การศึกษาอิทธิพลของรอยประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยาง ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ฉีด

An Investigation into the Influence of Weld Line on Mechanical Properties of Compression and Injection Molded Rubber Parts

นุชนาฏ ณ ระนอง [1]
สมเจตน์ พัชรพันธ์ [2] วัชรพงษ์ ชูแก้ว [2] ธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธ์ [2]

[1] สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของรอยประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ฉีด เป็นการศึกษาเบื้องต้นด้านวิศวกรรมแต่ในมิติเชิงลึกด้านสมบัติการไหลของยางที่จะมีผลต่อกระบวนการผลิต การออกแบบแม่พิมพ์ ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ที่ต้ องสัมพันธ์กัน นอกเหนือจากการออกแบบสูตรส่วนผสมของยางและสารเคมีซึ่งเป็นคุณภาพในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า สมบัติการไหลและการประสานตัวของเนื้อยางขึ้นอยู่กับส่วนผสมยางและสารเคมี โดยมีชนิดของยาง และสารตัวเติม เป็นปัจ จัยหลัก เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยาง และขนาดอนุภาคของสารตัวเติม มีผลต่อแรงอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างยางและสารตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยดังกล่าว นอกจากนั้น อุณหภูมิ และแรงอัดในระหว่างกระบวนการผลิต ก็มีผลต่อความแข็งแ รงรอยประสานเช่นกัน ทั้งนี้ ความต้านทานแรงดึงของชิ้นตัวอย่างที่มีรอยประสานจะต่ำกว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีรอยประสาน โดยเฉพาะยางสังเคราะห์ NBR ที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติม จะเห็นความแตกต่างชัดเจนกว่ายางสังเคราะห์ SBR และยางธรรมชาติ ที่มีปริมาณสารตัวเติมในระดับที่ สูงกว่า 40 phr เมื่อเพิ่มปัจจัยแรงอัดและอุณหภูมิ พบว่า แรงอัดที่เพิ่มขึ้น มีผลให้รอยประสานมีความแข็งแรงขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะช่วยให้ความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ฉีด พบว่า การออกแบบทางวิ่งในแม่พิมพ์ มีส่วนในการกำหนดตำแหน่งรอยประสานรวมถึงความแข็งแรงของรอยประสาน

คำนำ

กระบวนการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์จัดเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกและยางที่ใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ ยังคงพบปัญหาหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น คือ รอยประสาน (weld line) ซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านส่วนประกอบชิ้นงานซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวาง (obstacle) ของการไหลของยางภายในแม่พิมพ์ หรือในกรณีที่มีทางเข้าภายในแม่พิมพ์มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง (multi gate) นอกจากนี้การเกิดรอยประสานยังเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์มีความหนาแตกต่างกันมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยตำหนิที่สังเกตเห็นได้ตรงบริเวณรอยประสาน ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง โดยเฉพาะรอยประสานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของยางผ่านอินเสิร์ท และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบแรงอัดพบว่าผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายตรงบริเวณรอยประสาน หรือความเสียหายของผลิตภัณฑ์ยางที่เกิดจากการฉีดขาดตรงบริเวณรอยประสานระหว่างการดึงยางออกจากแม่พิมพ์ จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยเกี่ยวกับรอยประสานส่วนมากเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกและวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยประสานที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูป และการนำเทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยประสานในตำแหน่งที่สำคัญบนผลิตภัณฑ์ยาง ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เพื่อใช้ในการทำนายความแข็งแรงของรอยประสาน ตลอดจนการหาแนวทางในการปรับปรุงหรือเพิ่มความแข็งแรงของรอยประสานที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยาง

ระเบียบวิธีการวิจัย

อุปกรณ์

1. ยางและสารเคมี
2. เครื่องบดผสมระบบปิดและระบบเปิด
3. เครื่องวัดลักษณะการคงรูปของยาง
4. เครื่องขึ้นรูปยางแบบแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ฉีด
5. เครื่องมือวัดสมบัติการทนแรงดึง
6. โปรแกรมการคำนวณทางวิศวกรรม

วิธีการ

1. ออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงของรอยประสาน

2. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติม ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการคงรูปและความแข็งแรงของรอยประสาน
3. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน
4. ศึกษาโปรแกรมจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงกับผลการทำนายที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรม (CAE)
5. ศึกษาแบบจำลองทางคณิต ศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางการทำ นายความแข็งแรงของรอยประ สานที่เกิดขึ้น
6. สรุปแนวทางแก้ไขและปรับ ปรุงแบบจำลองที่ได้
7. นำเสนอเทคนิคและแนวทางในการปรับปรุงหรือเพิ่มความแข็งแรงของรอยประสานที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ยาง
8. สรุปผลการวิจัย

ระยะเวลา

ตุลาคม 2551 – กันยายน 2553

สถานที่ทำการทดลอง

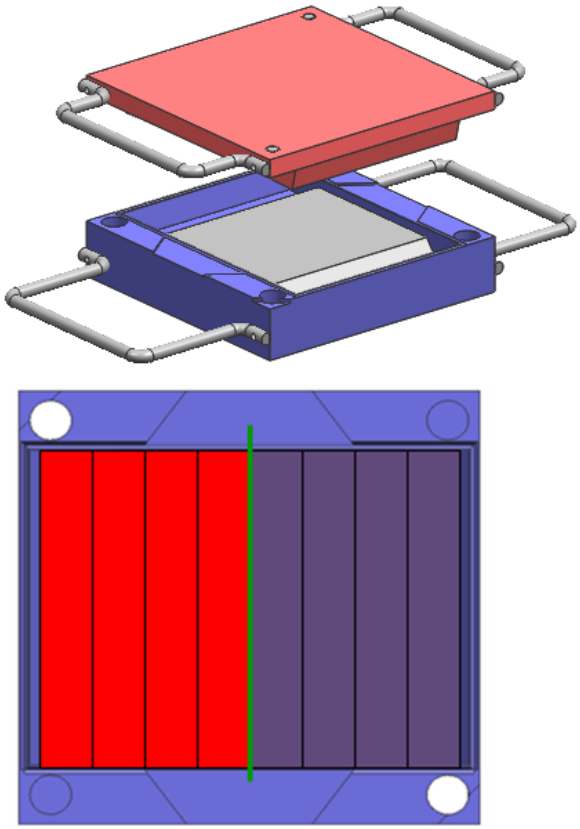
ห้องปฏิบัติการกลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองและวิจารณ์

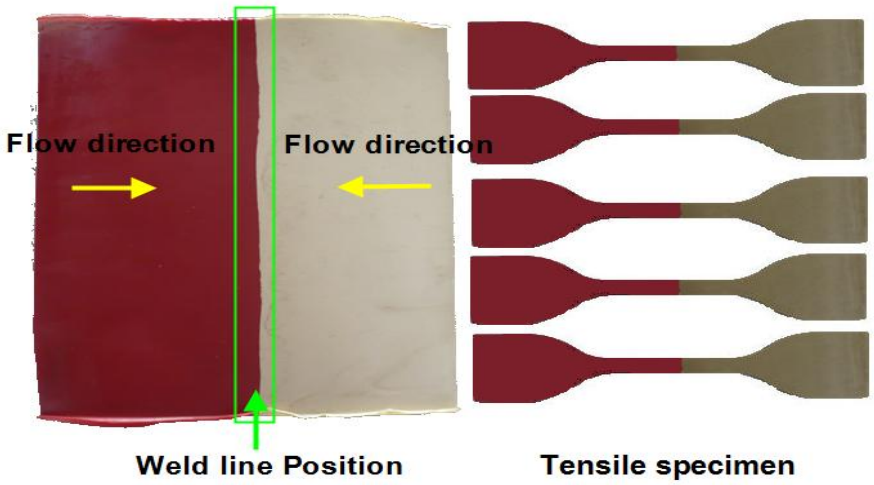
<u>กิจกรรมที่ 1</u> จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและบทความวิจัยเกี่ยวกับกลไกลการเกิดรอยประ ะสานของวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกและยาง รวมทั้งปัจจัยที่ทำให้ความแข็งแรงรอยประสานลดลง ซึ่งได้แก่ การที่บริเวณหน้าสัมผัสของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลขนานกับรอยประสานหรือตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง และการเกิดรอ ยบากตัววี (V-notch) ที่บริเวณรอยประสาน รวมถึงการเกิดโพรงอากาศ (voids) ที่บริเวณรอยประสาน จึงได้ออกแบบแม่พิมพ์ทดสอบความแข็งแรงรอยประสานเพื่อนำไปใช้ในการทดลอง

การออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้นำกระบวนการใช้คอมพิวเตอร์ช่ วยในการออกแบบ (Computer aided design; CAD) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 1 เพื่อให้เกิดรอยประสานจากกระบวนการอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2



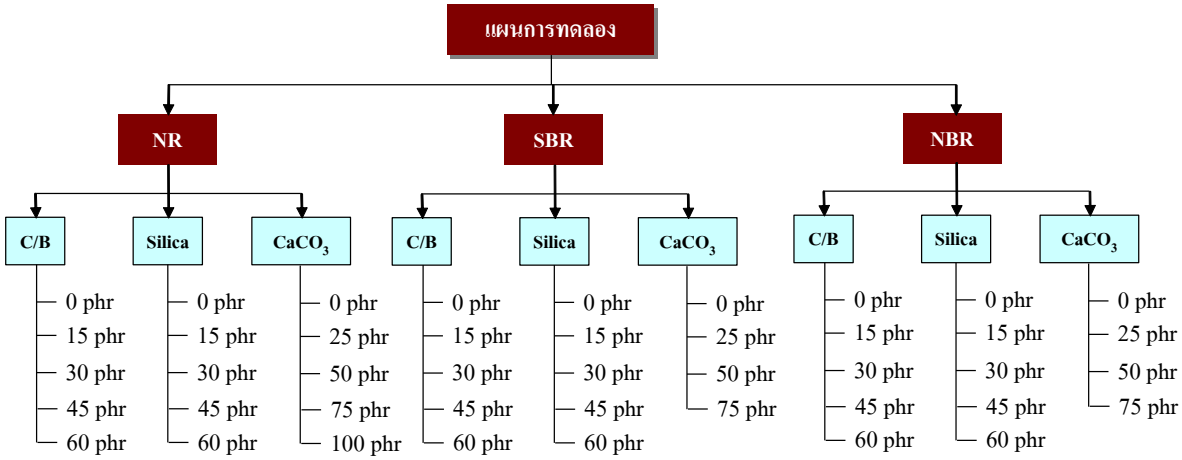
ภาพที่ 1 แม่พิมพ์อัดที่ได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2 ชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดโดยแม่พิมพ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น

<u>กิจกรรมที่ 2</u> เมื่อออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสาน ได้แก่ ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม โดยศึกษาสารตัวเติมทั้งแบบเสริมแรง (เขม่าดำ และซิลิกา) และแบบไม่เสริมแรง (แคลเซียม คาร์บอเนต) ซึ่งสูตรที่ใช้ในการทดลองได้จากการ

ดัดแปลงสูตรยางตามมาตรฐาน ISO4658 สำหรับยาง NBR และมาตรฐาน ISO2322 สำหรับยาง SBR ส่วนสูตรยางธรรมชาติ ได้ดัดแปลงตามความเหมาะสม โดยได้สูตรยางทั้งหมด 37 สูตร ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งนอกจากยางและสารเคมีที่แสดงในตารางแ ล้ว ยังมีสารเคมีอื่น ได้แก่ ZnO, Strearic acid, Sulfur, CBS, PEG และ Aromatic oil



