

การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนโทรศัพท์

โดยการออกแบบการทดลอง

Reducing Defectives in Plastic Injection Process of Telephone Part

By Design of Experiment

สุรศักดิ์ ชูบโธสง* ระพี กาญจนะ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Surasak Choobthaisong* Rapee Kanchana

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Thanyaburi 39 Moo1, Klong 6, Klong Luang Pathum Thani 12110

*Corresponding author Email: surasak_c@mail.rmutt.ac.th

(Received: February 21, 2020; Accepted: December 30, 2020)

บทคัดย่อ

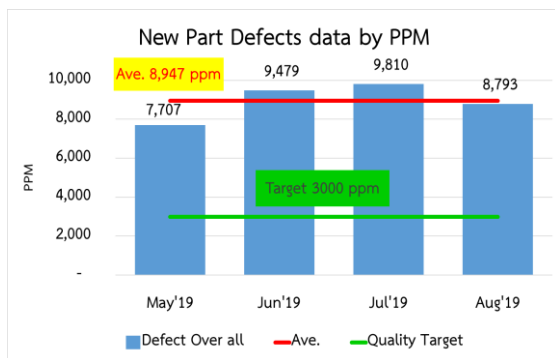
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียจากกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับกรณีการผลิตชิ้นงานใหม่ โดยการออกแบบการทดลอง และการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ จากข้อมูลในอดีตพบว่า มีสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 8947 ppm เกินเป้าหมายที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดไว้ที่ 3000 ppm งานวิจัยเริ่มจากการนำเครื่องมือคุณภาพมาใช้ในการค้นหาปัญหาในกระบวนการผลิต พบว่าปัญหาประกายเงิน เป็นปัญหาที่พบสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 95.70 ของปัญหาทั้งหมด และจากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการฉีดพลาสติกไม่เหมาะสมอยู่ 8 ปัจจัย จากแผนการทดลองเบื้องต้น (Screening experiment) โดยการทดลองแบบ 2^{8-3} Fractional Factorial เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงิน พบว่ามี 4 ปัจจัย ที่มีอิทธิพลหลักต่อปัญหาประกายเงินคือ Injection Pressure, Clamping force, Nozzle Temperature และ Injection Speed จากนั้นได้นำเทคนิคพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) โดยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) มาวิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสม Response Optimization พบว่าระดับค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินที่เหมาะสมคือ Injection Pressure 97 Mpa, Clamping force เท่ากับ 240 Ton, Nozzle Temperature เท่ากับ 237 °C, และ Injection Speed 30 mm/sec ผลที่ได้จากการวิจัยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าสัดส่วนของเสียสำหรับปัญหาประกายเงินของชิ้นงาน 1220402 ลดลงจากเดิม 33748 ppm มาอยู่ที่ 6778 ppm และหากพิจารณาจากสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมของชิ้นงานใหม่ทั้งหมด ลดลงจากเดิม 8947 ppm มาอยู่ที่ 2320 ppm เป็นไปตามเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษาที่กำหนดไว้คือสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมในการผลิตชิ้นงานใหม่ทั้งหมดต้องน้อยกว่า 3000 ppm

คำสำคัญ: การลดของเสีย การออกแบบการทดลอง กระบวนการฉีดพลาสติก

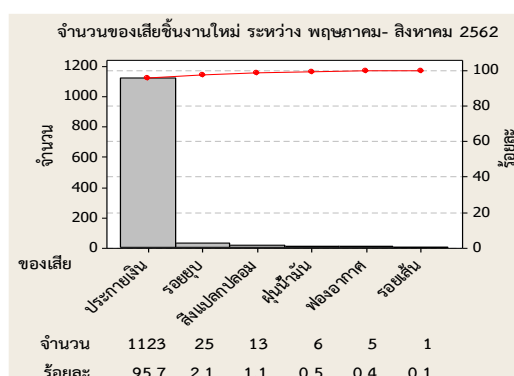
This research aimed to reduce the proportion of defect from plastic injection molding process for new part production by using Design of Experimental and applying Quality Control Tools. According to historical data, the proportion of defect was 8,947 ppm, exceeding the company target of 3,000 ppm. The research started with finding problems in the production process using QC Tools. It was found that the silver streak was the highest number of defects, 95.70 % of all defects. And the problem analysis, it was found that the main cause of the problem was the inappropriate parameter settings consisting of 8 factors in the plastic injection molding process. The design of experimental technique by 2^{8-3} Fractional Factorial was then applied in screening experiment to find out the main factors affecting the silver streaks. It was found that there were 4 factors including injection pressure, clamping force, nozzle temperature, and injection speed. The Response Surface Methodology technique by Central Composite Design was then applied for analyzing the response optimization. It was found that suitable parameters included the injection pressure of 97 Mpa, the clamping force of 240 tons, the nozzle temperature of 237 °C, and the injection speed at 30 mm/sec. The research result showed that the applied optimal parameters could reduce the silver streak defects of the part number 1220402 from 33,748 ppm to 6,778 ppm. Moreover, the overall average defect proportions of new part production decreased from 8,947 ppm to 2,320 ppm that were 74.06% of all defects. This achieved the company target which aimed to have less than 3,000 ppm defects.

1. บทนำ

พลาสติก ตั้งแต่ เดือนพฤษภาคม-เดือนสิงหาคม 2562 พบว่ามีสัดส่วนของเสียโดยรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 8947 ppm และจากรูปที่ 2 พบว่าเป็นปัญหาประกายเงิน มากถึง 95.70% ของปัญหาทั้งหมด ซึ่งส่งผลต่อสัดส่วนของเสีย โดยรวมของการผลิตชิ้นงานใหม่ที่เกินเป้าหมาย และจาก ข้อมูลของการผลิตชิ้นงานใหม่ทั้งหมด จากตารางที่ 1 พบว่าชิ้นงานหมายเลข 1220402 พบปัญหาประกายเงิน มากถึง 33748 PPM ซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับคุณลักษณะ ภายนอก Appearance ของชิ้นงาน จากรูปที่ 3 แสดง ลักษณะของปัญหาประกายเงิน ซึ่งในบริเวณผิวด้านนอก ของชิ้นงาน ตามมาตรฐานการตรวจสอบแล้วจะต้องไม่พบ ปัญหาดังกล่าว



รูปที่ 1 สัดส่วนของเสียโดยรวมของชิ้นงานผลิตใหม่
ข้อมูล ในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นและจำนวน
ของเสีย ในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562

ตารางที่ 1 ชิ้นงานที่พบปัญหาประกายเงิน ในระหว่าง
เดือนพฤษภาคม-เดือนสิงหาคม 2562

หมายเลข ชิ้นงาน	จำนวนการผลิตชิ้นงานใหม่ เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562	พบปัญหาประกายเงิน		
		จำนวน(ชิ้น)	PPM	%
1220368	8,666	5	577	0.06
1220370	10,433	12	1,150	0.12
1220374	15,684	4	255	0.26
1220377	802	2	2,494	0.25
1220378	9,202	1	109	0.01
1220384	15,049	7	465	0.05
1220402	32,357	1,092	33,748	3.37



รูปที่ 3 ลักษณะปัญหาประกายเงินบนผิวของชิ้นงาน

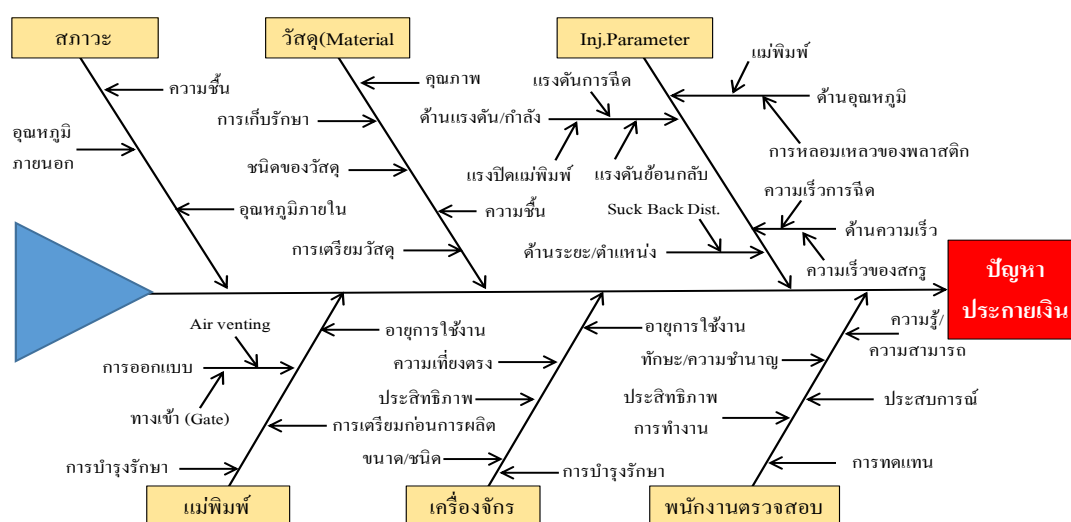
ด้วยเหตุนี้จึงเลือกชิ้นงานหมายเลข 1220402 มา
ทำการการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาประกายเงิน โดยมีเป้าหมาย
เพื่อที่จะลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมลง ให้เป็นไปตาม
เป้าหมายคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา โดยเริ่มจากการ
จัดตั้งทีมงานเพื่อระดมความคิด (Brainstorming) จาก
หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยนำเครื่องมือคุณภาพมา
ประยุกต์ใช้ เพื่อต้องการคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
เบื้องต้น โดยผลที่ได้จากการระดมความคิด ทำให้สามารถ
กำหนดความสำคัญของปัญหาที่จะต้องทำการแก้ไข
ก่อนหลังได้ และสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา
ประกายเงินโดยใช้แผนภูมิแกงปลา ดังรูปที่ 4 ทำให้ทราบ
ถึงสาเหตุทั้งหมดที่อาจส่งผลต่อปัญหาประกายเงิน.

จากปัจจัยที่ได้จากแผนผังแกงปลาหลายปัจจัย จึง
ได้นำหลักการของตารางความสัมพันธ์ของเหตุและผล
(Cause & Effect Matrix) มาวิเคราะห์ถึงระดับ
ความสำคัญของแต่ละปัจจัย ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มี
ความสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน จากตารางที่ 2 พบว่า
ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปัญหาประกายเงิน คือการปรับตั้ง
ค่าพารามิเตอร์ คิดเป็น 93.33% และได้้นำปัจจัยดังกล่าว
มาทำการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ในการ
ทดลองเบื้องต้น โดยใช้ข้อมูล 2 ส่วนในการพิจารณา คือ
ข้อมูลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากเทคนิคการระดม
ความคิด และข้อมูลที่สำคัญในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์
จากการศึกษาทฤษฎี โดยคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่สามารถ
ควบคุมได้ พบว่ามี 8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกาย
เงิน ดังนี้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหัวฉีด ระยะชักสกรู
ความเร็วรอบสกรู ความดันด้านการถอยสกรู ความเร็วฉีด
ความดันฉีด และแรงปิดแม่พิมพ์ สามารถแสดงได้ดัง
ตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุดลย์ และคณะ
[1] เนื่องจากปัจจัยที่ได้จากการระดมความคิดมีจำนวน
มาก จึงพิจารณาใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง
(DOE) เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน
โดยเลือกใช้ 2^{8-3}_{IV} Fractional Factorial design เพื่อการ
คัดกรองปัจจัย เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมี
ข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบหลัก
(Main Effect) และ ผลกระทบของปัจจัยร่วม

(Interaction Effect) ได้ ซึ่งหากผลการวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลในการทดลองไม่เพียงพอก็สามารถทำการทดลองเพิ่มเติมต่อจากการทดลองเดิมได้ ซึ่งข้อดีของการทดลองแบบ Fractional Factorial design สามารถช่วยลดเวลา ค่าใช้จ่าย และจำนวนในการทดลองได้ [2]

หลังจากได้ปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการทดลองเบื้องต้นแล้ว นำปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อความละเอียดของผลที่ได้ และเพื่อตรวจสอบลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งเป็นลักษณะ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (2^{nd} Order model) โดยการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ร่วมกับการทดลองจุดศูนย์กลาง (2^k Factorial design with Center point) พบว่าผลที่ได้เป็นแบบ 2^{nd} Order model ในการหาระดับ

ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจึงพิจารณาใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ (RSM) โดยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) เพื่อวิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ของกระบวนการฉีดพลาสติก ในการแก้ไขปัญหาประกายเงิน โดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ จากวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ประโยชน์คาดว่าจะได้รับการวิจัย คือทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาประกายเงิน ระดับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และสามารถลดสัดส่วนของเสียให้เป็นไปตามเป้าหมายคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา และสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาประกายเงิน

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

ลำดับ	กลุ่มของปัจจัย	ทีมงาน วิศวกร ผู้เชี่ยวชาญ โดยเทคนิคการระดมสมอง (Brainstorming)										รวม 90 คะแนน	%
		EN_MO	EN_PD	EN_QC	DS	SV_PD	MAT	MOL	INJ	MG_EN	MG_PD		
1	การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์	7	9	9	9	9	7	7	9	9	9	84	93.33
2	พนักงานตรวจสอบ	7	8	9	7	7	7	7	9	9	7	77	85.56
3	แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	7	7	7	7	5	5	7	5	5	5	60	66.67
4	วัตถุดิบ (พลาสติก)	5	7	5	5	7	5	5	5	5	5	54	60.00
5	เครื่องจักร												
	-เครื่องอบเม็ดพลาสติก	3	5	5	5	5	7	3	5	5	5	48	53.33
	-เครื่องฉีดพลาสติก	3	5	5	3	3	3	3	3	3	5	36	40.00
6	สภาวะแวดล้อม	1	3	3	1	3	3	1	3	1	3	22	24.44

หลักเกณฑ์การให้คะแนน: 9 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 100% 7คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 80% 5คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 60% 3 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 40% และ 1 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา <20%

