รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์

An Analysis of Factors Affecting Deformation in a Plastic Injection Molding Process for an Automotive Plastic Part

นางสาวชลธิชา สังข์น้อย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

T148477

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์

An Analysis of Factors Affecting Deformation in a Plastic Injection Molding Process for an Automotive Plastic Part

นางสาวชลธิชา สังข์น้อย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148477
วัน.เดือน.ปี 30 ต.ค. 2560

.b.12870717
.l.....

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์
ชื่อ–สกุล นักศึกษา	นางสาวชลธิชา สังข์น้อย
คณะ วิศวกรรมศาสตร์	**ภาควิชา** วิศวกรรมอุตสาหการ
ชื่อ–สกุล อาจารย์นิเทศ	ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
ชื่อ–สกุล ผู้นิเทศงาน	คุณสาโรชน์ แพร่สกุลเจริญกิจ
สถานประกอบการ	บริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษาแห่งหนึ่ง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก และกำหนดเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสม โปรแกรม Moldex3D ถูกใช้เพื่อทำการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกตามแผนการออกแบบการทดลอง ในขณะที่โปรแกรม Minitab มาใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน มีปัจจัยนำเข้าสำหรับการศึกษาทั้งหมด 7 ปัจจัย ได้แก่ (1) เวลาในการหล่อเย็น (2) ความดันฉีดย้ำ (3) ความดันฉีด (4) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (5) ความเร็วในการฉีด (6) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และ (7) อุณหภูมิหลอมเหลว หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า มี 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฉีดพลาสติก คือ (1) เวลาในการหล่อเย็น (2) อุณหภูมิหลอมเหลว (3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และ (4) ความดันฉีดย้ำ หลังจากนั้นแผนการทดลองส่วนประสมกลางได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ เพื่อได้ค่าของระดับแต่ละปัจจัยที่นำไปสู่ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุด หลังจากทำการทดลองฉีดในกระบวนการผลิตจริง พบว่าสามารถลดปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้จริง

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง การจำลอง การโก่งงอ

Cooperative Title: An Analysis of Factors Affecting Deformation in a Plastic Injection Molding Process for an Automotive Plastic Part

Student intern name: Ms. Chonthicha Sangnoi

Faculty: Engineering **Department:** Industrial Engineering

Advisor name: Asst.Prof. Kittiwat Sirikasemsuk, Ph.D.

Mentor name: Mr. Sarote Paresakulcharuenkit

Company: A Case Study of Automotive Parts Company

ABSTRACT

The objectives of this research were to study and analyze factors affecting deformation in a plastic injection molding process and to determine appropriate conditions. According to experimental design strategies, Moldex3D software was applied to simulate the injection molding process; Minitab software was used to analyze the analysis of variance. In this research, there were the following seven input factors in the initial study: (1) cooling time (2) packing pressure (3) injection pressure (4) switching over (5) injection velocity (6) mold temperature, and (7) melting temperature. After the analysis of the variance, the result showed that there were the following four significant factors affecting the deformation: (1) cooling time, (2) melting temperature, (3) mold temperature, and (4) packing pressure. After that, the central composite design (CCD) was used to analyze the response surface methodology (RSM) in order to get a set of appropriate levels in each significant factors leading to the minimum of the warpage deformation. After the appropriate conditions derived in this project were applied to the actual injection process, it was found that the problem of the warpage deformation could reduce.

Keywords: Design of experiment, Simulation, Warpage

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สามารถทำสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ จากอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน เป็นอย่างดีมาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มต้นจนงานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ดังนั้นทางผู้ดำเนินงานจึงขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข อาจารย์นิเทศ และอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ดำเนินงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษา ให้คำแนะนำ คำชี้แนะในการดำเนินงาน ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ตลอดจนการเข้ามานิเทศที่บริษัท และการเอาใจใส่ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย ผู้ดำเนินงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ สำหรับความรู้ในการใช้งานโปรแกรม Moldex3D และความรู้เกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก

คุณสาโรชน์ แพร่สกุลเจริญกิจ รวมถึงพี่ๆ พนักงาน แผนกประกันคุณภาพ บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษา สำหรับการให้คำปรึกษาและการสนับสนุนอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่สุดสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และการเป็นกำลังใจที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง และทำให้มีความสำเร็จในวันนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการเป็นสถาบันการศึกษาที่สอน ประสบการณ์การใช้ชีวิต ความรู้ที่สำคัญซึ่งล้วนเป็นสิ่งที่มากกว่าความรู้ในด้านวิชาการเพียงอย่างเดียว

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณวิทยานิพนธ์ หนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาหาข้อมูลและแหล่งความรู้ทุกแหล่งที่ได้ศึกษา

ชลธิชา สังข์น้อย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VII

สารบัญรูป..... IX

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน..... 2

1.4ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

1.5 วิธีการดำเนินงาน..... 2

1.6 แผนการดำเนินงาน..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal)..... 6

2.2ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก..... 7

2.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process)..... 7

2.2.2 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก..... 8

2.2.3 ปัจจัยที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก..... 8

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเสียรูปในลักษณะการโก่งงอ..... 10

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง..... 11

2.4.1 การออกแบบการทดลอง..... 11

2.4.2การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทรอเรียล..... 12

2.4.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง..... 13

2.4.4วิธีการพื้นผิวผลตอบ..... 15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสถิติ..... 16
2.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล..... 16
2.5.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram)..... 17
2.5.3 แผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram)..... 18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... 20
3.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมงาน..... 21
3.1.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน..... 21
3.1.2 ศึกษาข้อมูลด้านวัตถุดิบ และข้อมูลของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการผลิต..... 22
3.1.3 ศึกษาขนาดตามมาตรฐานการออกแบบของชิ้นส่วนกรณีศึกษา..... 25
3.1.4 วิเคราะห์ปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา..... 26
3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเริ่มงาน..... 28
3.2.1 กำหนดดัชนีวัดผล (Key performance indicator)..... 28
3.2.2 กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงาน..... 29
3.2.3 ศึกษาวิธีการวัดขนาดชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา..... 29
3.2.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม..... 29
3.2.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D..... 30
3.3 ขั้นตอนที่ 3 การปฏิบัติงาน..... 30
3.3.1 คัดเลือกและกำหนดปัจจัยนำเข้า (Input factors)..... 30
3.3.2 ศึกษาเงื่อนไขกระบวนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา..... 33
3.3.3 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น..... 33
3.3.4 จำลองกระบวนการฉีดพลาสติในโปรแกรม Moldex3D..... 34
3.3.5 พิจารณาค่าการโก่งงอและประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab..... 50
3.3.6 ออกแบบแผนการทดลองส่วนประสมกลางและวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม..... 50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.7 พิจารณาผลการดำเนินงาน 51
3.4 ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน 52
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 53
4.1 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 53
4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น 55
4.2.1 การวิเคราะห์ค่าการโก่งงอพิจารณาจากกราฟกึ่งปกติและแผนภูมิพาเรโต 55
4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) 56
4.2.3 การพิจารณากราฟปัจจัยหลัก (Main effect plot) และกราฟปัจจัยร่วม (Interaction effect plot) 57
4.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 59
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบและการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม 64
4.5 ผลการทดลองเพื่อยืนยันและเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน 66
4.5.1 การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D 66
4.5.2 การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง 67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 70
5.1 สรุปผลการทดลอง 70
5.2 ข้อเสนอแนะ 71

เอกสารอ้างอิง 73
ภาคผนวก 75
ภาคผนวก ก 75
ภาคผนวก ข 77
ประวัติผู้เขียน 82

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน 4

2.1 ลักษณะทางกายภาพของพลาสติกโพลีอะซีทัลทั้ง 2 ชนิด 7

2.2 ข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่อง 11

2.3 โครงสร้างซ้ำซ้อนและความหมายของรายละเอียดแผนการทดลอง 13

2.4 แผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณีศึกษา 3 ปัจจัย 14

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของพลาสติกโพลีอะซีทัล 23

3.2 รายละเอียดและขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36 26

3.3 ตารางสรุปสาเหตุของปัญหาการโก่งงอและวิธีการแก้ไข 27

3.4 พิจารณาและคัดเลือกปัจจัยนำเข้าสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป 31

3.5 เงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่ใช้ในปัจจุบัน (Current condition) 33

3.6 แผนการทดลองเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) 34

4.1 ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3} 54

4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลและไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 59

4.3 ระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง 60

4.4 แผนการทดลองตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง 61

4.5 ค่าการโก่งงอตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง 62

4.6 เงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา 65

4.7 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 (เงื่อนไขการผลิตเดิมของบริษัทกรณีศึกษา) 67

4.8 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 (เงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO))) 68

4.9 ดัชนีวัดผล (Key performance indicator) และเป้าหมายการดำเนินงาน 68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.10 เปอร์เซ็นต์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ลดลงโดยการจำลองในโปรแกรม..... 69
4.11 เปอร์เซ็นต์ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36 ที่ลดลง..... 69

