

# การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก

## A Study on Rheological Behavior of Rubber Compounds During Flow Through Micro-channel

กิตติ ยืนชนม์ และ พิมปวิณ์ เขียวประภัสสร

อ.ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2942-8555 ต่อ 2121 โทรสาร 0-25493422 E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราเฉือน ระบบการคงรูป รวมถึงชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ต่อพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ในด้าน ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) และอัตราส่วนการบวมตัว (Die swell ratio) โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉือน (Rate-controlled capillary rheometer) ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปหรือกำมะถัน (Non-sulphur system) จากการทดสอบพบว่า ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนและอุณหภูมิ รวมทั้งเมื่อขนาดของช่องทางการไหลเล็กลง โดยเฉพาะยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารคงรูปทั้งระบบ CV และ EV ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ผิวของยางคอมพาวนด์และปรากฏการณ์การเลื่อนตัวของผนังของหัวขึ้นรูป การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พบปรากฏการณ์ “Super-extrusion” หรือ “Super shear” ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเชื่อมขวางบริเวณผิวของยางคอมพาวนด์ รูปแบบการเชื่อมขวาง การเลื่อนตัวของผนังของหัวขึ้นรูป และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางคอมพาวนด์

คำสำคัญ: คาปิลลารีรีโอมิเตอร์, ยางคอมพาวนด์, ความหนืดปรากฏ, การเลื่อนตัวของผนัง

### Abstract

In this work, the influences of shear rate, test temperature, vulcanization system, filler type and content on the rheological properties of rubber compounds were studied by the rate-controlled capillary rheometer which was specially designed and constructed. The rheological properties of rubber compounds were characterized with respect to the apparent viscosity and die swell ratio. The measured results indicated that the apparent viscosity of rubber compound tended to decrease with increasing shear rate and test temperatures. It was also

found that the apparent viscosity increased, while the die swell ratio of rubber compound tended to decrease with increasing amount of filler added. From the rheological results obtained by using the micro-channel, for the non-sulfur system, it should be noted that the viscosity and die swell ratio of rubber compound significantly decreased as compared to those obtained from conventional and efficient vulcanizing systems. This was due to the occurrences of premature crosslinking in the skin layer and the slippage of rubber compound during the flow in micro-channel. Furthermore, the super-extrusion phenomenon was found in this work which was probably associated with the occurrences of premature crosslink at the skin layer, type of crosslink, slippage at the die wall, and filler-rubber matrix interaction.

Keywords: Capillary rheometer, Rubber compounds, Apparent viscosity, Wall slip

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้งานผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็ก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเติบโตของเทคโนโลยีการสื่อสาร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์การแพทย์ รวมทั้งอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding) หรือกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) อาศัยหลักการให้ความร้อนและใช้แรงดันในการไหลผ่านช่องทางการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์หรือหัวขึ้นรูป ดังนั้น ความรู้เกี่ยวกับสมบัติการไหล (Rheological properties) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงมีประโยชน์ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต รวมทั้งในการออกแบบแม่พิมพ์และหัวขึ้นรูป นอกจากนี้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสมบัติการไหลยังมีความสำคัญต่อความแม่นยำของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) รายงานการศึกษาพฤติกรรมการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็กที่ผ่านมา ส่วนใหญ่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ยังไม่ปรากฏรายงานวิจัยเรื่องยางมาก

นัก ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มาจากยางคอมพาวนด์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์หรือการออกแบบหัวขึ้นรูปสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

ส่วนผสมของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1 ถูกนำมาผสมด้วยเครื่องบดผสมภายในและเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติการไหลของยางด้วยเครื่องทดสอบที่ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดหัวขึ้นรูปได้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Ingredients	Contents (phr*)					
	Non-sulphur	CV	EV	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
NR (STR5L)	100	100	100	100	100	100
Zinc oxide	4	4	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
Calcium carbonate	-	-	-	15/30	-	-
Silica	-	-	-	-	15/30	-
Carbon black	-	-	-	-	-	15/30
Sulphur	-	2.4	0.8	2.4	2.4	2.4
PEG	-	-	-	-	0.9/1.8	-
CBS	0.8	0.8	2.4	0.8	0.8	0.8
Aromatic oil	-	-	-	-	-	1/2

