การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อรอยยุบตัวของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปพลาสติก

ภาสกร จั่นชาวนา[1,*], มนัส เหรัญญกิจ[2], สถาพร ชาตาคม[3]
[1, 2, 3]ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received: 22 June 2020
Revised: 17 March 2021
Accepted: 18 March 2021

บทคัดย่อ

ปัญหารอยยุบตัวในกระบวนการฉีดพลาสติกส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาทดลองกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปพลาสติก เพื่อแก้ไขปัญหารอยยุบตัว ชิ้นงานผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ที่มีความหนาโดยเฉลี่ย 5.87 มิลลิเมตร โดยทำการเปรียบเทียบพลาสติก 2 กลุ่มได้แก่ พลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก (พอลิโพรไพลีน) และพลาสติกในกลุ่มอสัณฐาน (อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน) ศึกษาความดันในช่วงการอัด 300, 600, 900 กิโลนิวตัน และระยะในการอัด 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Moldex3D พบว่าพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึกวิเคราะห์ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกพบรอยยุบตัว 0.419 มิลลิเมตร และเมื่อวิเคราะห์ด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติกพบรอยยุบตัว 0.228, 0.190, 0.164 และ 0.150 มิลลิเมตร ตามลำดับ พลาสติกในกลุ่มอสัณฐานวิเคราะห์ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกพบรอยยุบตัว 0.125 มิลลิเมตร และเมื่อวิเคราะห์ด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติกพบรอยยุบตัว 0.092, 0.059, 0.038 และ 0.026 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการฉีดอัดพลาสติกช่วยลดรอยยุบตัวของพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก 0.499 มิลลิเมตร และพลาสติกในกลุ่มอสัณฐานมีรอยยุบตัวลดลง 0.188 มิลลิเมตร ที่ระยะในการอัด 1.5 มิลลิเมตร ความดันในการอัด 600 กิโลนิวตัน

คำสำคัญ: รอยยุบตัว กระบวนการฉีดอัดพลาสติก ความดันในการอัด ระยะในการอัด

[*] ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: peembangmod@gmail.com

Analysis of Parameters Affecting the Product's Sink Mark from Injection Molding Process

Passakorn Janchaowna[1,*], Manat Hearunyakij[2], Sathaporn Chatakom[3]
[1, 2, 3]Mechanical Engineering Department, College of Industrial Technology,
King Monkut's University of Technology North Bangkok

Received: 22 June 2020
Revised: 17 March 2021
Accepted: 18 March 2021

Abstract

Problems of sink marks in the plastic injection process affect the quality of the work piece. This study aimed to investigate the plastic injection molding process to solve the problem of product deflection for packaging products with an average thickness of 5.87 mm. The research was done to compare two groups of plastics: semi-crystalline plastics (Polypropylene) and amorphous plastics (Acrylonitrile-butadiene-styrene). This research studied the pressure in the compression ranges of 300, 600, and 900 kN and the compression ranges of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mm. The results of analysis of the finite element process with Moldex3D program showed that the semi crystalline plastics which were analyzed by the plastic injection process resulted in finding a 0.419 mm abrasion, and when analyzed by the injection molding process, the deflation marks were 0.228, 0.190, 0.164 and 0.150 mm respectively. The amorphous plastics which were analyzed by the plastic injection process resulted in finding a 0.125 mm crease, and when analyzed by the injection molding process, the cracks were 0.092, 0.059, 0.038 and 0.026 mm respectively. From the results of the experiment, it was found that the injection molding process reduced the collapse of the semi-crystalline plastics 0.499 mm and the amorphous plastics had a decrease of 0.188 mm at the compression distance of 1.5 mm under the compression pressure of 600 kN.

Keywords: Sink mark, Injection molding process, Compression pressure, Compression distance

* Corresponding Author; Email: peembangmod@gmail.com

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการฉีดอัดพลาสติกเป็นกระบวนการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพในเรื่องของปริมาณและขนาดชิ้นงาน โดยเริ่มจากการหลอมเม็ดพลาสติกด้วยแรงตัดเฉือนและอุณหภูมิสูง อัดพลาสติกหลอมเหลวด้วยความดันเข้าสู่โพรงแบบของแม่พิมพ์และทำการลดอุณหภูมิในเวลาที่รวดเร็วเม็ดพลาสติกจะมีรูปร่างเช่นเดียวกับโพรงแบบของแม่พิมพ์ ภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีการแข่งขันในเรื่องรูปลักษณ์ของบรรจุภัณฑ์เป็นอย่างมากปัญหาที่พบได้บ่อยจากกระบวนการฉีดพลาสติกคือปัญหารอยยุบตัว (Sink Mark) มักจะเกินเกณฑ์ที่ลูกค้ายอมรับได้ที่ผ่านมามีแนวทางการแก้ไขเช่น เพิ่มปริมาณพลาสติก (Shot Size) เพิ่มแรงดันฉีด (Injection Pressure) และเพิ่มแรงดันฉีดย้ำ (Holding Pressure) ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) เพิ่มมากขึ้นบางครั้งชิ้นงานยังคงมีรอยยุบตัวในตำแหน่งที่ไกลจากทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) เนื่องจากแรงดันในการฉีดย้ำไม่สามารถเข้าถึงได้

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการฉีดอัดพลาสติก (Injection Compression Molding, ICM) ซึ่งแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่จะทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงดันภายในแม่พิมพ์เพื่อทำให้โพรงแบบมีแรงดันที่ใกล้เคียงกันและลดปัญหาเรื่องรอยยุบตัวในจุดที่แรงดันจากทางเข้าน้ำพลาสติกไปไม่ถึงโดยทำการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยวิเคราะห์เพื่อหาจุดสมดุลของระยะการอัดและแรงดันในการอัดเพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองต่อไป

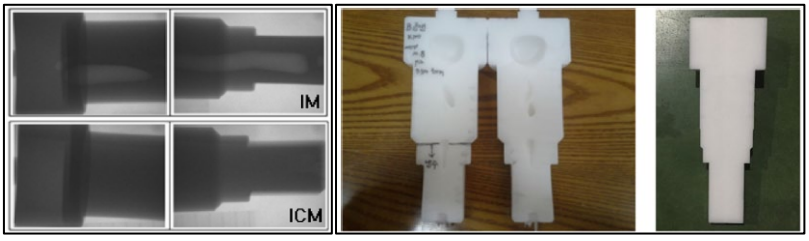
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษารอยยุบตัว (Sink Mark) เมื่อทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ความดันในการอัด (Compression Pressure) และระยะในการอัด (Compression Distance)
2. เปรียบเทียบปัญหารอยยุบตัวของพอลิเมอร์ในกลุ่ม Amorphous และ Semi-crystalline

