การกำหนดความเร็วฉีดพลาสติกที่เหมาะสมจากกราฟเวลาฉีด-ความเร็วฉีด

Determining proper plastic injection velocity from an injection time vs injection velocity graph

สมโชค สนธิแก้ว[1*], นพดล คุ้มอนุวงศ์[1]

[1]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126-ถนนประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ แขวงบางมด จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10140

*ติดต่อ: somchoke.son@kmutt.ac.th, 02-470-9205, 02-872-9080

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดความเร็วฉีดพลาสติกที่เหมาะสมจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีดและความเร็วฉีด (Injection time-velocity graph หรือ กราฟ IT) และเปรียบเทียบกับกราฟความหนืดสัมพัทธ์กับความเร็วฉีด (Relative viscosity-injection velocity graph หรือ กราฟ RV) ในงานศึกษานี้ได้ทำการทดลองฉีดขึ้นรูปเพื่อสร้างกราฟ IT และ RV ของพลาสติกสี่ชนิดได้แก่ PP (Polypropylene) HDPE (High density polypropylene) PS (Polystyrene) และ HIPS (High impact polystyrene) พบว่ากราฟ RV และ IT ให้เส้นกราฟมีรูปร่างเหมือนกัน และพลาสติกทั้ง 4 ชนิดให้กราฟ IT ที่มีลักษณะเหมือนกันหมด นอกจากนี้ IT กราฟสามารถสร้างได้จากสมการอัตราการไหลของพลาสติกหลอมในกระบอกฉีด กราฟที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองมีลักษณะเส้นกราฟเหมือนกัน แสดงว่ากราฟความสัมพันธ์ของเวลาและความเร็วฉีดขึ้นอยู่กับขนาดกระบอกฉีดและปริมาณพลาสติกที่จะฉีด ดังนั้นกราฟ IT ที่คำนวณจากขนาดกระบอกฉีดและปริมาณพลาสติกที่จะฉีดสามารถใช้ประเมินความเร็วฉีดหรือเวลาฉีดที่เหมาะสมได้โดยไม่จำเป็นต้องทดลองฉีดเพื่อสร้างกราฟ IT

คำหลัก: ความเร็วฉีด, เวลาฉีด, ความหนืด, การฉีดขึ้นรูปพลาสติก

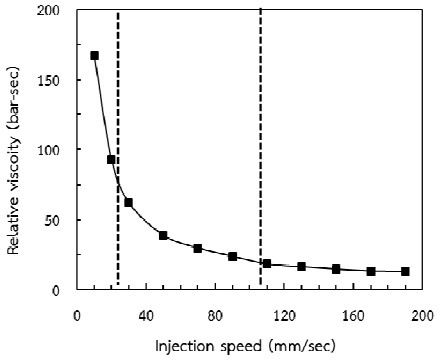
Abstract

This paper proposed a new method to determine a proper injection velocity from an injection time vs injection velocity graph (or IT graph) and compared IT graph to relative viscosity vs injection velocity graphs (or RV graph). This work performed injection-molding experiment to develop IT and RV graphs of four plastic materials, PP (Polypropylene), HDPE (High-density polypropylene), PS (Polystyrene) and HIPS (High impact polystyrene). It was found that RV and IT curves showed the same shape. Of all plastics, IT curves were almost identical each other. Besides, IT graph can be developed from the equation of volume flow rate of plastic melt in an injection barrel. The calculated IT graph and IT graph obtained from the test were identical. It implied that the IT graph characteristic depended on diameter of the injection barrel and the injection volume. Therefore, the IT graphs calculated from a barrel size and injection volume can be used to evaluate a proper injection velocity or injection time without performing any experiment to develop the IT graphs.

Keywords: Injection velocity, Injection time, Viscosity, Plastic injection molding

1. บทนำ

ในอุตสหกรรมฉีดพลาสติกได้มีการนำเสนอวิธีการกำหนดความเร็วฉีดหรือเวลาฉีดที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยการสร้างกราฟความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity graph) หรือ กราฟ RV ที่ความเร็วฉีด (injection velocity) หรือเวลาฉีด (Injection time) ต่างๆ กัน [1-4] ดังแสดงในรูปที่ 1 การทดลองฉีดเพื่อสร้างกราฟด้วยวิธีนี้ ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษใดๆ นอกจากเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงาน การสร้างกราฟทำได้ด้วยการทดลองฉีดเติมพลาสติกให้ได้ร้อยละ 80-90 ของโพรงแบบที่ความเร็วฉีดต่างๆกันโดยไม่มีการฉีดย้ำ อ่านและบันทึกผลความดันฉีดเติม (Actual injection pressure) และเวลาฉีดที่เกิดขึ้น (Actual injection time) จริงจากจอแสดงผลของเครื่องฉีดพลาสติก นำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟ RV โดยให้ความหนืดสัมพัทธ์เป็นแกนตั้ง (y-axis) ส่วนแกนนอน (x-axis) เป็นความเร็วฉีด ความหนืดสัมพัทธ์ได้จากความดันฉีดเติมที่เกิดขึ้นคูณกับเวลาฉีดเติม (Relative viscosity = Actual injection pressure x Actual injection time) จากรูปที่ 1 เส้นกราฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือช่วงความเร็วฉีดต่ำ ปานกลาง และสูง จะเห็นว่าที่ช่วงความเร็วฉีดต่ำ ความหนืดของพลาสติกหลอมสูง เมื่อความเร็วฉีดเพิ่มมากขึ้นความหนืดจะลดลงเป็นเชิงเส้นที่มีความชันมาก แสดงว่าเมื่อความเร็วฉีดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงมาก ช่วงความเร็วฉีดปานกลาง เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหักศอก ความหนืดของพลาสติกลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และช่วงความเร็วฉีดสูง พลาสติกหลอมมีความหนืดต่ำสุด เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นแนวราบ ความหนืดค่อนข้างคงที่และไม่ไวต่อความเร็วฉีด แนะนำว่าควรเลือกใช้ความเร็วฉีดที่เหมาะสมในช่วงนี้ เพราะจะทำให้คุณภาพของชิ้นงานคงที่ไม่เปลี่ยนตามความหนืด นอกจากนี้การเลือกใช้ความเร็วฉีดสูง จะให้รอบเวลาฉีดสั้น แต่ความเร็วฉีดไม่ควรสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ชิ้นงานพลาสติกมีตำหนิเช่น มีรอยพ่น (jetting) (5) ผิวด้าน หรือผิวเป็นรอยถลอก



รูปที่ 1 แสดงกราฟ RV ของการฉีดพลาสติก

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีดและความเร็วฉีด (Injection time-velocity graph หรือ IT graph) พิจารณาจากอุปกรณ์การฉีดพลาสติกซึ่งมีรูปร่างเป็นท่อทรงกระบอก และมีสกรูดันฉีดพลาสติกหลอมเข้าสู่แม่พิมพ์ การคำนวณหาอัตราการฉีดพลาสติก (Volume flow rate, Q) สามารถหาได้จากผลคูณของพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกกับความเร็วฉีด (S) ตามสมการที่ (1)

$$Q = \frac{\pi D^2 \times S}{4} \qquad (1)$$

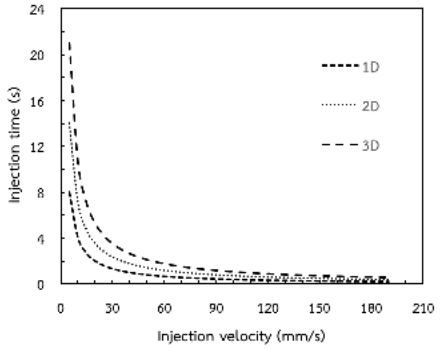
โดย Q คืออัตราการฉีด (mm^3/s) S คือความเร็วฉีด (mm/s) และ D (mm) คือเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกฉีด เวลาฉีดเติม (Injection time, t) คำนวณจากปริมาตรชิ้นงานฉีด (Injection volume, V) ส่วนด้วยอัตราการฉีด (Q)

$$t = \frac{V}{Q}$$

แทนค่า Q จากสมการ (1) จะได้

$$t = \frac{4V}{S\pi D^2} \qquad (2)$$

ซึ่งสมการนี้เป็นไปตามกฎของปัวซอยย์ (Poiseuille's law) เมื่อนำสมการที่ (2) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีด (*t*) กับ ความเร็วฉีด (*S*) จะได้กราฟแสดงในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้ขนาดกระบอกฉีด (*D*) = 35 mm และระยะชักของสกรู 35 mm (*1D*) 70 mm (*2D*) และ 105 mm (*3D*)



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีดกับความเร็วฉีดด้วยสมการ

จะเห็นว่ากราฟรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาความเร็วฉีดที่เหมาะสมจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีดกับความเร็วฉีด และเปรียบเทียบกับ RV กราฟ โดยได้ทดลองฉีดพลาสติก 4 ชนิดได้แก่ PP (Polypropylene), HDPE (High density polypropylene), PS (Polystyrene) และ HIPS (High impact polystyrene)

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุอุปกรณ์

เครื่องฉีดพลาสติก ENGEL รุ่น ES 200/50 HL ให้ความดันฉีดไฮดรอลิก 200 bar และแรงปิดแม่พิมพ์ 500 kN เส้นผ่าศูนย์กลางของสกรูฉีด 35 mm ขนาดรูฉีด 4 mm รัศมีหัวฉีด 35 mm สามารถฉีดพลาสติกได้น้ำหนักสูงสุด 120 g ความเร็วฉีดสูงสุด 192 mm/s ความดันฉีดสูงสุดที่หัวฉีด 1060 bar แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ทดลองมี 2 โพรงแบบสำหรับฉีดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638-80 ปริมาตรโพรงแบบรวมระบบป้อนประมาณ 34 cm^3 วัสดุพลาสติกสำหรับงานฉีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) พอลิพอพีลีน (Polypropylene, PP) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS) ก่อนนำไปฉีดชิ้นงานทดสอบต้องนำวัสดุทั้งสองชนิดไปอบที่ 80°C ในตู้อบลมร้อน ระยะเวลาอบ 3 ชม.

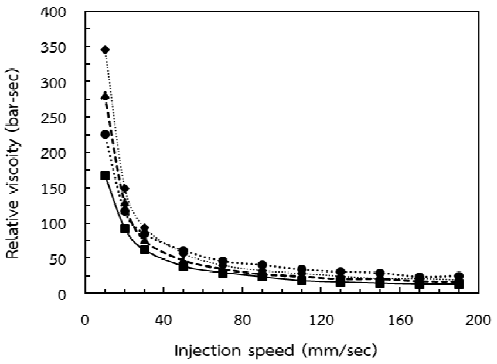
2.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบหาความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity) ของพลาสติกหลอมที่ถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ความเร็วฉีด 190, 170, 150, 130, 110, 90, 70, 50, 30, และ 10 mm/s ในการทดลองฉีดชิ้นงาน ให้ตั้งความเร็วฉีดสูงสุด 190 mm/s ตั้งความดันฉีดเติม 200 บาร์ ความดันย้ำเป็น 0 bar และเวลาฉีดย้ำ 0 s แรงปิดแม่พิมพ์ 150 kN บันทึกข้อมูลการฉีดแต่ละครั้งได้แก่ ความเร็วฉีดที่เกิดขึ้นจริง (Actual injection velocity), เวลาฉีดเติม (Injection time), ความดันไฮดรอลิคที่ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีด (Hydraulic pressure at switchover) จากนั้นทดลองฉีดและบันทึกผลที่ความเร็วฉีดอื่นๆ ตามที่กำหนดข้างต้น สำหรับอุณหภูมิกระบอกฉีดพลาสติกมี 4 ช่วงนับจากหัวฉีดดังนี้ อุณหภูมิฉีด PS 215 220 200 180°C อุณหภูมิฉีด PP 220 220 200 190°C อุณหภูมิฉีด HDPE 210 220 170 160°C อุณหภูมิฉีด HIPS 190 190 180 170°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 50°C สำหรับพลาสติกทุกชนิด

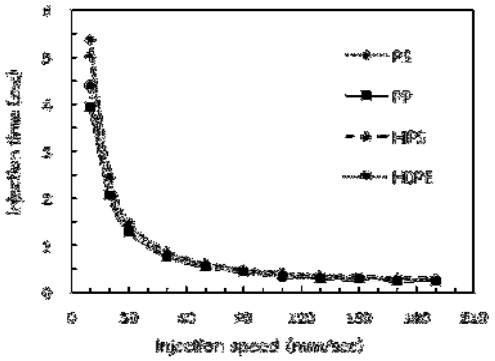
3. ผลการทดลอง

จากการทดลองฉีดพลาสติก 4 ชนิดคือ PP, HDPE, PS และ HIPS เพื่อสร้างกราฟ RV ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแกนตั้งของกราฟนี้ได้จากผลคูณของเวลาฉีดกับความดันฉีดเติม ส่วนแกนนอนเป็นความเร็วฉีด กราฟสามารถแบ่ง

ออกเป็นออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงความเร็วต่ำ 10-20 mm/s ช่วงความเร็วปานกลาง 20-90 mm/s และช่วง 90-190 mm/s กราฟทุกเส้นมีลักษณะเหมือนกันแต่ไม่ทับกัน เนื่องจากความดันฉีดซึ่งเป็นผลจากความหนืดของพลาสติกแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

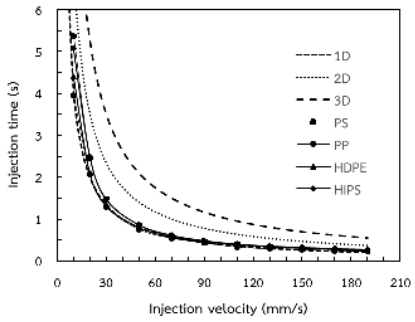


รูปที่ 3 แสดงกราฟ RV จากการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงกราฟ IT จากการทดลอง

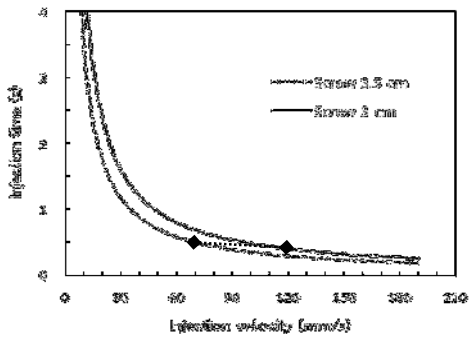
เมื่อเขียนกราฟระหว่างเวลาฉีดกับความเร็วฉีด (หรือ IT กราฟ) โดยตัดตัวคูณความดันออกไป จะได้กราฟดังรูปที่ 4 จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะเหมือนรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นว่ากราฟทุกเส้นเกือบทับกันตลอดช่วงความเร็วฉีด เพราะได้ตัดเทอมความดันฉีดเติมทิ้งไป เทอมความดันฉีดเติมมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนืดของพลาสติก แสดงว่าลักษณะเส้นกราฟไม่ขึ้นกับความหนืดของพลาสติก และเมื่อสร้าง IT ด้วยสมการที่ (2) และเปรียบเทียบกราฟ IT จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟ IT เปรียบเทียบกับกราฟ IT จากการคำนวณของเครื่องขนาดเส้นผศก (D) 35 มม. ระยะชัก 1D 2D และ 3D

จะเห็นว่ากราฟ IT ของพลาสติกทุกชนิดมีลักษณะเหมือนกราฟที่คำนวณด้วยสมการที่ (2) ที่ปริมาตรฉีด 1D โดยปกติแม่พิมพ์ชุดเดียวกัน เมื่อใช้เครื่องฉีดพลาสติกที่มีขนาดสกรูต่างกัน จะต้องใช้ความเร็วฉีดไม่เท่ากันเพื่อให้เวลาฉีดเท่ากัน ซึ่งจะทำให้อัตราเฉือนที่ทำกับพลาสติกที่ไหลในแม่พิมพ์เท่ากัน ดังนั้น IT กราฟสามารถใช้ประเมินความเร็วฉีดที่เหมาะสมได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วกว่า RV กราฟ

การฉีดพลาสติกในโรงงานอุตสาหกรรม บ่อยครั้งมักเกิดปัญหาชิ้นงานฉีดไม่ได้คุณภาพเหมือนเดิม เมื่อมีการย้ายแม่พิมพ์ไปฉีดด้วยเครื่องที่มีขนาดสกรูแตกต่างกัน ที่



รูปที่ 6 กราฟ IT จากการคำนวณของเครื่องฉีดขนาด ∅35 mm และ ∅30 mm ด้วยปริมาตรฉีด

เป็นเช่นนี้เพราะว่าความหนืดของพลาสติกขึ้นอยู่กับเวลาฉีดพลาสติก ถ้าเวลาฉีดน้อย อัตราเฉือนมากจะทำให้ความหนืดของพลาสติกหลอมลดลง เช่นเมื่อมีการเปลี่ยนไปใช้เครื่องฉีดที่มีขนาดสกรูใหญ่หรือเล็กกว่า แต่ยังใช้ความเร็วฉีดเท่าเดิม จะทำให้เวลาฉีดไม่เท่าเดิม ผลทำให้พลาสติกที่ไหลเข้าโพรงแบบได้รับอัตราเฉือนต่างกัน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก

จากรูปที่ 6 ถ้าฉีดพลาสติกด้วยเครื่องฉีดขนาดสกรูหรือกระบอกฉีด 35 mm ระยะชักสกรู 1D (35 mm) คิดเป็นปริมาตรฉีด 34 cm^3 และเลือกใช้ความเร็วฉีดประมาณ 70 mm/s แต่ถ้าเปลี่ยนเป็นเครื่องฉีดพลาสติกขนาดสกรู 30 mm ด้วยปริมาตรฉีดเท่าเดิม ระยะชักสกรูจะมากขึ้น จะต้องใช้เลือกความเร็วฉีด 120 mm/s เพื่อให้ได้เวลาฉีดเท่าเดิม ซึ่งจะให้ความหนืดของพลาสติกเท่ากัน ดังนั้นกราฟ IT สามารถช่วยหาความเร็วฉีดที่เหมาะสม เมื่อมีการย้ายแม่พิมพ์ฉีดไปใช้กับเครื่องฉีดพลาสติกที่มีขนาดสกรูที่ต่างกัน

4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีกำหนดความเร็วฉีดเพื่อให้ได้เวลาฉีดที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์และเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานฉีดพลาสติก ด้วยการใช้สมการพื้นฐานในการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาฉีดกับความเร็วฉีด (กราฟ IT) และได้นำมาเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าเส้นกราฟจากการคำนวณและการทดลองเป็นเส้นเดียวกัน โดยไม่คำนึงถึงชนิดพลาสติก ลักษณะของกราฟ RV และ IT น่าจะเป็นผลมาจากลักษณะทรงกระบอกของชุดฉีดและปริมาณพลาสติกที่ฉีดมากกว่าความเป็นของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) ของพลาสติก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] 1. J.P. Beaumont and J. Ralston, U.S. Patent 9,097565 (2015).

[2] Sean Mertes, Charlie. Carlson, John. Bozzelli and Mike Groleau (2001), “What position on the viscosity curve is the most repeatable with respect to end of fill cavity PSI,” paper presented in ANTEC conference, 2001, Dallas, Texas, USA.

[3] Chung-Chih Lin, Wen-Teng Wang, Chin-Chiuan Kuo and Chieh-Liang Wu (2014), Experimental and Theoretical Study of Melt Viscosity in Injection Process, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol. 8, No. 7, 2014, pp. 687-691.

[4] D. Hoffman (2013), A New Look at Evaluating Fill Times for Injection Molding, Plastics Technology Magazine, August 2013.

[5] Shaozhen Hua, Shixun Zhang, Wei Cao, Yaming Wang, Chunguang Shao, Chuntai Liu, Binbin Dong and Changyu Shen (2016), Simulation of Jetting in Injection Molding Using a Finite Volume Method, Polymers Vol. 8, Issue 5, 2016.