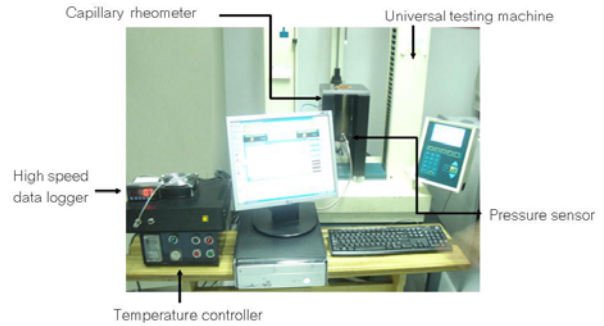
\*phr = Part per hundred of rubber by weight

เครื่องทดสอบสมบัติการไหลที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการไหล ถูกติดตั้ง ดังรูปที่ 1 โดยขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการนำยางคอมพาวนด์ใส่ลงในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนด ให้แรงดันแก๊สของคอมพาวนด์ด้วยแท่งกดซึ่งควบคุมความเร็วด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ตามค่าอัตราครีปเดชัน ( $\dot{\gamma}_{app}$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 พร้อมทั้งเก็บค่าแรงกดของแท่งอัดและค่าความดันที่วัดได้จากเครื่องเก็บข้อมูลความเร็วสูงเพื่อคำนวณหาความเค้นเฉือน ( $\dot{\tau}_{app}$ ) และความหนืดปรากฏ ( $\eta_{app}$ ) จากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนการบวมตัว (*Die swell ratio*) ของยางคอมพาวนด์ ได้จากสมการที่ 4 โดยการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอมพาวนด์ ( $D_{extrudate}$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขึ้นรูป ( $D_{die}$ ) ดังรูปที่ 2

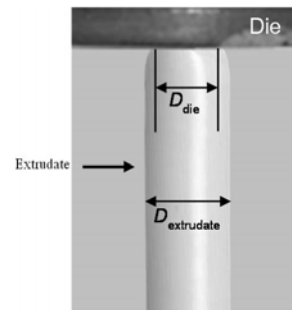
$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1) \quad \dot{\tau}_{app} = \frac{RAP}{2L} \quad (2)$$

$$\eta_{app} = \frac{\dot{\tau}}{\dot{\gamma}} \quad (3) \quad \text{Die swell ratio} = \frac{D_{extrudate}}{D_{die}} \quad (4)$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $m \cdot s^{-1}$ )  $\Delta P$  คือ ความดันตกคร่อม ( $N \cdot m^{-2}$ )  $R$  คือ รัศมีของหัวขึ้นรูป ( $m$ ) และ  $L$  คือ ความยาวของหัวขึ้นรูป ( $m$ )



รูปที่ 1 ชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

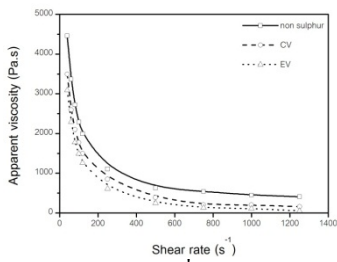


รูปที่ 2 การบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป

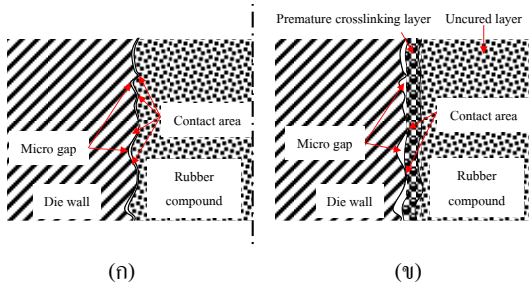
## 3. ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์