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหารอยยุบตัวและการประยุกต์ใช้กระบวนการฉีดอัดพลาสติกผู้วิจัยได้นำปัญหามาศึกษาวิเคราะห์ และค้นคว้าหาที่มาจากแหล่งข้อมูลต่างๆพบว่า (Ming-Shyan and Chin-Feng, 2010) ทำการศึกษาทดลองใช้กระบวนการฉีดอัดพลาสติก (ICM) กับชิ้นงานแผ่นพลาสติกนำแสง มีลักษณะบางและมีพื้นผิวเป็นร่องตัว V กว้าง 0.010 mm ลึก 0.005 mm มุม 90° พบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์และอุณหภูมิการหลอมเหลวเป็นปัจจัยสำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็กรวมถึงตัวแปรของกระบวนการเช่น ความเร็วในการฉีดและความเร็วในการบีบอัด กระบวนการฉีดอัดพลาสติก (ICM) ทำให้ผิวของชิ้นงานสมบูรณ์มากกว่ากระบวนการแบบปกติจากผลการทดลองยังกล่าวว่าการฉีดชิ้นงานขนาดเล็กที่มีผนังบางจำเป็นต้องใช้ความเร็วในการฉีดสูง (Han et al., 2016) พบปัญหาในการผลิตส่วนประกอบของวาล์วแก๊สปัญหา คือเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานได้ทำการศึกษาการแก้ไขปัญหาด้วยกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปพลาสติกก่อนการทดลองได้ทำการผ่านวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ากระบวนการฉีดปกติเกิดการหดตัวของชิ้นงานมากถึง 20.22% และกระบวนการฉีดอัดพลาสติกเกิดการหดตัวของชิ้นงาน 6.65% การทดลองปรับฉีดพลาสติกกระบวนการฉีดพลาสติก V/P Switch Over อยู่ที่ 99% ของการเติมเต็มพลาสติก กระบวนการฉีดอัดพลาสติก V/P Switch Over อยู่ที่ 105% ที่ระยะในการบีบอัด 5 mm ของปริมาตรโพรงแบบที่มีระยะในการบีบอัด พบว่าการทดลองฉีดพลาสติกเปรียบเทียบระหว่าง 2 กระบวนการและทำการ X-Ray ชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโพรงอากาศชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติกไม่มีโพรงอากาศภายในจากนั้นทำการตัดผ่าชิ้นงานเพื่อตรวจสอบซ้ำเพื่อยืนยันผลพบว่าผลเป็นเช่นเดียวกับการตรวจสอบด้วยการ X-Ray

(Isik Isil and Miko, 2015) ศึกษาการผลิตจอภาพด้วยกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการผลิตจอภาพ (Liquid Crystal Displays) จากการทดลองผลิตด้วยกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปพลาสติก พบว่าสามารถลดปัญหาการบิดงอของจอภาพได้ได้มากถึง 16% (Wei-Sheng and Han-Xiong, 2012) ทำการศึกษาการไหลกลับของพลาสติกภายในโพรงแบบระหว่างกระบวนการบีบอัด (Back Melt Flow) ชิ้นงานมีลักษณะเป็นสี่เหลียมผืนผ้าขนาด 150 x 20 x 2 mm พบว่า (1) เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt Temperature) สูงขึ้นส่งผลให้การไหลกลับของน้ำพลาสติกมากขึ้นในช่วงแรกของกระบวนการและการไหลกลับจะลดลงเมื่อกระบวนการดำเนินต่อไป (2) ความดันในการอัด (Compression Pressure) 165-270 kN เกิดการไหลกลับสูงขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้ายของกระบวนการยกเว้นในกรณีความดันในการอัด 130 kN ซึ่งเกิดการไหลกลับมากขึ้นในช่วงท้าย (3) ความเร็วในการบีบอัด (Compression Speed) ที่ส่งผลดีอยู่ระหว่าง 10–15 mm/s เมื่อความเร็วในการบีบอัดสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการไหลกลับมากขึ้น (4) ระยะในการบีบอัด (Compression Distance) และความเร็วในการฉีด (Injection rate) ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานน้อยมาก การไหลกลับของน้ำพลาสติกภายในโพรงแบบเกิดจากกระบวนการอัดพลาสติก (Compression Stage) ที่บริเวณทางเข้า (Gate) ยังไม่แข็งตัวตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้เกิดการไหลกลับของน้ำพลาสติกคือการใช้แรงในการอัดที่สูงและระยะในการอัดที่น้อยส่วนตัวแปรอื่นมีผลน้อยมาก (Jae-Yun Ho et al., 2012) ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการสร้างแบบจำลองสามมิติของอุปกรณ์เลนส์แว่นตาด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติกทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการฉีดอัดพลาสติกจากผลการวิเคราะห์พบว่ากระบวนการฉีดอัดพลาสติก (ICM) ส่งผลทำให้ลดอัตราการกระจายและเพิ่มความสม่ำเสมอของแรงเฉือน (Shear Force) และความเค้น (Stress) ระหว่างการขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานเลนส์ที่ผลิตนั้นลดการหักเหของแสงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เลนส์นั้นต้องการนอกจากนี้ยังอธิบายไว้ถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดอัดพลาสติกคือ ความเร็วในการบีบอัดและระยะในการบีบอัด (Nitikanchanatal et al., 2018) ศึกษาวิเคราะห์การหดตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกรีไซเคิลทำการศึกษาแบบจำลองวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS plastics กำหนด mesh เป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยม โดยใช้วัสดุชนิด PP (r-PP) ดัชนีการไหล 26.58 g/10min วัสดุแม่พิมพ์ P20 จากผลการจำลองโดยใช้ค่าตั้งต้นของโปรแกรม SOLIDWORK plastic พบว่าเกิดการหดตัวสูงสุด 18.915% ภายหลังเมื่อผ่านกระบวนการทากุชิและนำพารามิเตอร์ไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอีกครั้งพบว่ามีค่าหดตัวสูงสุดอยู่ที่ 15.1719% พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการหดตัวคือ อุณหภูมิหลอมเหลว เวลาในการฉีดย้ำ แรงดันในการฉีดย้ำ เวลาหล่อเย็น และอุณหภูมิแม่พิมพ์ตามลำดับ



