

การศึกษาสมบัติการไหลและการจำลองพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ภายในช่อง ทางการไหลขนาดเล็ก

An Investigation on Rheological Behavior and Flow Simulation of Non-filled Rubber Compound within Micro channel

ศิริวี อ่อนเอื้อน¹พีรวัส สุดใจ¹ กชกร เกียรติเรืองวัฒนา¹และ สมเจตน์ พัชรพันธ์¹

Sivaree Onouen¹, Peerawat Sudjai¹, Kotchakorn Kiatrueangwattana¹ and Somjate Patcharaphun¹

บทคัดย่อ

เครื่องทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีปเฉือน ได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราครีปเฉือน อุณหภูมิการทดสอบที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราครีปเฉือนและอุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น และจากผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กพบว่าค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหลที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็ก ไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CADMOULD version 2.0) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ภายในแม่พิมพ์ที่มีผนังบาง จากผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่า ควรมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงผลกระทบจากปรากฏการณ์เลื่อนตัวที่ผนัง

ABSTRACT

The rate-controlled capillary rheometer was used to investigate the effect of die diameter on the rheological properties of rubber compounds, regarding to the various shear rate and test temperature. The measured results indicated that the apparent viscosity of rubber compound tended to decrease with increasing shear rate and test temperature. From the rheological results obtained by using the various die diameters, it can be seen that the viscosity of rubber compound significantly decreased with decreasing the channel size. In addition, the data obtained from micro-channel rheometer was employed into the computer simulation program (CADMOULD version 2.0) in order to investigate the flow behavior of rubber compound during the flow in thin mold wall. From the simulation results, it should be noted that for the development of mathematical model, the effect of wall slip should be taken into consideration.

Key Words: Micro-channel, Rheological behavior, Rubber compounds, Finite Element Method

e-mail address: fengsjpc@ku.ac.th

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กนั้นมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการผลิตกับราคาของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้อุตสาหกรรมต่างๆ ที่ผลิตเครื่องมือหรืออุปกรณ์ดังกล่าว เริ่มมีการตื่นตัวในการพัฒนาระบบการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็ก โดยเป็นการพัฒนาในส่วนของกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ได้แก่ ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลในช่องทางขนาดเล็ก (Chen *et al.*, 2005) การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการทำนายพฤติกรรมต่างๆ ภายในแม่พิมพ์ขนาดเล็กหรือช่องว่างขนาดเล็ก (Xu *et al.*, 2010) รวมถึงกรรมวิธีการสร้างแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็ก (Micro milling) (Zhao *et al.*, 2004) โดยปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผลิตได้ เช่น ชิ้นงานไหลไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) หรือมีของเสีย (Waste) ในกระบวนการผลิตมากเกินไป และไม่สามารถกำหนดปัจจัยในกระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด ดังนั้นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กจำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางด้านพฤติกรรมกรไหล (Rheological behavior) ร่วมกับการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ (Mold design and manufacturing) เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นศึกษาไปที่สมบัติการไหลและการออกแบบแม่พิมพ์ของวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกและพบว่าพอลิเมอร์ที่ไหลในช่องทางกรไหลขนาดเล็กมีพฤติกรรมกรไหลแตกต่างจากการไหลในช่องทางขนาดปกติ (Chen *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 1999; Palmese and Karbhari, 1995) ในขณะที่ผลงานวิจัยที่สนับสนุนกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กยังมีรายงานน้อยมาก (ญานิชสา, 2554) พบว่า เมื่อยางคอมพาวนด์ไหลผ่านช่องทางกรไหลที่มีขนาดเล็กส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏของยางมีค่าลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ผิวสัมผัสกับช่องทางกรไหล โดยพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลของยางเมื่อไหลผ่านองค์ประกอบต่างๆ ภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกรไหลของยางคอมพาวนด์ภายในแม่พิมพ์ที่ไหลผ่านช่องทางกรไหลที่มีขนาดต่างกันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) เข้ามาช่วยในการทำนายพฤติกรรมกรไหลของยางก่อนการผลิตจริง ซึ่งสามารถนำผลการทำนายพฤติกรรมกรไหลของยางมาประยุกต์ใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง อีกทั้งเป็นการช่วยลดการสูญเสียเวลาและโอกาสทางการผลิตให้น้อยลง และช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดและเพียงพอตามความต้องการของลูกค้า

