การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมปาวด์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Rhelogical Study of Rubber Compound during Injection Molding Process

ศิวรี อ่อนเอื้อน[1] และ สมเจตน์ พัชรพันธ์[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Sivaree Onouen[1] and Somjate Patcharaphun[1,*]

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

Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

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

Received: Feb 10, 2023; **Revised:** May 10, 2023; **Accepted:** May 10, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาบดยางให้นิ่ม อัตราเครียดเฉือน อุณหภูมิฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ได้แก่ ขนาดและลักษณะช่องทางการไหล จากผลการทดสอบพบว่า ความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเครียดเฉือน เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของยางคอมปาวด์ และพบว่าการเพิ่มเวลาในการบดยางให้นิ่มและอุณหภูมิฉีด ทำให้เกิดการการตัดขาดและการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางลดลง จากผลการศึกษาขนาดและลักษณะพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่า ยางคอมปาวด์สามารถไหลในช่องทางการไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมปาวด์ขณะไหลได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าลดลงเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวที่ผนัง จากผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CADMOULD) เปรียบเทียบกับระยะทางการไหลที่วัดได้จากการทดลองจริง พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบจำลอง 2.5 มิติและจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่า ยังคงมีความแตกต่างจากความเป็นจริง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากข้อกำหนดในการวิเคราะห์และสมมติฐานที่ใช้ ซึ่งได้แก่ ของไหลไม่สามารถเลื่อนตัวได้ที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลมีค่าคงที่ตลอดการไหล ซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: พฤติกรรมการไหล, ยางคอมปาวด์, กระบวนการฉีดขึ้นรูป, ปัจจัยในกระบวนการผลิต, โปรแกรมจำลองการไหล

Abstract

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

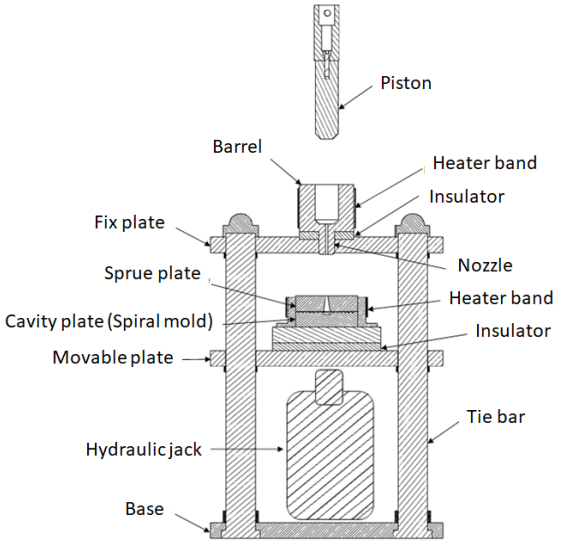
1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาตินับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบ (Raw Rubber) ได้มากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูปของยางดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแปรรูปจากยางคอมปาวด์ (Rubber compound) เป็นผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products) นิยมขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางด้านพฤติกรรมการไหล (Rheological behavior) ร่วมกับการออกแบบแม่พิมพ์ (Mold design) เป็นสำคัญ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มักพบปัญหาในระหว่างกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) เนื่องจากไม่สามารถกำหนดปัจจัยในการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้ จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่พบว่า มีการศึกษาปัจจัยของช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของวัสดุเทอร์โมพลาสติก และพบว่า เทอร์โมพลาสติกมีพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนไปเมื่อช่องทางการไหลมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและขนาดของช่องทางการไหล [1–3] โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) และความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ในขณะที่การศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า โดยส่วนมากเกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านสมบัติการคงรูป (Cure characteristics) ของยางคอมปาวด์ [4],[5] ดังนั้นงานวิจัยนี้นอกเหนือจากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาในการบดยางให้นิ่ม (Mastication time) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อุณหภูมิฉีดยางคอมปาวด์ (Injection temperature) และอัตราเครียดเฉือน (Shear rate) ปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ได้แก่ ชนิดและขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์แล้ว ยังได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CADMOULD กับผลการทดลองจริง เพื่อเป็นองค์ความรู้และแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

