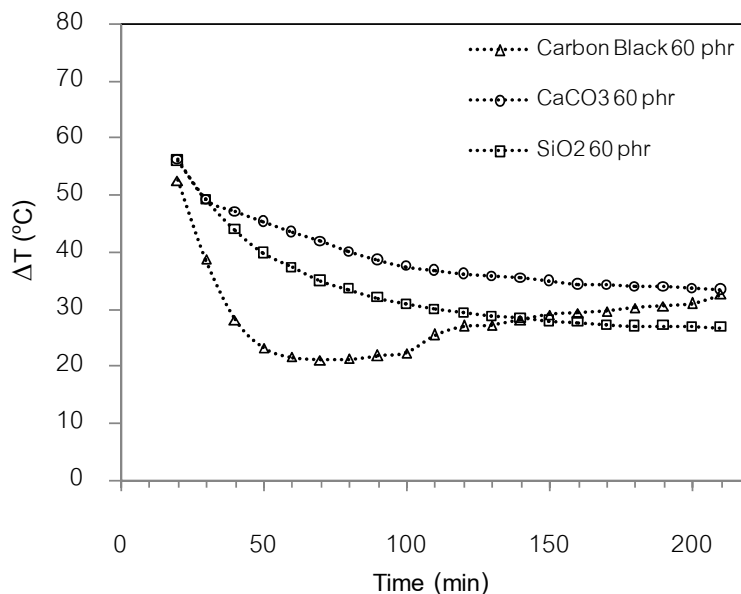
#### 4.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

จากผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณการผสมเท่ากับ 30 phr ที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า ผลต่างของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่ายางคอมพาวนด์ภายในมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และยางคอมพาวนด์ที่เติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr มีค่า  $\Delta T$  ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทางผู้วิจัยคาดว่ามิสาเหตุมาจากอิทธิพลของความหนืดยางคอมพาวนด์เมื่อผสมสารตัวเติมและอิทธิพลจากค่าการนำความร้อนของสารตัวเติม โดยซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการนำความร้อนอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่เติมเซมาต้า 30 phr เริ่มส่งผลที่แตกต่างโดยมีผลต่างของอุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเซมาต้า รวมถึงค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าเนื้อยาง ส่งผลให้ยางที่เติมเซมาต้าเกิดกระบวนการคงรูปอย่างรวดเร็ว (สามารถพิจารณาได้จากเวลาคงรูปที่ 90% ของยางคอมพาวนด์ที่เติมเซมาต้าที่ปริมาณต่างๆ กัน ในรูปผนวกที่ 2) ทำให้ชิ้นงานที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์เข้าสู่ภายในยางคอมพาวนด์



**รูปที่ 12** ผลต่างอุณหภูมิระหว่างยางที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ กันที่ปริมาณการผสมเท่ากับ 30 phr