อุปกรณ์และวิธีการ

ส่วนผสมยางคอมพาวนด์

เตรียมส่วนผสม ยางคอมพาวนด์ (Table 1) แล้วบดผสมด้วยเครื่องบดผสมภายใน (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง จากนั้นจึงผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาโครงสร้าง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ไปบดผสมต่อด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) โดยใช้อุณหภูมิลูกกลิ้ง 70 °C โดยบดผสมสารเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 1 นาที ในขั้นสุดท้ายจึงบดผสมกัมมะถัน ซึ่งมีหน้าที่เป็นสารคงรูปเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่บดผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปทดสอบหาค่าความหนืดมูนิ สมบัติการคงรูป และทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาปิลลารีวีโอมิเตอร์ ในช่วงอัตราความเร็วเฉือนตั้งแต่ 40 ถึง 1,250 S⁻¹ และใช้อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 80 °C 90 °C และ 100 °C โดย

ใช้ช่องทางการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter, D) เท่ากับ 0.75 1.50mm ยาว 15 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 mm ยาว 20 mm

Table 1 Formulations for rubber compound.

Ingredients	Content (phr ^{1/})
NR ^{2/} (STR5L)	100
ZnO ^{3/}	4
Stearic Acid	2
Sulphur	2.4
CBS ^{4/}	0.8

^{1/} Part per hundred of rubber by weight

^{3/} Zinc Oxide

^{2/} Natural rubber

^{4/} N-Cyclohexyl-2-Benzothiazyl- Sulfenamide

การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

งานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนตามมาตรฐาน ASTM D5099-08 (Figure 1) เพื่อใช้ศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ในขณะไหลผ่านช่องทางการไหลของชุดทดสอบ โดยมีการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งกด (piston) เพื่ออัดยางคอมพาวนด์ผ่านหัวขึ้นรูป โดยชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine, UTM) พร้อมทั้งติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) และชุดตรวจวัดความดัน (pressure transducer) ที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป โดยค่าความดันจากการทดสอบจะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลความเร็วสูง (high speed data logger) และทำการบันทึกข้อมูลไว้ที่คอมพิวเตอร์

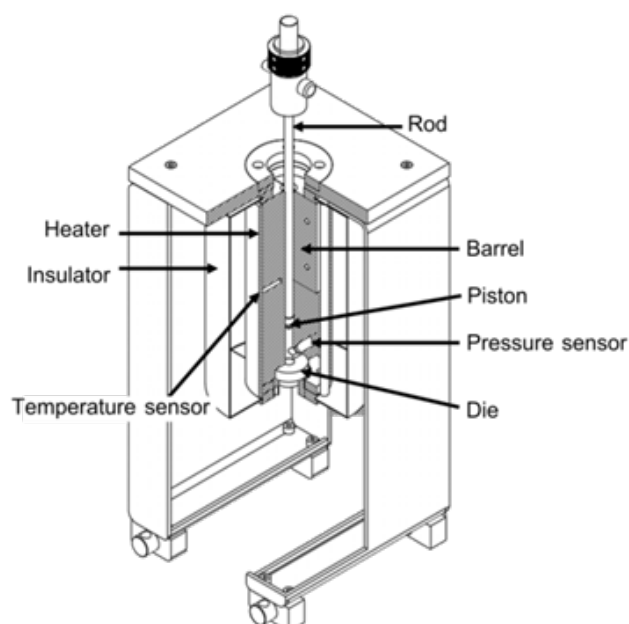


Figure 1 Rate-controlled capillary rheometer components

การทดลองเริ่มต้นด้วยการนำยางคอมพาวนด์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกให้ อุณหภูมิจนกระทั่งยางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการทดสอบ จากนั้นอัดยางคอมพาวนด์โดยแรงอัด ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างๆกัน เพื่อให้ได้อัตราเครียดเฉือนตามที่กำหนดซึ่งค่าความดันและอัตราการไหลที่ได้ จากชุดทดสอบสามารถนำไปคำนวณ ค่าความเค้นเฉือนปรากฏ (apparent shear stress, τ_{app}) อัตราเครียด เฉือนปรากฏ (apparent shear rate, $\dot{\gamma}_{app}$) และความหนืดปรากฏ (apparent shear viscosity, η_{app}) ดังสมการ ที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\tau_{app} = \frac{\Delta PR}{2L} \quad (1)$$

