

การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติ  
ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

An Investigation into Weld Line Strength of Injection Molded  
Natural Rubber Parts

นายชิตชาติ ดอกกรัก

อ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 Email: fengsjpc@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประเภทพอลิเมอร์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูง ต้นทุนในการผลิตต่อชิ้นลดลง และที่สำคัญสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูงได้ อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อน จำเป็นต้องมีทางเข้าหลายทางหรือมีอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ ทำให้เกิดรอยประสานบนผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการวิจัยเพื่อแก้ปัญหานี้เป็นจำนวนมาก โดยศึกษาเน้นไปที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต ในขณะที่งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางมีรายงานน้อยมาก ส่งผลให้ปัญหานี้ยังคงเกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นปริิญญาณินพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถสร้างชิ้นงานทั้งที่มีและไม่มีรอยประสาน เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติ (STR 5L) ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในปริมาณ 0 - 30 phr รวมทั้งศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 140°C - 160°C และนอกจากนี้ยังได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการจำลองพฤติกรรมกรไหลของยางภายในแม่พิมพ์ฉีดเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในเนื้อยาง ไม่ส่งผลกระทบบต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานมากนัก ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำในชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน พบว่า ทำให้ชิ้นงานยางมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน และพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ของยางที่เติมเขม่าดำ 30 phr สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของรอยประสาน

ได้ และจากผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พบว่า มีความสอดคล้องกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่คิดในระดับหนึ่ง

**คำสำคัญ** กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง รอยประสาน ยางธรรมชาติ ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด

### Abstract

Injection molding (IM) are widely used in polymeric parts fabrication due to its high production rate, low marginal cost and enabling complex part fabrication. Multi-gates are required in a mold for a large-sized part, and occasionally an insert is used. Existing of the multi-gates and insert results in a weld line on the part. This problem reducing the strength of the part at the weld line is still unable to be solved. Many studies aimed to solve this problem emphasizing on injection of thermoplastics and its composites, while few studies emphasized on strength at weld line of rubber parts. The problem still affects rubber processing industry. This research was purposed to study fillers affecting strength at weld line of STR 5L natural rubber added calcium carbonate, silica and carbon black at 0-30 phr. Moreover, mold temperature was observed at 140°C - 160°C and Computer-Aided Engineering (CAE) was used to simulate the flow of rubber in the mold cavity and compared with real injection process. The results showed increasing of calcium carbonate in rubber obviously unaffected maximum tensile strength of weld line and non-weld line parts. The increase mold temperature for rubber added carbon black at 30 phr could improve strength at weld line. Lastly, from the simulation showed a concordance with real rubber injection molding.

**Keywords:** Rubber injection molding process, Weld line, Natural rubber, Finite volume method

## 1. บทนำ

ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วย กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (transfer molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) ซึ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้นมีข้อดีที่มากกว่ากระบวนการอื่น โดยสามารถทำงานแบบอัตโนมัติ หรือ แบบกึ่งอัตโนมัติ อีกทั้งยังมีข้อดีในเรื่องของการใช้เวลาในการผลิตและของเสียในกระบวนการผลิตน้อย ไม่สิ้นเปลืองแรงงาน รวมทั้งประหยัดพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่ำกว่ากระบวนการผลิตแบบอื่นๆ ดังนั้นกระบวนการฉีดขึ้นรูปจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง อย่างไรก็ตามในการผลิตชิ้นงานยางที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้ทางเข้าหลายทาง (multiple gates) หรือในกรณีการผลิตชิ้นงานยางที่มีความซับซ้อนจำเป็นต้องมีอินเสิร์ท (insert) ภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดรอยประสานขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งเป็นรอยตำหนิบริเวณผิวชิ้นงาน และที่สำคัญชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงลดลงอย่างมาก เป็นสาเหตุให้ไม่เป็นที่ต้องการของลูกค้า