ตารางที่ 3 การคัดเลือกปัจจัยนำเข้าสำหรับการออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น

ลำดับ	ปัจจัย / ค่าพารามิเตอร์	แหล่งที่มาของปัจจัย		
		ศึกษาจากทฤษฎี	จากการระดมความคิด	การนำไปวิเคราะห์การทดลองเบื้องต้น
1	อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temp)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
2	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp)	มี	มี	เลือก
3	อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature)	มี	มี	เลือก
4	ระยะชักสกรู (Metering Stroke)	มี	มี	เลือก
5	เวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกฉีด (Resident Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
6	ระยะสำรอง (Cushion)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
7	ความเร็วรอบสกรู (rpm.)	มี	มี	เลือก
8	ความดันต้านการถอยสกรู (Back Pressure)	มี	มี	เลือก
9	ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching Over)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
10	ความเร็วฉีด (Injection Speed)	มี	มี	เลือก
11	ความดันฉีด (Injection Pressure)	มี	มี	เลือก
12	ความดันฉีดย้ำ (Packing Pressure)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
13	เวลาในการฉีดย้ำ (Packing Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
14	แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)	มี	มี	เลือก
15	เวลาในการหล่อเย็น (cooling Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก (Plastic) พลาสติกที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือพลาสติกเอบีเอส (ABS) เป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเหนียว ทนการกระแทก มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี มีอุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ 60-80°C นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของใช้หลากหลายชนิดเช่น ชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น [3] นอกจากคุณสมบัติของพลาสติก ABS ที่กล่าวมาแล้ว กระบวนการเตรียมเม็ดพลาสติก ABS ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก ก็มีความสำคัญ ดังนั้นทางบริษัทเม็ดพลาสติกมีข้อเสนอแนะดังนี้ ควรทำการอบ (Drying) เม็ดพลาสติกก่อนนำไปใช้งานเพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดพลาสติก เพื่อป้องกันปัญหาคุณภาพที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานเช่น ปัญหารั่วประกายเงิน ทางบริษัทเม็ดพลาสติก จึงแนะนำการอบพลาสติก ABS ที่

อุณหภูมิ 80 ~ 90 °C /3-5 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน และคำแนะนำสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับงานฉีดพลาสติก เช่น อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temperature) ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การตั้งค่าอุณหภูมิที่กระบอกฉีดสำหรับพลาสติก ABSเกรด GP [4]

N	Zone4	Zone3	Zone2	Zone1	H
230-240 °C	230-240 °C	230-240 °C	220-230 °C	220-230 °C	210-220 °C

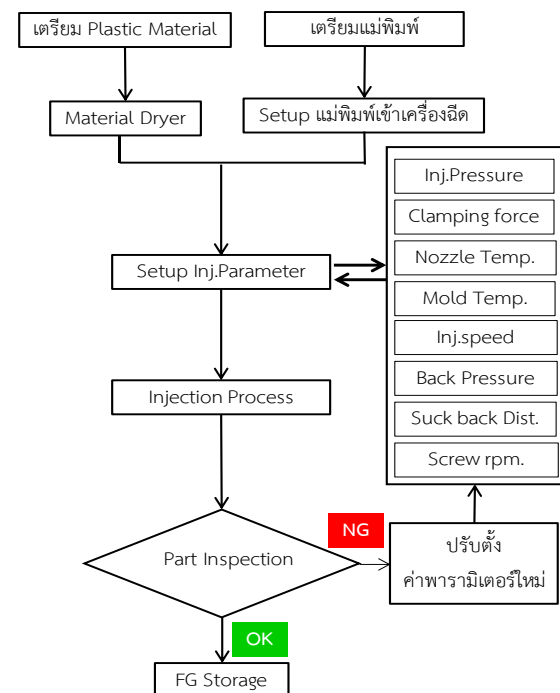
ความเร็วในการฉีดและแรงดันในการฉีด ความเร็วในการฉีดจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ช่วงแรงดันการฉีดทั่วไปคือ 70 ~ 140MPa [4] อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลต่อคุณภาพพื้นผิวและระดับของความเค้นตกค้างในผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพ

ผิวมีผิวงานที่ดีเยี่ยมและมีความเค้นตึงค้ำน้อยลงควรควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตั้งแต่ $40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นอาจทำให้รอบการทำงานนานขึ้นและเกิดปัญหาการบดงอ [4] การออกแบบแม่พิมพ์เช่น ทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) และขนาดของทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) จะต้องทำการทดลองในแต่ละรูปร่างของชิ้นงาน ก่อนการผลิตจริงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม สำหรับแรงดันในการฉีด ควรควบคุมความดันในการฉีดให้เต็มแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอและมีลักษณะที่ยอมรับได้สำหรับคุณลักษณะของชิ้นงาน (Appearance) ตัวแปรหลายตัวมีผลต่อแรงดันการฉีดเช่นอุณหภูมิการฉีด รูปร่างของผลิตภัณฑ์หัวฉีด และขนาดเกท (Gate) ขนาดทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) เป็นต้น

2.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) เป็นกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 6 ส่วน (6M) คือ Material (วัตถุดิบเม็ดพลาสติก) Mold (แม่พิมพ์) Machine (เครื่องฉีด) Method (พารามิเตอร์) Man (ช่างฉีด) Management (การจัดการ) [5] จากรูปที่ 5 แสดงถึงแผนภูมิการไหลของกระบวนการฉีดพลาสติก เริ่มจากการเตรียมเม็ดพลาสติก โดยทำการอบเม็ดพลาสติกก่อนป้อนเข้าที่เครื่องฉีด เตรียมแม่พิมพ์สำหรับฉีด เตรียมค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องฉีด หลังจากเตรียมส่วนต่างๆ แล้ว กระบวนการฉีดโดยเครื่องฉีดพลาสติกจะทำหน้าที่หลอมละลายเม็ดพลาสติกและฉีดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ คงความดันและอัดพลาสติกเหลวเข้าเต็มแม่พิมพ์ และชิ้นงานจะถูกหล่อเย็นด้วยขณะฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานรูปร่างตามแม่พิมพ์แล้วจึงเปิดแม่พิมพ์เพื่อทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ทำการตรวจสอบชิ้นงาน แยกของดี ของเสียและลงบันทึก เก็บงานดีเข้าที่จัดเก็บ เพื่อเตรียมส่งในกระบวนการถัดไป

2.3 การระดมความคิด (Brainstorming) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระดมความคิดเพื่อแก้ไขปัญหา จากหลาย ๆ มุมมอง หลากหลายความคิดของสมาชิกที่มาร่วมกิจกรรม

ระดมสมอง ดังนั้นการระดมความคิด (Brainstorm) โดยสรุปจึงหมายถึง การระดมความคิดจากทุก ๆ มุมมอง โดยไม่มีการตัดสินถูกผิด ของสมาชิกในกลุ่ม เพื่อหาทางเลือกในการตัดสินใจ ความคิดใหม่ๆ และใช้ในการการวางแผนในการแก้ไขปัญหาอื่นๆ [6]