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก 8
2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดพลาสติก 8
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ 11
2.4 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ 15
2.5 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ 15
2.6ลักษณะกราฟสำหรับการทดสอบการสุ่มของข้อมูล 16
2.7 ลักษณะกราฟสำหรับการทดสอบการแจกแจงปกติ 17
2.8 ลักษณะกราฟสำหรับการพิจารณาความเสถียรของความแปรปรวน 17
2.9 ตัวอย่างแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) 18
2.10 ตัวอย่างแผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram) 18
3.1 ชิ้นส่วนกรณีศึกษาขณะทำหน้าที่ร่วมกับชิ้นส่วนอื่นๆในระบบปรับอากาศ 21
3.2 ลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วนกรณีศึกษา : ด้านหน้า ด้านข้าง(ซ้าย) ด้านข้าง(ขวา) และด้านหลัง 22
3.3 เม็ดพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) 22
3.4 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา 25
3.5 ตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 25
3.6 การวิเคราะห์สาเหตุรากของปัญหาการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 26
3.7 การแสดงค่าผลตอบสนองและแนวแกนในการประมวลผลของโปรแกรม Moldex3D 28
3.8 การวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาด้วยเครื่องวัดละเอียด 3 มิติ (Coordinate measuring machine) ... 29
3.9 การออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน2^{7-3}(2^{7-3}Fractional factorial design) 33
3.10 CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 35
3.11 การเลือกนามสกุล .stlให้กับ CAD File 35
3.12 วิธีการสร้างโปรเจคใหม่ของการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก 36
3.13 การกรอกรายละเอียดเกี่ยวกับชื่อโปรเจค (Project name)และการระบุพื้นที่จัดเก็บโปรเจค 36
3.14วิธีการสร้าง Run 1 37
3.15 การนำเข้า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.16 การเลือก CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีนามสกุล .stl 38
3.17 โปรแกรม Moldex3D Design และวิธีการกำหนดหน่วยของ CAD file 38
3.18 CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา 39
3.19 การใช้งานฟังก์ชัน “Swap” และคำสั่ง “Fix wizard” 39
3.20 การแก้ไขการทับซ้อนขององค์ประกอบย่อย (Overlap element) โดยการใช้คำสั่ง “Fix wizard” 40
3.21 การใช้คำสั่ง “Edit injection molding attribute” 40
3.22 การกำหนดทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) 41
3.23 ฟังก์ชัน “Edit injection molding attribute” สำหรับการกำหนดแท่งหล่อเย็น 41
3.24 การใช้คำสั่ง “Cooling channel” 42
3.25 ฟังก์ชัน “Melt entrance” และการใช้คำสั่ง “Specific face” 42
3.26 พื้นที่สีแดงเข้มเป็นพื้นที่เริ่มต้นที่น้ำพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่ทางวิ่ง (Runner) 42
3.27 การใช้งานฟังก์ชัน “Moldbase”และคำสั่ง “Wizard” 43
3.28 การกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของแม่พิมพ์ 43
3.29 การใช้งานฟังก์ชัน “Inlet/Outlet” และคำสั่ง “Wizard” 43
3.30 ทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็น ในระบบหล่อเย็น (Cooling unit) 44
3.31 การใช้งานฟังก์ชัน “Check” และคำสั่ง “Check cooling channel” 44
3.32 โปรแกรมดำเนินการตรวจสอบระบบหล่อเย็น (Cooling unit) 44
3.33 การใช้งานฟังก์ชัน “Meshing” และคำสั่ง “Generate” 45
3.34 การใช้งานฟังก์ชัน “Export” และคำสั่ง “Save mesh file” 45
3.35 รายละเอียดของพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) ที่ได้จากโปรแกรม Moldex3D 46
3.36 การตั้งค่าโครงการ (Project setting) เกี่ยวกับเครื่องฉีดพลาสติก 46
3.37 การตั้งค่าอัตราการไหลของพลาสติกเหลว (Flow rate) 47
3.38 การตั้งค่าความดันในการฉีด (Injection pressure) 48
3.39 การตั้งค่าความดันฉีดย้ำ (Packing pressure) 48
3.40 การตั้งค่าของระบบการหล่อเย็น (Cooling system) 49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.41 ลักษณะการจำลองกระบวนการฉีดจริง (Run) ของโปรแกรม Moldex3D..... 50

4.1 ลักษณะของกราฟกึ่งปกติ (Half normal plot)..... 55

4.2 ลักษณะของแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram)..... 55

4.3 โครงสร้างซ้ำซ้อนของปัจจัยหลัก (Main effect) และปัจจัยร่วม (Interaction effect)..... 57

4.4 กราฟปัจจัยหลัก (Main effect plot)..... 58

4.5 กราฟปัจจัยร่วม (Interaction effect plot) 58

4.6 การสร้างแผนการทดลองส่วนประสมกลางโดยพิจารณาปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย..... 60

4.7 จำนวนแผนการทดลองของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง..... 61

4.8 กราฟเศษเหลือ (Residual plot) ของค่าการโก่งงอที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO))..... 64

4.9 กราฟแสดงผลตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุดโดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)..... 65

4.10 ผลการจำลองตามเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุด..... 66

ก 1 ข้อมูลแสดงผลการโก่งงอ (Warpage) ของแบบจำลองในโปรแกรม Moldex3D..... 75

ก 2 ข้อมูลการจำลองในโปรแกรม Moldex3D..... 76

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ในปัจจุบันมีการแข่งขันทางธุรกิจที่สูง โดยสิ่งสำคัญที่ใช้ในการพิสูจน์ว่าบริษัทมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนั้นก็คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามมาตรฐาน และเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นเพื่อเป็นการเสริมสร้างศักยภาพในการแข่งขันทางธุรกิจให้สูงขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการประยุกต์เครื่องมือต่างๆ ทั้งในด้านการใช้งานเทคโนโลยีสมัยใหม่ และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงการนำความรู้ ความสามารถพิเศษเฉพาะทางของบุคคลากรเข้ามาใช้กับกระบวนการผลิต เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และที่สำคัญคือสามารถดำเนินกระบวนการผลิตให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษาพบว่า วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวคือ พลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติพิเศษ และมีข้อดีหลายประการ โดยกระบวนการผลิตที่ใช้คือ กระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำการผลิตได้รวดเร็ว และผลิตได้ในปริมาณมาก อีกทั้งยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ

กระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) เป็นกระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยทักษะและเทคนิคไม่ต่างจากกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ จากการศึกษาพบว่า หากในกระบวนการผลิตมีการควบคุมหรือการกำหนดค่าปัจจัย (Factors) ที่เกี่ยวข้องต่างๆ อย่างไม่เหมาะสมแล้วจะส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากการพิจารณาการเสียรูปของชิ้นส่วนกรณีศึกษา พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การโก่งงอ (Warpage) ทำให้ชิ้นงานมีขนาดไม่ตรงตามมาตรฐานการออกแบบ อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงเห็นสมควรที่จะมุ่งเน้นในการปรับปรุงพัฒนา และศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษาดังกล่าว

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก ซึ่งเริ่มต้นดำเนินงานด้วยการศึกษาสภาพปัจจุบัน และการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อค้นหาสาเหตุราก โดยใช้เครื่องมือ แผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram) หลังจากทราบสาเหตุรากของปัญหาการเสียรูปของชิ้นส่วนกรณีศึกษาแล้ว สามารถออกแบบแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ดังนี้ “พิจารณาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม แล้วทำการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Design of experiment (DOE)) และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีนัยสำคัญต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือค่าของปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อการเสียรูป ทำให้ได้เงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นจึงนำเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดไปทดลองผลิตจริง โดยใช้เครื่องจักร บุคคลากร และ

ทรัพยากรต่างๆ ที่มีอยู่เดิมในกระบวนการฉีดพลาสติก จากนั้นทำการยืนยัน เปรียบเทียบผลการดำเนินงาน และสรุปผลการดำเนินงานในที่สุด" ซึ่งจากแนวทางการปรับปรุงดังกล่าว ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะต้องสามารถลดปัญหาการเสียรูปหรือการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาลงได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ และระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาในกระบวนการฉีดพลาสติก

1.2.2 เพื่อค้นหาเงื่อนไขกระบวนการฉีดพลาสติกที่เหมาะสม และพิจารณาผลลัพธ์ของการทดลองหลังจากทำการผลิตจริงโดยเปรียบเทียบจากเป้าหมายการดำเนินงาน

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้พลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) เท่านั้น

1.3.2 งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Minitab สำหรับการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองเท่านั้น

1.3.3 งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Moldex3D สำหรับการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกเท่านั้น

1.3.4 การกำหนดปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการทดลอง จะกำหนดเฉพาะปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และมีความเป็นไปได้ที่จะมีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตลอดจนเป็นปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าในโปรแกรม Moldex3D ได้เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถค้นหาและกำหนดเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมให้กับกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้

1.4.2 มีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมากขึ้น

1.4.3 มีความรู้ และสามารถใช้งานโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D ได้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1.5.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมงาน

1.5.1.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

1.5.1.2 ศึกษาข้อมูลด้านวัตถุดิบ และข้อมูลของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการผลิต

1.5.1.3 ศึกษาขนาดตามมาตรฐานการออกแบบของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

1.5.1.4 วิเคราะห์ปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

1.5.2 ขั้นตอนที่ 2 การเริ่มงาน

1.5.2.1 กำหนดดัชนีวัดผล (Key performance indicator)

1.5.2.2 กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงาน

1.5.2.3 ศึกษาวิธีการวัดขนาดชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา

1.5.2.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

1.5.2.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D

1.5.3 ขั้นตอนที่ 3 การปฏิบัติงาน

1.5.3.1 คัดเลือก และกำหนดปัจจัยนำเข้า (Input factors)

1.5.3.2 ศึกษาเงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

1.5.3.3 ออกแบบการทดลองเบื้องต้น

1.5.3.4 จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D

1.5.3.5 พิจารณาค่าการโก่งงอและประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab

1.5.3.6 ออกแบบแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางและวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

1.5.3.7 พิจารณาผลการดำเนินงาน

1) การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาซึ่งได้จากโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน

2) ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วนโดยใช้โปรแกรม Minitab

3) การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

4) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

5) ผลการทดลองเพื่อการยืนยัน และเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน

5.1) การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

5.2) การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

1.5.4 ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน

1.5.4.1 วิเคราะห์และระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

1.5.4.2 กำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุด

1.5.4.3 พิจารณาผลลัพธ์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาหลังจากทดลองผลิตจริง

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน และระยะเวลาในการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559															
	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมงาน - ศึกษาสภาพปัจจุบัน กำหนดวัตถุประสงค์ กำหนดขอบเขต ตลอดจนสอบถาม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง - ศึกษาข้อมูลวัตถุดิบ และเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต - ศึกษาขนาดตามมาตรฐานการออกแบบของชิ้นส่วนกรณีศึกษา - วิเคราะห์ปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา	←							→								
ขั้นตอนที่ 2 การเริ่มงาน - กำหนดดัชนีวัดผล (Key performance indicator) หรือการกำหนดค่าผลตอบสนอง - กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงาน - ศึกษาวิธีการวัดขนาดชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา - ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม - ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Minitab และการใช้งานโปรแกรม Moldex3D								←	→							
ขั้นตอนที่ 3 การปฏิบัติงาน - คัดเลือก และกำหนดค่าปัจจัยนำเข้า (Input factors) - ศึกษาเงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา - ออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้นโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน - จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองเบื้องต้น - พิจารณาค่าการโก่งงอเพื่อประมวลผล และค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ - ออกแบบแผนการทดลองส่วนประสมกลาง จากนั้นทำการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ และวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม - ยืนยัน และเปรียบเทียบผลการทดลอง - พิจารณาผลการดำเนินงาน										←	→	←	→			

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน และระยะเวลาในการดำเนินงาน (ต่อ)

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559															
	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน สรุปผลการดำเนินงาน และจัดทำรายงานการดำเนินงาน													←			→

ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน

ตั้งแต่วันที่ 8 เดือนสิงหาคม พ.ศ.2559 ถึง วันที่ 25 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2559 รวมระยะเวลาในการปฏิบัติงานทั้งหมดเป็นเวลา 3 เดือน 25 วัน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้ผู้ดำเนินงานได้กล่าวถึงองค์ความรู้ ทฤษฎี วิธีการดำเนินงานต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ไว้ภายในบทที่ 2 โดยมีหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal)

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเสียรูปในลักษณะการโก่งงอ

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสถิติ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) [1,2]

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มีโมเลกุลต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวแบบปลายต่อปลาย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะสามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกจึงเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อเป็นผลิตภัณฑ์แล้วเปรียบเสมือนน้ำแข็ง เมื่อถูกความร้อนก็จะละลายกลายเป็นน้ำ และเมื่อทำให้มีอุณหภูมิลดต่ำลงไปถึงจุดแข็งตัว น้ำก็กลายเป็นน้ำแข็งได้อีก

เทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้อยู่ทั่วไป สามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้

-โพลีอะซีทัล (Polyacetal) -เอบีเอส (ABS)

-อะคริลิก (Acrylic) -ไวนิล (Vinyl)

-ฟลูออร์โรคาร์บอน (Fluorocarbons) -เซลฟูโลซิก (Cellulosics)

โพลีอะซีทัลเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1906 แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) Polyacetal homopolymer resins

2) Polyacetal copolymer resins

ลักษณะโดยทั่วไปคือ จับลื่นคล้ายเทียนไข ผิวมีลักษณะคล้ายโพลิโพรพิลีน (Polypropylene) สีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม โดยสามารถพิจารณาลักษณะทางกายภาพของโพลีอะซีทัล (Polyacetal) ชนิด Polyacetal homopolymer resins และชนิด Polyacetal copolymer resins แสดงดังตารางที่ 2.1

พลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) มีคุณสมบัติที่เหนียว ทนทาน รับแรงดึงได้ดีมาก แข็งแรง ทนทานสารเคมี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีพิษ ใช้ได้ดีทั้งอุณหภูมิสูงกว่าจุดน้ำเดือด (212 – 225 องศาฟาเรนไฮท์) และจุดต่ำกว่าศูนย์ (-40 องศาฟาเรนไฮท์) ดังนั้นพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) นับเป็นพลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastic) ที่ดีมากชนิดหนึ่ง

พลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้แทนชิ้นส่วนโลหะที่หล่อโดยวิธีดายคาสท์ (Die casting) นอกจากนั้นยังใช้ทำชิ้นส่วนในรถยนต์ และเครื่องจักรกล เช่น คาร์บูเรเตอร์ เกียร์ แบริ่ง ลูกกลิ้ง ชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหวหรือมีการเสียดทาน

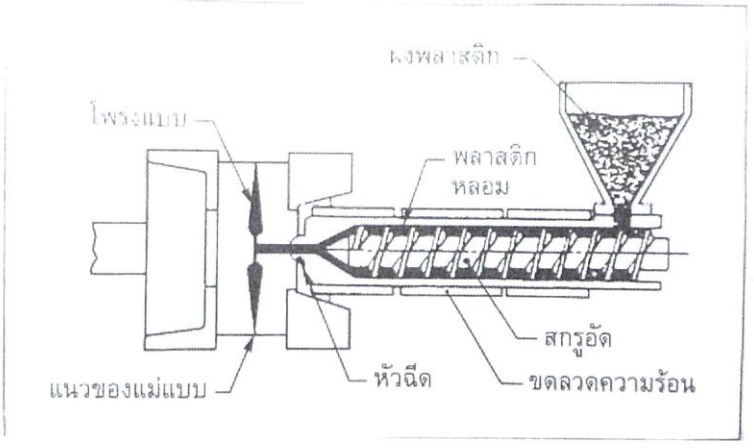
ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของพลาสติกโพลีอะซีทัลทั้ง 2 ชนิด

	Polyacetal homopolymer resins	Polyacetal copolymer resins
กรรมวิธีการผลิต (Molding method)	Injection, Extrusion	Injection, Extrusion, Blow
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (Molding temperature)	380 - 480 องศาฟาเรนไฮฟ์	360 - 430 องศาฟาเรนไฮฟ์
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.42	1.41
ปริมาตร ลบ.นิ้ว/ปอนด์	19.5	19.7
ทนแรงดึง (Tensile strength)	11,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว	9,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
ทนแรงอัด (Compressive strength)	19,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว	16,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
ทนแรงกระทบ (Izod impact strength)	2.0	1.4
ความแข็ง (Hardness rockwell)	M 94	M 80
ทนความร้อนโดยปกติ (Resistance to heat)	185 องศาฟาเรนไฮฟ์	220 องศาฟาเรนไฮฟ์
ความดูดซึมน้ำ (Water absorption) 24 ชั่วโมง	0.25 %	0.22 %
อัตราการเผาไหม้ (Burning rate)	ช้า	ช้า
ทนกรด (Resistance to acid)	ดี (ไม่ทนกรดเข้ม)	พอใช้
ทนด่าง (Resistance to alkalis)	พอใช้ – ดี	เลว
ทนแสงแดด (Resistance to sunlight)	พอใช้	พอใช้
ทนสารละลาย (Resistance to solvents)	ดีมาก	ดีมาก

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก [3]

2.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process)

การฉีดพลาสติกขึ้นรูปวิธีนี้จะใช้กับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยจะอาศัยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) ทำงานโดยการเติมพลาสติกซึ่งอาจจะเป็นผงหรือเม็ด ลงในกรวย (Hopper) จะถูกเกลียวหนอน (Screw – type plunger) หมุนส่งไปยังด้านหน้าซึ่งมีแผ่นความร้อนหุ้มอยู่ จะทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลว จากนั้นเกลียวตัวหนอนจะเคลื่อนที่ดันพลาสติกผ่านหัวฉีด (Nozzle) ไปเข้าแม่พิมพ์ซึ่งปิดอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.1 หลังจากนั้นแม่แบบจะถูกหล่อเย็นจากน้ำหล่อเย็นเพื่อทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัวจนสามารถถอดออกจากแม่พิมพ์ได้



รูปที่ 2.1 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

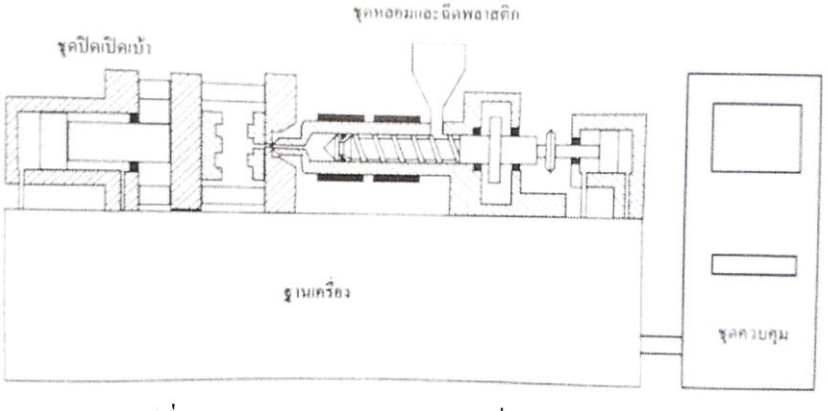
2.2.2 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก [4]

เครื่องฉีดพลาสติกในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกจำเป็นต้องออกแบบเครื่องฉีดให้มีลักษณะเหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการผลิต และจำเป็นจะต้องใช้เงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสม โดยทั่วไปเครื่องฉีดพลาสติก ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ

1) ชุดหลอมเหลวและชุดฉีดพลาสติก (Plastic melting and injection unit)

2) ชุดปิดและเปิดเบ้า (Clamping unit)

3) ระบบไฮดรอลิก ระบบควบคุม และระบบไฟฟ้า (Hydraulics, control and electrical system) โดยส่วนประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดพลาสติก

2.2.3 ปัจจัยที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก [5]

1) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)

อุณหภูมิหลอมเหลว คือ อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานมีปัจจัยที่สำคัญและจะต้องทำการพิจารณาคือ ชนิดของพลาสติก เนื่องจากหากอุณหภูมิ

หลอมเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น ค่าความหนืด (Viscosity) ค่าปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เป็นต้น

2) อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel temperature)

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของกระบอกฉีดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหน้า (Front) ส่วนกลาง (Center) และส่วนหลัง (Rear) ซึ่งทำความร้อนจากแผ่นความร้อนที่ติดอยู่กับกระบอกฉีด

3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

อุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะมีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์เช่นเดียวกับอุณหภูมิหลอมเหลว

4) อุณหภูมิขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding temperature)

อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์นี้มีผลต่อชิ้นงาน กล่าวคือหากการปลดชิ้นงานเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากจะทำให้ชิ้นงานที่เย็นตัวนอกแม่พิมพ์เกิดการหดตัว ไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ แต่หากปลดชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำมากเกินไปจะทำให้เสียเวลามากซึ่งทำให้อัตราการผลิตลดลง

5) เวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกฉีด (Resident time)

เวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกฉีดนั้นเป็นสิ่งสำคัญ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลคือความเร็วรอบสกรู ขนาดของชิ้นงาน และขนาดสกรู ถ้าหากพลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกฉีดเป็นเวลานานเกินไป จะส่งผลให้พลาสติกเสื่อมสภาพได้ แต่ถ้าหากเวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกฉีดน้อยเกินไปก็จะทำให้พลาสติกไม่หลอมเหลว

6) ระยะสำรอง (Cushion)

ระยะสำรอง คือ ระยะที่ช่วยป้องกันการเกิดการกระแทกของหัวฉีดกับแม่พิมพ์

7) ความเร็วรอบสกรู (Screw speed)

ความเร็วรอบสกรู มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว ระยะเวลาในการหลอมเหลวและการป้อนพลาสติก หากความเร็วรอบสกรูสูงจะทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวสูงขึ้น แต่จะทำให้ระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติกเหลวต่ำลง ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้รอบความเร็วสกรูสูง เนื่องจากจะส่งผลให้เนื้อพลาสติกหลอมเหลวเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น

8) ความดันต้านการถอยกลับสกรู (Back pressure)

ความดันต้านการถอยกลับของสกรู เป็นความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านซ้ายของสกรู โดยทั่วไปแล้วพลาสติกที่เข้าสู่กระบอกฉีดจะมีความสม่ำเสมอหรือไม่นั้น จำเป็นต้องอาศัยความดันต้านการถอยกลับของสกรู เพื่อควบคุมระยะเวลาในการหมุนตัวถอยกลับของสกรู และเพื่อทำการป้อนพลาสติกเข้าสู่กระบอกฉีด

9) ระยะเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเดิมเป็นฉีดย้ำ (Switching over)

การกำหนดตำแหน่งนั้นจำเป็นต้องกำหนดระยะที่เกิดขึ้นก่อนตำแหน่งที่ต้องการจริงแต่เป็นสิ่งที่ยากเนื่องจากมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อเวลาและ ตอบสนองการทำงานของไฮดรอลิค (Hydraulic)

10) ความเร็วฉีด (Injection velocity)

ความเร็วในการฉีด คือ ความเร็วของสกรูที่เคลื่อนที่เพื่อทำหน้าที่ดันพลาสติกเหลวให้ไปอยู่ที่หัวฉีดและเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยมีไฮดรอลิค (Hydraulic) เป็นตัวขับซึ่งความเร็วฉีดและความดันฉีดเป็นสิ่งที่เกิดคู่กัน

11) ความดันฉีด (Injection pressure)

ความดันฉีด คือ ความดันที่ทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าสกรูถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งสามารถปรับได้จากความดันไฮดรอลิค (Hydraulic)

12) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)

การฉีดย้ำเป็นขั้นตอนในการฉีดเมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ไปแล้วประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความสำคัญของการฉีดย้ำ คือ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ไหลย้อนกลับ

13) เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)

เวลาในการฉีดย้ำมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของชิ้นงานถ้าหากเวลาในการฉีดย้ำน้อยเกินไป จะส่งผลให้ความดันในแม่พิมพ์ไม่เพียงพอที่จะทำให้พลาสติกเหลวแน่นเต็มแม่พิมพ์

14) แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)

การปิดแม่พิมพ์เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์เปิดออกขณะทำการฉีด ดังนั้นแรงที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์จำเป็นต้องเพียงพอ เพื่อไม่ให้พลาสติกเหลวล้นออกมาซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดครีบในชิ้นงาน

15) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

เวลาในการหล่อเย็นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการฉีดพลาสติก เพราะต้องทำให้พลาสติกเย็นตัวก่อนที่จะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเสียรูปในลักษณะการโก่งงอ [6]

การโก่งงอ (Warpage) หรือการบิดเบี้ยวของชิ้นงานซึ่งเกิดจากชิ้นงานหดตัว แต่เป็นการหดตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการโก่งงอหรือรูปร่างไม่เป็นไปตามต้องการ ซึ่งสิ่งสำคัญที่จะทำให้สามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้คือต้องทราบและจำแนกสาเหตุของปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาเนื่องจาก

แม่พิมพ์ ปัญหาจากการปรับตั้งค่าปัจจัยของเครื่องฉีดพลาสติก เป็นต้น ซึ่งแนวทางในการแก้ไขข้อบกพร่องประกอบด้วยหลายวิธี แสดงดังตารางที่ 2.2

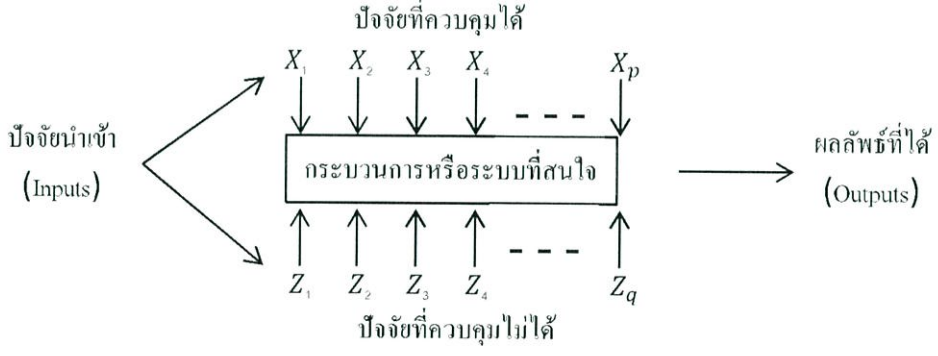
ตารางที่ 2.2 ข้อบกพร่อง และแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่อง

ข้อบกพร่อง	แนวทางการแก้ไขข้อบกพร่อง	
ชิ้นงานโก่งงอ, บิดเบี้ยวเสียรูป (Warpage)	1) ลดความดันฉีดให้ต่ำลง 2) เพิ่มความดันและเวลาในการฉีดซ้ำ 3) เพิ่มอุณหภูมิหัวฉีด 4) ลดความเร็วในการฉีด 5) เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์	6) เพิ่มความดันต้านการถอยกลับของสกรู 7) เพิ่มเวลาในการหล่อเย็น 8) เพิ่มเวลาในการเปิดแม่พิมพ์ 9) อบพลาสติกให้แห้งสนิท

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง [7]

2.4.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยนำเข้า (Input factor) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ (Outputs or response) โดยปัจจัยนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้เรียกว่า "ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factor) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้เรียกว่า "ปัจจัยที่รบกวนระบบ" (Uncontrollable or noise variable) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

การกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้วปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก เป็นต้น ซึ่งยากแก่การควบคุม

2.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทรอเรียล [8,9]

1) การออกแบบการทดลองแบบแฟคทรอเรียลเต็มรูป (Full factorial experiment)

การทดลองแฟคทรอเรียลเต็มรูป เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการศึกษาผลกระทบร่วม ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำใช่สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) และระดับสูงใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองลักษณะนี้เหมาะกับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้น ซึ่งจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกในขั้นตอนต่อไปมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

2) การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial experiment)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเป็นการทดลองซึ่งใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบมากที่สุด ดังนั้นนการทดลองนี้จึงเป็นการทดลองในขั้นตอนแรก การทดลองแบบแฟคทรอเรียลบางส่วนถูกนำมาใช้มากสำหรับการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพล กล่าวคือสำหรับการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่อยู่ในความสนใจก็จะใช้การออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเพื่อค้นหาว่าปัจจัยใดบ้าง เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพล ซึ่งการทดลองส่วนใหญ่จะเรียกว่า การทดลองเพื่อการวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening experiment) กล่าวคือเป็นการทดลองที่ใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่ามีปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบมากที่สุด ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการทดลองในขั้นตอนแรก การทดลองแบบแฟคทรอเรียลบางส่วน คือ การทดลองที่ทำโดยการลดรูปลงจากการทดลองแฟคทรอเรียลเต็มรูปในสัดส่วนของจำนวนระดับของปัจจัย เช่นการทดลอง $2^{k-p} = \frac{2^k}{2^p}$ เมื่อ $p = 1$ จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของการทดลอแฟคทรอเรียลเต็มรูป ($\frac{1}{2}(2^k)$) ของ k ปัจจัย (One half fraction factorial) หรือ เมื่อ $p = 2$ จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดจะเท่ากับ $\frac{2^k}{2^2} = \frac{1}{4}(2^k)$ หรือ One forth fraction factorial เป็นต้น

3) โครงสร้างซ้ำซ้อน และรายละเอียดของแผนการทดลอง (Alias structure and resolution)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial experiment) โดยทั่วไปจะนิยมศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (Screening experiment) โดยการศึกษาความสัมพันธ์กรณีโพลิโนเมียลดีกรี 2 นั้นจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในการทดลองเนื่องจากจะมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก (Main factors) และปัจจัยร่วม (Interaction factors) โดยสามารถพิจารณาค่ารายละเอียดของแผนการทดลอง (Design resolution) ซึ่งเป็นตัวบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม สำหรับการทดลองที่ออกแบบขึ้นแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างซ้ำซ้อน และความหมายของรายละเอียดแผนการทดลอง

Resolution	P-Factor	(R-p) Factor	ความหมาย
III	1 (Main effect)	2 (2-Factor interaction)	การใช้ Design resolution III ผลกระทบหลัก จะไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก แต่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับใช้ในการคัดเลือกปัจจัยในการทดลองออก ในกรณีที่มีปัจจัยในการทดลองจำนวนมาก
	(2)	(1)	
IV	1	3	การใช้ Design resolution IV ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย แต่ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยซ้ำซ้อนกัน และผลกระทบหลักซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ศึกษาปัจจัยหลัก
	2	2	
	(3)	(1)	
V	1	4	การใช้ Design resolution V ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกันเอง และไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย แต่จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 4 ปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยจะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (3- Factor interaction)
	2	3	
	(3)	(2)	

2.4.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง [7]

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second – order or quadratic model) จากงานวิจัยต่างๆ (Box และ Draper (1987)) พบว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางนั้นมีความยืดหยุ่น (Very flexible) ในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 โดยตัวอย่างแผนการทดลองแบบ CCD ของปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณีศึกษา 3 ปัจจัย

CCD , k = 3 ใช้ในการทดลอง 2^3				ลักษณะการออกแบบ
Run	A	B	C	
1	-	-	-	F
2	-	-	+	
3	-	+	-	
4	-	+	+	
5	+	-	-	
6	+	-	+	
7	+	+	-	
8	+	+	+	
9	0	0	0	C
10	0	0	0	
11	0	0	0	
12	0	0	0	
13	0	0	0	
14	0	0	0	
15	α	0	0	A
16	$-\alpha$	α	0	
17	0	$-\alpha$	α	
18	0	0	$-\alpha$	
19	0	0	0	
20	0	0	0	

โดย F = ส่วนของการทดลองแฟคทรอเรียล (Factorial portion)

C = ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Centerpoint portion)

A = ส่วนของจุดแกน (Axial point)

ข้อดีของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

1) เหมาะสมมากที่สุด (Most effective and efficient) ในการศึกษาสมการ โพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second - order model) กรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors)

2) มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เพราะสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟคทรอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ และการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน

3) โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ 2^{k-p} การทดลอง Fractional factorial (IV) การออกแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับคือ ทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial portion) และจุดศูนย์กลาง (Center point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการตัวแบบเชิงเส้นตรงสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center point) ถ้าสมการในรูปเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial portion) จะได้สมการโพลิโนเมียลดีกรี 2

ข้อเสียของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

คือ เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factor) จะต้องทำการปรับแผนการทดลอง โดยเฉพาะที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพมากกว่า 1 ปัจจัย

2.4.4 วิธีการพื้นผิวผลตอบ [9]

วิธีการพื้นผิวผลตอบ เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

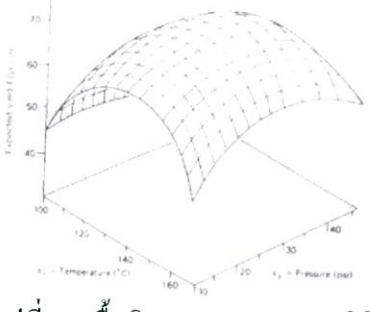
$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon$$

