

**อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานใน
กระบวนการอัดขึ้นรูปยางอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีน
Effects of Type and Filler content on
Weld line Strength in Acrylonitrile Butadiene Rubber**

ธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์¹, ทัชชา วงศ์สุวรรณ², นุชนาฏ ณะ ระนอง³, อัญชญา วงษ์โต¹ และ สมเจตน์ พัทธพันธ์^{2,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

³ ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2942-8555 ต่อ 2121, โทรสาร: 0-2955-1811

E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเกิดรอยประสานบนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์เป็นข้อบกพร่องที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และยังคงเป็นปัญหาที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้ โดย การเกิดรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การวางยางคอมพาวด์หลายตำแหน่งในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือ การมีอินเล็ทภายในแม่พิมพ์ งานวิจัยนี้ได้ ทำการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมชนิดลดต้นทุน ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกา และเขม่าดำ ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีน ซึ่งผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผล ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและ ความแข็งแรงของรอยประสานมากนัก ในขณะที่การผสมซิลิกาและเขม่าดำส่งผลให้ชิ้นงานที่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของชิ้นงานที่มีรอยประสาน การเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของรอยประสานมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการผสมซิลิกาและเขม่าดำที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ และการลดลงของสมบัติความยืดหยุ่นในยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้ว

คำหลัก: ความแข็งแรงรอยประสาน ยางอะครีโลไนไตรล์ สารตัวเติม กระบวนการอัดขึ้นรูป

Abstract

The formation of weld line in rubber products is regarded as a one of the most undesirable phenomenon and unresolved problem, since it may result in poor appearance as well as poor mechanical properties. Weld lines are the most prevalently occurring in most compression molded parts except those with very simple geometry. Molding of large and/or complicated parts, which are usually prepared by multiple compounds, produces weld line once the melt fronts join either by impingement flow or flow

around an insert. The focus of this study was to investigate primarily the effect of filler types and contents on the weld line strength of compression molded Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR). The non-reinforcing filler used in this investigation was Calcium carbonate (CaCO_3) and reinforcing fillers were Silica (SiO_2) and Carbon black, respectively. The NBR compounds and vulcanizates were characterized with respect to scorch time, cure time, tensile strength, and elongation at break. The results obtained from tensile testing indicated that an increasing amount of CaCO_3 does not significantly change in the tensile and weld line strengths, while the effect of adding SiO_2 and Carbon black tended to increase the tensile strength of NBR. Furthermore, the weld line strength of NBR was found to decrease with the increasing of SiO_2 and Carbon black contents. The explanation for this would be associated with the interaction between reinforcing filler and rubber matrix which affect the cure time of rubber compounds and the elastic properties of NBR vulcanizates.

Keywords: Weld line strength, Acrylonitrile Butadiene Rubber, Fillers, Compression molding

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศในด้านการส่งออกซึ่งสามารถสร้างมูลค่าเป็นจำนวนหมื่นล้านบาท อย่างไรก็ตามการแปรรูปยางดิบมาเป็นผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่ยังทำได้น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณยางดิบที่ผลิตได้ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดความรู้ ความสามารถในการออกแบบแม่พิมพ์ ทักษะในกระบวนการขึ้นรูป รวมไปถึงเครื่องจักรที่มีราคาสูง โดยในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และใช้เงินลงทุนต่ำกว่ากระบวนการอื่น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ในปัจจุบันยังพบปัญหาในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องมีทางเข้าหลายทาง (Multiple gates) หรือชิ้นงานที่มีความซับซ้อนต้องใช้อินเสิร์ท (Insert) ภายในแม่พิมพ์ หรือการวางยางคอมพาวด์เริ่มต้นหลายตำแหน่งในกระบวนการอัดขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดรอยประสาน (Weld line) ขึ้น ในการศึกษาด้านความแข็งแรงของรอยประสานในผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกมีอย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูป [1-5] อิทธิพลของสารตัวเติมต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว [6, 7] รวมไปถึงการใช้เทคนิคต่างๆในกระบวนการขึ้นรูปหรือ เทคนิค

ในออกแบบแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ [6, 8, 9] เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยประสาน อย่างไรก็ตามในการศึกษาถึงอิทธิพลของรอยประสานในผลิตภัณฑ์ยางยังพบน้อยมาก ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาอิทธิพลของรอยประสานในยางธรรมชาติ (Natural rubber) และยางยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป [10] โดยยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของ รอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ยางยาง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่ศึกษาถึงชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีน (Acrylonitrile Butadiene Rubber, NBR) โดย สารตัวเติมที่ใช้ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิต เขม่าดำและซิลิกา ซึ่งเป็นสารช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

- ยาง NBR
- สารคงรูปของยาง (Vulcanizing agent) ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur)

- สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ได้แก่ n-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) และ Polyethylene glycol (PEG)
- สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) ได้แก่ Zinc oxide (ZnO) และ Stearic acid
- สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aid) ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)
- สารตัวเติม (Filler) ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซิลิกา (SiO_2) และ เขม่าดำ (Carbon black)
- เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) ของบริษัท Kneader machinery
- เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ของบริษัท Kodair seisakusho รุ่น R11-3FF
- เครื่องอัดขึ้นรูปขนาด 75 ตัน ของบริษัท Wabash รุ่น V75H-18-BPX
- เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing Machine, UTM ของ Hounsfield รุ่น H50K5 0809

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 บดผสมยางตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 และ 3 ตามชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ โดยใช้เครื่องบดผสมระบบปิด จากนั้นเมื่อบดผสมยางและสารตัวเติมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงรีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบในกระบวนการอัดขึ้นรูป

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้เมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม (หน่วย: part per hundred rubber, phr)

ยางและสารเคมี	ปริมาณ				
NBR rubber	100	100	100	100	100
Zinc oxide	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
CaCO_3	-	15	30	45	60

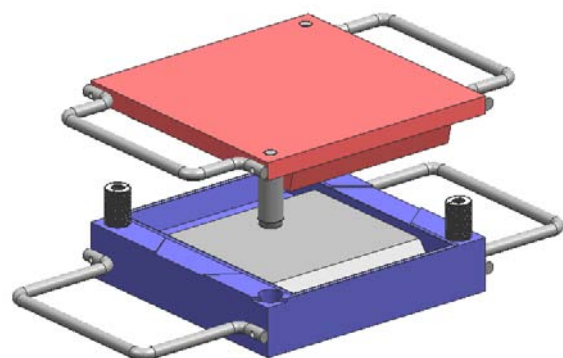
ตารางที่ 2 สูตรยางที่ใช้เมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม (หน่วย: part per hundred of rubber, phr)

ยางและสารเคมี	ปริมาณ				
NBR rubber	100	100	100	100	100
Zinc oxide	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
PEG	-	1	2	2.7	3.5
SiO_2	-	15	30	45	60

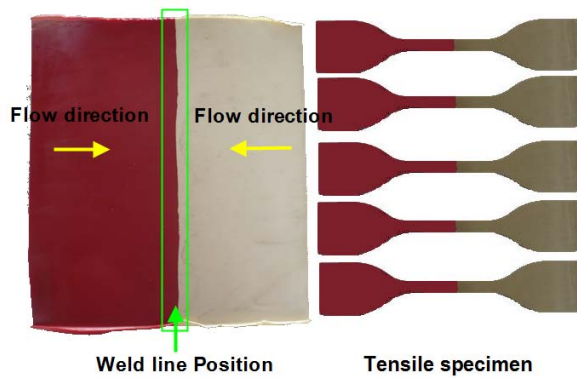
ตารางที่ 3 สูตรยางที่ใช้เมื่อใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม (หน่วย: part per hundred of rubber, phr)

ยางและสารเคมี	ปริมาณ				
NBR rubber	100	100	100	100	100
Zinc oxide	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Aromatic oil	-	-	-	2	4
Carbon black	-	15	30	45	60

2.2.2 อัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C โดยใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ดังภาพที่ 1 ซึ่งวางยางคอมพาวด์เริ่มต้น 2 ตำแหน่ง ทำให้ชิ้นงานที่ได้เกิดรอยประสานบริเวณกึ่งกลาง ที่เกิดจากการไหลมาชนกัน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ



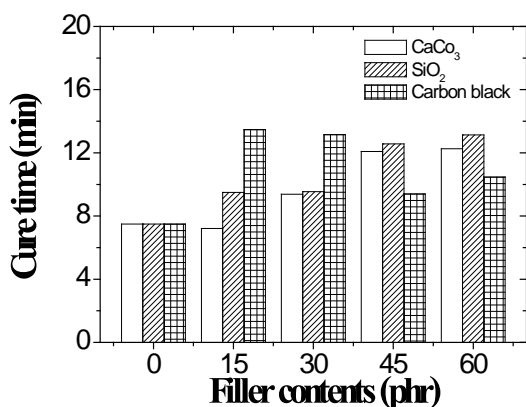
ภาพที่ 2 ชั้นงานทดสอบที่ได้จากการอัดขึ้นรูป

2.2.3 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 37 Type 1 ซึ่งใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ผลการวิจัยและคำอภิปราย

3.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาในการสุกตัวของยาง

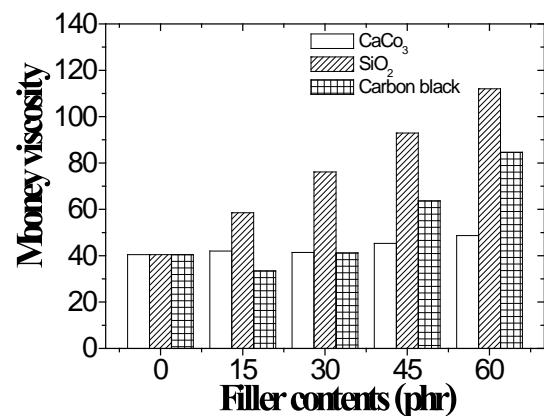
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณ สารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน ภาพที่ 3 ระยะเวลาในการสุกตัวของยางเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาค ของแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำที่มีขนาดเล็ก [11] ส่งผลให้เกิดการยับยั้งหรือขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่าง กำมะถัน และเนื้อยาง หรือ สารประกอบ กำมะถันกับเนื้อยาง จึงทำให้เวลาในการสุกตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 3 อิทธิพลของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อระยะเวลาการสุกตัวของยาง

3.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดของยาง

หากพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ส่งผลต่อค่าความหนืดของยางเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของซิลิกาและเขม่าดำที่มีขนาดเล็ก กว่าแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้มีการแทรกตัวในสายโซ่โมเลกุลได้ง่าย [11] ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเป็นไปได้อย่างขึ้น จึงทำให้ความหนืดของยางเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อ เพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ

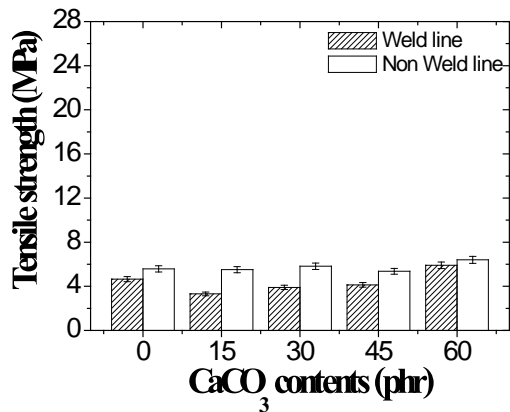


ภาพที่ 4 ค่าความหนืดของยาง NBR เมื่อผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน

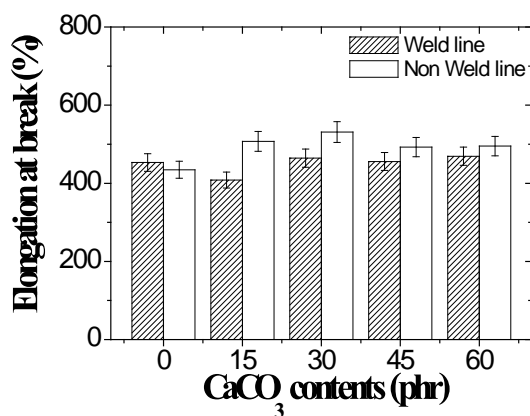
3.3 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

จากผลการทดสอบอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 และ 6 พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสานเมื่อไม่มีการใส่สารตัวเติมมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (Thermoplastic composites) ที่มีความแตกต่างกันอย่างมาก [12] และเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า ในชิ้นงานที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าการยึดตัวพบว่า มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้

ชิ้นงานที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสาน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทลดต้นทุนซึ่งไม่มีการเสริมแรง และ ลดสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic properties) เมื่อบดผสมเข้ากับยาง [13] ทำให้อิทธิพลของรอยประสานที่เกิดขึ้น ไม่ส่งผลมากนัก



ภาพที่ 5 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่บดผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต

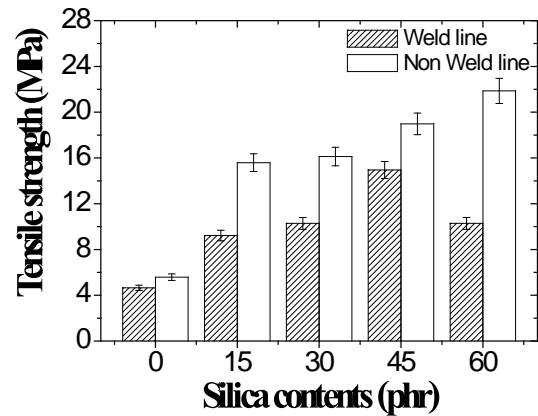


ภาพที่ 6 ระยะเวลายืดตัวเมื่อขาดของยาง NBR ที่บดผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต

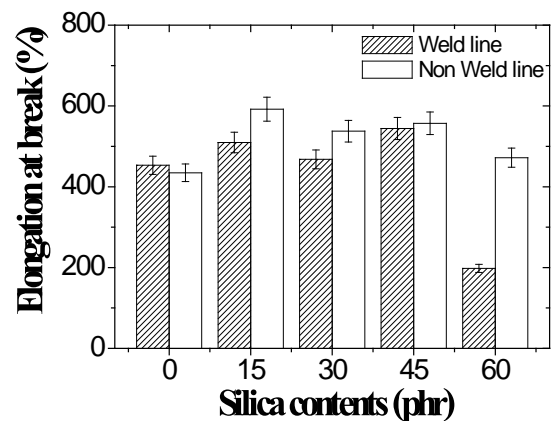
3.4 อิทธิพลของซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

การเพิ่มปริมาณซิลิกาส่งผลให้ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานมีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ และมีขนาดเล็ก ส่งผลให้การกระจายตัวในเนื้อยางทำได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ปริมาณซิลิกา 60 phr ในชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่ามีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจาก ความสามารถหรือสมบัติ

การยึดติดกันของยาง (Tacking property) ที่ลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากระยะเวลายืดเมื่อขาดที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมากในชิ้นงาน NBR ที่มีรอยประสาน



ภาพที่ 7 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่บดผสมกับซิลิกา

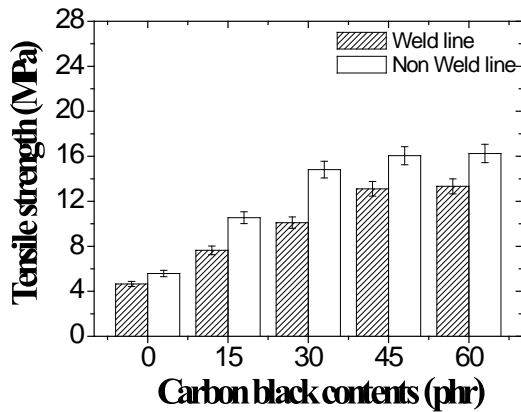


ภาพที่ 8 ระยะเวลายืดตัวเมื่อขาดของยาง NBR ที่บดผสมกับซิลิกา

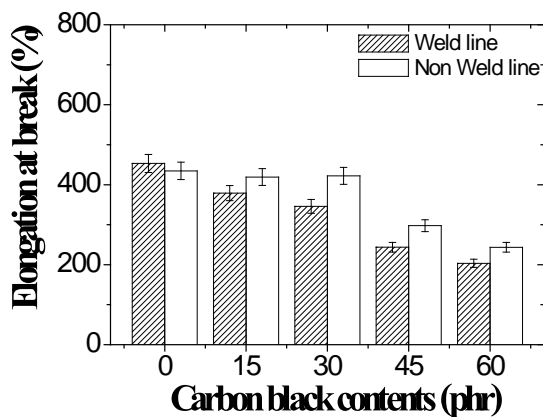
3.5 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