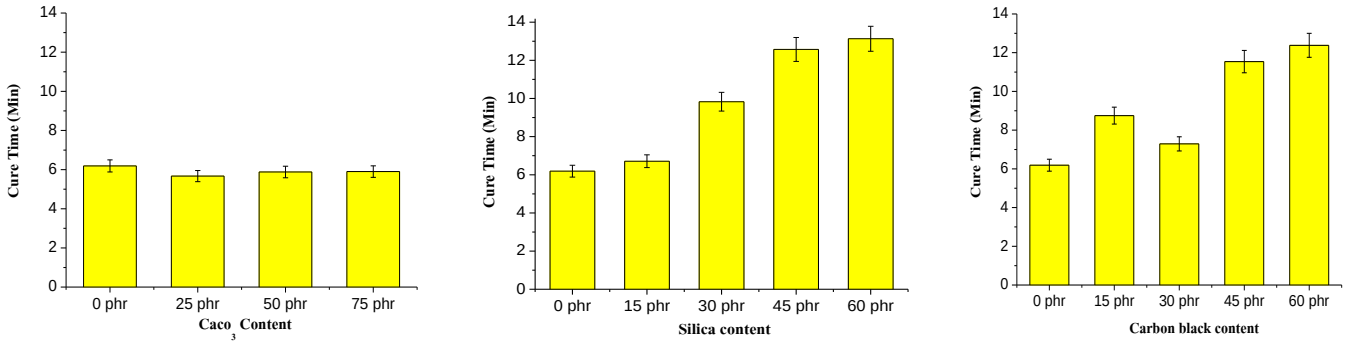
ภาพที่ 3 แผนการทดลองที่แสดงการแปรปัจจัยต่าง ๆ

บดผสมยางตามสูตรที่กำหนด แล้วนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบหาเวลาการคงรูปด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084 จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูป และทดสอบความแข็งแรงรอยประสานโดยการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength) เป็นรูป Dumbbell ตามมาตรฐาน ISO37 Type I ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

1. ผลการทดลองยาง NBR

1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยาง NBR

เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ พบว่า การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เวลาในการสุกตัวของยางผสมสารเคมีมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำส่งผลให้เวลาในการสุกตัวของยางเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของซิลิกาและเขม่าดำที่เล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำให้การกระจายตัวหรือแทรกตัวภายในสายโซ่โมเลกุลของยางที่ดีกว่า การกระจายตัวที่ดี ทำให้เกิดแรงดึงดูดของอนุภาคยางและสารตัวเติมดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการชะลอการทำ ปฏิกิริยาการคงรูป นอกจากนั้น กำมะถันยังกระจายในยาง NBR ได้ยาก จึงทำให้เวลาในการสุกตัวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคใหญ่กว่าไม่แสดงผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาในการคงรูปของยาง



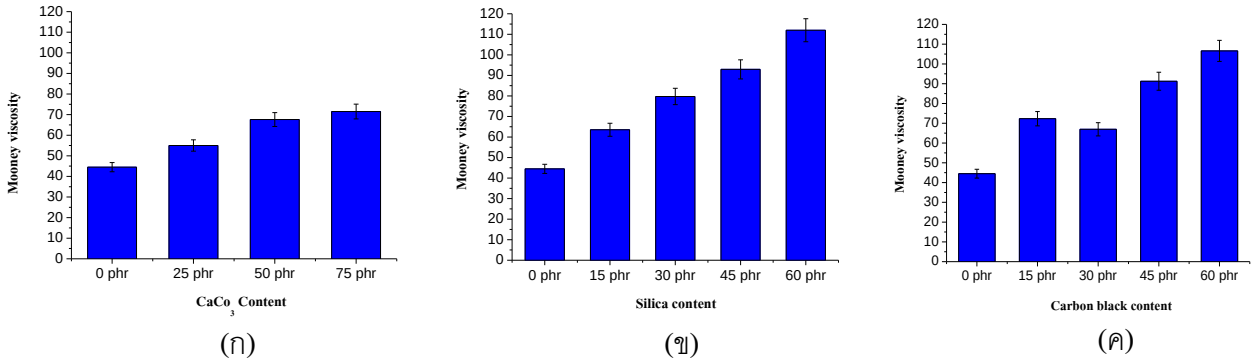
ภาพที่ 4 เวลาในการสุกตัวเมื่อเพิ่มปริมาณ (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม

ชนิดของสารตัวเติม	ขนาดอนุภาค
แคลเซียมคาร์บอเนต	1-100 nm
ซิลิกา	10-40 nm
เขม่าดำ	28-1036 um

1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยาง NBR

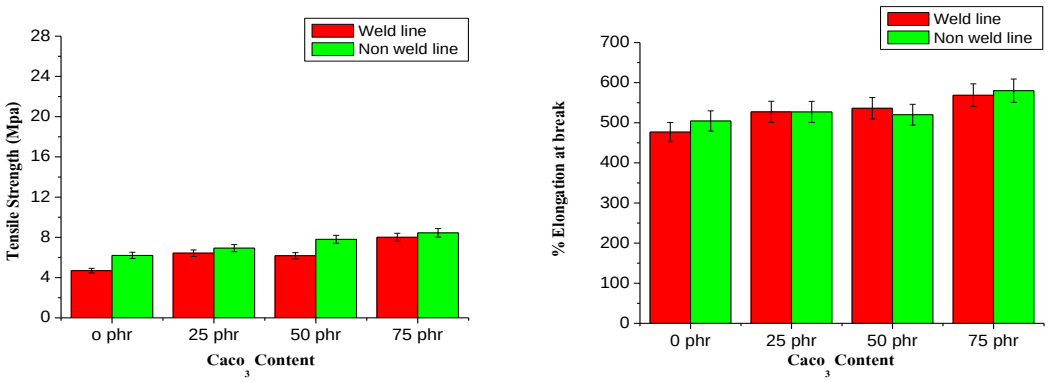
ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความหนืดของยางเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ ซิลิกาและเขม่าดำ ที่มีขนาดเล็กส่งผลให้มีการแทรกตัวในสายโซ่โมเลกุลได้ง่าย ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลให้เป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ความหนืดของยางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ



ภาพที่ 5 แสดงค่าความหนืดของยางเมื่อเพิ่มปริมาณ (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

1.3 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยาง NBR

โดยทั่วไป ยางมีลักษณะที่สามา รถเชื่อมติดกันได้ในระ ดับหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของยาง การเพิ่มสารอื่นเข้าไปจะทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนตัวออกจากกันและถูกห่อหุ้มด้วยอนุภาคหรือโมเลกุลของสารที่เติมลงไปนั้น เมื่อต้องการให้ยางไหลเข้าหากันจึงเกิดเป็นรอยประสาน จากผลการทดสอบอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสานเมื่อไม่มีการใส่สารตัวเติมมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีความแตกต่างกันอย่างมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าทั้งชิ้นงาน ที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัว พบว่ามีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน ทั้งในชิ้นงานที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสาน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทลดต้นทุน ซึ่งไม่มีการเสริมแรงเมื่ อบดผสมเข้ากับยาง หรือลดสมบัติความยืดหยุ่น (elastic properties) ของยาง ทำให้อิทธิพลของรอยประสานที่เกิดขึ้น ไม่ส่งผลมากนัก



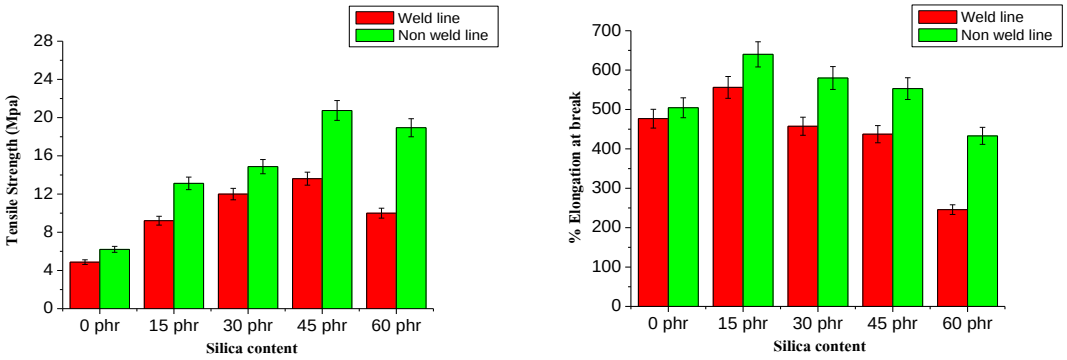
(ก) (ข)

ภาพที่ 6 สมบัติทางกลของยาง NBR เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต
(ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

1.4 อิทธิพลของซิลิกาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยาง NBR

การเพิ่มปริมาณซิลิกาส่งผลให้ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 7 เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ และมีขนาดเล็กส่งผลให้การกระจายตัวในเนื้อยางทำได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ปริมาณซิลิกา 60 phr พบว่ามีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเนื่องจาก ปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การบดผสมทำได้ยากขึ้น เวลาในการบดผสมจึงนาน สายโซ่โมเลกุลของยางจึงสั้นลง มวลโมเลกุลลดลง ซึ่งทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ที่ปริมาณซิลิกาสูงๆ ก่อให้เกิดการจับกลุ่มรวมตัวกันเป็น Aggromerate ซึ่งเป็นพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้การกระจายตัวภายในสายโซ่โมเลกุลของยางด้อยลง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีรอยประสานพบว่ามีสมบัติทางกลที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานเนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นของยางที่ลดลงจากค่าความหนืดมูนนี่ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้ความสามารถของในการยึดติดกันข องยาง (Tack properties) มีแนวโน้มที่ลดลงจาก สังเกตได้จากค่าการยืดตัวที่มีแนวโน้มลดลงทั้งในชิ้นงานที่มีรอยประสานและชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

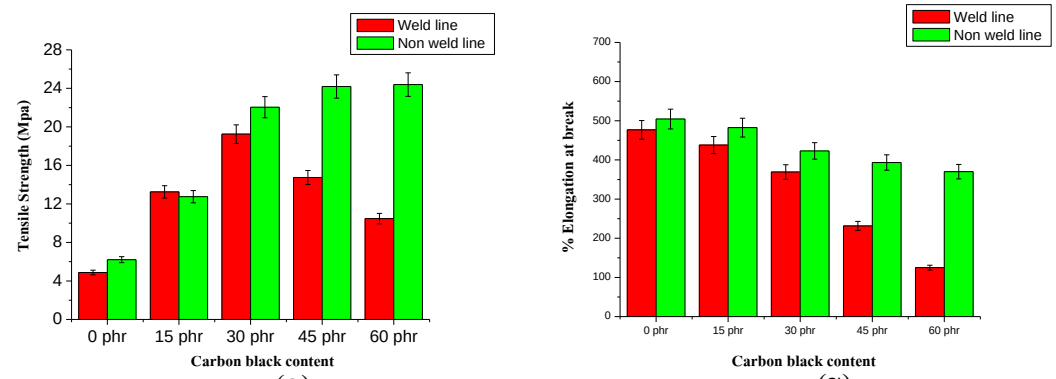


(ก) (ข)

ภาพที่ 7 สมบัติทางกลของยาง NBR เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

1.5 อิทธิพลของเขม่าดำที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยาง NBR