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

$$\eta_{app} = \frac{\tau_{app}}{\dot{\gamma}_{app}} \quad (3)$$

โดยที่ ΔP คือ ความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของช่องทางการไหล (Pa) Q คือ อัตราการ ไหลเชิงปริมาตร (m^3/s^{-1}) R คือ รัศมีของคาปิลลารี (m) และ L คือ ความยาวของช่องทางการไหล (m)

วิธีการทดสอบการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมยางคอมพาวนด์เป็นเส้นป้อนเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูปยางใช้ปริมาตรในการฉีด 190 cm^3 และใช้ความดันฉีด 20 MPa ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C เมื่อฉีดยางจนเต็มแม่พิมพ์ ปิดแม่พิมพ์ไว้จนกระทั่งได้กำหนดตามเวลาดังรูปที่ 90% (t_{90}) โดยเงื่อนไขในกระบวนการฉีด (Table 2) ถูกนำไปจำลองพฤติกรรมกรไหลภายในแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CADMOULD version 2.0) ซึ่งผลการทดสอบจะได้จากช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กและขนาดปกติ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 mm ยาว 15 mm 1.5 mm ยาว 15 mm และ 2.0 mm ยาว 20mm)

Table 2 Processing parameter of injection molding process.

Injection temperature (°C)	Injection pressure (MPa)	Filling time (s)	Cure time (s)
90	20	30	720

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของอิทธิพลจากอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

จากการศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิการทดสอบของยางคอมพาวนด์ ที่อุณหภูมิ 80°C 90°C และ 100°C และอัตราครีปเฉือนในช่วง 40-1250 s⁻¹ (Figure 2) โดยใช้เครื่องมือทดสอบค่าความหนืดของยางที่มีช่องทางการไหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm และยาว 20 mm พบว่า เมื่ออุณหภูมิการทดสอบของยางคอมพาวนด์ และอัตราครีปเฉือนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางคอมพาวนด์เกิดการคลายตัว (relaxation) และมีระยะห่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล (free volume) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น แต่ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90°C และ 100°C พบว่าค่าความหนืดปรากฏมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้ยางคอมพาวนด์มีโอกาสเกิดการสุกตัวก่อนกำหนด (premature crosslink) ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของกำมะถันซึ่งเป็นสารคงรูป (curing agent) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง

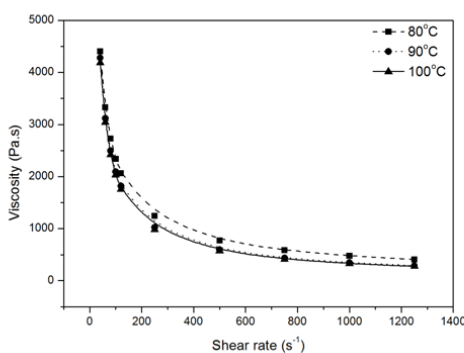


Figure 2 Effect of temperature on rheological properties of rubber compound

ผลของอิทธิพลจากขนาดของช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

จากการศึกษาอิทธิพลของช่องทางการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน คือ 0.75mm และ 1.50mm ยาว 15 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00mm ยาว 20 mm โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 90°C ที่มีผลต่อค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ (Figure 3) พบว่า ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ทำให้ความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน (shear heating) มีค่าเพิ่มขึ้น (Lawal and Kalyon, 1996; Sombatsompop and Chaiwattanpipat, 2000; Sombatsompop *et al.*, 2001; Chien *et al.*, 2005) อีกทั้งเกิดการเลื่อนตัวที่ผนังระหว่างพอลิเมอร์กับผิวของช่องทางการไหล (Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010) โดยการเลื่อนตัวที่ผนังนี้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลจากห้องหลอมเหลวเข้าสู่ช่องทางการไหลขนาดเล็ก ทำให้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปมีแรงดันต้านการไหลที่มาก จึงเกิดการไหลวนของยางคอมพาวนด์ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการไหลมีความซับซ้อน (complex flow) มากขึ้นยางคอมพาวนด์จึงอยู่ในระบบนานขึ้น รวมทั้งมีการเสียดสีกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางเป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลขาดหรือคลายตัวออกมากขึ้นส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีค่าความหนืดปรากฏลดลงและสามารถไหลได้ง่ายขึ้น