ปัญหาเรื่องความแข็งแรงรอยประสานมีการศึกษาอย่างกว้างขวางสำหรับชิ้นงานที่ผลิตจากวัสดุเทอร์โมพลาสติกมี ทั้งในด้านการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของโพลีสไตรีนในกระบวนการฉีดขึ้นรูป[1] และอิทธิพลของความหนาของชิ้นงานที่มีผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน[2] ในขณะที่การศึกษาด้านความแข็งแรงรอยประสานในผลิตภัณฑ์ยางยังพบได้น้อย ตัวอย่างเช่น การศึกษาอิทธิพลของรอยประสานของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนในกระบวนการฉีดขึ้นรูป[3] การศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีผลต่อความแข็งแรงรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทางการผลิตที่มีผลต่อความแข็งแรงรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป[4] ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในกระบวนการอัดขึ้นรูป[5] ปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งสามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตก่อนมีการผลิตจริง ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักเนื่องจากความซับซ้อนของสมบัตินิโกลของยาง จากปัญหาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ปรินูญานินพินนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยศึกษาตัวแปรที่มาจากยางคอมพาวด์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ รวมทั้งใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง

## 2. การดำเนินการงานการวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ยางธรรมชาติเกรด STR 5L (natural rubber) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) ซิลิกา (silica) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) เขม่าดำ (carbon black) น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) โซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะซิลซัลฟิनाไมด์ (CBS) กำมะถัน (sulfur) เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) ของ KNEADER MACHINERY เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ขนาด 8 นิ้ว x 20 นิ้ว ของ Kodair Seisakusho รุ่น R11-3FF เครื่องฉีดขึ้นรูปยาง (rubber injection molding machine) ของ Rep รุ่น V37/100 แม่พิมพ์ฉีดทดสอบความแข็งแรงรอยประสานยาง เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของ Instron รุ่น 1011 เครื่องชั่งน้ำหนักของ METTER – TOLEDO รุ่น PM 30000-Kn เครื่องตัดยางระบบไฮดรอลิก ของ Daina รุ่น HD-30 เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม

### 2.2 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์

ขั้นตอนแรกออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมยูนิกราฟิก (Uni-Graphic) โดยออกแบบให้แม่พิมพ์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสานได้ และสามารถขึ้นรูปได้ทั้งชิ้นงานที่มีรอยประสานแบบร้อนและแบบเย็น โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะรอยประสานแบบเย็น แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูป

### 2.3 ขั้นตอนการบดผสมยางและสารเคมี

ขั้นตอนการบดผสม ใช้ยางธรรมชาติ บดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อทำให้อย่างธรรมชาติมีผลจากนั้น ZnO และ Stearic acid เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงใส่สารตัวเติมพร้อมสารตัวช่วยในการบดผสม(เฉพาะบางตัว) ใส่ครั้งละ 1/3 ของทั้งหมด ใช้เวลาบดผสมครั้งละ 1 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องบดผสมระบบปิด แล้วนำไปบดผสมต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ใช้อุณหภูมิที่ลูกกลิ้ง 70 °C นำยางที่ได้จากเครื่องบดผสม

ระบบปิดมาใช้เพื่อลดให้พื้นรอบลูกกลิ้ง จากนั้นใส่สารตัวเร่ง CBS ใช้เวลาบดผสม 1 นาที แล้วใส่กัมมะถันแล้วบดผสมเป็นเวลา 3 นาที ในขณะที่บดผสมจะต้องใช้มีดกรีดยางบนลูกกลิ้งเพื่อเป็นการทำให้สารเคมีเข้ากับยางได้ทั่วถึง จากนั้นปรับขนาดช่องห่างระหว่างลูกกลิ้งเพื่อให้ยางสามารถเข้าเครื่องฉีดได้ คัดยางบางส่วนออกมาเก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์ ODR และ Mooney จากนั้นจะใช้มีดกรีดยางจากลูกกลิ้งออกเป็นเส้น โดยมีสูตรยางที่ไม่ผสมสารตัวเดิม ดังแสดงในตารางที่ 1 สูตรยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 2 สูตรยางที่ผสมซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 3 และสูตรยางที่ผสมเขม่าดำ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ไม่ผสมสารตัวเดิม (หน่วย : phr)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ
NR(STR5L)	100
ZnO	4
Stearic Acid	2
Sulphur	2.4
CBS	0.8

ตารางที่ 2 สูตรยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (หน่วย : phr)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
NR(STR5L)	100	100
ZnO	4	4
Stearic Acid	2	2
CaCO <sub>3</sub>	15	30
Sulphur	2.4	2.4
CBS	0.8	0.8