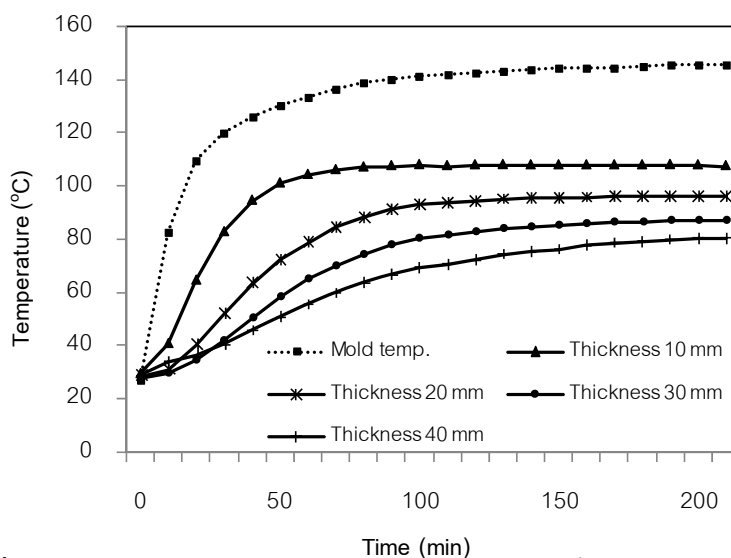
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจาก 30 เป็น 60 phr ที่มีต่อผลต่างของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่า ที่ปริมาณการผสม 60 phr เริ่มแสดงผลของสารตัวเติมที่ชัดเจนมากกว่าที่ปริมาณ 30 phr โดยยางคอมพาวนด์ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุด ถึงแม้ว่า ยางคอมพาวนด์มีความหนืดต่ำและมีค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวภายในเนื้อยางด้อยกว่าเขม่าดำและซิลิกา ส่งผลให้อุณหภูมิในเนื้อยางเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และหากพิจารณายางคอมพาวนด์ที่เติมซิลิกาซึ่งมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ยังคงน้อยกว่าเขม่าดำ เนื่องจาก ซิลิกาอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ภายในเนื้อยาง (พงษ์ธร, 2550ก) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายความร้อนเข้าสู่เนื้อยางได้ด้อยกว่าเขม่าดำ ในกรณียางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ จากผลการวิเคราะห์พบว่าผลต่างของอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจากนั้นเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเขม่าดำในเนื้อยางที่ปริมาณสูง (60 phr) ทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถนำความร้อนได้ดีขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของเขม่าดำที่สูงกว่าเนื้อยางค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และนอกจากนี้บนพื้นผิวเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมี ได้แก่ ฟีนอลิก (Phenolic) คาร์บอกซิล (Carboxyl) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และแล็กโตน (Lactone) รวมถึงอนุมูลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยางของยางได้ (พงษ์ธร, 2550ข) ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้บริเวณที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เกิดการสลายตัวและหลุดตัวก่อน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง ผลต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 และ 2 จึงเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงหลัง



รูปที่ 13 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างยางที่บริเวณผิวสัมผัสแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ กันที่ปริมาณการผสมเท่ากับ 60 phr

#### 4.4 อิทธิพลของความหนาที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางคอมพาวนด์ที่เติมเซมาดำในปริมาณ 60 phr ที่ความหนาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก (0-100 นาที) อุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่หลังจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของยางคอมพาวนด์ที่บริเวณผิวแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณที่ยางคอมพาวนด์สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวระหว่างผิวแม่พิมพ์และยางคงรูป ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ยางคอมพาวนด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่สมบูรณ์ได้ทั่วทั้งชิ้นงาน



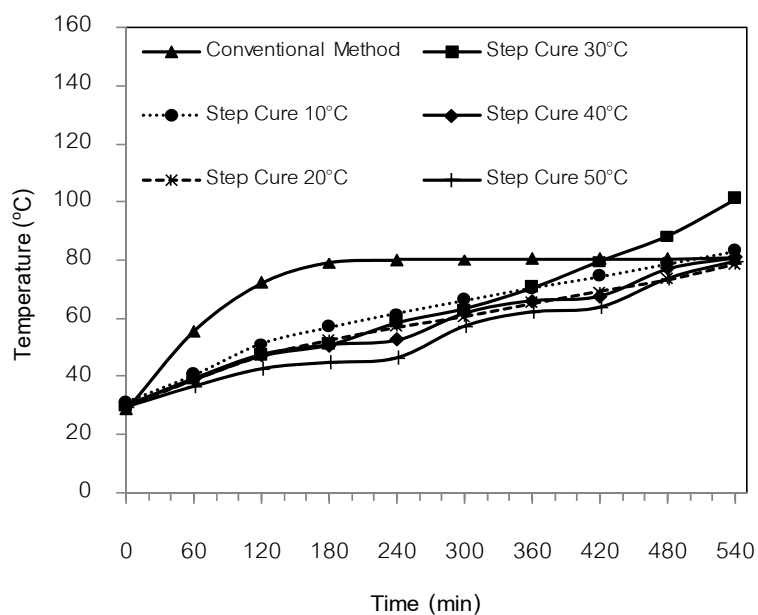
รูปที่ 14 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ที่ระดับความหนาต่างๆ กัน

