



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ขณะไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก

An Investigation into the Rheological Behavior of Rubber Compound during the Flow in
Micro-channel

นามผู้วิจัย

นางสาวณัฐนิชา สุขนิยม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พืชพันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ขณะไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก

An Investigation into the Rheological Behavior of Rubber Compound during the Flow in
Micro-channel

โดย

นางสาวณัชชา สุขนิยม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ญาติชสา สุขนิยม 2554: การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ขณะไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing. 132 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน (Rate-controlled capillary rheometer) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราเครียดเฉือน อุณหภูมิการทดสอบ รวมถึงขนาดและลักษณะของช่องทางการไหล ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ ซึ่งได้แก่ ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) และอัตราส่วนการบวมตัว (Die swell ratio) เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system, CV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system, EV) โดยได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปหรือกำมะถัน (Non-sulfur system) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 0 ถึง 30 phr จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเครียดเฉือนและอุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง จากผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางขนาดเล็กพบว่าค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารคงรูปมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ผิวของยางคอมพาวนด์และปรากฏการณ์การเลื่อนตัวของผนังของหัวขึ้นรูปที่มีขนาดเล็ก และเมื่อพิจารณาลักษณะช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์พบว่า ค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางขนาดเล็กแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่าช่องทางไหลแบบหน้าตัดกลมนอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป ผู้วิจัยได้พบปรากฏการณ์ “Super-extrusion” ซึ่งคาดว่า มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ การเชื่อมขวางบริเวณผิวของยางคอมพาวนด์ รูปแบบการเชื่อมขวาง การเลื่อนตัวของผนังของหัวขึ้นรูป และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางคอมพาวนด์

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Yanichsa Sukniyom 2011: An Investigation into the Rheological Behavior of Rubber Compound during the Flow in Micro-channel. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 132 pages.

In this work, the rate-controlled capillary rheometer was specially designed and constructed in order to primarily investigate the influences of shear rate, test temperature, vulcanization system, filler type and content on the rheological properties of natural rubber compounds. The rheological properties of rubber compounds were characterized with respect to the apparent viscosity and die swell ratio. The effects of flow channel (i.e. type, size, and length) were main interest. The measured results indicated that the apparent viscosity of rubber compound tended to decrease with increasing shear rate and test temperature. 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 crosslink at the skin layer and the slippage of rubber compound during the flow in micro-channel. The apparent viscosity and swelling ratio of rubber compound by using slit die was higher than that of circular die. 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.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบขอบคุณประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ กราบขอบคุณ ดร.ฉันททิพ สกฤตเขมฤทัย ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกและ ดร.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล ประธานการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับทุนการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว คุณธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์ นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและพลาสติก (Plastic and Rubber Processing Research; PaRP-Group) เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านจนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ญานิชสา สุขนิยม

ธันวาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก เครื่องคาลิปดาร์รีรี โอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีดเดือน	78
ภาคผนวก ข ความหนืดมุนนี้และสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์	87
ภาคผนวก ค ผลทดสอบความหนืดของยางคอมพาวนด์จากเครื่องทดสอบคาลิปดาร์รีรี โอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีดเดือน	90
ภาคผนวก ง ผลทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์จากเครื่องทดสอบคาลิปดาร์รีรี โอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีดเดือน	101
ภาคผนวก จ ผลทดสอบความหนืดของยางคอมพาวนด์โดยใช้สมการปรับแก้	111
ภาคผนวก ฉ ผลงานวิจัยที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการ	121
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันในแต่ละระบบการคงรูป	7
2	ส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์	40
3	ลักษณะและขนาดของหัวขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้	42
4	สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	44
5	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งกดในแต่ละขนาดของหัวขึ้นรูปตามค่าอัตรา เครียดเหนือนที่กำหนด	47
ตารางผนวกที่		
ข1	อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อค่าความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์	88
ข2	อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดมูนี่ของยาง คอมพาวนด์	88
ข3	อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยาง คอมพาวนด์	88
ข4	อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของ ยางคอมพาวนด์	89
ค1	อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่อง ทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	91
ค2	อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่อง ทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 100 °C	92
ค3	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 15 phr ต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	93
ค4	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 30 phr ต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	94
ค5	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสม สารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ค6	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	96
ค7	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	97
ค8	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาด 0.75 mm และอุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	98
ค9	อิทธิพลของความยาวของช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm	99
ค10	อิทธิพลของลักษณะช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm	100
ง1	อิทธิพลของระบบการคงรูปต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	102
ง2	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ ปริมาณ 15 phr ต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C	103
ง3	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ ปริมาณ 30 phr ต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C	104
ง4	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	105
ง5	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	106
ง6	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง7	อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C	108
ง8	อิทธิพลของความยาวของช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm	109
ง9	อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C	110
จ1	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 5 mm	115
จ2	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 15 mm	116
จ3	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 25 mm	117
จ4	ค่าดัชนีการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีระยะทางการไหลต่างกัน	117
จ5	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 5 mm	118
จ6	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 15 mm	119
จ7	ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 15 mm	120

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของธรรมชาติ	4
2	การเกิดพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยาง	7
3	เครื่องบดผสมยาง	13
4	เครื่องทดสอบความเหนียวที่ใช้อุณหภูมิและความชื้น	14
5	กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความเหนียว	14
6	เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง	16
7	ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง	16
8	ลักษณะการไหลที่เกิดจากแรงเฉือน	18
9	ลักษณะการไหลภายในท่อที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน	19
10	พฤติกรรมการไหลของของนิวโตเนียน	20
11	พฤติกรรมการไหลของของนอนนิวโตเนียน	21
12	ความสัมพันธ์ระหว่างความความเค้นเฉือนกับเวลา	22
13	ความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ของของไหลประเภทซูโดพลาสติก	23
14	เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารี	24
15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหล และรูปแบบการไหลในท่อทรงกระบอก	27
16	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป	28
17	ลักษณะการไหลวนของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ปรากฏในบริเวณมุมอับ	32
18	พฤติกรรมการไหลผ่านหัวขึ้นรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลว	33
19	ชิ้นงานขนาดเล็ก	37
20	ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉือน	39
21	ส่วนประกอบหลักของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์	40
22	ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 หัวขึ้นรูปที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์	42
24 แผนผังการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก	43
25 ยางธรรมชาติ STR5L	45
26 การบดผสมยาง	45
27 ยางคอมพาวนด์ที่เตรียมได้จากการบดผสม	46
28 ชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์	47
29 การอัดยางคอมพาวนด์ผ่านหัวขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติการไหล	48
30 ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม	49
31 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์	50
32 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณเท่ากับ 15 phr และ 30 phr	51
33 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีผลต่อความหนืดยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม	52
34 แบบจำลองแสดงลักษณะการสัมผัสระหว่างยางคอมพาวนด์กับผนังช่องทางการไหล	53
35 ลักษณะของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป	55
36 ความเค้นเฉือนที่ส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม	57
37 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์	58
38 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์	60
39 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์	61
40 ความเค้นเฉือนและอัตราครีดยืดเฉือนที่มีต่อการเกิดปรากฏการณ์เสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา	62
41 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์เมื่ออัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ $100s^{-1}$	63

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	รูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว	64
43	อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ เมื่ออัตราความเร็วเฉือนเท่ากับ 100s ⁻¹	65
44	อิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็ก	66
45	อิทธิพลของความยาวช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป	67
46	อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป	68
47	ลักษณะการเสียรูปร่างของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม	69
ภาพผนวกที่		
ก1	ห้องหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้านที่ 1	79
ก2	ห้องหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้านที่ 2	80
ก3	หัวกดพอลิเมอร์หลอมเหลว	81
ก4	แท่งกดพอลิเมอร์หลอมเหลว	82
ก5	ชุดให้ความร้อน	83
ก6	ที่นั่งรองหัวขึ้นรูป	84
ก7	หัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม	85
ก8	หัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม	86
จ1	หลักการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป	112
จ2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าอัตราความเร็วเฉือน โดยใช้สมการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป	113
จ3	ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ก่อนและหลังการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป	113
จ4	กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการปรับแก้ด้วยสมการราบิโนวิทซ์	114

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
ODR	=	Oscillating Disk Rheometer
MDR	=	Moving Die Rheometer
CV	=	Conventional vulcanization
EV	=	Efficient vulcanization
Semi EV	=	Semi efficient vulcanization
NR	=	Natural Rubber
NBR	=	Acrylonitrile butadiene Rubber
SBR	=	Styrene butadiene Rubber
STR 5L	=	Standard Thai Rubber 5L
CaCO ₃	=	Calcium Carbonate
CBS	=	N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide
EPDM	=	Ethylene propylene diene Rubber
ISO	=	International Organization for Standardization
M	=	Torque
M _{max}	=	Torque maximum
M _{min}	=	Torque minimum
°C	=	Degree celsius
PEG	=	Polyethyleneglycol
MBTS	=	DibenzothiazylDisulphide
phr	=	Parts Per Hundred of Rubber
t _{scorch}	=	Scorch Time
t _{cure}	=	Cure Tme
Tg	=	Glass transition temperature

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ZnO = Zinc Oxide

TMTD = TetramethylThiuramdisulphide



การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ขณะไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก

An Investigation into the Rheological Behavior of Rubber Compound during the Flow in Micro-channel

คำนำ

ในปัจจุบันการใช้งานผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสาร อุปกรณ์การแพทย์ รวมทั้งชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งโดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กสามารถขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding process) หรือกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process) โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยความร้อนและการใช้แรงดัน เพื่อให้สามารถไหลไปตามช่องทางการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ (ในกรณีขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์) หรือไหลผ่านหัวขึ้นรูป (ในกรณีขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดขึ้นรูป) ดังนั้นความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ในช่องทางการไหลขนาดเล็กจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบแม่พิมพ์ หรือการออกแบบหัวขึ้นรูป รวมทั้งการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และนอกจากนี้ข้อมูลที่ถูกต้องยังมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ที่ไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็กมีพฤติกรรมการไหลแตกต่างจากการไหลในช่องทางขนาดปกติ (Palmeze and Karbhari, 1995; Yao and Kim, 2002; Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2009) ซึ่งมีสาเหตุจากปัจจัยหลายประการ เช่น แรงตึงผิวของพอลิเมอร์ (Surface tension) ความหยาบของผิวแม่พิมพ์ (surface roughness) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดการไหล (Non-isothermal flow) รวมทั้งพฤติกรรมการเลื่อนตัวที่ผนัง (Slip at wall) เป็นต้น โดยพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกันนี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ในขณะที่พฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ภายในช่องทางการไหลขนาดเล็กยังคงมีรายงานการวิจัยที่น้อยมาก (Vergnes *et al.*, 1992; Liang, 2003) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก ซึ่งได้แก่ ความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress, τ)

อัตราเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate, $\dot{\gamma}$) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity, η) รวมถึงพฤติกรรมการบวมตัว (Die swell) ของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมการไหลภายในช่องทางการไหลขนาดเล็กต่อไป



วัตถุประสงค์

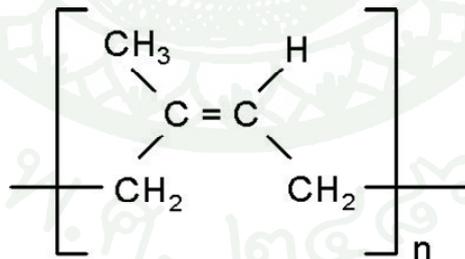
1. เพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชเคเนื้อนที่ สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กภายในหัวฉีดรูป
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป อุณหภูมิการทดสอบ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ที่มีต่อสมบัติการไหล ได้แก่ ความหนืดและอัตราส่วนการรวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่าน ช่องทางการไหลขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับช่องทางการไหลขนาดปกติ



การตรวจเอกสาร

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติเป็นผลผลิตจากต้นยางพาราสายพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยในโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยมอนอเมอร์ของไอโซพรีน (C_5H_8) ต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง (Linear chain) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) ที่กว้างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และอายุของต้นยางพารา ยางธรรมชาติมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ $-72^\circ C$ เมื่อพิจารณาโมเลกุลของยางธรรมชาติ เห็นได้ว่าในหนึ่งหน่วยของไอโซพรีนมีพันธะคู่ (Double bond) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ได้ด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ เช่น ออกซิเจน หรือ โอโซน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย (วราภรณ์, 2552) ดังนั้นจึงต้องมีการผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานหรือเก็บรักษา เช่น สารเคมีที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) และสารเคมีที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับ โอโซน (Antiozonant) เป็นต้น



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบจึงสามารถเกิดเป็นผลึก (Crystallize) ได้ ตัวอย่างเช่น การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) และเกิดผลึกในขณะยืดตัว (Strain induced crystallization) โดยในกรณีที่อุณหภูมิต่ำลง สายโซ่

โมเลกุลของยางดิบสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่ โมเลกุลที่ค่อนข้างเป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ผลึกที่เกิดขึ้นนี้สามารถ สลายไปได้และเริ่มกลับสู่สภาพเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และในกรณีที่ยางอยู่ในสภาพที่มีการยืดตัว สูง สายโซ่โมเลกุลที่เกี่ยวข้องพันกันถูกแรงดึงให้เกิดการคลายตัวออกและเข้ามาใกล้ชิดกันเกิดเป็นผลึก ขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้ว) ซึ่งสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียง กันเป็นระเบียบตามทิศทางของแรงที่กระทำ ส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีความทนทาน ต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อ การขัดสี (Abrasion resistance) เพิ่มขึ้น เป็นต้น

1.1 สารเคมีสำหรับการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ

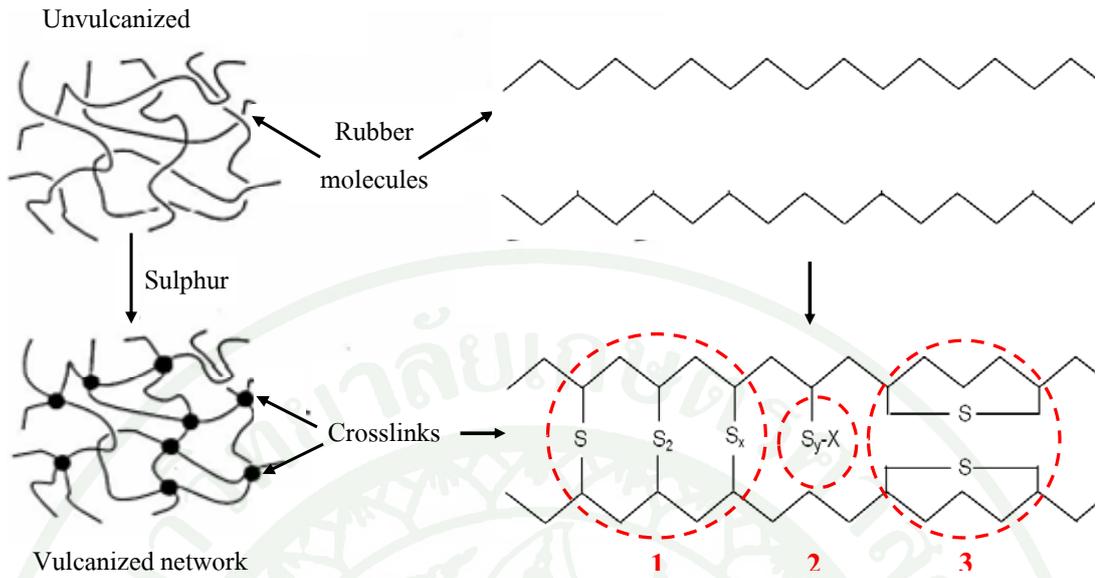
ยางดิบหรือยางที่ไม่ผ่านกระบวนการคงรูปมีข้อจำกัดสำหรับการนำไปใช้งานเนื่องจาก มีสมบัติเชิงกลค่อนข้างต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ กล่าวคือ ยางดิบสามารถอ่อนตัวเมื่อ ได้รับความร้อนและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ส่งผลให้การใช้ประโยชน์จากยางดิบ จำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้วยและข้อจำกัดในการใช้งานของ ยางดิบ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอื่นๆที่ทำหน้าที่เฉพาะด้านเพื่อเสริมสมบัติในการใช้งาน เช่น สาร ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ สารช่วยป้องกันโอโซน เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้สำหรับผสมกับยาง ดิบมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) สารกระตุ้น (Activators) และสารตัวเติม (Fillers) รวมถึงสารช่วยในกระบวนการ ผลิตหรือสารช่วยให้ยางนิ่ม (Processing aids/Softeners) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

1.1.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents)

สารช่วยทำให้ยางคงรูปมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการคงรูปทำ ให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางกันเป็น โครงสร้างตาข่าย 3 มิติ โดยยางที่ผ่าน กระบวนการคงรูปหรือยางคงรูป (Vulcanized rubber) มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและ ปริมาณพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง โดยทั่วไประบบการคงรูปของยางที่ใช้กันใน ภาคอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (Peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้นสำหรับยางที่ มีความไม่อิ่มตัว หรือมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural

rubber, NR) ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene, IR) ยางบิวตาไดอีน (Butadiene rubber, BR) และ ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) นิยมใช้กำมะถันเป็นสารช่วยในการคงรูป ซึ่งกำมะถันที่ใช้ในยางควรมีอนุภาคขนาดเล็กเพื่อการกระจายตัว (Dispersion) ในยางได้ดี ส่งผลให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้อย่างทั่วถึง ซึ่งโดยทั่วไปการผสมกำมะถันลงไปในช่วงต้องผสมในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการบดผสม (Compounding or Mixing) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด หรือการเกิดยางตาย (Scorch)

การใช้กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปมีข้อดีกว่าระบบอื่น เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถผสมเข้ากับเนื้อยางได้ง่าย อย่างไรก็ตามการใช้กำมะถันมีข้อจำกัดด้านการใช้งานเฉพาะยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัวเท่านั้น (Unsaturated bond) นอกจากนี้ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วอาจมีสมบัติความต้านทานต่อความร้อนที่ต่ำกว่าการคงรูปด้วยสารช่วยในการคงรูปตัวอื่น เมื่อพิจารณาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจากการใช้กำมะถันเป็นสารคงรูปอาจเกิดได้หลายรูปแบบ (ดังแสดงในภาพที่ 2) โดยในตำแหน่งที่ 1 การเชื่อมขวางอาจเกิดเป็นพันธะมอนอซัลไฟดิก (Monosulphidic, -S-) ไดซัลไฟดิก (Sulphidic, -S₂-) หรือ พอลิซัลไฟดิก (Polysulphidic, -S_x-) ตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่งที่ 2 แสดงการเชื่อมโยงแบบเพนเด้นท์ (Pendant sulphur, -Sy-X-) และตำแหน่งที่ 3 แสดงการเชื่อมโยงระหว่างกำมะถันภายในสายโซ่เดียวกันของโมเลกุลยาง (Intermolecular linkage) โดยความแตกต่างของพันธะที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถัน และจากอัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถัน สามารถแบ่งตามระบบการคงรูปได้ 3 ระบบดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งได้แก่ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ และระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพตามลำดับ



ภาพที่ 2 การเกิดพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยาง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันในแต่ละระบบการคงรูป (Hofmann, 1989)

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา (phr)	อัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถัน
CV	2.0-3.5	0.4-1.2	0.1-0.6
EV	0.4-0.8	2.0-5.0	2.5-12.5
Semi-EV	1.0-1.7	1.2-2.5	0.7-2.5

ระบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system, CV) เป็นระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันต่ำ แต่ละพันธะเชื่อมขวางประกอบด้วยกำมะถันหลายอะตอม พันธะที่เกิดขึ้นเป็นแบบพอลิซัลไฟดิก (พิจารณาได้ดังภาพที่ 2 ตำแหน่งที่ 1) จึงให้สมบัติทางกลที่ดี เช่น ทนต่อแรงดึงยืดได้ดี ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อความล้าดี และมีสมบัติในการต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก อย่างไรก็ตามสมบัติในการทนความร้อน ด้านการต้านการเสื่อมสภาพ และสมบัติการเสีรูปร่างเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ของยางที่คงรูปด้วยระบบดั้งเดิมยังคงด้อยกว่าระบบประสิทธิภาพ เนื่องจากพลังงานพันธะ (S-S) ที่

เกิดขึ้นในพันธะแบบพอลิซัลไฟด์มีค่าประมาณ 206 kJ/mol ในขณะที่พลังงานพันธะ (C-S) ที่เกิดขึ้นในระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพมีค่าสูงกว่า คือ ประมาณ 279 kJ/mol

ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system, EV) ระบบนี้เป็นระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันสูง หรือบางกรณีใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้กำมะถันออกมาในระหว่างกระบวนการคงรูป (Sulphur donor) แทนการผสมกำมะถัน ซึ่งเป็นสารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ ได้แก่ เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulfide, TMTD) ไดโมโพลไดซัลไฟด์ (Dimorpholine disulfide, DTDM) ไดเพนตะเมทิลีนไทยแรมเตตระซัลไฟด์ (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide, DPTT) ซึ่งทำให้การเชื่อมขวางเกิดเป็นแบบมอดูลาร์หรือไดซัลไฟด์ที่มีประสิทธิภาพมาก ส่งผลให้ยางมีสมบัติเด่นในด้านทนต่อความร้อนและมีสมบัติการเสียรูปเมื่อได้รับแรงอัดน้อยกว่า ในขณะที่ให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม

ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi efficient vulcanization system, Semi EV) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาในช่วงระหว่างระบบดั้งเดิมและระบบประสิทธิภาพ มีพันธะเชื่อมขวางส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลไฟด์ ทำให้อย่างมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าระบบดั้งเดิม แต่อาจมีสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ดีกว่าระบบประสิทธิภาพ

1.1.2 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

การใช้สารเร่งปฏิกิริยามีความจำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน การผสมสารเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง และไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณมากเกินไป อีกทั้งยังคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่สูงขึ้น ทั้งนี้ชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่ผสมกับยาง ให้สมบัติการคงรูป เช่น เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time) เวลาการคงรูป (Cure time) รวมไปถึงสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน การแบ่งประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาตามการใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียวและการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสองชนิดหรือมากกว่าร่วมกันซึ่งสารตัวเร่งทั้งสองชนิดเมื่อทำงานร่วมกันจะให้ผลแบบเสริมกัน (Synergistic effect) ตัวอย่างเช่น การใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่ให้เวลาเริ่มคงรูปช้า (Delayed scorch) หรือให้สมบัติเชิงกลหลังผ่านการคงรูปดี ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาที่มีการคงรูปเร็ว เป็นต้น

1.1.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ผสมลงไปในช่วงเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูป โดยทำหน้าที่ในการกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และทำปฏิกิริยาร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compounds) ที่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของรูป (Cure rate) สูงขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพของยาง สารกระตุ้นอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) และเกลืออะมีน (Amine salt) หรือเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) เป็นต้น

1.1.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไปในช่วงเพื่อวัตถุประสงค์ในการเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะสมบัติเด่นทางด้านความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความทนทานต่อการขูดถู เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวนับว่าเป็นสารตัวเติมที่อยู่ในกลุ่มของสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) ตัวอย่างเช่น เขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อยาง (Extender) หรือเพื่อลดต้นทุนการผลิต ตัวอย่างสารตัวเติมประเภทนี้เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) หรือไชน่าเคลย์ (China clay) สารตัวเติมในกลุ่มนี้ทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เขม่าดำ เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่มีการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบหลักคือ อนุภาคคาร์บอนซึ่งได้มาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของปิโตรเลียม โดยมีอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 10-500 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีในการผลิต โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำมักอยู่ในรูปของกลุ่มอนุภาคขนาดเล็ก (Aggregate) ที่เกาะตัวรวมกัน (Agglomerate) (พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002) ซึ่งต้องใช้พลังงานและเวลาในการบดผสมที่มากขึ้น เพื่อให้เขม่าดำกระจายตัว และเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงภายในเนื้อยาง โดยเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีกว่า รวมไปถึงมีเวลาในการคงรูปเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องมาจากการกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ที่ดีในเนื้อยาง อย่างไรก็ตาม

ตาม การใช้เขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กอาจทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากขึ้น รวมถึงมีความร้อนที่เกิดขึ้นในการบดผสมสูง (Heat build up) ซึ่งอาจทำให้ยางเกิดการคงรูปก่อนได้ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงมีการกำหนดเกรดของเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM ในการกำหนดเกรดของเขม่าดำตามขนาดของอนุภาคและความเร็วในการคงรูป ยกตัวอย่างเช่น เขม่าดำเกรด N330 โดยอักษรตัวแรกแรกหมายถึงความเร็วในการคงรูปของยางเมื่อบดผสม เช่น อักษร N แทน ความเร็วในการคงรูประดับปกติ (Normal curing) S แทนความเร็วในการคงรูปที่ช้าลงเมื่อบดผสม (Slow curing) และตามด้วยตัวเลขสามตัว ซึ่งตัวเลขตำแหน่งแรกบ่งบอกถึงขนาดของอนุภาคปฐภูมิ ในขณะที่ตัวเลขสองตัวท้ายไม่ได้ระบุความหมายที่ชัดเจน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต ยกเว้นในกรณีที่เขม่าดำเกรดนั้นมีระดับโครงสร้างมาตรฐาน ตัวเลขตัวที่สองมักใช้ซ้ำกับตัวแรกและตามด้วยเลขศูนย์ ยกตัวอย่างเช่น N330 และ N550 เป็นต้น

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสัน โดย การเสริมแรงของซิลิกาให้สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดและความร้อนที่ดี รวมถึงการเกิดความร้อนในกระบวนการบดผสมต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเขม่าดำ ในบางกรณีพบว่ามีการใช้ซิลิกา ร่วมกับเขม่าดำ ในการผลิตหน้ายางล้อรถยนต์เพื่อเพิ่มสมบัติการกระเดื่องกระดอน และลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น (Rattanasom *et al.*, 2005) ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน อย่างไรก็ตาม การบดผสมซิลิกาเข้ากับยางจำเป็นต้องใช้เวลาและพลังงานในการบดผสมที่นานมาก เนื่องจากการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกาที่มีความแข็งแรงสูง (พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002) นอกจากนี้จากการที่อนุภาคของซิลิกามีความพรุนที่ผิวสูงจึงสามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาที่ผสมลงในยางในระหว่างการบดผสม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคงรูปของยาง ดังนั้นในช่วงของการบดผสมซิลิกาในยาง จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี ซึ่งได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) หรือพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เพื่อลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา รวมถึงลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาในระหว่างการบดผสมภายในเฟสยาง (พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002)

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมที่ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับเนื้อยางได้ เนื่องจากบนพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงต่ำกว่า จึงนิยมใช้เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความแข็งของยางในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ความเป็นด่างของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เล็กน้อย (พงษ์ธร, 2550)

ไชน่าเคลย์ (China clay) หรือเกาลิน (Kaolin) เป็นสารตัวเติมที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางรองจากเขม่าดำ เนื่องจากมีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ต่ำกว่า 2 ไมครอน เมื่อผสมลงในยาง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขูดของยางเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ไชน่าเคลย์ชนิดหยาบซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 2 ไมครอน นิยมใช้เป็นสารตัวเติมชนิด 0น

1.1.5 สารที่ทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Softener and processing aids)

สารที่ทำให้ยางนิ่ม คือสารเคมีที่เติมลงไปแล้วทำให้ยางอ่อนตัวลงหรือทำให้พลังงานและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบดผสมลดลง ยกตัวอย่างเช่น น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) ซึ่งใช้ร่วมกับการบดผสมยางกับเขม่าดำ นอกจากนี้ในการบดผสมยางให้นิ่ม (Mastication) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับยางธรรมชาติ เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดของยาง ยังมีการใช้สารช่วยย่อยโมเลกุล (Peptizers) เพื่อให้ยางอ่อนตัวได้เร็วขึ้น

1.1.6 สารเคมีอื่นๆ (Miscellaneous Ingredients)

นอกจากสารเคมีที่กล่าวมาข้างต้น ในบางกรณีอาจมีการผสมสารเคมีบางชนิดลงไปในการผลิตเพื่อต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สี (Pigments) ซึ่งต้องเป็นสีที่มีประสิทธิภาพ ทนทานต่อแสงแดด และทนต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง รวมถึงสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) เพื่อช่วยให้เกิดรูพรุนภายในยาง นอกจากนี้ยังมีการใช้สารหน่วง (Retardants) เพื่อลดหรือชะลอความว่องไวของสารเร่งในระหว่างการเก็บรักษาหรือในขั้นตอนของการบดผสม และสารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (Antistatic agents) ของยาง เป็นต้น

2. ทฤษฎีการบดผสมยาง (Theory of mixing)

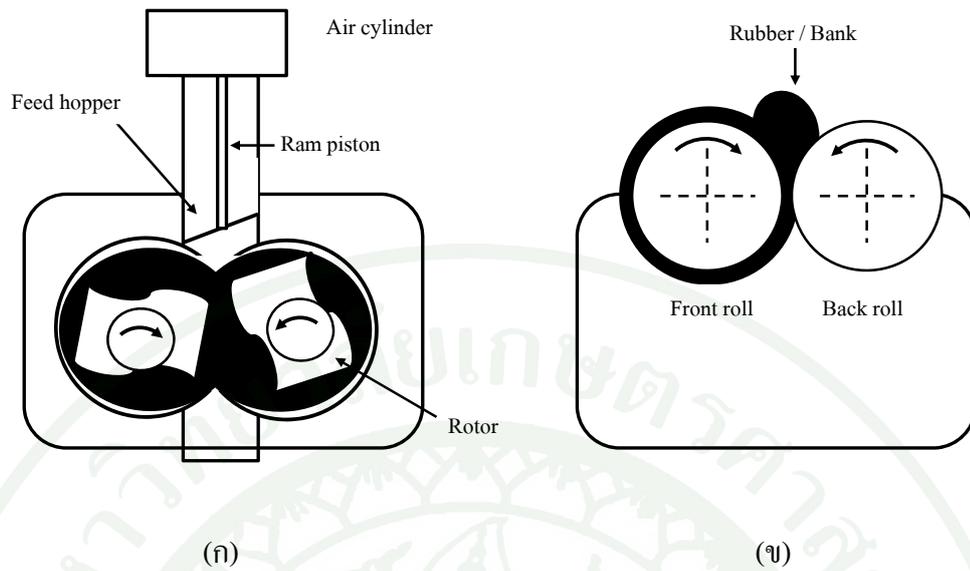
การบดยางให้นิ่มเป็นกระบวนการตัดโมเลกุลของยางจากสายโซ่ยาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงให้เป็นสายโซ่ที่สั้นโดยแรงเฉือนจากลูกกลิ้งเพื่อให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณียางธรรมชาติ เพื่อลดความแข็งหรือความหนืดให้ง่ายต่อการบดผสมเข้ากับสารเคมีที่สามารถเข้าไปรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในขณะที่ยางสังเคราะห์อาจไม่จำเป็นต้องบดให้นิ่ม

เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดเริ่มต้นไม่สูงมากนัก ดังนั้นในการบดผสมยางธรรมชาติควรพิจารณาถึงความหนืดของยางเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการบดผสมมากที่สุด ซึ่งในบางกรณีอาจมีการผสมสารช่วยย่อยโมเลกุล เพื่อให้ยางนุ่มหรืออ่อนตัวเร็วขึ้น เมื่อยางนุ่มพอเหมาะแล้วจึงผสมสารเคมีให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยขั้นตอนการผสมสารเคมีต่างๆ ในการบดผสมกับยางนั้นต้องจัดลำดับการผสมไว้อย่างถูกต้อง หลักการโดยทั่วไปคือ ในช่วงแรกเติมสารตัวเติม เพื่อให้มีระยะเวลาในการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ จากนั้นเติมสารเคมีพวกสารเร่งปฏิกิริยาและสารคงรูปเป็นลำดับสุดท้ายเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการเกิดการคงรูปก่อนเวลา หรือที่เรียกว่า ยางตาย โดยยางที่ได้จากบดผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้ว ควรเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

โดยทั่วไป การบดผสมยางนิยมบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) ซึ่งเป็นเครื่องบดผสมที่ใช้หลักการหมุนของโรเตอร์เพื่อให้แรงเฉือนกับยางเป็นเครื่องบดผสมที่มีประสิทธิภาพ และให้คุณภาพของยางคอมพาวนด์ค่อนข้างสม่ำเสมอ รวมทั้งสามารถบดยางได้ในปริมาณมาก ในขณะที่เครื่องบดผสมแบบเปิดหรือเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) เป็นเครื่องบดที่ใช้หลักการให้แรงเฉือนในการบดจากช่องว่างระหว่างสองลูกกลิ้งที่สามารถปรับขนาดได้ ทำให้สารเคมีต่างๆ ที่ผสมเข้าไปมีการแตกตัวและกระจายตัวได้ดี อย่างไรก็ตามเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งมีข้อเสียในด้านการควบคุมอุณหภูมิและการฟุ้งกระจายของสารเคมีในระหว่างการบดผสม รวมทั้งคุณภาพของการผสมขึ้นอยู่กับทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติ

2.1 การทดสอบความหนืดและสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการบดผสมมาแล้ว ถูกนำมาทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปก่อนการนำไปเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปและคงรูป ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ทดสอบสมบัติเหล่านี้ได้แก่เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 เพื่อวัดความหนืดของยางคอมพาวนด์หรือยางที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคงรูป และเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) หรือ Moving Die Rheometer (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084 และ ASTM D5289 สำหรับวัดสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์



ภาพที่ 3 เครื่องบดผสมยาง (ก) เครื่องบดผสมระบบปิด (ข) เครื่องบดผสมระบบเปิด

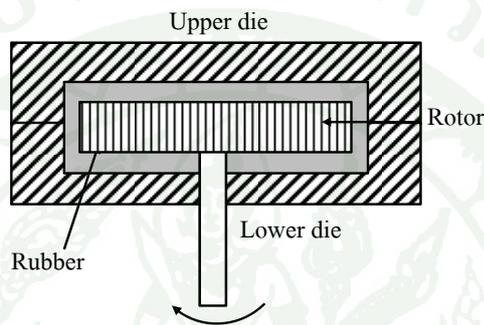
2.1 การทดสอบความหนืดและสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการบดผสมมาแล้ว ถูกนำมาทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปก่อนการนำไปเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปและคงรูป ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ทดสอบสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 เพื่อวัดความหนืดของยางคอมพาวนด์หรือยางที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคงรูป และเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) หรือ Moving Die Rheometer (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084 และ ASTM D5289 สำหรับวัดสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

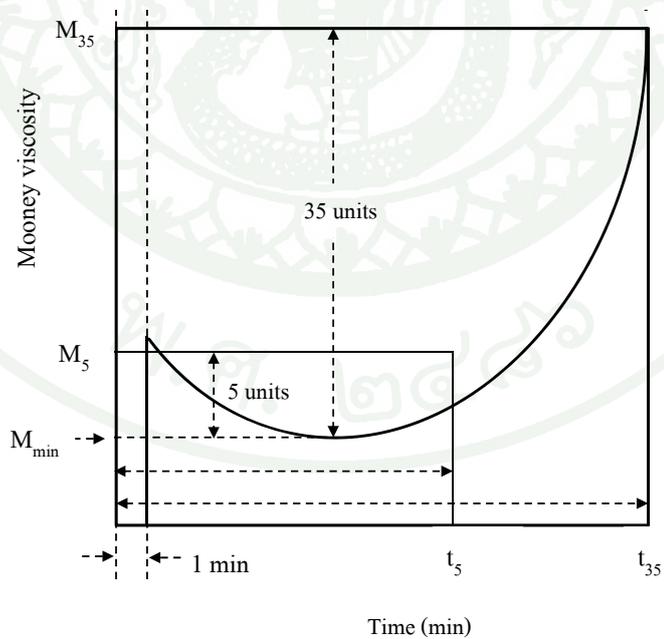
2.1.1 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer)

ความหนืดของยางดิบหรือยางคอมพาวนด์ สามารถทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยมีจานโลหะ (Rotor) หมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 2 ± 0.02 รอบต่อนาที อยู่ในห้องทดสอบ ภายใต้อุณหภูมิและความดันตามที่กำหนดไว้ การหมุนของโรเตอร์ทำให้เกิดแรงต้านการหมุนหรือแรงบิด (Torque) ซึ่งค่าที่ได้เรียกว่าความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity) เช่น 50 ML 1+4(100°C) และตัวอย่างกราฟความหนืดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่แสดงในภาพที่ 5

โดย	50	หมายถึง	ค่าความหนืดที่วัดได้ในหน่วยมูนนี่
	M	หมายถึง	Mooney
	L	หมายถึง	งานมูนนี่ขนาดใหญ่ (ถ้าใช้งานมูนนี่ขนาดเล็กให้ใช้อักษร S)
	1	หมายถึง	ระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนทดสอบ ในหน่วยนาที
	4	หมายถึง	เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในหน่วยนาที
	100°C	หมายถึง	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติการไหลของยาง



ภาพที่ 5 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

กราฟความหนืดมูนนี้สามารถใช้หาค่าความหนืดมูนนี้และเวลาที่ยังสามารถไหลได้ (Scorch Time) รวมทั้งสมบัติในการคงรูปของยาง (Cure characteristics) เช่น ดัชนีการคงรูป (Cure Index) ดังแสดงในสมการที่ 1 ถึง 3 ซึ่งสามารถนำไปกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้

$$T_{\text{scorch}}(t_5) = \text{Minimum} + 5 \text{ units} \quad (1)$$

$$t_{35} = \text{Minimum} + 35 \text{ units} \quad (2)$$

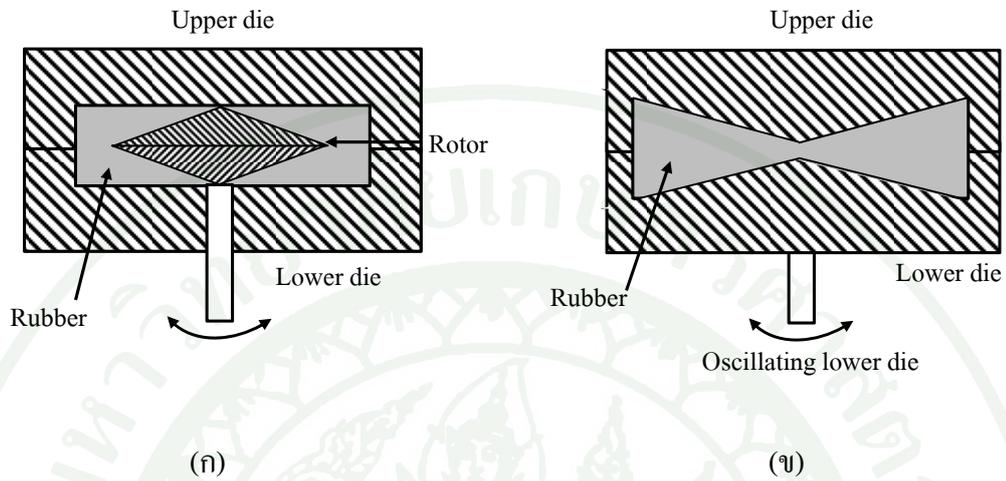
$$\text{Cure Index } (\Delta T) = t_{35} - t_5 \quad (3)$$

โดย t_5 หมายถึง ในการเริ่มคงรูปของยาง (เวลาที่ยังสามารถไหลตัวได้ในขณะผลิต)
 t_{35} หมายถึง ค่ามูนนี้สูงกว่าจุดต่ำสุด 35 หน่วย
 Δt หมายถึง ค่าดัชนีการคงรูปของยาง

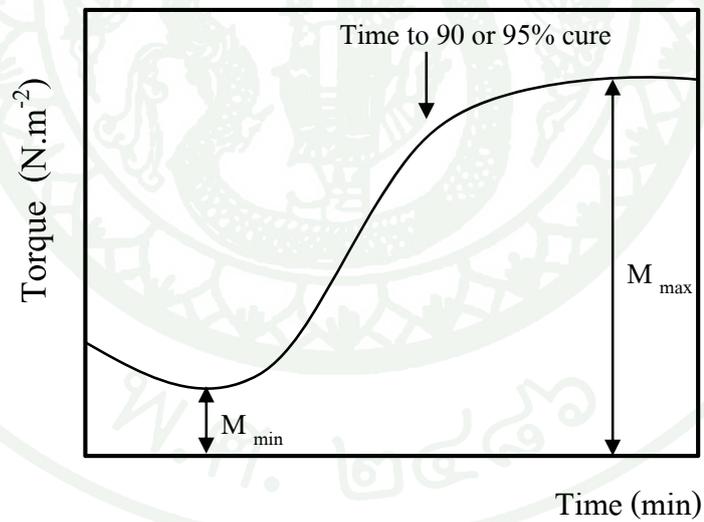
2.1.2 เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

การศึกษาสมบัติการคงรูปของยาง (Cure characteristic) ในสถานะอุณหภูมิคงที่ สามารถทดสอบโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบ Oscillating Disc Rheometer (ODR) ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) ซึ่งใช้หลักการหมุนของโรเตอร์กล่าวคือ วางยางคอมพาวนด์ตัวอย่างบนโรเตอร์ภายในห้องทดสอบ จากนั้นทำการหมุนโรเตอร์ในลักษณะสลับไปมา (Oscillate) ในช่วงเริ่มต้นเมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับความร้อนยางจะเริ่มอ่อนตัว โดยแรงที่ใช้ในการหมุนของโรเตอร์ยังมีค่าที่น้อย แต่เมื่อยางเริ่มเกิดปฏิกิริยา โมเลกุลของยางมีการเชื่อมขวางเกิดขึ้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้แรงที่ใช้หมุนโรเตอร์เพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเครื่องรีโอมิเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคือ Moving Die Rheometer (MDR) เครื่องทดสอบแบบนี้มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบบ ODR โดยเครื่อง MDR ใช้เพียงแผ่นประกบบนและล่างที่หมุนสลับไปมาเป็นมุมแคบจากนั้นเครื่องจะเริ่มบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามเวลาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทั้ง 2 แบบ เป็นความสัมพันธ์ของค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นของยางคอมพาวนด์เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์กับระยะเวลา ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปพิจารณาสมบัติการคง

รูปของยางได้ ดังแสดงในภาพที่ 7 รวมทั้งคำนวณระยะเวลาและเปอร์เซ็นต์การคงรูปของยางได้ตามสมการที่ 4



ภาพที่ 6 เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง (ก) เครื่อง ODR (ข) เครื่อง MDR



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง

$$M = \frac{Y(M_{\max} - M_{\min})}{100} + M_{\min} \quad (4)$$

โดย	M	หมายถึง	ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เปอร์เซ็นต์การคั่งรูปที่ต้องการ (N.m ²)
	Y	หมายถึง	เปอร์เซ็นต์การคั่งรูปที่ต้องการ (%)
	M _{max}	หมายถึง	ค่าแรงบิดสูงสุด (N.m ²)
	M _{min}	หมายถึง	ค่าแรงบิดต่ำสุด (N.m ²)

3. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

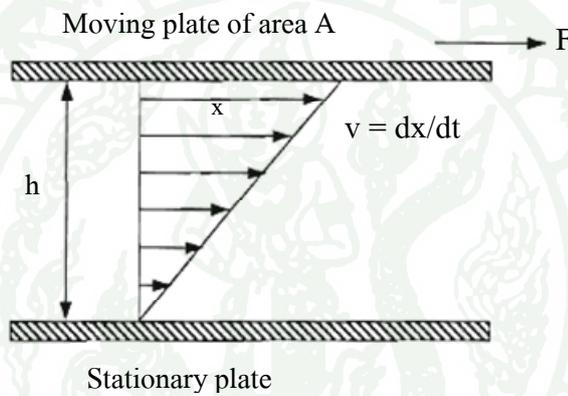
การศึกษาสมบัติการไหล (Rheology) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) และความสามารถในการไหล (Flowability) ของของไหล เมื่อของไหลนั้นถูกแรงกระทำค้ำหนึ่ง โดยทั่วไปแล้ววัสดุแต่ละประเภทมีสมบัติการไหลแตกต่างกัน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ หรืออย่างนั้น สมบัติการไหลมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ อาศัยหลักการให้ความร้อน เพื่อให้ความหนืดลดลงจากนั้นจึงใช้แรงดันให้พอลิเมอร์ไหลผ่านหัวขึ้นรูปหรือไหลเข้ายังแม่พิมพ์ เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งความรู้เกี่ยวกับสมบัติการไหลสามารถแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุไปใช้ในกระบวนการผลิต (Processability) หรือเพื่อแสดงถึงสภาวะการผลิต (Processing conditions) ที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) และอัตราการไหล (Flow rate) รวมทั้งใช้ในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.1 ประเภทของการไหลในรูปแบบของแรงเฉือน

เมื่อพิจารณาลักษณะการไหลของยางและพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต พบว่าส่วนใหญ่เป็นการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear flow) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ การไหลแบบลากดึง (Drag flow) และการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน (Pressure driven flow) โดยสามารถพิจารณาลักษณะการไหลแต่ละประเภท ดังนี้

3.1.1 การไหลแบบลากดึง (Drag flow)

การไหลในรูปแบบนี้เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำกับผนังหรือผิวของการไหล ตัวอย่างเช่น การไหลของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ที่มีความเร็วแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยพอลิเมอร์ที่อยู่ติดกับแผ่นเคลื่อนที่มีความเร็วสูงที่สุดและความเร็วมีค่าลดลงเมื่อเข้าไปใกล้กับแผ่นที่อยู่กับที่ ตัวแปรที่สำคัญของการไหลในรูปแบบนี้ได้แก่ ค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ค่าความเครียดเฉือน (Shear strain, γ) และค่าอัตราเฉือนเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5 6 และ 7 ตามลำดับ



ภาพที่ 8 ลักษณะการไหลที่เกิดจากแรงเฉือน

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{5}$$

$$\gamma = \frac{x}{h} \tag{6}$$

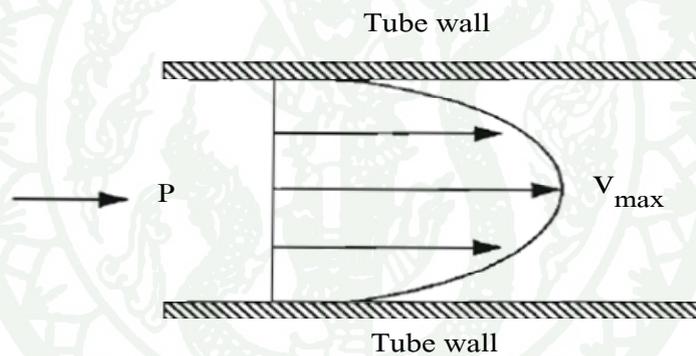
$$\dot{\gamma} = \frac{1}{h} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{v}{h} \tag{7}$$

โดย	τ	หมายถึง	ความเค้นเฉือน (N.m ⁻² หรือ Pa)
	γ	หมายถึง	ความเครียดเฉือน
	$\dot{\gamma}$	หมายถึง	อัตราเฉือนเฉือน (s ⁻¹)
	F	หมายถึง	แรงเฉือน (N)

A	หมายถึง	พื้นที่ (m^2)
h	หมายถึง	ความสูงของแผ่นประกบ (m)
v	หมายถึง	ความเร็วการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบ ($m.s^{-1}$)

3.1.2 การไหลจากความแตกต่างของแรงดัน (Pressure driven flow)

การไหลประเภทนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดัน โดยพอลิเมอร์หลอมไหลจากด้านที่มีแรงดันสูงไปยังด้านที่มีแรงดันต่ำ ความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมไหลมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกลางของช่องทางการไหลและต่ำที่สุดที่ตำแหน่งติดกับผนัง ดังแสดงในภาพที่ 9 การไหลแบบนี้สามารถพบได้ในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในหัวขึ้นรูป และการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในกระบอกฉีดในจังหวะการฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 9 ลักษณะการไหลภายในท่อที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน

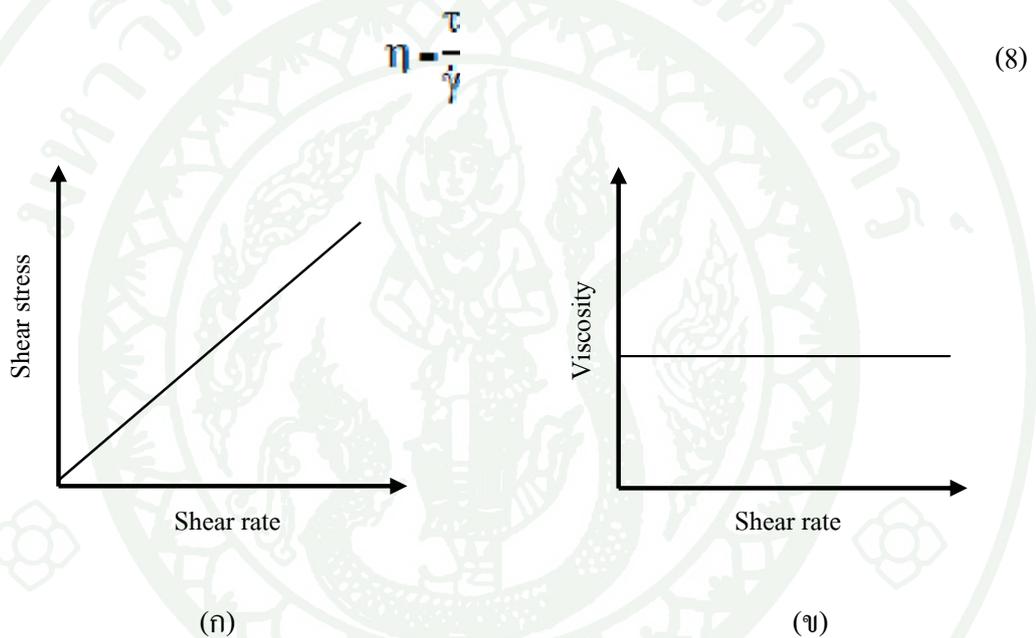
3.2 ประเภทของของไหล

โดยทั่วไปสามารถแบ่งของไหลในรูปแบบของแรงเฉือนออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก

ดังนี้

3.2.1 ของไหลนิวโตเนียน(Newtonian fluid)

พฤติกรรมของไหลนิวโตเนียน คือ ของไหลที่มีความหนืดคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอัตราครีดยืดและอุณหภูมิ ซึ่งมักเป็นพฤติกรรมของของไหลที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำ สารละลายเจือจาง เป็นต้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราครีดยืด และความหนืดกับอัตราครีดยืดมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 10(ก) และ 10(ข) ซึ่งสามารถหาค่าความหนืดได้จากสมการที่ 8



ภาพที่ 10 พฤติกรรมการไหลของของไหลนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราครีดยืด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราครีดยืด

3.2.2 ของไหลนอนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid)

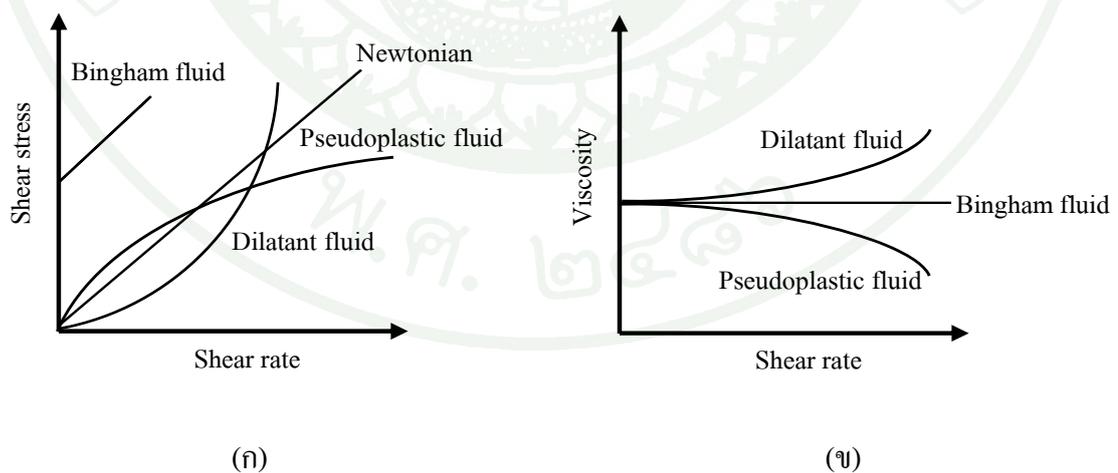
ของไหลนอนิวโตเนียนเป็นของไหลที่ค่าความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราครีดยืด โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราครีดยืด และความหนืดกับอัตราครีดยืดไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งของไหลนอนิวโตเนียน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time independent fluid) และของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent fluid) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.2.2.1 ของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา(Time-independent fluid) หมายถึง ของไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนหรือความหนืดเมื่ออัตราครีดยเฉือนเปลี่ยนแปลงไป โดยไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งสามารถแบ่งของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาได้ 3 ประเภทคือ

ของไหลบิงแฮม (Bingham fluid) มีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหลนิวโตเนียน แต่ของไหลประเภทนี้เกิดการไหลได้ก็ต่อเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความเค้นเฉือนคราก (Yield stress) และเมื่อเกิดการไหลแล้วจะมีความเค้นเฉือนและความหนืดคงที่โดยไม่ขึ้นกับอัตราครีดยเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 11 ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ ได้แก่ ยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ และยลลี่ เป็นต้น

ของไหลไดลาแทนท์ (Dilatant fluid) มีความเค้นเฉือนหรือความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราครีดยเฉือนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของของไหลประเภทนี้ได้แก่ น้ำแป้ง และทรายเปียก เป็นต้น

ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) เป็นของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนหรือความหนืดลดลงเมื่ออัตราครีดยเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ ได้แก่ หมึกพิมพ์ เลือด และพอลิเมอร์หลอมเหลว เป็นต้น

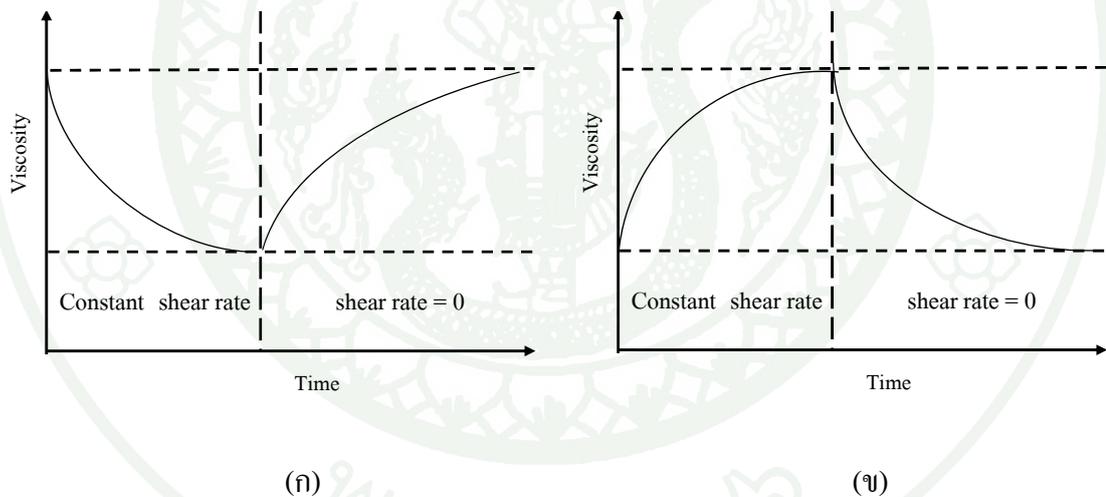


ภาพที่ 11 พฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราครีดยเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราครีดยเฉือน

3.2.2.2 ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent fluids) เป็นของไหลที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ อัตราเครียดเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ของไหลในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ ของไหลไทโซทรอปิกของไหลรีโอพิกซ์โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ของไหลไทโซทรอปิก (Thixotropy) คือ ของไหลที่มีความหนืดลดลงตามเวลาที่อยู่ในระบบ เมื่อให้อัตราเครียดเฉือนคงที่ และเมื่อหยุดให้อัตราเครียดเฉือน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นกลับมาเท่าเดิม ดังแสดงในภาพที่ 12(ก) ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมเช่นนี้ได้แก่ มายองเนส โยเกิร์ต เป็นต้น

ของไหลรีโอพิกซ์ (Rheopexy) คือ ของไหลที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลา ณ อัตราเครียดเฉือนคงที่ และเมื่อหยุดให้อัตราเครียดเฉือน ความหนืดจะลดลงกลับมาเท่าเดิม ตัวอย่างเช่น สารแขวนลอย หรือ โคลน เป็นต้น



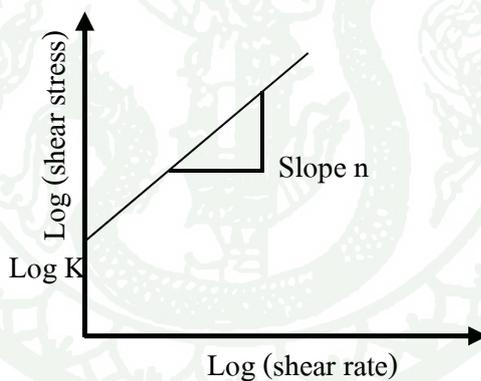
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเครียดเฉือนกับเวลา (ก) ของไหลไทโซทรอปิก (ข) ของไหลรีโอพิกซ์

ของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน มีค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราเครียดเฉือน ทำให้ไม่สามารถระบุค่าความหนืดรวมได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ค่าดัชนีการไหล (Power law index) เป็นตัวบ่งบอกถึงสมบัติการไหลของของไหลที่สามารถเปรียบเทียบกับของไหลอื่นๆ โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 9 ซึ่งเรียกว่า สมการยกกำลัง (Power law equation)

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \tag{9}$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่การไหล (Power law consistency) ซึ่งบ่งบอกถึงความหนืดของพอลิเมอร์ที่อัตราเฉือนต่ำมาก (อัตราเฉือนเทียบกับ 1 s^{-1}) และ n คือค่าดัชนีการไหล ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะของของไหลได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อค่า n น้อยกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติก เมื่อค่า n มากกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลไดลาแทนท์ และเมื่อหาค่า n เท่ากับ 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลประเภทนิวโตเนียน โดยค่า n ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 10 และสามารถหาค่า n ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ดังแสดงในภาพที่ 13 และค่า K สามารถหาได้จากจุดตัดแกน Log (Shear stress)

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \tag{10}$$

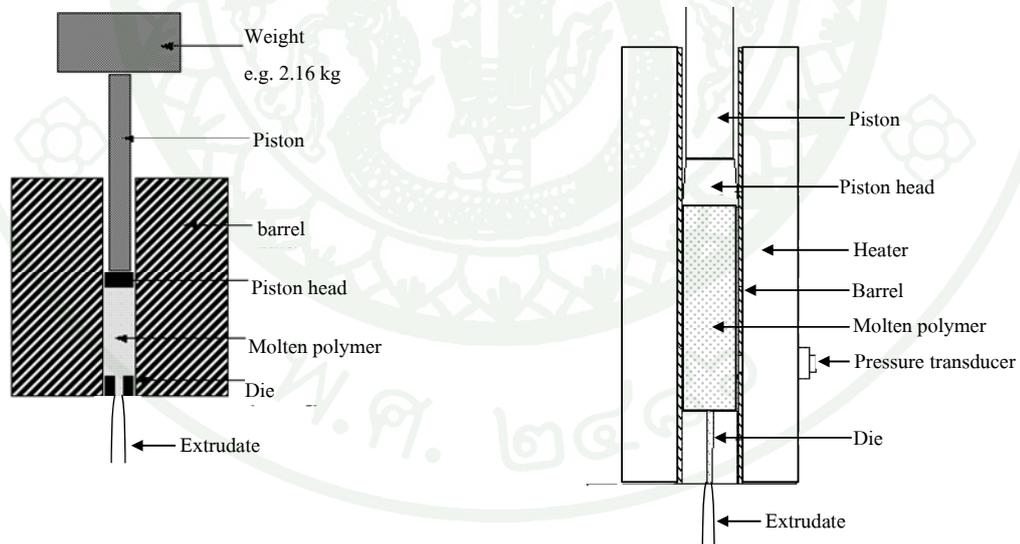


ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ของของไหลประเภทซูโดพลาสติก

4. การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

เครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ เครื่องรีโอมิเตอร์ระบบแท่งอัคริด (Piston-extrusion rheometers) ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ แบบควบคุมความเค้นเฉือน (Stress-controlled rheometer) ยกตัวอย่างเช่น เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากผลการทดสอบ

สามารถนำไปใช้ในการประเมินสถานะการผลิตที่เหมาะสม รวมทั้งมีความสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ นอกจากนี้ยังใช้ในการพิจารณาค่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Molecular weight) กล่าวคือ หากพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบมีค่าดัชนีการไหลสูงแสดงว่าพอลิเมอร์นั้นมีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สำหรับการทำงานของเครื่องวัดดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 อาศัยหลักการเปลี่ยนตุ้มถ่วงน้ำหนักเพื่อเปลี่ยนความเค้นเฉือนให้มีความเหมาะสมกับพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบ โดยพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปเมื่อถูกกดจากแท่งกดตามน้ำหนักของลูกตุ้ม ถูกนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที ได้ค่าของดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่มีหน่วยเป็น $g/10 \text{ min}$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดภายใต้เงื่อนไขการกำหนดอัตราครีปเฉือนของการทดสอบในช่วงที่ต่ำซึ่งไม่สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง ซึ่งใช้อัตราครีปเฉือนที่สูงมาก ดังนั้น ในการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวสำหรับการผลิตที่ใช้อัตราครีปเฉือนที่ค่อนข้างสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีปเฉือน (Rate-controlled capillary rheometer) ดังแสดงในภาพที่ 14(ข) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการอัดรีดได้ ทำให้มีความเหมาะสมและมีความสามารถในการวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อัตราครีปเฉือนที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง



(ก)

(ข)

ภาพที่ 14 เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารี (ก) แบบควบคุมความเค้นเฉือน

(ข) แบบควบคุมอัตราครีปเฉือน

การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยใช้เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเนียนสามารถควบคุมอัตราเครียดเนียน โดยการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งกด โดยมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแท่งกดอัดให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูปซึ่งความดันที่เกิดขึ้นสามารถตรวจวัดได้จากชุดตรวจวัดความดัน (Pressure transducer) ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปโดยความเร็วของแท่งกดและความดันที่เกิดขึ้นสามารถนำไปคำนวณหาอัตราเครียดเนียนปรากฏ (Apparent shear rate, $\dot{\gamma}$) และความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress, τ) ที่เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม ได้จากสมการที่ 11-14 ตามลำดับ โดยมีสมการที่ 15 เป็นสมการสำหรับการหาค่าความหนืดปรากฏ (Apparent shear viscosity, η)

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\Delta P R}{2L} \quad (12)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{WH^2} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{H\Delta P}{2L} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (15)$$

เมื่อ	R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
	W	=	ความกว้างของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
	H	=	ความสูงของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
	L	=	ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)
	Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร = vA ($m^3 s^{-1}$)
	ΔP	=	ความดันตกคร่อมหัวขึ้นรูป (Pa)
	η	=	ความหนืดปรากฏ (Pa.s)

$$v = \text{ความเร็วของแท่งกด (m.s}^{-1}\text{)}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (m}^2\text{)}$$

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวมีสมบัติความเป็นนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางการไหล จึงได้มีการปรับแก้สมการที่ใช้ในการหาอัตราครีดยืดเคือง โดยการระบุตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการไหล คือ ค่าดัชนีการไหล (Power law index, n) เพื่อให้ได้อัตราครีดยืดเคืองแท้จริง (True shear rate) ซึ่งการปรับแก้นี้เรียกว่า การปรับแก้แบบราบิโนวิทซ์ (Rabinowitsch corrections) และนอกจากนี้ยังพบว่าความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปมีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้มีการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance correction) เพื่อให้ได้ค่าความดันที่แท้จริง ซึ่งเรียกว่า การปรับแก้ของ Bagley (Bagley corrections) (Bagley, 1957) อย่างไรก็ตาม การปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปนั้น อยู่บนสมมติฐานที่ว่าความดันบริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์ (Zero-exit pressure) แต่จากผลงานวิจัยต่อมาแสดงให้เห็นว่าค่าความดันที่ตำแหน่งทางออกหัวขึ้นรูปไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero exit pressure) ซึ่งควรพิจารณาถึงความดันที่บริเวณทางออกขึ้นรูปด้วย วิธีการปรับแก้แบบนี้เรียกว่า การปรับแก้บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (Exit correction) โดยวิธีการปรับแก้แบบต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การปรับแก้แบบราบิโนวิทซ์(Rabinowitsch corrections) สำหรับการปรับแก้อัตราครีดยืดเคือง