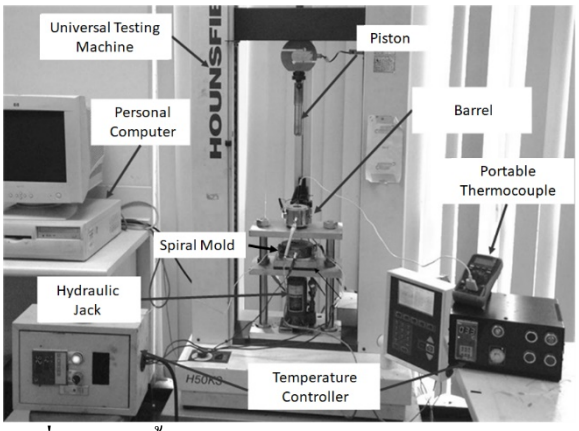
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D 3123 เพื่อศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ โดยได้ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) เพื่อควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของ

แท่งกด (Piston) และตรวจวัดแรงกดที่เกิดขึ้น ภายใต้สภาวะการทดสอบที่อัตราเครียดเฉือนต่างๆ โดยได้ทำการติดตั้งชุดควบคุมความร้อนเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงใน**รูปที่ 1 และ 2**



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR5L ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบดยางให้นิ่ม (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 ของบริษัท Thai Carbon Black Public Co., Ltd. ที่ปริมาณ 15 และ 30 phr ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้ยางคอมปาวด์ทั้งสิ้น 10 สูตร ดังแสดงใน**ตารางที่ 1**

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

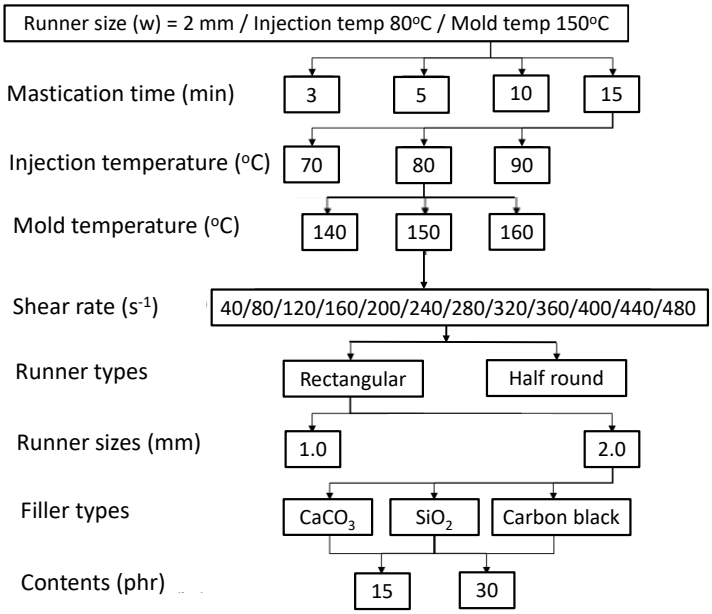
Ingredients	Contents (phr*)			
	Non-filled	Carbon black	SiO_2	$CaCO_3$
NR (STR5L)	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2
Carbon black		15/30		
SiO_2			15/30	
$CaCO_3$				15/30
Sulphur	2.4	2.4	2.4	2.4
PEG			0.9/1.8	
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8
Aromatic oil		1.2		
Mastication time (min)	3/5/10/15	15	15	15

*phr = Part per hundred of rubber by weight

ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ เริ่มจากการชั่งน้ำหนักยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขนาด 8 × 20 นิ้ว ของบริษัท KODAIRA SEISAKUSHO Co., Ltd. Model R11-3FF โดยบดยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง (บดเย็น) เป็นเวลา 3 5 10 และ15 นาที ตามที่กำหนดไว้ในแต่ละสูตรเป็นลำดับแรก เพื่อให้ยางธรรมชาติมีความอ่อนตัว จากนั้นเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูป ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก แล้วจึงทำการผสมสารตัวเติม (ในกรณีสูตรที่มีการบดผสมสารตัวเติม ซิลิกาใช้บดร่วมกับสาร PEG และเขม่าดำใช้บดร่วมกับน้ำมันอะโรมาติก) นอกจากนี้เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการบดผสมสารตัวเติม ได้แบ่งการผสมสารตัวเติมเป็น 3 ครั้ง ในทุก ๆ 5 นาที