ตารางที่ 3 สูตรยางที่ผสมซิลิกา (หน่วย : phr)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
NR(STR5L)	100	100
ZnO	4	4
Stearic Acid	2	2
SiO <sub>2</sub>	15	30
Sulphur	2.4	2.4
PEG	0.9	1.44

CBS	0.8	0.8
-----	-----	-----

ตารางที่ 4 สูตรยางที่ผสมเขม่าดำ (หน่วย : phr)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
NR(STR5L)	100	100
ZnO	4	4
Stearic Acid	2	2
Carbon Black	15	30
Sulphur	2.4	2.4
CBS	0.8	0.8
Aromatic Oil	1	2

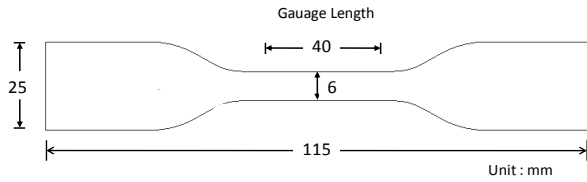
และจะต้องบดยางข้างล่างกระบอกลูกกลิ้ง โดยบดยางธรรมชาติด้วยเครื่องบดผสมระบบปิดเป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงใส่ดินขาวแล้วบดต่อเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปบดต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง แล้วกรีดยางออกมาเป็นเส้นในลักษณะเดียวกับยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป

## 2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

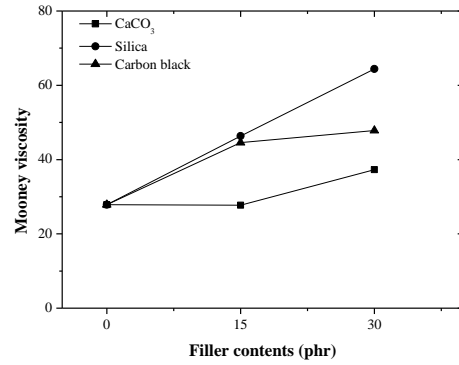
นำยางคอมพาวนด์ที่เป็นเส้นป้อนเข้าเครื่องฉีดยาง เมื่อได้ตามปริมาตรที่เราต้องการสกรูของเครื่องจะหยุดป้อนเนื้อ โดยใช้ปริมาตรในการฉีดประมาณ 225 cm<sup>3</sup> และใช้ความดันฉีดที่ 19.61 MPa จากนั้นจะทำการปิดแม่พิมพ์ และเลื่อนชุดหัวฉีดลงมาสุด โดยใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 140 °C 150 °C และ 160 °C จากนั้นจึงทำการฉีด แล้วทิ้งไว้ตามเวลารองรับที่ 90% (t<sub>90</sub>) เมื่อครบตามเวลาจึงเปิดแม่พิมพ์ แล้วปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำการฉีดขึ้นรูปในครั้งต่อไป เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปยางเสร็จในแต่ละสูตรจะต้องใช้ยางล้างล้างกระบอกลูกกลิ้งเพื่อให้ยางคอมพาวนด์ตัวเก่าที่ค้างอยู่ภายในออกไปให้หมดก่อน และก่อนจะปิดเครื่องในแต่ละครั้งจำเป็นต้องฉีดยางล้างก่อนเช่นกันเพื่อไม่ให้ยางคอมพาวนด์ที่มีส่วนผสมของกัมมะถันค้างอยู่ในกระบอกลูกกลิ้ง

## 2.5 ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานแรงดึง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ เตรียมได้จากเครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม ได้ชิ้นงานทดสอบในลักษณะคิมเบลล์ ตามมาตรฐาน ISO 37 และ ASTM D 412 ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปวัดด้วยเครื่องวัดความหนา แล้วจึงนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2 ลักษณะชิ้นงานที่ตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม



รูปที่ 3 ความหนืดมูนีของยางธรรมชาติเมื่อผสมสารตัวเติม

### 3. ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์

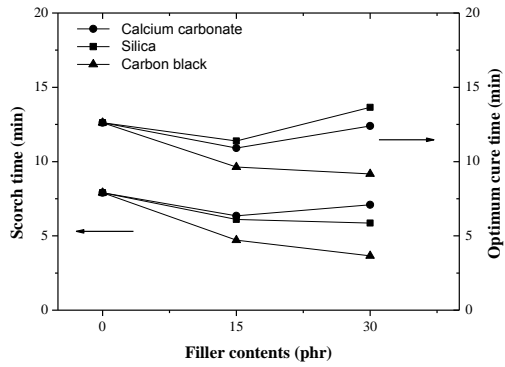
#### 3.1 ผลการทดสอบความหนืดมูนีและสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