โดยที่ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(X_1, X_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

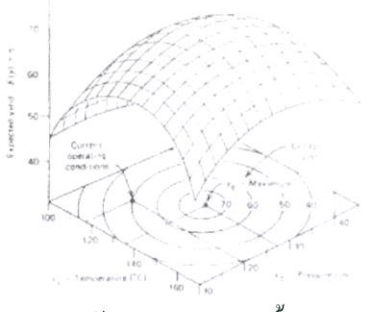
$$\eta = f(X_1, X_2)$$

ซึ่งเรียกว่า "พื้นผิวผลตอบ (Response surface)"

โดยทั่วไปจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบกราฟฟิก แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับที่ X_1, X_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour plot) ของพื้นที่ผิวผลตอบแสดงดังรูปที่ 2.5 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.4 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ



รูปที่ 2.5 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสถิติ [10]

2.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล

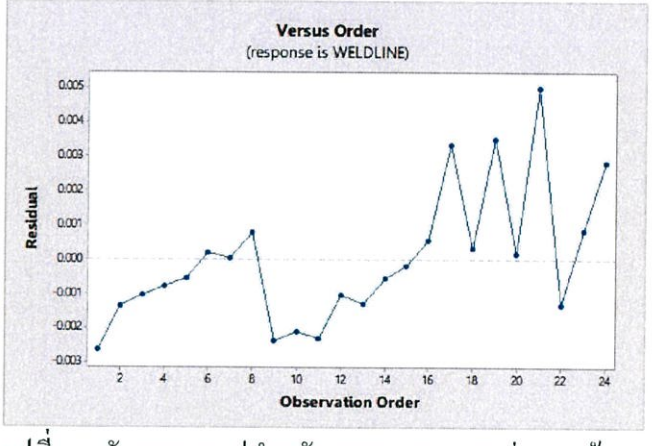
ข้อมูลที่ทำการศึกษาจำเป็นต้องมีคุณสมบัติตามข้อกำหนด คือ ความปกติของข้อมูล (Normal) ความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) และความเสถียรของความแปรปรวน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อทำการตรวจว่าแบบจำลองมีความถูกต้องหรือไม่ ซึ่งหากแบบจำลองไม่มีความถูกต้องแล้วจะถือได้ว่าข้อมูลไม่มีความเหมาะสมและไม่สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลได้ การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการผ่านทางการทดสอบเศษเหลือ (Residual) ของข้อมูล แทนด้วยสัญลักษณ์ e_{ij} หมายความว่าเศษเหลือ (Residual) สำหรับข้อมูลที่ j ของระดับปัจจัยที่ i

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

เมื่อ $\hat{y}_{ij}$ คือค่าประมาณ (Fit) ของข้อมูล y_{ij} ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าเฉลี่ยของ y_i ($\bar{y}_i$) หมายความว่าค่าประมาณข้อมูลในระดับปัจจัยที่ i คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในระดับปัจจัยนั้นๆ ซึ่งการทดสอบข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์มีวิธีการดังนี้

1) การทดสอบการสุ่มของข้อมูล (Run test)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือและเวลา หรือลำดับข้อมูลในการพิจารณา แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งหากข้อมูลมีการสุ่มแล้วจะต้องไม่มีลักษณะเป็นจุดต่อเนื่อง (Run) หรือมีแนวโน้ม (Trend)

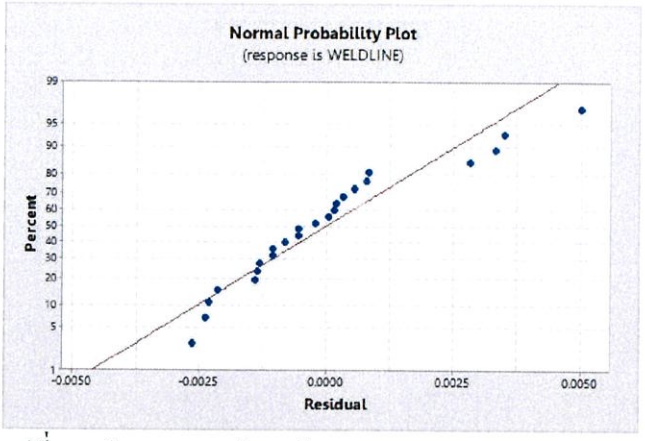


รูปที่ 2.6 ลักษณะกราฟสำหรับการทดสอบการสุ่มของข้อมูล

2) กราฟทดสอบการแจกแจงปกติ (Normal probability paper (NOPP))

กราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติเป็นกราฟที่พล็อตระหว่างข้อมูลที่นำมาพิจารณากับความถี่สะสมในสเกลของการแจกแจงปกติ และนำมาใช้ตรวจสอบความเป็นปกติ (Normal) ของข้อมูลโดยเฉพาะ แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งหากข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติแล้ว กราฟทดสอบการแจกแจงปกติ (Normal probability paper) จะให้ข้อมูลที่มีลักษณะการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง

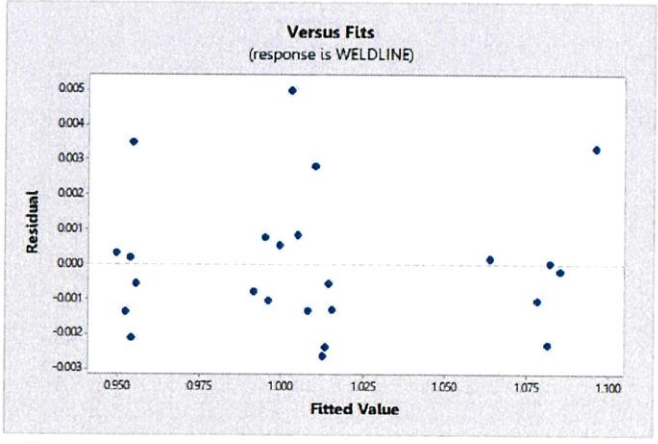
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.7 ลักษณะกราฟสำหรับการทดสอบการแจกแจงปกติ

3) การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Test for equal variance)

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษเหลือ (Residual) และค่าประมาณ (Fit) สำหรับการพิจารณาความเสถียรของความแปรปรวน แสดงในรูปที่ 2.8 โดยหากความแปรปรวนมีความเสถียรแล้ว การกระจายตัวของค่าเศษเหลือ (Residual) ที่เหนือและใต้เส้น 0 ควรมีขนาดใกล้เคียงกัน



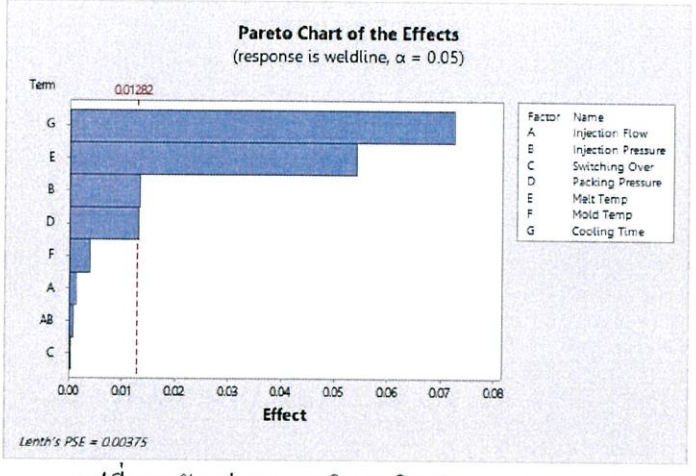
รูปที่ 2.8 ลักษณะกราฟสำหรับการพิจารณาความเสถียรของความแปรปรวน

2.5.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram)

แผนภูมิพาเรโตเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรของข้อมูลที่มีการจำแนกประเภท โดยถ้าข้อมูลที่มีความเสถียรแล้ว ข้อมูลที่มีความสำคัญจะมีเพียงจำนวนน้อย (Vital few) ในขณะที่ข้อมูลที่เหลืออยู่มากมายจะมีความสำคัญเพียงเล็กน้อย (Trivial many) ดังนั้นถ้าข้อมูลเป็นไปตามหลักของพาเรโตแล้ว แสดงว่าข้อมูลนั้นอยู่ในสภาวะที่เสถียรและสามารถคาดการณ์ได้ แต่ถ้าข้อมูลไม่ได้เป็นไปตามหลักของพาเรโตแสดงว่าข้อมูลไร้เสถียรภาพ อันเนื่องมาจากข้อมูลอยู่ในสภาวะการ

148477

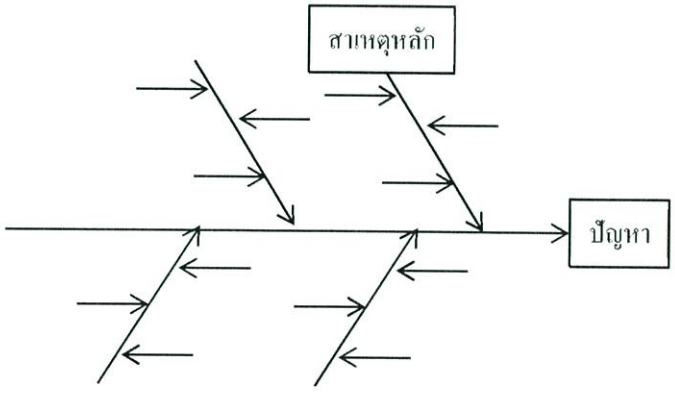
ปรับตัวเข้าสู่ความเสถียร จึงควรทำการแก้ไขด้วยการทำให้กระบวนการมีมาตรฐาน ซึ่งตัวอย่างของแผนภูมิพาเรโต แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram)

2.5.3 แผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram)

แผนภาพก้างปลาเป็นการนำเสนอความสัมพันธ์อย่างเป็นระบบระหว่างสาเหตุและผลสำหรับประเด็นปัญหาที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยแผนภาพก้างปลาจะมุ่งสู่รายการสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (ตามหัวปลา) ซึ่งทำให้ทราบรายการของสาเหตุทั้งหมดจากระบบงาน เพราะพิจารณาจากความเรื้อรังของปัญหา ทำให้สามารถพิสูจน์หาสาเหตุได้ค่อนข้างง่าย แต่จะต้องใช้ความพยายามระดมความคิดหาสาเหตุที่คาดว่าจะเป็นไปได้ทั้งหมด และต้องทำการทบทวนเพื่อให้มั่นใจว่าสาเหตุหลักๆ ของปัญหาไม่ได้ตกไปจากการพิจารณา



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างแผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิริวรรณ ขาวอุไร และทีมงาน [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการแก้ไขข้อบกพร่องของการขึ้นรูปงานฉีดฝาครอบฐานถ้วยรางวัล และวิธีการหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดจำนวนรอยเชื่อม (Weldline) น้อยที่สุดโดยใช้หลักของการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full factorial design) ซึ่งมีปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว แรงดันในการฉีด ความเร็วในการฉีด และเวลาในการหล่อเย็น และการประยุกต์ใช้โปรแกรม Moldex3D ซึ่งเป็นซอฟแวร์ที่สามารถจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกได้

พิชกรณ์กร ชวนาทนุสรณ์ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการโก่งงอ และรอบเวลาการฉีดขึ้นรูปตลอดจนการพิจารณาปัจจัยตั้งต้นของการออกแบบการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดย้ำ เวลาในการฉีดย้ำ และเวลาในการหล่อเย็น ตลอดจนการหาค่าที่เหมาะสมโดยการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรรมยกตัวอย่างเช่น เทคนิคการออกแบบการทดลอง ตลอดจนการนำโปรแกรม Moldflow เข้ามาใช้ในการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก

สิทธิศักดิ์ ธุรกิจ [13] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของเต้าเสียบปลั๊กไฟที่ผลิตจากพลาสติก ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) โดยมีการประยุกต์เทคโนโลยี CAD/CAE เข้ามาช่วยในการวิจัย และศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าปัจจัยต่างๆ เช่น ความดันฉีดย้ำ เวลาในการฉีดย้ำ เป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญ หรือมีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิต

พรนภา สนองบุญ [14] ได้ศึกษาการปรับตั้งค่าปัจจัยที่สำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพชิ้นงาน และเกี่ยวข้องกับการปรับตั้งค่า คือ ชนิดของพลาสติก ระยะทางการไหลที่ยาวที่สุด และความหนาของชิ้นงานกรณีศึกษา

จิตตสุภา ไกรจักร์ และกณิดา ต่อสกุล [15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการชำระล้างกระบอกฉีดพลาสติกและเพื่อกำหนดค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านั้น และศึกษาเกี่ยวกับรายละเอียดของกระบวนการฉีดพลาสติกที่มีแม่พิมพ์แบบทางวิ่งร้อน

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

สำหรับวิธีการดำเนินงานในหัวข้อเรื่อง "การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์" สามารถจำแนกขั้นตอนการดำเนินงานได้ 4 ขั้นตอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมงาน

3.1.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

3.1.2 ศึกษาข้อมูลด้านวัตถุดิบ และข้อมูลของเครื่องฉีดพาสติกที่ใช้ในการผลิต

3.1.3 ศึกษาขนาดตามมาตรฐานการออกแบบของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

3.1.4 วิเคราะห์ปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเริ่มงาน

3.2.1 กำหนดดัชนีวัดผล (Key performance indicator)

3.2.2 กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงาน

3.2.3 ศึกษาวิธีการ วัดขนาดชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา

3.2.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

3.2.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D

3.3 ขั้นตอนที่ 3 การปฏิบัติงาน

3.3.1 คัดเลือก และกำหนดค่าปัจจัยนำเข้า (Input factors)

3.3.2 ศึกษาเงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

3.3.3 ออกแบบการทดลองเบื้องต้น

3.3.4 จำลองกระบวนการฉีดในโปรแกรม Moldex3D

3.3.5 พิจารณาค่าการโก่งงอและประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab

3.3.6 ออกแบบแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางและวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

3.3.7 พิจารณาผลการดำเนินงาน

3.3.7.1 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาซึ่งได้จากโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

3.3.7.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนโดยการใช้โปรแกรม Minitab

3.3.7.3 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

3.3.7.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

3.3.7.5 ผลการทดลองเพื่อการยืนยัน และเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน

1) การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

2) การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

3.4 ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน

สำหรับการสรุปผลการดำเนินงานจะทำการสรุปผลตามวัตถุประสงค์

3.4.1 วิเคราะห์ และระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

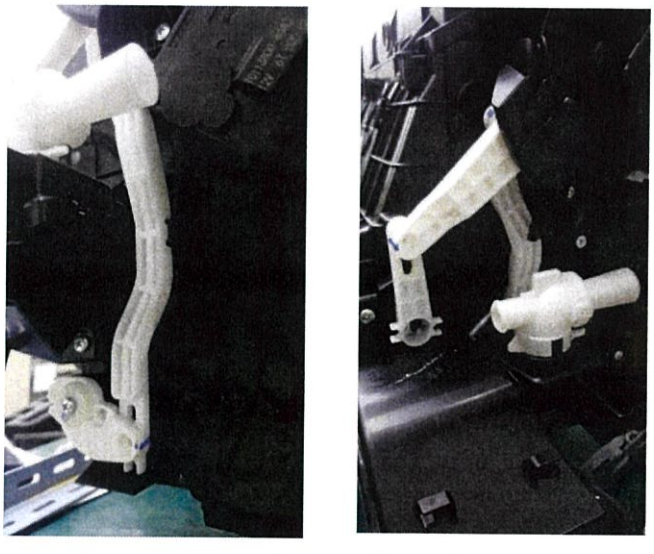
3.4.2 กำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุด

3.4.3 พิจารณาผลลัพธ์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาหลังจากทดลองผลิตจริง

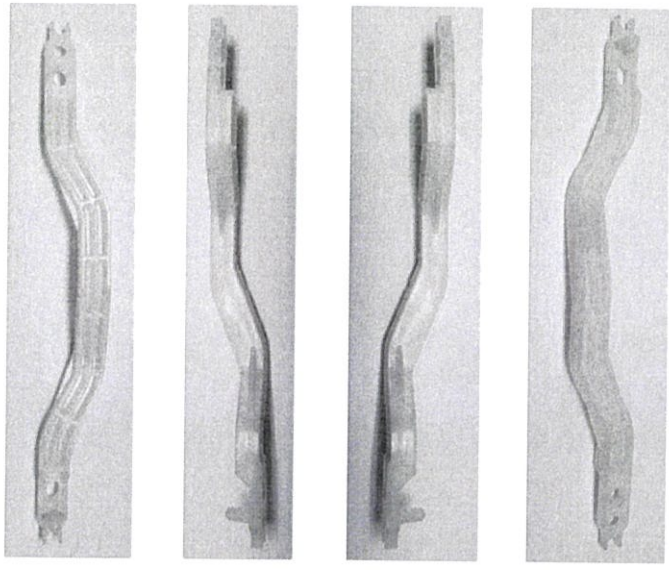
3.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมงาน

3.1.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

จากการศึกษาสภาพปัจจุบันพบว่าชิ้นส่วนกรณีศึกษา คือชิ้นส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศในรถยนต์ (Heating ventilating and air condition (HVAC)) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนแขนกลไก สำหรับการเปิด ปิดประตูของทางเดินลมในระบบการปรับอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) และกระบวนการผลิตคือกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process)



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนกรณีศึกษาขณะทำหน้าที่ร่วมกับชิ้นส่วนอื่นๆในระบบปรับอากาศ

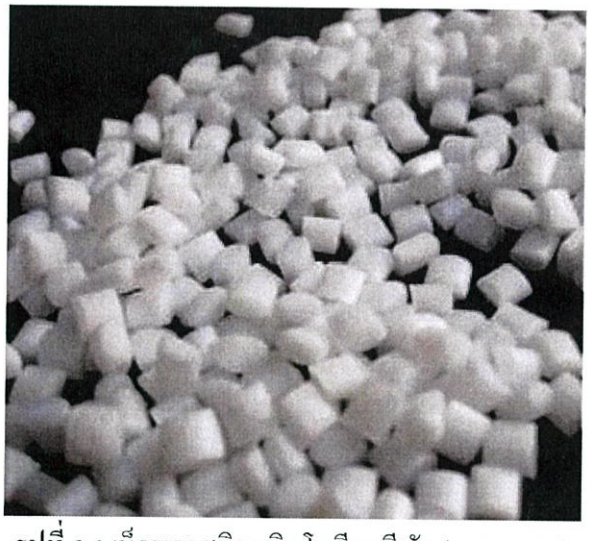


รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วนกรณีศึกษา : ด้านหน้า ด้านข้าง (ซ้าย) ด้านข้าง (ขวา) และด้านหลัง

3.1.2 ศึกษาข้อมูลด้านวัตถุดิบ และข้อมูลของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการผลิต

3.1.2.1 ข้อมูลด้านวัตถุดิบ

ชิ้นส่วนกรณีศึกษา ผลิตจากพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) จะมีลักษณะทางกายภาพที่ทึบแสง มีสีขาวขุ่น มีความแข็งที่สูง ทนทานต่อการเสียดสี สามารถยืดหยุ่นได้ดีในอุณหภูมิที่สูงและต่ำ ซึ่งปกติผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำพลาสติกชนิดนี้ไปทำการผลิตเช่น ส่วนประกอบของเกียร์ ฟันเฟือง เป็นต้น



รูปที่ 3.3 เม็ดพลาสติกชนิดโพลีอะซีทัล (Polyacetal)

รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) มีดังนี้

- ชนิดพลาสติก : โพลีอะซีทัล(Polyacetal)
- เกรดของพลาสติก : M90LV
- บริษัทที่ผลิตวัตถุดิบ : บริษัท Polyplastic

จากนั้นสามารถพิจารณารายละเอียดของคุณสมบัติพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของพลาสติกชนิดโพลีอะซีทัล

Item	Unit	Test method	Low VOC
			M90LV
			Standard
Color No.			CF2001/CD3069
ISO marking code		ISO11469 (JIS K6999)	POM
Density	g/cm^3	ISO 1183	1.41
Water absorption (23°C,24hrs,1mmt)	%	ISO 62	0.6
MFR (190°C,2.16kg)	g/10min	ISO 1133	9
Tensile strength	MPa	ISO 527-1,2	60
Strain at break	%	ISO 527-1,2	35 *1
Tensile modulus	MPa	ISO 527-1,2	2,640
Flexural strength	MPa	ISO 178	83
Flexural modulus	MPa	ISO 178	2,350
Charpy notched impact strength (23°C)	kJ/m^2	ISO 179/1eA	7
Temperature of deflection under load (1.8MPa)	°C	ISO 75-1,2	93
Coefficient of linear thermal expansion (23 - 55°C, Flow direction)	x10^{-5}/°C	Our standard	12
Coefficient of linear thermal expansion (23 - 55°C, Transverse direction)	x10^{-5}/°C	Our standard	12
Coefficient of Dynamic Friction (vs M90-44, pressure0.06MPa, 15cm/s)	-	JIS K7218	0.37
Flammability	-	UL94	HB