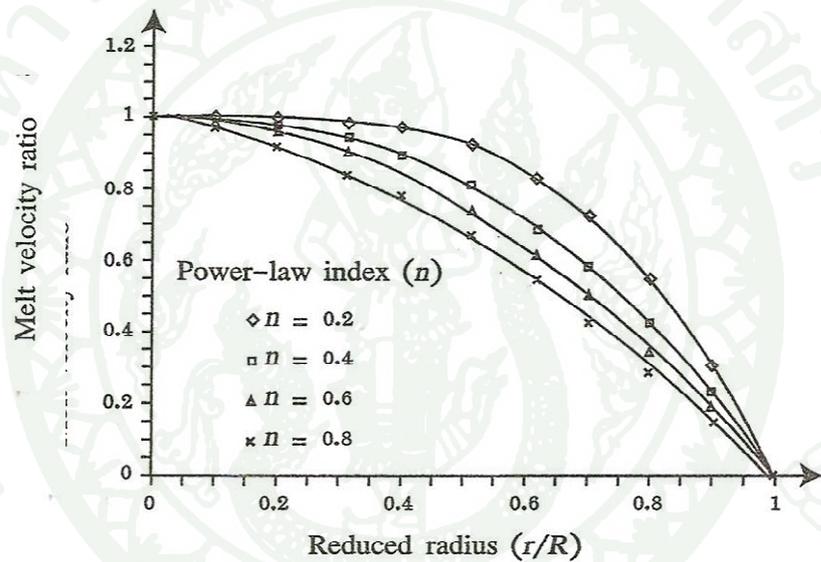
การปรับแก้ราบิโนวิทซ์เป็นการปรับแก้ค่าอัตราครีดยืดเคือง เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยทั่วไปมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติคนอนนิวโตเนียน และถูกกำหนดให้มรูปแบบการไหลแบบพาราโบลา ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งค่า n เป็นตัวที่บ่งบอกถึงรูปแบบการไหลและความเป็นนอนนิวโตเนียนของพอลิเมอร์ได้ โดยพิจารณาจากสมการที่ 16 ซึ่งพบว่า ค่า n ที่ลดลง ทำให้รูปแบบของพอลิเมอร์เป็นแบบปลั๊ก (Plug flow) มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15 และค่า n ที่ได้ สามารถนำมาใช้หาค่าอัตราครีดยืดเคืองจริง ($\dot{\gamma}_{true}$) ของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมและแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ได้ดังสมการที่ 17 และ 18 ตามลำดับ

$$v(r) = \frac{3n+1}{n+1} v^* \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{2+\frac{2}{n}} \right] \quad (16)$$

$$\dot{\gamma}_{max} = \left[\frac{3n+1}{4n} \right] \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad (17)$$

$$\dot{\gamma}_{max} = \left[\frac{2n+1}{4n} \right] \left[\frac{6Q}{WH^3} \right] \quad (18)$$

โดย n หมายถึง ค่าดัชนีการไหล
 $v(r)$ หมายถึง ความเร็วของพอลิเมอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนหน้าตัดหัวขึ้นรูป ($m.s^{-1}$)
 v^* หมายถึง ความเร็วเฉื่อยการไหล ($m.s^{-1}$)

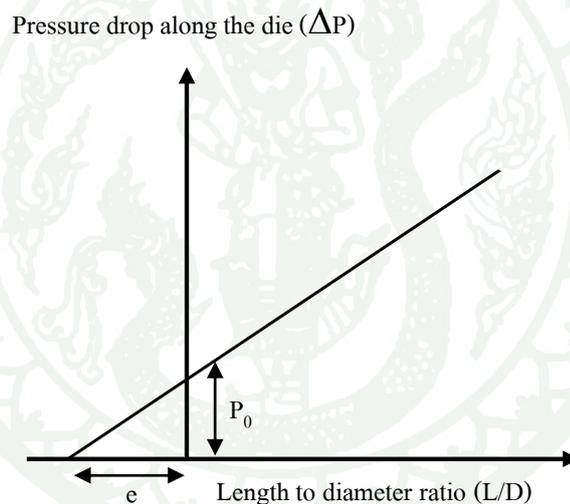


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหล และรูปแบบการไหลในท่อทรงกระบอก

ที่มา: Sombatsompop (1997)

4.2 การปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance correction)

เครื่องคาร์ปิลารี่รีโอมิเตอร์มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวัดค่าความดันบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปได้โดยตรง อีกทั้งความดันบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non linear pressure) ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลว การวิเคราะห์หาค่าความดันที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Bagley จึงเรียกว่า “Bagley correction” (Bagley, 1957) ซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (L/D) ดังแสดงในภาพที่ 16 เพื่อหาความดันตกคร่อมบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป ทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือนที่แท้จริง (True shear stress, τ_{true})



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป

เมื่อ P_0 = ความดันบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (ความดันที่ความยาวหัวขึ้นรูปเท่ากับ ศูนย์) ($N.m^{-2}$)

e = ความยาวนามธรรมของหัวขึ้นรูป (Imaginary length) (m)

ผลของค่า e ที่ได้จากรูปความสัมพันธ์สามารถหาค่าความเค้นเฉือนที่แท้จริงได้ตามสมการที่ 19 และ 20 ในกรณีหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลม และสมการที่ 21 และ 22 ในกรณีของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$T_{\text{ทวน}} = \frac{R\Delta P}{2(L+eR)} \quad (19)$$

$$T_{\text{ทวน}} = \frac{R(\Delta P - P_0)}{2L} \quad (20)$$

$$T_{\text{ทวน}} = \frac{H\Delta P}{2(L+eH)} \quad (21)$$

$$T_{\text{ทวน}} = \frac{H(\Delta P - P_0)}{2L} \quad (22)$$

โดย ΔP = ความดันตกคร่อมก่อนการปรับแก้ (N.m^{-2})
 R = รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
 H = ความสูงของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
 L = ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)

สมการที่ใช้สำหรับการปรับแก้ ใช้ได้เฉพาะกับอัตราเคียดเฉือนหนึ่งๆ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจต้องทำการทดลองมากและใช้เวลานาน รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับค่า L/D อาจไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ไม่อาจใช้วิธีการปรับแก้ที่เสนอไป อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่ใช้เครื่องมือทดสอบเดียวกัน (โดยไม่มี การนำไปใช้ในกระบวนการจริง) อาจไม่มีความจำเป็นต้องปรับค่าข้อมูล (Sombatsompop *et al.*, 1997)

4.3 การปรับแก้บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (Exit correction)

การปรับแก้ด้วยทางเข้าบริเวณหัวขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวอาจมีค่าที่สูงเกินไป ซึ่งเป็นผลมาจากสมมติฐานที่ให้ความดันบริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ความเป็นจริงความดันบริเวณดังกล่าวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (ณรงค์ฤทธิ์, 2548) ทำให้ค่าที่ได้จำเป็นต้องมีการหักลบจากความดันบริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป ดังแสดงในสมการที่ 23 และ 24 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปที่มากกว่า 40 ($L/D > 40$) อาจไม่มีความจำเป็นต้องใช้สมการปรับแก้ที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป เนื่องจากค่าความดันที่เกิดขึ้น มีความแตกต่างกันน้อยมาก

$$U_{avg} = \frac{R(\Delta P - P_{exit})}{2(L + eR)} \quad (23)$$

$$U_{avg} = \frac{\Delta P R}{2(L + eR + MR)} \quad (24)$$

โดย M คือ ความยาวนานธรรมชาติของหัวขึ้นรูปในบริเวณทางออก

4.4 การปรับแก้Head effect เพื่อปรับค่าความดันตกคร่อม

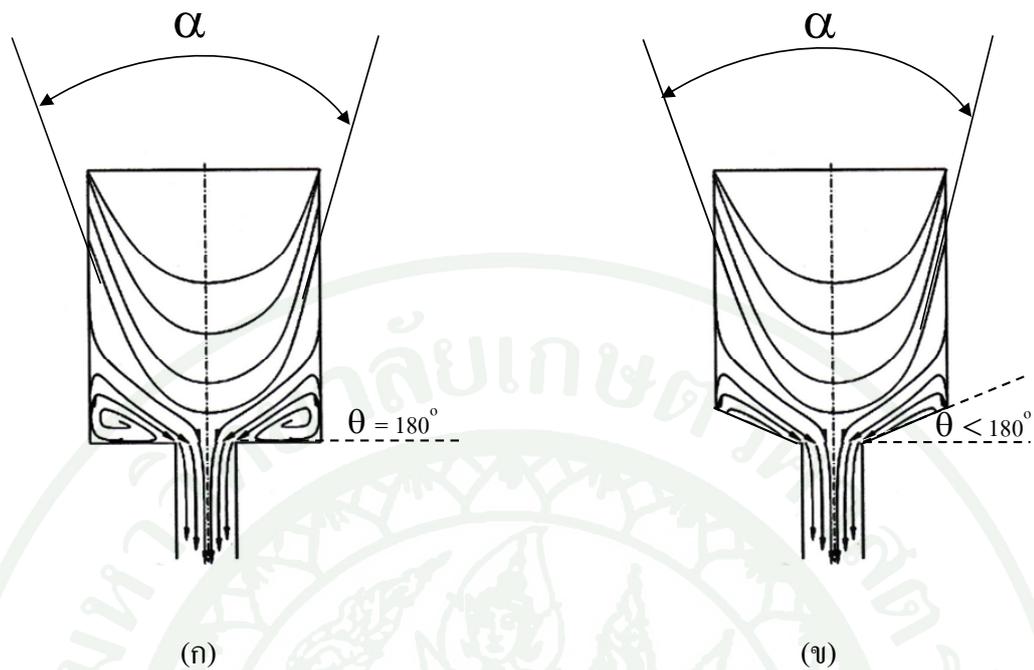
ในกรณีที่เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันบริเวณทางเข้าของหัวขึ้นรูป แต่อาศัยการใช้การคำนวณความดันที่เกิดขึ้นจากแท่งอัดที่กระทำกับพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยตรงซึ่งพบว่ามีความดันส่วนหนึ่งสูญเสียไปในห้องหลอมเหลวเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างแท่งกดกับผนังของช่องทางการไหล จึงมีการปรับแก้ค่าความดันที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าความดันที่แท้จริงบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปโดยใช้สมการที่ 25

$$\frac{\Delta P_B}{\Delta P_C} = \frac{L_B}{L_C} \left(\frac{R_C}{R_B} \right)^{3n+1} \quad (25)$$

โดย	ΔP_B	=	ความดันตกคร่อมในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก
	ΔP_C	=	ความดันตกคร่อมในหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม
	R_B	=	รัศมีของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (m)
	R_C	=	รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
	L_B	=	ความยาวของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (m)
	L_C	=	ความยาวของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)

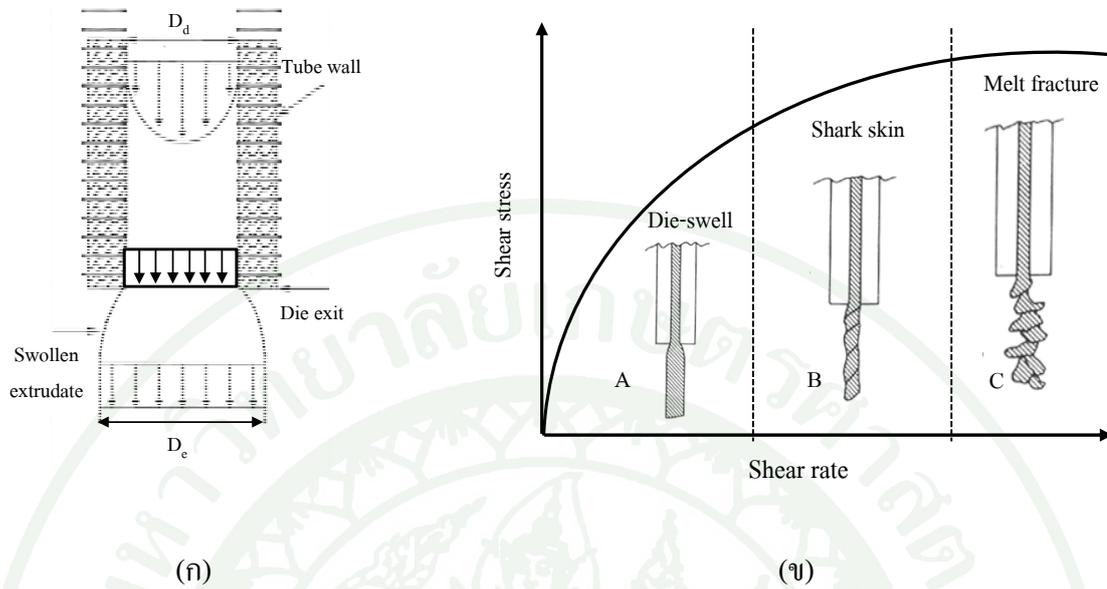
5. รูปแบบและพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่านคาปิลารีรีโอมิเตอร์

โดยทั่วไปพอลิเมอร์หลอมเหลวมีรูปแบบการไหลจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกเข้าสู่หัวขึ้นรูปเป็นมุมคู่เข้า (Convergence flow) อย่างเป็นระเบียบ อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหลยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น ลักษณะที่บริเวณทางเข้าของหัวขึ้นรูป (Die entry angle) (Sombatsompop and dangtungee, 2001) หรือชนิดของพอลิเมอร์ (Wong, 1998) กล่าวคือ หัวขึ้นรูปที่มีลักษณะมุมทางเข้าแบบ 180° พบว่า รูปแบบการไหลเกิดการไหลวน (Vortex) ณ บริเวณทางเข้าของหัวขึ้นรูป เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกเข้าสู่หัวขึ้นรูปอย่างรวดเร็ว ทำให้รูปแบบการไหลไหลซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น จนเกิดเป็นลักษณะของการไหลวนที่บริเวณมุมอับของทางเข้าหัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 17(ก) ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบหัวขึ้นรูปเพื่อลดปรากฏการณ์การไหลวน โดยการลดมุมทางเข้าหัวขึ้นรูป ($\theta < 180^\circ$) ดังแสดงในภาพที่ 17(ข) วิธีการดังกล่าวช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดและความดันอย่างกระทันหัน นอกจากนี้ลักษณะการไหลวนยังอาจมีอิทธิพลมาจากลักษณะของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ไม่เกิดปรากฏการณ์ไหลวน เนื่องจากมีความเป็นเส้นตรงของสายโซ่โมเลกุล (Linear chain) ทำให้เมื่อไหลเข้าหัวขึ้นรูปมีการจัดเรียงตัวได้ดีกว่าสายโซ่ที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน (Branch chain) ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) (Bagley and Birks, 1960)



ภาพที่ 17 ลักษณะการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ปรากฏในบริเวณมุมอับ
(ก) มุมทางเข้ามีมุมเท่ากับ 180° (ข) มุมทางเข้ามีมุมน้อยกว่า 180°

ขนาดและผิวของชิ้นงานที่อัดผ่านหัวขึ้นรูปเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพบว่าเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านออกจากหัวขึ้นรูป (Die exit) ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการอัดผ่านหัวขึ้นรูปมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูป ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า พฤติกรรมการบวมตัว (Extrudate swell) ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก หรือความสามารถของการกลับคืนรูปของพอลิเมอร์ ภายหลังการปลดปล่อยแรงที่มากกระทำ (ณรงค์ฤทธิ์, 2548; Müller *et al.*, 2008) ซึ่งพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งแบบไม่สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมที่เรียกว่าเป็นการเสียรูปแบบวิสคัส (Viscous deformation) และในแบบที่สามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้ เรียกว่าการเสียรูปแบบอีลาสติก (Elastic deformation) โดยการเสียรูปแบบอีลาสติกสามารถสะสมไว้ในรูปของพลังงานที่เรียกว่าพลังงานสะสมแบบอีลาสติก (Elastic storage energy) และพลังงานที่สะสมบางส่วนสามารถปลดปล่อยในรูปของการบวมตัว (Die swell) และหากอัตราครีปเฉือนสูงขึ้นผิวของพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาเริ่มเกิดเป็นรอยผิวฉลาม (Shark skin) และเกิดการเสียรูปร่างของพอลิเมอร์ (Melt fracture) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเส้นกราฟการไหลดังแสดงในภาพที่ 18(ข) โดยการคำนวณหาอัตราส่วนของการบวมตัว (Die swell ratio, B) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26



ภาพที่ 18 พฤติกรรมการไหลผ่านหัวขึ้นรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลว (ก) การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูป (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนซึ่งมีต่อการเกิดการเสียรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลว

$$D = \frac{D_e}{D_d} \quad (26)$$

โดย B หมายถึง อัตราส่วนการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว
 D_e หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป (mm)
 D_d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (mm)

โดยทฤษฎีการเกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์มี 2 ทฤษฎีหลักๆ ที่ใช้ในการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์บวมตัวของพอลิเมอร์ ดังนี้

5.1 ทฤษฎีการเกิดการบวมตัว

5.1.1 สมบัติความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Elastic properties) ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลภายในหัวขึ้นรูปเนื่องจากแรงที่มากระทำ พลังงานที่มาจากแรงถูกนำไปใช้ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกใช้ในการทำให้พอลิเมอร์เสียรูป (Deformation) และเกิดการไหล ส่วนที่สองใช้ในการยึดตัวของสายโซ่โมเลกุล (Molecular orientation) เนื่องจากในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลภายในห้องหลอมเหลว สายโซ่โมเลกุลอยู่ในลักษณะที่ขดพันกัน (Entanglement) แต่เมื่อไหลเข้าในหัวขึ้นรูป สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัว (Disentanglement) และยึดตัวให้มีระเบียบมากขึ้น ซึ่งในส่วนนี้เกิดการสะสมพลังงานแบบอีลาสติกจากนั้นเมื่อพอลิเมอร์ไหลออกมาบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป พลังงานที่สะสมถูกปลดปล่อยในลักษณะของการคืนสภาพ (Elastic recovery) ของสายโซ่โมเลกุล จึงส่งผลให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป (ณรงค์ฤทธิ์, 2548; Müllner *et al.*, 2008)

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์ (Velocity profile) การไหลภายในหัวขึ้นรูปมีลักษณะการไหลเป็นแบบพาราโบลา (Parabolic flow) ในขณะที่รูปแบบการไหลบริเวณใกล้ทางออกของหัวขึ้นรูปมีลักษณะการไหลแบบปลั๊ก (Plug flow) พอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณผนังหัวขึ้นรูปจึงเร่งความเร็วในการไหลเพื่อให้เท่ากับความเร็วในการไหลบริเวณตรงกลางหัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 18(ก) ซึ่งการเร่งความเร็วนี้ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลได้รับความเค้นเฉือนสะสมมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนังของหัวขึ้นรูป จึงทำให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์เมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูป

5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว

5.2.1 ระยะเวลาการไหลภายในระบบ (Residence flow time) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวสามารถอธิบายได้จากเลขดีเบอร์ฮาห์ (Deborah number, N_{DEB}) ดังแสดงในสมการที่ 27 ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ที่ไหลอยู่ในระบบนาน ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีระยะเวลาในการคลายตัวได้มาก ทำให้สามารถปลดปล่อยหรือเปลี่ยนรูปพลังงานสะสมบางส่วนไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นได้ เช่น พลังงานความร้อน โดยหากค่า N_{DEB} น้อยกว่า 1 พอลิเมอร์หลอมเหลวแสดงสมบัติเป็นแบบวิสคัส (Viscouseffect) ซึ่งหมายความว่าถึงการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวในขณะที่หากค่า N_{DEB} มากกว่า 1 พอลิเมอร์หลอมเหลว

แสดงสมบัติเป็นแบบอีลาสติก (Elastic effect) ซึ่งพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการบวมตัว (Die swell) ในบางกรณีของกระบวนการผลิต หากความเค้นที่เกิดขึ้นเกินความต้านทานของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt strength) ส่งผลให้ผิวของพอลิเมอร์เกิดการฉีกขาดขณะสัมผัสกับหัวขึ้นรูปและเกิดเป็นรอยผิวฉลาม (Shark skin) บนผิวพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูป โดยสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 18(ข) โซน B หรือหากเกิดความเค้นที่สูงเกินจุดที่พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถรับได้ อาจทำให้เกิดการเสียหายถึงขั้นเกิดการเสียรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวจนมีลักษณะแตกต่างจากหัวขึ้นรูปโดยสิ้นเชิง ดังแสดงดังภาพที่ 18(ข) โซน C ชิ้นงานที่ได้จึงไม่มีคุณภาพและลักษณะไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

$$N_{DEB} = \frac{t_r}{t_p} \quad (27)$$

โดย t_r หมายถึง เวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (s)
 t_p หมายถึง เวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (s)

5.2.2 รูปแบบการไหล (Flow pattern) ระบบที่มีการไหลแบบซับซ้อนส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการไหลที่ซับซ้อนทำให้พอลิเมอร์มีระยะเวลาในการคลายตัวได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง ซึ่งส่งผลต่อปริมาณการบวมตัวที่ลดลง (Sombatsompop and O-Charoen, 2003)

5.2.3 อัตราครีดยเฉือน (Shear rate) การเพิ่มขึ้นของอัตราครีดยเฉือนส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีการสะสมพลังงานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ไหลออกจากหัวขึ้นรูป จึงเกิดพฤติกรรมบวมตัวที่เพิ่มมากขึ้น (Liang, 1996; Liang, 2002; Sombatsompop and Dangtangee, 2002; Müller *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราครีดยเฉือนเกินค่าอัตราเฉือนวิกฤต (Critical shear rate) ลักษณะภายนอกของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดเป็นริ้วรอยผิวฉลามและเกิดการเสียรูปในที่สุด

5.2.4 อุณหภูมิของหัวขึ้นรูป (Die temperature) การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถคลายตัวได้ดีขึ้น ความ

หนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าความเป็นอีลาสติกลดลง (Wong, 1998; Liang, 2001; Allal *et al.*, 2006)

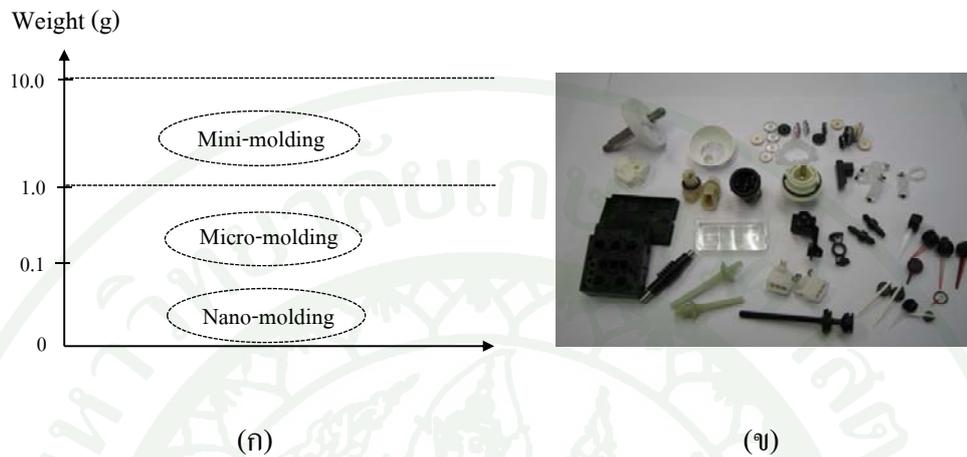
5.2.5 สัดส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (Length to diameter ratio, L/D ratio) ค่า L/D ของหัวขึ้นรูป เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเวลาที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในระบบ เช่นเดียวกับระยะเวลาการไหลภายในหัวขึ้นรูป กล่าวคือ การใช้หัวขึ้นรูปที่มีความยาวมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีเวลาในการไหลภายในหัวขึ้นรูปนานขึ้น และเกิดการคลายตัวได้ดี จึงส่งผลให้อัตราการส่วนบวมตัวลดลง (Liang, 1996; Wong, 1998 Müller *et al.*, 2008)

5.2.6 สารตัวเติม (Fillers) ที่ผสมลงไปในพอลิเมอร์ส่งผลต่อปริมาณการบวมตัวที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และรูปร่างของสารตัวเติม ตัวอย่างเช่น เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการบวมตัวลดลง เนื่องจากสารตัวเติมเหล่านี้ไม่มีสมบัติความเป็นอีลาสติก เมื่อใส่ลงไป ทำให้ความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์ลดลง (Dilution effect) โดยเฉพาะสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ซึ่งได้แก่ เขม่าดำ เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็ก และมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ดี จึงส่งผลให้ลดความเป็นอีลาสติกได้ดีกว่า ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง และไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ (Liang, 2002; Song *et al.*, 1988)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลในช่องทางไหลขนาดเล็ก

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการจำลองพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดหรือขณะไหลผ่านหัวขึ้นรูป เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้งานคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมยังมีข้อที่ควรคำนึงถึงเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ ซึ่งได้แก่ สมมติฐาน (Assumption) ที่ใช้ในจำลองพฤติกรรมการไหล รวมถึงข้อมูลนำเข้า (Input data) ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยข้อมูลที่สำคัญเหล่านี้ได้จากเครื่องมือทดสอบที่ใช้ช่องทางไหลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในช่องทางไหลขนาดเล็ก หรือในกรณีชิ้นงานขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งแสดงถึง

การกำหนดขนาดของชิ้นงาน โดยน้ำหนัก กล่าวคือ หากชิ้นงานมีน้ำหนักน้อยกว่า 1 g หรือมีขนาดเล็กกว่า 1 mm สามารถเรียกชิ้นงานดังกล่าวว่า ชิ้นงานขนาดเล็ก หรือ Micro-molding



ภาพที่ 19 ชิ้นงานขนาดเล็ก (ก) การกำหนดขนาดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก(Griffiths *et al.*, 2007)
(ข) ตัวอย่างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก

จากมาตรฐานการวัดสมบัติการไหลที่ใช้ เมื่อพิจารณาถึงขนาดของหัวขึ้นรูปในเครื่องคาบิลลารีรีโอมิเตอร์ ซึ่งใช้สำหรับทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $1.5 \pm 0.1\text{mm}$ (ตามมาตรฐาน ASTM D 5099) ซึ่งมีความแตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่องทางการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด หรือแม่พิมพ์อัดสำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 mm) โดยจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาสมบัติการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเมื่อไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น โดยเฉพาะ พบว่า ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวมีความแตกต่างจากการไหลในช่องทางขนาดปกติ (Palmease and Karbhari, 1995; Xu *et al.*, 1999; Yao and Kim, 2002; Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2009) โดยมีค่าความหนืดลดลงประมาณ 1 ถึง 4 เท่า (Chien *et al.*, 2005) หรือลดลงประมาณ 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ (Chen *et al.*, 2008) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Lawal and Kalyon, 1996; Rosenbaum and Hatzikiriakos, 1997; Xu *et al.*, 1999; Young, 2004; Chien *et al.*, 2005) และการเลื่อนตัวที่ผนังระหว่างพอลิเมอร์กับผิวของช่องทางการไหล (Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010) อย่างไรก็ตาม การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางในช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กยังคงพบน้อยมากซึ่งส่งผลให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมี

- 1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เกรด STR5L
- 1.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)
- 1.3 กรดสเตียริก (Stearic Acid)
- 1.4 เขม่าดำ (Carbon Black)
- 1.5 ซิลิกา (Silica)
- 1.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3)
- 1.7 กำมะถัน (Sulphur, S)
- 1.8 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)
- 1.9 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซายล์ซัลเฟนไมด์ (Cyclohexylbenzothiazyl sulfenamide, CBS)
- 1.10 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)

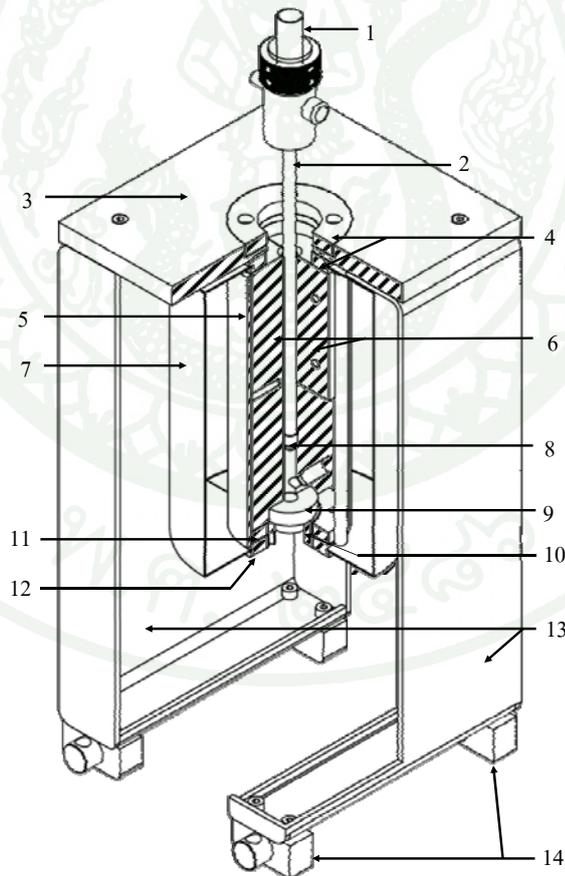
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer)
- 2.2 เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูป (Moving die rheometer, MDR)
- 2.3 เครื่องเก็บข้อมูลความเร็วสูง (High speed data logger)
- 2.4 ชุดตรวจวัดความดัน (Pressure transducer)
- 2.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 2.6 ชุดวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
- 2.7 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)
- 2.8 เครื่องผสมภายใน (Internal mixer)
- 2.9 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

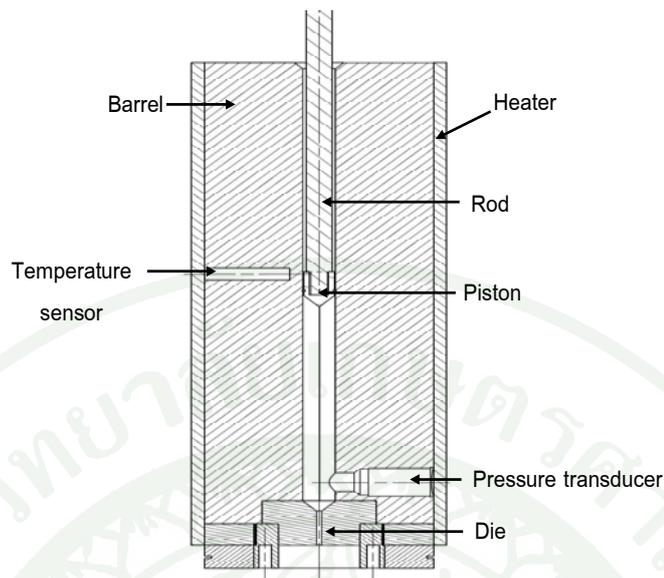
วิธีการ

1. การออกแบบชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเคียดเฉือนตามมาตรฐาน ASTM D5099 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบทางวิศวกรรม (Computer aided design, CAD) เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ในขณะไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก ซึ่งอาศัยหลักการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งกวดเพื่ออัดผ่านหัวขึ้นรูป พร้อมกับการวัดความดันตกคร่อม (ΔP) เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความหนืดปรากฏ สำหรับส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลได้แสดงในภาพที่ 20-21 โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 20 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเคียดเฉือน



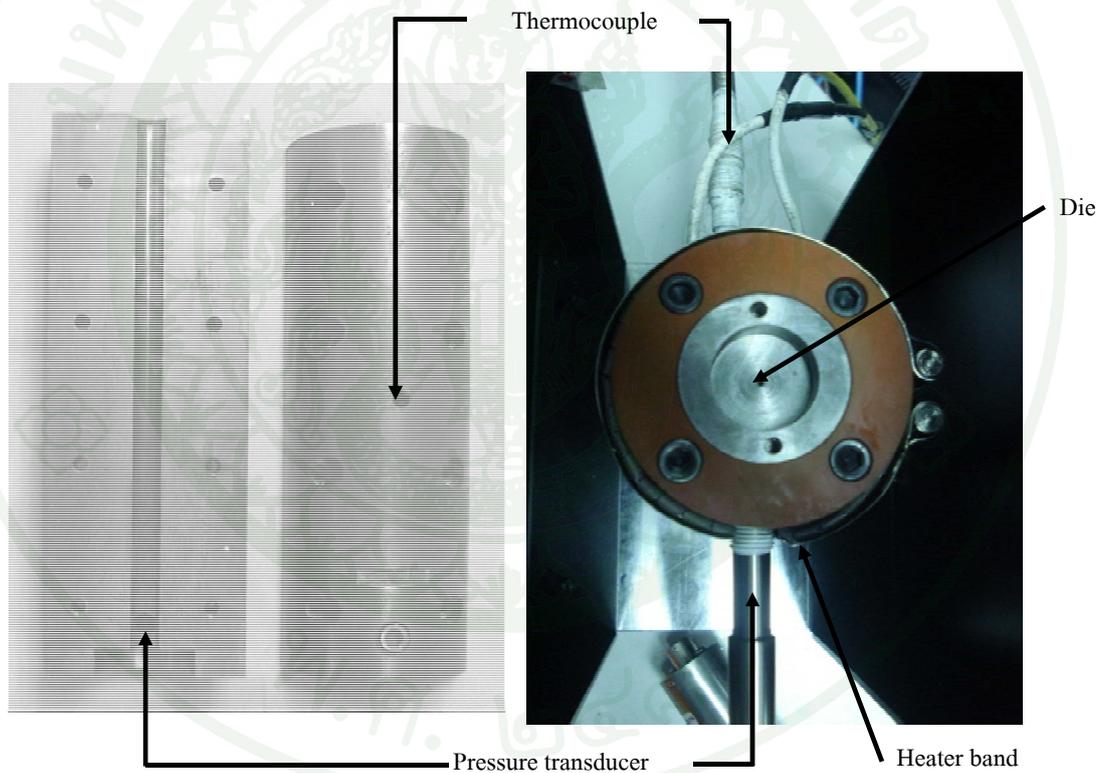
ภาพที่ 21 ส่วนประกอบหลักของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

หมายเลข	ชื่ออุปกรณ์
1	ที่ยึดแท่งกวดกับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์
2	แท่งกวดพอลิเมอร์หลอมเหลว
3	แผ่นยึดด้านบน
4	ฉนวนความร้อนด้านบน
5	เข็มขัดรัดให้ความร้อน
6	ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก
7	หัวกดพอลิเมอร์หลอมเหลว
8	แหวนกันซึม / ประกอบเข้ากับหัวกด
9	หัวขึ้นรูป
10	ที่ยึดหัวขึ้นรูป
11	ที่นั่งรองหัวขึ้นรูป
12	ฉนวนความร้อนด้านล่าง
13	ขาตั้งเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์
14	ตัวล็อกขาตั้งเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