เมื่อพิจารณาปริมาณเขม่าดำ ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10 พบว่าในชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับซิลิกา เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีรอยประสานพบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นและความสามารถในการยึดติดกันของยางที่เริ่มมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงได้จากระยะเวลายืดตัวเมื่อขาดที่มีค่าลดลง และค่าความหนืดมูนินี้

ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการเชื่อมโยงพันธะบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานต้อยกว่าบริเวณที่ไม่เกิดรอยประสาน



ภาพที่ 9 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่บดผสมกับเขม่าดำ



ภาพที่ 10 ระยะยืดตัวเมื่อขาดของยาง NBR ที่บดผสมกับเขม่าดำ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูปยาง อะครีโลไนไตรล์ บิวตาไดอีน โดยใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่ทำให้ยางสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการยึดติดกัน ทำให้หน้าสัมผัสของรอยประสานเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้สมบูรณ์ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาและ

เขม่าดำ ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงลดต่ำลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำในปริมาณที่สูง ทำให้ยางสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่นและการยึดติดกันของยาง ส่งผลให้บริเวณรอยประสานไม่สามารถเชื่อมโยงพันธะได้สมบูรณ์ จากผลการวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่มีรอยประสาน ในกลุ่มผู้ผลิตยางโอริง (O-ring) หรือ ประเก็น (Gasket) ซึ่งนิยมใช้ยางอะครีโลไนไตรล์ หรือนำไปประยุกต์ใช้กับยางชนิดอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้แผนงานวิจัยอุตสาหกรรมเศรษฐกิจและการตลาดเพื่อเพิ่มมูลค่ายางของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nguyen-Chung, T. (2004). Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics, *Rheologica Acta*, vol. 43, pp. 240–245.
- [2] Chien, R.D., Chen, S.-C., Peng, H.-S., Su, P.-L. and Chen, C.-S. (2004) Investigations on the weldline tensile strength of thin-wall injection molded parts, *Journal of Reinforced Plastic and Composite*, vol. 23, pp. 575-588.
- [3] Kim, S.-G. and Suh, N.P. (1986). Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers, *Polymer Engineering and Science*, vol. 36, pp. 1200-1207.
- [4] Selden, R. (1997). Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics, *Polymer Engineering and Science*, vol. 37, pp. 205-217.

- [5] Merah, N., Irfan-ul-Haq, M. and Khana, Z. (2004). Effects of injection molding weld on fatigue crack resistance of cpvc at different temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155, pp. 1261–1265.
- [6] Malloy, R.A. (1994). *Plastic Part Design for Injection Molding: An introduction*, Hanser, Munich.
- [7] Lalande, F. (1991). Weldline Integrity of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene. *SPE ANTEC proceedings*.
- [8] Patcharaphun, S., Zhang, B. and Mennig, G. (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, pp. 421-435.
- [9] Zhai, M., Lam, Y.C. and Au, C.K. (2005). Runner sizing and weld line positioning for plastics injection moulding with multiple gates, *Engineering with Computer*, vol. 21, pp. 218-224.
- [10] Seadan, M., Pongbhai, P., Thairaj, P. and Watana Kamtornkul, T. (2002). Weld-line strength of rubber in injection molding: Effect of injection factors and compound characteristics, *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 75 , pp. 83-92.
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). ยาง: สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี
- [12] พิชัย จริยธรรมานุกูล. (2551). การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป. ป. วิทยานิพนธ์ , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [13] Sobhy, M.S., El-nashar, D.E. and Maziad, N.A. (2003). Cure characteristics and physico mechanical properties of calcium carbonate reinforcement rubber composites. *Egyptian Journal of Solid*, vol. 26, pp. 241-257.
- [14] พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน , ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ปทุมธานี