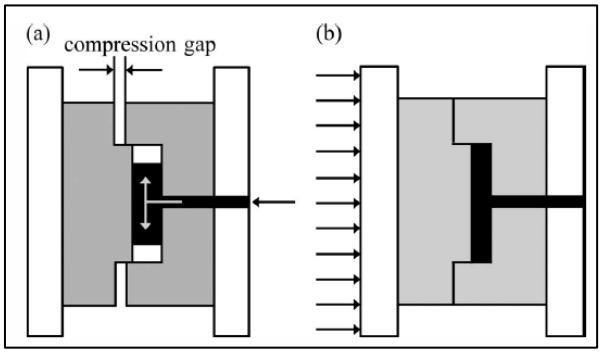
ภาพที่ 1 (ซ้าย) ภาพ X-ray ชิ้นงานของทั้ง 2 กระบวนการ **(ขวา)** ภาพชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการฉีดอัดพลาสติก (Han et al., 2016)

กระบวนการฉีดอัดพลาสติก (Injection Compression Molding)

กระบวนการฉีดอัดพลาสติกเป็นกระบวนการที่รวมข้อดีของ 2 กระบวนการเข้าด้วยกันคือ กระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการอัดพลาสติกจุดเด่นที่สำคัญของกระบวนการฉีดอัดพลาสติกคือการกระจายแรงดันภายในโพรงแบบด้วยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ในจังหวะการฉีดย้ำทำให้แรงดันภายในแม่พิมพ์นั้นกระจายใกล้เคียงกันทั้งโพรงแบบส่งผลให้เกิดข้อดีหลายประการเช่น ลดแรงดันในการฉีด ลดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน ลดการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ลดรอยยุบตัวและการบิดงอ ลดการหักเหของแสงสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะใส ลดเวลาการผลิตต่อรอบมีส่วนทำให้ขนาดของชิ้นงานแม่นยำขึ้นและเป็นการระบายอากาศแต่การเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่นั้นจำเป็นต้องมีระยะในการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นจุดอ่อนของกระบวนการเนื่องจากทำให้การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์มีความซับซ้อนมากขึ้นเช่นเมื่อทำการเติมพลาสติกเข้าสู่โพรงแบบมากเกินไปก่อนเริ่มกระบวนการอัดทำให้เกิดปัญหาครีบ (Flash) และชิ้นงานที่มีลักษณะลึกในทิศทางการฉีดจะไม่เหมาะกับกระบวนการนี้เนื่องจากทำการเติมเนื้อพลาสติกในโพรงแบบได้น้อยกว่าชิ้นงานที่มีลักษณะแบน และกว้างตามทิศทางการฉีด

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการฉีดอัดพลาสติก

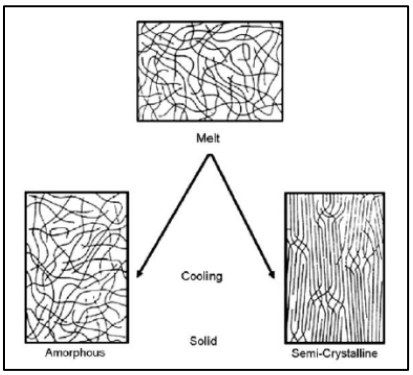
กระบวนการฉีดอัดพลาสติกแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 จังหวะหลักคือจังหวะปิดแม่พิมพ์โดยการปิดแม่พิมพ์นี้จะมีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่และฝั่งอยู่กับที่จากนั้นทำการเติมเนื้อพลาสติกเข้าสู่โพรงแบบต่อมาคือจังหวะการปิดแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูงแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ประกบสนิทกับแม่พิมพ์ฝั่งอยู่กับที่และรักษาแรงดันการปิดแม่พิมพ์ไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้ชิ้นงานคงสภาพก่อนทำการเปิดแม่พิมพ์เพื่อปลดชิ้นงาน ดังแสดงตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการฉีดอัดพลาสติก (Jae-Yun Ho et al., 2012)

คุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการวิจัย

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบ่งออกเป็นพลาสติก 2 ชนิดด้วยกันคือพลาสติกกลุ่มอสัณฐาน (Amorphous) ลักษณะของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพลาสติกกลุ่มนี้จะคล้ายคลึงกับช่วงที่มีการหลอมเหลว พลาสติกกลุ่มนี้มักมีการหดตัวน้อยและมีความใสเนื่องจากแสดงสามารถส่องผ่ายสายโซ่โมเลกุลได้ตัวอย่างเช่น Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Polystyrene (PS) Polymethyl Methacrylate (PMMA) และพลาสติกกลุ่มที่มีการตกผลึก (Semi-Crystalline) ลักษณะของสายโซ่โมเลกุลตกเป็นผลึกภายหลังจากการหลอมเหลวทำให้ขนาดของชิ้นงานนั้นมีขนาดเล็กลงคือมีการหดตัวที่มากกว่าแสงสามารถส่องผ่านได้น้อยกว่า ตัวอย่างเช่น Polypropylene (PP) Polyethylene (PE) Low Density Polyethylene (LDPE) High Density Polyethylene (HDPE)

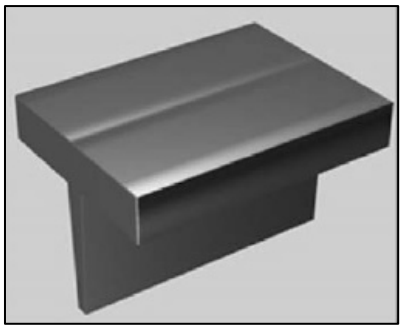


ภาพที่ 3 ลักษณะของสายโซ่โมเลกุลพลาสติก (Peter, 2008)

ปัญหาการยุบตัวและฟองอากาศ (Sink Mark and Voids)

1. การยุบตัวจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เมื่อแรงดันในการฉีดพลาสติกหรือแรงดันในการฉีดย้ำไม่เพียงพอ เช่น เวลาในการฉีดย้ำน้อยเกินไปแรงดันในการฉีดย้ำน้อยเกินไปส่งผลให้ชิ้นงานบริเวณนั้นๆ มีความหนาแน่นของพลาสติกไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดการยุบตัวหรือการปรับตั้งเวลาในการหล่อเย็นชิ้นงานพลาสติกน้อยเกินไปทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว

2. การยุบตัวจากการออกแบบผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกออกแบบให้มีความหนาบางจุดมากกว่าปกติด้วยเงื่อนไขจากการออกแบบความแตกต่างของขนาดชิ้นงานและอุณหภูมิของชิ้นงานพลาสติกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทำให้เกิดการยุบตัวและโพรงอากาศ

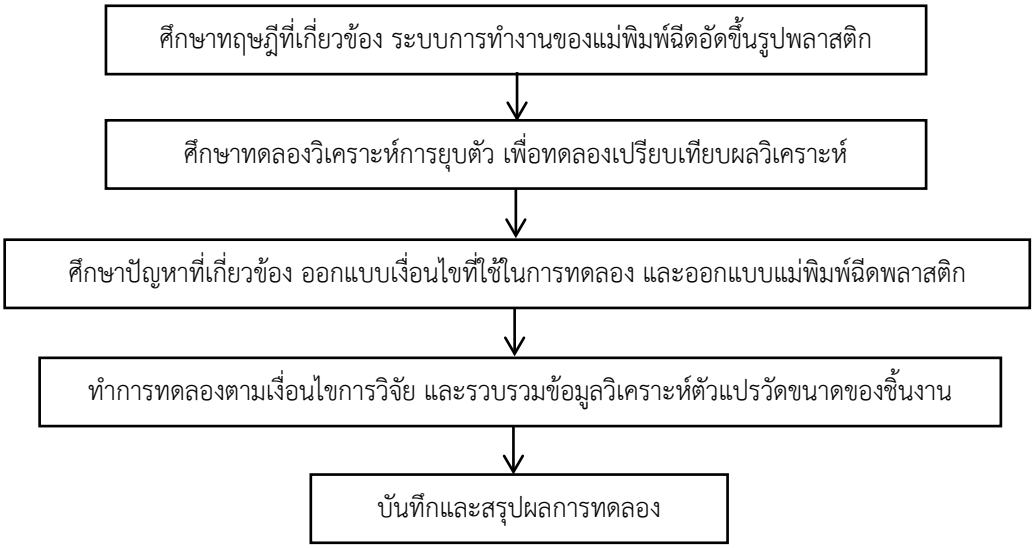


ภาพที่ 4 ปัญหาการยุบตัว (Peter, 2008)

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัย

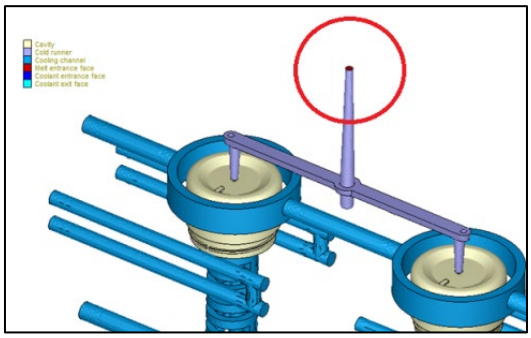
ในการดำเนินการวิจัยนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้



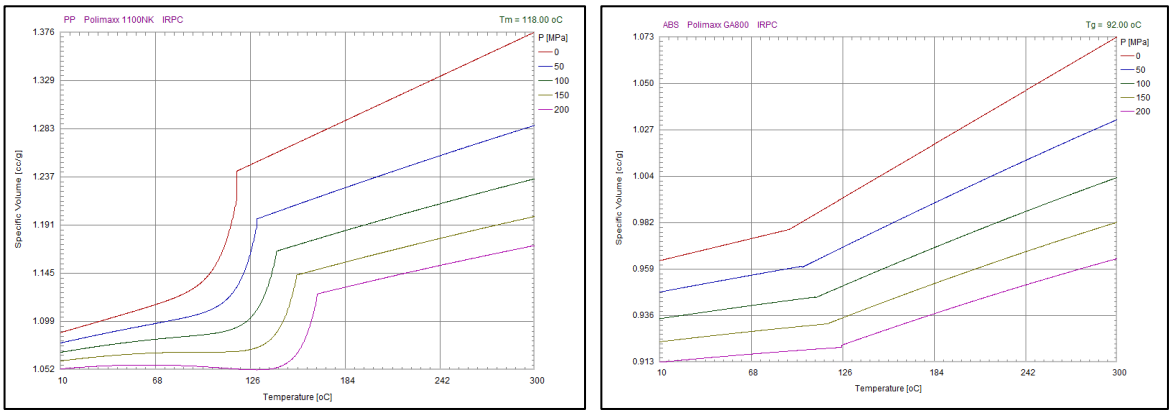
ภาพที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ลักษณะบรรจุภัณฑ์ประเภทกระปุกปริมาตร 29.76 cm^3 ตำแหน่งทางเข้าน้ำพลาสติกด้านใต้ผลิตภัณฑ์ขนาดของทางเข้ามีลักษณะวงกลมขนาดเท่ากับ 1.5 mm สำหรับทางวิ่ง (Runner) ระบบทางเข้าน้ำพลาสติกออกแบบให้มีลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid) ปริมาตร 9.0 cm^3 เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โมเดลชิ้นงานที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์มาทำการวิเคราะห์ใช้โครงสร้าง Boundary Layer (Hybrid) Mesh ชิ้นงานมีจำนวน 148,479 โหนด 551,624 เอลิเมนต์ ระบบทางวิ่งจำนวน 33764 โหนด 116,319 เอลิเมนต์ มีค่า Offset Ratio 1.4 ตำแหน่งทางเข้าน้ำพลาสติกแสดงในภาพที่ 6 เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการฉีดอัดพลาสติกเพื่อทำนายผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานของพลาสติก 2 ชนิดคือ PP Polymaxx 1100NK ดัชนีการไหล 11 g/10min ที่อุณหภูมิ 230 °C และ ABS Polymaxx GA800 ดัชนีการไหล 20 g/10min ที่อุณหภูมิ 220 °C ตามมาตรฐาน ASTM 1238



ภาพที่ 6 โมเดลที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 7 (ซ้าย) PVT – diagram ของพลาสติกชนิด PP เกรด Polymaxx 1100NK

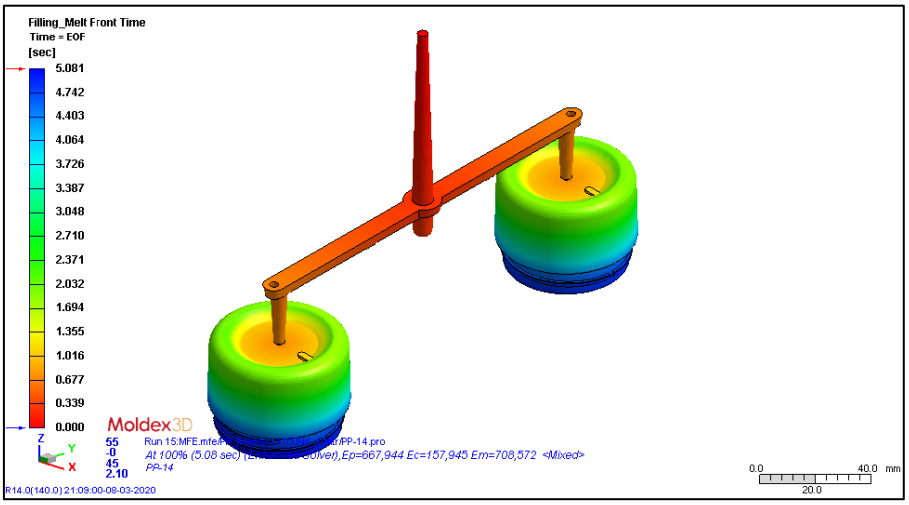
(ขวา) PVT – diagram ของพลาสติกชนิด ABS เกรด Polymaxx GA800

การกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ของการวิเคราะห์การไหลด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

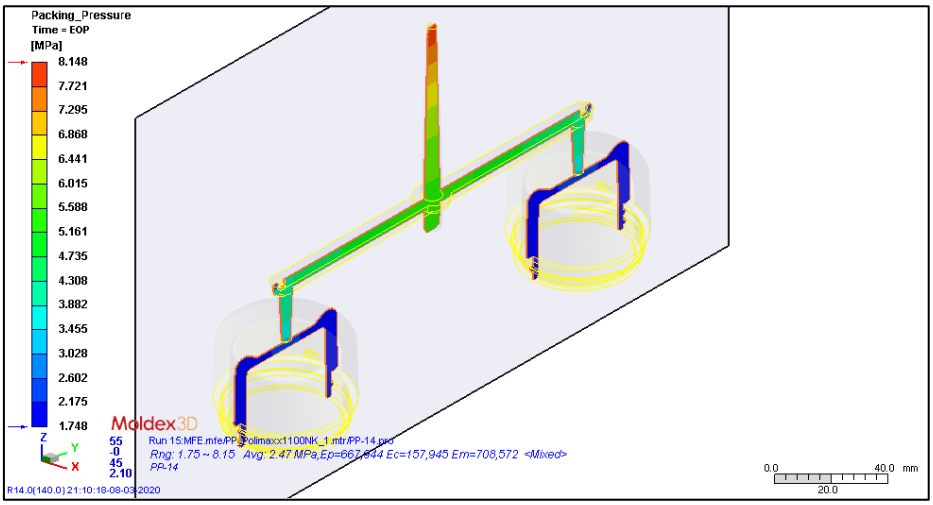
- ขนาดของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ = 110 tons
- อุณหภูมิหลอมละลาย (Melt Temperature) PP 1100NK = 210 °C
- อุณหภูมิหลอมละลาย (Melt Temperature) ABS GA800 = 230 °C
- เวลาในการฉีดพลาสติก (Filling Time) 5 sec
- เวลาที่ใช้ในการรักษาความดันภายในแม่พิมพ์ (Packing Pressure) = 6 sec

การกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมของการวิเคราะห์การไหลด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติก

- ปรับเวลาในการฉีดพลาสติก (Filling Time) 2 sec
- ระยะในการอัดพลาสติก (Compression Distance) = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm
- แรงดันในการบีบอัดพลาสติก (Compression Pressure) = 300, 600, 900 kN
- เวลาที่ใช้ในการรักษาความดันภายในแม่พิมพ์ (Packing Pressure) = 6 sec

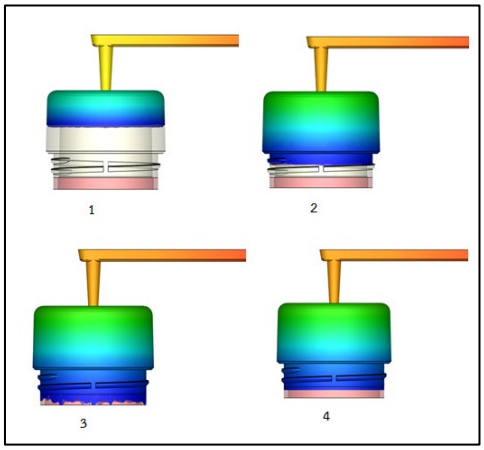


ภาพที่ 8 Filling Melt Front Time



ภาพที่ 9 Packing Pressure

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกในช่วงของการเติมเต็มเนื้อพลาสติกแสดงในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระบบทางวิ่งสามารถเติมเต็มพลาสติกเหลวเข้าไปภายในเบ้าพิมพ์ได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 Cavity โดยใช้เวลาประมาณ 5 วินาทีและแสดงภาพภายหลังการคงสภาพแรงดันเป็นเวลา 6 วินาที ดังภาพที่ 9



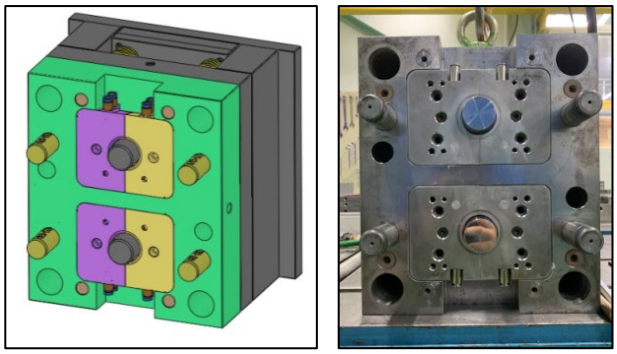
ภาพที่ 10 การวิเคราะห์การไหลด้วยกระบวนการฉีดอัดพลาสติก

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการฉีดอัดพลาสติกในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 พลาสติกไหลเข้าสู่ส่วนต่างๆของโพรงแบบขั้นตอนที่ 3 พลาสติกไหลเข้าสู่โพรงแบบในส่วนที่ทำการบีบอัดขั้นตอนที่ 4 พลาสติกอยู่ในขั้นตอนการคงสภาพแรงดันในการแบบอัดพร้อมทั้งมีการคงแรงดันจากระบบป้อนพลาสติก

การสร้างแม่พิมพ์และการทดลองฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการวิจัยนั้นเป็นแม่พิมพ์ชนิด 3 แผ่นเนื่องจากต้องการแยกระบบป้อนพลาสติกกับชิ้นงานพลาสติกออกจากกันในจังหวะการเปิดแม่พิมพ์และมีชุดยก (Lifter) ทำหน้าที่ในการปลดเกลียวบริเวณปากของกระปุก

ซึ่งมีทิศทางขวางการปลด (Under Cut) โครงสร้างแม่พิมพ์ใช้วัสดุหลักคือเหล็กเกรด S50C มีความแข็งอยู่ที่ 179-235 HB ส่วนอินเสิร์ทใช้วัสดุ CENA-V (Hitachi) มีความแข็ง 38-42 HRC



ภาพที่ 11 ภาพแม่พิมพ์ที่ใช้ในการวิจัย

โดยในการทดลองฉีดพลาสติกนั้นจะใช้เครื่องฉีดพลาสติก NISSEI รุ่น FNXIIIT มีแรงดันปิดแม่พิมพ์ขนาด 110 ตัน เป็นเครื่องฉีดระบบไฮบริดจ์ทางบริษัท NISSEI PLASTIC (THAILAND) CO.,LTD.

ภาพที่ 12 การยุบตัวของพลาสติก **(ซ้าย)** PP เกรด 1100NK **(ขวา)** ABS เกรด GA800

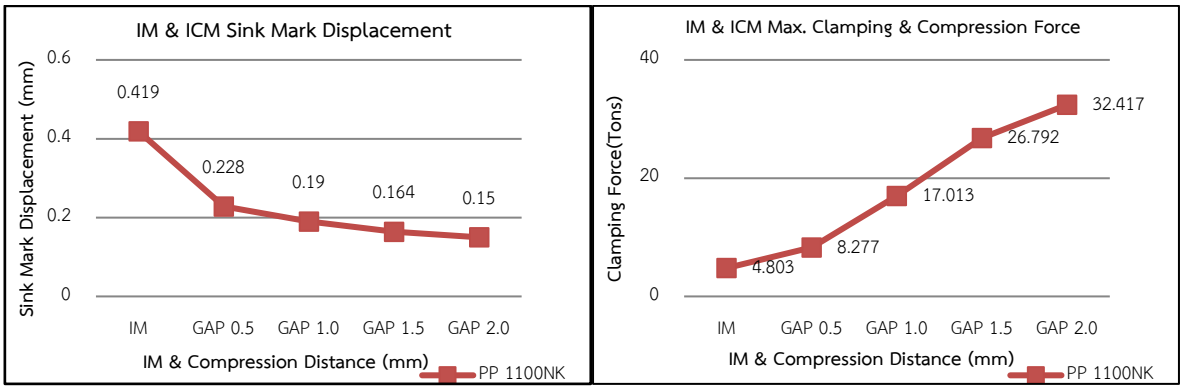
ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับผลการวัดขนาดชิ้นงาน

ในการวัดขนาดของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดพลาสติกนั้น ใช้เครื่องจักร CNC Machining Center DMG Mori NVX 5080 II HSC ทำการวัดขนาดด้วยอุปกรณ์ RENISHAW OMP60 โดยทำการวัดจากชิ้นงานตามเงื่อนไขการฉีดทั้งกระบวนการฉีดแบบปกติ (IM) และกระบวนการฉีดอัด (ICM) ทั้งหมด 5 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีดดังแสดงในภาพที่ 13

ภาพที่ 13 (ซ้าย) เครื่องจักร DMG Mori NVX 5080 II HSC **(ขวา)** อุปกรณ์ RENISHAW OMP60

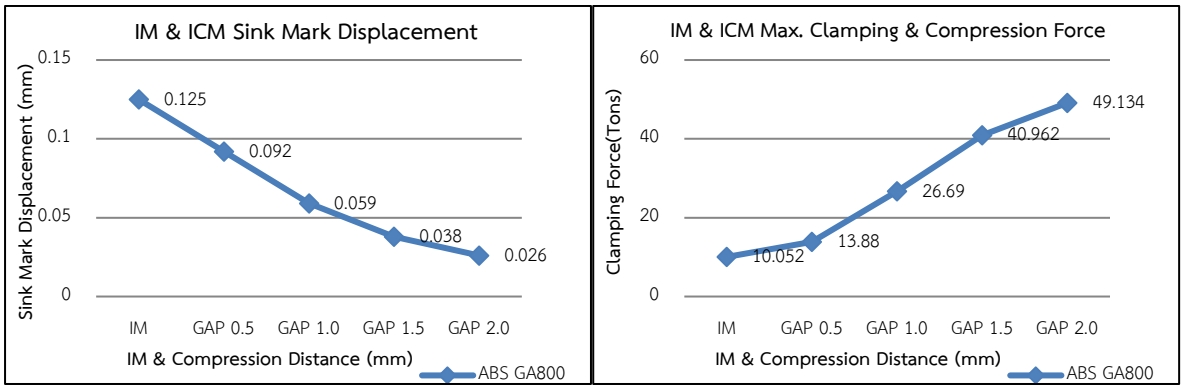
ผลการวิจัย

การศึกษาเทคนิคการลดรอยยุบตัวด้วยกระบวนการฉีดอัดขึ้นรูปพลาสติกก็เพื่อต้องการพัฒนาวิธีการในการผลิตบรรจุภัณฑ์กระปุกเครื่องสำอางที่มีรอยยุบตัวน้อยกว่ากระบวนการฉีดแบบปกติโดยเมื่อพิจารณาจากผลของการวิเคราะห์นั้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้



ภาพที่ 14 (ซ้าย) ผลวิเคราะห์ Sink mark displacement **(ขวา)** Clamping force & Compression force ของพลาสติกชนิด PP เกรด 1100NK

จากภาพที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์พลาสติกชนิด PP ซึ่งอยู่ในกลุ่ม Semi-Crystalline ทำการเพิ่มระยะในการอัดส่งผลให้การยุบตัวลดลงเมื่อถึงระยะที่ 1.5 mm การยุบตัวเริ่มชะลอลงอย่างเห็นได้ชัดและผลวิเคราะห์แรงดันในการอัดเมื่อทำการเพิ่มระยะในการอัดมีความต้องการแรงในการอัดมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 15 (ซ้าย) ผลวิเคราะห์ Sink mark displacement **(ขวา)** Clamping force & Compression force ของพลาสติกชนิด ABS เกรด GA800

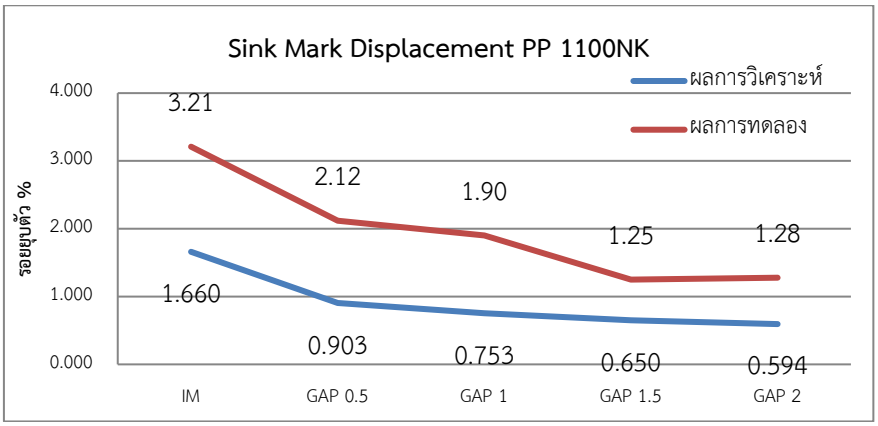
จากภาพที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์พลาสติกชนิด ABS ซึ่งอยู่ในกลุ่ม Amorphous เมื่อทำการเพิ่มระยะในการอัดจะทำให้การยุบตัวลดลงซึ่งการยุบตัวมีค่าต่ำกว่าพลาสติกชนิด PP และผลวิเคราะห์แรงในการอัดเมื่อทำการเพิ่มระยะในการอัดมีความต้องการแรงในการอัดมากขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้วยกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ได้ผลรอยยุบตัวและความดันในการอัดแล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการทดลองด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (เมื่อทำการทดลองด้วยเครื่องฉีดพลาสติกทำการปรับค่าพารามิเตอร์ความดันในการอัดเป็น 300, 600, 900 กิโลนิวตัน) ทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่สมบูรณ์จำนวน 5 ชิ้นต่อเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การตรวจวัดขนาดกระบวนการฉีดพลาสติกของพลาสติกชนิด PP เกรด 1100NK

แรงปิดแม่พิมพ์ (kN)	ระยะการอัด (mm)	รอยยุบตัว ผลการวิเคราะห์ (mm)	รอยยุบตัวผล การวิเคราะห์ (%)	รอยยุบตัว ผลการทดลอง (mm)	รอยยุบตัว ผลการทดลอง (%)
300	0.0	0.419	1.66	0.810	3.21
300	0.5			0.529	2.14
600	0.5	0.228	0.903	0.523	2.12
900	0.5			0.522	2.11
300	1.0			0.471	1.90
600	1.0	0.190	0.753	0.470	1.90
900	1.0			0.465	1.88
300	1.5			0.335	1.35
600	1.5	0.164	0.650	0.311	1.25
900	1.5			0.314	1.26
300	2.0			0.322	1.29
600	2.0	0.150	0.594	0.319	1.28
900	2.0			0.318	1.28

จากตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระยะในการอัดและผลการทดลองมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งเมื่อถึงระยะในการอัดที่ 1.5 มิลลิเมตร และแนวโน้มรอยยุบตัวเริ่มเพิ่มขึ้นที่ระยะ 2.0 มิลลิเมตร ที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีรอยยุบตัว 0.650 % ผลการทดลองพบว่ามีรอยยุบตัว 1.25 - 1.35 % และความดันในการอัดไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการทดลอง แสดงภาพเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดลองตามภาพที่ 16

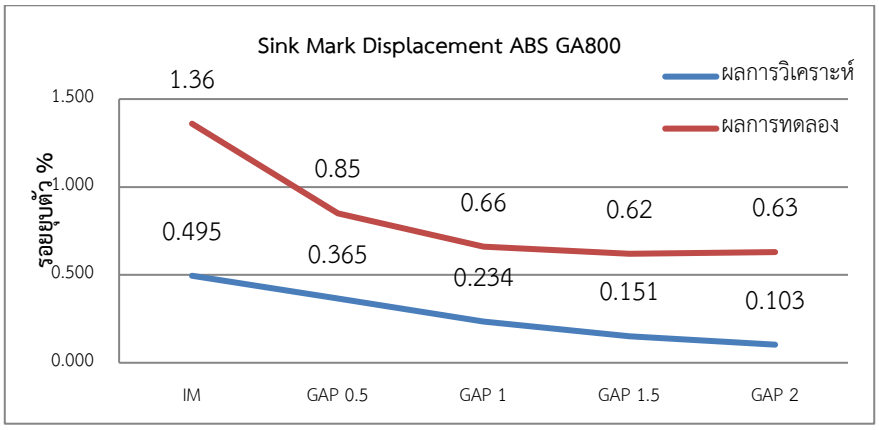


ภาพที่ 16 ผลการวัดขนาดเปรียบเทียบทั้ง 2 กระบวนการของพลาสติกชนิด PP เกรด 1100NK

ตารางที่ 2 การตรวจวัดขนาดกระบวนการฉีดพลาสติกของพลาสติกชนิด ABS เกรด GA800

แรงปิดแม่พิมพ์ (kN)	ระยะการอัด (mm)	รอยยุบตัว ผลการวิเคราะห์ (mm)	รอยยุบตัว ผลการวิเคราะห์ (%)	รอยยุบตัว ผลการทดลอง (mm)	รอยยุบตัว ผลการทดลอง (%)
300	0.0	0.125	0.495	0.343	1.36
300	0.5			0.215	0.86
600	0.5	0.092	0.365	0.212	0.85
900	0.5			0.210	0.84
300	1.0			0.164	0.65
600	1.0	0.059	0.234	0.165	0.66
900	1.0			0.164	0.66
300	1.5			0.158	0.63
600	1.5	0.038	0.151	0.155	0.62
900	1.5			0.159	0.63
300	2.0			0.158	0.63
600	2.0	0.026	0.103	0.157	0.63
900	2.0			0.158	0.63

จากตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระยะในการอัดและผลการทดลองมีแนวโน้มลดลงจนถึงระยะที่ 1.0 มิลลิเมตร รอยยุบตัวนั้นเริ่มลดลงอย่างช้าๆ จนถึงระยะที่ 2.0 มิลลิเมตร ที่ระยะ 1.0 มิลลิเมตร จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีรอยยุบตัว 0.234 % ผลการทดลองพบว่ามีรอยยุบตัว 0.65-0.66% และความดันในการอัดไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการทดลองแสดงภาพเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการทดลองตามภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ผลการวัดขนาดเปรียบเทียบทั้ง 2 กระบวนการของพลาสติกชนิด ABS เกรด GA800