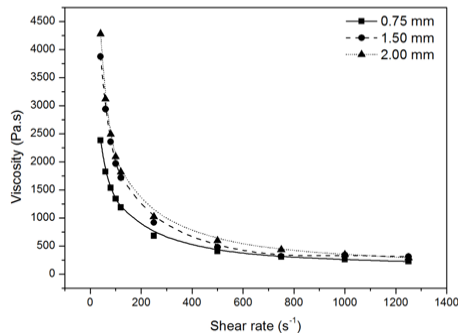


Figure3 Effect of channel size on rheological properties of rubber compound

ผลวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติและช่องทางการไหลขนาดเล็กพบว่า มีพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน โดยค่าความหนืดปรากฏที่ได้จากการทดสอบมีค่าลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ผู้วิจัยได้นำผลของค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่คงรูปแบบ CV ซึ่งได้จากเครื่องทดสอบสมบัติการไหลที่ใช้หัวขึ้นรูปเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดปกติ (1.5 mm ยาว 15 mm และ 2.0 mm ยาว 20mm) และหัวขึ้นรูปเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (0.75 mm ยาว 15 mm) เพื่อจำลองการฉีดขึ้นรูปเข้าสู่แม่พิมพ์ที่มีความหนาผนังเท่ากับ 1 mm โดยอาศัยข้อมูลที่ใช้ฉีดขึ้นรูปจริงในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้แก่ เวลาในการฉีด (filling time) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mold temperature) เวลาที่ใช้ในการคงรูป (curing time) และสมบัติการคงรูป (curing property)

ผลการทดสอบ (Figure4) พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันในช่วงแรกของกระบวนการฉีด และรูปแบบการไหลเริ่มมีแนวโน้มที่ความแตกต่างกัน เมื่อปริมาตรการฉีดเพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดสอบจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงมีระยะทางการไหลมากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กเกิดการลื่นตัวที่ผนังระหว่างผิวสัมผัสแม่พิมพ์และยางคอมพาวนด์ ประกอบกับยางคอมพาวนด์มีความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดลดลง สามารถไหลตัวได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการไหลด้วยช่องทางการไหลขนาดปกติและช่องทางการไหลขนาดเล็ก พบว่า ข้อมูลจากการทดสอบด้วยช่องทางการไหลขนาดเล็กให้ผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการทดสอบด้วยช่องทางการไหลขนาดเล็กนั้นเป็นค่าความหนืดปรากฏที่มีค่าต่ำกว่าความหนืดปรากฏที่ได้จากการทดสอบด้วยช่องทางการไหลขนาดปกติโดยสาเหตุที่ความหนืดปรากฏลดลงนั้นมาจากการลื่นตัวที่ผนังช่องทางการไหล