#### 4.5 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในยางคอมพาวนด์

จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการคงรูปแบบปกติ (Conventional Method) ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาหรือผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยมีหลักการ คือ การเพิ่มอนุภาคนาโนแม่พิมพ์ตามลำดับขั้น เพื่อไม่ให้อย่างคอมพาวนด์ที่บริเวณผิวเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป โดยมีวิธีการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจากผลการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในยางคอมพาวนด์ พบว่าอนุภาคนาโนในยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 15 และเมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่คงรูปด้วยวิธีปกติ พบว่ากระบวนการคงรูปแบบปกติ ในช่วงแรกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนที่ค่อนข้างสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนกลับมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว จนในช่วงสุดท้ายไม่สามารถเพิ่มอนุภาคนาโนให้แกยางคอมพาวนด์ได้อีก (อัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนเท่ากับศูนย์) ในขณะที่ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้นยังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนเช่นเดียวกันตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีการสุกตัวที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น โดยวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้นที่ 30 °C เป็นวิธีการที่ทำให้ยางคอมพาวนด์ภายในมีอนุภาคนาโนสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4 นอกจากนี้เทคนิคที่คาดว่าจะลดผลกระทบจากการหดตัวของชิ้นงานยางที่เกิดการสุกตัวบริเวณผิวแม่พิมพ์ได้ ยกตัวอย่างเช่นการปรับสูตรของยางคอมพาวนด์ในแต่ละชั้นให้มีอัตราการคงรูปที่แตกต่างกัน โดยที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ อาจใช้ยางคอมพาวนด์ที่มีอัตราการคงรูปช้ากว่าบริเวณแกนกลาง (โดยใช้สารตัวเร่งที่หน่วงปฏิกิริยาหรือใช้ระบบการคงรูปแบบ EV เพื่อป้องกันการเกิด Reversion หรือเสื่อมสภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ) เพื่อลดระยะเวลาในการคงรูปโดยรวมและให้ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการสุกตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนา

ตารางที่ 3 วิธีการทดสอบการคงรูปแบบลำดับขั้น

| การคงรูปแบบลำดับขั้น | 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 15 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์  
เมื่อใช้การคงรูปแบบปกติและการคงรูปแบบลำดับขั้น

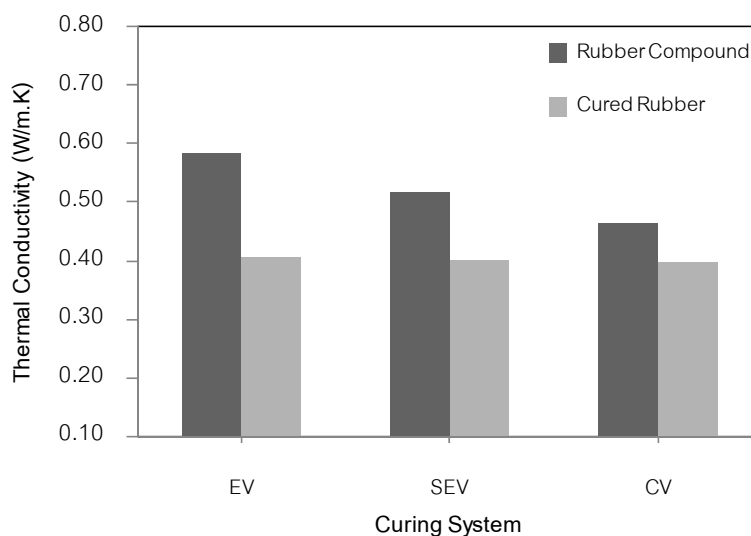
ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิและระดับการคงรูปภายในชั้นแกนกลางของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้วิธีการคงรูปแบบปกติและแบบลำดับขั้นต่างๆ

| วิธีการคงรูป               | อุณหภูมิเมื่อเวลา 9 ชม. (°C) | %Cure* |
|----------------------------|------------------------------|--------|
| การคงรูปแบบปกติ            | 80.5                         | 51.79  |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น 10 °C | 83.1                         | 69.53  |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น 20 °C | 78.3                         | 35.32  |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น 30 °C | 100.9                        | 99.29  |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น 40 °C | 81.0                         | 55.49  |
| การคงรูปแบบลำดับขั้น 50 °C | 79.4                         | 43.49  |

\* สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Isayev และ Deng (1988)