จากภาพที่ 8 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มสูงขึ้นในชิ้นงานที่ไม่มีมีรอยประสานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก เขม่าดำเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับซิลิกา แต่การเกาะกลุ่มรวมเป็น Aggromerate ซึ่งเป็นแรงวัลเดอร์วาล ไม่แข็งแรงเท่าพันธะไฮโดรเจนของซิลิกา ทำให้การแตกตัวเป็น Aggregate ขณะบดผสมง่ายกว่า ส่งผลให้ที่ปริมาณเขม่าดำสูงๆ ค่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงไม่มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อพิจาณาชิ้นงานที่ มีรอยประสานพบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน และเห็นผลชัดเจนเมื่อ ปริมาณเขม่าดำมากกว่า 30 phr ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางเริ่มมีการลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงดัง ค่าการยืดตัวที่มีค่าลดลง และค่าความหนืดมูนนี่ที่ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการเชื่อมโยงพันธะบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานด้อยกว่าบริเวณที่ไม่เกิดรอยประสาน



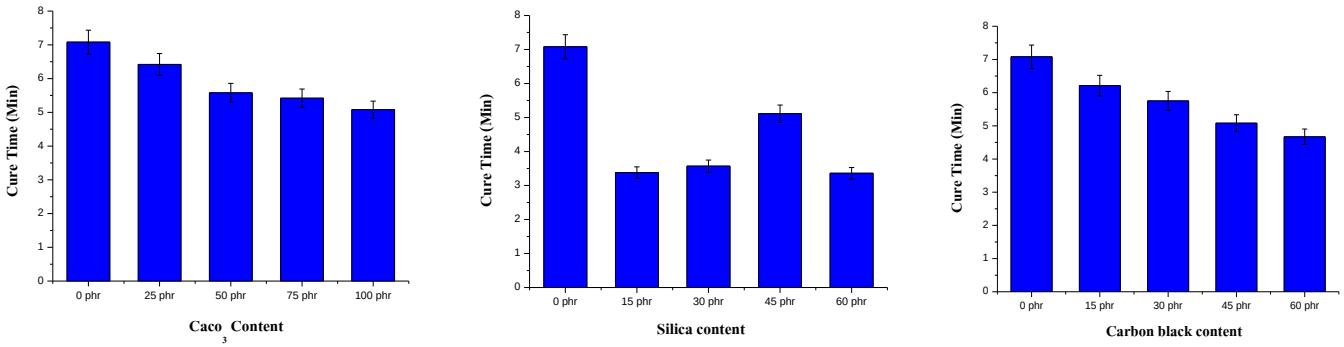
(ก) (ข)

ภาพที่ 8 สมบัติทางกลของยาง NBR เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

2. ผลการทดลองยางธรรมชาติ

2.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมซึ่งส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยางธรรมชาติ

การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทุกชนิดที่ใช้ในการทดลอง ทำให้เวลาการคงรูปของยางลดลง ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งแตกต่างจากการทดลองของยาง NBR อาจกล่าวได้ว่าเนื่องจากในยางธรรมชาติมีสารที่ไม่ใช่ยาง (non rubber) อยู่ด้วย โดยเฉพาะสารกลุ่มที่มีไนโตรเจนผสมอยู่ สามารถทำหน้าที่เหมือนสารเร่งปฏิกิริยาได้ ทำให้เวลาการคงรูป มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง

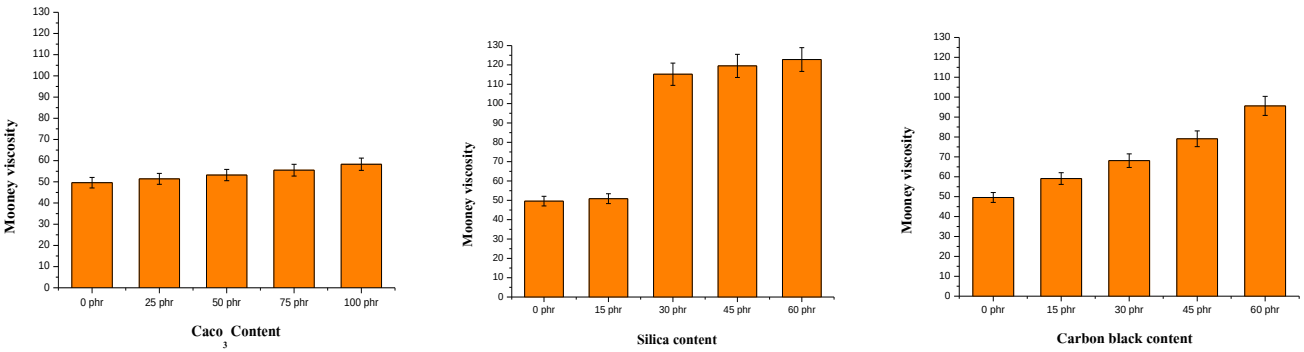


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 9 เวลาในการสุกตัวของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณ (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

2.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมซึ่งส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความหนืดของยางเล็กน้อย (ดังแสดงในภาพที่ 10ก) เมื่อเทียบกับปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของซิลิกาและเขม่าดำที่มีขนาดเล็กทำสามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ดีกว่าทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเป็นไปได้ยากขึ้น ความหนืดของยางจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 10ข และ 10ค

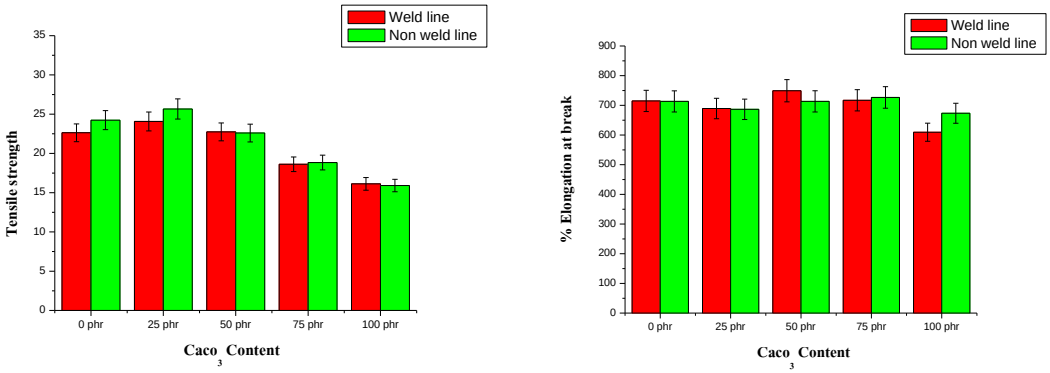


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 10 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

2.3 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ

เมื่อไม่มีสารตัวเติมสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานไม่มีความแตกต่างกันมากนัก (ภาพที่ 11ก) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในเนื้อยางพ บว่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานทั้งสองแบบแนวโน้มลดลง ส่วนการยืดตัวของชิ้นงานที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ ทั้งชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 11ข เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง จึงไม่มีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล



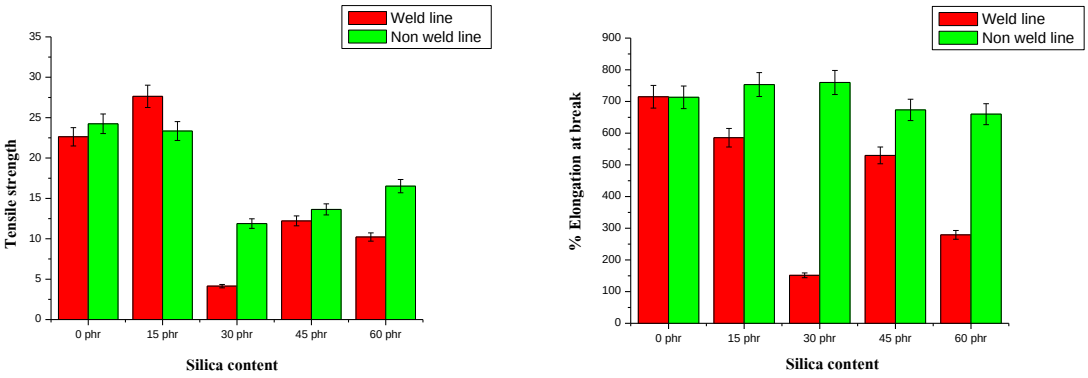
(ก) (ข)

ภาพที่ 11 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต
(ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

2.4 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 12ก เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณซิลิกาในยางธรรมชาติ พบว่า ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจาก ปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นจาก 15 phr เป็น 30 phr 45 phr และ 60 phr ต้องใช้เวลาในการ บดผสมมากขึ้น สายโซ่โมเลกุลของยางจึงสั้นลง มวลโมเลกุลลดลง ซึ่งทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

ส่วนการยืดตัวชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนชิ้นงานที่มีรอยประสานค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิก าเพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานซึ่งสามารถสังเกตค่าการยืดตัวที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจนที่ปริมาณซิลิกา 60 phr ดังแสดงในภาพที่ 12ข

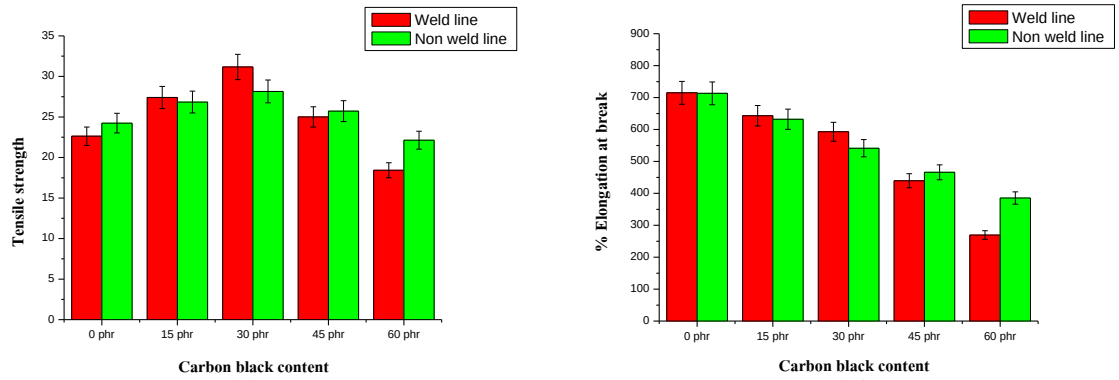


(ก) (ข)

ภาพที่ 12 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

2.5 อิทธิพลของเขม่าดำที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ

จะเห็นได้ว่าปริมาณเขม่าดำที่สูงกว่า 30 ส่วน ยังไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรง และการยืดตัวแม้มีรอยประสาน แต่เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ความแข็งแ รงจะลดลง (ภาพที่ 13) ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลยางเคลื่อนห่างออกไปมาก แรงระหว่างอนุภาคลดลง



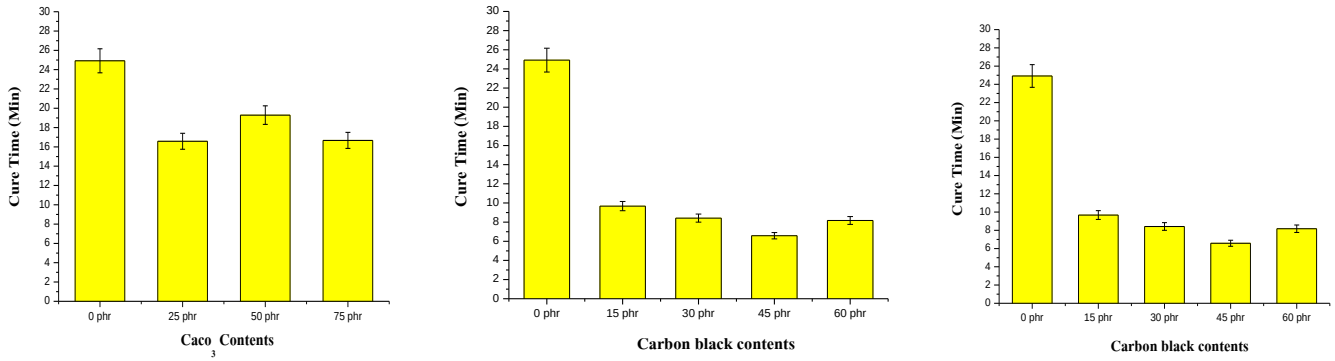
(ก) (ข)