โดยนาทีสุดท้ายให้กวาดสารตัวเติมที่ติดอยู่ตามขอบลงมา แล้วบดผสมจนเวลาครบ 15 นาที ขั้นตอนต่อไปทำการผสมสารเร่งปฏิกิริยาแล้วบดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที ในขั้นตอนสุดท้ายทำการบดผสมกำมะถันซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคงรูป และบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้ยางคอมปาวด์มีความหนาประมาณ 5 mm และตัดยางคอมปาวด์บางส่วนออกมาเพื่อนำไปทดสอบความหนืดมูนนีและสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ ที่อุณหภูมิ 150°C ตามมาตรฐาน ISO 289-1:2005 และ ASTM D5289-07a ตามลำดับ

รูปที่ 3 แสดงขอบเขตการศึกษาปัจจัยด้านกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ เวลาในการบดยางให้นิ่ม (ตั้งแต่ 3 ถึง 15 นาที) อุณหภูมิฉีด (ตั้งแต่ 70 ถึง 90°C) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (ตั้งแต่ 140 ถึง 160°C) อัตราเครียดเฉือน (ตั้งแต่ 40 ถึง 480 s^{-1}) และปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้แก่ ชนิด (แบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม) และขนาดของช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (1 และ 2 mm) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นเฉือน อัตราเครียดเฉือน และค่าความหนืด สำหรับช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากหนังสือเรื่อง พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน [6]

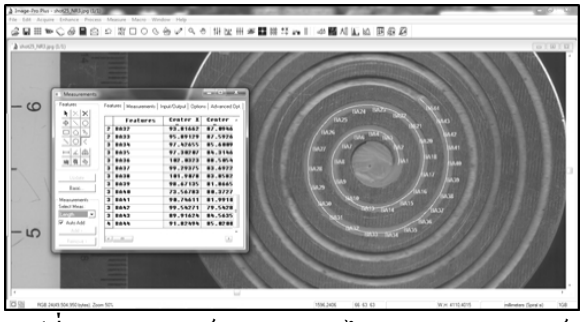


รูปที่ 3 ขอบเขตการศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากนำยางคอมปาวด์น้ำหนักประมาณ 15 กรัม ใส่ลงไปในกระบอกฉีด (Barrel) และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีเพื่อให้ยางคอมปาวด์ มีอุณหภูมิฉีด (Injection temperature) ตามที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ด้วยแรงดันเท่ากับ 200 kg/cm^2 และอัดยางคอมปาวด์ที่อยู่ภายในกระบอกฉีดด้วยแท่งอัด (Piston) เพื่อให้ยางคอมปาวด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่อัตราเครียดเฉือนตั้งแต่ 40 ถึง 480 s^{-1} โดยกำหนดค่าแรงอัดจากชุดต้นกำลังจากเครื่อง UTM ที่ใช้ฉีดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ภายในแม่พิมพ์มีค่าเท่ากัน คือ 30,000 N จึงหยุดการเคลื่อนที่ของแท่งอัด จากนั้นปล่อยให้ยางคอมปาวด์เกิดกระบวนการคงรูปภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงรูปภายในแม่พิมพ์ (T_{90}) พิจารณาจากผลการทดสอบเวลาคงรูปที่ได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) หลังจากนั้นนำชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ โดยลักษณะของชิ้นงานยางคงรูปที่ได้แสดงใน**รูปที่ 4** และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดระยะทางที่ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ (Flow distance) ภายใน

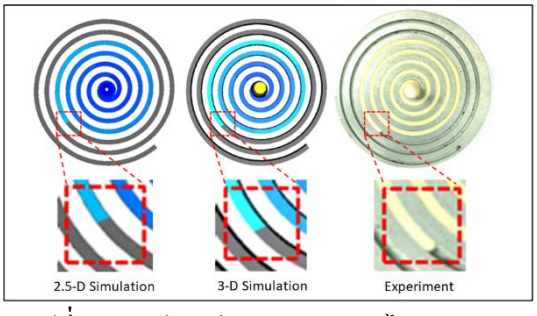
แม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus ดังแสดงใน**รูปที่ 5**