##### 3.1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อความหนืดมูนีของยาง

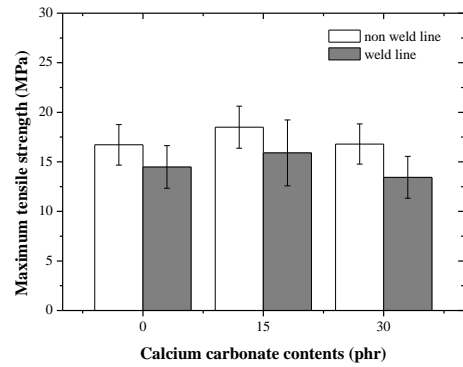
จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อค่าความหนืดมูนีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของซิลิกาและเขม่าดำ ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิว (surface area) น้อย ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อยางลดลง [6] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจึงไม่ทำให้ความหนืดของยางคอมพาวนด์เปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อพิจารณาปริมาณซิลิกาและเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความหนืดมูนีของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้สามารถยึดเกาะกับเนื้อยางได้ดี ซิลิกาและเขม่าดำจึงเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing fillers) ดังนั้นความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์จึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนีของยางเดิมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า ที่ปริมาณการเติม 30 phr ค่าความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์ที่เติมซิลิกาสูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่เติมเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก ทำให้มีการยึดเกาะกันเองสูงมาก จึงรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่อย่างเหนียวแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความแข็งแรงมาก เกิดเครือข่ายสารตัวเติม (filler-filler network) ภายในยางคอมพาวนด์ ส่งผลให้ความหนืดของยางคอมพาวนด์มีค่าเพิ่มขึ้น

##### 3.1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยาง

จากผลการทดสอบเวลาเริ่มคงรูป (scorch time, Ts2) และเวลาคงรูป (optimum cure time, Tc90) ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางมากนัก ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเขม่าดำส่งผลให้เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวภายในเนื้อยางของสารตัวเติมมีความแตกต่างกัน เป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีขนาดเล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและผิวของเขม่าดำมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยาง ซึ่งในขณะบดผสมจะเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลได้มาก เขม่าดำสามารถแทรกตัวในระหว่างเนื้อยางได้ดีกว่า โดยเมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับความร้อน สามารถแพร่กระจายความร้อนภายในยางคอมพาวนด์ได้ดีและเกิดกระบวนการวัลคาไนเซชันได้อย่างรวดเร็ว และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้สามารถอธิบายเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เติมซิลิกาในปริมาณ 15 phr ได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 30 phr ส่งผลให้เวลาคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเอง และยังเป็นตัวดูดซับสารตัวเร่งและสารกระตุ้นเข้าไปที่ผิวของซิลิกาทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ระยะเวลาเริ่มคงรูปและระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม



รูปที่ 5 สมบัติการต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต

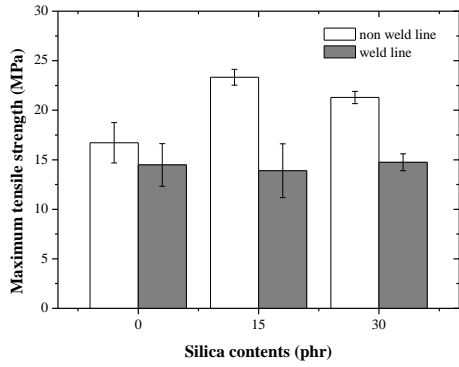
### 3.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของยางคงรูป

#### 3.2.1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในยางเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณาความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีรอยประสานพบว่า มีค่าไม่แตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากความหนืดของยางคอมพาวนด์ไม่สูงมาก ยางคอมพาวนด์จึงสามารถไหลได้ดีภายในแม่พิมพ์ ทำให้เวลาสัมผัส (contact time) ของยางภายในแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการที่แคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (molecular diffusion) และเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุล (molecular entanglement) ที่บริเวณหน้าสัมผัสได้ดี ความแข็งแรงจึงไม่แตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