ภาพที่ 13 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

3. ผลการทดลองยาง SBR

3.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมซึ่งส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยาง SBR

จากภาพที่ 14 เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น พบว่าเวลาในการสุกตัวของยางธรรมชาติเมื่อผ่านการบดผสมมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง เนื่องจากความค่าการนำความร้อนของสารตัวเติมมีค่าสูงกว่าและค่าการนำความร้อนของเนื้อยาง เมื่อมีการเติมปริมาณสารตัวเติมสูงขึ้นทำให้ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ยางคอมพาวด์จะทำให้การแพร่กระจายความร้อนภายในยางคอมพาวด์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เว ลาในการสุกตัวของยางลดลง

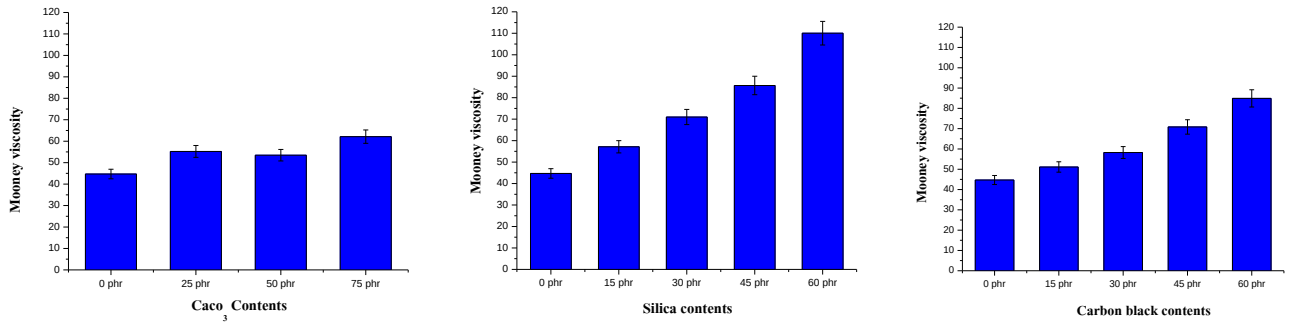


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 14 เวลาในการสุกตัวของยาง SBR เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

3.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยาง SBR

เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ เพิ่มขึ้น จากภาพที่ 15ก พบว่า ส่งผลต่อค่าความหนืดของยางเล็กน้อยโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมประเภทเสริมแรงอย่าง ซิลิกา และเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 15ข และ 15ค จะสามารถสังเกตเห็นค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจาก ขนาดโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดโตกว่า ซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้ไม่สามารถแทรกเข้าไปในระหว่างโซ่โมเลกุลเนื้อยางได้ดีเท่ากับซิลิกาและเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า ทำให้ค่าความหนืดของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ กัน มีค่าไม่แตกต่างกันมาก

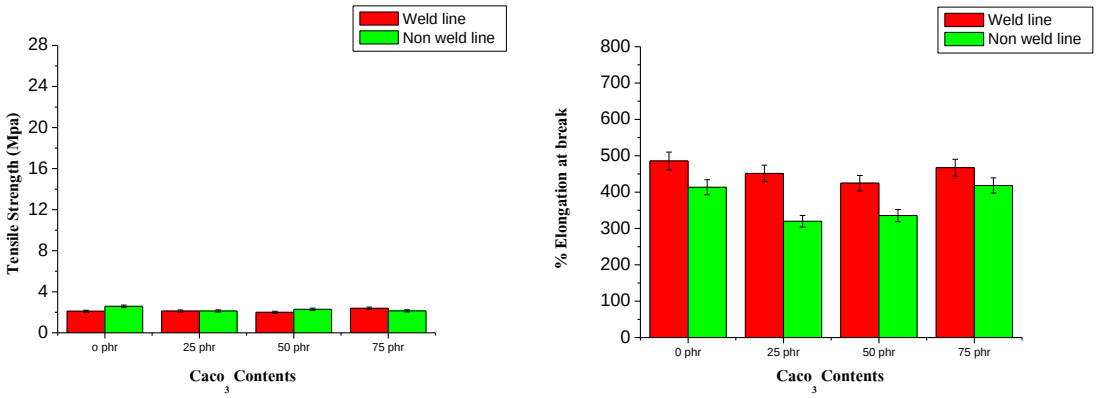


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 15 ค่าความหนืดของยาง SBR เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ซิลิกา (ค) เขม่าดำ

3.3 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยาง SBR

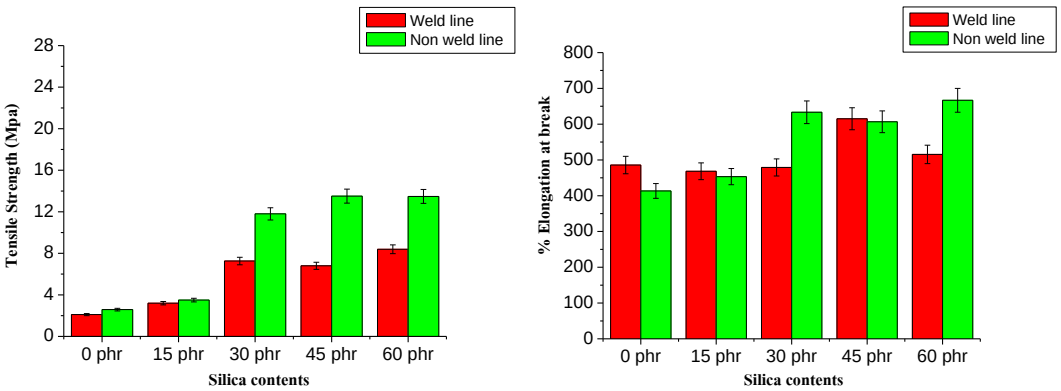
จากภาพที่ 16ก แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่ง ผลกระทบต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทลดต้นทุน ซึ่งไม่มีการเสริมแรงเมื่อบดผสมเข้ากับยาง หรือลดสมบัติความยืดหยุ่นของยาง ทำให้ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานมากนัก



ภาพที่ 16 สมบัติทางกลของยาง SBR เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

3.4 อิทธิพลของซิลิกาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสานของยาง SBR

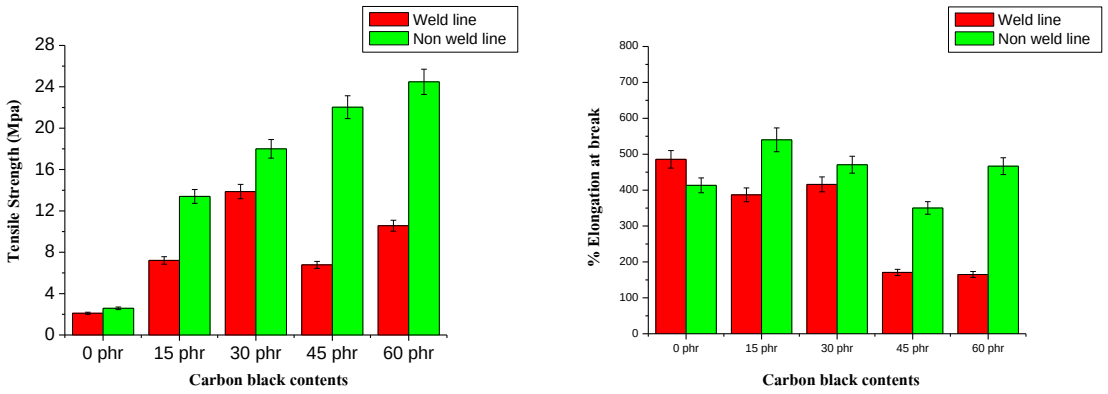
การเพิ่มปริมาณซิลิกาส่งผลให้ชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานมีความต้านทานต่อแ รงดึงที่สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 17ก และแสดงในเห็นว่าที่ปริมาณซิลิกา 30 phr 45 phr และ 60 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ และมีขนาดเล็กส่งผลให้ การกระจายตัวในระหว่างเนื้อยางทำได้ดี ทำให้ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่สำหรับชิ้นงานที่มีรอยประสานผลของการเสริมแรงของสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงบริเวณรอยประสาน



ภาพที่ 17 สมบัติทางกลของยาง SBR เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

3.5 อิทธิพลของเขม่าดำที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของยาง SBR

จากภาพที่ 18ก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงในชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก เขม่าดำเป็นสารตัวเติมประเภทเ สริมแรงที่มีประสิทธิภาพเช่นเดียว กับซิลิกา และเมื่อพิจาณาชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน และเห็นผลชัดเจนตั้งแต่ปริมาณเขม่าดำ 30 phr ถึง 60 phr ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางเริ่มมีกา รลดลงอย่างมาก และความสามารถของในการยึดติดกันของยางที่ปริมาณสารตัวเติมสูงขึ้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ในส่วนของค่าการยืดตัวของชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในเนื้อยางค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 18ข เนื่องจากบริเวณรอยต่อการวางเ รียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง สำหรับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานค่าการยืดตัวมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน



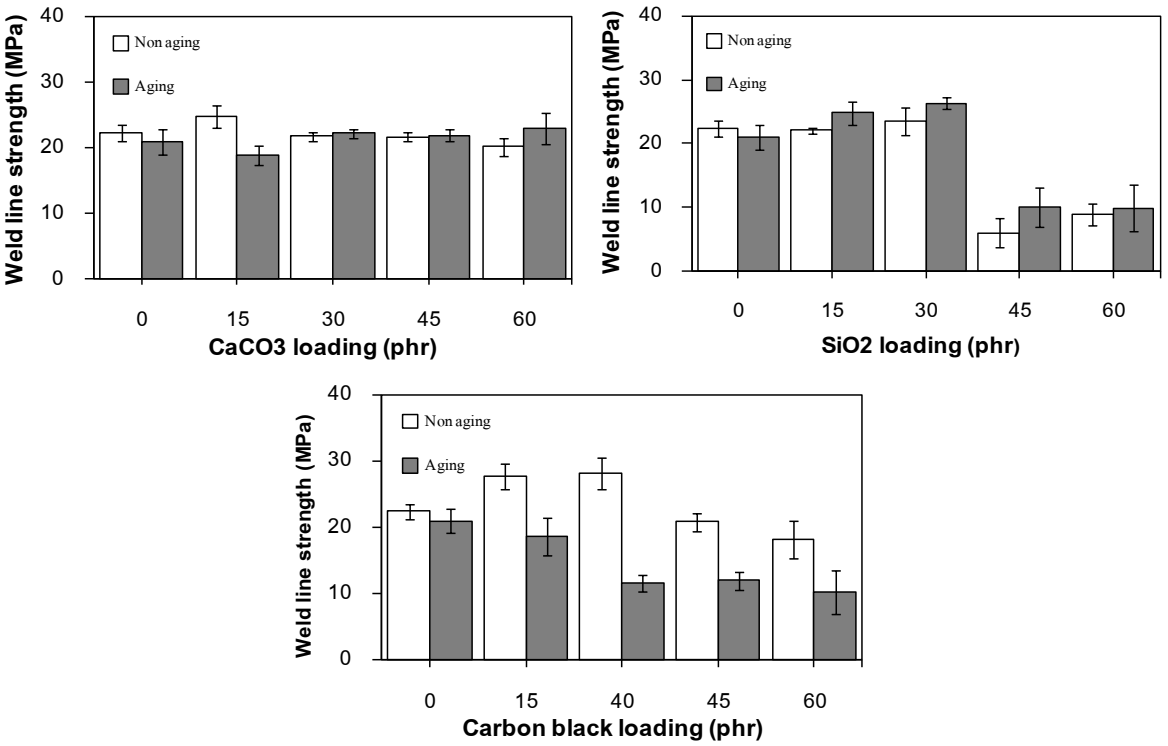
(ก) (ข)