### 3.1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีผลต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

ผลการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผ่านช่องทางการไหลขนาด 1.50 mm และยาว 15 mm อุณหภูมิการทดสอบ 90 °C โดยใช้อัตราครีปเดชันในช่วง 40 - 1,250  $s^{-1}$  ดังรูปที่ 3 พบว่า ในช่วงอัตราครีปเดชันต่ำ ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันและยางคอมพาวนด์ที่คงรูปด้วยระบบ CV และ EV ค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของยางคอมพาวนด์ โดยยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันมีค่าความหนืดต่ำกว่า ซึ่งมีสาเหตุมาจากการคงรูปบางส่วน (Premature crosslink) บริเวณผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป จากการเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) (Lawal and Kalyon, 1996) ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันจึงแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับหัวขึ้นรูปได้ดีกว่ายางที่ไม่ผสมกำมะถัน (ดังรูปที่ 2) ส่งผลให้เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) (Chen *et al.*, 2005) ได้ง่าย และเมื่อพิจารณาของยางคอมพาวนด์ผสมกำมะถัน พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่คงรูปด้วยระบบ EV มีค่าความหนืดปรากฏต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่คงรูปด้วยระบบ CV ทั้งเนื่องมาจากเวลาเริ่มคงรูป (scorch) ของระบบการคงรูปแบบ EV ที่เกิดขึ้นรวดเร็วกว่าแบบ CV



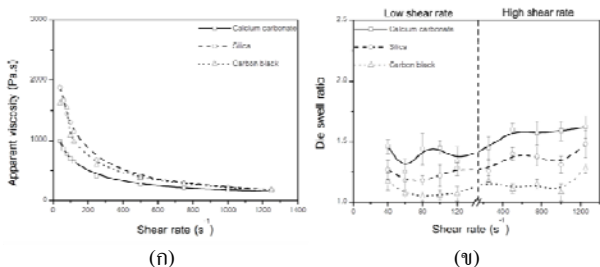
รูปที่ 3 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม



รูปที่ 4 แบบจำลองการสัมผัสระหว่างยางคอมพาวนด์กับผนังหัวขึ้นรูป (ก) ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ใช้สารคงรูป (ข) ยางคอมพาวนด์ที่ใช้สารคงรูป

### 3.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

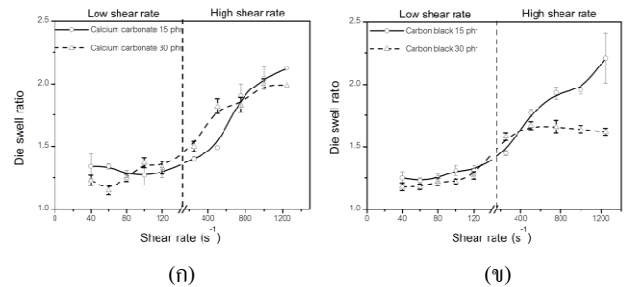
ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมปริมาณ 15 phr โดยใช้ช่องทางการไหลขนาด 1.50 mm ดังรูปที่ 5(ก) พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนืดปรากฏต่ำสุด โดยยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำและซิลิกามีความหนืดปรากฏสูงขึ้นไปตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางคอมพาวนด์ และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ พบว่า อัตราครีดยืดหยุ่นไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการบวมตัวมากนัก เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิดสารตัวเติม พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต มีอัตราส่วนการบวมตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำและซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 5(ข)



รูปที่ 5 อิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็ก (ก) ความหนืดปรากฏ (ข) อัตราส่วนการบวมตัว

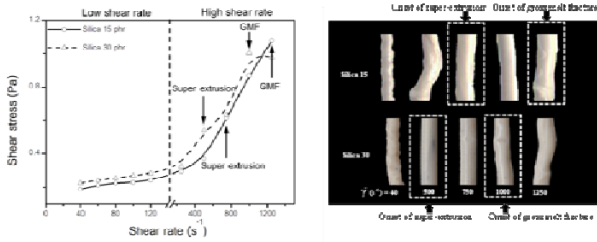
### 3.3 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ จากปริมาณ 15 phr เป็น 30 phr ค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเขม่าดำและซิลิกามีอันตรกิริยากับเนื้อยาง (Hofmann, 1989) ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยางลดลง ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่เกิดอันตรกิริยากับเนื้อยาง ค่าความหนืดจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำ ในช่วงอัตราครีดยืดหยุ่นต่ำ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารตัวเติมทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติคของยางคอมพาวนด์ลดลง และเมื่ออัตราครีดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีการสะสมพลังงานแบบอีลาสติคเพิ่มขึ้น จึงเกิดการคายพลังงานในรูปแบบของการบวมตัวดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติม (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) เขม่าดำ

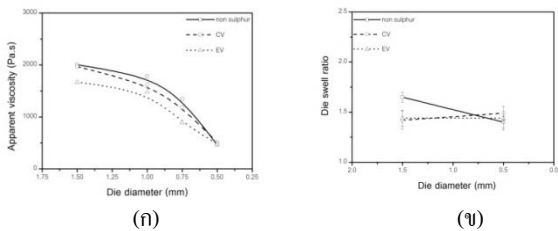
ในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา เกิดการเสียรูปร่างเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป เนื่องจากเกิดการคงรูปบางส่วนที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูปจึงไม่สามารถปลดปล่อยพลังงานสะสมในรูปแบบการบวมตัวได้เนื่องจากถูกห่อหุ้ม (Encapsulate) ด้วยผิวที่เกิดการคงรูป เมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดหยุ่นขึ้นไปจนถึงจุดที่ความเค้นเฉือนเกินกว่าที่พันธะเชื่อมขวางสามารถรับไว้ได้ ผิวของยางคอมพาวนด์จึงกลับมาเรียบอีกครั้งเกิดเป็นปรากฏการณ์ Super-extrusion โดยจากรูปที่ 7 พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 15 phr เกิดปรากฏการณ์ Super-extrusion ที่อัตราครีดยืดหยุ่นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่เร็วกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา 30 phr



รูปที่ 7 การเกิดปรากฏการณ์เสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา

### 3.4 อิทธิพลของระบบการคงรูปและสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ในช่องทางการไหลขนาดเล็ก

ผลการทดสอบความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.50 - 1.50 mm อัตราเฉียดเฉือน  $100 \text{ s}^{-1}$  พบว่า ค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากมีการไหลวน (Vortex) ที่บริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป ทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน สายโซ่โพลิเมอร์จึงสามารถเคลื่อนตัวผ่านกันได้ง่าย และนอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ยังทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีอัตราการบวมลดลง ในขณะที่ยางผสมกำมะถันมีอัตราส่วนการบวมตัวที่ไม่แตกต่างกันเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง เนื่องจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็ว ทำให้พันธะเชื่อมขวางที่ผิวของยางคอมพาวนด์ขาดจากกัน ทำให้อัตราการบวมตัว มีค่าใกล้เคียงกับการไหลในช่องทางการไหลขนาดปกติ แสดงในรูปที่ 8(ข)



รูปที่ 8 (ก) ขนาดหัวขึ้นรูปกับค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ (ข) อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัว

### 4. สรุปผล

เมื่ออัตราเฉียดเฉือนและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอัตราเฉียดเฉือนยังส่งผลให้การเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงและเกิดเป็นปรากฏการณ์ Super-extrusion และผลการศึกษาดังอิทธิพลของสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง สำหรับอิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่ลดลง พบว่า ทำให้ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลง และทำให้อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีแนวโน้มลดลง

ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันมีอัตราส่วนการบวมตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลง

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับทุนการดำเนินงานวิจัย ภายใต้โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium Projects on Rubber, MPR) รวมทั้งขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในความกรุณาช่วยเหลือและสนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

Chen, S.C., R.I. Tsai, R.D. Chen and T.K. Lin. 2005. Preliminary study of polymer melt Rheological behavior flowing through micro-channels. International Communications in Heat and Mass Transfer. 32: 501-510.

Chien, R.D., W.R. Jong and S.C. Chen. 2005. Study on Rheological Behavior of Polymer Melt Flowing Through Micro-Channels Considering The Wall-Slip Effect. Journal of Micromechanics and Microengineering. 15: 1389-1396.

Lawal, A. and D.M. Kalyon. 1996. Viscous Heating in Nonisothermal Die Flows of Viscoplastic Fluids with Wall Slip. Chemical Engineering Science. 52: 1323-1337.

Hoffman, W. 1989. Rubber Technology Handbook. Hanser Publisher, Munich.