



การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดข้อบกพร่องการฉีดพลาสติกไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short Shot)

ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า

OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR REDUCING SHORT SHOT DEFECTS IN INJECTION MOLDING: A CASE STUDY OF AN ELECTRICAL APPLIANCE FACTORY

อัครเดช รัฐเสรี^{1*} และพลชัย โชติปราชญกุล²

^{1*} นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*Corresponding Author, e-mail: 67016107@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อลดข้อบกพร่องการฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short Shot) ซึ่งเป็นข้อบกพร่องสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและต้นทุนของโรงงานกรณีศึกษา โดยจากการเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2567 ในกรณีศึกษาการฉีดหัวปลั๊กไฟหุ้มแกนปลั๊กและสายไฟพบว่าข้อบกพร่องการฉีดไม่เต็มที่เกิดขึ้นมากที่สุดเป็นอันดับ 1 โดยจำนวนของเสีย 19,957 ชิ้น จากยอดผลิต 1,674,504 ชิ้น คิดเป็นของเสีย 1.2% ถือเป็นสาเหตุหลักที่สร้างความสูญเสียและเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วนขึ้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนภาพก้างปลาและการระดมสมอง พบว่ามีปัจจัยสำคัญคืออุณหภูมิหลอมเหลว ความเร็วฉีด และแรงดันฉีด ทำการกำหนดค่าปัจจัยจากกระบวนการที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งให้เป็น 3 ระดับ นำไปจำลองกระบวนการฉีดด้วยโปรแกรม SolidWorks Plastics ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามระดับ (3^3 Factorial Design) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของพลาสติกโดยพิจารณาจากค่าน้ำหนักชิ้นงานปริมาตรการฉีด อุณหภูมิการแข็งตัวของพลาสติกที่นำไปสู่ปัญหาการฉีดไม่เต็ม การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อทดสอบอิทธิพลของปัจจัยและเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตจริง ผลการจำลองสถานการณ์ฉีดพลาสติกพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมให้โอกาสการฉีดเต็มสูงสุดคือ อุณหภูมิหลอม 200 °C แรงดันฉีด 90 MPa และความเร็วการฉีด 70 มิลลิเมตรต่อวินาที จากขนาดหัวฉีด 10 ตารางมิลลิเมตร ทำการยืนยันผลการจำลองงานฉีดโดยใช้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ไปใช้ผลิตจำนวน 411,643 ชิ้น ฉีดไม่เต็ม 1,309 ชิ้นคิดเป็นเพียง 0.32% แต่จากการทดลองเบื้องต้นพบค่าในช่วงการทดสอบที่ส่งผลอยู่แต่ในช่วงสูงจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์การทดสอบด้วยการใช้ระเบียบวิธีพื้นผิวการตอบสนองที่สัมพันธ์กับข้อจำกัดกระบวนการฉีดทำให้พบว่าตัวแปรการฉีดที่มีผลต่อการฉีดไม่เต็มมีเพียงอุณหภูมิหลอม และแรงดันฉีดที่ 190 องศาเซลเซียส 110 MPa หรือถ้าใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 195-200 องศาเซลเซียส สามารถใช้แรงดันฉีดเหลือเพียง 100 MPa ที่สามารถฉีดเต็มได้

คำสำคัญ: การฉีดพลาสติก; ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม; การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง; การลดของเสีย

ABSTRACT

This research aims to determine the optimal process parameters for plastic injection molding in order to reduce the occurrence of short shot in AC power cord plug production. Short shot is one of the most critical defects affecting product quality and manufacturing efficiency in the studied factory. Production data collected between January and December 2024 showed that 19,957 defective parts were identified as short shot out of a total production of 1,674,504 parts, representing 1.2% of total production. To investigate the root causes of the problem, data collection and brainstorming sessions were conducted with the production team, followed by root cause analysis using a cause-and-effect diagram. Three key process parameters influencing short shot were identified: melt temperature, injection pressure, and injection speed. The injection molding process was then simulated using SolidWorks Plastics to analyze melt flow behavior and determine appropriate parameter ranges. A full factorial experimental design (3^3 factorial design) was applied to evaluate the effects of these parameters on the filling behavior of molten plastic. Simulation results indicated that injection temperature and injection pressure significantly affected the filling behavior. The optimal process conditions for minimizing short shot were a melt temperature of 200 °C, an injection pressure of 90 MPa, and an injection speed of 70 mm/s, with a gate size of 10 sq. mm. Validation experiments under actual production conditions confirmed the effectiveness of the optimized parameters. During the validation period, 411,643 parts were produced, of which 1,309 parts were identified as short shot, corresponding to a defect rate of 0.32%. These results demonstrate that appropriate optimization of process parameters can effectively reduce short shot and improve production quality in plastic injection molding processes.