ภาพที่ 18 สมบัติทางกลของยาง SBR เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ (ก) การต้านทานต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว

4. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานหลังการบ่มเร่ง

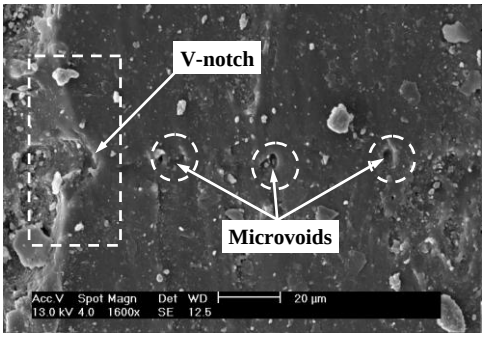
4.1 เมื่อพิจารณาผลการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานของยางธรรมชาติ (แสดงในภาพที่ 19) พบว่าในชิ้นงานที่ไม่มีการใส่สารตัวเติมมีความแข็งแรงของรอยประสานที่ลดต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากการขาดของสายโซ่โ มเลกุลบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าความแข็งแรงของรอยประสานที่ผ่านการบ่มเร่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานก่อนบ่มเร่ง และมีค่าที่มากกว่าในระดับ 60 phr ซึ่งเนื่องจากปริ มาณแคลเซียมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและพันธะคู่ภายในเนื้อยางเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้ยางผสมมีความคงทนต่อความร้อนและออกซิเจนมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของซิลิกาที่มีต่อความต้านทานต่อการบ่มเร่ง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งมีค่าควา มแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากซิลิกายังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนให้กับเนื้อยาง นอกจากนี้คาดว่าด้วยคุณสมบัติของซิลิกาที่มีความพรุนและเกาะตัวเป็นกลุ่ม ทำให้มีการดูดกลืนสารเร่งปฏิกิริยาและกำมะถัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งพันธะระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาถูกตัดขาด จึง

ทำให้สารเร่งปฏิกิริยาและกำมะถัน สามารถทำปฏิกิริยาในกระบวนการคงรูปต่อไปได้ จึงส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะบริเวณหน้าสัมผัสที่มากขึ้นหลังผ่านการบ่มเร่ง อย่างไรก็ตามการบดผสมยางธรรมชาติเข้ากับเขม่าดำพบว่า เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน ความ แข็งแรงของรอยประสานมีค่าที่ลดต่ำลงในทุกระดับของปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากอิทธิพลของเขม่าดำที่มีค่าการนำความร้อนสูง ส่งผลให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง ความแข็งแรงของยางเมื่อยืดดึงจึงลดต่ำลง



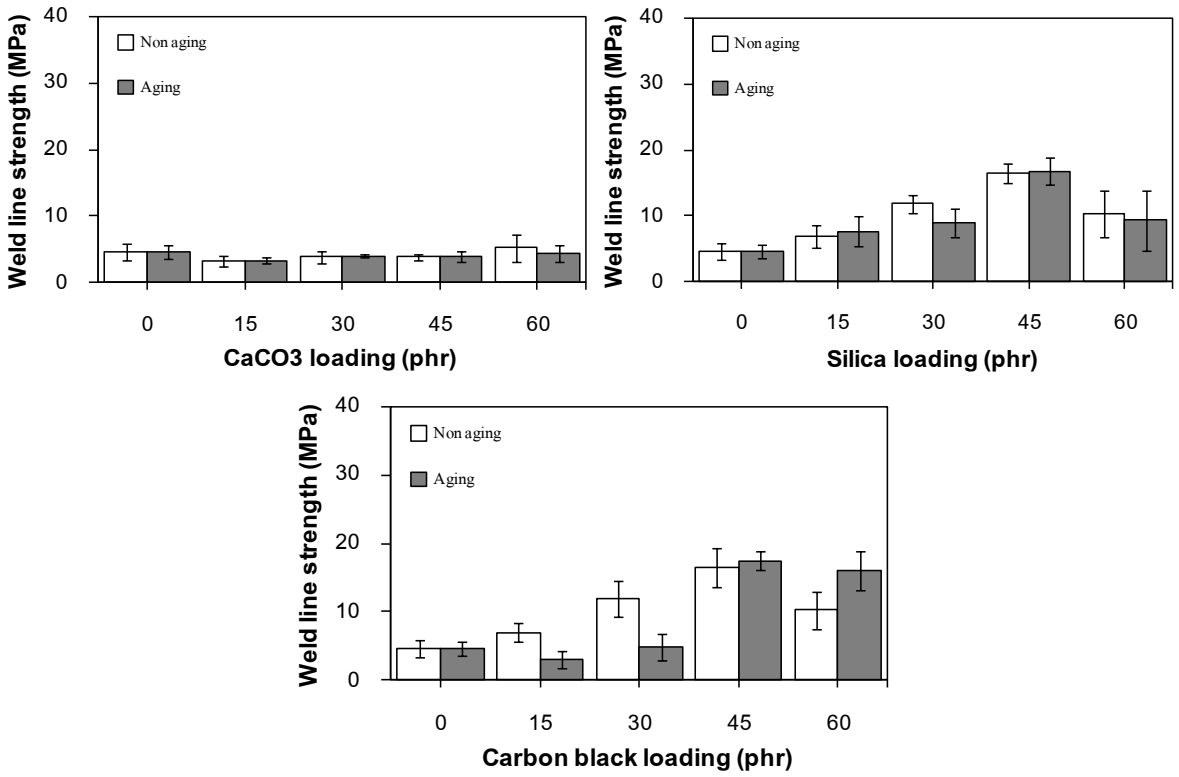
ภาพที่ 19 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางธรรมชาติภายหลังผ่านการบ่มเร่ง

4.2 ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยาง NBR พบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติ เดิมของยาง NBR ที่มีสมบัติอีลาสติกน้อยกว่ายางธรรมชาติ การเชื่อมโยงพันธะบริเวณรอยประสานจึงทำได้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีรอยประสานต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน เนื่องจากสมบัติความเป็นอีลาสติกของเนื้อยางที่ลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการส่องด้วยกล้อง SEM บริเวณรอยประสานดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่ามีการเกิดโพรงอากาศ (Void) และร่องบากรูปตัววี (V-notch) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่การรับแรงลดลง และการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่มีรอยประสาน จึงทำสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงลดลง



ภาพที่ 20 การเกิดโพรงอากาศและร่องบากรูปตัววีบริเวณรอยประสาน

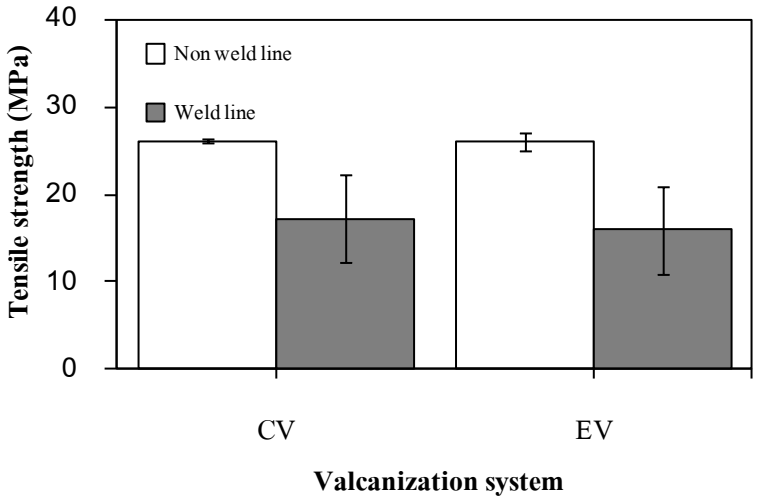
จากภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมและการบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถอธิบายได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานที่ชัดเจนและยังไม่มีสมบัติความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง เพราะฉะนั้นสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยังคงไม่แตกต่างกันเป็นผลมาจากสมบัติการทนต่อความร้อนของยาง NBR สำหรับความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่เติมซิลิกาและเขม่าดำที่ระดับ 15 phr 30 phr และ 45 phr เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมของอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนสำหรับชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ในแต่ละระดับของปริมาณสารตัวเติมไม่ส่งให้ผลให้ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้ เนื่องจากสมบัติการทนต่อความร้อนของยาง NBR



ภาพที่ 21 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยาง NBR ภายหลังผ่านการบ่มเร่ง

5. การศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางธรรมชาติ

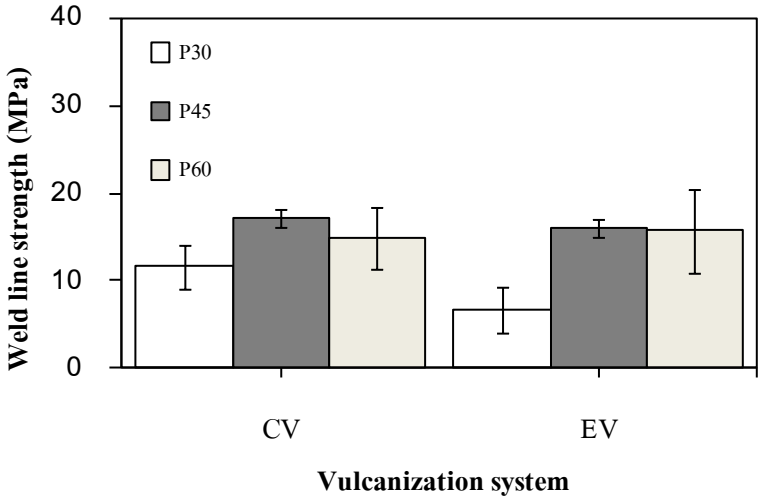
จากระบบการคงรูปของยางธ รรมชาติที่ใช้กำมะถันเป็นส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาที่ต่ำ และให้สมบัติการของยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปที่ดี จึงศึกษาระบบการคงรูปของยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเป็นสารคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 22 พบว่าสมบัติการต้านท านต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานของระบบการคงรูปแบบ EV และ CV มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงที่น้อยกว่า และมีค่าที่ใกล้เคียงทั้งสองระบบการคงรูป ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางธรรมชาติที่ไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้การยึดติดหรือเชื่อมโยงพันธะบริเวณหน้าสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 22 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

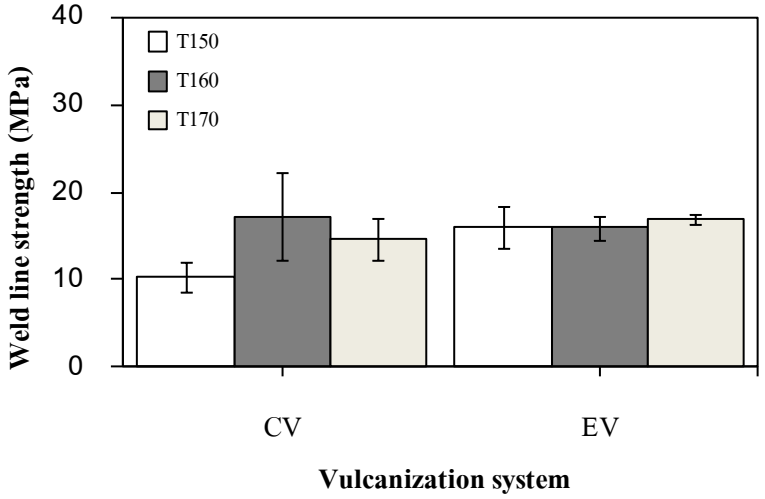
6. อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางธรรมชาติ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของแรงปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่าในระบบการคงรูปแบบ CV การเพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์ส่งผลให้รอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์ในระบบ EV ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์ ทำให้เวลาในการสัมผัสกันก่อนปฏิกิริยาคงรูปเ พิ่มมากขึ้น เนื่องจากความเร็วในการไหลของยางภายในแม่พิมพ์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามในระบบการคงรูปแบบ CV การเพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์ที่มากเกินไปส่งผลให้ ความแข็งแรงของรอยประสานลดลง เนื่องจากระบบการคงรูปแบบ CV มีการเชื่อมโยงพันธะแบบ Polysulphidic ซึ่งไม่คงทนต่ออุณหภูมิที่สูงเนื่องจากความเร็วในการไหลที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง ในขณะที่ระบบการคงรูปแบบ EV มีการเชื่อมโยงพันธะแบบ Monosulphidic หรือ Disulphidic ซึ่งมีสมบัติการทนทานต่อความร้อนที่ดีกว่า