1.1 ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel)

ห้องหลอมเหลวทรงกระบอกทำหน้าที่ลำเลียงยางคอมพาวนด์เข้าสู่หัวขึ้นรูป โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm ยาว 200 mm บริเวณตรงกลางของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type K) ซึ่งต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิ และมีอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเข็มขัดรัด (Heater band) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกให้คงที่ตลอดระยะทางของการไหลรวมทั้งติดตั้งชุดตรวจวัดความดันบริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป เพื่อตรวจวัดความดันของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกเข้าสู่หัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 22



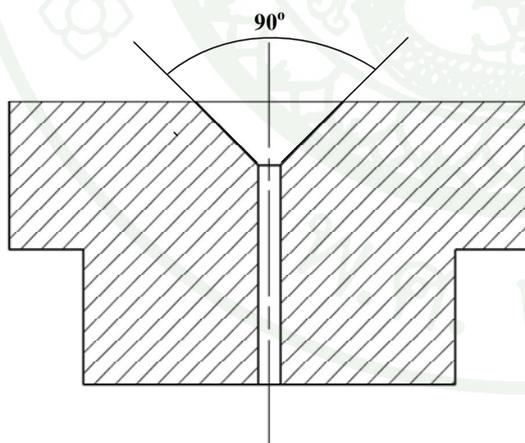
ภาพที่ 22 ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก

1.2 หัวขึ้นรูป (Die)

เครื่องคานาปัลลาเรียโรมิเตอร์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหัวขึ้นรูปได้ โดยขนาดช่องทางการไหลภายในหัวขึ้นรูปที่ศึกษาได้แก่ หัวขึ้นรูปที่มีลักษณะหน้าตัดกลม (Circular die) และหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยขนาดและความยาวของหัวขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 3 นอกจากนี้ ที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปยังได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะเป็นมุมเอียง 90° ดังแสดงในภาพที่ 23(ก) และ 23(ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ลักษณะและขนาดของหัวขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Die types	Die diameters (mm)	Die lengths (mm)
Circular die	0.50	15
	0.75	5/15/25
	1.00	15
	1.50	15
Slit die	0.75×1.50	15



(ก)

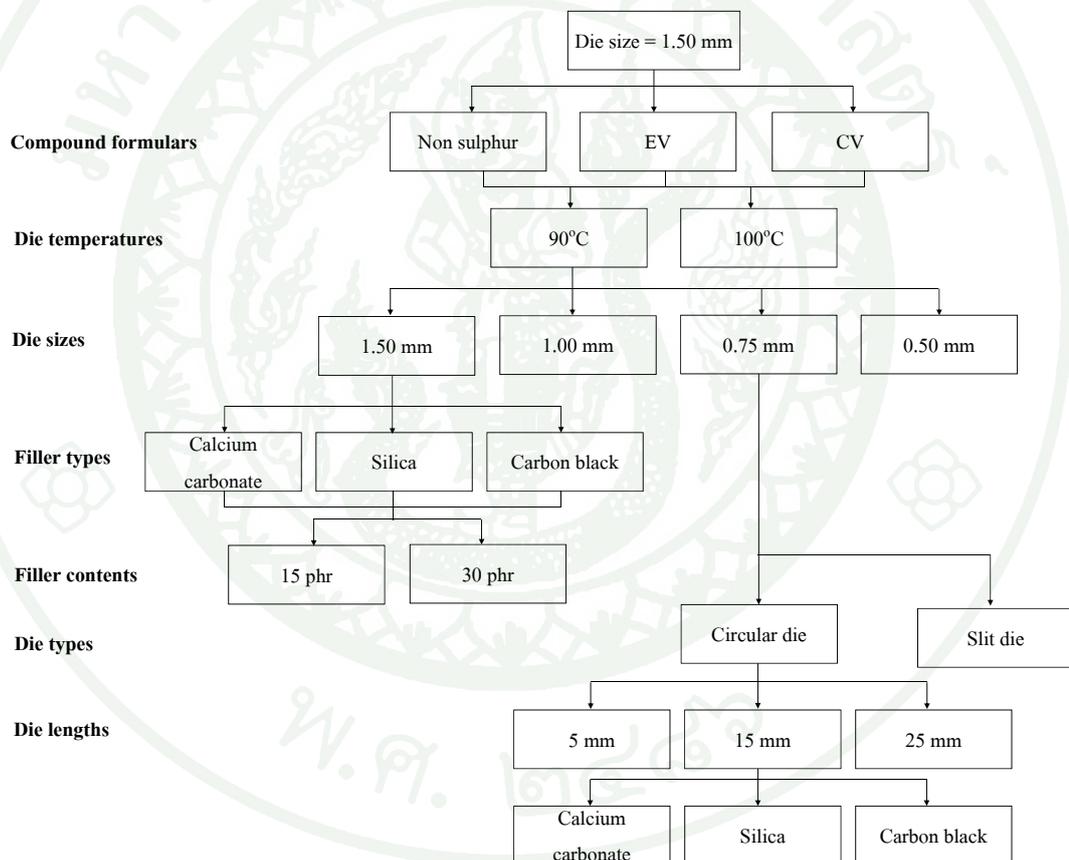


(ข)

ภาพที่ 23 หัวขึ้นรูปที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ (ก) ภาคตัดขวางของหัวขึ้นรูป (ข) ลักษณะของหัวขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2. การออกแบบแผนการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและลักษณะช่องทางการไหล อุณหภูมิการทดสอบ รวมถึงชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ โดยได้ติดตั้งเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเคียวคเหนือนเข้ากับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งกกายได้สภาวะการทดสอบที่อัตราเคียวคเหนือนต่างๆ พร้อมทั้งติดตั้งชุดตรวจวัดความดัน และชุดให้ความร้อนเข้ากับชุดทดสอบสมบัติการไหล โดยขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แผนผังการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก

3. การทดลอง

3.1 การออกแบบสูตรยางและการเตรียมยางคอมพาวนด์

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เกรด STR5L ถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป (ระบบประสิทธิภาพและระบบตั้งเค็ม) ชนิดและปริมาณสารตัวเติม (เขม่าดำซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 0-30phr) ที่มีต่อสมบัติการไหลขณะไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก โดยใช้ยางคอมพาวนด์ทั้งหมด 9 สูตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Ingredients	Contents (phr*)					
	Non-S	CV	EV	Carbon Black	Silica	CaCO ₃
NR (STR5L)	100	100	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4	4	4
Stearic Acid	2	2	2	2	2	2
Carbon Black	-	-	-	15/30	-	-
Silica	-	-	-	-	15/30	-
Calcium carbonate	-	-	-	-	-	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

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางคอมพาวนด์ เริ่มจากนำยางธรรมชาติที่ได้จากการชั่งน้ำหนัก (ดังแสดงในภาพที่ 25) บดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบปิดดังแสดงในภาพที่ 26(ก) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ยางอ่อนตัวภายหลังจากการผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป ซึ่งได้แก่ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก แล้วจึงทำการผสมสารตัวเติม (ในกรณีการบดผสมสารตัวเติมซิลิกาใช้การบดร่วมกับสาร PEG และใช้น้ำมันอะโรมาติกในกรณีของการบดผสมเขม่าดำ) นำยาง

คอมพาวนด์ที่ได้ไปบดผสมต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิลูกกลิ้งเท่ากับ 70°C เช่นเดียวกัน จากนั้นทำการผสมสารเร่งปฏิกิริยาแล้วบดผสมเป็นเวลา 1 นาที ในขั้นตอนสุดท้ายทำการผสมกัมมะถันซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคงรูป และบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที ดังแสดงในภาพที่ 26(ข) ปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้แผ่นยางคอมพาวนด์ที่มีความหนาประมาณ 7 mm นำยางคอมพาวนด์ที่ได้ดังภาพที่ 27 ไปทดสอบความหนืดมูนนี้ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D5289



ภาพที่ 25 ยางธรรมชาติ STR5L

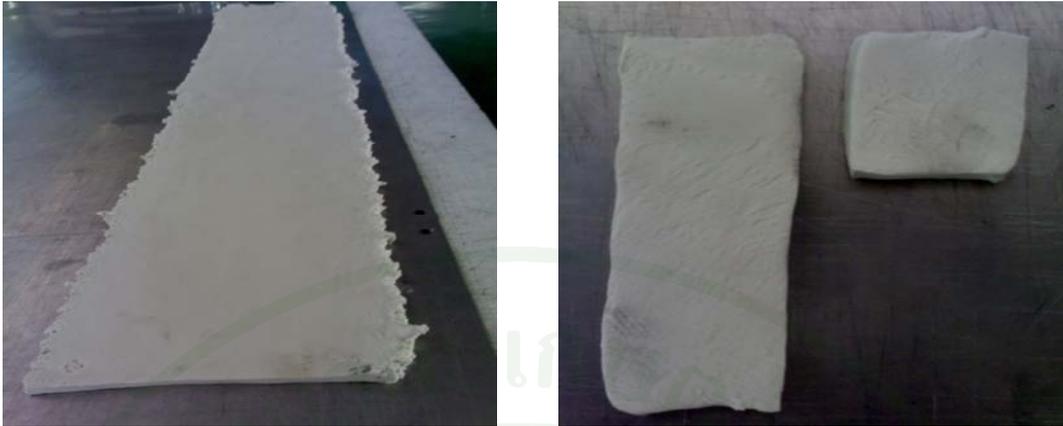


(ก)



(ข)

ภาพที่ 26 การบดผสมยาง (ก) การบดผสมในเครื่องบดผสมแบบปิด (ข) การบดผสมในเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง



(ก)

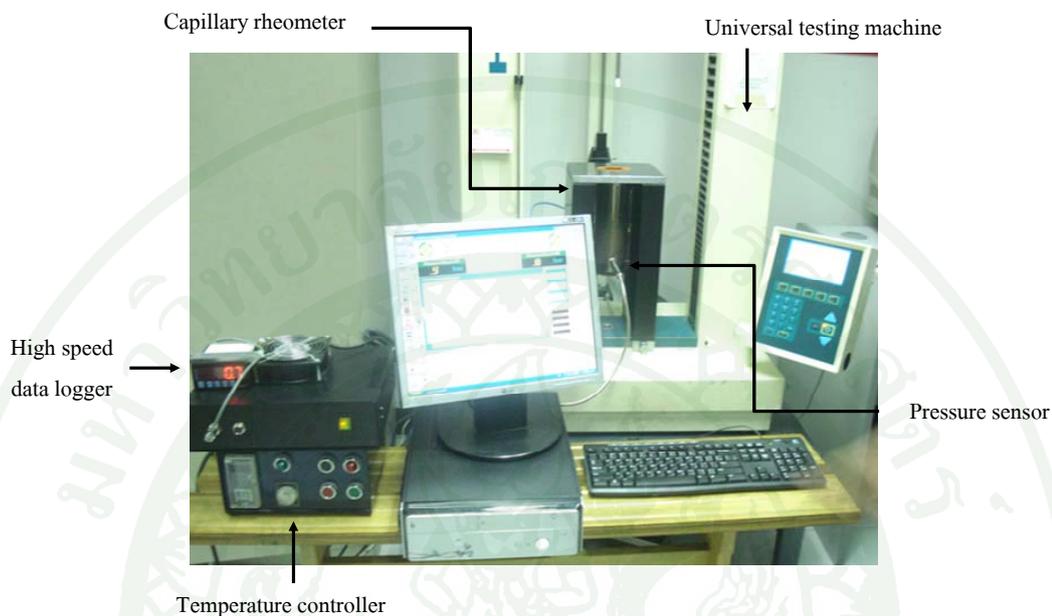
(ข)

ภาพที่ 27 ขางคอมพาวนด์ที่เตรียมได้จากการบดผสม (ก) ขางคอมพาวนด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (ข) ขางคอมพาวนด์สำหรับเตรียมทดสอบความเหนียวเหนียวและสมบัติการคงรูป

3.2 การทดสอบสมบัติการไหลของขางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการไหลซึ่งได้แก่ ความเหนียวปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของขางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราความเร็วที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น และถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ พร้อมทั้งติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิและชุดตรวจวัดความดันดังแสดงในภาพที่ 28 การทดลองเริ่มจากการนำขางคอมพาวนด์ที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกตามอุณหภูมิทดสอบ จากนั้นรอจนกระทั่งขางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการทดสอบ (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) จากนั้นทำการอัดขางคอมพาวนด์โดยแบ่งอัดที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่าง ๆ กัน เพื่อกำหนดอัตราความเร็วที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 10 โดยลักษณะของขางคอมพาวนด์ที่ผ่านหัวขึ้นรูปมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 29 บันทึกค่าความดันที่ได้จากเครื่องเก็บข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งค่าความดันและอัตราการไหลที่ได้สามารถนำไปคำนวณค่าความเค้นเฉือนปรากฏที่เกิดขึ้น และความเหนียวปรากฏของขางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูปที่สภาวะการทดสอบต่างๆ (ดังสมการที่ 11 ถึง 15) สำหรับขางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านออกจากหัวขึ้นรูปนำไปวิเคราะห์อัตราส่วนการบวมตัวโดยการเข้าสู่เครื่องสแกนเพื่อถ่ายภาพชิ้นงาน และใช้

โปรแกรม Image Pro Plus ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของยางคอมพาวด์และอัตราส่วนการบวมตัวดังแสดงในสมการที่ 26



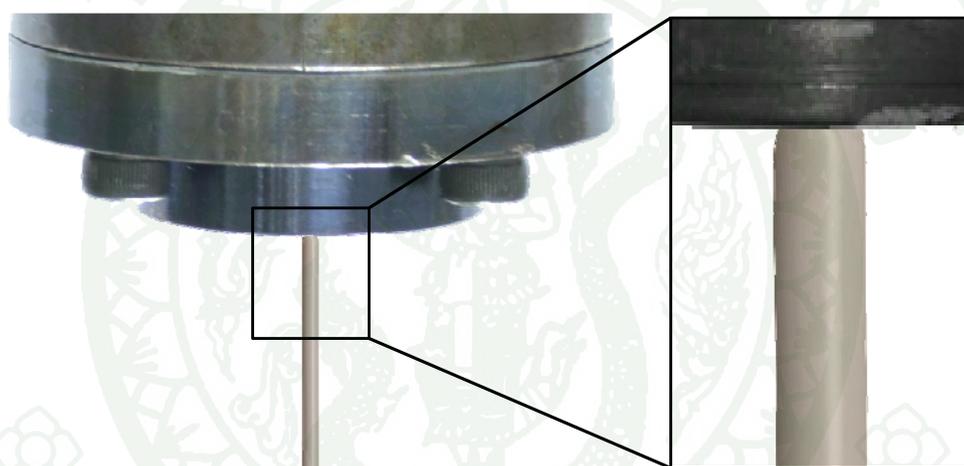
ภาพที่ 28 ชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 5 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งกดในแต่ละขนาดของหัวขึ้นรูปตามค่าอัตราเฉียกเฉือนที่กำหนด

Shear rate (s^{-1})	Velocity (mm/min)				
	Die 1.50 mm	Die 1.00 mm	Die 0.75 mm	Die 0.50 mm	Slit die
40	10.13	3.00	1.27	0.38	8.59
60	15.19	4.50	1.90	0.56	12.89
80	20.25	6.00	2.53	0.75	17.18
100	25.31	7.50	3.16	0.94	21.48
120	30.38	9.00	3.80	1.13	25.77
250	63.28	18.75	7.91	2.34	53.69

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Shear rate (s^{-1})	Velocity (mm/min)				
	Die 1.50 mm	Die 1.00 mm	Die 0.75 mm	Die 0.50 mm	Slit die
500	126.56	37.50	15.82	4.69	107.39
750	189.84	56.25	23.73	7.03	161.08
1000	253.13	75.00	31.64	9.38	214.77
1250	316.41	93.75	39.55	11.72	268.47

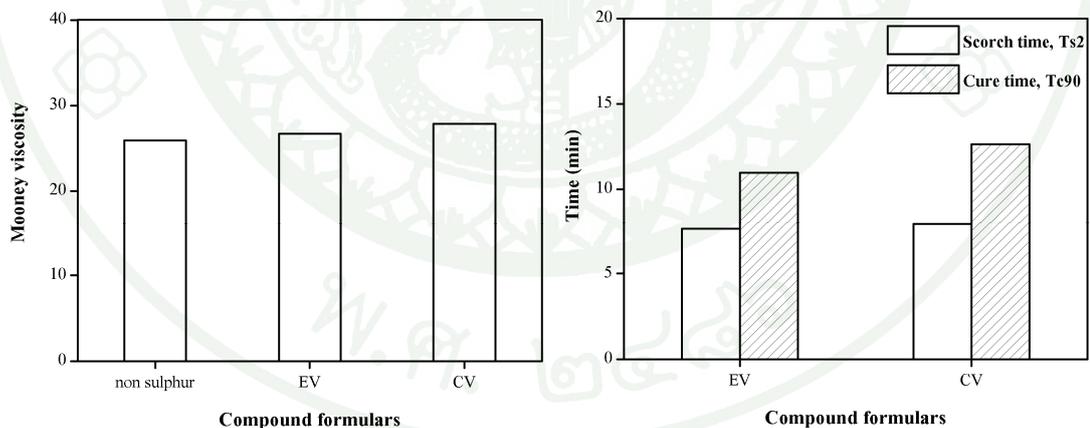


ภาพที่ 29 ลักษณะของยางคอมพาวนด์ภายหลังการอัดผ่านหัวขึ้นรูป

ผลและวิจารณ์

1. อิทธิพลของระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ที่มีต่อความหนืดมูนนี่และสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน และยางที่คงรูปด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanization) ทั้งระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization, CV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization, EV) ดังแสดงในภาพที่ 30(ก) พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากใช้เวลาในการบดผสมเท่ากัน การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลยางหรือการขาดของสายโซ่โมเลกุลจึงมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับภาพที่ 30(ข) แสดงเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่ 90% ของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV โดยพบว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV มีเวลาเริ่มคงรูปที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงเวลาคงรูปที่ 90% แสดงให้เห็นว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีเวลาในการคงรูปที่รวดเร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันของระบบการคงรูปแบบ EV มีปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าแบบ CV ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า

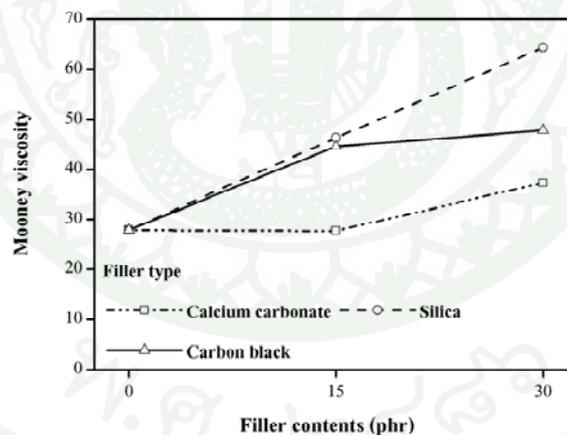


(ก)

(ข)

ภาพที่ 30 ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม (ก) ความหนืดมูนนี่ (ข) เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่ 90%

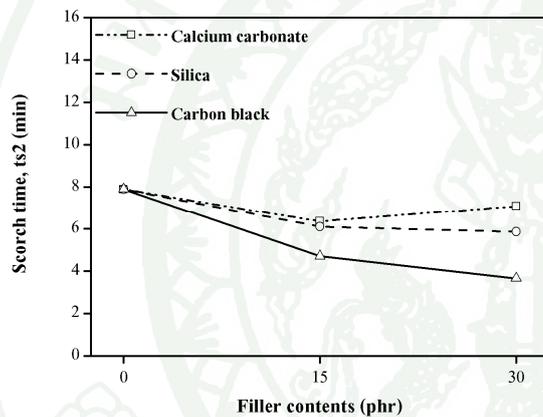
จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนนี่ ดังแสดงในภาพที่ 31 พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีอันตรกิริยากับเนื้อยางและอนุภาคมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับซิลิกาและเขม่าดำที่มีอันตรกิริยากับเนื้อยางและมีอนุภาคขนาดเล็กกว่า (มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงกว่า) ทำให้มีความสามารถในการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่า แคลเซียมคาร์บอเนตดังนั้นซิลิกาและเขม่าดำจึงทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมในปริมาณเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาจากคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรง พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกามีค่าความหนืดสูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณการผสมเท่ากับ 30 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่ทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-filler network) ที่รวมตัวกันอย่างเหนียวแน่นเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ที่เรียกว่า Agglomerate (พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002) จึงส่งผลทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาไหลตัวได้ยากขึ้น



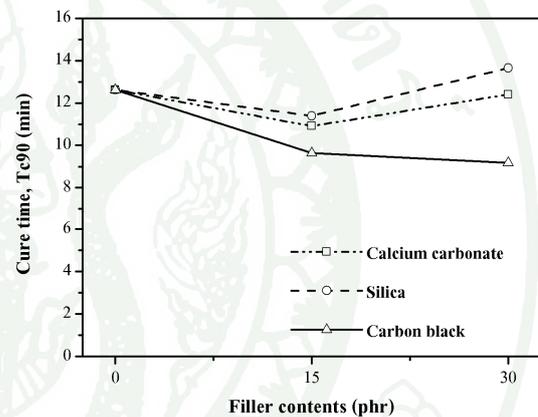
ภาพที่ 31 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมแต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาไม่ส่งผลต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์มากนัก ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำมีเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากเขม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็กและสามารถกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี รวมถึงเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนสูงและมีการแพร่กระจายความร้อนที่ดี

(พงษ์ธร, 2550) จึงทำให้ความร้อนสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อยางได้ดี อีกทั้งที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บางกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยางได้ดีซึ่งได้แก่ คาร์บอกซิล (Carboxyl) ควิโนน (Quinone) และฟีนอลิก (Phenolic) เป็นต้น (Hofmann, 1989) เหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นส่งผลให้ยางที่ผสมเขม่าดำเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Crosslink) ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การผสมซิลิกาซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กเช่นเดียวกับเขม่าดำ พบว่า ที่ปริมาณการผสม 30 phr มีเวลาคงรูปนานที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้มีความสามารถในการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาไว้ที่ผิว ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาของรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นสาเหตุที่ทำให้เวลาคงรูปของยางที่ผสมซิลิกาเพิ่มมากขึ้น



(ก)



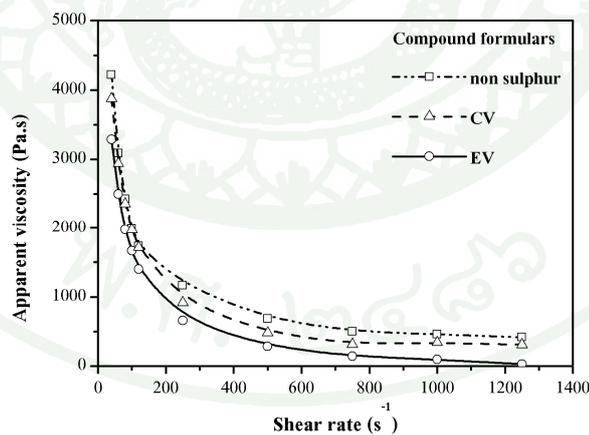
(ข)

ภาพที่ 32 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณเท่ากับ 15 phr และ 30 phr (ก) เวลาเริ่มคงรูป (ข) เวลาคงรูปที่ 90%

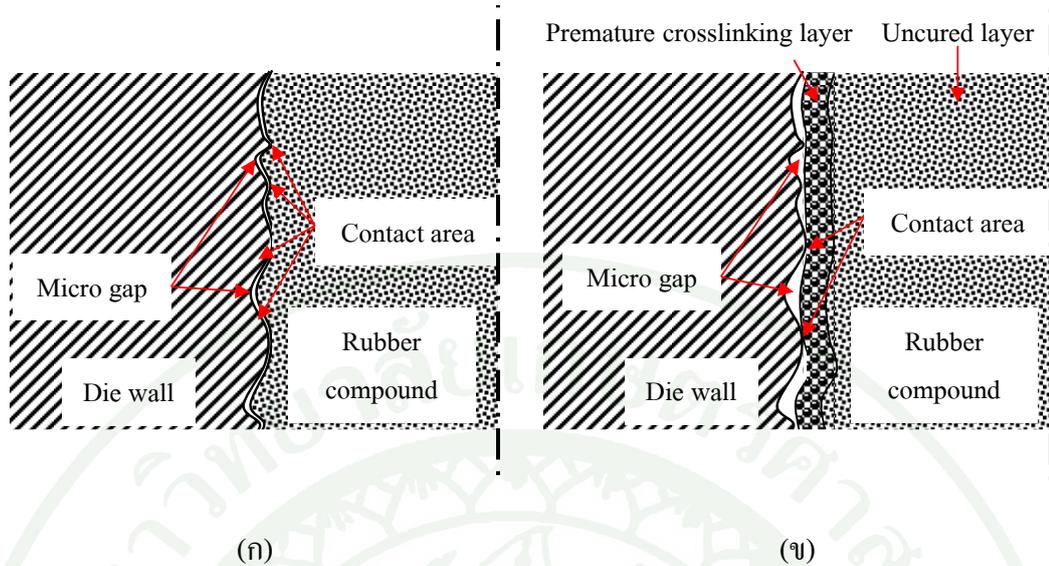
2. อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดปรากฏและอัตราครีปเฉือนของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 mm ยาว 15 mm (Length to diameter ratio, $L/D = 40$) โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90°C และใช้อัตราครีปเฉือนในช่วง 40 ถึง $1,250\text{ s}^{-1}$ ดังแสดงในภาพที่ 33 พบว่า การไหลของยางคอมพาวนด์ในช่วงอัตราครีปต่ำ (40 ถึง 250 s^{-1}) ส่งผลให้ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก และเริ่มมีแนวโน้ม

คงที่เมื่ออัตราครีดยืดเพิ่มขึ้น (250 ถึง $1,250 \text{ s}^{-1}$) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) ของยางคอมพาวนด์ โดยพบว่า ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีค่ามากกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และแบบ EV ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันเป็นสารคงรูปเกิดการเชื่อมขวางบางส่วน (Premature crosslinking) ที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากผิวช่องทางการไหลและความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ที่อาจเกิดขึ้นขณะไหลด้วยอัตราครีดยืดที่สูง โดยการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป ส่งผลให้ที่บริเวณดังกล่าวมีค่าความหนืดปรากฏเพิ่มสูงขึ้น จนไม่สามารถแทรกตัวสัมผัสกับผิวของช่องทางการไหลได้ ดังแสดงในภาพที่ 34 ดังนั้นแรงดันด้านการไหลที่บริเวณหัวขึ้นรูปจึงมีค่าลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันเกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) ได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าความหนืดปรากฏต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งมีสาเหตุมาจากเวลาเริ่มคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV สั้นกว่าระบบการคงรูปแบบ CV เนื่องจากการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูปได้เร็ว จึงไม่สามารถแทรกตัวเพื่อสัมผัสกับผนังช่องทางการไหลได้เมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน ตามลำดับ



ภาพที่ 33 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีผลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม



ภาพที่ 34 แบบจำลองแสดงลักษณะการสัมผัสระหว่างยางคอมพาวนด์กับผนังช่องทางการไหล
(ก) ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน (ข) ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน

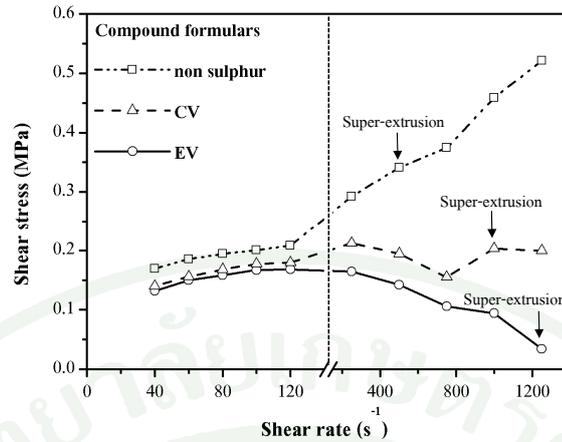
ภาพที่ 35 แสดงลักษณะของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปซึ่งพบว่า ยางคอมพาวนด์เกิดการเสีรูปร่างตั้งแต่การไหลในช่วงอัตราครีดยืดเฉือนที่ต่ำจนกระทั่งถึงอัตราครีดยืดเฉือนค่าหนึ่งที่ยางคอมพาวนด์กลับมามีผิวเรียบ โดยพฤติกรรมการบวมตัวและการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับแรงดันจากการอัดภายในห้องหลอมเหลว ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลที่เกี่ยวข้องภายในห้องหลอมเหลวเกิดการยึดตัวในขณะที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป ซึ่งการยึดตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะเช่นนี้เป็นการเพิ่มพลังงานสะสมแบบอีลาสติก (Stored elastic energy) ไว้ในสายโซ่โมเลกุลเมื่อพลังงานสะสมแบบอีลาสติกมีค่าสูงในระดับที่เกินกว่ายางคอมพาวนด์สามารถรับไว้ได้ หรือมีพลังงานสะสมมากกว่าแรงที่ยางคอมพาวนด์ยึดเกาะกับผนัง จึงเกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป โดยที่อัตราครีดยืดเฉือนไม่สูงมาก (ที่อัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1}) มีปริมาณการเลื่อนตัวน้อย (Weak slip) เนื่องจากพลังงานสะสมแบบอีลาสติกมีค่าต่ำ ส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 35(ก-ค) และเมื่ออัตราครีดยืดเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้มีการเลื่อนตัว (Slip) ที่เพิ่มมากขึ้นสลับกับการหยุดชะงัก (Stick) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Slip-stick” ทำให้ยางคอมพาวนด์เสีรูปร่างมากขึ้น โดยมีลักษณะผิวของยางคอมพาวนด์เรียบสลับกับการเสีรูปร่างดังแสดงในภาพที่ 35(ข) ที่อัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ 500 และ $1,000 \text{ s}^{-1}$ และภาพที่ 35(ค) ที่อัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ 500 s^{-1} อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราครีดยืดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ส่งผลให้มีพลังงานสะสมแบบอีลาสติกภายใน

ยางคอมพาวนด์เกินกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้ได้ เป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูปขาดจากกัน (เฉพาะในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน) ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลมีความเป็นอิสระมากขึ้น (คล้ายตัวไดคีย์) จึงเกิดการเลื่อนตัวที่ผนังแบบสม่ำเสมอ (Uniform slip) ซึ่งทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปมีผิวเรียบขึ้น (Baik and Tzoganakis, 1998; Goutille-Y. and Goutille-T., 2002) โดย Adewale and Leonov (1997) เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า “Super extrusion” หรือ “Super shear” จากงานวิจัยของ Baik and Tzoganakis (1998) ที่ได้ศึกษารูปแบบการไหล (Flow pattern) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว พบว่าปรากฏการณ์ Super extrusion มักเกิดกับการไหลแบบปลັ๊ก นั่นคือ ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากห้องหลอมเหลวเข้าสู่หัวขึ้นรูป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปจากแบบพาราโบลาไปเป็นแบบปลັ๊ก ส่งผลทำให้เกิดความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้นจนเป็นสาเหตุต่อการเกิดการเลื่อนตัวที่ผนังของหัวขึ้นรูป นอกจากนี้ Leonov and Prokumin (1994) และ Rauwendall (2001) ยังได้ศึกษาการเสียดรูปร่างของพอลิโพรพิลีน โดยได้พบปรากฏการณ์ Super extrusion ในการทดลอง ซึ่งไม่ได้อธิบายถึงกลไกการเกิดปรากฏการณ์นี้ แต่ได้แนะนำจากผลการทดลองว่าปรากฏการณ์ Super-extrusion มักเกิดขึ้นในกรณีที่หัวขึ้นรูปมีผิวเรียบและมีความยาวมาก รวมทั้งยังได้สรุปว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุของการเลื่อนตัวที่ผนังอย่างสม่ำเสมอ (Uniform slip)



ภาพที่ 35 ลักษณะของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป (ก) ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน (ข) ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV (ค) ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV

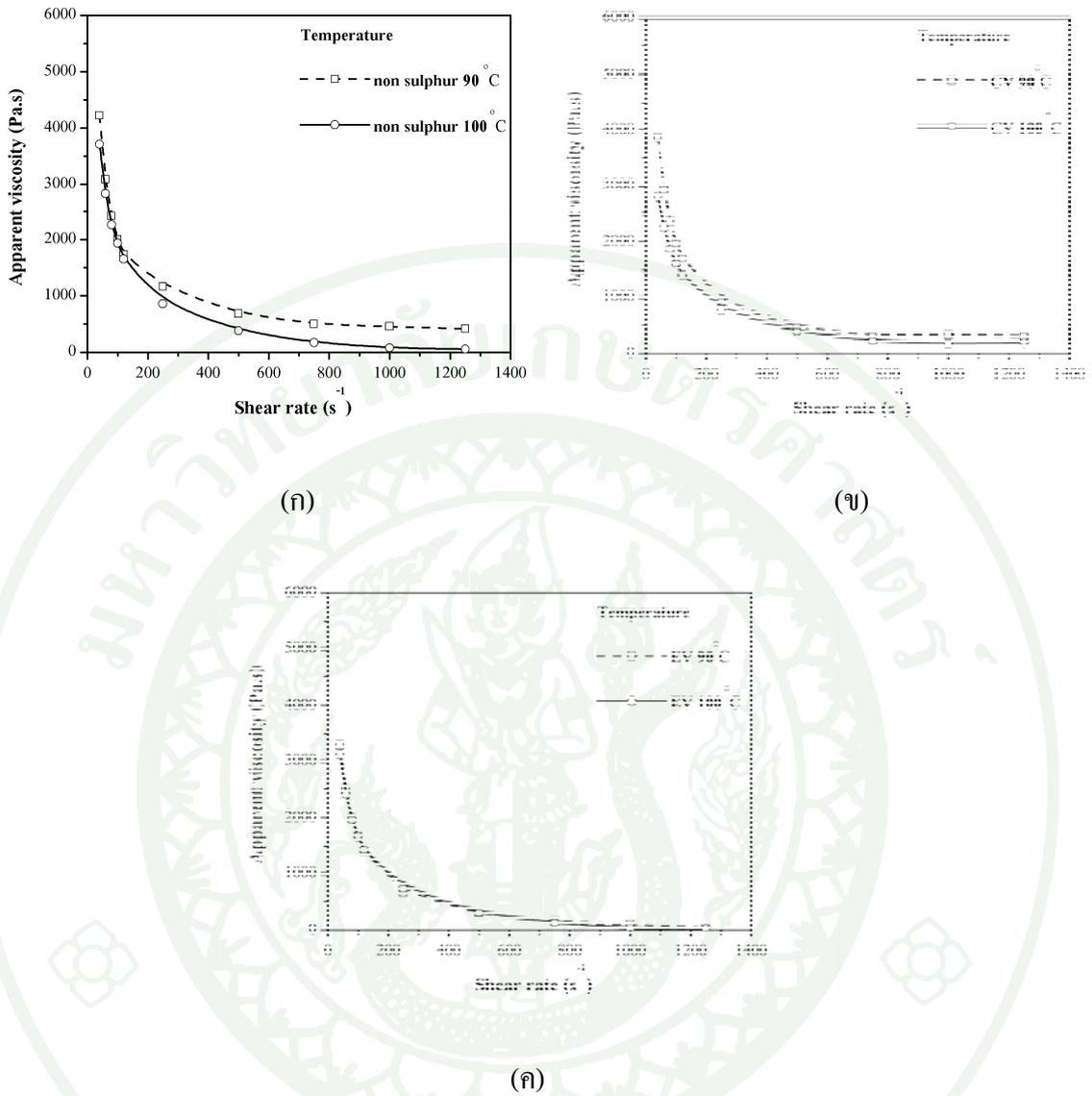
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราครีดยืดเฉือนของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน และยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน (ทั้งระบบการคงรูปแบบ CV และ EV) พบว่า ค่าความเค้นเฉือนของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีค่ามากที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดเฉือน ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันมีค่าอัตราครีดยืดเฉือน ไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และมีแนวโน้มลดลงในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ดังแสดงในภาพที่ 36 ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์เลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจากการคงรูปแบบบางส่วนของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน ซึ่งได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2 และเมื่อพิจารณาถึงความเค้นเฉือนและอัตราครีดยืดเฉือนที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ Super extrusion (Onset of super extrusion) ของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน พบว่า เกิดขึ้นที่อัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ 500 s^{-1} ซึ่งมีค่าต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และแบบ EV โดยเกิดขึ้นที่อัตราครีดยืดเฉือนเท่ากับ $1,000$ และ $1,250 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างกำมะถันกับสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลทำให้ยางคอมพาวนด์มีแรงยึดเกาะภายในที่ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถัน สายโซ่โมเลกุลจึงสามารถคลายตัวหรือขาดออกจากกันได้ที่อัตราครีดยืดเฉือนต่ำ ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันนั้นเกิดการเชื่อมขวางที่บริเวณผิวของยางคอมพาวนด์ที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป ซึ่งจำเป็นต้องใช้อัตราครีดยืดเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางขาดออกจากกัน และนอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV เกิดปรากฏการณ์ Super extrusion ที่อัตราครีดยืดเฉือนต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพลังงานพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นมีค่าที่แตกต่างกัน โดยยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งเป็นพันธะระหว่างกำมะถันกับกำมะถัน (S-S bond) (พลังงานพันธะเท่ากับ 206 kJ/mol) มีค่าต่ำกว่าพลังงานพันธะที่เกิดขึ้นในยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ที่ส่วนใหญ่เป็นพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S bond) (พลังงานพันธะเท่ากับ 279 kJ/mol) (พงษ์ธร, 2550) ส่งผลให้ต้องใช้อัตราครีดยืดเฉือนสูงเพื่อให้สามารถทำลายพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 36 ความเค้นเฉือนที่ส่งผลให้เกิดการเสียรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม

3. อิทธิพลของอุณหภูมิการทดสอบที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม โดยใช้ อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 และ 100°C และอัตราเฉือนระหว่างช่วง 40 s⁻¹ ถึง 1,250 s⁻¹ พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันและยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีความหนืดปรากฏลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 37(ก-ข) โดยในกรณียางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีความหนืดปรากฏลดลงอย่างชัดเจนที่อัตราเฉือนสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดระยะระหว่างสายโซ่โมเลกุล (Free volume) ที่มากยิ่งขึ้น สายโซ่โมเลกุลยางจึงเกิดการคลายตัว (Relaxation) ซึ่งทำให้สามารถเคลื่อนตัวและไหลได้ดีขึ้น แต่ในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV สาเหตุการลดลงของค่าความหนืดปรากฏ นอกเหนือจากการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลยางแล้ว ยังมีสาเหตุมาจากการคงรูปบางส่วนที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น และหากพิจารณายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV พบว่า ผลของการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจาก 90°C เป็น 100°C ทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถเกิดการคงรูปได้เพิ่มมากขึ้นจนขีดขวงการไหล เนื่องจากยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีอัตราการคงรูปที่รวดเร็ว ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 100°C ความหนืดปรากฏจึงมีค่าไม่แตกต่างจากผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 90°C ดังแสดงในภาพที่ 37(ค)

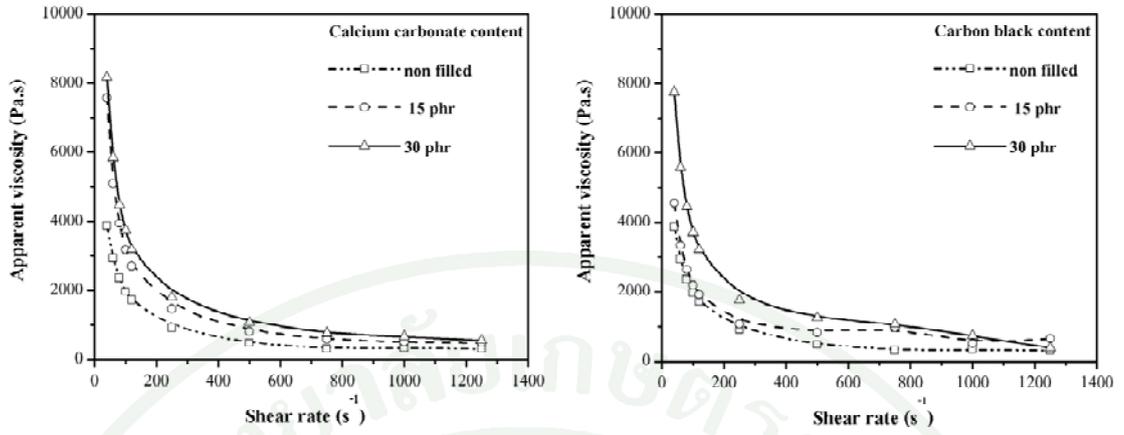


ภาพที่ 37 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์
 (ก) ไม่ผสมกำมะถัน (ข) ระบบการคงรูปแบบ CV (ค) ระบบการคงรูปแบบ EV

4. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

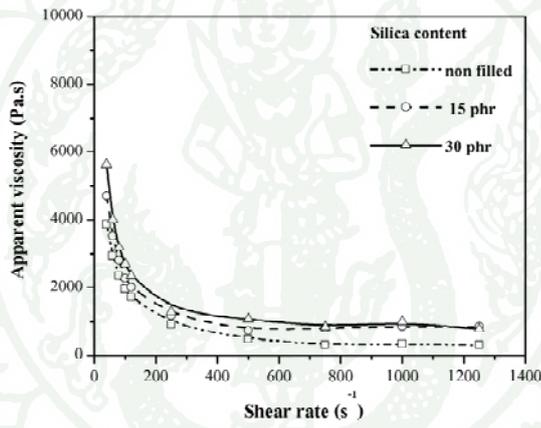
ภาพที่ 38 และ 39 แสดงค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติม คือ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ และซิลิกา ที่ปริมาณ 15 phr และ 30 phr โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบ 90°C และใช้อัตราครีดยืดเฉือนระหว่าง 40 ถึง 1,250 s⁻¹ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมค่าความหนืดปรากฏ

ของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเข้าไปผสมกับเนื้อยาง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยาก ยางคอมพาวนด์จึงไหลได้ยากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 39(ก) และ (ข) พบว่า ในช่วงอัตราเคียดเดือนต่ำ (40 ถึง 250 s^{-1}) เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมไม่มีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก เมื่อบดผสมเข้ากับยางคอมพาวนด์จึงส่งผลให้ความเป็นอีลาสติกของยางลดลง (Dilution effect) อย่างไรก็ตาม ในช่วงอัตราเคียดเดือนที่เพิ่มสูงขึ้น (250 ถึง 1250 s^{-1}) พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ปริมาณการผสมสารตัวเติมที่ 15 phr ในขณะที่ปริมาณการผสมสารตัวเติมที่ 30 phr มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ นอกจากนี้จากผลการทดสอบในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา พบว่า เกิดการเสีรูปร่างเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำ ไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ทั้งนี้ เนื่องจากในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างเนื้อยางกับสารตัวเติม เมื่อเกิดการไหลสายโซ่โมเลกุลจึงเกิดการเลื่อนตัวออกจากกันได้ดี เช่นเดียวกับกรณีที่ผสมเขม่าดำ ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กและกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี จึงทำหน้าที่ลดการบวมตัวหรือเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ในขณะที่ไหลออกจากหัวขึ้นรูป รวมทั้งในการบดผสมเขม่าดำ ได้มีการใช้น้ำมันอะโรมาติกในการลดความหนืดของยาง เพื่อให้เขม่าดำสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง ซึ่งมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการเลื่อนตัวออกจากกันได้ดีขึ้น



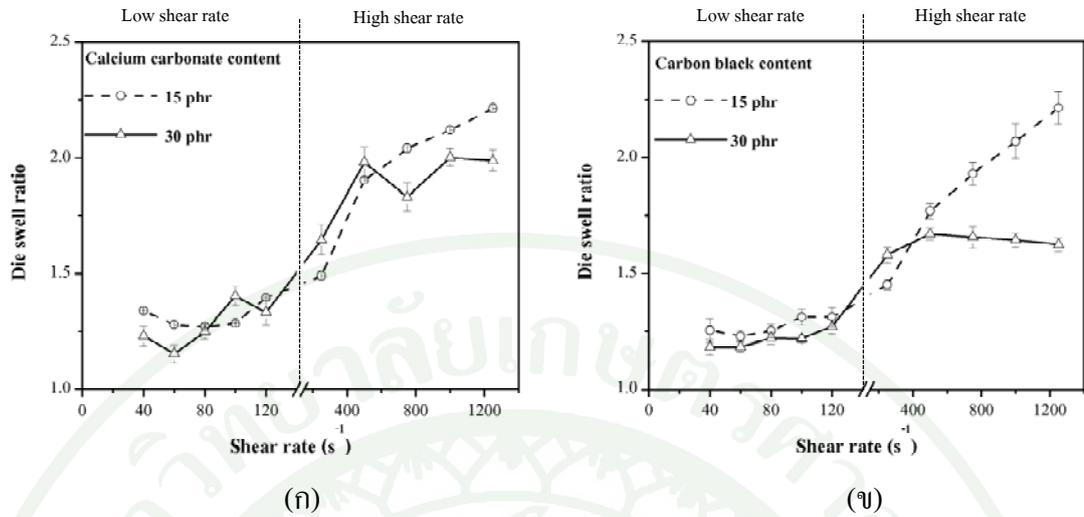
(ก)

(ข)



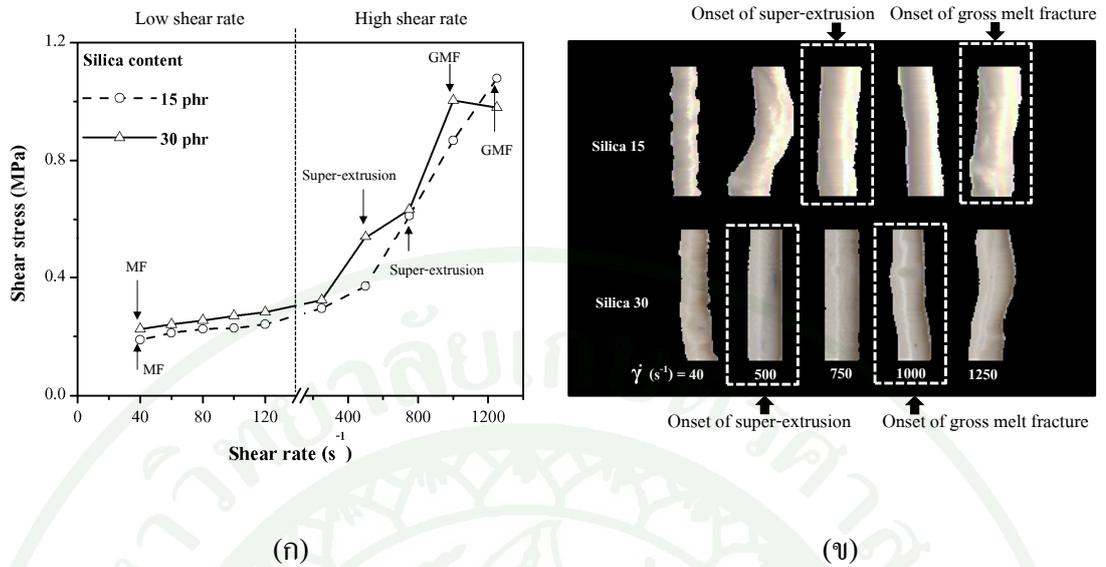
(ค)

ภาพที่ 38 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์
(ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) เขม่าดำ (ค) ซิลิกา



ภาพที่ 39 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์
(ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) เขม่าดำ

ในกรณีของซิลิกา เนื่องจากเกิดการเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป จึงไม่
ซึ่งสามารถนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วนการบวมตัวได้ ดังนั้นจึงนำเสนอค่าความเค้นเฉือนที่ทำให้
เกิดการเสีรูปร่างแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 40(ก) และ (ข)ซึ่งพบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา
เริ่มมีการเสีรูปร่างตั้งแต่ที่อัตราเฉียดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} และเมื่ออัตราเฉียดเฉือนเพิ่มขึ้นเท่ากับ
เป็น 120 s^{-1} ยางคอมพาวนด์มีลักษณะผิวเรียบสลับกับการเสีรูปร่างซึ่งเป็นปรากฏการณ์ Slip-stick
แต่เมื่ออัตราเฉียดเฉือนเพิ่มมากขึ้น กลับพบว่า ลักษณะการเสีรูปร่างลดลงจนมีผิวเรียบที่อัตรา
เฉียดเฉือนเท่ากับ 750 s^{-1} และ 500 s^{-1} ในกรณียางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 15 phr และ
30 phr ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราเฉียดเฉือนเท่ากับ $1,000 \text{ s}^{-1}$ เกิดการเสีรูปร่างเช่นเดียวกับใน
กรณีของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่เรียกว่า “Gross melt fracture” (Baik and Tzoganakis, 1998;
Rauwendaal, 2001) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเสีรูปร่างที่อัตราเฉียดเฉือนต่ำนั้นเกิดขึ้นเนื่องจาก
ยางคอมพาวนด์เกิดการคงรูปบางส่วนที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูป ดังนั้นเมื่อยางคอมพาวนด์ไหลผ่าน
หัวขึ้นรูปจึงไม่สามารถปลดปล่อยพลังงานสะสมแบบอีลาสติกในรูปแบบการบวมตัวได้เนื่องจาก
ถูกห่อหุ้ม (Encapsulate) ด้วยผิวที่เกิดการคงรูป แต่ปลดปล่อยพลังงานดังกล่าวในรูปแบบของการ
เสีรูปร่างแทน และในกรณีที่เพิ่มอัตราเฉียดเฉือนขึ้นไปจนกระทั่งถึงจุดที่ความเค้นเฉือนเกินกว่า
ที่สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางสามารถรับไว้ได้ ทำให้ผิวของยางคอมพาวนด์กลับมาเรียบ
อีกครั้งหนึ่ง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2 อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราเฉียดเฉือนเพิ่มขึ้นไป
จนถึงระดับหนึ่งเกิดการเลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการเสีรูปร่างที่มากขึ้น



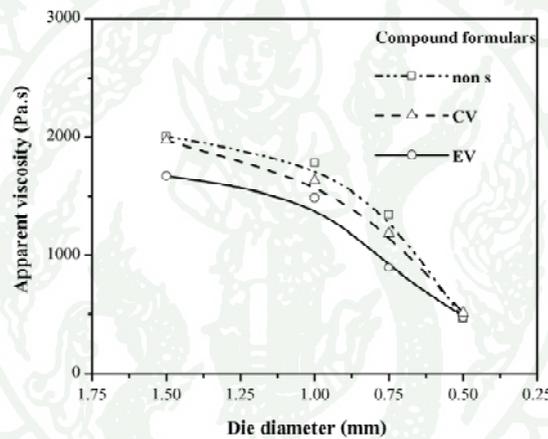
ภาพที่ 40 ความเค้นเฉือนและอัตราเคียดเฉือนที่มีต่อการเกิดปรากฏการณ์เสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเคียดเฉือน (ข) ลักษณะการเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาอัตราเคียดเฉือนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Super extrusion ดังแสดงในภาพที่ 40(ข) พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 15 phr เกิดขึ้นที่อัตราเคียดเฉือนสูงกว่าที่ปริมาณการผสม 30 phr ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 15 phr มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของรูปที่รวดเร็วกว่า 30 phr ดังแสดงในภาพที่ 32(ข) จึงต้องใช้แรงหรือพลังงานในการทำลายพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มมากขึ้น

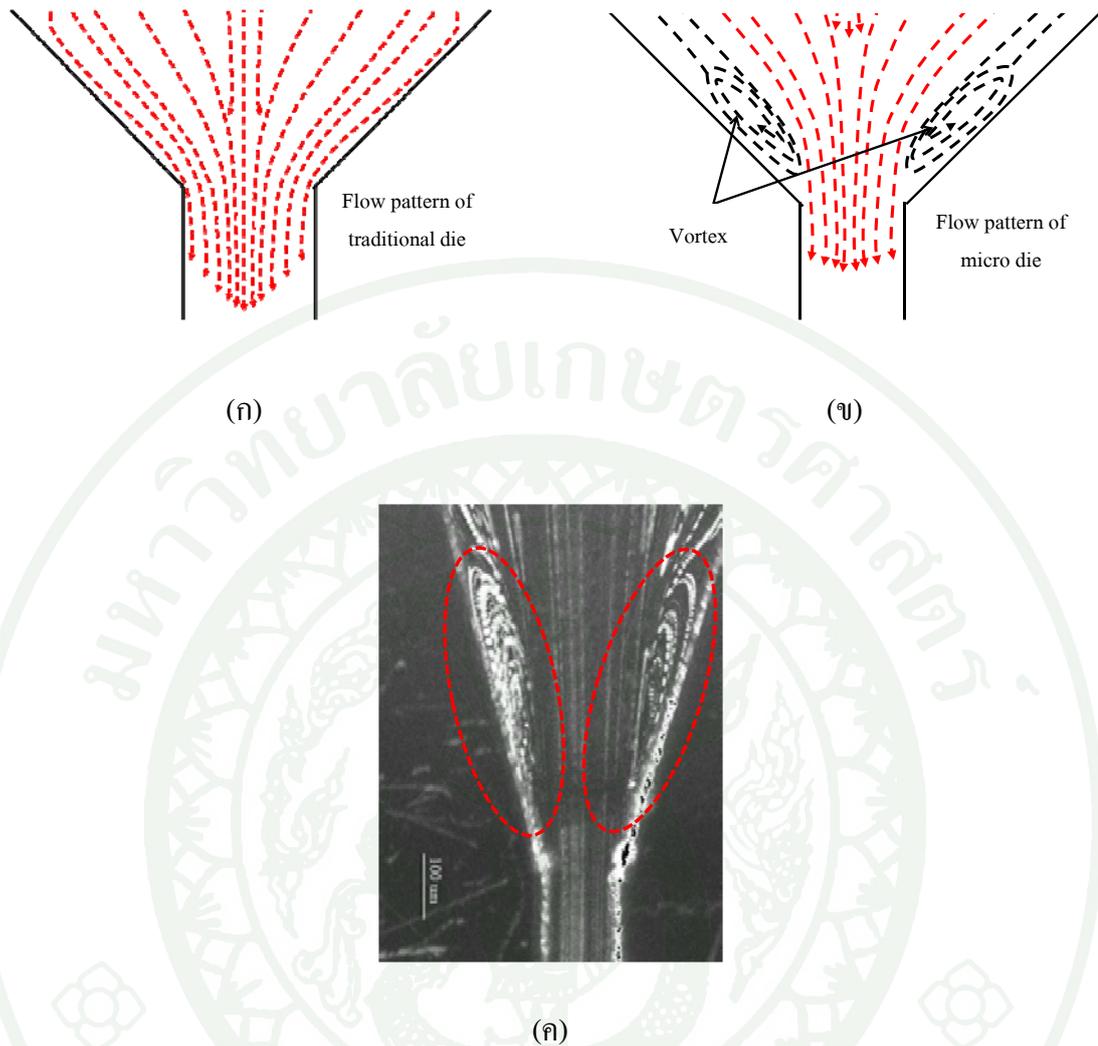
5. อิทธิพลของระบบการคงรูปและชนิดของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ในช่องทางการไหลขนาดเล็ก

ภาพที่ 41 แสดงค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถัน ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV ซึ่งไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดตั้งแต่ 0.50 ถึง 1.50 mm โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90°C และอัตราเคียดเฉือนเท่ากับ 100 s⁻¹ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเลื่อนตัวที่ผนัง (Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยการเลื่อนตัวที่ผนังนี้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลจากห้องหลอมเหลวเข้าสู่ช่องทางการไหลที่ขนาดเล็ก ทำให้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปมีแรงดันต้านการไหลที่มาก และเกิดการไหลวนของยางคอมพาวนด์ (ดังแสดงในภาพที่ 42) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Kai Kang (2003) ดังแสดงในภาพที่ 42(ค) โดยการไหลวนที่เกิดขึ้นส่งผลให้รูปแบบการไหลมีความซับซ้อน (Complex flow) มากขึ้นยางคอมพาวนด์จึงอยู่ในระบบนานขึ้น รวมทั้งมีการเสียดสีกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางเป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลขาดหรือคลายตัวออกมากขึ้น และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Lawal and Kalyon, 1996; Sombatsompop and Chaiwattanpipat, 2000; Sombatsompop *et al.*, 2001; Chien *et al.*, 2005) ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น



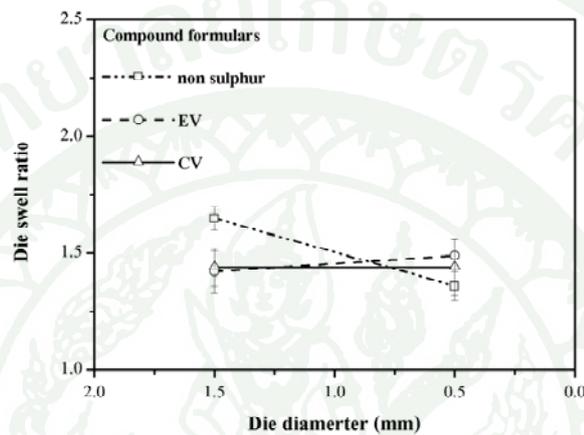
ภาพที่ 41 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์เมื่ออัตราเฉือนเท่ากับ 100s^{-1}



ภาพที่ 42 รูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (ก) รูปแบบการไหลในช่องทางการไหลขนาดปกติ (ข) รูปแบบการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็ก (ค) รูปแบบการไหลที่พบในงานวิจัยของ Kai Kang (2003)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ของหัวขึ้นรูปที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.50 และ 1.50 mm ดังแสดงในภาพที่ 43 พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมกำมะถันมีแนวโน้มลดลง เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏที่ลดลงแต่ในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกำมะถันซึ่งได้แก่ระบบ CV และ EV พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการไหลของยางคอมพาวนด์เข้าสู่ช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กซึ่งมีแรงดันสูงที่บริเวณทางเข้า เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็วจากห้อง

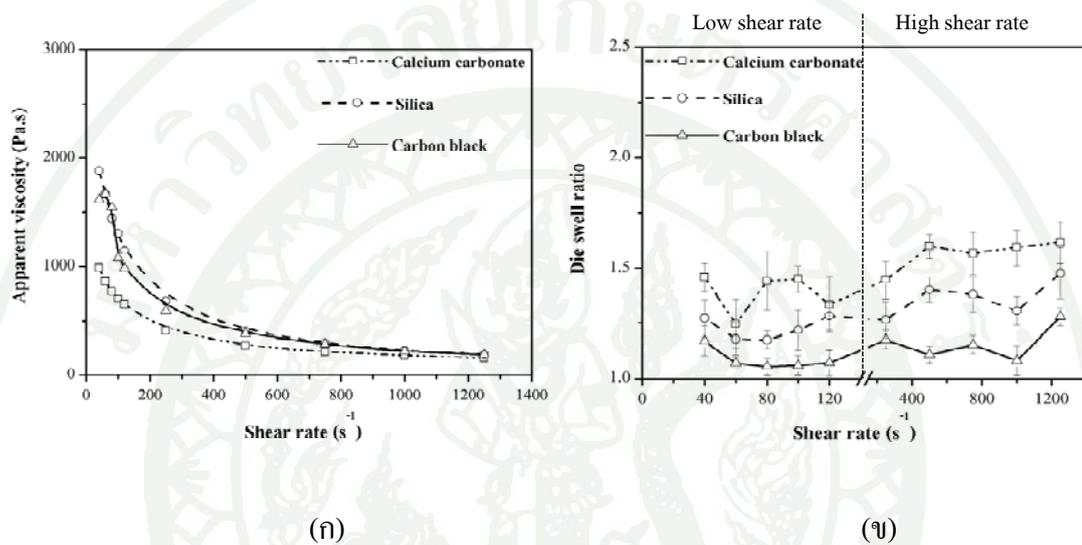
หลอมเหลวเข้าสู่ช่องทางการไหลขนาดเล็ก ส่งผลให้มีพลังงานสะสมแบบอีลาสติกในสายโซ่ โมเลกุลยางที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้พันธะเชื่อมขวางที่ผิวสัมผัสกับหัวขึ้นรูปขาดจากกันและ เมื่อขึ้นผิวที่เกิดพันธะเชื่อมขวางถูกทำลายลง สายโซ่โมเลกุลที่บริเวณส่วนกลางจึงมีความเป็นอิสระมากขึ้น (ซึ่งยังคงมีพลังงานสะสมแบบอีลาสติกที่สูง) ทำให้ยางคอมพาวนด์มีอัตราส่วนการบวมตัวที่ไม่แตกต่างจากช่องทางการไหลขนาดปกติ ถึงแม้ว่าความหนืดปรากฏจะมีค่าลดลงก็ตาม



ภาพที่ 43 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์เมื่ออัตราความเร็วเฉือนเท่ากับ 100 s^{-1}

ภาพที่ 44 แสดงค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในปริมาณการผสม 15 phr ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ และใช้อัตราความเร็วเฉือนระหว่างช่วง 40 ถึง $1,250\text{ s}^{-1}$ จากผลการทดสอบพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับช่องทางการไหลขนาดปกติ กล่าวคือ ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าความหนืดปรากฏต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ และ ซิลิกาตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยาง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัว พบว่า อัตราความเร็วเฉือนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากสารตัวเติมที่ผสมลงไปเนื้อยาง ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของยางคอมพาวนด์ลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมพบว่า อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางเช่นเดียวกัน โดยได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4 สำหรับผลของอัตราส่วนการบวมตัว

ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรง พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกามีอัตรา
การบวมตัวสูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการแตกตัวและ
การกระจายตัว (Dispersion and distribution) ของซิลิกาในเนื้อยางที่ต่ำกว่าเขม่าดำ (พงษ์ธร, 2550)
ส่งผลทำให้การเสริมแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ ดังนั้นการปลดปล่อย
พลังงานสะสมแบบอีลาสติกในรูปแบบการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาจึงมีค่าสูงกว่า



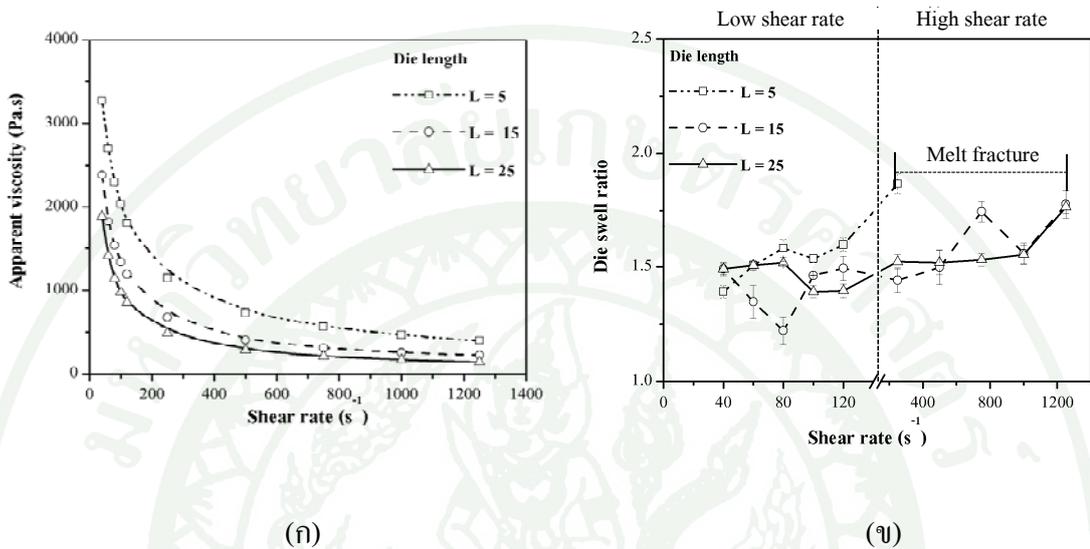
ภาพที่ 44 อิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็ก

(ก) ความหนืดปรากฏ (ข) อัตราส่วนการบวมตัว

6. อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ในช่องทางการไหลขนาดเล็ก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์
ที่ไม่ผสมสารคงรูปเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขึ้นรูป
(D) เท่ากับ 0.75 mm และมีความยาว (L) เท่ากับ 5 15 และ 25 mm โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบ
เท่ากับ 90°C และใช้อัตราความเร็วระหว่างช่วง 40 ถึง 1,240 s⁻¹ พบว่า เมื่อความยาวหัวขึ้นรูป
เพิ่มขึ้น ค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงดังแสดงในภาพที่ 45(ก) ทั้งนี้
เนื่องจากยางคอมพาวนด์ไหลอยู่ในหัวขึ้นรูปนานขึ้น ความร้อนสะสมอันเนื่องมาจากการไหลมีค่า
เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนการบวมตัวดังแสดงในภาพที่ 45(ข) พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อ
ความยาวของช่องทางการไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจากยางคอมพาวนด์มีระยะเวลาในการคลายตัวที่เพิ่มมา

ขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ช่องทางการไหลที่มีความยาวเท่ากับ 5 mm เกิดการเสีรูปร่างที่อัตราเร็วเฉือน 500 ถึง $1,250 \text{ s}^{-1}$ เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีระยะทางหรือระยะเวลาในการไหลที่ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างที่อัตราเร็วเฉือนในช่วงดังกล่าว