Keywords: Injection Molding; Short Shot; SolidWorks Plastics; Design of Experiments; Process Optimization

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานพลาสติก กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานจำนวนมากและต้องการความแม่นยำเพื่อคุณภาพสูง ปัญหาที่พบได้บ่อยในกระบวนการผลิตคือชิ้นงานฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ เป็นของเสียที่กระทบโดยตรงต่อการผลิต และ ต้นทุนการผลิต จากกรณีโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 พบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์หม้อหุงข้าวปลั๊กสายไฟมีการฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์รวมทั้งสิ้น 19,957 ชิ้นจากของเสียทั้งหมด 31,481 ชิ้น ของยอดผลิต 1,674,504 ชิ้น คิดเป็น 1.2% ของยอดการผลิตแต่เป็น 63% ของ ๑ เสีย ปัญหาการฉีดไม่เต็มมีโอกาสมาจากการควบคุมค่าพารามิเตอร์หรือการควบคุมตัวแปรในกระบวนการฉีดพลาสติกที่ไม่เหมาะสม โดยมีปัจจัยอย่าง อุณหภูมิการหลอม ความเร็วการฉีด แรงดันฉีด อุณหภูมิโมลด์ และ เวลาฉีดช้า ปัจจัยเหล่านี้หากตั้งค่าไม่เหมาะสมจะทำให้พลาสติกแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าไปเต็มเต็มโพรงแม่พิมพ์ได้ทั้งหมดส่งผลให้เกิดการฉีดไม่เต็ม

ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีความสำคัญ เนื่องจากมุ่งเน้นไปที่การ หาค่าพารามิเตอร์การฉีดที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดการเกิดของเสียชิ้นงานฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์จึงใช้การจำลองการฉีดพลาสติกด้วย SolidWorks Plastics® ร่วมกับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการฉีดพลาสติกอย่างเป็นระบบ ช่วยให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต งานวิจัยหลายงานได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์

กัตจิรา พิงสุข และ วิชัย รุ่งเรืองนันต์ [1] ศึกษาปัญหาการเกิดฟองอากาศในกระบวนการฉีดขึ้นรูปถังเครื่องซักผ้าพบว่าสาเหตุสำคัญมาจากสภาวะการหลอม ความดัน และ อุณหภูมิของระบบสอตรีนเนอร์ที่ไม่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k หาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการเกิดของเสีย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าความดันและอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมช่วยลดการเกิดฟองอากาศทำให้ของเสียลดลงจากร้อยละ 2.62 เหลือร้อยละ 2.02

โสภิตา ท้วมมี [2] ได้ศึกษาปัญหาเม็ด PVC ที่ไม่หลอมละลายในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองร่วมกับการวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนองหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมพบว่าการปรับอุณหภูมิการหลอมให้เหมาะสมสามารถลดการเกิดเม็ด PVC ที่ไม่หลอมละลายและช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์

ปิยะพงษ์ ริดเชียว [3] ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในกระบวนการผลิตกระจกโครเมียมพบว่าปัจจัยด้านระบบขนย้าย การป้องกันฝุ่นบนสายพาน และเวลาในการเคลือบโครเมียมเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุด การปรับค่ากระบวนการที่อุณหภูมิอบ $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วสายพาน 15 m/min และเวลาเคลือบ 8 วินาที สามารถลดของเสียลงและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต นอกจากนี้

อภิชาติ ศรีณนิตย์ [4] ศึกษาปัญหาความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์พบว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันฉีดมีผลต่อความแม่นยำของมิติชิ้นงาน และการปรับค่าพารามิเตอร์สามารถลดอัตราของเสียได้อย่างชัดเจน

Mahajan and Ulhe [5] ได้ศึกษาการลดข้อบกพร่องประเภทชิ้นงานฉีดไม่เต็มในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Taguchi เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่าความเร็วในการฉีดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน และสามารถลดการเกิดปัญหาฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ได้เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม

Zhang et al. [6] ได้ศึกษาการปรับเหมาะพารามิเตอร์กระบวนการฉีดขึ้นรูปเพื่อลดการบิดงอของชิ้นงาน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi ร่วมกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม Moldflow ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและลดค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองได้ต่ำกว่า 3.5%

การนำโปรแกรมสำเร็จรูปมาจำลองการไหลของพลาสติกหลอมเหลว เพื่อแก้ไขปัญหกระบวนการฉีด งานวิจัยหลายงานได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering: CAE) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ และปัจจัยที่เหมาะสม

Hong-Seok Park and Xuan-Phuong Dang [7] ประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ระบบหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์ ผลการศึกษาพบว่าช่องระบายความร้อนแบบเกลียว (Spiral Cooling Channels) สามารถถ่ายเทความร้อนได้มีประสิทธิภาพมากกว่า และให้คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีกว่าช่องระบายความร้อนแบบซิกแซก (Zigzag Cooling Channels)

I.Gnilitskiy et al. [8] ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวแบบ Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) ต่อพฤติกรรมการณ์ไหลของพอลิเมอร์พบว่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมเหลวมีบทบาทสำคัญต่อการไหลของพลาสติกหลอมเหลว

ศุภชัย ดวงทองพล และ ชาคริต สุวรรณจรัส [9] งานวิจัยนี้ใช้ (Computer Aided Design: CAD) และ (Computer Aided Engineering: CAE) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์ไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ร่วมกับการออกแบบชิ้นงาน แม่พิมพ์ และระบบทางวิ่งพลาสติกก่อนการผลิตจริง ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ ลดการปรับแก้แม่พิมพ์ เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงาน

Mohammed Yunus et al. [10] วิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม รวมถึงศึกษา ลักษณะตำแหน่งเกททางเข้าของชิ้นงานที่ส่งผลต่อการเกิดรอยประสานและการยุบตัวของชิ้นงานงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง ร่วมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) เพื่อยืนยันผลการดำเนินงาน และยังมีการใช้วิธีการทางสถิติเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดช่วยลดจำนวนการทดลองและระยะเวลาในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Knoll and Heim [11] ได้ศึกษาความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Moldflow และการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของการจำลองกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่าการจำลองสามารถทำนายพฤติกรรม การไหลของพลาสติกได้ใกล้เคียงกับการผลิตจริง และการปรับค่าข้อมูลวัสดุสามารถลดความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ Tong Wu et al. [12] ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับผลิตสารเติมแต่งโดยใช้การวิเคราะห์ Finite Element เพื่อปรับปรุงระบบหล่อเย็นและโครงสร้างแม่พิมพ์ซึ่งช่วยลดน้ำหนักแม่พิมพ์และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าการใช้การจำลองการไหลร่วมกับการออกแบบการทดลองสามารถช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ ระบุจุดเสี่ยงต่อการเกิดข้อบกพร่อง และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดชิ้นงานฉีดไม่เต็มเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฉีดพลาสติกและลดข้อเสียจากการฉีดขึ้นรูปฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ ทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และ ทำการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม SolidWorks Plastics วิเคราะห์และสรุปผลจากการจำลองการฉีด และ นำผลค่าพารามิเตอร์จากการวิจัยไปใช้ในการฉีดพลาสติก

2.1 การกำหนดปัญหา

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียของกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าระหว่างเดือน มกราคม ถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2567 พบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์หม้อหุงข้าวเกิดข้อเสียมากที่สุดรวมของเสีย 31,481 ชิ้น

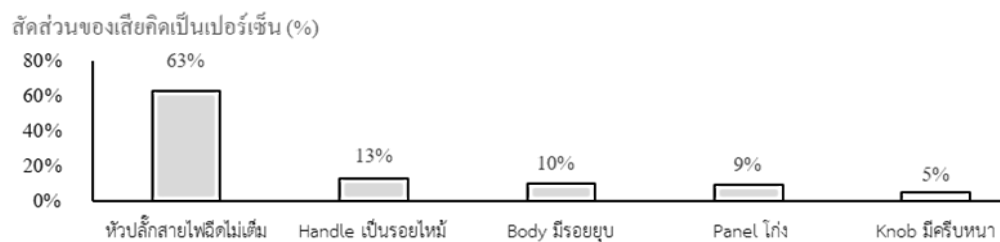
ตารางที่ 1 ขอดการผลิตกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในช่วงเดือน ม.ค ถึง เดือน ธ.ค 67

กลุ่มผลิตภัณฑ์	หม้อหุงข้าว	กระดิกน้ำร้อน	เตารีด	หม้อหุงข้าวคอมพิวเตอร์ไรซ์	รวม
ยอดผลิต (ชิ้น)	1,674,504	248,245	235,019	83,118	3,951,272
ของเสีย (ชิ้น)	31,481	1,317	2,416	668	35,882

เมื่อแยกประเภทตามสาเหตุของงานเสียพบว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นสูงที่สุดคือหัวปลีกล้วยไฟฉีดไม่เต็มดังตารางที่ 2

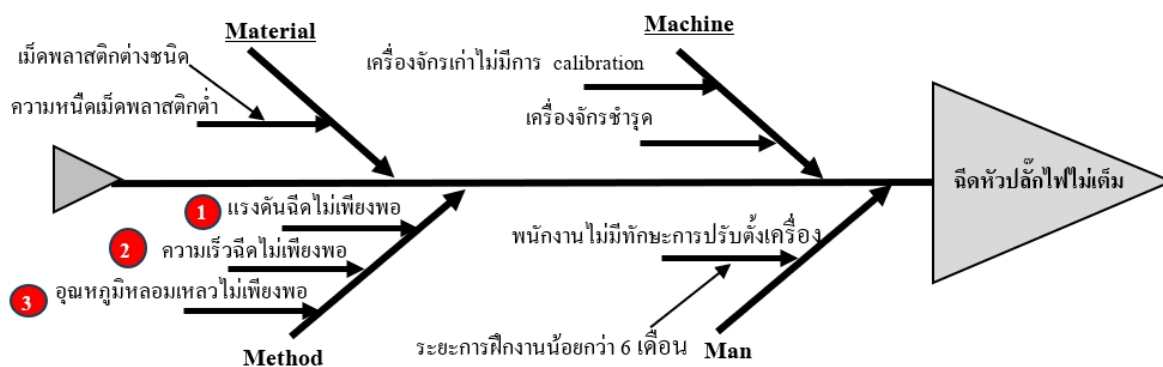
ตารางที่ 2 ของเสียแยกตามสาเหตุในช่วงเดือน ม.ค ถึง เดือน ธ.ค 67

แยกตามสาเหตุเสีย	หัวปลีกล้วยไฟฉีดไม่เต็ม	Handle เป็นรอยไหม้	Body มีรอยยุบ	Panel โกง	Knob มีครีบทน
ของเสีย (ชิ้น)	19,957	3,947	3,211	2,700	1,666
เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)	63%	13%	10%	9%	5%