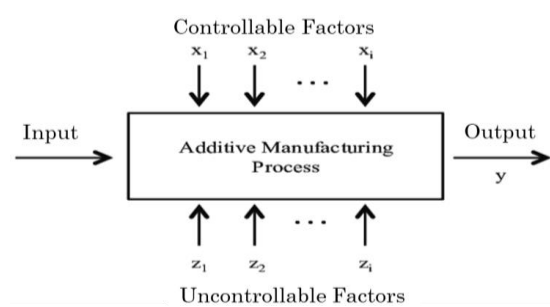
รูปที่ 5 แผนภูมิการไหลของกระบวนการฉีดพลาสติก

2.4 เครื่องมือคุณภาพ (7QC Tools) ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือคุณภาพมาใช้นี้ ใบบันทึก (Check sheet) ใช้สำหรับการลงบันทึกผลการตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) แสดงตามรูปที่ 2 ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและวิเคราะห์ข้อมูลสะสม แผนภูมิแกงปลาหรือแผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) แสดงตามรูปที่ 4 กราฟ (Graph) ใช้แสดงการเปรียบเทียบกันของข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง [6]

2.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา กับปัจจัยที่นำเข้าที่สำคัญ ที่ได้จากการระดมความคิด โดยใช้แผนภูมิแกงปลา วิเคราะห์ถึงระดับความสำคัญของปัจจัยที่มี

ผลกระทบต่อดัชนีแปรตอบสนองพิจารณาโดยใช้ความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ ในการปฏิบัติงานของทีมงานในการแก้ปัญหาจากการระดมความคิด [6]

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หมายถึง การทดลองเพียงครั้งเดียวหรือทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา ซึ่งทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Response) จากกระบวนการนั้น ๆ ตัวแปรนำเข้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่าตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปรหรือปัจจัยที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

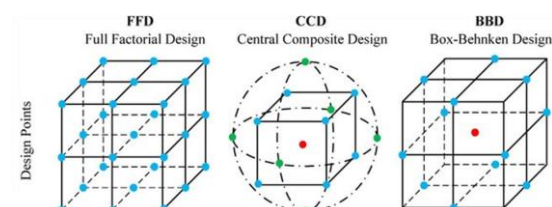
การออกแบบ Fraction Factorial Experiment คือ การทดลองเพื่อทำการลดจำนวนการทดลองลงจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) แต่เป็นการทดลองซึ่งใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองที่มากที่สุด กล่าวคือเป็นการทดลองในขั้นตอนแรกของการพัฒนา ซึ่งการใช้งานโดยส่วนใหญ่ของการออกแบบการทดลองชนิดพิเศษส่วนนี้เรียกว่า การทดลองเพื่อวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening Experiment) เพื่อใช้ในการคัดเลือกปัจจัยออกบางส่วน ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่มีผลต่อดัชนีแปรตอบสนอง [7]

Response Surface Methodology (RSM) เป็นเทคนิคการรวบรวมเอาทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ Responds Optimization [8]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการทดลองที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษา หรือสร้างตัวแบบในลักษณะของ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second-order or Quadratic Model) การทดลองลักษณะนี้พบว่ามีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุด แสดงจุดทำการทดลองตามรูปที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 [8]



รูปที่ 7 ตัวอย่างการออกแบบจุดการทดลอง CCD

2.7 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำเทคนิคการออกแบบการทดลอง และเทคนิคของพื้นที่ผิวผลตอบโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มาใช้ในการแก้ไขปัญหาในกระบวนการฉีดพลาสติกและเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามลำดับ ดังนี้ อุดุลย์ [9] ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก เอบีเอส โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง แบบ 2^{k-p} Fractional Factorial

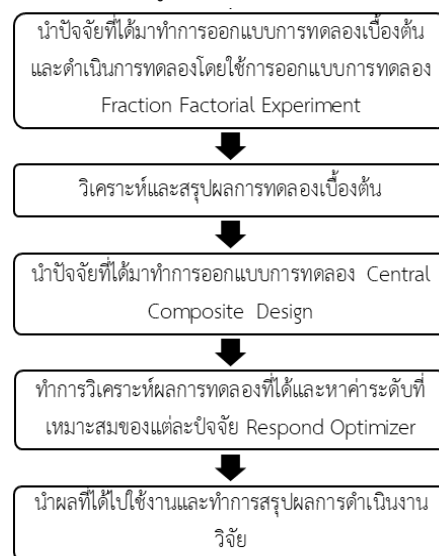
Design สำหรับการออกแบบการทดลองเบื้องต้น พบว่าสามารถลดปัจจัยทั้งหมดจาก 8 ปัจจัย เหลือ 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ อัตราการฉีด เวลาการฉีดช้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และเวลาหล่อเย็น จากนั้นนำทั้ง 4 ปัจจัยมาวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) โดยได้ค่าอัตราการฉีดร้อยละ 58 เวลาการฉีดช้า 6 วินาที อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก 221 องศาเซลเซียส และเวลาหล่อเย็น 55 วินาที โดยได้ค่าการเสียรูปต่ำที่สุดเท่ากับ 3.97 มิลลิเมตร นำค่าที่ได้ไปทำการผลิตจริงพบว่าสัดส่วนของเสียจากการเสียรูปเท่ากับร้อยละ 3.30 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของบริษัท กรณีศึกษาที่ยอมรับสัดส่วนของเสียที่ร้อยละ 5 ซึ่งแสดงว่าจากผลที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางแก้ปัญหา ลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกได้จริง พระพงษ์ และวิภู [10] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวและหาจุดเหมาะสมของสภาวะปัจจัยที่ทำให้ชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955 เกิดการหดตัวน้อยที่สุดของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งปัจจัยที่ใช้ศึกษามีทั้งหมด 6 ปัจจัย คือ อุณหภูมิพลาสติก, ความเร็วฉีด, ความดันฉีด, ความดันฉีดช้า, เวลาในการฉีดช้า และเวลาในการเย็นตัว พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการหดตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิพลาสติก, ความเร็วฉีด, ความดันฉีด, ความดันฉีดช้า, และเวลาในการฉีดช้า จากนั้นนำทั้ง 5 ปัจจัยมาวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหาค่าการหดตัวที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) และผลการวิจัยพบว่าที่สภาวะปัจจัยที่เหมาะสมทำให้ได้ค่าการหดตัวของชิ้นงาน เท่ากับ 1.95 มิลลิเมตร (1.54 เปอร์เซ็นต์ของความยาวชิ้นงาน) กระบวนการผลิตและต้องกำจัดรอยเชื่อมบนชิ้นส่วนพื้นผิวให้หมด

Krit, Wiroj and Thiradet [11] ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดพลาสติกที่มีผลต่อความมั่นคงของชิ้นส่วนพลาสติก ABS โดยวิธีการ

ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคของทากูชิ เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความมั่นคงของชิ้นงาน จาก 8 ปัจจัย เหลือ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (RSM) โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง (CCD) เพื่อหาระดับค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย พบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฝั่ง Cavity ที่ 70 °C อุณหภูมิการฉีดที่ 240 °C และความเร็วในการฉีด 120 มม. / วินาที ในระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เป็นระดับของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ ความเงาบนชิ้นส่วนพลาสติกที่เหมาะสมที่สุด

3.วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะลดสัดส่วนของเสียจากกระบวนการฉีดพลาสติก โดยการหาค่าระดับของปัจจัยงานฉีดพลาสติกที่เหมาะสมในการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากบทนำ เราทราบถึงปัญหาและชิ้นงานที่จะต้องทำการปรับปรุงเพื่อลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวม ตามรูปที่ 1 รูปที่2 รูปที่3 และตารางที่ 1 ตามลำดับ คือปัญหาประกายเงิน ชิ้นงานหมายเลข 1220402 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาประกายเงินโดยแผนผังก้างปลา ตามรูปที่ 4 และทราบถึงระดับความสำคัญของ

แต่ละปัจจัยตามตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่อาจมีผลต่อปัญหาประกายเงินสูงที่สุดคือปัจจัยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ และจากการคัดเลือกปัจจัยของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง จากตารางที่ 3 พบว่ามีทั้งหมด 8 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับการกำหนดค่าของระดับของปัจจัย ที่ใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้น จากตารางที่ 5 พิจารณาจาก ความสอดคล้องกับคุณสมบัติต่างของวัตถุดิบ เครื่องจักร รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยอาศัยเทคนิคการระดมความคิดจากทีมงาน โดยนำปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ได้ไปทำการทดลองแบบ 2^{8-3} Fractional Factorial design โดยกำหนดค่าผลตอบสนองในการทดลอง (Y) คือ จำนวนของเสียจากปัญหาประกายเงินของชิ้นงาน หมายเลข 1220402 ทำการทดลองฉีดยิงตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดตามแผนการทดลอง

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับของปัจจัย นำเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^{8-3} Fraction Factorial Experiment

Factors (Symbol)	ระดับของปัจจัย		หน่วย
	Low	High	
Screw rpm. (A)	25	35	rpm
Inj. Pressure (B)	90	110	Mpa
Clamping force (C)	230	280	Ton
Nozzle Temp. (D)	230	270	°C
Mold Temp. (E)	50	70	°C
Inj. Speed (F)	30	50	mm/Sec
Back Pressure (G)	6	10	Mpa
Suck back Dist. (H)	2	3	mm.

4. ผลการทดลอง

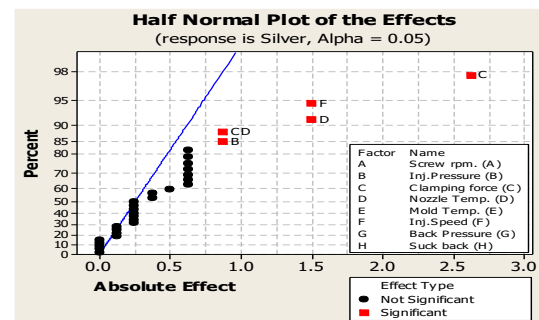
4.1 การทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment)

จากข้อมูลตารางที่ 5 ได้ทำการทดลองแบบ 2^{8-3}_{IV} Fractional Factorial design 1 Replicate 32 Run ใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) ทำการประมวลผล โดยโปรแกรม Minitab ได้ผลตามรูปที่ 9 และทำการวิเคราะห์ผลจากตาราง ANOVA พบว่าไม่สามารถสรุปผลได้เนื่องจากผลที่ได้ไม่แสดงค่า P-value

จึงพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงิน จาก Half Normal Plot ตามรูปที่ 10 พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า Y (ปัญหาประกายเงิน) มีทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้ Inj. Pressure (B) Clamping force (C) Nozzle Temp. (D) Inj. Speed (F) และ Clamping force * Nozzle Temp. (C*D)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	8	104.625	104.625	13.0781	*	*
2-Way Interactions	20	25.750	25.750	1.2875	*	*
3-Way Interactions	3	3.125	3.125	1.0417	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	31	133.500				

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA



รูปที่ 10 Half Normal plot of the Effect

Factors: 8	Base Design: 8, 32	Resolution: IV
Runs: 32	Replicates: 1	Fraction: 1/8
Blocks: 1	Center pts (total): 0	
Design Generators: F = ABC, G = ABD, H = BCDE		
Alias Structure (up to order 4)		
I + ABCF + ABDG + CDFG		
A + BCF + BDG + CEGH + DEFH		
B + ACF + ADG + CDEH + EFGH		
C + ABF + DFG + AEGH + BDEH		
D + ABG + CFG + AEFH + BCEH		
E + ACGH + ADFH + BCDH + BFGH		
F + ABC + CDG + ADEH + BEGH		
BH + CDE + EFG + ACFH + ADGH		
CD + FG + BEH + ABCG + ABDF		

รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลอง 2^{8-3}_{IV}

Fraction Factorial

จากผลการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ จากเงื่อนไขของการทดลองแบบ 2^{8-3}_{IV} Fraction Factorial เมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) พบว่าจากแผนการทดลองนี้เป็นรูปแบบ Resolution 4

ซึ่งหมายความว่า จะมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมน้อยมาก โดยอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่สามารถตรวจพบได้ จะเป็นผลของอิทธิพลร่วมที่มีโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) แบบ 2 ปัจจัยร่วมกับอีกสองปัจจัย โดยผลที่ได้จากการทดลองประมวลผลโดยโปรแกรม Minitab ตามรูปที่ 11

หลังจากพิจารณา Aliases แล้วสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อ Y (ปัญหาประกายเงิน) อย่างมีนัยสำคัญคือ ปัจจัย B C D F ที่ระดับนัยสำคัญ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha=0.05$) จึงนำปัจจัย ดังกล่าว ไปทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^4 รวมกับการทดลองที่จุด Center point เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง และเพื่อตรวจสอบ และยืนยันว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง (Linear) หรือเชิงเส้นโค้ง (Curvature) โดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 1 ระดับ (Level) เพื่อใช้พิจารณาในการทดลองที่จะแยกต่อไป ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองตามตารางที่ 6 ทำการทดลองจำนวน 3 Replicate ในแต่ละการทดลองใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) ผลที่ได้ตามรูปที่ 12 ประมวลผลโดย โปรแกรม Minitab

ตารางที่ 6 ปัจจัยและระดับของปัจจัย นำเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^4 Factorial design with Center point

ปัจจัยนำเข้า/Factor	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		หน่วย
		ต่ำ	สูง	
แรงดันฉีด (Inj.Pressure)	B	90	110	Mpa.
ความเร็วฉีด (Inj.Speed)	F	30	50	mm/Sec.
แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)	C	230	280	Ton
อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle tep.)	D	230	270	°C