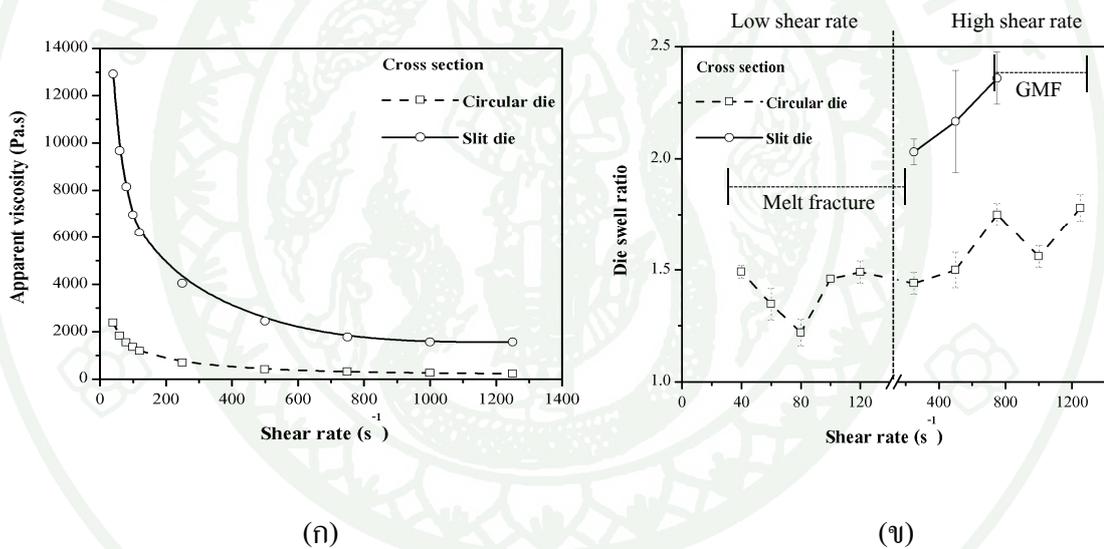


ภาพที่ 45 อิทธิพลของความยาวช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป (ก) ความหนืดปรากฏ (ข) อัตราส่วนการบวมตัว

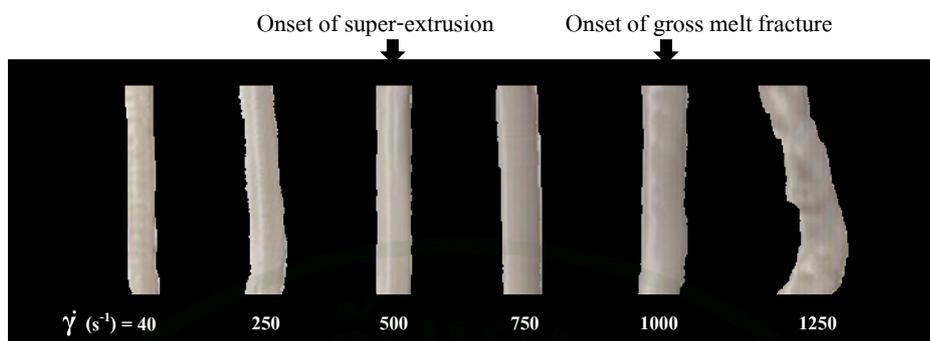
7. อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหล (Cross-section) ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

ภาพที่ 46 แสดงอิทธิพลของลักษณะช่องทางการไหลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปจากการทดลองพบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลหน้าตัดกลมมีค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวที่ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลทำให้มีแรงต้านทานการไหล (Flow resistance) ที่มากกว่า (Chen *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเป็นอย่างมากของช่องทางการไหลแบบหน้าตัดกลม (พิจารณาจากขนาดของห้องหลอมเหลวต่อช่องทางการไหลของหัวขึ้นรูป) ส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลที่มีความซับซ้อนยางคอมพาวนด์มี

โอกาสไหลวนในระบบมากขึ้น เป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลขาดจากกัน ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวจึงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาลักษณะของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปที่มีลักษณะหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 47 พบว่า เกิดปรากฏการณ์การเสีรูปตั้งแต่ที่อัตราครีดยืดต่ำ (อัตราครีดยืดเท่ากับ 40 s^{-1}) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงต้านการไหลที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับช่องทางการไหลที่มีหน้าตัดกลม จึงส่งผลให้เกิดความเค้นสะสมมากกว่า เมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูปจึงเกิดการเสีรูป ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดเท่ากับ 500 s^{-1} ลักษณะของยางคอมพาวนด์กลับมามีผิวเรียบ ซึ่งเกิดเป็นปรากฏการณ์ Super-extrusion เนื่องจากที่อัตราครีดยืดดังกล่าวส่งผลให้เกิดการเลื่อนตัวที่สม่ำเสมอ และเมื่ออัตราครีดยืดเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 750 s^{-1} เกิดการเลื่อนตัวที่ผนังหัวขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลต่อการเสีรูปในลักษณะ Gross melt fracture อีกครั้ง



ภาพที่ 46 อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป (ก) ความหนืดปรากฏ (ข) อัตราส่วนการบวมตัว



ภาพที่ 47 ลักษณะการเสีรูปร่างของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก ซึ่งได้แก่ ความหนืดปรากฏ และอัตราส่วนการบวมตัว ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 และ 100°C พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างจากช่องทางการไหลขนาดปกติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอัตราครีดยืดเหนือน อุณหภูมิการทดสอบ ระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดเหนือนและอุณหภูมิการทดสอบ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ดีขึ้น รวมทั้งการเกิดปรากฏการณ์เลื่อนตัวที่ผนังช่องทางการไหล เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่ผิวของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV ในขณะที่การเพิ่มอัตราครีดยืดเหนือนส่งผลให้การเสถียรภาพของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงและเกิดเป็นปรากฏการณ์ Super-extrusion เมื่ออัตราครีดยืดเหนือนเพิ่มสูงขึ้น โดยยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV เกิดปรากฏการณ์ Super-extrusion ที่อัตราครีดยืดเหนือนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปและยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่บริเวณผนังของช่องทางการไหลในระบบการคงรูปแบบ EV ที่มีค่าสูงสุด

2. อิทธิพลของการผสมสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในยางธรรมชาติที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ส่งผลให้ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารตัวเติมทำหน้าที่ลดความเป็นอีลาสติกของยางคอมพาวนด์ จากผลการทดสอบยังพบว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาเกิดปรากฏการณ์ Super-extrusion ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยการผสมซิลิกาที่ปริมาณ 15 phr เกิดปรากฏการณ์ Super-extrusion ที่อัตราครีดยืดเหนือนสูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา 30 phr ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่เร็วกว่าของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกา 15 phr

3. การลดขนาดช่องทางการไหลภายในหัวขึ้นรูปส่งผลให้ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดการไหลวนที่บริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีระยะเวลาในการคลายตัวที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาของรูปที่ผิวของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV และปรากฏการณ์การเลื่อนตัวที่ผนังที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การลดขนาดช่องทางการไหลส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูปมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ดีขึ้น ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารคงรูปทั้งระบบ CV และ EV มีอัตราส่วนการบวมตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากการเลื่อนตัวที่ผนัง รวมทั้งการเกิดพันธะเชื่อมขวางที่บริเวณผิวของยางคอมพาวนด์

4. จากผลการทดสอบอิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหลที่มีต่อค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ พบว่ายางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กแบบหน้าสี่เหลี่ยม มีค่าความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการไหลผ่านช่องทางการไหลแบบหน้าตัดกลม ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสของหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมที่มีค่ามากกว่าแบบหน้าตัดกลม ส่งผลให้เกิดแรงดันด้านการไหลและความเสียดสมในยางคอมพาวนด์ที่มากกว่า

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับช่องทางการไหลขนาดปกติ ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากลไกการเกิดปรากฏการณ์ Super extrusion เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
2. ควรมีการนำผลงานวิจัยที่ได้ไปพัฒนาแบบจำลองสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการไหลในช่องทางการไหลขนาดเล็ก เพื่อนำไปเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปหรือกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2550. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.
- Adewale, K.P. and A.I. Leonov. 1997. Modeling spurt and stress oscillations in flows of molten polymers. **Rheologica Acta**. 36: 110-127.
- Allal, A., A. Lavernhe, B. vergnes and G. Marin. 2006. Relationships between molecular structure and sharkskin defect for linear polymers. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mech**. 134: 127-135.
- Baik, J.J. and C. Tzoganakis. 1998. A Study of Extrudate Distortion in Controlled-Rheology Polypropylenes. **Journal of Polymer Engineering and Science**. 38: 274-281.
- Bagley, E.B. and A.M. Birks. 1960. Flow of Polyethylene into a Capillary. **Journal of Applied Physics**. 31: 556-561.
- 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. Tsaia, R.D. Chen and T.K. Lin. 2005. Preliminary study of polymer melt Rheological behavior flowing through 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.
- Goutille, Y. and J. Guillet. 2002. Influence of Filters in The Die Entrance Region on Gross Melt Fracture: Extrudate and Flow Visualization. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. 102: 19-36.
- Hoffman, W. 1989. **Rubber Technology Handbook**. Hanser Publisher, Munich.
- Kang, M.S. 2003. **Microfluidics of complex fluids Dissertation**. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.
- 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.
- Leblanc, J.L. 2002. Rubber-Filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds. **Progress in Polymer Science**. 27: 627-687.
- Leonov, A.I. and A.N. Prokuin. 1994. **Nonlinear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids**. Chapman and Hall, London.
- Liang, J.Z. 1996. A Study of Die-Swell Behaviour of Rubber Compounds during Short-Die Extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**. 59: 268-271.
- _____. 2001. Pressure effect of viscosity for polymer fluids in die flow. **Journal of Polymer**. 42: 3709-3712.

- Liang, J.Z. 2002. The melt elastic behavior of polypropylene/glass bead composites in capillary flow. **Journal of Polymer Testing**. 21: 927-931.
- _____. 2003. Predication of Critical Distance of Wall-Slip phenomenon During Extrusion of Carbon Black-Filled Natural Rubber/cis-polybutadiene Rubber Compound. **Journal of Applied Polymer Science**. 91: 3239-3243.
- Müllner, H.W., G. Ernst and J. Eberhardsteiner. 2008. Back-Calculation of the Die Swell Phenomenon of Rubber Compounds by Means of Torsional Rheometry. **Journal of Applied Polymer Science**. 110: 76-82.
- Palmese, G.R. and V.M. Karbhari. 1995. Effect of Sizings on Microscopic Flow in Resin Transfer Molding. **Journal of Polymer Composites**. 16: 313-318.
- Rauwendall, C. 2001. **Polymer Extrusion**. Hanser Publisher, Munich.
- Rosenbaum E.E. and S.G. Hatsikirikos. 1997. Wall Slip in the Capillary Flow of Molten Polymers Subject to Viscous Heating. **AIChE Journal**. 43: 598-608.
- Sombatsompop, N. M.C. Tan and A.K. Wood. 1997. Flow Analysis of Natural Rubber in a Capillary Rheometer. 1: Rheological Behavior and Flow Visualization in the Barrel. **Journal of Polymer Engineering Science**. 37: 270-280.
- _____. and Dangtangee. 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.
- _____. and N.-T. Intawong. 2001. Flow Properties and Entrance Corrections of Polymer Melts by Mobile Barrel Capillary Rheometer. **Polymer Testing**. 20: 97-103.

Sombatsompop, N. and N. O-Charoen. 2003. Extrudate Swell Behavior of PS and LLDPE Melts in a Dual Die with Mixed Circular/Slit Flow Channels in an Extrusion Rheometer.

Journal of Polymers for Advanced Technologies. 14: 699-710.

_____. and R. Dangtangee. 2002. Effects of The Actual Diameters and Diameter Ratios of Barrels and Dies on The Elastic Swell and Entrance Pressure Drop of Natural Rubber in Capillary Die Flow. **Journal of Applied Polymer Science.** 86: 1762-1772.

_____. and W. Chaiwattanpipat. 2000. Temperature Distributions of Molten Polypropylene During Injection Moulding. **Advances in Polymer Technology.** 19: 79-86.

_____. W. Chaiwattanpipat and M. Panapoy. 2000. Melt Temperature Variations in The Barrels of An Injection Moulder and a Twin Screw Extruder. **Materials Research Innovations.** 3: 271-275.

Song, H.J., J.L. White and K. Min. 1988. Rheological Properties, Extrudate Swell, and Die Entry Extrusion Flow Marker Experiments for Rubber-Carbon Black Compounds. **Journal of Advance in Polymer Technology.** 8: 431-449.

Wong, A.C.-Y. 1998. Factors Affecting Extrudate Swell and Melts Flow Rate. **Journal of Materials Processing Technology.** 79: 163-169.

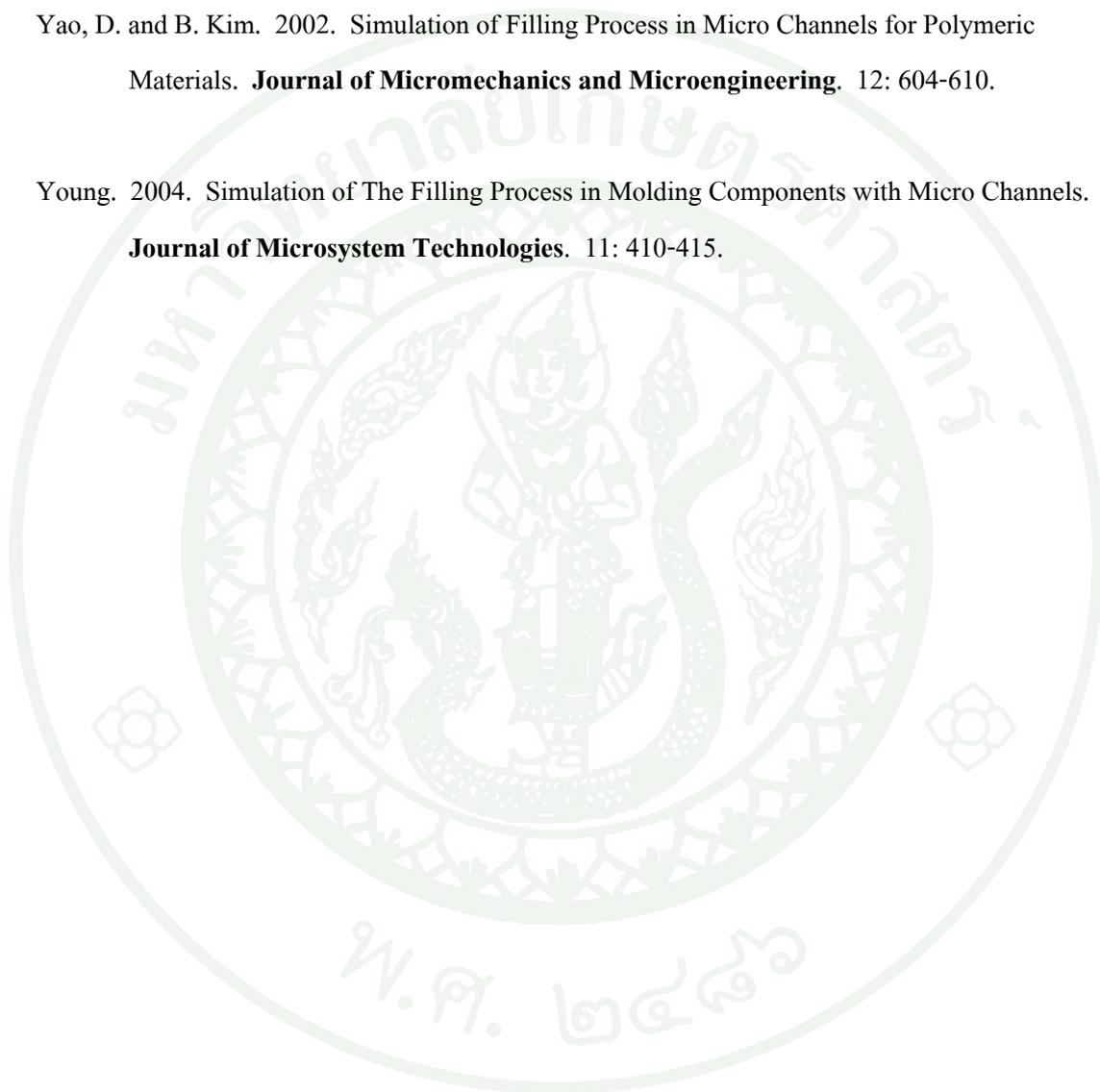
Xu, B., K.T. Ooi, T.N. Wong and C.Y. Liu. 1999. Study in the Viscosity of The liquid Flowing in Microgeometry. **Journal of Micromechanics and Microengineering.** 9: 377-384.

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.

Yang, S.Y., S.C. Nian, S.T. Huang and Y.J. Weng. 2009. A Study on The Micro-Injection Molding of Multi-Cavity Ultra-Thin Parts. **Journal of Polymers for Advanced Technologies.** 22: 891-902.

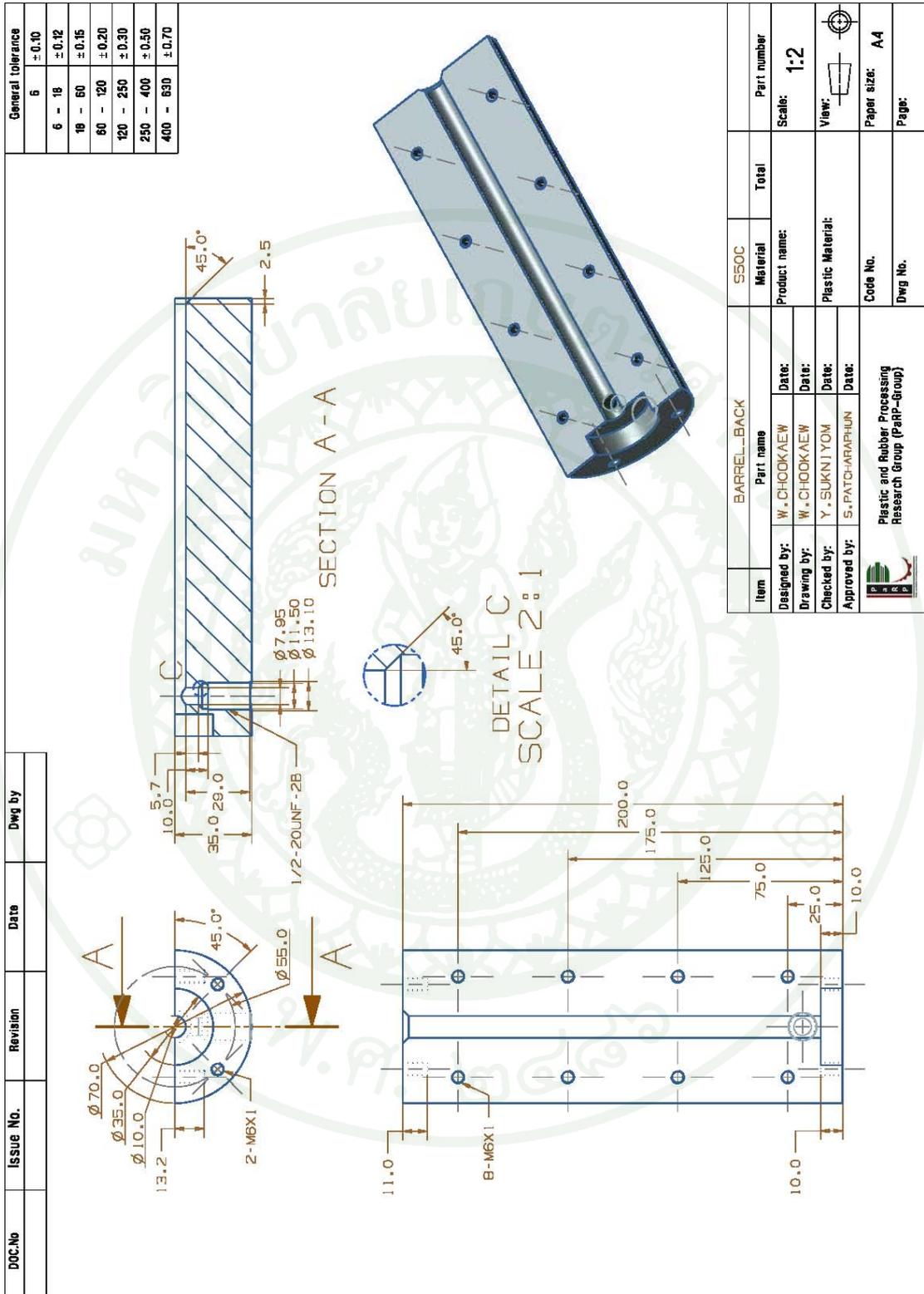
Yao, D. and B. Kim. 2002. Simulation of Filling Process in Micro Channels for Polymeric Materials. **Journal of Micromechanics and Microengineering.** 12: 604-610.

Young. 2004. Simulation of The Filling Process in Molding Components with Micro Channels. **Journal of Microsystem Technologies.** 11: 410-415.

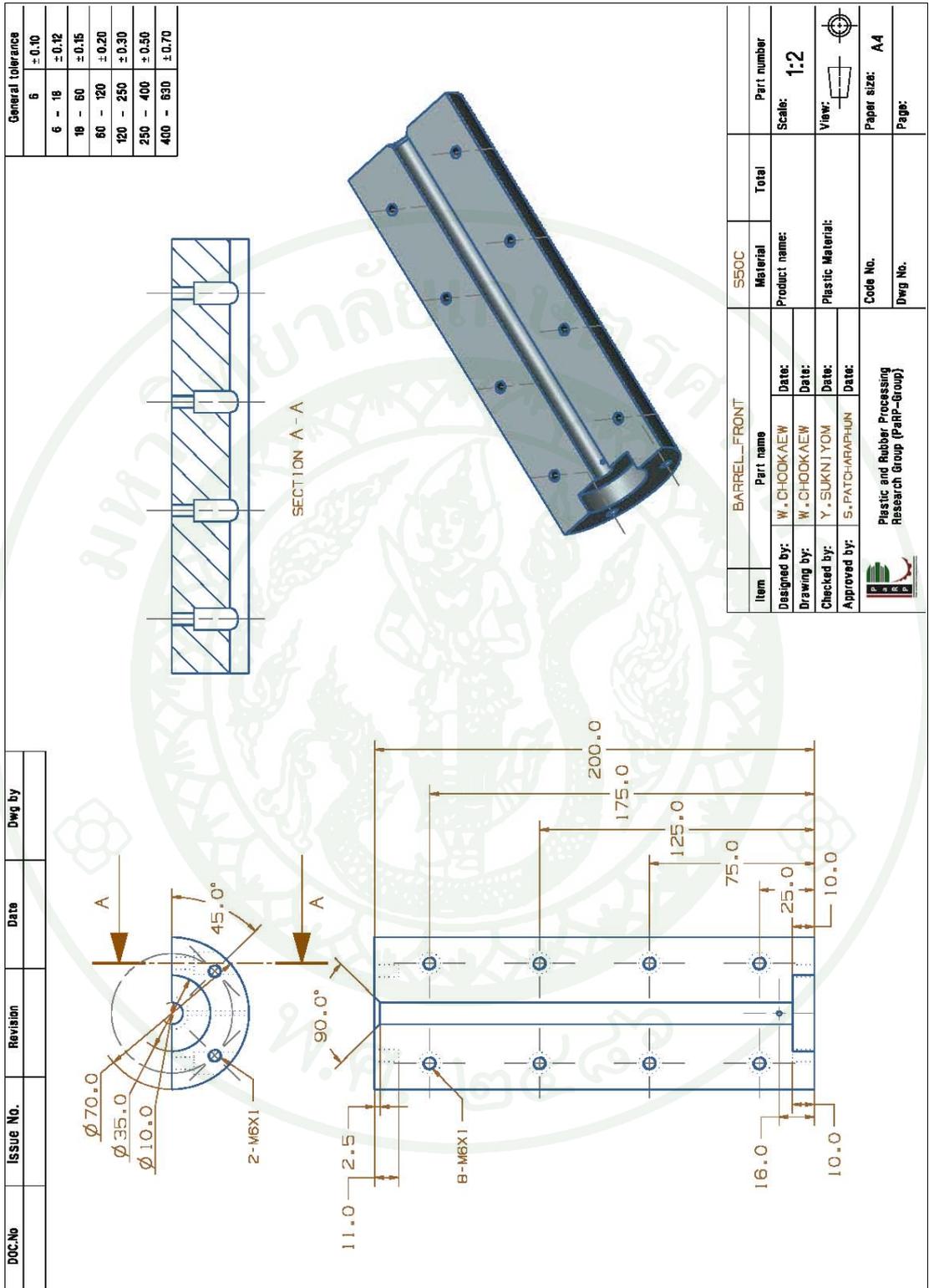




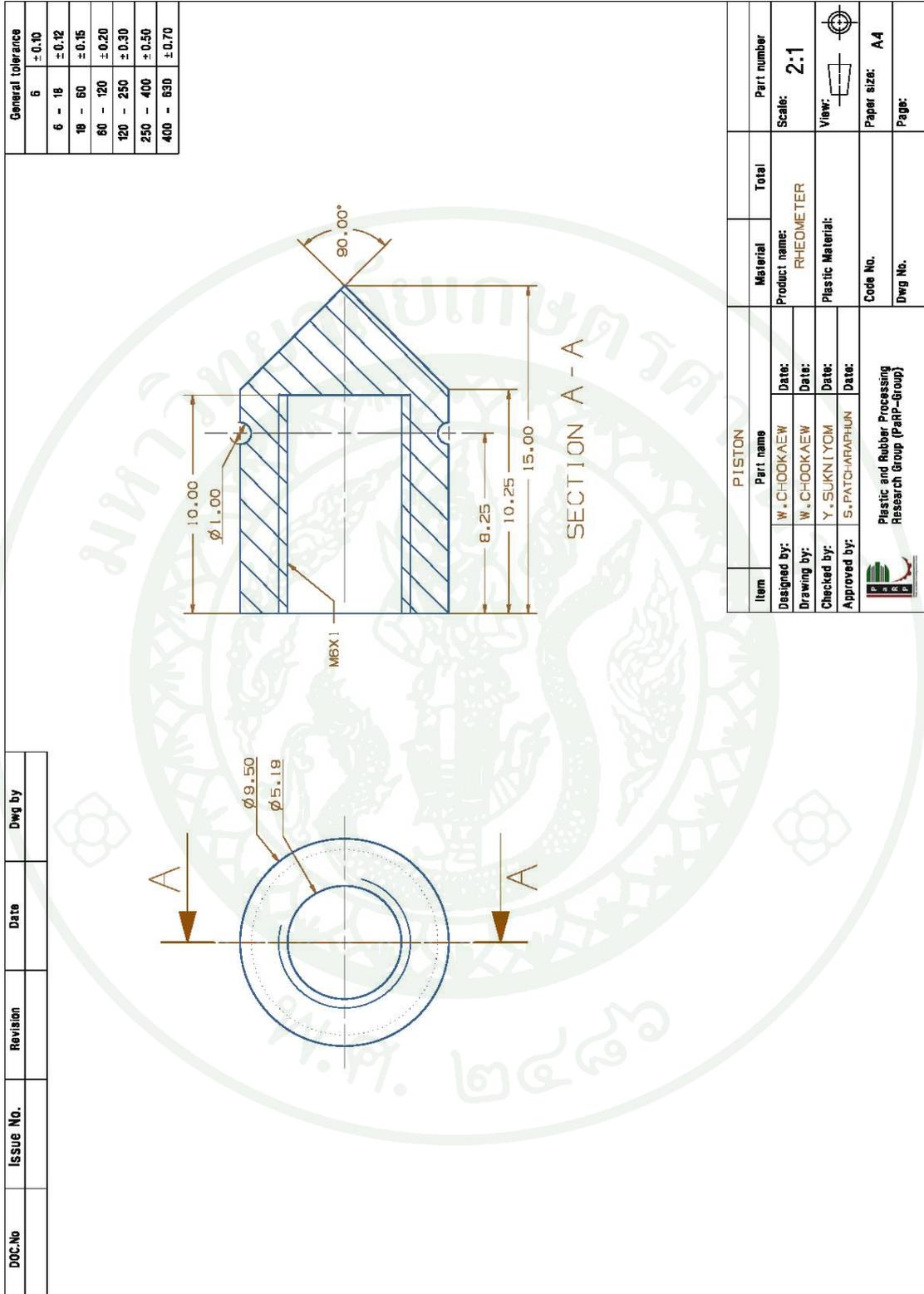




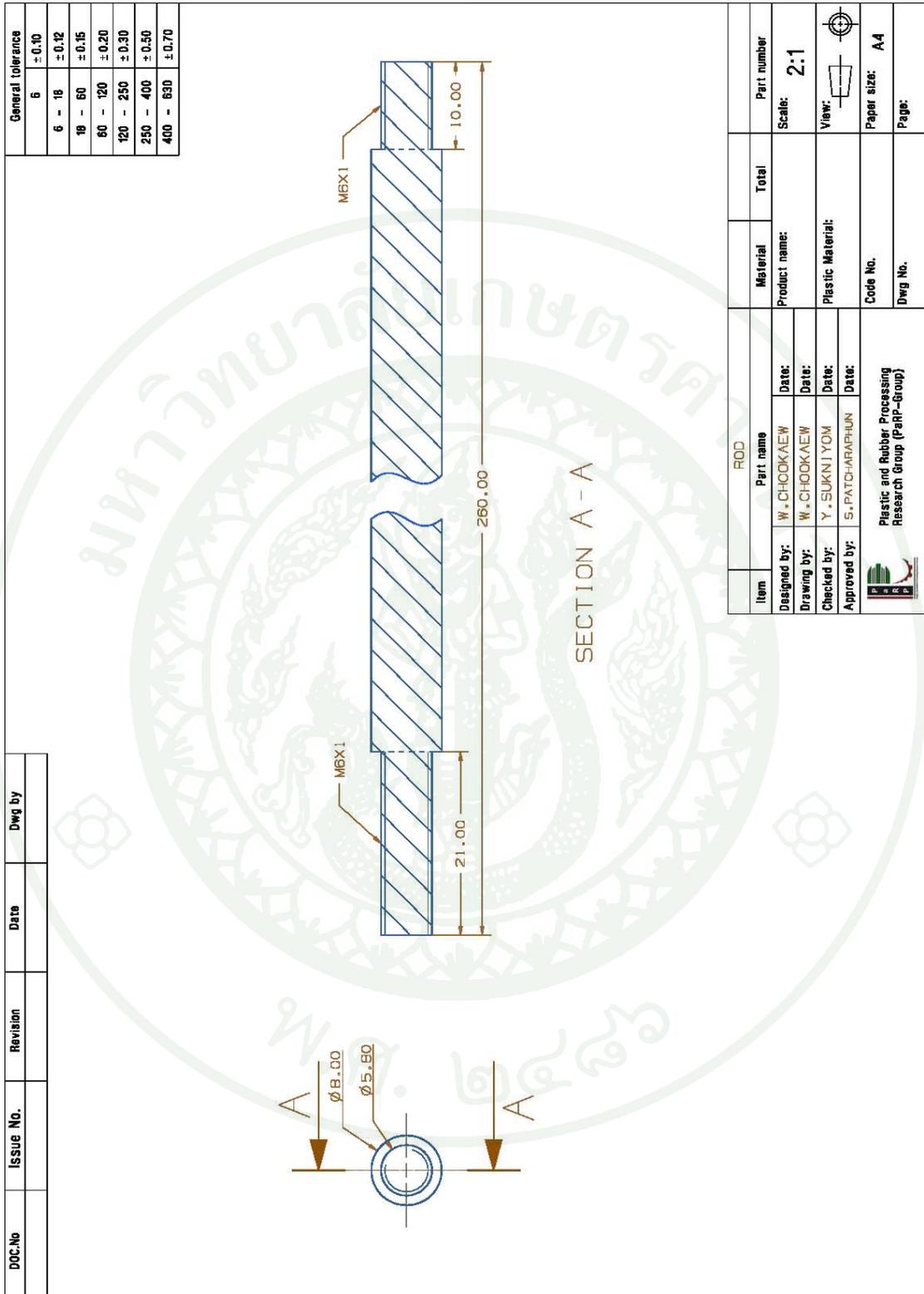
ภาพผนวกที่ ก1 ห้องหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้านที่ 1 (Barrel#1)



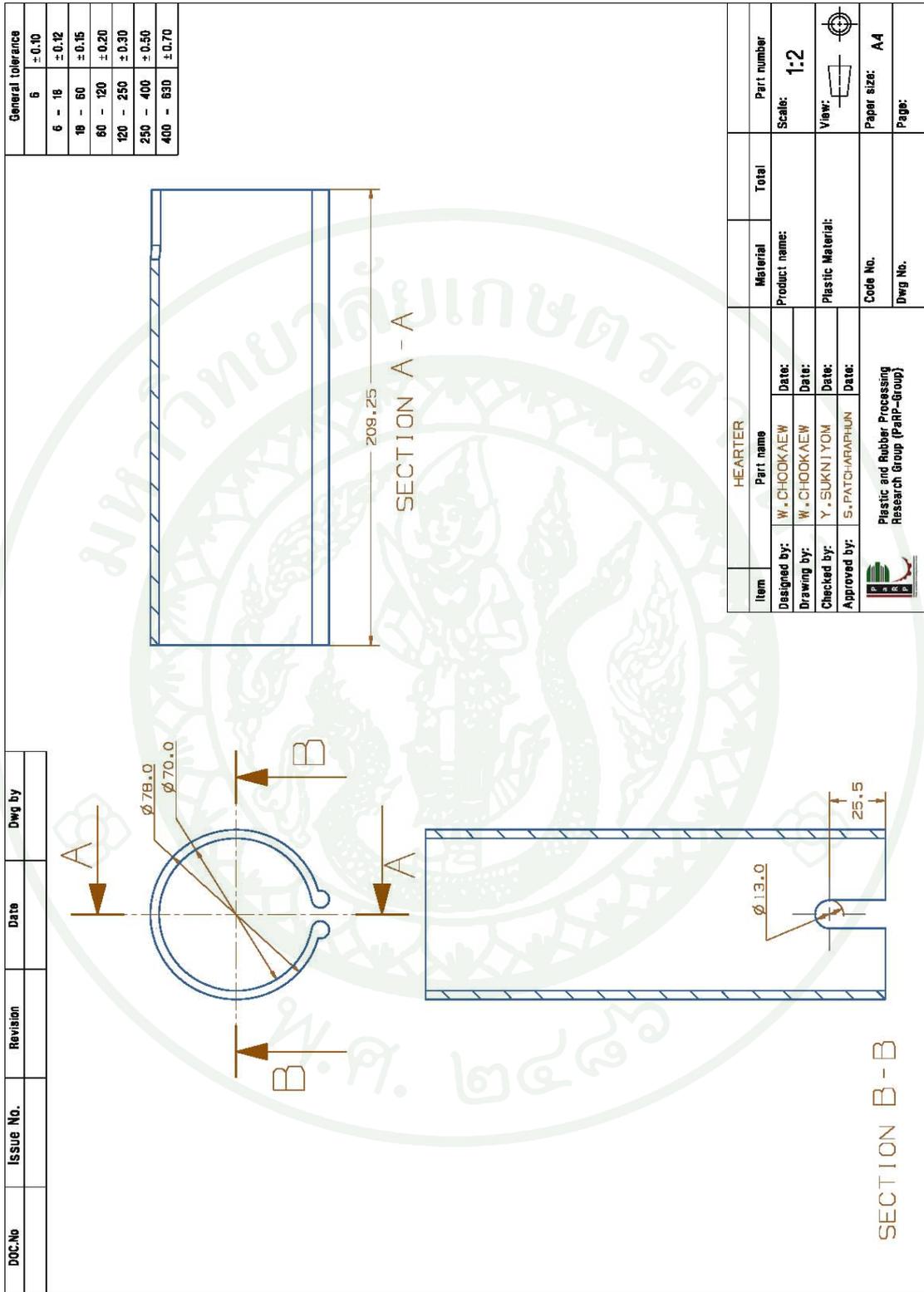
ภาพผนวกที่ ก2 ห้องหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้านที่ 2 (Barrel#2)