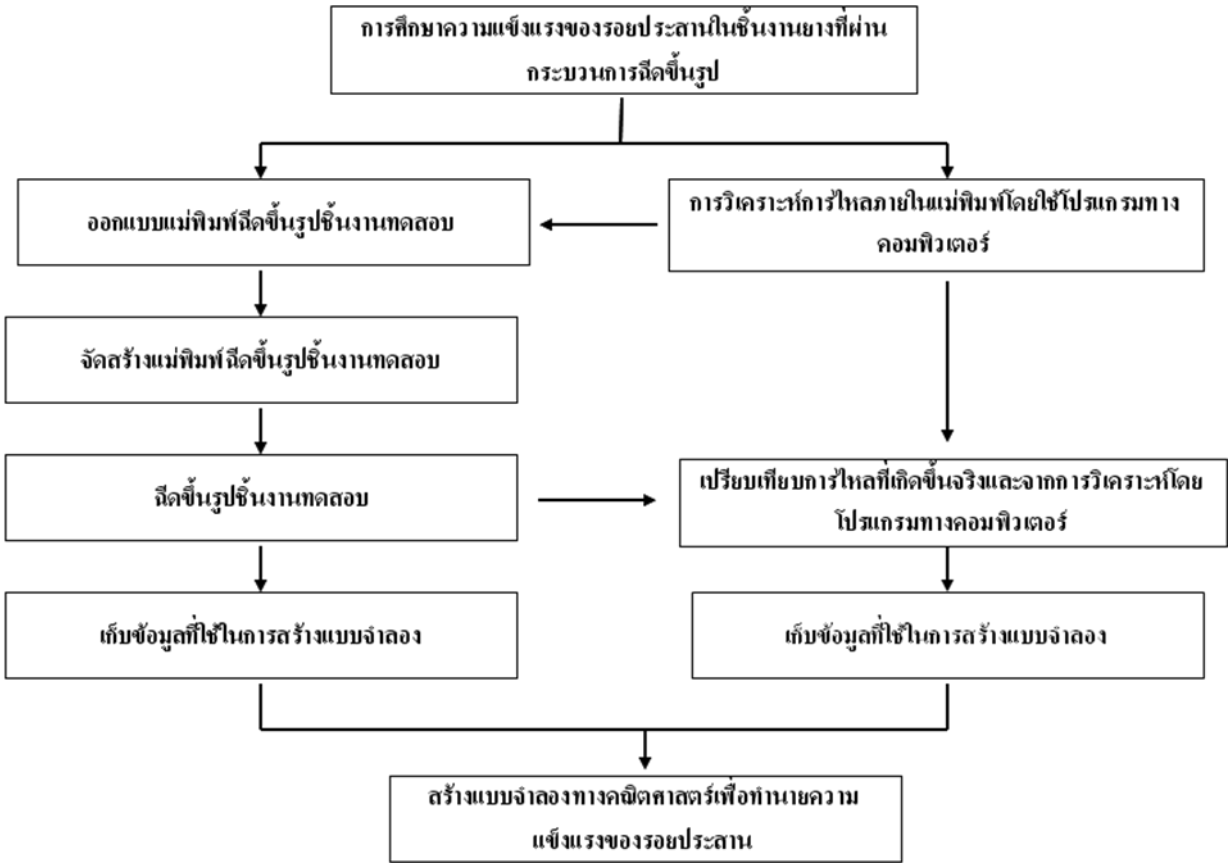
ภาพที่ 23 อิทธิพลของแรงปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 24 พบว่าในระบบการคงรูปแบบ CV มีความแข็งแรงของรอยประสานที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการคงรูปเพิ่มขึ้นจาก 140 °C เป็น 160 °C เนื่องจากปริมาณกำมะถันภายในเนื้อยางสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อ งโยงเพิ่มขึ้น และพบว่าความแข็งแรงรอยประสานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 170 °C ซึ่งเกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของกำมะถันทำให้ความแข็งแรงลดลง ในขณะเดียวกันพบว่าชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าความแข็งแรงรอยประสานที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่ อเพิ่มอุณภูมิการคงรูป ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งมีการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบ Monosulphidic หรือ Disulphidic มีสมบัติการทนต่อความร้อนที่ดีกว่าระบบการคงรูปแบบ CV



ภาพที่ 24 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

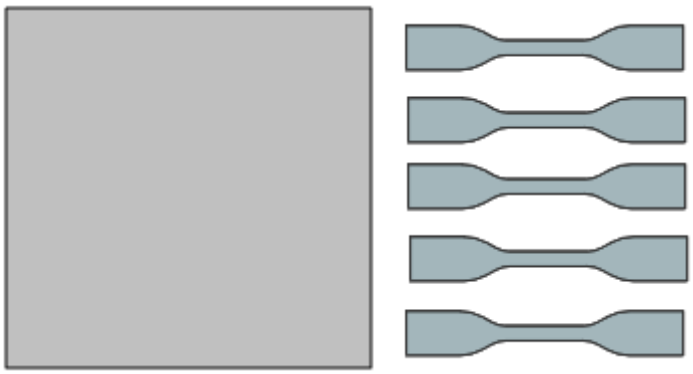
<u>กิจกรรมที่ 3</u> การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายความความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยาง ซึ่งอาศัยการเก็บข้อมูลจากกระบวนการฉีดขึ้นชิ้นงานทดสอบร่วมกับข้อมูลจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 25



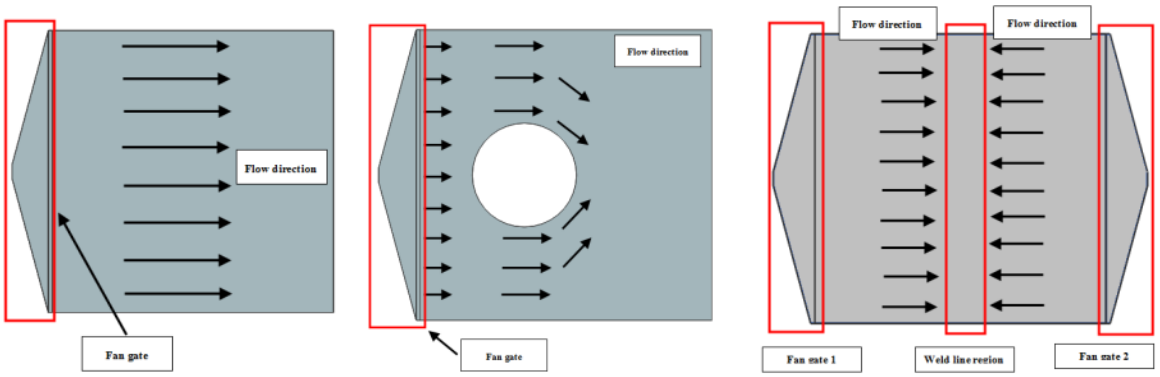
ภาพที่ 25 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงของรอยประสาน

1. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถตัดเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานทดสอบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 26 และออกแบบให้ทางเข้าเป็นแบบพัด (Fan gate) ซึ่งทำให้เนื้อยางสามารถไหลได้เต็มโดยใช้เวลาที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 27ก 27ข และ 27ค ซึ่งเป็นการออกแบบทางเข้าของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานและมีรอยประสานแบบร้อน (Hot weld line) และเย็น (Cold weld line) ตามลำดับ



ภาพที่ 26 ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์



ก. ข. ค.

ภาพที่ 27 การออกแบบทางเข้าของชิ้นงานทดสอบ

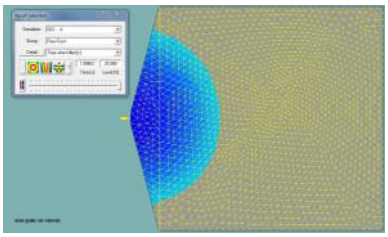
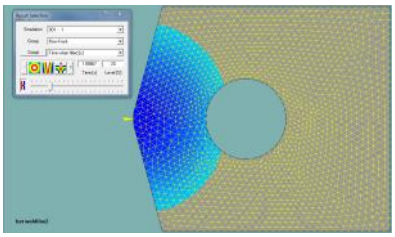
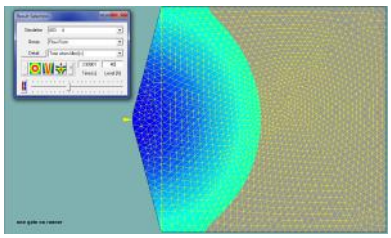
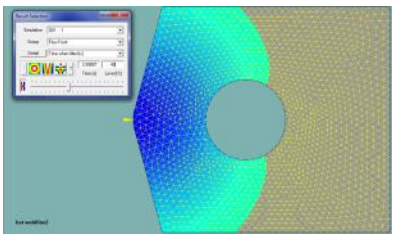
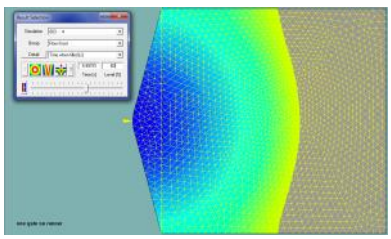
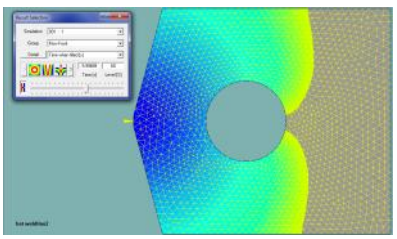
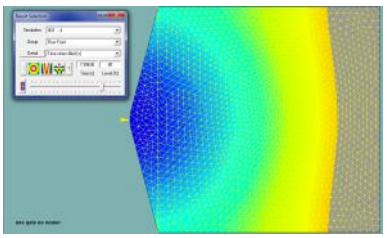
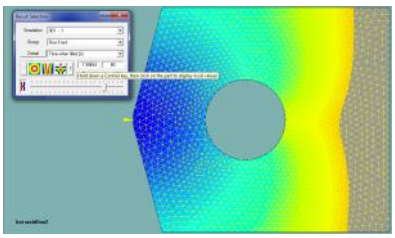
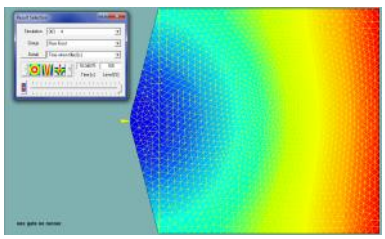
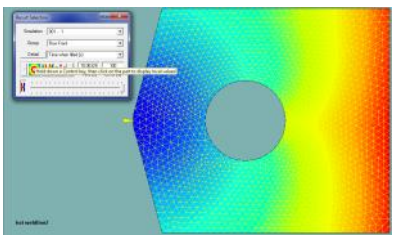
ก. ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