รูปที่ 1 กราฟเปอร์เซ็นต์ของเสียแยกตามสาเหตุ

จากนั้นนำปัญหาหัวปลั๊กสายไฟไม่เต็มมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุร่วมกับวิศวกรแม่พิมพ์ หัวหน้าฝ่ายผลิต และช่างปรับฉีดพลาสติกประสบการณ์ในสายการผลิต 15 ปี ใช้แผนภาพก้างปลาเพื่อระบุสาเหตุของการเกิดปัญหาฉีดหัวปลั๊กสายไฟไม่เต็มโดยพิจารณาใน 4 ด้าน ได้แก่ Man, Machine, Method, Material และใช้แผนภูมิแก๊งปลาในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่าปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องโดยตรงคือค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักร ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว, ความเร็วฉีด และแรงดันฉีด



รูปที่ 2 แผนภาพสาเหตุและผล Cause & Effect Diagram

คำนวณความเร็วฉีดและเวลาการไหลการไหลค่าความเร็วฉีด (Injection Speed) ใช้ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างปริมาตรของพลาสติกหลอม (V) พื้นที่หน้าตัดสกรู (A) และ เวลาเติมเต็มโพรงแม่พิมพ์ (t) การคำนวณอัตราการไหลของพลาสติกหลอมสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์พื้นฐานของการไหลของของไหล [13] ดังสมการ (1)

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

โดยที่

Q = อัตราการไหลของพลาสติกหลอม (mm³/s)

V = ปริมาตรของชิ้นงานรวมต่อหนึ่งข้อด (mm³)

t = เวลาในการฉีด (Sec.) ไม่รวมเวลาดึงแรงดัน

และความเร็วของการไหลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและพื้นที่หน้าตัด [13] ดังสมการ (2)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

โดยที่

Q = อัตราการไหลของพลาสติกหลอม (mm^3/s)

v = ความเร็วของสกรูฉีด (mm/s)

A = พื้นที่หน้าตัดของสกรู (รูกระบอกฉีด) (mm)

การคำนวณค่าพารามิเตอร์แรงดันฉีดเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองจากการคำนวณแรงดันฉีดอ้างอิงตามหลักการคำนวณการไหลของพลาสติกหลอมในระบบทางวิ่ง (Runner System) ที่มีความดันเพื่อสำหรับการสูญเสียใน Runner [13] ดังสมการ (3)

$$P_2 = K_F \times K_S \times f_W + 200 \quad (3)$$

โดยที่

P_2 = แรงดันฉีดที่หัวฉีด

K_F = แฟกเตอร์เกี่ยวกับการไหลของพลาสติก (bar/mm.)

K_S = แฟกเตอร์เกี่ยวกับความหนาของช่องทางการไหลหรือความหนาชิ้นงาน

f_W = ความยาวของช่องทางไหลหรือระยะทางการไหลของพลาสติกเหลว (mm.)

ปัญหาการฉีดไม่เต็มมาจากการเย็นตัวของเนื้อพลาสติกก่อนพลาสติกจะเข้าไปเต็มโพรงแม่พิมพ์การแข็งตัวของพลาสติกจึงเป็นปัจจัยเดียวที่จะพิจารณา โดยค่าคงที่มีค่าความร้อนจำเพาะของ PVC สถานะยืดหยุ่นเป็น $1.4 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ค่าการนำความร้อนยืดหยุ่นของ PVC เป็น 0.14 ถึง 0.17 วัตต์ต่อเมตร เคลวิน การที่อุณหภูมิฉีดของ PVC ที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 180 องศาเซลเซียสและแข็งตัวที่ 80 องศาเซลเซียสใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุการคำนวณแรงดันฉีดอ้างอิงจากหลักการไหลของพลาสติกในระบบทางวิ่ง (Runner System) สามารถอธิบายได้ตามกฎข้อที่หนึ่งหลักอุณหพลศาสตร์ (First Law of Thermodynamics) [14] ดังสมการ (4)

$$q = mc(T_2 - T_1) \quad (4)$$

โดยที่

q = ค่าความร้อน จูล

m = น้ำหนักของวัสดุ กรัม

c = ค่าความร้อนจำเพาะ จูลต่อกรัมเซลเซียส

T_2 = อุณหภูมิวัสดุปัจจุบัน

T_1 = อุณหภูมิวัสดุเริ่มต้น

และการถ่ายเทความร้อนออกจากโมลด์ตามกฎการนำความร้อน [15] ดังสมการ (5)

$$P = \frac{kA\Delta T}{t} = \frac{kA(T_a - T_b)}{t} \quad (5)$$

โดยที่ P = อัตราการถ่ายเทความร้อน (จูลต่อวินาที หรือ วัตต์)
 k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (จูลต่อวินาที·เมตร·องศาเซลเซียส)
 A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (ตารางเมตร)
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิของสองฝั่ง (ฝั่ง a-b)
 l = ความหนาของวัสดุระหว่างสองฝั่งอุณหภูมิ (เมตร)

ดังนั้นสมการการเย็นตัวของ PVC ที่ฉีดเข้าไปในโมลด์สามารถอธิบายได้ตามกฎการนำความร้อน [15] ดังสมการ (6)

$$m_{pvc}c_{pvc}(T_{pvc} - T_{pvcold}) = \frac{k_{pvc}A_{pvc}(T_{pvc} - T_{mold})(dt)}{l_{pvc}} - m_{mold}c_{mold}(T_{mold} - T_{moldold}) - \frac{k_{mold}A_{pvc}(T_{mold} - T_{air})(dt)}{l_{mold}} \quad (6)$$

โดยที่ m_{pvc} = น้ำหนักชิ้นงานรวม
 C_{pvc} = ค่าความร้อนจำเพาะของ PVC ยืดหยุ่น
 T_{pvc} = อุณหภูมิปัจจุบันของชิ้นงาน PVC
 $T_{pvc\ old}$ = อุณหภูมิเดิมของชิ้นงาน PVC
 T_{mold} = อุณหภูมิปัจจุบันของโมลด์
 $T_{mold\ old}$ = อุณหภูมิเดิมของโมลด์
 T_{air} = อุณหภูมิอากาศโดยรอบ
 K_{pvc} = ค่าการนำความร้อนของ PVC ยืดหยุ่น
 A_{pvc} = พื้นที่ผิวชิ้นงานที่ติดกับโมลด์
 K_{mold} = ค่าการนำความร้อนของเหล็กทำโมลด์
 A_{mold} = พื้นที่ผิวโมลด์ถ่ายเทสู่อากาศ
 l_{pvc} = ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน
 l_{mold} = ความหนาเฉลี่ยของโมลด์

และ dt = ค่าเวลาต่อรอบการคำนวณ (iteration หน่วยวินาที)

2.2 การจำลองกระบวนการด้วย SolidWorks Plastics

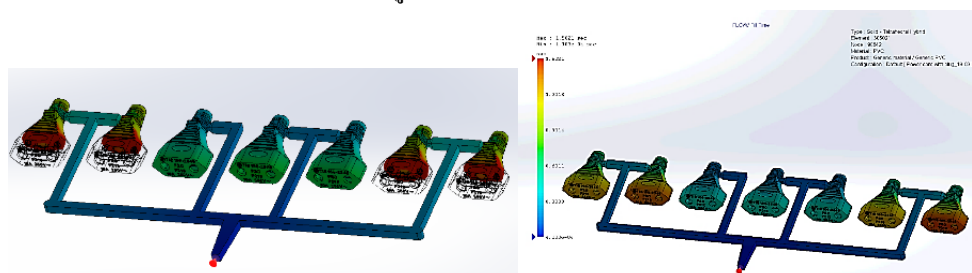
ทำการสร้างแบบจำลองของการฉีดพลาสติกในโปรแกรม SolidWorks Plastics เตรียมโมเดลสามมิติ (3D Model) สร้างระบบ Runner และตำแหน่ง Gate กำหนดเงื่อนไขในการจำลองวัสดุพลาสติกที่ใช้เป็นเม็ดพลาสติก PVC โดยอ้างอิงค่าจาก Material Database ของซอฟต์แวร์ปรับค่าพารามิเตอร์การฉีดตามตารางการออกแบบการทดลอง 3³ แฟคทอเรียล ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3³

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	180	190	200
แรงดันฉีด (MPa)	70	80	90
ความเร็วฉีด (mm/s)	70	80	90

2.3 การวิเคราะห์ผล Simulation

นำค่าปัจจัยในแต่ละระดับจากตารางที่ 3 มา Run Simulation ในการวิเคราะห์จะนำค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปมาทำการวิเคราะห์ และบันทึกผล แสดงการ Run Simulation ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลของแบบจำลองลักษณะการไหลของพลาสติกหลอมเหลว และค่าเวลาของการฉีดเติมเนื้อพลาสติก

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสามระดับ

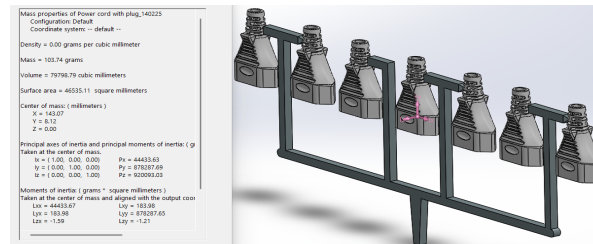
จากผลการทดลองเมื่อโปรแกรมทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้นจะได้ค่าน้ำหนักชิ้นงาน ที่ได้จากตารางการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3³ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไป แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองรูปแบบ (3^3 Factorial Design) ทั้งหมดจำนวน 27 ข้อมูล

ลำดับที่	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	แรงดันฉีด (MPa)	ความเร็วฉีด (mm/s)	น้ำหนักชิ้นงาน (g.)
1	180	70	70	63
2	180	70	80	64
3	180	70	90	64
4	180	80	70	66
5	180	80	80	66
6	180	80	90	66
7	180	90	70	68
8	180	90	80	68
9	180	90	90	68
10	190	70	70	67
11	190	70	80	67
12	190	70	90	71
13	190	80	70	68
14	190	80	80	68
15	190	80	90	74
16	190	90	70	71
17	190	90	80	78
18	190	90	90	75
19	200	70	70	68
20	200	70	80	76
21	200	70	90	84
22	200	80	70	81
23	200	80	80	85
24	200	80	90	105
25	200	90	70	105
26	200	90	80	105
27	200	90	90	106