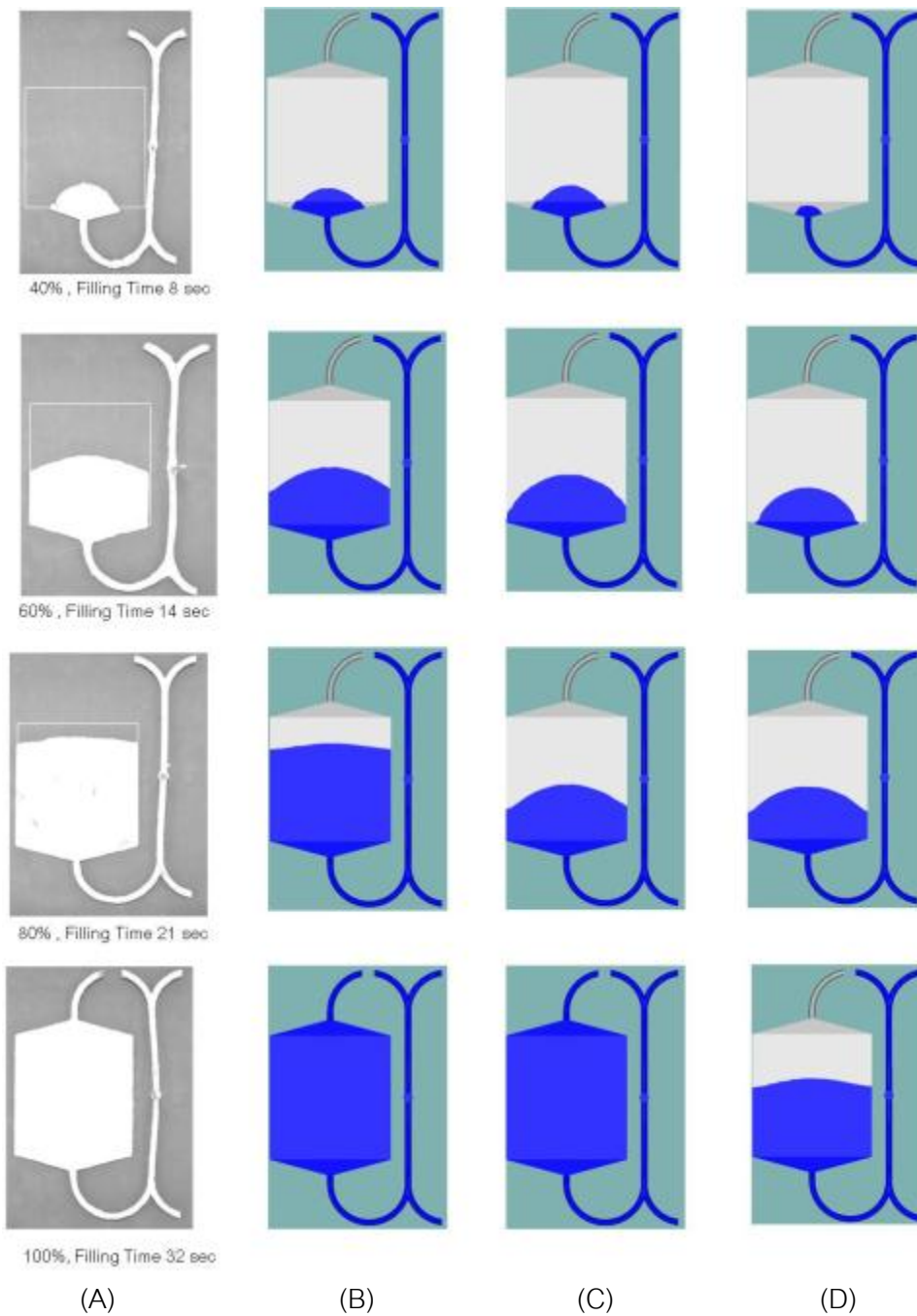


Figure 4 Rubber Injection molded and computer simulation program, experiment (A), simulation results using rheological data obtained from various die diameters 0.75 mm (B), 1.50 mm (C) and 2.00 mm (D)

เมื่อพิจารณารูปแบบการไหล (Figure 6) พบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์มีรูปแบบที่เป็นพาราโบลา (parabolic flow) มากกว่า ผลการทดสอบชนิดจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาตรการฉีดขึ้นงานจริง 80% ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้อสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณนั้นแตกต่างจากพฤติกรรมจริง ซึ่งได้แก่ ข้อกำหนดที่ว่า พอลิเมอร์ไหลไม่มีการไหลที่ผนัง (no slip at wall) รวมถึงอุณหภูมิคงที่ (isothermal) ตลอดกระบวนการฉีดขึ้น

รูป โดยในการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานจริงนั้น เกิดการเลื่อนตัวที่ผนังในขณะที่ยางไหลเข้าสู่ช่องทางกรไหลที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลผ่านช่องทางขนาดเล็กมีอัตราเครียดเฉือนสูง