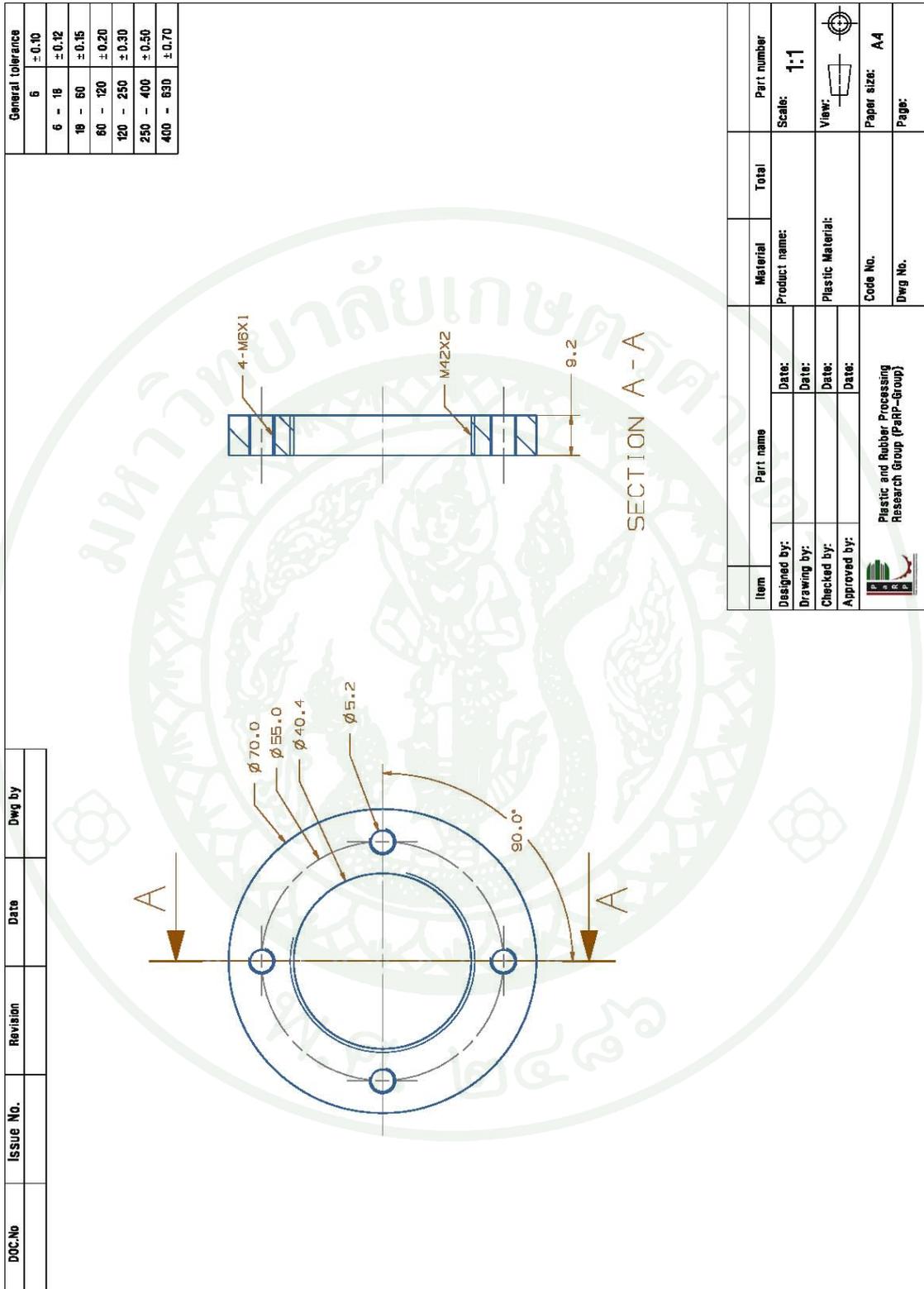
ภาพผนวกที่ ก3 หัวคดพอลิเมอร์หลอมเหลว (Piston)



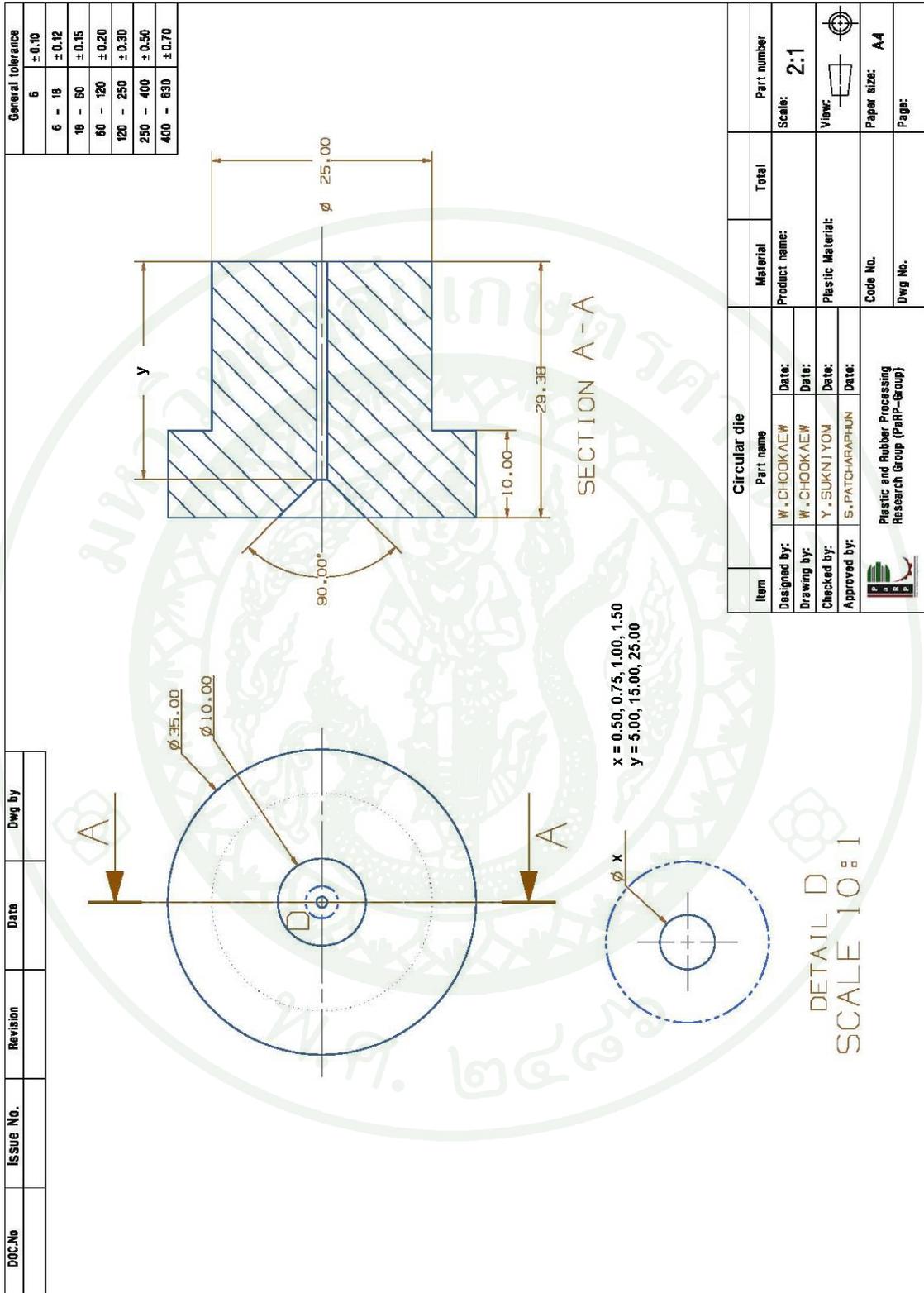
ภาพผนวกที่ ก4 แท่งกดพอลิเมอร์หลอมเหลว (Rod)



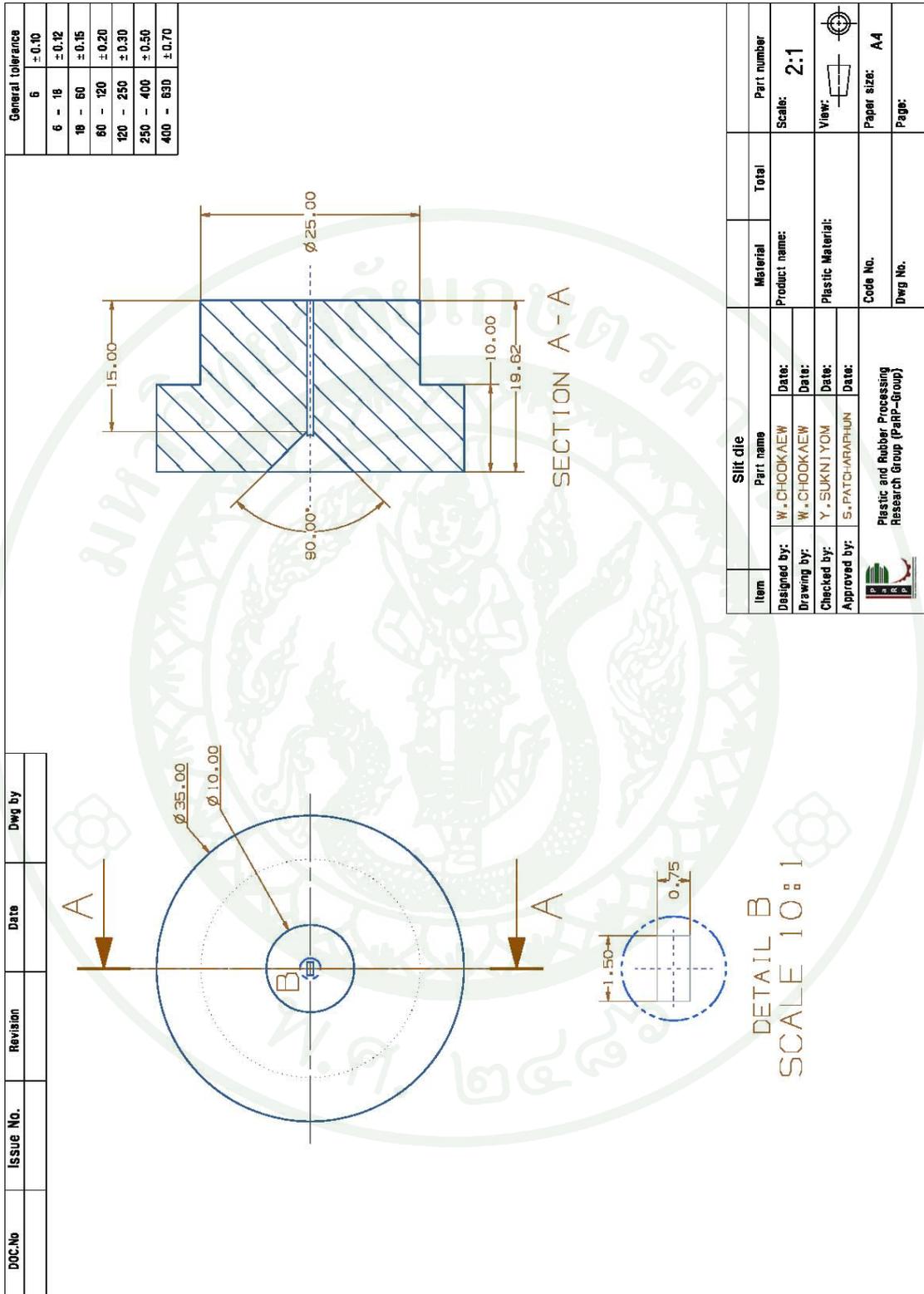
ภาพผนวกที่ ก5 เข็มขัดรัดให้ความร้อน (Heater)



ภาพผนวกที่ ก6 ที่น้ร่องห้ว้ข้น้รู่บ (Support die)



ภาพผนวกที่ ๓7 หัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (Circular die)



ภาพผนวกที่ ก8 หัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Slit die)



ภาคผนวก ข
ความเหน็ดเหนื่อยและสมบัติการครองรูปของนางค่อมพาวนค์

ตารางผนวกที่ ข1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์

Mooney viscosity	Non sulphur	EV	CV
		25.91	26.69

ตารางผนวกที่ ข2 อิทธิพลของชนิด และปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์

Filler contents (phr)	Mooney viscosity		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
0	27.86	27.86	27.86
15	27.73	46.32	44.57
30	37.30	64.40	47.81

ตารางผนวกที่ ข3 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์

Vulcanization system	Scorch time (min)	Cure time (min)
Non sulphur	-	-
EV	7.63	10.96
CV	7.90	12.62

ตารางผนวกที่ ๔4 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์

Filler contents (phr)	Scorch time (min)			Cure time (min)		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
0	7.90	7.90	7.90	12.62	12.62	12.62
15	6.35	6.10	4.71	10.91	11.39	9.63
30	7.09	5.86	3.66	12.40	13.65	9.17



ตารางผนวกที่ ค1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	Non s	EV	CV	Non s	EV	CV
	40	168,827.60	125,141.13	155,025.36	4,220.69	3,287.62
60	185,173.20	145,098.05	176,401.68	3,086.22	2,497.85	2,940.03
80	193,882.50	156,782.25	188,550.73	2,423.53	1,975.69	2,356.88
100	200,364.50	166,557.36	196,881.59	2,003.64	1,668.76	1,968.82
120	208,119.20	170,605.20	205,848.82	1,734.33	1,400.50	1,715.41
250	292,093.00	184,984.32	229,135.80	1,168.37	657.21	916.54
500	341,140.50	150,786.82	240,044.32	682.28	283.76	480.09
750	374,278.90	96,862.05	234,725.57	499.04	141.03	312.97
1,000	458,644.60	17,164.55	338,861.37	458.64	94.16	338.86
1,250	521,374.00	22,421.59	385,406.26	417.10	27.10	308.33

ตารางผนวกที่ ค2 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 100 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	Non s	EV	CV	Non s	EV	CV
	40	148,379.78	125,141.13	112,707.18	3,709.49	3,128.53
60	170,092.40	145,098.05	135,356.23	2,834.87	2,418.30	2,940.03
80	180,986.83	156,782.25	149,096.18	2,262.34	1,959.78	2,356.88
100	193,790.36	166,557.36	161,881.59	1,937.90	1,665.57	1,968.82
120	198,639.34	170,605.20	168,303.36	1,655.33	1,421.71	1,715.41
250	214,884.99	184,984.32	196,363.07	859.54	739.94	916.54
500	190,542.70	150,786.82	193,907.96	381.09	301.57	480.09
750	128,654.96	96,862.05	166,316.48	171.54	129.15	312.97
1,000	76,949.03	17,164.55	176,270.46	76.95	17.16	338.86
1,250	70,743.11	22,421.59	246,360.80	56.59	17.94	308.33

ตารางผนวกที่ ค3 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 15 phr ต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์
ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	Calcuim carbonate	Silica	Carbon black	Calcuim carbonate	Silica	Carbon black
40	303,239.61	188,638.09	182,336.64	7,580.99	4,715.95	4,558.42
60	305,768.51	212,116.22	200,982.23	5,096.14	3,535.27	3,349.70
80	315,933.77	225,412.54	211,673.27	3,949.17	2,817.66	2,645.92
100	318,144.49	228,527.04	219,818.86	3,181.44	2,285.27	2,198.19
120	324,809.75	241,186.99	229,873.55	2,706.75	2,009.89	1,915.61
250	368,611.21	294,999.41	268,819.89	1,474.44	1,180.00	1,075.28
500	409,131.52	370,362.45	416,776.14	818.26	740.72	833.55
750	451,879.09	612,134.58	734,323.30	602.51	816.18	979.10
1,000	512,126.67	868,224.90	517,961.37	512.13	868.22	517.96
1,250	604,192.43	1,078,178.85	827,553.99	483.35	862.54	662.04

ตารางผนวกที่ ค4 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 30 phr ต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์
ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	Calcuim carbonate	Silica	Carbon black	Calcuim carbonate	Silica	Carbon black
	40	327,261.72	225,376.49	310,349.98	8,181.54	5,634.41
60	350,938.03	240,882.91	335,388.61	5,848.97	4,014.72	5,589.81
80	358,705.25	254,798.43	356,290.87	4,483.82	3,184.98	4,453.64
100	373,790.65	269,986.67	371,147.68	3,737.91	2,699.87	3,711.48
120	381,876.06	282,629.46	386,322.67	3,182.30	2,355.25	3,219.36
250	450,499.36	323,443.94	438,823.74	1,802.00	1,293.78	1,755.29
500	539,635.09	539,069.70	631,374.76	1,079.27	1,078.14	1,262.75
750	575,634.46	633,468.19	802,289.42	767.51	844.62	1,069.72
1,000	671,770.18	1,003,730.31	740,613.16	671.77	1,003.73	740.61
1,250	705,860.46	978,810.62	482,300.54	564.69	783.05	385.84

ตารางผนวกที่ ค5 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
	40	137,518.13	95,327.29	26,797.53	3,437.95	2,383.18
60	156,019.63	109,593.21	36,544.79	2,600.33	1,826.55	609.08
80	169,005.97	123,063.68	41,095.07	2,112.57	1,538.30	513.69
100	178,386.25	134,147.78	46,387.78	1,783.86	1,341.48	463.88
120	186,705.92	142,527.33	52,210.79	1,555.88	1,187.73	435.09
250	222,329.25	170,346.72	73,567.93	889.32	681.39	294.27
500	265,870.63	203,579.80	98,681.31	531.74	407.16	197.36
750	309,412.00	231,562.89	115,309.84	412.55	308.75	153.75
1,000	349,135.19	257,159.61	120,377.77	349.14	257.16	120.38
1,250	385,252.32	281,483.60	126,930.54	308.20	225.19	101.54

ตารางผนวกที่ ค6 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบ
การคงรูปแบบประสิทธิภาพ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
	40	125,156.95	67,341.21	24,023.07	3,128.92	1,683.53
60	123,796.02	78,909.54	35,405.81	2,063.27	1,315.16	590.10
80	151,495.71	80,614.23	41,379.47	1,893.70	1,007.68	517.24
100	148,649.94	89,318.93	47,989.48	1,486.50	893.19	479.89
120	164,470.84	101,682.71	55,235.87	1,370.59	847.36	460.30
250	183,943.03	138,297.32	74,390.38	735.77	553.19	297.56
500	207,340.61	166,844.63	95,023.18	414.68	333.69	190.05
750	214,192.73	182,982.86	106,640.83	285.59	243.98	142.19
1,000	225,923.64	194,666.53	123,773.64	225.92	194.67	123.77
1,250	235,957.58	215,577.49	131,785.23	188.77	172.46	105.43

ตารางผนวกที่ ค7 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบ
การคงรูปแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
	40	137,635.76	103,393.63	42,104.13	3,440.89	2,584.48
60	146,862.73	106,817.72	50,012.25	2,447.71	1,780.30	833.54
80	154,604.86	111,991.81	50,496.14	1,932.56	1,399.90	631.20
100	162,983.34	118,279.53	51,192.14	1,629.83	1,182.80	511.92
120	172,634.56	125,839.98	54,857.84	1,438.62	1,048.67	457.15
250	208,746.24	157,085.19	73,434.90	834.98	628.34	293.74
500	240,401.57	192,965.84	93,218.28	480.80	385.98	186.44
750	262,935.69	212,301.03	105,153.18	350.58	283.07	140.20
1,000	277,409.20	241,658.95	114,648.68	277.41	241.66	114.65
1,250	291,458.48	249,857.78	126,795.70	233.17	199.89	101.44

ตารางผนวกที่ ค8 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาด 0.75 mm และอุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	แคลเซียม คาร์บอเนต	ซิลิกา	เขม่าดำ	แคลเซียม คาร์บอเนต	ซิลิกา	เขม่าดำ
	40	39,668.38	75,326.81	64,711.38	991.71	1,883.17
60	51,479.85	100,240.22	100,180.71	858.00	1,670.67	1,669.68
80	61,700.41	115,289.99	123,718.22	771.26	1,441.12	1,546.48
100	69,852.78	130,339.76	107,483.00	698.53	1,303.40	1,074.83
120	77,209.70	137,912.25	117,815.96	643.41	1,149.27	981.80
250	102,677.41	170,110.76	147,514.31	410.71	680.44	590.06
500	134,263.90	200,653.33	189,255.90	268.53	401.31	378.51
750	157,895.85	219,423.18	210,952.02	210.53	292.56	281.27
1,000	177,868.71	222,602.12	213,716.34	177.87	222.60	213.72
1,250	194,182.48	233,417.43	230,162.47	155.35	186.73	184.13

ตารางผนวกที่ ๑ อิทธิพลของความยาวของช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)			Apparent viscosity (Pa.s)		
	L = 5 mm	L = 15 mm	L = 25 mm	L = 5 mm	L = 15 mm	L = 25 mm
	40	130,868.24	95,327.29	75,428.19	3,271.71	2,383.18
60	161,734.18	109,593.21	84,942.29	2,695.57	1,826.55	1,415.70
80	183,531.94	123,063.68	91,306.39	2,294.15	1,538.30	1,141.33
100	203,420.61	134,147.78	97,479.58	2,034.21	1,341.48	974.80
120	216,150.19	142,527.33	102,411.86	1,801.25	1,187.73	853.43
250	287,199.25	170,346.72	122,062.58	1,148.80	681.39	488.25
500	368,284.87	203,579.80	141,716.06	736.57	407.16	283.43
750	424,075.03	231,562.89	159,937.73	565.43	308.75	213.25
1,000	468,410.64	257,159.61	171,286.67	468.41	257.16	171.29
1,250	499,859.89	281,483.60	181,108.34	399.89	225.19	144.89

ตารางผนวกที่ ค10 อิทธิพลของลักษณะช่องทางการไหลต่อความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm

shear rate (s ⁻¹)	Apparent shear stress (N.m ⁻²)		Apparent viscosity (Pa.s)	
	Circular die	Slit die	Circular die	Slit die
	40	95,327.29	516,854.63	2,383.18
60	109,593.21	580,281.94	1,826.55	9,671.37
80	123,063.68	651,981.98	1,538.30	8,149.77
100	134,147.78	696,318.39	1,341.48	6,963.18
120	142,527.33	745,109.34	1,187.73	6,209.24
250	170,346.72	1,011,023.24	681.39	4,044.09
500	203,579.80	1,221,591.94	407.16	2,443.18
750	231,562.89	1,325,887.91	308.75	1,767.85
1,000	257,159.61	1,556,820.25	257.16	1,556.82
1,250	281,483.60	1,956,388.94	225.19	1,565.11



ภาคผนวก ง
ผลทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์จากเครื่องทดสอบ
คาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชดเนื่อง

ตารางผนวกที่ 1 อิทธิพลของระบบการคงรูปต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติที่อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	Non s	EV	CV	Non s	EV	CV
40	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-
100	1.37	-	-	0.04	-	-
120	1.41	-	-	0.02	-	-
250	1.57	-	-	0.04	-	-
500	1.81	-	-	0.05	-	-
750	1.84	-	-	0.03	-	-
1,000	2.29	-	1.83	0.10	-	0.17
1,250	2.30	1.76	2.02	0.06	0.07	0.10

ตารางผนวกที่ ๖2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ ปริมาณ 15 phr ต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
40	1.34	-	1.25	0.10	-	0.05
60	1.34	-	1.23	0.02	-	0.02
80	1.28	-	1.25	0.03	-	0.03
100	1.27	-	1.31	0.08	-	0.04
120	1.29	-	1.31	0.04	-	0.04
250	1.40	-	1.45	0.02	-	0.02
500	1.49	-	1.77	-	0.06	0.03
750	1.90	1.83	1.93	0.10	0.06	0.05
1,000	2.04	2.00	1.95	0.09	0.04	0.03
1,250	2.12	-	2.21	-	0.04	0.20

ตารางผนวกที่ 33 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่ ปริมาณ 30phr ต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดปกติอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
40	1.23	-	1.18	0.04	-	0.03
60	1.15	-	1.18	0.04	-	0.02
80	1.25	-	1.22	0.03	-	0.03
100	1.37	-	1.22	0.04	-	0.02
120	1.33	-	1.27	0.05	-	0.03
250	1.50	-	1.58	0.04	-	0.03
500	1.82	1.70	1.67	0.06	0.06	0.03
750	1.83	1.77	1.66	0.06	0.03	0.05
1,000	2.00	-	1.64	0.04	-	0.03
1,250	1.99	-	1.62	-	-	0.03

ตารางผนวกที่ ๔4 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์
ที่ไม่ผสมสารคงรูป อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
40	-	-	-	-	-	0.03
60	-	-	1.22	-	-	0.12
80	-	1.22	1.24	-	0.06	0.08
100	-	1.46	1.40	-	0.00	0.03
120	-	1.49	1.33	-	0.05	0.03
250	-	1.44	1.22	-	0.05	0.04
500	1.71	1.50	-	0.04	0.08	-
750	1.72	1.75	-	0.03	0.05	-
1,000	1.96	1.56	-	0.05	0.05	-
1,250	2.05	1.78	-	0.05	0.06	-

ตารางผนวกที่ ๖5 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์
ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
40	-	-	1.43	-	-	0.06
60	-	-	1.39	-	-	0.06
80	-	-	1.45	-	-	0.07
100	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-
1,000	1.89	-	-	0.04	-	-
1,250	1.85	1.44	-	0.04	0.05	-

ตารางผนวกที่ ๖ อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์
ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	die 1.00	die 0.75	die 0.50	die 1.00	die 0.75	die 0.50
40	-	-	1.41	-	-	0.03
60	-	-	1.29	-	-	0.03
80	-	-	1.40	-	-	0.03
100	-	-	1.47	-	-	0.06
120	-	-	1.43	-	-	0.06
250	-	-	1.41	-	-	0.07
500	-	-	-	-	-	-
750	1.65	-	-	0.07	-	-
1,000	1.64	1.77	-	0.03	0.04	-
1,250	1.70	1.77	-	0.03	0.06	-

ตารางผนวกที่ 7 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
40	1.46	1.27	1.17	0.06	0.08	0.07
60	1.25	1.18	1.07	0.11	0.07	0.03
80	1.44	1.18	1.05	0.13	0.04	0.04
100	1.45	1.22	1.06	0.06	0.09	0.04
120	1.34	1.28	1.07	0.12	0.06	0.06
250	1.45	1.26	1.18	0.09	0.09	0.04
500	1.60	1.40	1.11	0.05	0.05	0.04
750	1.57	1.38	1.15	0.10	0.08	0.04
1,000	1.59	1.31	1.08	0.08	0.07	0.07
1,250	1.62	1.48	1.28	0.09	0.11	0.04

ตารางผนวกที่ 8 อิทธิพลของความยาวของช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C เมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm

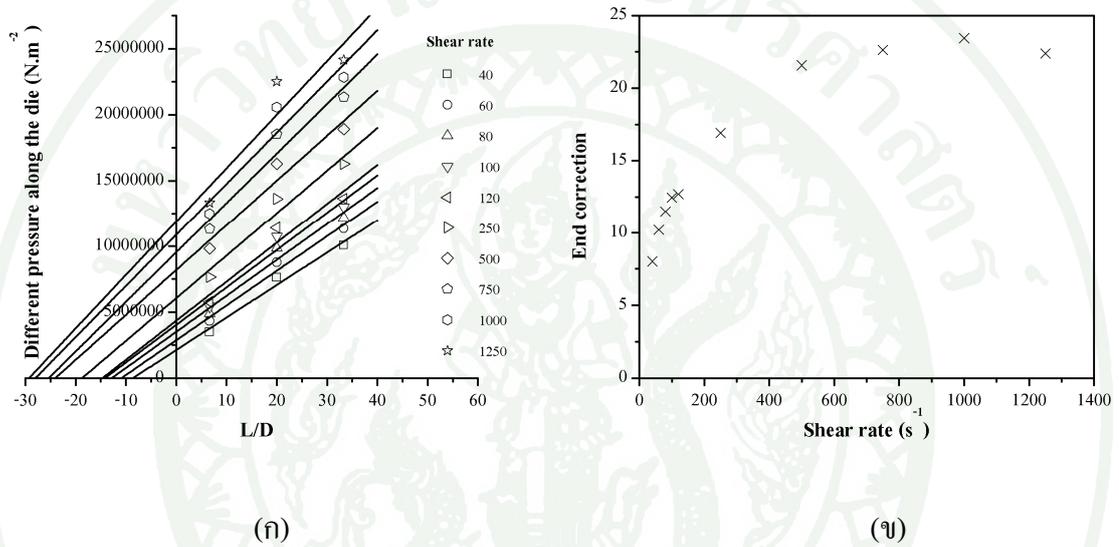
shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B			Standard Deviation, SD		
	L = 5 mm	L = 15 mm	L = 25 mm	L = 5 mm	L = 15 mm	L = 25 mm
40	1.39	-	1.49	-	-	0.02
60	1.51	-	1.51	-	-	0.02
80	1.58	-	1.52	-	-	0.01
100	1.54	1.46	1.39	-	0.00	0.03
120	1.60	1.49	1.40	-	0.05	0.03
250	1.87	1.44	1.52	-	0.05	0.03
500	-	1.50	1.52	-	0.08	0.05
750	-	1.75	1.53	-	0.05	0.03
1,000	-	1.56	1.55	-	0.05	0.04
1,250	-	1.78	1.77	-	0.06	0.03

ตารางผนวกที่ ๑9 อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางการไหลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารคงรูป อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 90 °C

shear rate (s ⁻¹)	Die swell ratio, B		Standard Deviation, SD	
	Circular die	Slit die	Circular die	Slit die
40	-	-	-	-
60	-	-	-	-
80	1.22	0.06	-	-
100	1.46	-	-	-
120	1.49	0.05	-	-
250	1.44	0.05	2.03	0.06
500	1.50	0.08	2.17	0.23
750	1.75	0.05	2.36	0.12
1,000	1.56	0.05	-	-
1,250	1.78	0.06	-	-

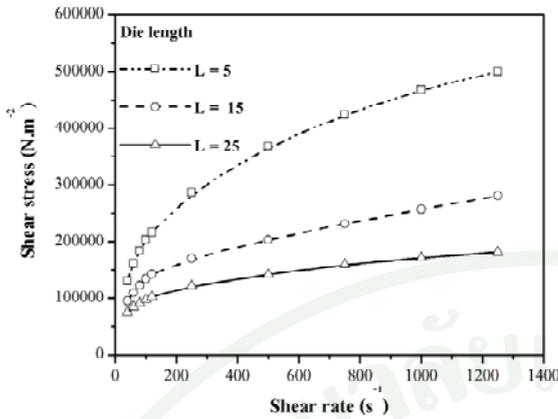


ยางคอมพาวนด์มีสมบัติเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนดังนั้นสมบัติการไหลที่วัดได้จาก เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์จึงขึ้นอยู่กับความยาวของหัวขึ้นรูปที่ใช้ กล่าวคือ หัวขึ้นรูปที่มีความยาว ต่างกัน ส่งผลให้สมบัติการไหลมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการทดลองได้วัดความดันที่ ตำแหน่งก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ปรับแก้ข้อมูลตามวิธีการปรับแก้ที่นำเสนอ โดย Baley (Bagley correction) เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นดังแสดงในภาพ ผนวกที่ จ1(ก)