3.2 การจำลองการฉีดพลาสติก

จากผลการทดลองเมื่อโปรแกรมทำการจำลองการฉีดพลาสติกตามสภาวะที่กำหนดทั้ง 27 สภาวะการฉีดและผลการจำลอง ทำ 2 ซ้ำให้ค่าผลการคำนวณออกมาเหมือนกันตามคาดจึงไม่จำเป็นต้องเป็นการจำลองซ้ำผลที่ได้เป็นค่าน้ำหนักของงานฉีดตามระยะเวลาการเติมเต็มเนื้อพลาสติกอ้างอิงค่าน้ำหนักชิ้นงานจากแบบในคอมพิวเตอร์ และการชั่งน้ำหนักจริงรวมรันเนอร์มีน้ำหนัก 103.7 กรัม ต่อ 7 ชิ้น น้ำหนัก 91 กรัม และรันเนอร์หนัก 12 กรัม ที่ฉีดเต็ม



รูปที่ 4 ค่าน้ำหนักและปริมาตรชิ้นงาน

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ระดับด้วย Minitab โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 หรือ $\alpha = 0.05$ โดยตรวจสอบที่ P-Value < 0.05 ของปัจจัย อุณหภูมิฉีด แรงดันในการฉีด และ ความเร็วฉีด ต่อระยะเวลาการเติมเต็ม Fill Time ที่มีผลต่อน้ำหนักชิ้นงานพบว่า มี 3 ปัจจัยหลัก รวมกับอีก 1 ปัจจัยร่วมของอุณหภูมิฉีดกับแรงดันในการฉีด มีผลต่อระยะเวลาการเติมเต็มอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัยร่วมอื่นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงผลในรูปที่ 5

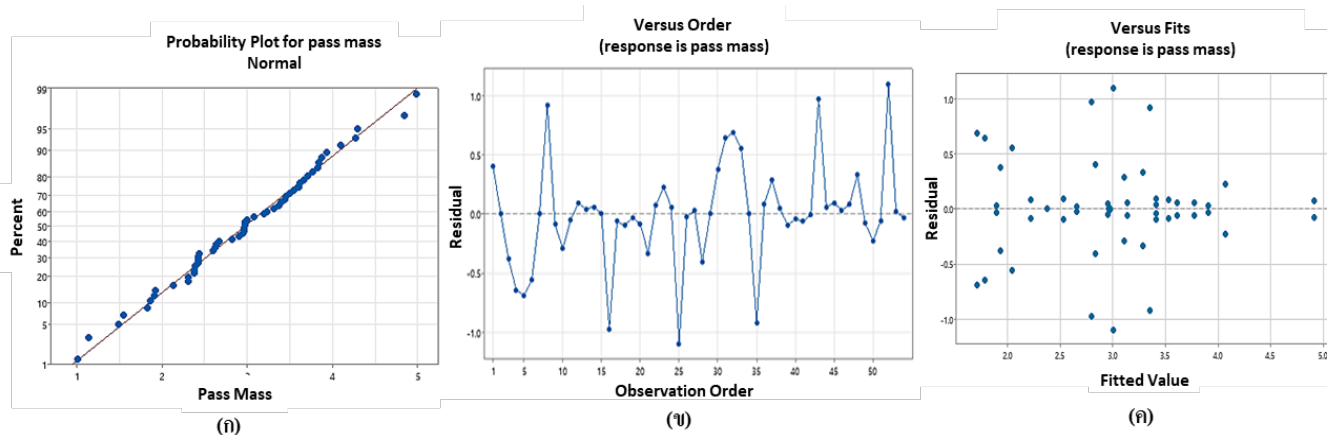
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	24.8407	0.95541	23.94	0.000
Linear	6	12.9958	2.16596	54.27	0.000
Temperature	2	7.4673	3.73364	93.54	0.000
Injection Pressure	2	2.1528	1.07640	26.97	0.000
Injection Speed	2	3.3757	1.68784	42.29	0.000
2-Way Interactions	12	11.1690	0.93075	23.32	0.000
Temperature*Injection Pressure	4	10.6848	2.67120	66.92	0.000
Temperature*Injection Speed	4	0.3905	0.09763	2.45	0.071
Injection Pressure*Injection Speed	4	0.0937	0.02343	0.59	0.675
3-Way Interactions	8	0.6759	0.08449	2.12	0.069
Temperature*Injection Pressure*Injection Speed	8	0.6759	0.08449	2.12	0.069
Error	27	1.0777	0.03991		
Total	53	25.9184			

รูปที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

3.4 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นการกำหนดปัจจัย (Factors) และระดับ (Levels)

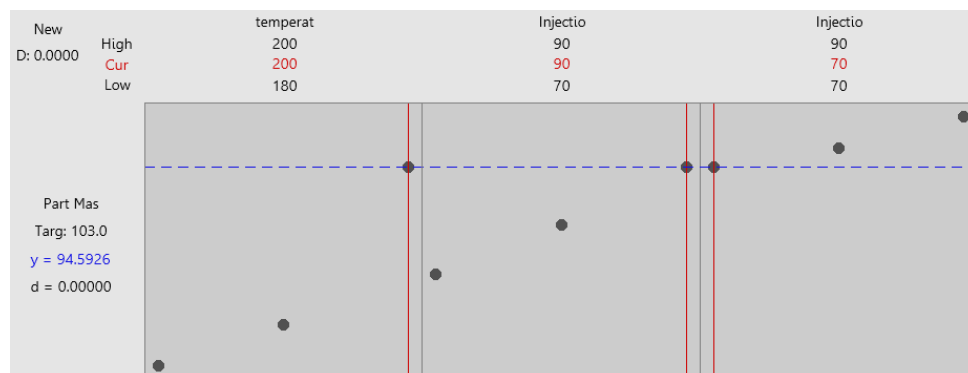
จากผลการทดลองแบบแฟกทอเรียล (3^k Factorial Design) ดังในตารางที่ 4 มาวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฉีดชิ้นงานไม่เต็มที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) พบว่า การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ได้จากการเรียงตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่อยู่ในลักษณะเส้นตรงจาก Normal Probability Plot ดังรูปที่ 6(ก) และ แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ของค่าส่วนตกค้างลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 6(ข) ระบุได้ว่าปัจจัยที่ใช้มีความเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ส่วน Fitted Value แสดงความเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ ดังรูปที่ 6(ค) ที่เทียบค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัย



รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง

3.5 การทดสอบเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด

การวัดการเกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์จะพิจารณาที่ น้ำหนักหรือปริมาตรพลาสติกที่ฉีดเข้าไปได้ในโพรงชิ้นงานของแม่พิมพ์ใช้น้ำหนัก 103 กรัม ที่ได้จากการชั่งน้ำหนักและตามแบบในคอมพิวเตอร์เป็นเกณฑ์ตัดสินใจ จากข้อมูลทั้ง 27 การทดลองพบมีแค่เพียง 4 ชุดการทดลองที่มีการฉีดเกิน 103 กรัม จากนั้นนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางสถิติใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลว 200 °C แรงดันฉีด 90 MPa และความเร็วฉีด 70 mm/s ซึ่งให้ค่าน้ำหนักชิ้นงานใกล้เคียงเป้าหมายมากที่สุด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ Response Optimizer ของอุณหภูมิหลอมเหลว แรงดันฉีด และความเร็วฉีด ต่อ น้ำหนักชิ้นงาน

3.6 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ค่าตัวแปรใหม่ที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ที่ได้จากการจำลองงานฉีดด้วยโปรแกรม SolidWorks Plastics นำมาทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการฉีดจริงตามตารางที่ 5-6 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เดิมและใหม่จากผลการจำลองงานฉีด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการปรับตั้งค่าสภาวะของเครื่องฉีดพลาสติก

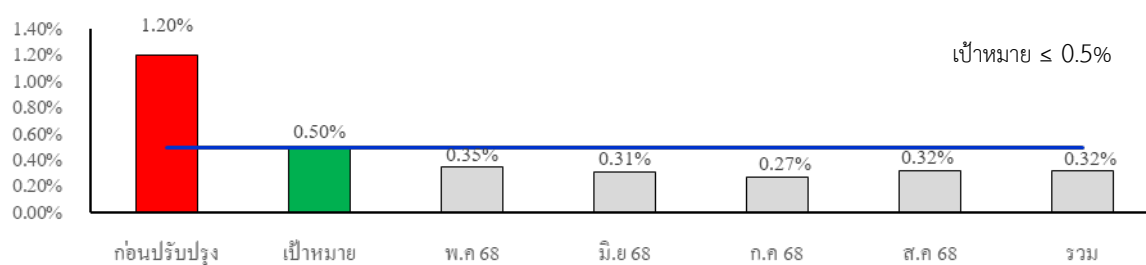
	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	แรงดันฉีด (MPa)	ความเร็วฉีด (mm/s)
ชุดตัวแปรเดิม	170	60	60
ชุดตัวแปรใหม่	200	90	70

ตารางที่ 6 การขึ้นชั้นผลการทดลอง

	พ.ค 68	มิ.ย 68	ก.ค 68	ส.ค 68	รวม
ยอดผลิต	66,732	72,644	168,965	103,312	411,653
ของเสีย (ชิ้น)	297	222	459	331	1,309
เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)	0.45%	0.31%	0.27%	0.32%	0.32%

หลังจากใช้ชุดตัวแปรใหม่ฉีดขึ้นงานปลั๊กไฟเป็นเวลา 4 เดือน ได้ยอดการผลิตรวม 411,653 ชิ้น พบของเสียเฉลี่ย 0.32% ลดลงจาก 1.2% ที่โรงงานฉีดเมื่อปี 2567 ในรูปที่ 8

เปอร์เซ็นต์ของเสีย



รูปที่ 8 กราฟเปอร์เซ็นต์ของเสียเดือน พ.ค. 68 ถึง ส.ค. 68

3.7 การขยายการทดลองในช่วงตัวแปรการฉีดพลาสติกใหม่

แม้ว่าผลการผลิตจริงจะยืนยันว่าชุดตัวแปรชุดใหม่สำหรับงานฉีดปลั๊กไฟสามารถลดการฉีดไม่เต็มลดลง แต่ตัวแปรที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเป็นจุดที่อยู่ค่าสูงของตัวแปรจึงไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ของชุดตัวแปรกับเวลาฉีดสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตรงหรือไม่ใช่เชิงเส้นตรงจึงปรับช่วงการทดลองใหม่เป็น 190-195-200 ตามลำดับ ส่วนแรงดันฉีดจากการตรวจสอบเครื่องฉีดและขนาดแม่พิมพ์สามารถฉีดได้สูงสุดที่ 120 MPa จึงทำการปรับช่วงแรงดันฉีดเป็น 100-110-120 MPa แต่ยังคงไว้ที่ช่วงเดิม 70-80-90 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 7 ตารางข้อมูลที่ใช้ในการทดลองส่วนขยาย