ชนิดของพลาสติกส่งผลโดยตรงต่อการยุบตัวของชิ้นงานโดยชิ้นงานที่ผลิตด้วยพลาสติกกลุ่ม (Semi-Crystalline) มีแนวโน้มในการยุบตัวมากกว่าพลาสติกในกลุ่ม (Amorphous) ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดของกลุ่มวัสดุ เนื่องจากพลาสติกในกลุ่ม (Semi-Crystalline) มีโครงสร้างเป็นผลึกทึบแสงเมื่อวัสดุเย็นตัวลงจะทำให้เกิดการยุบตัวมาก

1. ระยะในการอัดพลาสติก (Compression Distance) ส่งผลโดยตรงต่อการยุบตัวเมื่อระยะในการอัดพลาสติกเพิ่มขึ้นจะทำให้การยุบตัวนั้นน้อยลงทั้งนี้ต้องพิจารณาระยะในการอัดพลาสติกด้วยเนื่องจากเมื่อมีระยะมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดครีบที่ชิ้นงานทำให้เสียเวลาในการตัดครีบที่ชิ้นงาน

2. แรงที่ใช้ในการอัด (Compression Force) จากการทดลองนั้นพบว่าแรงที่ใช้ในการอัดส่งผลต่อชิ้นงานน้อยมากและผลที่ได้นั้นไม่แน่นอน แต่เมื่อใช้แรงในการอัดน้อยกว่าปกติจะทำให้แม่พิมพ์ปิดไม่สนิทชิ้นงานเกิดครีบและชิ้นงานยุบตัวมากขึ้นเนื่องจากไม่สามารถรักษาแรงดันภายในแม่พิมพ์ได้

อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์รอยยุบตัวของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิด PP ลดลงต่ำที่สุด 0.594% ที่ระยะในการอัด 2.0 mm ผลการทดลองพบว่า สามารถลดรอยยุบตัวต่ำสุด 1.25% ที่ระยะการอัด 1.5 mm ความดันในการอัด 600 kN ผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิด ABS จากผลการวิเคราะห์รอยยุบตัวลดลงต่ำที่สุด 0.103% ที่ระยะในการอัด 2.0 mm ผลการทดลองพบว่า สามารถลดรอยยุบตัวต่ำสุด 0.62% ที่ระยะการอัด 1.5 mm ความดันในการอัด 600 kN แนวโน้มของการเพิ่มแรงดันในการปิดแม่พิมพ์มีผลกระทบต่อการยุบตัวน้อยมากทั้ง 2 วัสดุแต่เมื่อทำการลดแรงดันในการปิดแม่พิมพ์ต่ำเกินไปจะทำให้ไม่สามารถปิดแม่พิมพ์ได้สนิทเกิดปัญหาครีบบริเวณขอบชิ้นงาน

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 การเลือกใช้เครื่องฉีดพลาสติกเพื่อรองรับกระบวนการฉีดอัดพลาสติกควรเลือกเครื่องฉีดพลาสติกระบบไฟฟ้า จะทำให้ได้ประสิทธิ์ภาพในการผลิตมากกว่า เนื่องจากเครื่องฉีดระบบไฟฟ้ามีความแม่นยำในการปิด-เปิดแม่พิมพ์มากกว่าเครื่องระบบไฮบริดจ์และระบบการทำงานของสกรูเครื่องฉีดระบบไฟฟ้าทำงานแยกกับระบบ ปิด-เปิดแม่พิมพ์ทำเครื่องจักรสามารถเติมเนื้อพลาสติกเข้าสู่โพรงแบบพร้อมกับการปิดแม่พิมพ์ได้คาดว่าจะส่งผลทำให้ใช้แรงในการปิดแม่พิมพ์น้อยกว่า

1.2 การเลือกผลิตภัณฑ์ในการใช้งานร่วมกับกระบวนการฉีดอัดพลาสติกควรเลือกชิ้นงานที่มีลักษณะหน้ากว้างและชิ้นงานไม่ลึกมากนักจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะลึกเช่นกระปุก

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ความเร็วในการบีบอัด (Compression Speed) เมื่อทำการบีบอัดด้วยความเร็วสูงหรือต่ำผลที่ได้จะเป็นเช่นไร

2.2 เวลาในการบีบอัด (Compression Time) เมื่อใช้เวลาในการบีบอัดมากขึ้นหรือลดลงมีผลกระทบอย่างไร

2.3 การใช้กระบวนการทากุชิเพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการต่างๆ จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้นการทำวิจัยครั้งต่อไปควรพิจารณาในส่วนนี้เพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ดังกล่าว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในด้านแม่พิมพ์และเครื่องมือตรวจสอบขนาดชิ้นงาน บริษัท A.BEST INTERPRODUCT CO., LTD. งานวิจัยได้รับการสนับสนุนโปรแกรมวิเคราะห์การไหลพลาสติกจาก บริษัท Moldex3d Thailand ในด้านการสนับสนุนการประยุกต์ระบบเครื่องฉีดพลาสติกจากบริษัท NISSEI PLASTIC (THAILAND) CO., LTD.

เอกสารอ้างอิง

Han, et al. (2016). Numerical and experimental studies of injection compression molding process for thick plastic gas valve stem. *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 89, 651-660.

Isik Isil, N. and Miko, C. (2015). Instrumented film-insert injection compression molding for lens encapsulation of liquid crystal displays. *Displays*, 38, 20-31.

Jae-Yun Ho, et al. (2012). Three-Dimension Numerical Analysis of Injection-Compression Molding Process. *Polymer Engineering and Science*, 52, 901-911.

Ming-Shyan, H. and Chin-Feng, C. (2010). Injection Molding and Injection Compression Molding of Thin-Walled Light-Guided Plates with V-Grooved Microfeatures. *Journal of Applied Polymer Science*, 121, 1151-1159.

Nitikanchanatal, et al. (2018). Analysis Shrinkage of Recycle Plastic Injection Molding by using Taguchi Methodolygy. *UBE Engineering Journal*, 12-(2), 123-134.

Peter, J. (2008). *The Mould Design Guide*. Shawbury: SMITHERS rapra.

Wei-Sheng, G. and Han-Xiong, H. (2012). Back melt flow in injection-compression molding: Effect on part thickness distribution. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 792-797.