#### 4.6 อิทธิพลของระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์

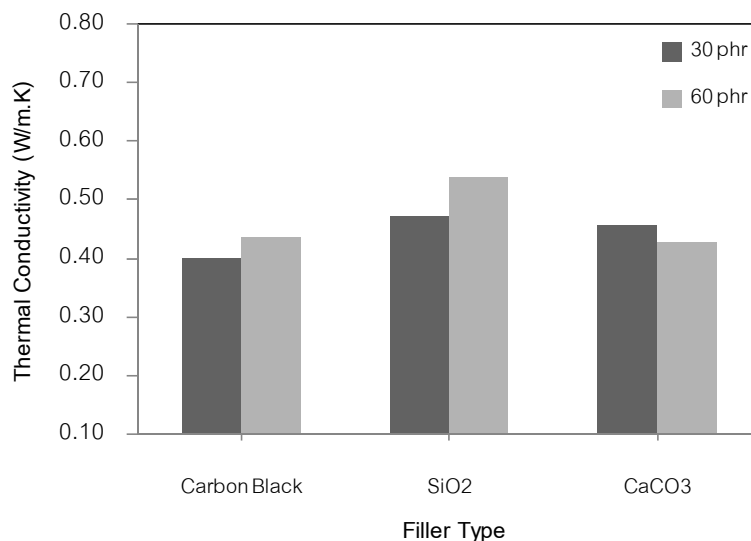
จากผลการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคงรูปและยางคอมพาวนด์ สามารถนำมาคำนวณค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ  $180^{\circ}\text{C}$  ได้ ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV SEV และ CV มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในตารางผนวกที่ 1) โดยระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าความหนืดต่ำที่สุด รองลงมาคือระบบการคงรูปแบบ SEV และ ระบบการคงรูปแบบ CV มีค่าความหนืดสูงที่สุด ซึ่งทำให้ความสามารถในการแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์แตกต่างกัน โดยยางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดต่ำ สามารถแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ได้ดีกว่ายางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดสูง จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านเข้าสู่ยางคอมพาวนด์ที่ดีกว่า และเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางคงรูป ซึ่งใช้ระบบการคงรูปแบบต่างๆ พบว่า ค่าการนำความร้อนไม่แตกต่างกันและมีค่าต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ทุกระบบการคงรูป ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากชิ้นงานยางคงรูปมีสมบัติความเป็นอิลาสติก ทำให้ความสามารถในการไหลตัวได้ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จึงไม่สามารถแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ได้ดีเท่ากับยางคอมพาวนด์ ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปจึงมีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน



รูปที่ 16 ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิทดสอบ  $180^{\circ}\text{C}$  เมื่อใช้ระบบการคงรูปที่แตกต่างกัน

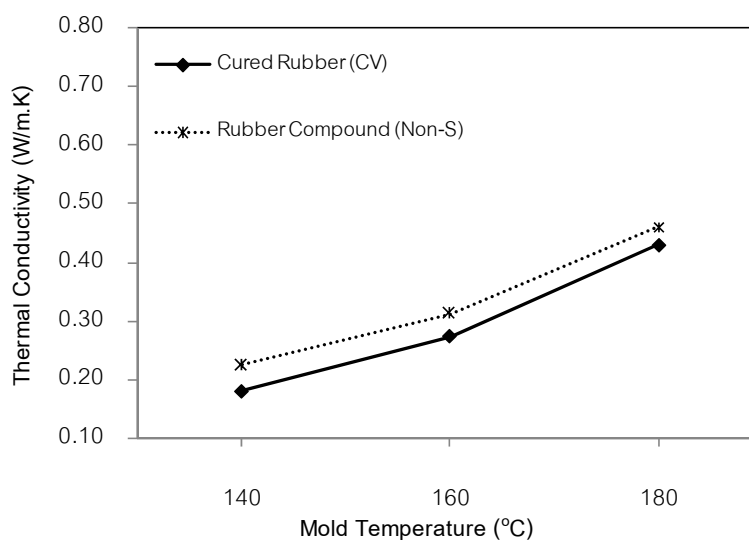
รูปที่ 17 แสดงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิทดสอบ  $180^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์เติมเซม่าดำและซิลิกา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคที่เล็กและเป็นสารตัวเติมที่มีอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยางจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวได้ดีกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ประกอบกับเซม่าดำและซิลิกามีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเป็นอย่างมาก ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ผ่านสู่ยางคอมพาวนด์และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ในขณะที่ยางเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม เนื่องจากการที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่จึงทำให้กระจายตัวภายในเนื้อยางได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับเซม่า

ดำและซิลิกา ดังนั้นการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจึงไม่ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงมากนัก แม้ว่าค่าการนำความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะสูงกว่าก็ตาม โดยปกติยางคอมพาวนด์เติมเขม่าดำมีค่าการแพร่ความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดี แต่สาเหตุที่ทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากการทดลองนี้ได้ คำนวณค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งในเวลาขณะนั้นยางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำได้ผ่านกระบวนการคงรูปเกือบสมบูรณ์ ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์ลดลง ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 17 ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิทดสอบ 180 °C เมื่อผสมสารตัวเติมที่ชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 18 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปมีค่าต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ ดังเหตุผลที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 18 ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

## 5. สรุปผล

จากการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์และยางคงรูป พบว่า ยางคงรูปมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมและอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมพาวนด์เริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การเติมเขม่าดำในปริมาณสูงและชิ้นงานที่มีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้มีการแพร่กระจายอุณหภูมิภายในสารประกอบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

จากปัญหาเรื่องยางคอมพาวนด์ที่เกิดการสุกตัวไม่เท่ากันตลอดความหนาของชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีความหนาหรือมีการผสมเขม่าดำในปริมาณที่สูง (มากกว่า 60 phr)

## 6. ข้อเสนอแนะ

ทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาหรือปรับปรุงเทคนิคในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีความหนามาก โดยหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมพาวนด์ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ยางสุกตัวอย่างทั่วถึงตลอดความหนา ยกตัวอย่างเช่น การปรับสูตรของยางคอมพาวนด์ให้มีอัตราการคงรูปที่แตกต่างกัน โดยที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ ใช้ยางคอมพาวนด์ที่มีอัตราการคงรูปช้ากว่าบริเวณแกนกลาง เพื่อให้ยางคอมพาวนด์มีการกระจายตัวของอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิในการคงรูป โดยใช้เวลาในการคงรูปที่สั้นที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน ตลอดจนการลดต้นทุนที่เกิดขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่ฮุย. การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง*, 2550ก, 2, 30-38.

พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550ข.

Isayev, A.I. and Deng J.S. Non isothermal vulcanization of rubber compounds. *Rubber Chem Technol*, 1988, 61, 340-361.

Sommer, J.G. Elastomer molding technology. Bookmasters, Inc., Ashland, 2003.

## ภาคผนวก

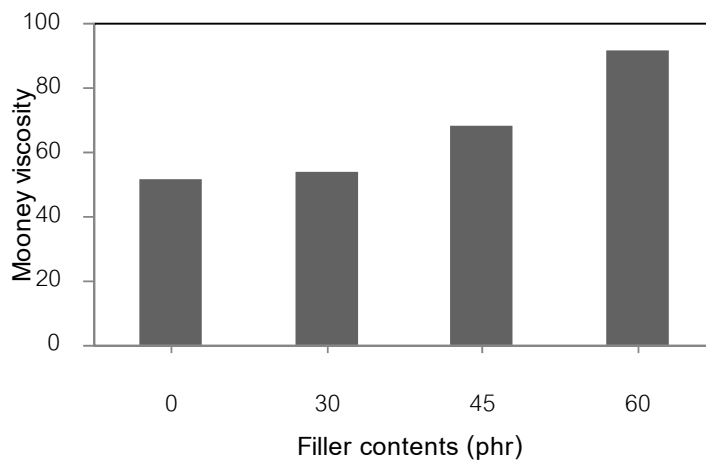
ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดสอบความเหนียวของยางคอมพาวนด์

| ลำดับที่ | สูตรยาง             | ความเหนียว (Mooney) |
|----------|---------------------|---------------------|
| 1        | Non-S               | 38.1                |
| 2        | CV                  | 51.7                |
| 3        | SEV                 | 38.5                |
| 4        | EV                  | 37.0                |
| 5        | 30CB                | 54.2                |
| 6        | 45CB                | 68.3                |
| 7        | 60CB                | 91.8                |
| 8        | 30Silica            | 64.1                |
| 9        | 60Silica            | 106.2               |
| 10       | 30CaCO <sub>3</sub> | 39.4                |
| 11       | 60CaCO <sub>3</sub> | 42.2                |

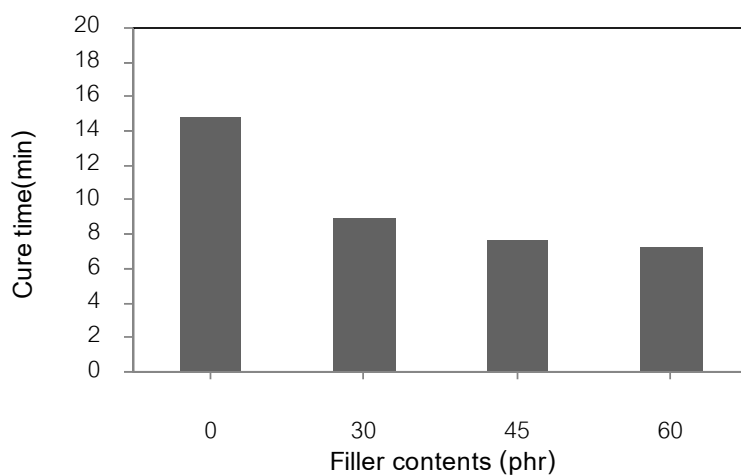
ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ได้จากเครื่อง ODR

| ลำดับที่ | สูตรยาง             | Torque Max<br>(dNm) | Torque Min<br>(dNm) | Torque Max –<br>Torque Min<br>(dNm) | Scorch time<br>(min) | Cure time<br>(min) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| 1        | CV                  | 5.04                | 0.67                | 4.37                                | 9.87                 | 14.78              |
| 2        | SEV                 | 4.61                | 0.93                | 3.68                                | 8.46                 | 10.46              |
| 3        | EV                  | 4.05                | 0.95                | 3.10                                | 11.75                | 13.88              |
| 4        | 30CB                | 9.45                | 1.37                | 8.08                                | 3.82                 | 8.97               |
| 5        | 45CB                | 12.19               | 1.94                | 10.25                               | 2.40                 | 7.58               |
| 6        | 60CB                | 15.52               | 2.90                | 12.62                               | 1.42                 | 7.23               |
| 7        | 30Silica            | 6.09                | 1.21                | 4.88                                | 9.03                 | 16.93              |
| 8        | 60Silica            | 31.65               | 3.38                | 28.27                               | 0.17                 | 17.30              |
| 9        | 30CaCO <sub>3</sub> | 5.69                | 0.68                | 5.01                                | 8.92                 | 14.13              |
| 10       | 60CaCO <sub>3</sub> | 8.48                | 0.94                | 7.54                                | 7.78                 | 13.05              |

อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความหนืดและเวลาการบ่มของยางคอมพาวนด์



**รูปผนวกที่ 1** ความหนืดมูนีของของยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำในช่วงระหว่าง 0-60 phr



**รูปผนวกที่ 2** เวลาการบ่มที่ 90% ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำในช่วงระหว่าง 0-60 phr

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การศึกษาพฤติกรรมการนำความร้อนของสารประกอบยางธรรมชาติในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา”

สัญญาเลขที่ RDG5250035

| ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ชี้แจงโดยนักวิจัย                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1. ในรายงานขาดบทสรุปรายงานฉบับผู้บริหาร                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ผู้วิจัยได้จัดส่งบทสรุปรายงานฉบับผู้บริหารเรียบร้อยแล้วครับ                                                                                                                                                                                              |
| 2. ทบทวนการใช้เฉพาะของเทคโนโลยียาง คำว่า “สารประกอบยาง” ถัดตรงกับคำว่า Rubber compound ปกติจะเรียกว่ายางคอมปาวด์ หรือยางผสม และถ้ายังไม่ vulcanise หรือ cure (unvulcanised compound หรือ uncured compound) ซึ่งมักจะเรียกกันว่า ยางยังไม่ผ่านการคงรูป<br>อนึ่ง คำที่นักวิจัยใช้นั้น ทำให้เกิดความสับสนและไม่กว้างขวางในวงการยาง | ผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนคำให้ตรงกับคำที่บัญญัติในพจนานุกรมพอลิเมอร์ คือ สารประกอบยาง เป็น “ยางคอมพาวด์” และยางไม่ผ่านการคงรูป เรียกว่า “uncured compound”                                                                                                  |
| 3. ทำไมจึงใช้คำย่อสับสน คำว่า CV-cure rubber หน้า 28 ในขณะที่ CV ก็แทน conventional vulcanisation                                                                                                                                                                                                                               | ใน หน้า 28 ฉบับร่าง หรือหน้า 23 ฉบับแก้ไข นั้น คำว่า “Cured rubber (CV)” ผู้วิจัยต้องการสื่อความหมายว่าเป็น ยางสุก (Cured rubber) ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) เพื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่คงรูป (หมายถึงยางที่ไม่เต็มกำมะถัน)                         |
| ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1. ตรวจสอบสูตรในตารางที่ 1 สูตร Non-S ไม่ทราบว่าทดลองทำไม และการใช้ SiO <sub>2</sub> เข้าใจว่าแทน Silica นั้น เชื่อมั่นได้เพียงใดว่าเป็น SiO <sub>2</sub> ล้วนๆ ทำไมไม่ระบุซิลิกาตามที่ทั่วไปใช้กัน                                                                                                                             | - สูตร Non-s นั้นผู้วิจัยต้องการนำไปเปรียบเทียบกับยางที่เกิดกระบวนการคงรูป ซึ่งยางที่ไม่เต็มกำมะถันจะไม่เกิดการสุกตัว ซึ่งหมายความว่าไม่เกิดการหดตัวในขณะที่ขึ้นรูป<br>- SiO <sub>2</sub> ผู้วิจัยใช้คำว่า Silica ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำแล้ว           |
| 2. การวิจารณ์ผลควรมีการอ้างอิงหรือมีหลักฐานแสดงผลการทดลองไม่ใช่กล่าวลอยๆ เช่น หน้า 21 ที่กล่าวว่า “...เขม่าดำ 60 phr มีการกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ดีกว่า...” นั้นมีหลักฐานอะไร                                                                                                                                                 | ผู้วิจัยได้แก้ไขข้อความดังกล่าวให้มีความชัดเจนและตรงประเด็นมากขึ้น ดังแสดงรายละเอียดในหน้าที่ 18                                                                                                                                                         |
| 3. วิธีปฏิบัติโดยปกติสำหรับการคงรูปยางหนา คือ ควรออกสูตรระบบ vulcanise แบบ delay scorch time ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถปฏิบัติได้ ส่วนวิธีที่นักวิจัยเสนอนั้น มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติหรือไม่ ควรเปรียบเทียบกับวิธีทั่วไปใช้กันอยู่                                                                                               | วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีทั่วไป เนื่องจากวิธีการทั่วไปที่ใช้สูตรยางระบบ vulcanise แบบ delay scorch time มีการให้แรงดันสูงในกระบวนการคงรูป แต่ในงานวิจัยนี้ใช้แรงดันต่ำในกระบวนการคงรูปและกำหนดให้เป็นค่าคงที่ จึงทำให้ผลการ |

| ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ                                                                                                       | ชี้แจงโดยนักวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                             | ทดลองไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยจะทำการปรับเปลี่ยนแรงดันในกระบวนการคงรูปและนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไปที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรม                                                                              |
| ข้อเสนอแนะ                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 1. ในการศึกษาต่อไป ควรพิจารณาระยะเวลาของการคงรูป ถ้าใช้เวลา (cure time) มากเกินไป อาจไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจได้                               | ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้คำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในกระบวนการคงรูป ทำให้เวลาที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างนาน หากมีการเพิ่มแรงดันในกระบวนการคงรูป ผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถลดเวลาลงได้เป็นอย่างมาก ซึ่งการหาเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสมสามารถทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจได้ |
| 2. ควรพิจารณาศึกษาเรื่องดัชนียางหนากับการคงรูปแบบขั้นที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปใช้กับการผลิตยางหนาชชนิดต่างๆ และได้รับระบบการคงรูปที่เหมาะสม | ผู้วิจัยจะนำประเด็นนี้ไปพิจารณาในงานวิจัยต่อไป                                                                                                                                                                                                                      |