ผลการวิเคราะห์การทดลอง จากรูปที่ 12 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) ของการทดลองพบว่าค่า (Y) ปัญหาประกายเงินมีการเปลี่ยนแปลงอันมีผลมาจากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า Y ข้างต้น เท่ากับ ร้อยละ 86.52 แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองใน 100 หน่วย จะมีความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการทดลองถึง 86.52 หน่วย ในขณะที่หน่วยที่เหลือไม่สามารถอธิบาย

ได้ว่ามีความผันแปรเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือไม่ ซึ่งก็หมายถึงเกิดจากความคลาดเคลื่อนนั่นเอง และพิจารณาจาก ค่าของ Ct Pt (Center point) ค่า P Value ที่ได้น้อยกว่า 0.05 และจากตาราง ANOVA ค่าของ Curvature ค่า P Value ที่ได้น้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกัน สรุปได้ว่าความสัมพันธ์เป็นลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second-order Model) สำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ระดับของอิทธิพลอย่างละเอียด ซึ่งในการวิจัยนี้ได้นำการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) มาวิเคราะห์ ระดับของอิทธิพลอย่างละเอียดเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการทดลองสูง ในหัวข้อถัดไป

Factorial Fit: Y versus Inj. Pressure(B), Inj. Speed(F), Clamping force(C), Nozzle Temp. (D)						
Estimated Effects and Coefficients for Y (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		10.104	0.1581	63.90	0.000	
B	-1.042	-0.521	0.1581	-3.29	0.002	
F	3.958	1.979	0.1581	12.52	0.000	
C	2.792	1.396	0.1581	8.83	0.000	
D	0.625	0.312	0.1581	1.98	0.056	
B*F	-0.292	-0.146	0.1581	-0.92	0.362	
B*C	0.208	0.104	0.1581	0.66	0.514	
B*D	-0.625	-0.312	0.1581	-1.98	0.056	
F*C	0.375	0.188	0.1581	1.19	0.243	
F*D	-0.625	-0.312	0.1581	-1.98	0.056	
C*D	-0.125	-0.063	0.1581	-0.40	0.695	
B*F*C	2.125	1.062	0.1581	6.72	0.000	
B*F*D	0.458	0.229	0.1581	1.45	0.156	
B*C*D	-0.042	-0.021	0.1581	-0.13	0.896	
F*C*D	1.125	0.563	0.1581	3.56	0.001	
B*F*C*D	-0.458	-0.229	0.1581	-1.45	0.156	
Ct Pt		-2.704	0.5148	-5.25	0.000	
S = 1.09545 PRESS = 96.375						
R-Sq = 90.67% R-Sq(pred) = 79.18% R-Sq(adj) = 86.52%						
Analysis of Variance for Y (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	299.250	299.250	74.812	62.34	0.000
2-Way Interac	6	12.792	12.792	2.132	1.78	0.132
3-Way Interac	4	71.917	71.917	17.979	14.98	0.000
4-Way Interac	1	2.521	2.521	2.521	2.10	0.156
Curvature	1	33.113	33.113	33.113	27.59	0.000
Residual Error	36	43.200	43.200	1.200		
Pure Error	36	43.200	43.200	1.200		
Total	52	462.792				

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลอง 2^4

Factorial design

4.2 การวิเคราะห์ผลตอบ Response Surface Methodology (RSM) และ Response Optimization เพื่อที่จะหาระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ในการแก้ไขปัญหาประกายเงินของชิ้นงานหมายเลข 1220402 ได้นำปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้นทั้ง 4 ปัจจัยมาทำการวิเคราะห์

โดยใช้ การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite ซึ่งจะทำให้การทดลองจำนวน 1 Replicate 31 Run ใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) โดยกำหนดค่าในการทดลองตามตารางที่ 7 โดยที่จะทำการควบคุมปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน ตารางที่ 7 ค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ทดลองแบบ CCD

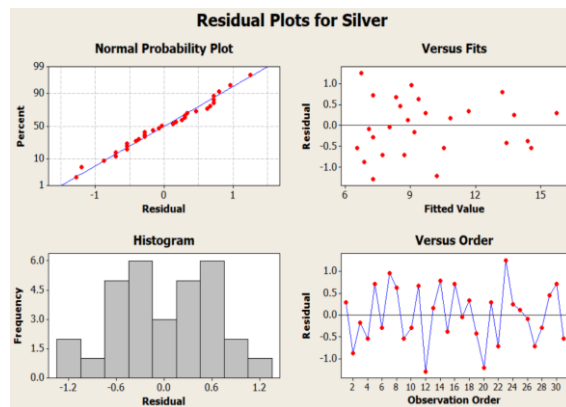
ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย					หน่วย
		$-\alpha$	-1	0	1	α	
แรงดันฉีด (Inj.Pressure)	B	80	90	100	110	120	Mpa.
ความเร็วฉีด (Inj.Speed)	F	20	30	40	50	60	mm/Sec.
แรงบีบแม่พิมพ์ (Clamping force)	C	205	230	255	280	305	Ton
อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temp.)	D	210	230	250	270	290	°C

Response Surface Regression: Y versus Inj. Pressur(B), Inj. Speed(F), Clamping force(C), Nozzle Temp. (D)						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Y						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	7.2857	0.2980	24.453	0.000		
B	0.5417	0.1609	3.366	0.003		
F	1.8750	0.1609	11.652	0.000		
C	1.4583	0.1609	9.063	0.000		
D	0.7083	0.1609	4.402	0.000		
B*B	0.4598	0.1474	3.119	0.005		
F*F	0.8348	0.1474	5.663	0.000		
C*C	1.0848	0.1474	7.359	0.000		
D*D	0.4598	0.1474	3.119	0.005		
B*D	0.4375	0.1971	2.220	0.038		
F*C	0.5625	0.1971	2.854	0.010		
S = 0.788307	PRESS = 38.8104					
R-Sq = 94.54% R-Sq(pred) = 82.96% R-Sq(adj) = 91.81%						
Analysis of Variance for Y						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	215.313	215.313	21.5313	34.65	0.000
Linear	4	154.500	154.500	38.6250	62.16	0.000
B	1	7.042	7.042	7.0417	11.33	0.003
F	1	84.375	84.375	84.3750	135.78	0.000
C	1	51.042	51.042	51.0417	82.14	0.000
D	1	12.042	12.042	12.0417	19.38	0.000
Square	4	52.688	52.688	13.1721	21.20	0.000
B*B	1	1.855	6.046	6.0462	9.73	0.005
F*F	1	13.750	19.929	19.9291	32.07	0.000
C*C	1	31.037	33.653	33.6525	54.15	0.000
D*D	1	6.046	6.046	6.0462	9.73	0.005
Interaction	2	8.125	8.125	4.0625	6.54	0.007
B*D	1	3.062	3.062	3.0625	4.93	0.038
F*C	1	5.062	5.062	5.0625	8.15	0.01
Residual Error	20	12.429	12.429	0.6214		
Lack-of-Fit	14	9.000	9.000	0.6429	1.13	0.471
Pure Error	6	3.429	3.429	0.5714		
Total	30	227.742				
Estimated Regression Coefficients for Y using data in uncoded units						
Term	Coef					
Constant	292.329					
Inj. Pressure	-1.41235					
Inj. Speed	-1.05411					
Clamping force	-0.916881					
Nozzle Temp.	-0.758110					
Inj. Pressure*Inj. Pressure	0.00459821					
Inj. Speed*Inj. Speed	0.00834821					
Clamping force*Clamping force	0.00173571					
Nozzle Temp.*Nozzle Temp.	0.00114955					
Inj. Pressure*Nozzle Temp.	0.00218750					
Inj. Speed*Clamping force	0.00225000					

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง (CCD) โดยโปรแกรม Minitab

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองตามรูปที่ 13 พบว่าปัจจัย Injection pressure มีค่า P-Value เท่ากับ 0.003 ปัจจัย Clamping force มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ปัจจัย Nozzle Temperature มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 และปัจจัย Injection speed มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมถึงปัจจัยกำลังสองซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมามีอิทธิพลต่อการปัญหาประกายเงิน และพิจารณาจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) ของการทดลองหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินเท่ากับ 91.81% แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองใน 100 หน่วย จะมีความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการทดลอง 91.81 หน่วย ส่วนหน่วยที่เหลือเราไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีความผันแปรเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือกล่าวได้ว่าหน่วยที่เหลือเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั่นเอง ผลที่ได้จากการทดลอง แสดงรูปที่ 13 ประมวลผลโดยโปรแกรม Minitab และจาก Residuals plot รูปที่ 14 จากกราฟด้านบนซ้ายเป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากการพิจารณาของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ จากกราฟบนขวา เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) จากกราฟล่างขวา เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความ คลาดเคลื่อน (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่ทำการทดลอง

พบว่าส่วนตกค้ำงั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลที่ได้นั้น มีความเสถียรของความแปรปรวน สรุปได้ว่าข้อมูลที่ทำมาทำการทดลองและผลที่ได้นั้นมีความเหมาะสม และผลการวิเคราะห์ที่ได้ตามรูปที่ 13 จึงสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความเชื่อถือได้ โดยพิจารณาจากค่า Lack-of-Fit ที่ได้ค่า P Value เท่ากับ 0.417 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) แสดงได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือได้

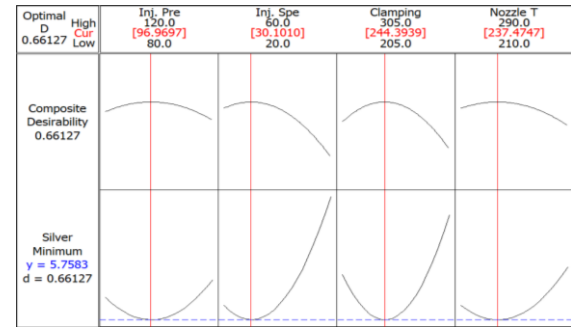


รูปที่ 14 Residuals plot

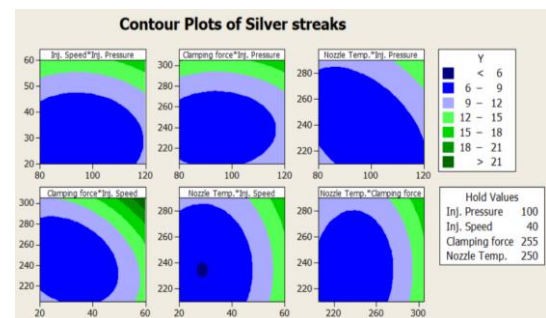
จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่า *Response Optimization* เพื่อที่จะได้ทราบระดับค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินที่เหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์ จากโปรแกรม Minitab ที่ได้แสดงตาม รูปที่ 15 และรูปที่ 16 , 17 ตามลำดับ

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Y	Minimum	0	0	17	1	1
Global Solution						
Inj. Pressur	=	96.9697				
Inj. Speed	=	30.1010				
Clamping force	=	244.394				
Nozzle Temp.	=	237.475				
Predicted Responses						
Y	=	5.75833				
Composite Desirability	=	0.661274				

รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่16 ผลตอบป้จจ้ยที่เ้เหมาะสมที่ท่ให้เกิดปัญหาประกายเงิน น้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 17 Contour Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน (B C D และ F)

จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Response Optimization ของทั้ง 4 ปัจจัยพบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัย Inj. Pressure เท่ากับ 96.96 Mpa. ปัจจัย Inj. Speed เท่ากับ 30.10 mm./Sec ปัจจัย Clamping force เท่ากับ 244.39Ton และ ปัจจัย Nozzle Temp. เท่ากับ 237.47 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) และได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y = 292.329 - 1.412 (B) - 1.054 (F) - 0.916 (C) - 0.758 (D) + 0.0045 (B)^2 + 0.0083 (F)^2 + 0.0017 (C)^2 + 0.0011 (D)^2 + 0.0021 (B*D) + 0.0022 (F*C)$$

5. ทดลองเพื่อยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง

5.1 การทดลองเพื่อยืนยันผล ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ โดยกำหนดค่าของระดับปัจจัยที่ได้ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัยที่นำไปทดลองเพื่อยืนยันผล

ปัจจัย (Symbol)	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		Unit
		ก่อน	หลัง	
Screw rpm.**	A	30	25	rpm
Inj. Pressure *	B	110	97	Mpa
Clamp. force *	C	260	240	Ton
Nozzle Temp. *	D	260	237	°C
Mold Temp. **	E	60	70	°C
Inj. Speed *	F	40	30	mm./Sec
Back Pressure **	G	8	6	Mpa
Suck back Dist **	H	3	3	mm.

(ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ*, ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ**)

โดยทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง ได้ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

ชิ้นงาน	จำนวนการทดลอง	ปัญหา ประกายเงิน	ปัญหาอื่นๆ	รวม	PPM
1220402	1000	7	2	9	9000

ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลจากตารางที่ 9 พบว่า ปัจจัยที่กำหนดในการทดลองส่งผลให้ ปัญหาประกายเงินลดลง ซึ่งมีสัดส่วนของเสียอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงพิจารณาระดับค่าปัจจัยของพารามิเตอร์มาเพิ่มจำนวนการตัวอย่างในการทดลอง ตามตารางการผลิตจริงของบริษัทการศึกษา ในช่วงระหว่างการผลิตของเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2562 และติดตามผลการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 เพื่อตรวจสอบสัดส่วนปัญหาประกายเงินที่เกิดขึ้นได้ผลตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงผลการติดตามการผลิตเพื่อยืนยันผลและการเปรียบเทียบ ปัญหาประกายเงินจากการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402

แผนการผลิต 2562	จำนวนการผลิต ชิ้นงาน 1220402	พบปัญหาประกายเงิน	
		จำนวน(ชิ้น)	PPM
พฤษภาคม-สิงหาคม(ก่อนการปรับปรุง)	32,357	1,092	33,748
กันยายน-ตุลาคม (หลังการปรับปรุง)	42,878	663	15,462
ผลการเปรียบเทียบ		ลดลง	18,286