รูปที่ 4 ชิ้นงานยางคงรูปภายหลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CADMOULD Version 2.0 และ 5.0 เพื่อวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์ฉีดแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ โดยสามารถกำหนดข้อมูลด้านวัสดุ และตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง แสดงใน**รูปที่ 6**

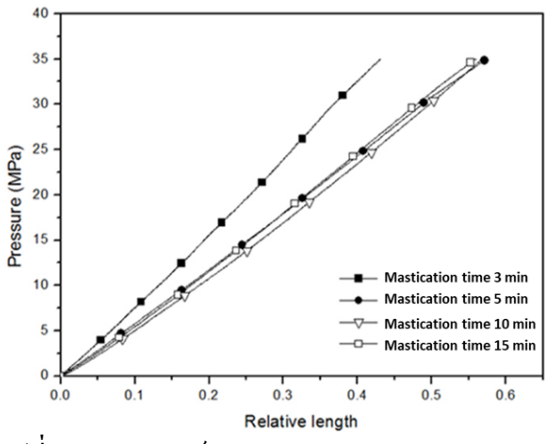


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระยะทางการไหลระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการฉีดขึ้นรูปจริง

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1. อิทธิพลของเวลาบดยางที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

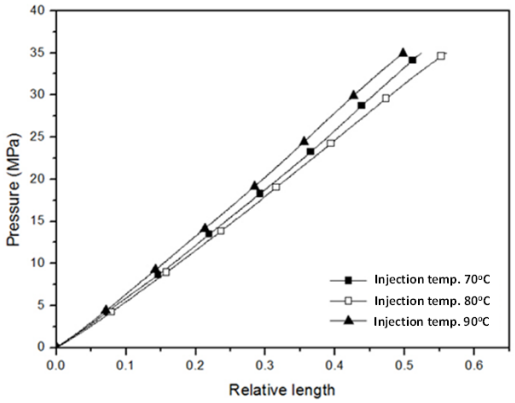
รูปที่ 7 แสดงผลการตรวจวัดระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ผ่านการบดให้นิ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 ถึง 15 นาที โดยใช้แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2 mm × 2 mm) ใช้อุณหภูมิฉีด 80°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และอัตราเครียดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} จากผลการทดสอบซึ่งแสดงผลระหว่างความดันที่ใช้ (คำนวณจากค่าแรงกดที่วัดได้จากเครื่อง UTM ต่อพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด) และระยะสัมพัทธ์ หรือ Relative length (ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์เมื่อเทียบกับระยะทางการไหลทั้งหมดภายในแม่พิมพ์) พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาในการบดยางให้นิ่ม 3 นาที ต้องใช้แรงดันมากที่สุดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการบดยางในเวลา 3 นาที สายโซ่โมเลกุลยางถูกตัดขาดในปริมาณน้อยทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางยังคงมีค่ามาก [7] เมื่อเทียบกับระยะเวลาบดยางให้นิ่มที่ 5 10 และ 15 นาที โดยที่ระยะเวลาบดยาง 3 นาที มีระยะทางการไหลน้อยที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาการบดยางให้นิ่มที่ 5 10 และ 15 นาที ระยะทางการไหลมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพัทธ์ของยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาบดยางให้นิ่มต่างๆ กัน