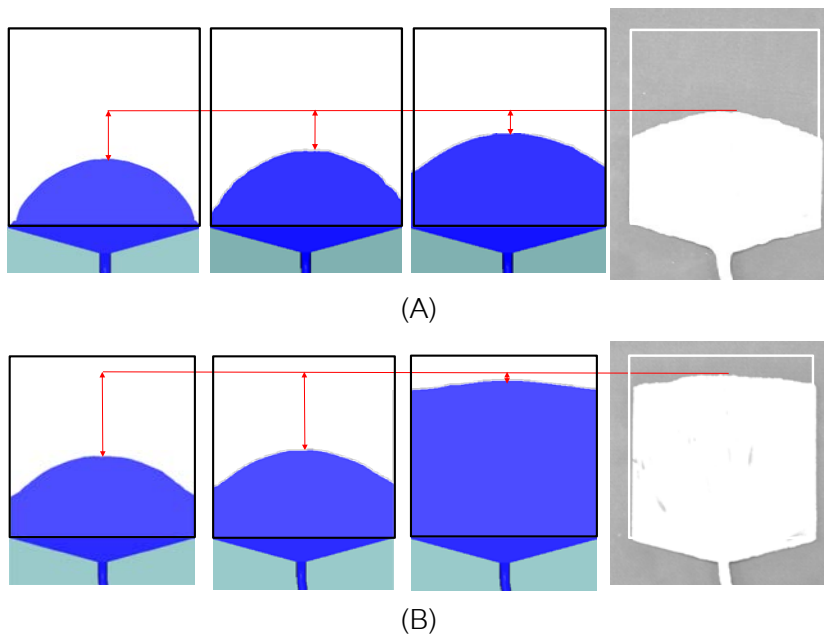


Figure 6 Flow distance of computer simulation program and experiment (A) Shot size 60% and 80% (B)

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ด้วยชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน ที่อัตราเครียดเฉือนในช่วงระหว่าง $40-1,250 \text{ s}^{-1}$ และอุณหภูมิในการทดสอบ $80-100^{\circ}\text{C}$ ซึ่งไหลผ่านช่องทางกรไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $0.50-2.00 \text{ mm}$ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเครียดเฉือนและอุณหภูมิการทดสอบ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ดีขึ้น รวมทั้งการเกิดปรากฏการณ์เลื่อนตัวที่ผนังช่องทางกรไหล และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดช่องทางกรไหล พบว่า เมื่อช่องทางกรไหลมีขนาดเล็กลง ทำให้ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดการไหลวนที่บริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีระยะเวลาในการคลายตัวที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุล และเมื่อนำข้อมูลความหนืดที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหลที่มีช่องทางกรไหลขนาดปกติและช่องทางกรไหลที่มีขนาดเล็กไปใช้จำลองการไหลในแม่พิมพ์ที่มีผนังบาง พบว่า การใช้ข้อมูลความหนืดที่ได้จากการทดสอบการไหลผ่านช่องทางกรไหลขนาดปกติ มีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานจริง ในขณะที่การใช้ข้อมูลความหนืดที่ได้จากการไหลผ่านช่องทางกรไหลที่มีขนาดเล็ก มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นผู้นำโปรแกรมจำลองการไหลไปใช้งานควรตระหนักถึงความแตกต่างนี้ โดยแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือ ต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่มีช่องทางกรไหล

ขนาดเล็กหรือใกล้เคียงกับความหนาของแม่พิมพ์ ถึงแม้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นจริงบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีข้อสมมติฐาน (assumption) ในการคำนวณ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (MPR) สัญญาเลขที่ RDG5350058ประจำปี2553รวมทั้งได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบจากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตรและสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

เอกสารอ้างอิง

- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ญาติชลา สุขนิยม. 2554. การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางขณะไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chen, C.S., S.C. Chen, W.L. Liaw and R.D. Chien. 2008. Rheological Behavior of POM Polymer Melt Flowing Through Micro Channels. *European Polymer* 44: 1891-1898.
- 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.
- Sombatsompop, N. and R. Dantongee. 2001. Flow visualization and extrudate swell of natural rubber in a capillary rheometer: Effect of Die/Barrel System. *Journal of Applied Polymer Science* 82: 2525-2533.
- Sombatsompop, N. and W. Chaiwattanpipat. 2000. Temperature distributions of molten polypropylene during injection moulding. *Advances in Polymer Technology* 19: 79-86.
- Xu, B., M. Wang, T. Yu and D. Zhao. 2010. viscous dissipation influencing viscosity of polymer melt in micro channels. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24: 1417-1423.