จากตารางที่ 10 ผลจากการผลิตจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิจัย ของการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงินได้จริง กล่าวคือสัดส่วนของเสียลดลงจากเดิม 18,286 PPM หรือคิดเป็น ลดลง 54.18% ดังนั้นจึงกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน (Tolerances for Setup $\pm 5\%$) เพื่อใช้ทำการผลิต Mass Production ต่อไป

5.2 การติดตามผลการดำเนินงานวิจัย และการเปรียบเทียบผลที่ได้ การผลิตภายใต้ค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการทดลองสำหรับผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 ทำการตรวจสอบปัญหาประกายเงินที่เกิดขึ้นได้ผลสัดส่วนของเสีย ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการติดตามการผลิต จากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ ของชิ้นงาน 1220402 ในช่วงเดือนพฤศจิกายน2562 - เดือนมีนาคม 2563

สภาวะ	จำนวนการผลิต ชิ้นงาน 1220402	พบปัญหาประกายเงิน	
		จำนวน	PPM
ก่อนการปรับปรุง	32,357	1,092	33,748
การทดลองยืนยันผล (ระหว่างการปรับปรุง)	42,878	663	15,462
MP (หลังการปรับปรุง)	106,665	723	6,778
ผลการเปรียบเทียบ		ลดลง	2670

จากตารางที่ 11 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน ของชิ้นงานหมายเลข 1220402 ลดลงจาก 33748 PPM มาอยู่ที่ 6778 PPM หรือคิดเป็นลดลง 79.92 % จากสัดส่วนของเสียที่ลดลงของชิ้นงาน 1220402 ดังกล่าว

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียโดยรวม ก่อนและหลังการปรับปรุง สำหรับชิ้นส่วนใหม่

การเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียทั้งหมดสำหรับการผลิตชิ้นงานใหม่			
สภาวะการปรับปรุง/ช่วงเวลา	จำนวนการผลิตเฉลี่ยต่อ เดือน(ชิ้น)	พบของเสียเฉลี่ยทั้งหมด	
		จำนวน(ชิ้น)	PPM
ก่อนการปรับปรุง/พฤษภาคม-สิงหาคม62	31930	286	8947
หลังการปรับปรุง/กันยายน-ตุลาคม62	81121	358	4550
หลังการปรับปรุง/พฤศจิกายน62-มีนาคม63	66086	164	2320

จากตารางที่ 12 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมของปัญหาทั้งหมดของการผลิตชิ้นงานใหม่ลงได้จาก 8947 PPM ลดลงมาอยู่ที่ 2320 PPM หรือคิดเป็นลดลง 74.06% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของบริษัทฯ วิศวกรรมศึกษากำหนด

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 *สรุปผลการทดลอง* จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ เพื่อทราบถึงปัญหา และที่มาของปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาทั้งหมด จากนั้นได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลอง มาประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา ประกายเงิน และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) เพื่อใช้ในการปรับตั้งค่า พารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก พบว่ามี 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัจจัยเป็นดังนี้ แรงดันในการฉีด (Injection Pressure) 97 Mpa. แรงบิดแม่พิมพ์ (Clamping force) 240 Ton อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature 237 °C และ ความเร็วในการฉีด (Injection Speed) 30 mm/Sec. จากการนำระดับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยดังกล่าวไปปรับใช้ ในกระบวนการฉีดพลาสติก พบว่าสัดส่วนของเสียในการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 จากปัญหาประกายเงิน ลดลงจาก 33748 PPM เหลือ 6778 PPM และทำให้ส่งผลต่อสัดส่วนของเสียโดยรวมจากการผลิตชิ้นงานใหม่จาก 8947 PPM ลดลงเหลือ 2320 PPM ซึ่งเป็นไปตามที่บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษากำหนด

6.2 *ข้อเสนอแนะ* จากการนำค่าพารามิเตอร์ไปผลิตอย่างต่อเนื่อง จะต้องทำการตรวจสอบและติดตามสัดส่วนของเสียในปัญหาอื่นๆ ด้วย เช่น ฉีดไม่เต็ม ชิ้นงานเป็นครีบ เป็นต้น หากมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจต้องทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อแก้ปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง

จากการวิจัยนี้พบว่ามีความทิศทางการหาระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลได้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้ในการปรับตั้ง

ค่า พารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งผลที่ได้สามารถลดสัดส่วนของเสียได้จริง บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษามีการนำการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ และเทคนิคการออกแบบการทดลอง ไปที่ใช้ในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาอื่นๆ ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีต้องขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี คุณภานุวัฒน์ นาคสมบัติ ผู้จัดการอาวุโสและทีมงานวิศวกร บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษา ที่ให้ข้อมูลด้านเทคนิคในกระบวนการฉีดพลาสติก และขอขอบพระคุณกำลังใจ จากบิดา มารดา และสุดท้ายขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องในการให้ข้อมูลต่างๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Jit-aree, S. Jarupinyo and R. Kanchana, "Design of Experiments for Analyzing Factors Affecting to Varied Deformation in the Simulation of ABS Plastic Injection Molding Process", in *The 2nd TNIAAC: Thai-Nichi Institute of Technology Academic Conference*, Bangkok, 2013, pp. 68-73.
- [2] P. Chutima, *Design of an Engineering Experiment*. Bangkok: The Publisher of Chulalongkorn University, 2002, pp. 449-495.
- [3] B. Sorannil, *Plastic Technology*. Bangkok: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2010, pp. 14-24.
- [4] ABS Resin. TOYOLAC Technical Guide Toray Plastics (Malaysia) Sdn. Bnd [Online]. Available: https://www.torayplastics.com.my/pdf/toyolac/Technical_guide/GP_Technical_Guide.pdf

- [5] W. Techawinyuatham, Plastic injection *Engineering*. 1st edition, Bangkok: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2010.
- [6] K. Ployphanichcharoan, *Quality Control System (QC CIRCLE)*. Bangkok: The Publisher of S. Asia press co ., ltd. , 2000, pp. 209-312.
- [7] P. Suthat Na Ayudhya and P. Luengphaibun, *Design and analysis of Experiments*. Bangkok: Top, 2008, pp. 281-282.
- [8] Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. The United States of America : John Wiley & Sons, INC., 2005, pp. 478-540.
- [9] A. Jit-aree “Experimental design for the analysis of factors influencing deformation in the simulation of ABS plastic injection molding process,” M.S.Thesis, Dept. Industrial Eng., Rajamangala Univ. of Technology Thanyaburi, 2012.
- [10] P. Bourtone and W. Sriseubsai,“ Applications of Design of Experiment and Computer-Aided Engineering to Minimize Shrinkage of a Plastic Injection-molded Part” in *IE Network conference*, Phetchaburi, 2012, pp. 829-834.
- [11] K. Chasuriyakul, W. Thasana and T. Khajifa, “Study of heating and cooling temperature of injection molding to effect on gloss of plastic injection parts,” in *The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Bangkok, 2017, pp. 1238-1246.