#### 3.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่ไม่มีและมียอยประสาน

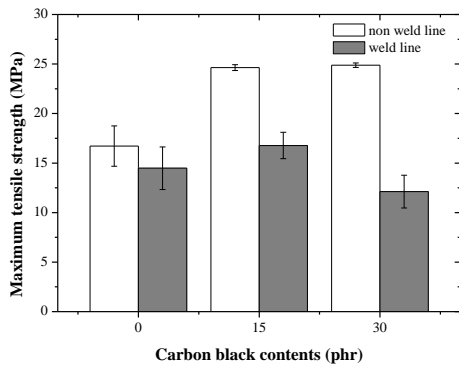
จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานยาง ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางที่ไม่เติมสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งสามารถแทรกตัวเข้าไปสัมผัสกับเนื้อยางได้ดี ส่งผลให้ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง แต่อย่างไรก็ตามการเติมซิลิกาที่ปริมาณ 30 phr พบว่า มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดลดลง เนื่องจากการเติมซิลิกาในปริมาณมาก ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ของสารตัวเติม ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของซิลิกาเป็นพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง ส่งผลให้มีการกระจายตัวในยางคอมพาวนด์ได้น้อยลง ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้น การไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ช้ากว่ายางที่มีความหนืดต่ำ ส่งผลให้เวลาสัมผัสกันของยางลดลง และยางที่มีความหนืดสูงทำให้ร่องบากตัววี (V-notch) ที่ผิวของชิ้นงานยางปรากฏชัดเจนมากขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่บริเวณดังกล่าว รวมทั้งที่บริเวณหน้าสัมผัสของยางที่มีความหนืดสูงๆ แรงบิดแม่พิมพ์ไม่สามารถขับอากาศออกจากเนื้อยางได้โดยง่าย เกิดเป็นอากาศตกค้าง (air trap) ภายในชิ้นงานยาง ส่งผลให้พื้นที่ในการรับแรงของชิ้นงานลดลง[8] นอกจากนี้ซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางและสารตัวเติมที่ค่อนข้างดี เป็นผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยาก การแพร่ข้ามและการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณหน้าสัมผัสจึงน้อยลง



รูปที่ 6 สมบัติการต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา

### 3.2.3 อิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่ไม่มีและมียรอยประสาน

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณขี้เถ้า ทำให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากขี้เถ้ามีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง และมีการกระจายตัวที่ดีมาก ส่งผลให้ขี้เถ้าเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (อย่างไรก็ตามในที่ปริมาณ 15 phr และ 30 phr มีความต้านทานต่อแรงดึงไม่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความหนาเกินไปทำให้แรงสูงสุดของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงไม่สามารถดึงให้ขาดได้) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า เมื่อปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงเป็นอย่างมาก

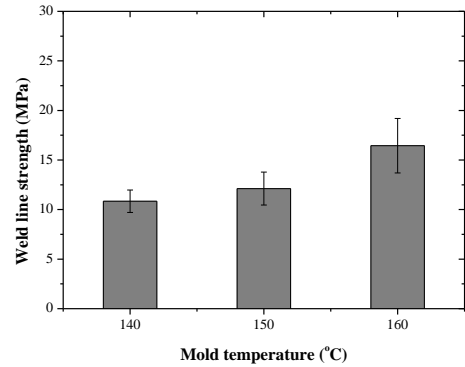


รูปที่ 7 สมบัติการต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมขี้เถ้า

### 3.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสาน

จากผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานพบว่า การเติมสารตัวเติมเสริมที่ปริมาณมาก ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนของการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มี

ต่อความแข็งแรงรอยประสาน จึงเลือกขี้เถ้าเดิมขี้เถ้า 30 phr ในการทดสอบจากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาในช่วงอุณหภูมิ 140 °C - 160 °C พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแพร่ข้าม (diffusion) ระหว่างหน้าสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันสายโซ่โมเลกุลที่แพร่ข้ามเกิดการเกี่ยวพันกัน และเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (crosslink) ด้วยกัมมันต์ของสายโซ่โมเลกุลที่แพร่เข้าหากัน ที่ตำแหน่งหน้าสัมผัสของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน ส่งผลให้รอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 8 สมบัติการต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผสมขี้เถ้า 30 phr ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ

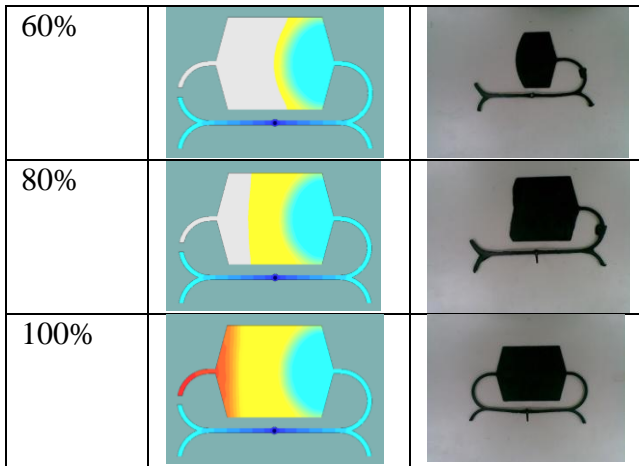
### 3.3 ผลการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหลของยางภายในแม่พิมพ์ฉีด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ที่เติมขี้เถ้าในปริมาณ 30 phr มาศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดที่ปริมาณการเติมเข้าแม่พิมพ์ตั้งแต่ 20% - 100%

#### 3.3.1 ผลการจำลองการไหลของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการจำลองการไหลกับการฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

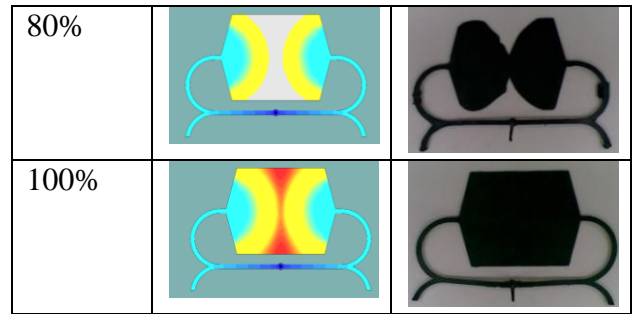
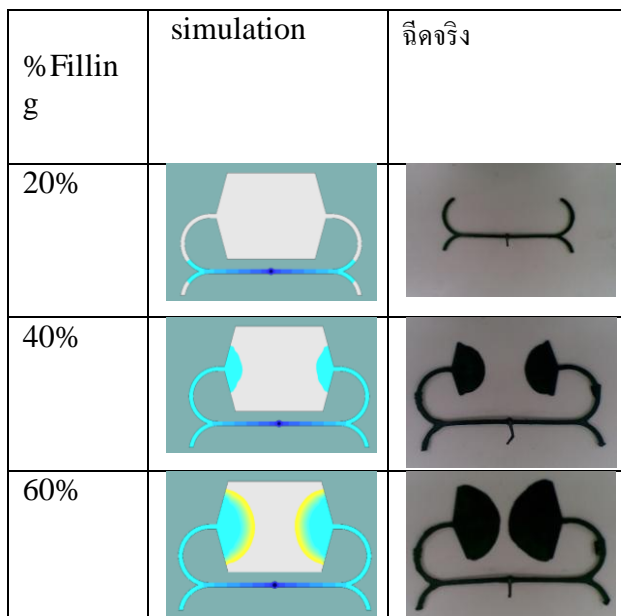
% Filling	simulation	ฉีดจริง
20%		
40%		



ชิ้นงานที่ฉีดจริงกับที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงยังสามารถไหลตัวได้มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีการตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิของระบบคงที่ตลอดระยะเวลาการไหล (isothermal) แต่ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้น ความร้อนในพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นจากแรงเฉือน (shear heating) ในขณะที่ไหลตัวผ่านช่องทางที่มีขนาดเล็ก อย่างเช่น ทางเข้า ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงจึงสามารถไหลได้ดี และจากสมมติฐานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไม่มีการเลื่อนไถลที่บริเวณผนัง (no slip at wall) ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง ที่ปรากฏเป็นร่องรอยการลื่นไถล ดังแสดงในตารางที่ 5

### 3.3.2 ผลการจำลองการไหลของชิ้นงานที่มีรอยประสาน

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการจำลองการไหลกับการฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานที่มีรอยประสาน



จากตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า สอดคล้องกับผลที่ได้จากชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน คือ ยางในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงสามารถไหลตัวได้ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกัน ดังได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.1

## 4. สรุปผลการทำดำเนินงาน

### 4.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่มีรอยประสานและมีรอยประสาน โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในเนื้อยาง ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ไม่มีและมียอยประสานมากนัก เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำในชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน พบว่า มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ในขณะที่ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน และสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำ 30 phr พบว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความสามารถในการแพร่ข้ามหน้าสัมผัสของสายโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการจำลองการไหลของยางภายในแม่พิมพ์มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง

### 4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยต่อไปควรเพิ่มการศึกษาปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ ความดันปิดแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด เป็นต้น รวมทั้งควรมีการทดสอบสมบัติอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การทดสอบการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีรอยประสาน เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาให้ความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ตลอดจนให้คำแนะนำ แนวคิด และวิธีการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

และขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรศิริกุล และ อ.ชนวรพงศ์ มีศักดิ์ กรรมการที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและอุปกรณ์การทดสอบจาก สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ขอขอบเจ้าน้ำใจของสถาบันวิจัยยาง สำหรับคำแนะนำการใช้อุปกรณ์การทดสอบสมบัติยาง และขอขอบพระคุณ ดร.นุชนาถ ณระนอง เป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำในการแก้ปัญหาในกระบวนการคิดค้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ในกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing Research Group, PaRP-Group) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว และคุณธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์ ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Huadsarkhar, S. 2006. A study of factors affecting weld line strength of polystyrene in the injectionmolding process. Polymer science and technology, Mahidol. Master: 116.

[2] สมเจตน์ พัชรพันธ์ พิชัย จริยธรรมานุกูล นิพัทธ์ แพเจริญชัย และพัชรพล พุ่มขจร. 2552. อิทธิพลความหนาที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมประสานในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป. เรื่องเติมการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47: สาขาสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] Seadan, M., P. Pongbhai., P. Thairaj and T. Watana Kamtomkul 2002. Weld-line strength of rubber in injection molding: Effect of injection factors and compound characteristics. Rubber Chemistry and Technology. 75(1): 83-92.

[4] Chookaew, W., T. Tungkeunkunt., J. Mingbunjersuk., N. Na-Ranong and S. Patcharaphun. 2001. Weld Line Strength of Acrylonitrile Butadiene Rubber Processed by Compression Molding Technique. The International Conference on Materials Processing Technology. The Westin Grande Sukhumvit Hotel, Thailand, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok.

[5] Chookaew, W., T. Tungkeunkunt., S. Patcharaphun and N. Na-Ranong. 2010. Effect of processing parameters on the weld line strength of compression molded natural rubber. 12th International seminar on Elastomer 2010, The Holiday Inn Resort Regent Beach Cha-am, Thailand, National Metal and Materials Technology Center, Thailand , Polymer Society of Thailand and The Society of Rubber Industry, Japan.

[6] Saowaroj Chuayjulit, Aopeak Imvittaya, Nuchanat Na-ranong and Pranot Potiyaraj 2002. Effects of Particle Size and Amount of Carbon Black and Calcium Carbonate on Curing Characteristics and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber. Journal of Metals, Materials and Minerals 12: 51-57.

[7] Leblanc, J. L. 2002. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. Progress in Polymer Science 27(4): 627-687.

[8] Watcharapong Chookaew, Tanawat Tungkeunkunt, Jirachai Mingbunjersuk, Nuchanat Na-Ranong and Somjate Patcharaphun 2010. Effect of Thermal Aging on Weld Line Strength of Acrylonitrile Butadiene Rubber. International Conference on Materials Processing Technology 2010. The Westin Grande Sukhumvit Hotel, Thailand, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok.

[9] Imran Khan, B. T. Poh 2010. Effect of Silica on Viscosity, Tack, and Shear Strength of Epoxidized Natural Rubber-Based Pressure-Sensitive Adhesives in the Presence of Coumarone-Indene Resin. Journal of Applied Polymer Science 118: 3439-3444.

[10] พงษ์ธร แซ่ฮุย. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2548.

[11] พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.



[12] พงษ์ธร แซ่อูย. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.

[13] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณพลศาสตร์ของไหล. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545