3.2.อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

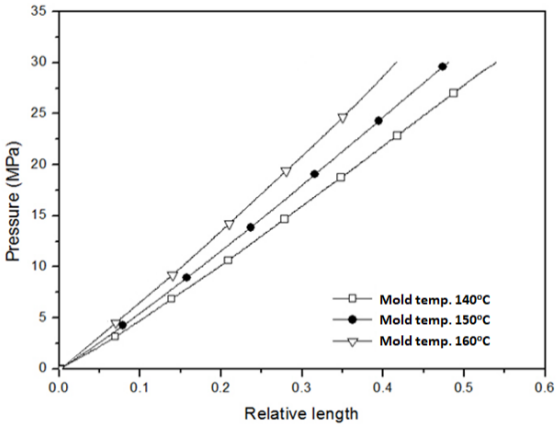
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่ 70 ถึง 90°C ที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม เมื่อผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2mm × 2mm) อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และใช้อัตราเครียดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} จากการทดลองดังแสดงใน**รูปที่ 8** พบว่า ในช่วงแรกของการไหล (ที่ระยะสัมพัทธ์ 0 ถึง 0.1) ค่าแรงดันฉีดที่ใช้เพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าแรงดันฉีดที่ใช้สำหรับอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 70°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 80°C ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 90°C ต้องใช้แรงดันฉีดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิฉีดที่อาจส่งผลให้สารคงรูปเริ่มทำปฏิกิริยากับเนื้อยางคอมปาวด์ รวมถึงการเกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อยางขณะไหล ทำให้ยางสามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้บางส่วน แรงดันที่ใช้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพัทธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิฉีดต่าง ๆ กัน

3.3.อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

ผลทดสอบการใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในการคงรูปเท่ากับ 140 150 และ160°C เมื่อใช้ยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2mm × 2mm) อุณหภูมิฉีดเท่ากับ 80°C และใช้อัตราเครียดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} (**รูปที่ 9**) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 160°C จำเป็นต้องใช้แรงดันมากที่สุด เพื่อให้ยางสามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ยางคอมปาวด์ไหลภายในแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่บริเวณชั้นผิวของยางและส่งผ่านความร้อนเข้าสู่แกนกลางของเนื้อยาง โดยที่บริเวณชั้นผิวได้รับอิทธิพลความร้อนจากแม่พิมพ์มากที่สุด จึงเกิดปฏิกิริยาคงรูปที่ชั้นผิว (Cured skin layer) ก่อน ทำให้ช่องทางการไหลที่บริเวณชั้นแกนกลางมีขนาดลดลง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ยากขึ้น ดังนั้นแรงดันที่ใช้เพื่อให้ยางสามารถไหลได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



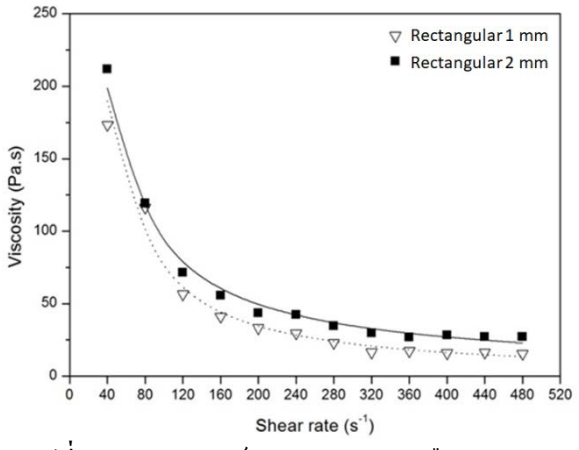
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพัทธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

3.4.อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลและอัตราเครียดเฉือนที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 10 แสดงผลของอัตราเครียดเฉือนในช่วงระหว่าง 40 ถึง 480 s^{-1} ที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผ่านการบดยางให้นิ่มเป็นเวลา 15 นาที เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ 1 และ 2 mm เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราเครียดเฉือน โดยทั่วไปพบว่า เมื่ออัตราเครียดเฉือนเพิ่มสูง ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้

เนื่องจากยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทซูโดพลาสติกภายใต้ช่วงอัตราเครียดเฉือนที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ยางคอมปาวด์อาจมีพฤติกรรมการไหลหรือความหนืดเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงระยะทางการไหลหรืออัตราเครียดเฉือนที่มีค่าสูงขึ้นกว่านี้

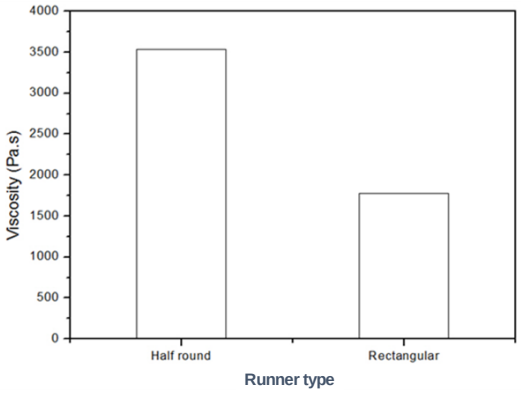
นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่าค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) โดยการเลื่อนตัวที่ผนังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง [1],[8],[9] รวมทั้งอาจเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating)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