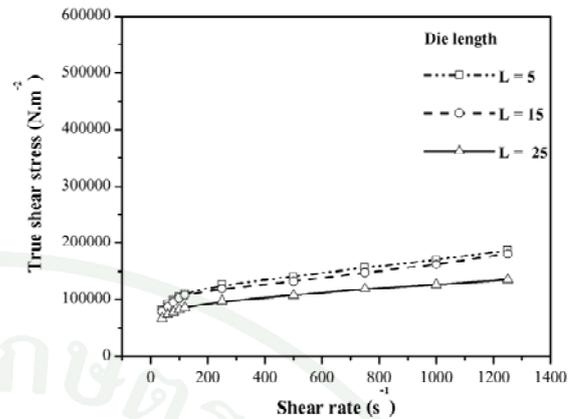


ภาพผนวกที่ จ1 หลักการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมบริเวณปากทางเข้าหัวขึ้นรูปกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขึ้นรูป (L/D) (ข) ค่าความยาวนานามธรรม (e) ที่ได้จากการทดสอบยางคอมพาวนด์

ค่า e ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราส่วน L/D ดังแสดงในภาพ ผนวกที่ จ1(ข) สามารถนำไปคำนวณค่าความเค้นเฉือนจริงและความหนืดจริงได้จากสมการที่ 12 และ 15 ตามลำดับ โดยความแตกต่างระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏและความเค้นเฉือนจริง ดังแสดงในภาพผนวกที่ จ2 และความแตกต่างระหว่างความหนืดปรากฏและความหนืดจริง ดังแสดงในภาพผนวกที่ จ3

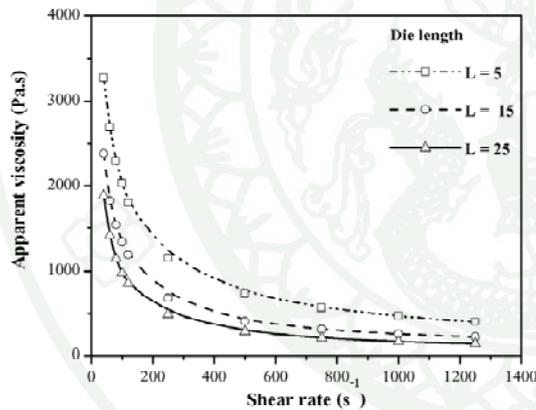


(ก)

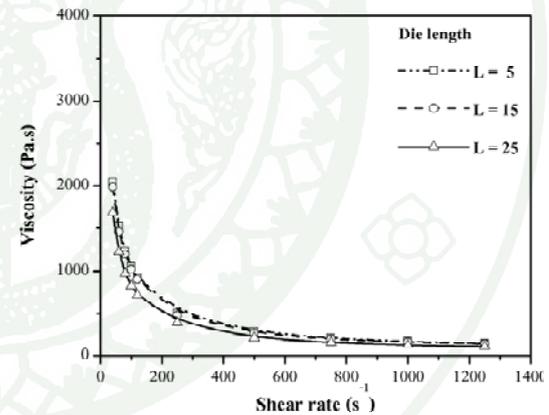


(ข)

ภาพผนวกที่ ๒ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าอัตราเคี้ยวเฉือน โดยใช้สมการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (ก) ก่อนการปรับแก้ (ข) หลังการปรับแก้



(ก)

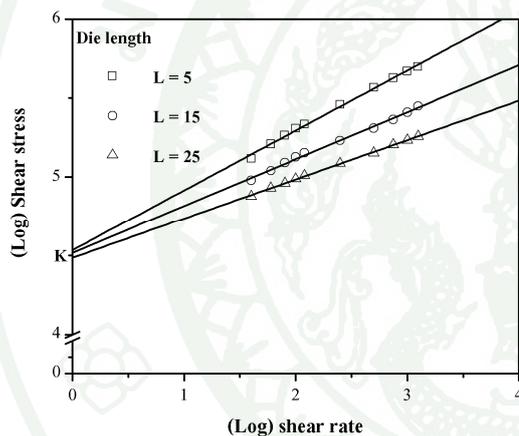


(ข)

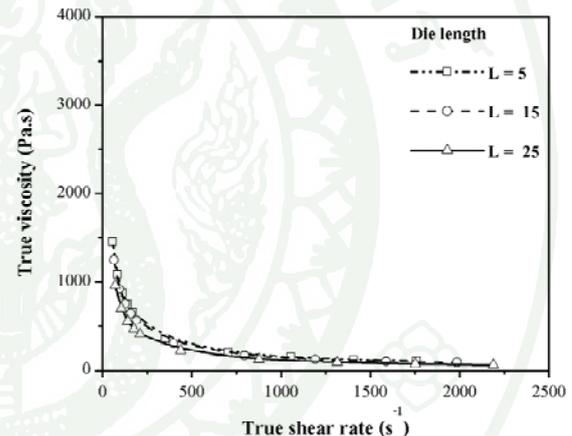
ภาพผนวกที่ ๓ ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ก่อนและหลังการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (ก) ก่อนการปรับแก้ (ข) หลังการปรับแก้

นอกจากอิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่ส่งผลให้ความเค้นเฉือนมีความแตกต่างกันแล้ว ยังพบว่าความเป็นนอนนิวโตเนียนของยางคอมพาวนด์ยังส่งผลให้มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันตามลักษณะของช่องทางการไหล ซึ่งโดยปกติพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ถูกตั้งสมมติฐานให้มีรูปแบบการไหลแบบพาราโบลา แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น

ไม่ได้เป็นรูปแบบพาราโบลา แต่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ระยะทางและเวลาของการไหล ความเร็วในการไหล ขนาดของหัวขึ้นรูป เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าอัตราเครียดเฉือนจริง (True shear rate, $\dot{\gamma}_{\text{true}}$) จึงต้องปรับแก้ข้อมูลโดยใช้สมการปรับแก้ราบิโนวิทซ์ (Rabinowitch correction) ซึ่งใช้ค่าดัชนีการไหล (n) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกลักษณะและรูปแบบการไหลของยางคอมพาวนด์ เมื่อสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) กับ Log (Shear rate) ดังแสดงในภาพผนวกที่ จ4(ก) สามารถหาค่าดัชนีการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีความยาวต่างกันได้จากความชันของกราฟ และเมื่อนำค่า n ที่ได้ไปหาค่าอัตราเครียดเฉือนจริงจากสมการที่ 23 ความสัมพันธ์ของความหนืดที่ได้จากการปรับแก้พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีระยะทางการไหลต่างกัน มีค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถพิจารณาได้จากภาพผนวกที่ จ4(ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ จ4 กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการปรับแก้ด้วยสมการราบิโนวิทซ์

(ก) ความเค้นเฉือน (ข) ความหนืด

เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าความหนืดปรากฏที่ได้จากการทดสอบและผลของค่าความหนืดจริงที่ได้จากการปรับแก้ทางเข้า และการปรับแก้ด้วยสมการราบิโนวิทซ์ ดังแสดงในภาพที่ 47 และ 48 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของค่าความหนืดที่ได้ไม่แตกต่างกัน

ตารางผนวกที่ จ1 ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 5 mm

shear rate (s ⁻¹)	ΔP (N.m ⁻²)	End correction, e	True shear stress (N.m ⁻²)	Apparent viscosity (Pa.s)
40	3,489,819.83	8.02	81,712.22	2,042.81
60	4,312,911.57	10.19	91,665.26	1,527.75
80	4,894,185.12	11.49	98,572.39	1,232.15
100	5,424,549.58	12.47	105,129.65	1,051.30
120	5,764,004.96	12.70	110,687.31	922.39
250	7,658,646.69	16.91	126,612.92	506.45
500	9,820,929.74	21.57	140,691.59	281.38
750	11,308,667.34	22.63	157,238.08	209.65
1,000	12,490,950.39	23.44	169,855.55	169.86
1,250	13,329,597.08	22.39	186,593.21	149.27

ตารางผนวกที่ จ2 ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 15 mm

shear rate (s ⁻¹)	ΔP (N.m ⁻²)	End correction, e	True shear stress (N.m ⁻²)	Apparent viscosity (Pa.s)
40	7,626,183.47	8.02	79,404.67	1,985.12
60	8,767,457.02	10.19	87,339.19	1,455.65
80	9,845,094.21	11.49	95,598.29	1,194.98
100	10,731,822.31	12.47	102,274.07	1,022.74
120	11,402,186.77	12.70	108,171.93	901.43
250	13,627,737.60	16.91	119,728.50	478.91
500	16,286,384.29	21.57	132,261.24	264.52
750	18,525,030.97	22.63	147,899.72	197.20
1,000	20,572,768.57	23.44	162,153.73	162.15
1,250	22,518,687.99	22.39	180,481.59	144.39

ตารางผนวกที่ จ3 ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 25 mm

shear rate (s ⁻¹)	ΔP (N.m ⁻²)	End correction, e	True shear stress (N.m ⁻²)	Apparent viscosity (Pa.s)
40	10,057,092.56	8.02	67,327.67	1,683.19
60	11,325,638.84	10.19	73,678.35	1,227.97
80	12,174,185.12	11.49	77,881.22	973.52
100	12,997,276.86	12.47	82,123.33	821.23
120	13,654,914.05	12.70	86,019.90	716.83
250	16,275,010.32	16.91	97,364.59	389.46
500	18,895,475.20	21.57	107,073.91	214.15
750	21,325,030.97	22.63	119,409.54	159.21
1,000	22,838,223.12	23.44	126,734.45	126.73
1,250	24,147,778.90	22.39	135,582.97	108.47

ตารางผนวกที่ จ4 ค่าดัชนีการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีระยะทางการไหลต่างกัน

Die length (mm)	5	15	25
Power law index, n	0.38	0.30	0.25

ตารางผนวกที่ จ5 ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 5 mm

Power law index, n	True shear stress (N.m ⁻²)	shear rate (s ⁻¹)	Apparent viscosity (Pa.s)
0.38	81,712.22	56.28	3,489,819.83
0.38	91,665.26	84.42	4,312,911.57
0.38	98,572.39	112.56	4,894,185.12
0.38	105,129.65	140.70	5,424,549.58
0.38	110,687.31	168.84	5,764,004.96
0.38	126,612.92	351.76	7,658,646.69
0.38	140,691.59	703.52	9,820,929.74
0.38	157,238.08	1,055.27	11,308,667.34
0.38	169,855.55	1,407.03	12,490,950.39
0.38	186,593.21	1,758.79	13,329,597.08

ตารางผนวกที่ ๖ ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 15 mm

Power law index, n	True shear stress (N.m ⁻²)	shear rate (s ⁻¹)	Apparent viscosity (Pa.s)
0.30	79,404.67	63.53	7,626,183.47
0.30	87,339.19	95.30	8,767,457.02
0.30	95,598.29	127.07	9,845,094.21
0.30	102,274.07	158.84	10,731,822.31
0.30	108,171.93	190.60	11,402,186.77
0.30	119,728.50	397.09	13,627,737.60
0.30	132,261.24	794.18	16,286,384.29
0.30	147,899.72	1191.27	18,525,030.97
0.30	162,153.73	1588.36	20,572,768.57
0.30	180,481.59	1985.45	22,518,687.99

ตารางผนวกที่ ๗ ข้อมูลที่ได้จากการปรับแก้แบบราบิโนวิชท์ เมื่อช่องทางการไหลมีความยาวเท่ากับ 25 mm

Power law index, n	True shear stress (N.m ⁻²)	shear rate (s ⁻¹)	Apparent viscosity (Pa.s)
0.25	67,327.67	70.06	10,057,092.56
0.25	73,678.35	105.10	11,325,638.84
0.25	77,881.22	140.13	12,174,185.12
0.25	82,123.33	175.16	12,997,276.86
0.25	86,019.90	210.19	13,654,914.05
0.25	97,364.59	437.90	16,275,010.32
0.25	107,073.91	875.80	18,895,475.20
0.25	119,409.54	1,313.70	21,325,030.97
0.25	126,734.45	1,751.60	22,838,223.12
0.25	135,582.97	2,189.50	24,147,778.90



อิทธิพลของอุณหภูมิและระบบการคงรูปที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์
ที่ไหลผ่านช่องทางกรไหลขนาดเล็ก

**The influence of temperature and vulcanization system on rheological properties
of rubber compound during the flow in micro channel**

ญาณิสรา สุขนิยม (Yanisa Sukniyom)¹, กิตติ ชื่นชนม์ (KittiYuenchon)¹,
พิมพ์วิณี เขียวประภัสสร (PimpaweeKeawpapasson)¹ และ
สมเจตน์ พัชรพันธ์ (SomjatePatcharaphun)^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน (Rate-controlled capillary rheometer) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดและอุณหภูมิของช่องทางกรไหล รวมถึงอัตราเครียดเฉือน ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางธรรมชาติซึ่งได้แก่ ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system, CV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system, EV) โดยได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารคงรูปหรือกำมะถัน (Non-sulfur system) จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมกรไหลของยางธรรมชาติที่ไหลผ่านช่องทางกรไหลขนาดเล็กมีพฤติกรรมแตกต่างจากช่องทางกรไหลขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์สมบัติการไหลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการทำนายการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก

คำสำคัญ: ช่องทางขนาดเล็ก คาปิลลารีรีโอมิเตอร์ ยางธรรมชาติ ความหนืดปรากฏ การเลื่อนตัวที่ผนัง

¹ กลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

* อีเมลล์: fengsjpc@ku.ac.th

ABSTRACT

In this work, the controlled rate capillary rheometer was specially designed and constructed in order to measure the apparent viscosity of natural rubber compound during the flow in micro-channel. The influences of processing parameters including die diameter, die temperature, shear rate, and curing system were our main interests. The results obtained by different curing systems i.e. Conventional Vulcanization (CV) and Efficient Vulcanization (EV) were compared with those obtained by non-sulfur system. It can be seen that the apparent viscosity of rubber compound was dependent on die diameter, die temperature, shear rate, and curing system. Furthermore the measured apparent viscosity of rubber compound during the flow in micro-channel was found to be different from standard channel. The obtained results in this work can be used to enhance the accuracy of Computer Aided Engineering (CAE) program for the process simulation of micro-moldings.

Keywords: Micro-channel, Capillary rheometer, Natural rubber, Apparent viscosity, Shear heating, Wall slip

บทนำ

ปริมาณการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเติบโตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ ส่งผลให้มีความจำเป็นต้องมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งศึกษาเพื่อสร้างองค์ความรู้และพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก แต่เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุพอลิเมอร์ทำให้ความเข้าใจทางด้านนี้ยังไม่สามารถแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ทั้งหมด ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงและที่สำคัญไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทได้ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาหรือแก้ปัญหากระบวนการผลิต คือ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ในการแก้ปัญหา ซึ่งอาศัยการจำลองพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์จากแบบจำลองต่างๆ อย่างไรก็ตามผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกแสดงพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนไปเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง (Palmease and Karbhari, 1995; Yao and Kim, 2002; Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2009) เนื่องมาจากแรงตึงผิวที่มีผลต่อการไหลของพอลิเมอร์ ลักษณะพื้นผิวของช่องทางที่พอลิเมอร์ไหลผ่านและที่สำคัญพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวระหว่างพอลิเมอร์และผนัง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองพฤติกรรมการไหลที่ได้รับการพัฒนามาจากช่องทางการไหลที่มีขนาดใหญ่

การตรวจเอกสาร

การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยใช้เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปซึ่งสามารถหาอัตราการไหล (Flow rate) และความดันตกคร่อม (Pressure drop) เพื่อไปคำนวณความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress) อัตราเฉียดเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ที่ผนังของช่องทางการไหลนั้นได้จากสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Poiseuille สำหรับการไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีลักษณะกลม (Circular die)

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

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

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

โดยที่ τ_{app} , $\dot{\gamma}_{app}$ และ η_{app} คือ ความเค้นเฉือนปรากฏ อัตราเฉียดเฉือนปรากฏ และความหนืดปรากฏ ตามลำดับ ΔP คือ ความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของช่องทางการไหล (Pa) Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) R คือ รัศมีของคาปิลลารี (m) และ L คือความยาวของช่องทางการไหล

จากมาตรฐานการวัดสมบัติการไหลที่ใช้ในเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ในปัจจุบัน เมื่อพิจารณาถึงขนาดของหัวขึ้นรูปหรือขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ พบว่า มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ มีขนาดตั้งแต่ 9.5-20 mm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับช่องทางการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดหรือหัวขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ยางขนาดเล็ก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมาก (Chen *et al.*, 2005) จากการศึกษาสมบัติการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเมื่อไหลผ่านช่องทางขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น โดยเฉพาะ พบว่า ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวมีค่าที่ต่ำกว่าการไหลผ่านช่องทางขนาดใหญ่ (Eugene and Hatzikiriakos, 1997; Xu *et al.*, 1999; Young, 2004) โดยมีค่าลดลงประมาณ 1.4 - 4.1 เท่า (Chien *et al.*, 2005) หรือลดลงประมาณ 29-35 เปอร์เซ็นต์ (Chen *et al.*, 2008) ในขณะที่การศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวด์ในช่องทางการไหลขนาดเล็กยังคงพบน้อยมาก ซึ่งนอกจากความแตกต่างด้านขนาดของช่องทางการไหลแล้ว ยังเป็นผลสืบเนื่องมาจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่

ค่าแรงดึงผิวระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลว ความหยาบของผิวแม่พิมพ์ ความร้อนจากการไหล และการเลื่อนตัวบริเวณผิว อย่างไรก็ตามปัจจัยที่เกิดจากค่าแรงดึงผิวระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวและความหยาบของผิวแม่พิมพ์มีผลกระทบน้อยมาก ซึ่งไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง (Aramphongphun and Castro, 2007; Chien *et al.*, 2005)

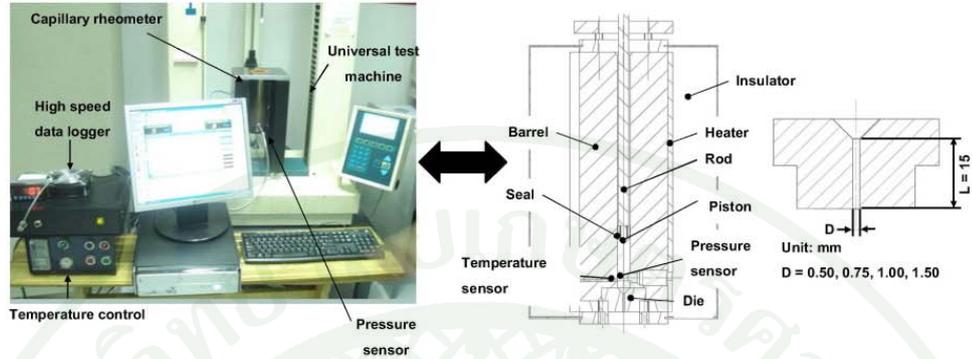
วิธีดำเนินการวิจัย

ส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 ถูกบดผสมด้วยเครื่องบดผสมภายในและเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบสมบัติการไหล ด้วยเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราความเร็วเฉือนซึ่งได้ออกแบบโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM D5099 ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้สภาวะการทดสอบในช่วงอัตราความเร็วเฉือนตั้งแต่ 40 ถึง 250 s^{-1} และใช้อุณหภูมิทดสอบในช่วงระหว่าง 90 ถึง 100°C โดยช่องทางการไหลที่มีขนาดมาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, D) เท่ากับ 1.5 mm และยาว (Length, L) เท่ากับ 15 mm ในขณะที่ช่องทางการไหลขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 500- 1000 μm ซึ่งมีความยาวเท่ากับขนาดมาตรฐานคือ 15 mm ค่าความดันที่วัดได้จากเครื่องมือทดสอบสามารถนำไปคำนวณความเค้นเฉือนปรากฏ อัตราความเร็วเฉือนปรากฏ และความหนืดปรากฏ ดังสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของยางคอมพาวนด์

Ingredients	Contents (phr*)		
	Non sulfur	EV	CV
Natural rubber (STR5L)	100.0	100.0	100.0
Zinc Oxide	4.0	4.0	4.0
Stearic acid	2.0	2.0	2.0
Sulfur	-	0.8	2.4
CBS	0.8	2.4	0.8

*phr = part per hundred of rubber by weight

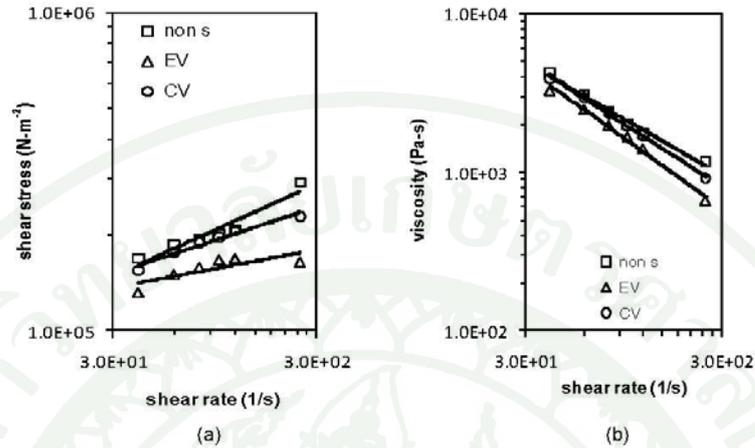


ภาพที่ 2 ชุดทดสอบสมบัติการไหลคาปิลลารีโอมิเตอร์
แบบควบคุมอัตราเครีดเนื้อที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลของการวิจัย

1. อิทธิพลของระบบการควบคุมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเครีดเนื้อของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิการทดสอบ 90°C ดังแสดงในภาพที่ 3(a) พบว่าที่อัตราเครีดเนื้อเดียวกัน ค่าความเค้นเฉือนของยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมสารคงรูปมีค่ามากกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมสารคงรูป ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม และยางคอมพาวนด์ที่ใช้แบบประสิทธิภาพมีค่าความหนืดลดลงตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ (b) ซึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อนตัวของผนัง (Wall slip) ระหว่างยางคอมพาวนด์และผิวช่องทางการไหล โดยการเลื่อนตัวของผนังมีสาเหตุมาจากแรงยึดเกาะกันเองของพอลิเมอร์มีค่าสูงกว่าแรงยึดเกาะที่ผนัง และเกิดขึ้นจากการเชื่อมขวางของยางคอมพาวนด์ที่เติมสารคงรูป ซึ่งเมื่อระดับการคงรูปเกิดขึ้นในระดับหนึ่ง ยางคอมพาวนด์จะเกิดการแยกตัวจากผนัง ส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวได้เพิ่มขึ้น โดยในกรณียางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพมีค่าความหนืดต่ำกว่าแบบดั้งเดิมดังแสดงในภาพที่ 3(b) สามารถอธิบายได้ว่าเวลาเริ่มคงรูปและอัตราการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เติมสารคงรูป ส่งผลต่อระดับการแยกตัวจากผนัง โดยยางคอมพาวนด์ที่มีเวลาเริ่มคงรูปสั้นและมีอัตราการคงรูปสูง (ยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ) มีการแยกตัวจากผนังได้มากกว่า(พิจารณาได้จากผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางดังแสดงในตารางที่ 2)



ภาพที่ 3 ผลของความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนที่อุณหภูมิทดสอบ 90°C (a) ความเค้นเฉือนปรากฏ (b) ความหนืดปรากฏ

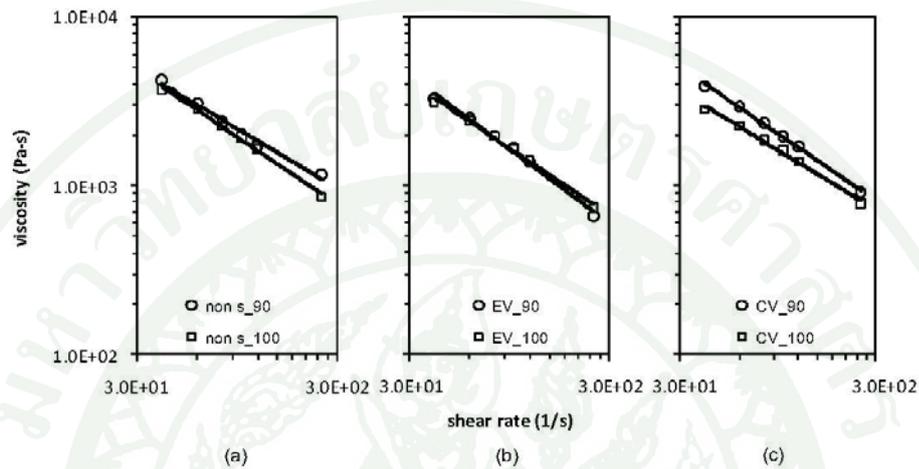
ตารางที่ 2 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

Compounds	Scorch time (min)	Cure time (min)
EV	7.63	10.96
CV	7.90	12.62

2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์แต่ละชนิด พบว่า ยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมสารคงรูปและยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม มีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (ประมาณ 10%) ดังแสดงในภาพที่ 4(a) และ 4(c) โดยยางคอมพาวนด์ไม่เติมสารคงรูปมีความหนืดปรากฏลดลงเนื่องจากอุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลยังเกิดการคลายตัวและขยับตัวออกจากห่างจากกัน ทำให้สามารถเคลื่อนตัวและไหลได้ดีขึ้น แต่ในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมนอกจากเกิดขึ้นจากการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลแล้วยังมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนตัวของผนังดั่งที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ 1 โดยเชื่อมขวางนี้เกิดขึ้นกับยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพเช่นกัน แต่ผลการทดสอบที่ได้จากอุณหภูมิ 90°C และ 100°C มีค่าความหนืดปรากฏที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงได้ในภาพที่ 4(b) ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาสูงส่งผลให้อัตราการคงรูปเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางเกิดขึ้นชั้นผิว (Skin layer) ที่มีความหนาจนขัดขวางการไหล โดยชั้นของยางส่วนแกนกลาง (Core layer) ที่สามารถไหลได้มีขนาดเล็กกลง ทำให้ความหนืด

ปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพที่อุณหภูมิทดสอบ 100°C ใกล้เคียงกับความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ทดสอบด้วยอุณหภูมิ 90°C



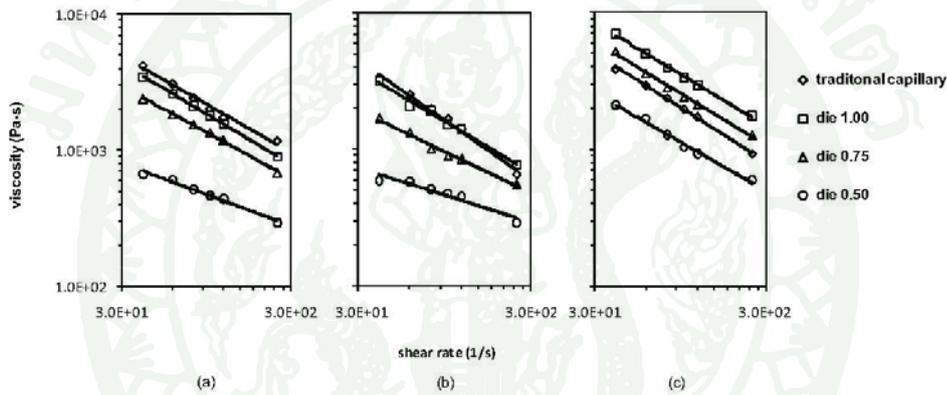
ภาพที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมสารตัวเติม (a) ยางไม่เติมสารคงรูป (b) ยางที่คงรูปด้วยระบบประสิทธิภาพ (c) ยางที่คงรูปด้วยระบบดั้งเดิม

3. อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์

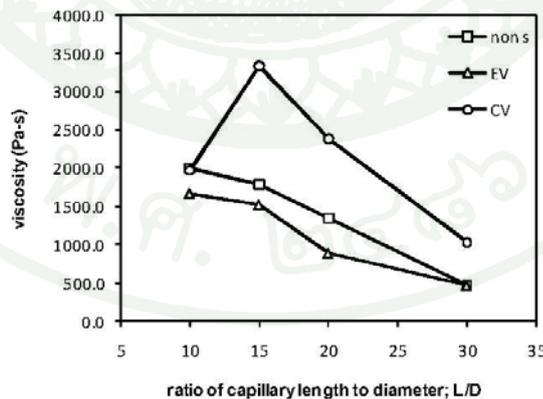
จากผลการทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดตั้งแต่ 500 ถึง $1,500 \mu\text{m}$ โดยใช้อุณหภูมิทดสอบ 90°C ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า ยางคอมพาวนด์มีพฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนขนาดช่องทางการไหล โดยค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งเกิดขึ้นจากความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Lawaland Kalyon, 1996; Sombatsompop and Chaiwattanpipat, 2000; Sombatsompop *et al.*, 2000; Chien *et al.*, 2005) และการเลื่อนตัวที่ผนัง (Chen *et al.*, 2005; Chien *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010) ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ 1 โดยความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาจากช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กซึ่งเมื่อพอลิเมอร์ไหลผ่านเข้าสู่ทางเข้าที่มีขนาดเล็กเกิดการเสียดสีและการขาดกันของสายโซ่โมเลกุล รวมทั้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์มีค่าลดลง โดยงานวิจัยนี้คาดว่าผลกระทบจากปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมสารคงรูปและยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพแต่สำหรับในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม พบว่าผลของความหนืดปรากฏที่ได้มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ความหนืดปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนขนาดช่องทางการไหลจาก $1,500 \mu\text{m}$ เป็น $1,000 \mu\text{m}$ และกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องทางการไหลน้อยกว่า $1,000 \mu\text{m}$ ถึง $500 \mu\text{m}$ ดังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ชัดเจนในภาพที่ 6 กรณีที่เปลี่ยนขนาดช่องทางการไหลจาก $1,500 \mu\text{m}$ เป็น $1,000 \mu\text{m}$ ยางคอมพาวนด์

O-E&T026 หน้า 8-10

มีความหนืดเพิ่มขึ้นจากความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนทำให้ยางคอม-พาวนด์เกิดการเชื่อมขวางขึ้น แต่ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมมีอัตราการคงรูปที่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ดังนั้นการเชื่อมขวางบางส่วนของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมนั้นจะเกิดขึ้นเป็นชั้นที่มีความหนามากกว่า โดยที่บริเวณผิวยังไม่เกิดการหดตัวมากนัก การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดการรั่วของสารไหล แต่เมื่อเปลี่ยนขนาดช่องทางการไหลเป็น 750 μm และ 500 μm ความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น การเชื่อมขวางเกิดขึ้นในปริมาณที่มากขึ้นเป็นผลให้เกิดการหดตัวที่ผิวสัมผัส ซึ่งทำให้ยางคอมพาวนด์เกิดการเลื่อนตัวหลุดจากผนัง



ภาพที่ 5 ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็ก (a) ยางไม่เติมสารคงรูป (b) ยางที่คงรูปด้วยระบบประสิทธิภาพ (c) ยางที่คงรูปด้วยระบบดั้งเดิม



ภาพที่ 6 ความหนืดปรากฏของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมตามอัตราของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาปิลลารี

บทสรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ที่ไหลผ่านคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ที่มีขนาดตั้งแต่ 500-1,500 μm โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 90-100°C และอัตราความเร็วเฉือนที่ 40-250 s^{-1} ของยางคอมพาวนด์ที่ไม่เติมกำมะถันและยางคอมพาวนด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน ได้แก่ ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบคงรูปแบบประสิทธิภาพ ระบบคงรูปแบบดั้งเดิม ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่า ความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ใช้สารคงรูป ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบคงรูปแบบดั้งเดิมและแบบประสิทธิภาพ มีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบส่งผลให้ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ลดลง และจากผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบในช่องทางการไหลขนาดปกติ

เอกสารอ้างอิง

- Aramphongphun, C. and J.M. Castro.2007. Microfluidics rheology of carbon black suspensions for In-Mold Coating applications: some insight into the slip flow phenomena. *Journal of Computer-Aided Materials Design*.14: 31-36.
- Chen, S.C., R.I. Tsai, R.D. Chen and T.K. Lin. 2005.Preliminary study of polymer melt Rheological behavior flowing through through micro-channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 32: 501-510.
- 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 Journal*.44: 1891-1898.
- 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.
- Eugene, E.R., S.G.Hatzikiriakos.1997. Wall slip in the capillary flow of molten polymers subject to viscous heating. *AIChE Journal*. 43-3: 598-608.
- 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.
- Palmese, G.R.and V.M. Karbhari. 1995. Effect of Sizings on Microscopic Flow in Resin Transfer Molding. *Journal of Polymer Composites*. 16: 313-318.
- Sombatsompop, N. and W. Chaiwattanpipat. 2000. Temperature Distributions of Molten Polypropylene During Injection Moulding. *Advances in Polymer Technology*. 19: 79-86.

- Sombatsompop, N. W. Chaiwattanpipat and M. Panapoy. 2000. Melt temperature variations in the barrels of an injection moulder and a twin screw extruder. *Materials Research Innovations*. 3: 271-275.
- Xu, B., K.T. Ooi, T.N. Wong and C.Y. Liu. 1999. Study in the Viscosity of The liquid Flowing in Microgeometry. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 9: 377-384.
- 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*. 9: 377-384.
- Yang S.Y., S.C. Nian, S.T. Huang and Y.J. Weng. 2009. A Study on The Micro-Injection Molding of Multi-Cavity Ultra-Thin Parts. *Journal of Polymers for Advanced Technologies*. 22: 891-902.
- Young. 2004. Simulation of The Filling Process in Molding Components with Micro Channels. *Journal of Microsystem Technologies*. 11: 410-415.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวณัชชา สุขนิยม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
ทุนการศึกษา	ทุนโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา ปี 2553 สัญญา เลขที่ RDG5250058 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการ วิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม