

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมปาวด์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Rheological Study of Rubber Compound during Injection Molding Process

ศิริ อ่อนอ่อน¹ และ สมเจตน์ พชรพันธ์^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.งามวงศ์วาน-ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Sivaree Onouen¹ and Somjate Patcharaphun^{1,*}

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

50 Ngamwongwan Road-Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

Received: MMM DD, YEAR; Revised: MMM DD, YEAR; Accepted: MMM DD, YEAR

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาบดยางให้นิ่ม อัตราครีดยืดหยุ่น อุณหภูมิฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ ได้แก่ ขนาดและลักษณะช่องทางการไหล จากผลการทดสอบพบว่า ความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดหยุ่น เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโพลาสติกของยางคอมปาวด์ และพบว่า การเพิ่มเวลาในการบดยางให้นิ่มและอุณหภูมิฉีด ทำให้เกิดการการตัดขาดและการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางลดลง จากผลการศึกษาขนาดและลักษณะพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่า ยางคอมปาวด์สามารถไหลในช่องทางการไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมปาวด์ขณะไหลได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าลดลงเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวของผนัง จากผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CADMOULD) เปรียบเทียบกับระยะทางการไหลที่วัดได้จากการทดลองจริง พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบจำลอง 2.5 มิติ และจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่า ยังคงมีความแตกต่างจากความเป็นจริง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากข้อกำหนดในการวิเคราะห์และสมมติฐานที่ใช้ ซึ่งได้แก่ ของไหลไม่สามารถเลื่อนตัวได้ที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลมีค่าคงที่ตลอดการไหล ซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: พฤติกรรมการไหล, ยางคอมปาวด์, กระบวนการฉีดขึ้นรูป, ปัจจัยในกระบวนการผลิต, โปรแกรมจำลองการไหล

Abstract

Style Definition: Heading 1: Indent: Left: 0 cm, Hanging: 0.5 cm

Style Definition: Heading 2: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Left: 2.54 cm, Right: 2.54 cm, Top: 2.54 cm, Bottom: 2.54 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Commented [A1]: รบกวนตรวจสอบชื่อนามสกุลและสังกัดว่าถูกต้องพร้อมขึ้นต้นด้วยครับ

Formatted: Superscript

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Not Bold, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New), Not Bold

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Not Bold, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New), Not Bold

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Not Bold, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New), Not Bold

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Font: 12 pt, Not Bold, Complex Script Font: 12 pt, Not Bold

Formatted: Indent: First line: 0.75 cm, Space After: 8 pt

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Space After: 8 pt

Formatted: Right: 0 cm

Formatted: Left, Right: 0 cm, Tab stops: 5.96 cm, Left + 8.92 cm, Centered + Not at 2.11 cm

Formatted: Right: 0 cm

In this study, the effects of process parameters such as mastication time, shear rate, injection and mold temperatures, filler type and content on the rheological behavior of rubber compound were investigated. The influences of mold designs, i.e., type and size of runner were also studied in details. The measured results indicated that the viscosity of rubber compound tended to decrease with increasing shear rate. This was due to the pseudoplastic flow behavior of rubber compound. The results suggested that the increase of mastication time and injection temperature, which can be a source of rubber chain scission and relaxation, enhanced the flowability of rubber compound. On the other hand, the increasing mold temperature and amount of filler loadings tended to decrease the flowability. From the results obtained by using various sizes and cross-sectional area of flow channel, it can be seen that the square runner gave a better flowability as compared to that of half round runner where the higher heat transfer from mold wall can penetrate into the rubber compound. The smaller the size of runner, the lower the viscosity was observed which probably caused by a wall slip phenomenon. Furthermore, the effects of processing parameters on the flowability of rubber compound were extensively verified against the simulated results performed by the commercial simulation package (CADMOULD). The predicted result of flow length obtained from the 3D model was found to be higher than that of 2.5D model. However, the discrepancies were observed which resulted from the assumption of no slip boundary and isothermal flow utilizing in the simulation program.

Keywords: Rheological behavior, Rubber compound, Injection molding, Process parameters, Flow simulation program

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบ (Raw Rubber) ได้มากที่สุด ในโลก อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูปของยางดิบ ทั้งนี้ เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแปรรูปจากยางคอมปาวด์ (Rubber compound) เป็นผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products) นิยมขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางด้านพฤติกรรมการไหล (Rheological behavior) ร่วมกับการออกแบบแม่พิมพ์ (Mold design) เป็นสำคัญ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็น

กระบวนการที่มักพบปัญหาในระหว่างกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) เนื่องจากไม่สามารถกำหนดปัจจัยในการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้ จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่พบว่า มีการศึกษาปัจจัยของช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของวัสดุเทอร์โมพลาสติก และพบว่า เทอร์โมพลาสติกมีพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนไปเมื่อช่องทางการไหลมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและขนาดของช่องทางการไหล [1-3] โดยมีความสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) และความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ในขณะที่การศึกษาศักยภาพการไหลของยางคอมปาวด์จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า โดยส่วนมากเกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านสมบัติการคงรูป (Cure characteristics) ของยางคอมปาวด์ [4,5] ดังนั้นงานวิจัยนี้ออกเหนือจากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาในการบดยางให้

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Indent: First line: 0.75 cm, Space After: 8 pt

Formatted: Font color: Auto, Condensed by 0.25 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Indent: First line: 0.75 cm, Space After: 8 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font color: Auto, Condensed by 0.25 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Distributed, Space After: 8 pt

Formatted: Space After: 8 pt

Formatted: Complex Script Font: 16 pt

Formatted: Heading 1, Left

Formatted

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

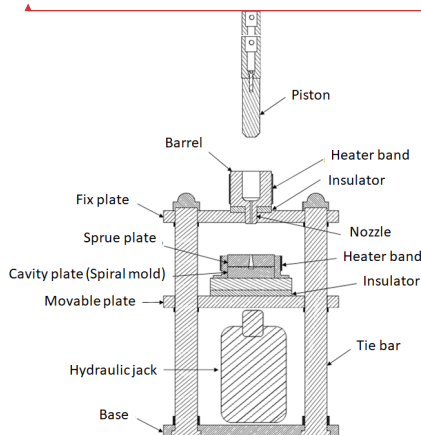
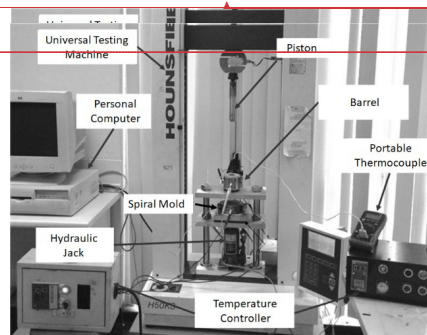
Formatted: Font color: Auto

น้้ม (Mastication time) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อุณหภูมิฉีดยางคอมปาวด์ (Injection temperature) และอัตราครีดยืดเค้น (Shear rate) ปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ได้แก่ ชนิดและขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์แล้ว ยังได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CADMOULD กับผลการทดลองจริง เพื่อเป็นองค์ความรู้และแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D 3123 เพื่อศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ โดยได้ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) เพื่อควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งกด (Piston) และตรวจวัดแรงกดที่เกิดขึ้น ภายใต้สภาวะการทดสอบที่อัตราครีดยืดเค้นต่างๆ โดยได้ทำการติดตั้งชุดควบคุมความร้อนเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR5L ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบดยางให้น้้ม (Mastication time) ชนิดและปริมาณสารตัวเติมซึ่งได้แก่ ซิลิกา (Silica, SiO_2) ของบริษัท Tokuyama Siam Silica Co., Ltd. แคลเซียมคาร์บอเนต (Activated calcium carbonate, CaCO_3) ของบริษัท Heritage Plastic, Inc. และเขม่าดำ (Carbon black, CB) เกรด N330 (Carbon black)

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: +Headings CS (Angsana New), 16 pt

Formatted: Heading 1, Left

Formatted: Centered

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

ของบริษัท Thai Carbon Black Public Co., Ltd. ที่ปริมาณ 15 และ 30 phr ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้ยางคอมปาวด์ทั้งสิ้น 10 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

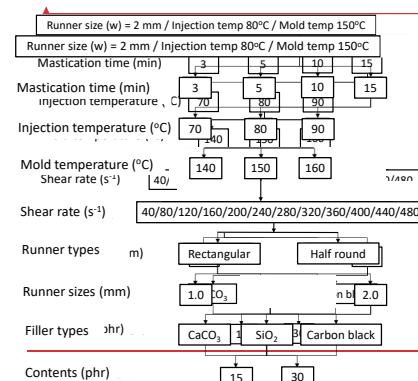
Ingredients	Concentration (phr) ^a			
	NR (cis-1,4)	Carbon Black	SiO ₂	CaCO ₃
NR (cis-1,4)	100	100	100	100
ZnO	4 ⁴	4 ⁴	4 ⁴	4 ⁴
Stearic acid	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²
Carbon black ^a	-	15/30	-	-
SiO ₂ ^a	-	-	15/30	-
CaCO ₃ (light weight) ^a	-	-	-	15/30
SiO ₂ filler ^a	24 ⁴	24 ⁴	24 ⁴	24 ⁴
PEG	-	-	0.9/1.8	-
CBS	0.8 ⁸	0.8 ⁸	0.8 ⁸	0.8 ⁸
Antioxidant ^a	-	1, 2 ²	-	-
Masterbatch (phr)	35/10/15	15 ⁵	15 ⁵	15 ⁵

กรณีสูตรที่มีการบดผสมสารตัวเติม ซิลิกาใช้ร่วมกับสาร PEG และเขม่าดำใช้ร่วมกับน้ำมันอะโรมาติก) นอกจากนี้เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการบดผสมสารตัวเติมได้แบ่งการผสมสารตัวเติมเป็น 3 ครั้ง ในทุกๆ 5 นาที โดยนาที่สุดท้ายให้กวาดสารตัวเติมที่ติดอยู่ตามขอบลงมา แล้วบดผสมจนเวลาครบ 15 นาที ขั้นตอนต่อไปทำการผสมสารเร่งปฏิกิริยาแล้วบดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที ในขั้นตอนสุดท้ายทำการบดผสมกัมมะถันซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคงรูป และบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้ยางคอมปาวด์มีความหนาประมาณ 5 mm และตัดยางคอมปาวด์บางส่วนออกมาเพื่อนำไปทดสอบความหนืดมูนินและสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 150°C ตามมาตรฐาน ISO 289-1:2005 และ ASTM D5289-07a ตามลำดับ

รูปที่ 3 แสดงขอบเขตการศึกษาปัจจัยด้านกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ เวลาในการบดยางให้ نرم (ตั้งแต่ 3 ถึง 15 นาที) อุณหภูมิฉีด (ตั้งแต่ 70 ถึง 90°C) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (ตั้งแต่ 140 ถึง 160°C) อัตราความเร็วฉีดยื่น (ตั้งแต่ 40 ถึง 480 s⁻¹) และปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้แก่ ชนิด (แบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม) และขนาดของช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (1 และ 2 mm) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นเฉือน อัตราความเร็วฉีดยื่น และค่าความหนืด สำหรับช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากหนังสือเรื่อง พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ไหลวนและกลไกการนำไปใช้งาน [6]

^aphr = Part per hundred of rubber by weight

ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ เริ่มจากการชั่งน้ำหนักยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขนาด 8 × 20 นิ้วของบริษัท KODAIRA SEISAKUSHO Co., Ltd. Model R11-3FF โดยบดยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง (บดเย็น) เป็นเวลา 3 5 10 และ 15 นาที ตามที่กำหนดไว้ในแต่ละสูตรเป็นลำดับแรก เพื่อให้ยางธรรมชาติมีความอ่อนตัว จากนั้นเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดเตียริก แล้วจึงทำการผสมสารตัวเติม (ใน



Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Commented [A2]: รบกวนขอให้เปลี่ยนเป็นตารางครับ โดยมีขนาด font ที่ 14 pt ครับ ปัจจุบันเป็นการแทรกรูปภาพ โดยใช้คำอธิบายตารางซึ่งไม่ถูกต้องครับ ท

Formatted: Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: 14 pt, Complex Script Font: 14 pt

Formatted: Font: 14 pt, Complex Script Font: 14 pt

Formatted: Font: 14 pt, Complex Script Font: 14 pt

Formatted: Font color: Auto

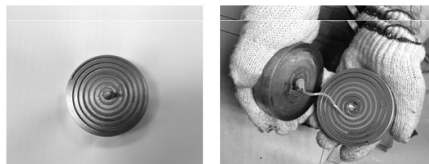
Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

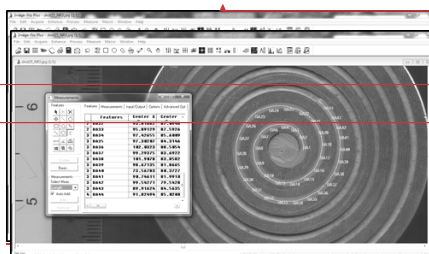
Formatted: Centered

รูปที่ 3 ขอบเขตการศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์
ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากนำยางคอมปาวด์น้ำหนัก
ประมาณ 15 กรัม ใส่ลงไปในกระบอกฉีด (Barrel) และตั้ง
ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีเพื่อให้ยางคอมปาวด์ มีอุณหภูมิฉีด
(Injection temperature) ตามที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการปิด
แม่พิมพ์โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ด้วย
แรงดันเท่ากับ 200 kg/cm^2 และอัดยางคอมปาวด์ที่อยู่ภายใน
กระบอกฉีดด้วยแท่งอัด (Piston) เพื่อให้ยางคอมปาวด์ไหล
เข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่อัตราความเร็วตั้งแต่ 40 ถึง
 480 s^{-1} โดยกำหนดค่าแรงอัดจากชุดดันกำลังจากเครื่อง
UTM ที่ใช้ฉีดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ในภายใน
แม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ คือ $30,000 \text{ N}$ จึงหยุดการเคลื่อนที่ของ
แท่งอัด จากนั้นปล่อยให้ยางคอมปาวด์เกิดกระบวนการคง
รูปภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงรูปภายในแม่พิมพ์
(T_{90}) พิจารณาจากผลการทดสอบเวลาคงรูปที่ได้จากเครื่อง
Moving Die Rheometer (MDR) หลังจากนั้นนำชิ้นงานยาง
ออกจากแม่พิมพ์ โดยลักษณะของชิ้นงานยางคงรูปที่ได้
แสดงในรูปที่ 4 และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ทางที่
ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ (Flow distance) ภายใน
แม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus ดัง
แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ชิ้นงานยางคงรูปภายหลังจากกระบวนการฉีดขึ้น
รูปภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์
โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CADMOULD Version 2.0
และ 5.0 เพื่อวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายใน
แม่พิมพ์ลีดแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ โดย
สามารถกำหนดข้อมูลด้านวัสดุ และตัวแปรใน
กระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อให้โปรแกรมสามารถ
วิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำ ผลการ
วิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับ
ผลการทดสอบจริง แสดงในรูปที่ 6

Formatted: Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Centered

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.25 pt

Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.25 pt

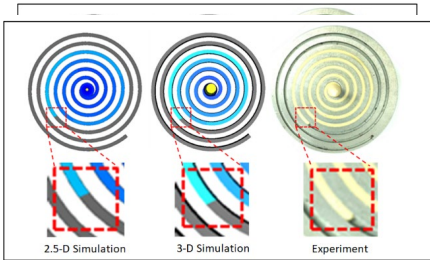
Formatted: Condensed by 0.25 pt

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

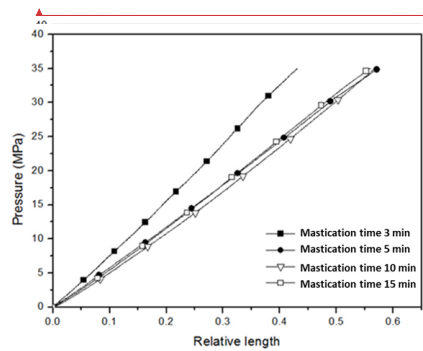
Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระยะทางการไหลระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการฉีดขึ้นรูปจริง

10 และ 15 นาที โดยที่ระยะเวลาบดขย 3 นาที มีระยะทางการไหลน้อยที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาการบดขย ให้นั่มที่ 5 10 และ 15 นาที ระยะทางการไหลมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพันธ์ของยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาบดขย ให้นั่มต่างๆ กัน

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1.3.1 อิทธิพลของเวลาบดขย ที่มีต่อระยะทางการไหล

ของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 7 แสดงผลการตรวจวัดระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ผ่านการบด ให้นั่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 ถึง 15 นาที โดยใช้แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2 mm \times 2 mm) ใช้อุณหภูมิฉีด 80°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และอัตราความเร็วเคลื่อนเท่ากับ 40 s⁻¹ จากผลการทดสอบซึ่งแสดงผลระหว่างความดันที่ใช้ (คำนวณจากค่าแรงกดที่วัดได้จากเครื่อง UTM ต่อพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด) และระยะสัมพันธ์ หรือ Relative length (ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์เมื่อเทียบกับระยะทางการไหลทั้งหมดภายในแม่พิมพ์) พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาในการบดขย ให้นั่ม 3 นาที ต้องใช้แรงดันมากที่สุดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการบดขย ในเวลา 3 นาที สายโซ่โมเลกุลของถูกตัดขาดในปริมาณน้อยทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางยังคงมีค่ามาก [7] เมื่อเทียบกับระยะเวลาบดขย ให้นั่มที่ 5

3.2.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่ 70 ถึง 90°C ที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม เมื่อผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2mm \times 2mm) อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และใช้อัตราความเร็วเคลื่อนเท่ากับ 40 s⁻¹ จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ในช่วงแรกของการไหล (ที่ระยะสัมพันธ์ 0 ถึง 0.1) ค่าแรงดันฉีดที่ใช้เพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าแรงดันฉีดที่ใช้สำหรับอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 70°C มีค่า

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: +Headings CS (Angsana New), 16 pt

Formatted: Font: +Headings CS (Angsana New), 16 pt, Not Bold, Complex Script Font: Not Bold

Formatted: Heading 1

Formatted: Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted: Heading 2, Left

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 2

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm, Right: 0.22 cm

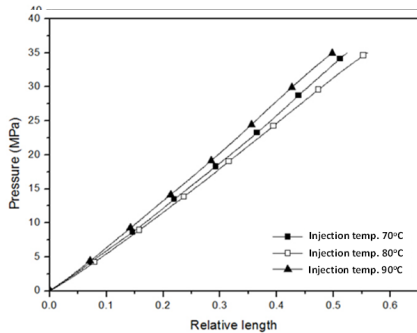
Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

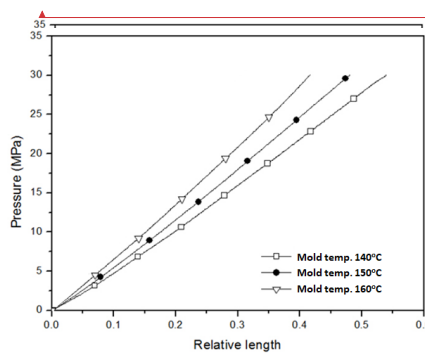
Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font color: Auto

มากกว่าที่อุณหภูมิ 80°C ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 90°C ต้องใช้แรงดันฉีดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิที่อาจส่งผลให้สารคงรูปเริ่มทำปฏิกิริยากับเนื้อยางคอมปาวด์ รวมถึงการเกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อยางขณะไหล ทำให้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้บางส่วน แรงดันที่ใช้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



อุณหภูมิสูง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่บริเวณชั้นผิวของยางและส่งผลผ่านความร้อนเข้าสู่แกนกลางของเนื้อยาง โดยที่บริเวณชั้นผิวได้รับอิทธิพลความร้อนจากแม่พิมพ์มากที่สุด จึงเกิดปฏิกิริยาคงรูปที่ชั้นผิว (Cured skin layer) ก่อน ทำให้ช่องทางการไหลที่บริเวณชั้นแกนกลางมีขนาดลดลง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ยากขึ้น ดังนั้นแรงดันที่ใช้เพื่อให้ยางสามารถไหลได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt, Condensed by 0.3 pt

Formatted: Centered

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพันธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิฉีดต่างๆ กัน

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพันธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

3.3.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

ผลทดสอบการใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในการคงรูปเท่ากับ 140°C , 150°C และ 160°C เมื่อใช้ยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$) อุณหภูมิฉีดเท่ากับ 80°C และใช้อัตราฉีดเนื้อเท่ากับ 40 s^{-1} (รูปที่ 9) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 160°C จำเป็นต้องใช้แรงดันมากที่สุด เพื่อให้ยางสามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ยางคอมปาวด์ไหลภายในแม่พิมพ์ซึ่งมี

3.4.3.4 อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลและอัตราฉีด

เดือนที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 10 แสดงผลของอัตราฉีดเดือนในช่วงระหว่าง 40 ถึง 480 s^{-1} ที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผ่านการบดยางให้นุ่มเป็นเวลา 15 นาที เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ 1 และ 2 mm เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเท่ากับ 80°C และ 150°C

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 2, Left

Formatted: Heading 2

Formatted: Condensed by 0.3 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font color: Auto

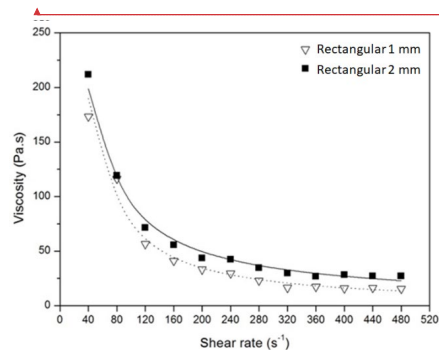
Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.3 pt

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold, Condensed by 0.3 pt

Formatted: Condensed by 0.3 pt

ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราครีปเฉือน โดยทั่วไปพบว่า เมื่ออัตราครีปเฉือนเพิ่มสูง ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทซูโดพลาสติกภายใต้ช่วงอัตราครีปเฉือนที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ยางคอมปาวด์อาจมีพฤติกรรมการไหลหรือความหนืดเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงระยะทางการไหลหรืออัตราครีปเฉือนที่มีค่าสูงชันกว่านี้

นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่าค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวของผนัง (Wall slip) โดยการเลื่อนตัวของผนังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง [1],[8],[9] รวมทั้งอาจเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) [10],[11] ซึ่งเป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีค่าความหนืดลดลงและสามารถไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น

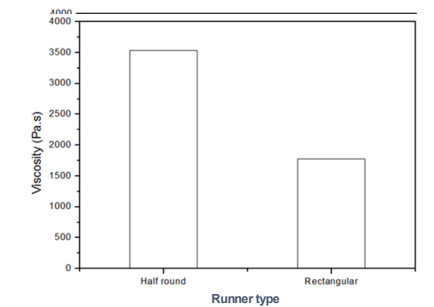


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราครีปเฉือนของยางคอมปาวด์เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดต่างกัน

3.5.3.5 อิทธิพลของชนิดช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืด

ของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่ได้จากการไหลของยางคอมปาวด์ในช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ 2 mm และแบบครึ่งวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 1.6 mm เมื่อใช้อัตราครีปเฉือนคงที่เท่ากับ 40 s^{-1} กำหนดอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ยางที่ไหลผ่านช่องทางการไหลแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมมีค่าความหนืดที่สูงกว่ายางที่ไหลผ่านช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทั้งนี้ได้กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลทั้งสองรูปแบบมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาพื้นที่สัมผัสระหว่างยางคอมปาวด์และผนังแม่พิมพ์ พบว่า ช่องทางการไหลแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์สู่ยางคอมปาวด์ขณะไหลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จึงเกิดชั้นคงรูปที่บริเวณผิวที่หนากว่า ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ยากขึ้น ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น



Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 2, Left

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font color: Auto

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

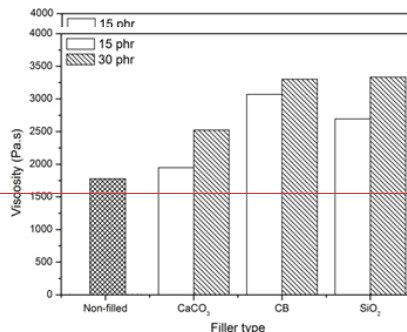
รูปที่ 11 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีรูปแบบต่างกัน

3.6.3-6 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อ

ความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 2 mm) เมื่อใช้อัตราความเร็วเครื่องที่เท่ากับ 40 s^{-1} อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทุกชนิดทำให้ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการผสม CaCO_3 ที่ปริมาณ 30 phr ส่งผลให้ค่าความหนืดของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Activated Calcium Carbonate (ACC) ซึ่งมีการเคลือบผิวอนุภาคด้วยสารกระตุ้นคือกรดสเตียริก (Stearic acid) และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชนิด Ground Calcium Carbonate (GCC) ส่งผลให้สามารถกระจายตัวได้ดีภายในเนื้อยาง ในกรณีของการผสม CB ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) เนื่องจากผิวของอนุภาคมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ คือ ฟีนอลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยาง [12] โดยเมื่อผสมแล้วทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [13]

การเพิ่มขึ้นของความหนืดเมื่อผสม SiO_2 เนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันด้วยแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความแข็งแรงสูง การเกาะเป็นกลุ่มก้อนนี้เรียกว่าแอกริเกต (Aggregate) และเมื่อแอกริเกตเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) จะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-Filler network) ที่รวมตัวเกาะกลุ่มกันอย่างเหนียวแน่นภายในเนื้อยางส่งผลให้ค่าความหนืดมีค่าสูงขึ้น [14]



รูปที่ 12 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่อัตราความเร็วเครื่องเท่ากับ 40 s^{-1} เมื่อผสมสารตัวเติมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

3.7.3-7 การวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายใน

แม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถหรือระยะทางการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 mm โดยใช้โปรแกรม CADMOULD สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณการฉีดจริง โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ มีค่าระยะทางการไหลที่มากกว่า 2.5 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ มีรูปแบบที่ต่างกัน กล่าวคือ การวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ไม่พิจารณาการนำความร้อน (Heat conduction) ในแนวระนาบ (In-plane) แต่พิจารณา

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 2, Left

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 2

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

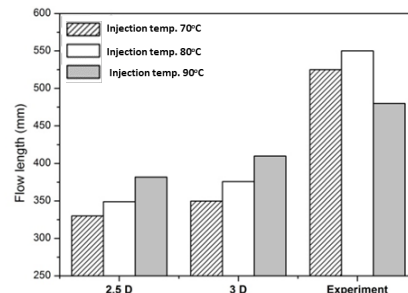
Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

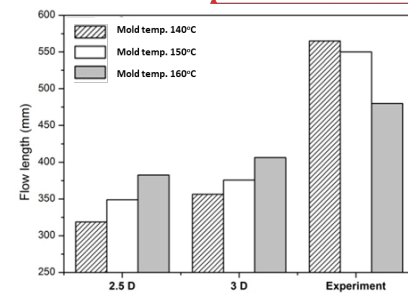
เฉพาะการนำความร้อนในทิศทางความหนา (Thickness direction) รวมและพิจารณาการพาความร้อน (Thermal convection) ในแนวระนาบเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองแบบ 3 มิติ มีการพิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนในทุกทิศทาง [15] ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางแบบ 3 มิติ มีค่ามากกว่าแบบ 2.5 มิติ ทำให้เนื้อยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มาจากแม่พิมพ์มากกว่า นอกจากนี้หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และกระบวนการฉีดจริงพบว่า ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมีค่าระยะทางการไหลที่สั้นกว่าในกระบวนการฉีดจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการฉีดจริงยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน เป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและสามารถไหลได้ง่ายขึ้น อีกทั้งความร้อนเฉือนนี้ยังส่งผลให้ยางคอมปาวด์บริเวณที่ติดกับผนังของช่องทางการไหลเกิดการคงรูปบางส่วนในลักษณะของชั้นคงรูปบางๆ ทำให้เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้ไม่เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลขณะไหลมีค่าคงที่ (Isothermal flow) จากสาเหตุข้างต้น จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง

หากพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยจากกระบวนการผลิตที่มีต่อผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพรูปที่ 13 (a) และ (b) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ ส่งผลให้ค่าระยะทางการไหลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมทั้ง 2.5 และ 3 มิติ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความหนืดของของไหลใช้สมการของ Carreau-WLF ในการวิเคราะห์ [15] โดยอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดลดลง ในขณะที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ทำให้ระยะทางการไหลลดลง โดยมีสาเหตุมาจากยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ

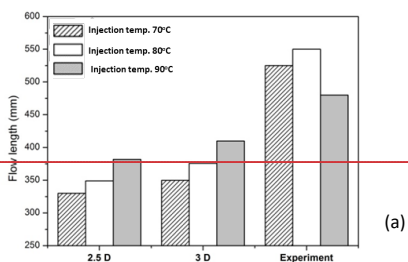
ที่มาจากภายในเนื้อยางและแม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดการคงรูป ความสามารถในการไหลจึงลดลง ซึ่งพฤติกรรมนี้ไม่สอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหล



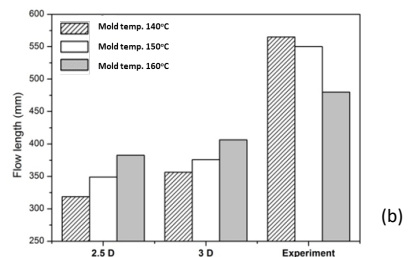
(a)



(b)



(a)



(b)

Formatted: Centered

Formatted: Font: 14 pt, Complex Script Font: 14 pt

Formatted: Centered

Formatted: Centered

Formatted: Centered

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

Formatted: Font: Bold, Complex Script Font: Bold

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2.5D และ 3D เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (a) อุนหนุมิจิต และ (b) อุนหนุมิแม่พิมพ์

4. 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในด้านกระบวนการฉีด การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D3123 ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาบดยางให้นิ่มและอุนหนุมิจิต ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีความสามารถในการไหลภายในแม่พิมพ์ที่ดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุนหนุมิแม่พิมพ์และการผสมสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง จากผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วเคลื่อนที่ของยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทซูโดพลาสติก ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบอัตราเร็วเคลื่อนที่ที่กำหนดไว้จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหน้าตัดและขนาดช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่ายางคอมปาวด์สามารถไหลผ่านช่องทางไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม และความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าช่องทางการไหลขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรม CADMOULD แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ กับผลจากการบดยางจริง พบว่าการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบ 2.5 มิติ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มาจากการเพิ่มอุนหนุมิจิตและอุนหนุมิแม่พิมพ์ยังคงไม่สอดคล้องกับการฉีดจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมมติฐานและข้อกำหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์ แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ

5. 5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. C. Chen, R. I. Tsai, R. D. Chien, and T. K. Lin, "Preliminary study of polymer melt rheological behavior flowing through micro-channels," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 3-4, pp. 501-510, 2005, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.07.004.
- [2] B. Xu, K. T. Ooi, T. N. Wong, and C. Y. Liu, "Study in the viscosity of the liquid flowing in microgeometry," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, no. 4, pp. 377-384, 1999, doi: 10.1088/0960-1317/9/4/315.
- [3] G. R. Palmese and V. M. Karbhari, "Effect of sizing on microscopic flow in resin transfer molding," *Polymer Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 313-318, 1995, doi: 10.1002/pc.750160408.
- [4] C. E. Barnett, "Thermal properties of rubber compounds I. thermal conductivity of rubber and rubber compounding materials," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 263, no. 3, pp. 303-306, 1934, doi: 10.1021/ie50291a018.
- [5] S. Ngamsurat, K. Boonkerd, U. Leela-adison, and P. Potiyaraj, "Curing characteristics of natural rubber filled with gypsum," *Energy Procedia*, vol. 9, pp. 452-458, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.09.051.
- [6] N. Sombatsompop "Polymer Rheology & Applications (Revised and Expanded Version), KMUTT Press, Bangkok, 2005.
- [7] S. S. Choi, "Correlation of crosslink density with pyrolysis pattern of natural rubber vulcanizates with

Formatted: Heading 1, Left

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted

Formatted: Heading 1, Indent: Left: 0 cm, Hanging: 0.5 cm

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), 14 pt, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted

Formatted: Reference_new, Indent: Left: 0 cm, Hanging: 0.63 cm, Right: 0 cm, Adjust space between Latin and Asian text, Adjust space between Asian text and numbers

Formatted: Font: 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Heading 1

Formatted: Indent: First line: 0.5 cm

Formatted

Formatted

Formatted

Formatted: Reference_new, Indent: Left: 0 cm, Hanging: 0.63 cm

Formatted

Formatted

Commented [A3]: ไม่แน่ใจว่าเป็นเอกสารประเภทใดแต่คิดว่าน่าจะเป็นหนังสือ หากเป็นหนังสือรบกวนเขียนตามรูปแบบครับ
J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, (only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), 14 pt, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New), Highlight

Formatted

- efficient vulcanizing cure system,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 52, no. 1, pp. 105–112, 1999, doi: 10.1016/S0165-2370(99)00041-8.
- [8] [8] R.-D. Chien, W.-R. Jong, and S.-C. Chen, “Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1389–1396, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/003.
- [9] [9] C.-S. Chen, S.-C. Chen, W.-L. Liaw, and R.-D. Chien, “Rheological behavior of POM polymer melt flowing through microchannels,” *European Polymer Journal*, vol. 44, no. 6, pp. 1891–1898, 2008, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.03.007.
- [10] [10] A. Lawal, and D. M. Kalyon, “Viscous heating in non-isothermal die flows of viscoplastic fluids with wall slip,” *Chemical Engineering Science*, vol. 52, no. 8, pp. 1323–1337, 1997, doi: 10.1016/S0009-2509(96)00486-1.
- [11] [11] N. Sombatsompop and W. Chaiwattanpipat, “Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 79–86, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1098-2329(200022)19:2<79::AID-ADV1>3.0.CO;2-D.
- [12] [12] *Rubber Technology Handbook*, Hanser Publishers, New York, NY, USA, 1989, pp. xx–xx.
- [13] [13] M. A. Wheelans, “Title of chapter in the book,” in *Injection Moulding of Rubber*, London, UK: Butterworth-Heinemann, 1974, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.
- [14] [14] J. L. Leblanc, “Rubber-filler interactions and rheological properties in filled Compounds,”

Formatted

Formatted

Formatted

Formatted

Commented [A6]: ขอข้อมูลเพิ่มเติมตามไฮไลต์ด้วยครับ

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), 14 pt, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted

Formatted

Formatted

Formatted

Commented [A4]: ขอข้อมูลเพิ่มเติมตามไฮไลต์ด้วยครับ

Formatted

Commented [A5]: ขอข้อมูลเพิ่มเติมตามไฮไลต์ด้วยครับ

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Angsana New), 14 pt, Complex Script Font: +Headings CS (Angsana New)

Formatted