ลำดับที่	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	แรงดันฉีด (MPa)	ความเร็วฉีด (mm/s)	น้ำหนักชิ้นงาน (g.)
1	190	100	70	100
2	190	100	80	100
3	190	100	90	100
4	190	110	70	105
5	190	110	80	105
6	190	110	90	106
7	190	120	70	105
8	190	120	80	105
9	190	120	90	106
10	195	100	70	105
11	195	100	80	106
12	195	100	90	106
13	195	110	70	105
14	195	110	80	105
15	195	110	90	106
16	195	120	70	107
17	195	120	80	107
18	195	120	90	107
19	200	100	70	107
20	200	100	80	107
21	200	100	90	107
22	200	110	70	107
23	200	110	80	107
24	200	110	90	107
25	200	120	70	107
26	200	120	80	107
27	200	120	90	107

3.8 ผลการจำลองงานฉีดพลาสติกช่วงตัวแปรใหม่

ผลการทดลองในช่วงตัวแปรใหม่พบว่าค่าความเร็วฉีดไม่มีผลต่อปัญหาการฉีดไม่เต็ม อุณหภูมิในการฉีดพลาสติกและแรงดันฉีดสามารถปรับได้โดยมีเงื่อนไข อุณหภูมิที่ 190 องศาเซลเซียส ต้องเพิ่มแรงดันฉีดไปที่ 110 MPa แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 195-200 องศาเซลเซียส สามารถใช้แรงดันฉีดเหลือเพียง 100 MPa ได้ ซึ่งจะได้นำเอาองค์ความรู้นี้ไปปรับตั้งเพื่อใช้ในการฉีดในอนาคตเพื่อขึ้นชิ้นผลต่อไป

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการลดของเสียแบบฉีดขึ้นงานไม่เต็มในการผลิตปลั๊กสายไฟฟ้า การทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับ ทดสอบด้วยการจำลองงานฉีดพลาสติกใน โปรแกรม SolidWorks Plastic พบค่าพารามิเตอร์ทั้ง อุณหภูมิ หลอม แรงดันฉีด และความเร็วฉีด มีผลต่อเวลาในการเติมเต็มโพรงแม่พิมพ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเกณฑ์การวัดการฉีดเต็มไม่เต็ม ใช้ น้ำหนักชิ้นงานที่วัดจากทั้งโปรแกรมและชิ้นงานจริงเป็นจุดวิกฤตในการวัดปัญหาการฉีดไม่เต็มอยู่ที่ 103 กรัม จากผลการทดลองจำลองงานฉีดพบว่าอุณหภูมิหลอมที่ 200 องศาเซลเซียส แรงดันฉีด 90 MPa ความเร็วฉีดที่ 70 มิลลิเมตรต่อวินาที ช่วยลดโอกาสการเกิดการฉีดไม่เต็มได้ เมื่อมีการขยายช่วงตัวแปรการฉีดเพิ่มเติมทำให้สามารถเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวและแรงดันฉีดสามารถปรับลดหย่อนกันได้ ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานเพิ่มขึ้นและการเติมเต็มในโพรง แม่พิมพ์สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ใหม่ไปใช้ในการผลิตจริงเป็นระยะเวลา 4 เดือนสามารถลดของเสียจากเดิม 1.2% เหลือเพียง 0.32% แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและการใช้งานจริงทำให้กระบวนการผลิตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภักจิรา พิงสุข และวิชัย รุ่งเรืองอนันต์. การลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องซักผ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏธนบุรี*, 2554, 10 (1), หน้า 589–593.
- [2] โสภิตา ท้วมมี. การลดของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [3] ปิยพงษ์ ริดเขียว. การลดของเสียในกระบวนการผลิตกระบอกโครเมียมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏธนบุรี*, 2555, 10 (1), หน้า 25–32.
- [4] อภิชาติ ศรีณนิตย์. การลดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [5] Mahajan, L. D. and Ulhe, P. N. Analysis of injection molding process to reduce defects (short-shot). *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 2018, 5 (6), pp. 113–119.

- [6] Zhang, L., Chang, T.-L., Tsao, C.-C., Hsieh, K.-C. and Hsu, C.-Y. Analysis and optimization of injection molding process on warpage based on Taguchi design and PSO algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 137 (1–2), pp. 981–988.
- [7] Park, H. S. and Dang, X. P. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10, pp. 48–59.
- [8] Gnilitzkyi, I. Effects of anisotropic and isotropic LIPSS on polymer filling flow and wettability of micro injection molded parts. *Optics and Laser Technology*, 2022, 158, pp. 1–7.
- [9] ศุภชัย ดวงทองพล และชาคริต สุวรรณจำรัส. การนิคขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสาน CAD/CAE. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2561, 29 (4), หน้า 45–52.
- [10] Yunus, M. Optimizing the die design parameters of a two cavity injection molding tool for a fan blade back cover using mold flow analysis. *International Journal in IT and Engineering*, 2015, 3 (6), pp. 92–103.
- [11] Knoll, J. and Heim, H.-P. Analysis of the machine-specific behavior of injection molding machines. *Polymers*, 2024, 16, 54.
- [12] Wu, T. Design optimization of plastic injection tooling for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10, pp. 923–934.
- [13] วีโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. *งานนิคพลาสติก*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเกชั่น, 2540.
- [14] Çengel, Y. A. and Boles, M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [15] Incropera, F. P. *et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.