ข. ชิ้นงานที่มีรอยประสานแบบร้อน

ค. ชิ้นงานที่มีรอยประสานแบบเย็น

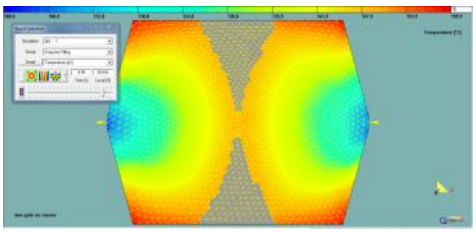
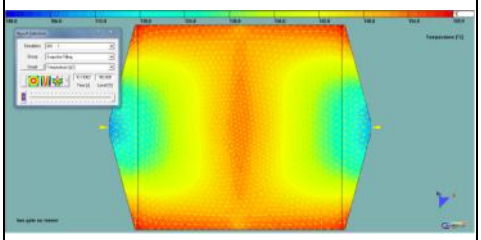
การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ในงานวิจัย ได้ใช้โปรแกรม Cadmould 3D-F 2.0 ซึ่งสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ได้ทั้ งพลาสติก (Thermoplastic) และยาง (Elastomer) โดยการวิเคราะห์แบ่งเป็นการจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานที่มีรอยประสาน (Weld line specimen) แบบเย็น (Cold weld line) และไม่มีรอยประสาน (Non weld line specimen) โดยรูปแบบการไหลของทั้งสองกรณี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

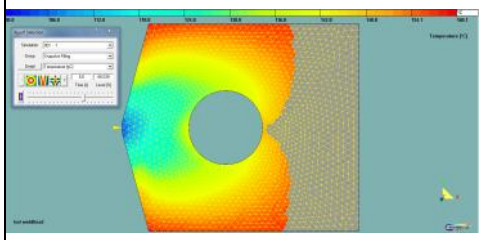
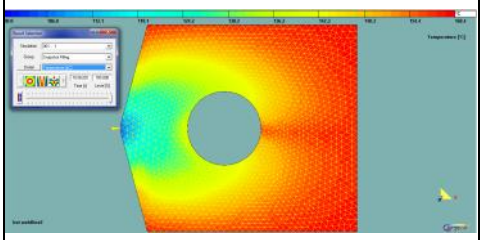
ปริมาตรการฉีด (เปอร์เซ็นต์)	ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน	ชิ้นงานที่มีรอยประสาน
20		
40		
60		
80		
100		

จากผลการวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถวิเคราะห์หาระยะเวลาที่เนื้อยางสัมผัสกัน (Contact time) และอุณหภูมิบริเวณหน้าสัมผัส (Temperature at flow front) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงของรอยประสาน โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

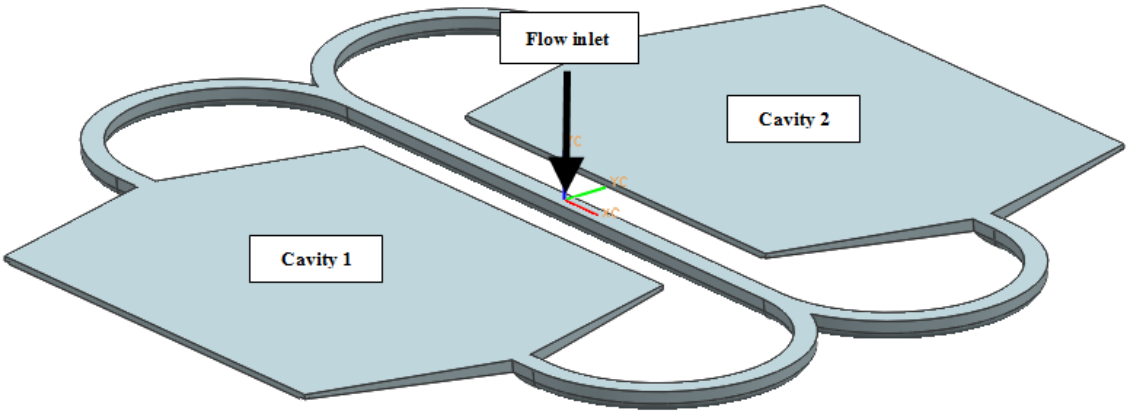
ข้อมูล	เนื้อยางเริ่มสัมผัสกัน	เนื้อยางเต็มเบ้าพิมพ์
รูปแบบการไหล		
Contact time (sec)	0	1.05
Temp. at flow font (°C)	141.9	154
Pressure at contact line (bar)	0	100

ตารางที่ 4 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ข้อมูล	เนื้อยางเริ่มสัมผัสกัน	เนื้อยางเต็มเบ้าพิมพ์
รูปแบบการไหล		
Contact time (sec)	0	3.4
Temp. at flow font (°C)	142	154
Pressure at contact line (bar)	0	0

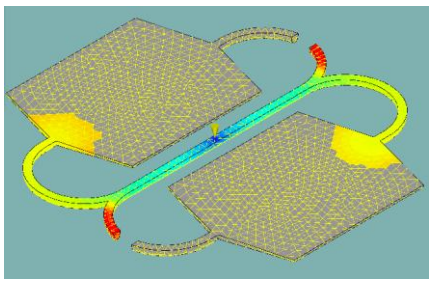
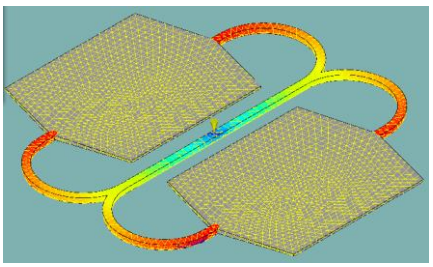
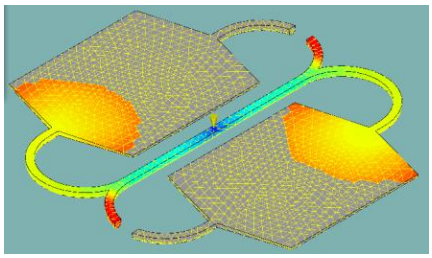
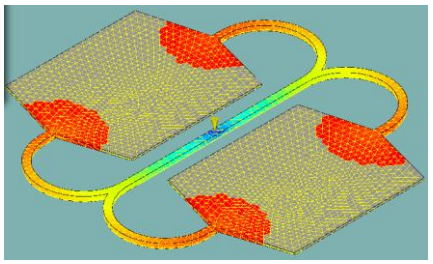
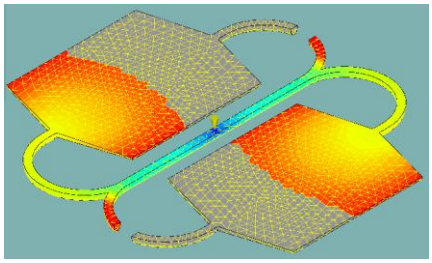
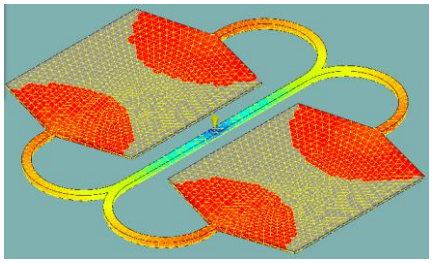
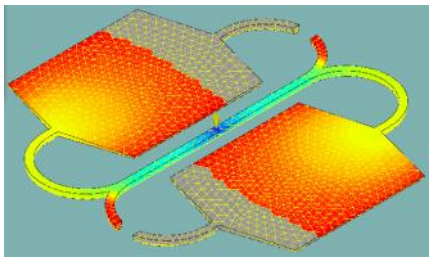
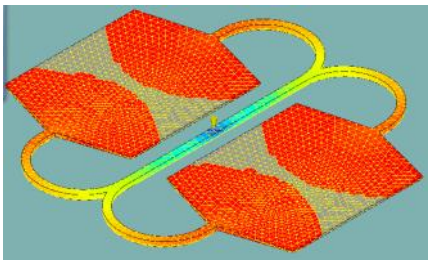
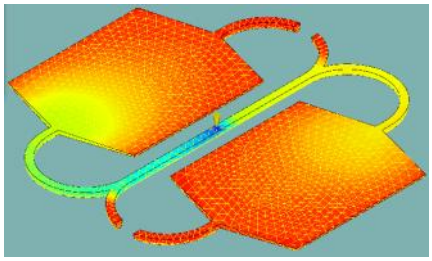
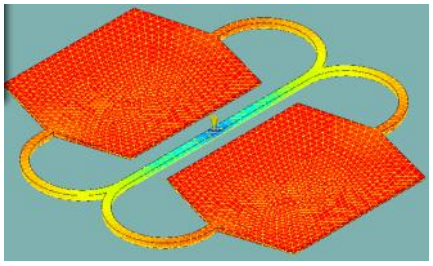
2. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้น นงานทดสอบ ได้อาศัยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ เพื่อช่วยในการออกแบบทางวิ่งที่เหมาะสม โดยภาพที่ 28 แสดงทางวิ่งและทางเข้าของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5 และ 6

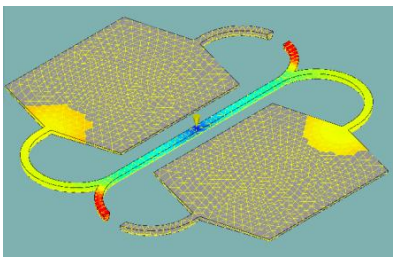
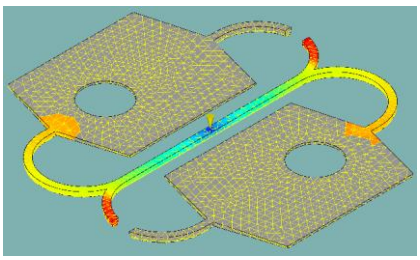
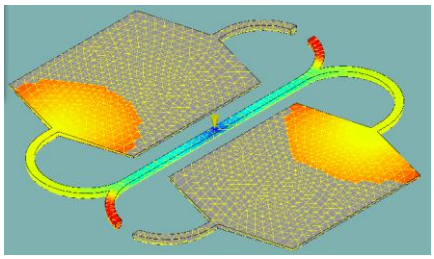
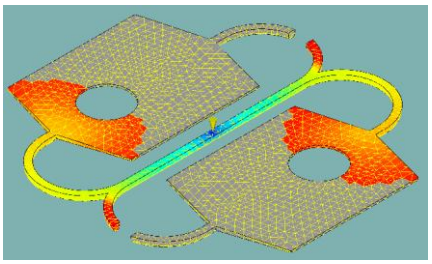
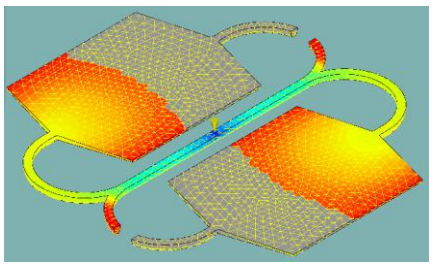
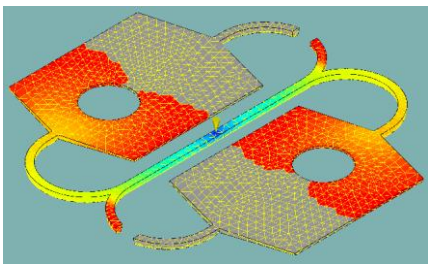
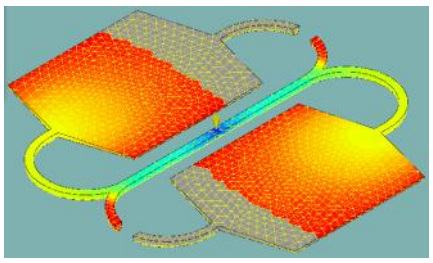
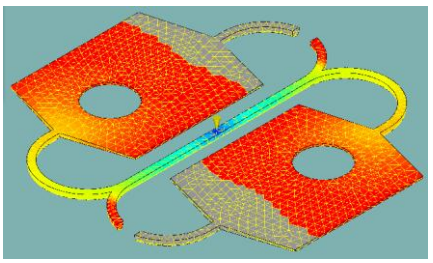
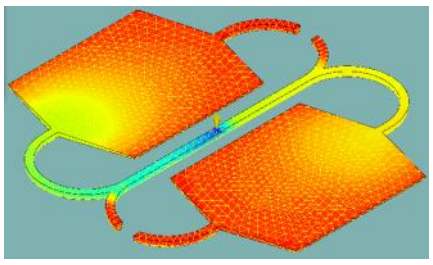
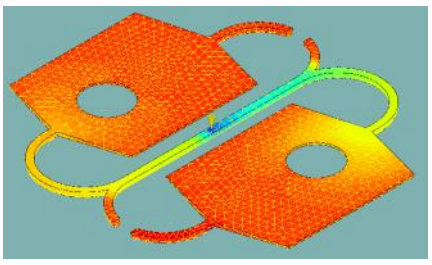