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราเครียดเฉือนของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดต่างกัน

3.5.อิทธิพลของชนิดช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

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



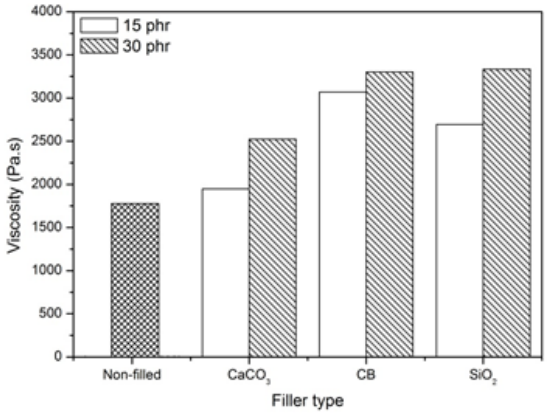
รูปที่ 11 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีรูปแบบต่างกัน

3.6.อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 2 mm) เมื่อใช้อัตราเครียดเฉือนคงที่เท่ากับ 40 s^{-1} อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ ดังแสดงใน**รูปที่ 12** พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทุกชนิดทำให้ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการผสม $CaCO_3$ ที่ปริมาณ 30 phr ส่งผลให้ความหนืดของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Activated Calcium Carbonate (ACC) ซึ่งมีการเคลือบผิวอนุภาคด้วยสารกระตุ้นคือกรดสเตียริก (Stearic acid) และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชนิด Ground Calcium Carbonate (GCC) ส่งผลให้สามารถกระจายตัวได้

ดีภายในเนื้อยาง ในกรณีของการผสม CB ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) เนื่องจากผิวของอนุภาคมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ คือ ฟีนอกลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยาง [12] โดยเมื่อบดผสมแล้วทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [13]

การเพิ่มขึ้นของความหนืดเมื่อผสม SiO_2 เนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันด้วยแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความแข็งแรงสูง การเกาะเป็นกลุ่มก้อนนี้เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) และเมื่อแอกกรีเกตเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) จะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-Filler network) ที่รวมตัวเกาะกลุ่มกันอย่างเหนียวแน่นภายในเนื้อยางส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น [14]



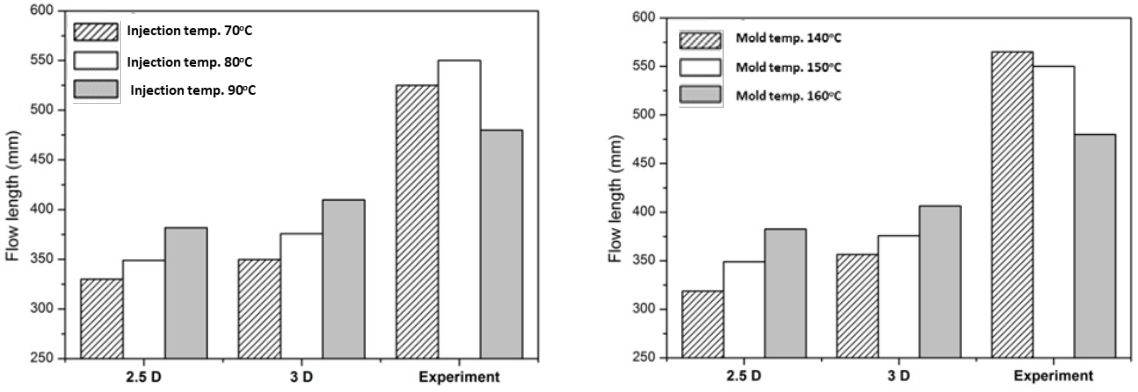
รูปที่ 12 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่อัตราเครียดเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} เมื่อผสมสารตัวเติมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

3.7.การวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถหรือระยะทางการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 mm โดยใช้โปรแกรม CADMOULD สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการฉีดจริง โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**รูปที่ 13** พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ มีค่าระยะทางการไหลที่มากกว่า 2.5 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ มีรูปแบบที่ต่างกัน กล่าวคือ การวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ไม่พิจารณาค่าการนำความร้อน (Heat conduction) ในแนวระนาบ (In-plane) แต่พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนในทิศทางความหนา (Thickness direction) รวมและพิจารณาค่าการพาความร้อน (Thermal convection) ในแนวระนาบเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองแบบ 3 มิติ มีการพิจารณาค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนในทุกทิศทาง [15] ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางแบบ 3 มิติ มีค่ามากกว่าแบบ 2.5 มิติ ทำให้เนื้อยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มาจากแม่พิมพ์มากกว่า นอกจากนี้หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และกระบวนการฉีดจริงพบว่า ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมีค่าระยะทางการไหลที่สั้นกว่าในกระบวนการฉีดจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการฉีดจริงยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน เป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและสามารถไหลได้ง่ายขึ้น อีกทั้งความร้อนเฉือนนี้ยังส่งผลให้ยางคอมปาวด์บริเวณที่ติดกับผนังของช่องทางการไหลเกิดการคงรูปบางส่วนในลักษณะของชั้นคงรูปบางๆ ทำให้เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้ไม่เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลขณะไหลมีค่าคงที่ (Isothermal flow) จากสาเหตุข้างต้น จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง

หากพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยจากกระบวนการผลิตที่มีต่อผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงใน**รูปที่ 13(a)–(b)** พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิ

แม่พิมพ์ ส่งผลให้ค่าระยะทางการไหลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมทั้ง 2.5 และ 3 มิติ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความหนืดของของไหลใช้สมการของ Carreau-WLF ในการวิเคราะห์ [15] โดยอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดลดลง ในขณะที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ทำให้ระยะทางการไหลลดลง โดยมีสาเหตุมาจากยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มาจากภายในเนื้อยางและแม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดการคงรูป ความสามารถในการไหลจึงลดลง ซึ่งพฤติกรรมนี้ไม่สอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหล



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2.5D และ 3D เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (**a**) อุณหภูมิฉีด และ (**b**) อุณหภูมิแม่พิมพ์

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในด้านกระบวนการฉีด การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D3123 ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาบดยางให้นิ่มและอุณหภูมิฉีด ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีความสามารถในการไหลภายในแม่พิมพ์ที่ดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และการผสมสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง จากผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเครียดเฉือนพบว่า ยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทซูโดพลาสติก ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบอัตราเครียดเฉือนที่กำหนดไว้ จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหน้าตัดและขนาดช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่ายางคอมปาวด์สามารถไหลผ่านช่องทางไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม และความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าช่องทางการไหลขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรม CADMOULD แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ กับผลจากกระบวนการฉีดจริง พบว่าการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบ 2.5 มิติ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มาจากการเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ยังคงไม่สอดคล้องกับการฉีดจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมมติฐานและข้อกำหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์ แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. C. Chen, R. I. Tsaia, 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. 26, 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 "Rheological behaviors of molten polymer" in *Polymer Rheology & Applications (Revised and Expanded Version)*, Bangkok, Thailand: KMUTT Press, 2005, ch. 2, pp.7–24.

[7] S. -S. Choi, "Correlation of crosslink density with pyrolysis pattern of natural rubber vulcanizates with 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] 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] 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] 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] 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] W. Hofmann "Filler characteristics" in *Rubber Technology Handbook*, Hanser Publishers, New York, NY, USA, 1989, pp. 275–290.

[13] B. Rodgers "General compounding" in *Rubber Compounding; Chemistry and Application*, New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc., 1994, ch.8, pp. 365–378.

[14] J. L. Leblanc, "Rubber-filler interactions and rheological properties in filled Compounds," *Progress in Polymer Science*, vol. 27, no. 4, pp. 627–687, 2002, doi: 10.1016/S0079-6700(01)00040-5.

[15] P. Kennedy, "Governing equation for fluid flow" in *Flow Analysis of Injection Molds*, New York, NY, USA: Hanser Publishers,1995, ch. 4, pp. 41–55