ภาพที่ 28 การออกแบบทางวิ่งและทางเข้าของแม่พิมพ์

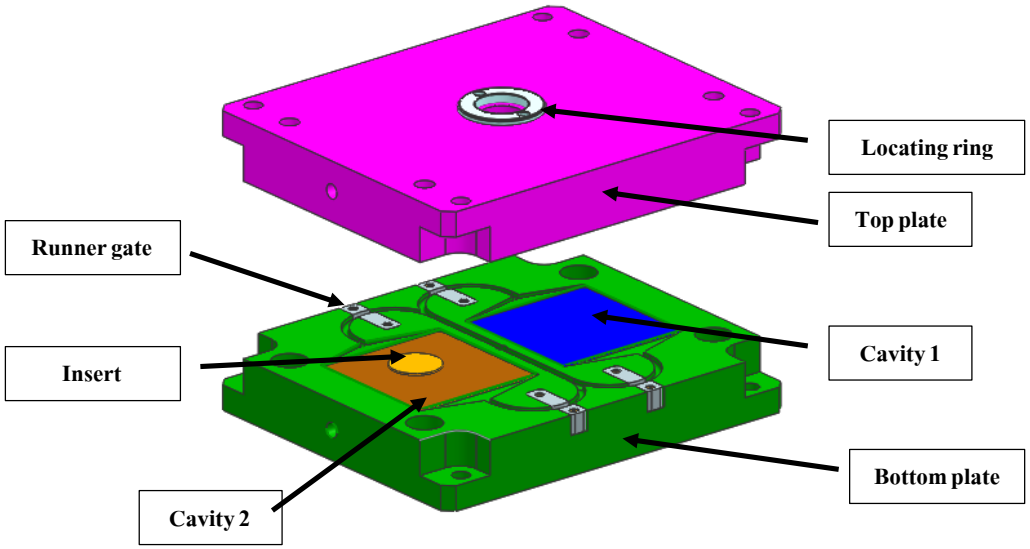
ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของชิ้นงานที่มีรอยประสานเย็น

ปริมาตรการฉีด (เปอร์เซ็นต์)	ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน	ชิ้นงานที่มีรอยประสาน
20		
40		
60		
80		
100		

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของชิ้นงานที่มีรอยประสานเย็น

ปริมาตรการฉีด (เปอร์เซ็นต์)	ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน	ชิ้นงานที่มีรอยประสาน
20		
40		
60		
80		
100		

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์จึงนำข้อมูล ที่ได้มาใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดจริง โดยใช้โปรแกรม Unigraphic ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แม่พิมพ์ที่ออกแบบ

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

การศึกษาอิทธิพลของรอยประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ฉีด เป็ นการศึกษาเบื้องต้นด้านวิศวกรรมแต่ในมิติเชิงลึกด้านสมบัติการไหลของยางที่จะมีผลต่อกระบวนการผลิต การออกแบบแม่พิมพ์ ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ที่ต้องสัมพันธ์กัน นอกเหนือจากการออกแบบสูตรส่วนผสมของยางและสารเคมีซึ่งเป็นคุณภาพในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตระดั บอุตสาหกรรม จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า สมบัติการไหลและการประสานตัวของเนื้อยางขึ้นอยู่กับส่วนผสมยางและสารเคมี โดยมีชนิดของยาง และสารตัวเติม เป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยาง และขนาดอนุภาคของสารตัวเติม มีผลต่อแรงอันตรกิริยา (interaction) ระหว่าง ยางและสารตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยดังกล่าว นอกจากนั้น อุณหภูมิ และแรงอัดในระหว่างกระบวนการผลิต ก็มีผลต่อความแข็งแรงรอยประสานเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ได้กล่าวแล้วว่า การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของมิติเชิงลึกด้านวิศวก รรม ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จึงจัดเป็นองค์ความรู้เบื้องต้นที่จะเป็นฐานในการศึกษาเชิงลึกด้านวิศวกรรมต่อไปได้

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินการทดลอง ทั้งการเตรียมยางผสมสารเคมี การทดสอบต่าง ๆในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

แกน โอภาสกรกุล. 2551. อิทธิพลของปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป . ปริญญานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Allen, Y. P., W.-H. Yang and D. C. Hsu. 2008. **Numerical Prediction of the Weld-line-Induced Strength Reduction for Injection-Molded Part.** n.d. CoreTech System Co.,Ltd., Available Source: http://www.ansys.com/events/proceedings/2006/PAPERS/53.pdf. June 10

Davis, B.A., P.J. Gramanm., T.A. Osswald and A.C. Rios. 2003. **Compression Moulding**. Carl Hanser Verlag, Munich.

Enikeev, A. V., Yu. V. Kazankov and V. A. Mironov. 1999. Mechanism of Weld Line Formation In Injection Molding of Plastics. **Chemical and Petroleum Engineering** vol. 35(1999): 118-123.

Ersoy, O. G. and N. Nugay. 2007. Combined Effect of The Nature of The Filler and the Compatibilizer on The Weld Line Properties of Filled Blends. **Composites: Part A** vol. 38(2007): 162–173.

Guo, S., A. Ait-Kadib, and M. Bousmina. 2004. A Modified Model Predictions and Experimental Results of Weld-Line Strength in Injection Molded PS/PMMA Blends. **Polymer** vol. 45(2004): 2911–2920.

Hashemi, S. and Y. Lepessova. 2007. Temperature and Weldline Effects on Tensile Properties of Injection Moulded Short Glass Fibre PC/ABS Polymer Composite. **J. Mater Sci**. vol. 42(2007): 2652–2661.

Huadsarkhar, S. 2006. **A Study of Factors Affecting Weld Line Strength of Polystyrene in the Injection Molding Process**. Mater Thesis. Mahidol University.

Jarus, D., J. W. Summersb A. Hiltnera and E. Baera. 2000. Weld Line Strength Of Poly (Vinyl Chloride)/Polyethylene Blends. **Polymer** vol. 41(2000): 3057–3068.

Kazmer, D. O., **Exploiting Melt Compressibility to Achieve Improved Weld Line Strengths**. n.d. University of Massachusetts Amherst. Available Source: kazmer.uml.edu/Staff/Archive/ 1998 JPRCP_Weld_Strength.pdf. January 24, 2008.

Kim S.-G. and N. P. Suh. 1986. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. **Polymer Engineering and Science** vol. 36(1986): 1200-1207.

Kim, J. K., S. H. Park, H. T. O and H. K. Jeon. 2001. The Effect of Weld-Lines on the Morphology and Mechanical Properties of Amorphous Polyamide/Poly(Ethylene-Ran-Propylene) Blend with Various Amounts of an in Situ Compatibilizer. **Polymer** vol. 42(2001): 2209–2221.

Liu S.-J., J.-Y. Wu and J.-H. Chang. 2001. Design of Experiments to Optimize the Weldline Strength in Injection Molded Thermoplastics. **SPE ANTEC Proceedings**, May, 2001.

Lu, C., S. Guo, L. Wen and J. Wang. 2004. Weld Line Morphology and Strength of Polystyrene/Polyamide-6/Poly (Styrene-Co-Maleic Anhydride) Blends. **European Polymer Journal** vol. 40(2004): 2565–2572.

Malguarnera, S. C. 1982. Weldline in Polymer Processing. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**. Vol. 18(1982): 1-45.

Mekhilef, N., A. Ait-Kadi and A. Ajji. 1995. Weld Lines in Injection-Moulded Immiscible Blends: Model Predictions and Experimental Results. **Polymer** vol. 36(1995): 2033-2042.

Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2004. Effects of Injection Molding Weld on Fatigue Crack Resistance of CPVC at Different Temperatures. **Journal of Materials Processing Technology** vol. 155–156(2004): 1261–1265.

Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2003. Temperature and Weld-Line Effects on Mechanical Properties of CPVC. **Journal of Materials Processing Technology** vol. 142(2003): 247–255.

Merhar, C. F., K. A. Beiter and K. Ishii. 1994. Weld-Line Strength in Injection Molded PVC Parts. **SPE ANTEC Proceedings**, May, 1994.

Nguyen-Chung, T. 2004. Flow Analysis of the Weld Line Formation During Injection Mold Filling of Thermoplastics. **Rheol Acta** vol. 43(2004): 240–245.

Overton, L. n.d. Flow Orientation and Weld Lines-They can Contribute to the Success or Failure of a Part. **Engineering Design: A Global View of Dupont Polymers**. Available Source: http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/americas /processing/DCI384.pdf. January 24, 2008.

Patcharaphun S. 2007. A Troubleshooting Forum & Workshop on Injection Molded Parts. **Research and Development Institute of Industrial Production Technology**. Available Source: www.rdipt.ku.ac.th/document/Presentation_ITP%2009.pdf. January 24, 2008.

Patcharaphun, S. 2006. **Characterization and Simulation of Material Distribution and Fiber Orientation in Sandwich Injection Molded Parts**. Ph.D. Thesis, Chemnitz University of Technology.

Patcharaphun, S., B. Zhang and G. Mennig. 2006. Investigation on Weldline Strength of Short-glass-fiber Reinforced Polycarbonate Manufactured through Push–Pull-processing Technique. **Journal of Reinforced Plastics and Composites** vol. 25: 421-435.

Patcharaphun, S., B. Zhang and G. Mennig. 2007. Simulation of Three-dimensional Fiber Orientation in Weldline Areas During Push-pull-processing. **Journal of Reinforced Plastics and Composit** vol. 26(2007): 977-985.

Rios, A., B. Davis, and P. Gramann. n.d. Computer Aided Engineering in Compression Moulding. The Madison Group. Available Source: http://www.madisongroup.com/Publications/Thermosets /cae.pdf. January 23, 2008.

Seadan M. P. Pongbhai, P. Thairaj, T. Watana Kamtornkul. 2002. Weld-line strength of rubber in injection molding: Effect of injection factors and compound characteristics. **Rubber chemistry and technology.** vol. 75(2007): 83-92.

Tjader T. and J. Seppala. 1998. Effect of material characteristics of polyolefins on weld line morphology and its correlation to mechanical properties. **Journal of Materials Science** vol. 33(1998): 923-931.

Zhai, M., Y. C. Lam and C. K. Au. 2006. Runner Sizing and Weld Line Positioning for Plastics Injection Moulding with Multiple Gates. **Engineering with Computers** vol. 21(2006): 218–224.

Zhou H., D. Li. 2004. Modelling and Prediction of Weld Line Location and Properties Based on Injection Moulding Simulation. **International Journal of Materials and Product Technology** vol. 21(2004): 526 – 538.