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของพลาสติกโพลีอะซีทัล (ต่อ)

Item	Unit	Test method	Low VOC
			M90LV
			Standard
Color No.			CF2001/CD3069
ISO marking code		ISO11469 (JIS K6999)	POM
Electric strength (3mmt)	kV/mm	IEC 60243-1	-
Volume resistivity	Ω·cm	IEC 60093	3×10^{14}
Surface resistivity	Ω	IEC 60093	3×10^{16}
Volume resistivity (Our standard)	Ω·cm	-	-
Surface resistivity (Our standard)	Ω	-	-
Mold Shrinkage (60×60×2mmt, Flow direction)	%	ISO 294-4	2.0
Mold Shrinkage (60×60×2mmt, Transverse direction)	%	ISO 294-4	2.0
Rockwell hardness	M(Scale)	ISO2039-2	80
Specific wear amount (vs C-Steel, material side, pressure 0.49 MPa, 30cm/s)	$x10^3 mm^3$/ (N·km)	JIS K7218	1.50
Specific wear amount (vs C-Steel, steel side, pressure 0.49 MPa, 30cm/s)	$x10^3 mm^3$/ (N·km)	JIS K7218	0.01 >
Coefficient of Dynamic Friction (vs C-Steel, pressure 0.98 MPa, 30cm/s)	-	JIS K7218	-

3.1.2.1 ข้อมูลของเครื่องฉีดพลาสติก

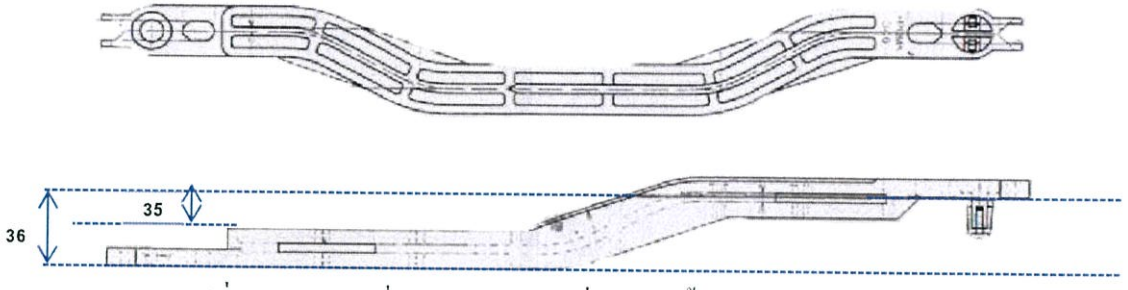
เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของชิ้นส่วนกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

รูปที่ 3.4 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา

- เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น : FANUC ROBOSHOT S-2000I 100A (SERIES A)
- ขนาดเครื่องฉีด : 100 ตัน
- วัตถุดิบที่ใช้ทำแม่พิมพ์ : เหล็กเกรด NAK80

3.1.3 ศึกษาขนาดมาตรฐานการออกแบบของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาเกิดการโก่งงอขึ้นซึ่งส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36 แสดงดังรูปที่ 3.5 มีขนาดไม่ตรงตามค่ามาตรฐานการออกแบบ ดังนั้นทำให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีคุณภาพไม่ผ่านตามมาตรฐาน แสดงผลขนาดการวัดชิ้นงานดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

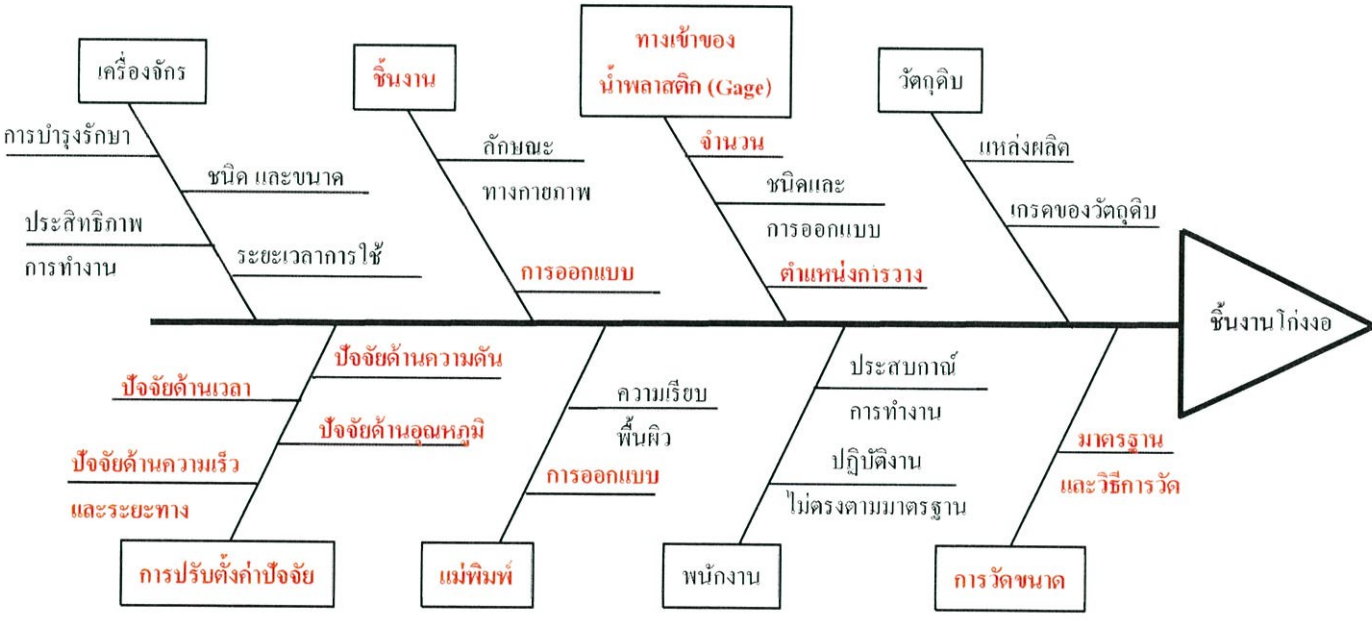
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดและขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36

ตำแหน่ง	รายละเอียด			ผลการวัด				หน่วย	ผลการตัดสิน
	ขนาดมาตรฐาน	ค่าความเผื่อ	เครื่องมือวัด	ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 (Cavity 1)		ช่องแม่พิมพ์ที่ 2 (Cavity 2)			
				ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2		
35	9.40	(± 0.35)	CMM	- 0.5150	- 0.4060	- 0.8530	- 0.5920	mm	ไม่ผ่าน
36	15.40	(± 0.20)	CMM	- 0.9800	- 0.8180	- 1.4680	- 1.1950	mm	ไม่ผ่าน

3.1.4 วิเคราะห์ปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาเป็นชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นโดยใช้ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) วัตถุดิบที่ใช้ผลิตคือ พลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) เกรด M90LV โดยปกติของกระบวนการฉีดขึ้นรูปทั่วไป ชิ้นงานที่ได้มักจะเกิดข้อบกพร่องมากมาย ตัวอย่างเช่น เกิดการโก่งงอ (Warpage) การหดตัว (Shrinkage) ชิ้นงานเกิดครีบ (Flash) เป็นต้น ซึ่งปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ เหล่านี้เกิดมาจากหลายสาเหตุด้วยกันไม่ว่าจะเป็น สาเหตุจากการออกแบบ หรือขั้นตอนของการผลิต

ดังนั้นเพื่อให้ทราบสาเหตุของการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ทางผู้ดำเนินงานจึงเลือกใช้แผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram) สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบที่แท้จริงของปัญหาที่เกิดขึ้น และทำให้ทราบถึงสาเหตุรากของปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์สาเหตุรากปัญหาการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

หลังจากพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) โดยใช้แผนภาพก้างปลา (Fish bone diagram) พบว่าสาเหตุรากของปัญหาการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา เกิดจากหลากหลายสาเหตุด้วยกัน แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางสรุปสาเหตุของปัญหาการโก่งงอ และวิธีการแก้ไข

สาเหตุของปัญหา	วิธีการแก้ไข	ผู้ดำเนินการ
1) ชิ้นงาน - การออกแบบ	- ปรับขนาดความเผื่อ (Tolerance) ให้สูงขึ้น - ออกแบบชิ้นงานใหม่ ให้มีความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น	- บริษัท กรณีศึกษา
2) ทางเข้าของน้ำพลาสติกเหลว (Gage) - ตำแหน่งการวางทางเข้า - จำนวนทางเข้า	- เพิ่มจำนวนทางเข้า (Gage) - พิจารณาตำแหน่งการวางที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นส่วนกรณีศึกษา	- บริษัท กรณีศึกษา
3) การปรับตั้งค่าปัจจัย - ปัจจัยด้านความดัน - ปัจจัยด้านเวลา - ปัจจัยด้านอุณหภูมิ - ปัจจัยด้านความเร็วและระยะทาง	- ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปของชิ้นส่วนกรณีศึกษา เพื่อกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดให้กับกระบวนการผลิต	- ผู้ดำเนินงานวิจัย
	- กำหนดค่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปใหม่	- บริษัท กรณีศึกษา
4) แม่พิมพ์ - การออกแบบ	- ออกแบบและแก้ไขแม่พิมพ์ใหม่ โดยการปรับขนาดแม่พิมพ์ให้เหมาะสม	- บริษัท กรณีศึกษา
5) การวัดขนาด - มาตรฐานและวิธีการวัด	- แก้ไขมาตรฐานและวิธีการวัดให้ถูกต้อง	- บริษัท กรณีศึกษา

จากการพิจารณาสาเหตุรากของปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าการที่จะดำเนินการแก้ไขให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีขนาดของชิ้นงานอยู่ในช่วงมาตรฐานตามการออกแบบ มีความจำเป็นจะต้องพิจารณาและแก้ไขสาเหตุรากของปัญหาดังที่กล่าวมาทั้งหมด ซึ่งด้วยระยะเวลาในการดำเนินงาน และความเหมาะสมของระดับการแก้ปัญหาที่จะสามารถดำเนินการได้นั้น ทางผู้ดำเนินงานจึงเลือกดำเนินการแก้ไข และวิจัยในส่วนของ "การปรับตั้งค่าปัจจัยของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา" เท่านั้น

3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเริ่มงาน

3.2.1 กำหนดดัชนีวัดผล (Key performance indicator)

การกำหนดดัชนีวัดผล หรือการกำหนดค่าผลตอบสนองเป็นการกำหนดเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดและเปรียบเทียบผลการดำเนินงานโดยกำหนดดัชนีวัดผลของการดำเนินงานเป็น 2 ค่าวัดผลประกอบด้วย

- ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36
- ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาพิจารณาจากโปรแกรม Moldex3D

จากการพิจารณาความสามารถในการแสดงผล และการประมวลผลของโปรแกรม Moldex3D พบว่าค่าการโก่งงอที่โปรแกรมสามารถแสดงผลออกมาได้ประกอบด้วยข้อมูล 4 ลักษณะ ได้แก่

1) ค่าการโก่งงอที่น้อยที่สุด (Minimum of warpage)

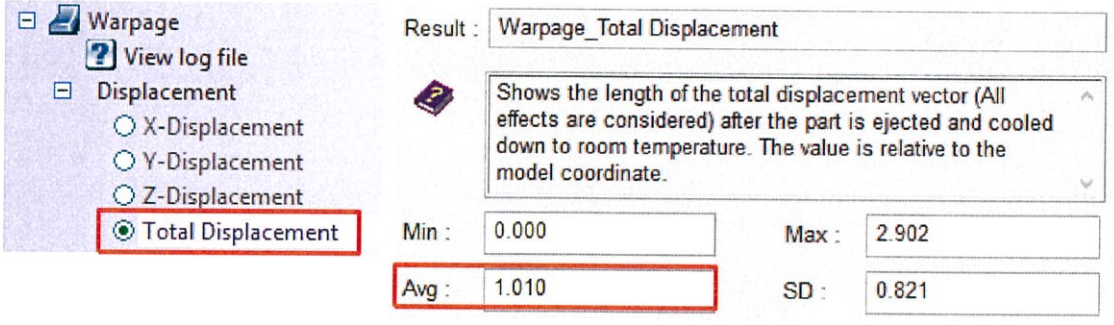
2) ค่าการโก่งงอที่มากที่สุด (Maximum of warpage)

3) ค่าการโก่งงอเฉลี่ย (Warpage average)

4) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการโก่งงอ (Standard deviation of warpage)

โดยเมื่อโปรแกรมประมวลผลค่าการโก่งงอ (Warpage) ออกมาแล้วสามารถเลือกพิจารณาได้ว่าจะทำการศึกษาในแนวแกนใด เนื่องจากโปรแกรม Moldex3D จะทำการประมวลผลออกมาทั้งหมด 3 แนวแกน (X, Y, Z) และ 1 ภาพรวม (3 แนวแกนรวมกัน)

ดังนั้นเพื่อให้การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนกรณีศึกษาสามารถพิจารณาและเปรียบเทียบผลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทางผู้ดำเนินงานจึงกำหนดดัชนีวัดผลหรือกำหนดค่าผลตอบสนองที่ทำการศึกษาคือ "ค่าการโก่งงอเฉลี่ย (Warpage average) หรือแทนด้วย ค่าการโก่งงอ (Warpage)" และแนวแกนที่ศึกษาคือ "ภาพรวมของทั้ง 3 แนวแกน" แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การแสดงค่าผลตอบสนอง และแนวแกนในการประมวลผลของโปรแกรม Moldex3D

ซึ่งดัชนีวัดผล (Key performance indicator) หรือค่าผลตอบสนองทั้ง 2 ค่านี้ จะมีความเกี่ยวข้องกับเป้าหมายของการดำเนินงาน

3.2.2 กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงาน

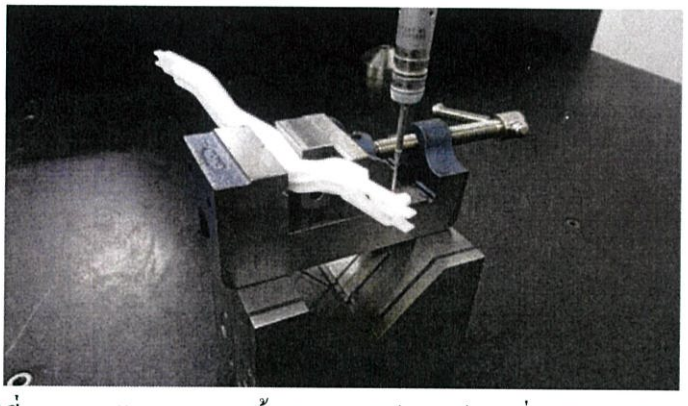
เป้าหมายของการดำเนินจะพิจารณาที่ค่าดัชนีวัดผล (Key performance indicator) หรือค่าผลตอบสนองเป็นหลัก โดยสามารถกำหนดรายละเอียดได้ดังนี้

3.2.2.1 ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่จำลองในโปรแกรม Moldex3D ต้องมีค่าลดลง 40% จาก 100%

3.2.2.2 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ไม่ตรงตามมาตรฐานการออกแบบ (ตำแหน่ง 35 และ 36) ต้องมีค่าลดลง 40 % จาก 100 %

3.2.3 ศึกษาวิธีการวัดขนาดชิ้นงานของบริษัทกรณีศึกษา

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาคือ "เครื่องวัดละเอียด 3 มิติ (Coordinate measuring machine)" ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถวิเคราะห์ผลการวัด และสามารถพิจารณาลักษณะของชิ้นส่วนที่เป็นไปตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติได้ ซึ่งวิธีการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษาเริ่มโดยการยึดชิ้นงานไว้กับปากกาจับชิ้นงานหรือ JIG การวัดของชิ้นงานนั้นๆ จากนั้นจึงเลื่อนแกนเครื่องวัดมาวัดขนาดทุกตำแหน่งที่ระบุไว้ในการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาด้วยเครื่องวัดละเอียด 3 มิติ (Coordinate measuring machine)

3.2.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

แผนการทดลองที่จำเป็นต้องใช้ในการดำเนินงานในครั้งนี้ประกอบไปด้วย 2 แผนการทดลอง คือ การออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design (FFD)) และการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design (CCD)) โดยการออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน หรือการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เป็นแผนการทดลองที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อดัชนีวัดผลในเบื้องต้น ซึ่งเมื่อทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลแล้วก็นำไปใช้เป็นปัจจัยนำเข้าของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design (CCD)) โดยเป็นแผนการ

ทดลองที่สามารถทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยในระดับที่สูงหรือมีความซับซ้อนได้ และเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2

3.2.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D

โปรแกรมทั้ง 2 โปรแกรมถือว่ามีความสำคัญต่อการทดลองเป็นอย่างมาก เนื่องจากโปรแกรม Minitab จะทำการออกแบบการทดลองให้กับการดำเนินงาน จากนั้นนำแผนการทดลองต่างๆ ที่ได้ไปจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D แล้วทำการพิจารณาค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาเพื่อ ดำเนินการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.3 ขั้นตอนที่ 3 การปฏิบัติงาน

3.3.1 คัดเลือกและกำหนดปัจจัยนำเข้า (Input factors)

พิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าและออกแบบการทดลองเบื้องต้นโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การคัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input factors)

จากการศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญ และมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) พบว่ามีปัจจัยที่สำคัญทั้งหมด 15 ปัจจัย ดังนี้

1) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลา (Time)
   - 1.1) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)
   - 1.2) เวลาในการฉีดย้ำ (Packing Time)
   - 1.3) เวลาที่น้ำพลาสติกเหลวอยู่ในกระบอกฉีด (Resident Time)
2) ปัจจัยที่เกี่ยวกับความดัน (Pressure)
   - 2.1) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)
   - 2.2) ความดันฉีด (Injection pressure)
   - 2.3) ความดันด้านสกรู (Back pressure)
   - 2.4) แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)
3) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเร็วและระยะทาง (Velocity and distance)
   - 3.1) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over)
   - 3.2) ความเร็วรอบสกรู (Screw speed)
   - 3.3) ระยะสำรอง (Cushion)
   - 3.4) ความเร็วในการฉีด (Injection flow)

4) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ (Temperature)

4.1) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

4.2) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)

4.3) อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel temperature)

4.4) อุณหภูมิขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding temperature)

ซึ่งจากปัจจัยทั้ง 15 ปัจจัยก็จะต้องนำมาทำการวิเคราะห์และพิจารณาเพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input factors) ให้กับการออกแบบการทดลอง โดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจาณาทั้งหมด 2 เกณฑ์ ดังนี้

1) ปัจจัยที่เลือกจะต้องส่งผลกระทบ และเกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

2) ปัจจัยที่เลือกจะต้องสามารถทำการจำลอง และกำหนดค่าในโปรแกรม Moldex3D ได้

โดยสามารถพิจารณาวิธีการเลือกคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พิจารณาและคัดเลือกปัจจัยนำเข้าสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป

ลำดับ	ปัจจัย (Factors)	ความสามารถในการส่งผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป	ความสามารถในการจำลองบนโปรแกรม Moldex3D	ปัจจัยที่คัดเลือกไปออกแบบการทดลอง
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลา (Time)				
1	เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
2	เวลาในการฉีดซ้ำ (Packing Time)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
3	เวลาที่น้ำพลาสติกอยู่ในกระบอกฉีด (Resident Time)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความดัน (Pressure)				
4	ความดันฉีดซ้ำ (Packing pressure)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
5	ความดันฉีด (Injection pressure)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
6	ความดันด้านสกรู (Back pressure)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
7	แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก

ตารางที่ 3.4 พิจารณาและคัดเลือกปัจจัยนำเข้า สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป (ต่อ)

ลำดับ	ปัจจัย (Factors)	ความสามารถในการส่งผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป	ความสามารถในการจำลองบนโปรแกรม Moldex3D	ปัจจัยที่คัดเลือกไปออกแบบการทดลอง
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเร็วและระยะทาง				
8	ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
9	ความเร็วรอบสกรู (Screw speed)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
10	ระยะสำรอง (Cushion)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
11	ความเร็วในการฉีด (Injection velocity)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ				
12	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
13	อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)	มี	สามารถกำหนดได้	เลือก
14	อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel temperature)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก
15	อุณภูมิขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding temperature)	มี	ไม่สามารถกำหนดได้	ไม่เลือก

จากการพิจารณาปัจจัยทั้ง 15 ปัจจัย เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input factors) สำหรับการออกแบบการทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณา 2 เกณฑ์ คือ ต้องเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดพลาสติก และต้องสามารถจำลองหรือกำหนดค่าในโปรแกรม Moldex3D ได้ ซึ่งจากการพิจารณาได้คัดเลือกปัจจัยนำเข้าออกมาทั้งหมด 7 ปัจจัยได้แก่

1) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

2) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)

3) ความดันฉีด (Injection pressure)

4) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over)

5) ความเร็วในการฉีด (Injection velocity)

6) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

7) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)

3.3.2 ศึกษาเงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

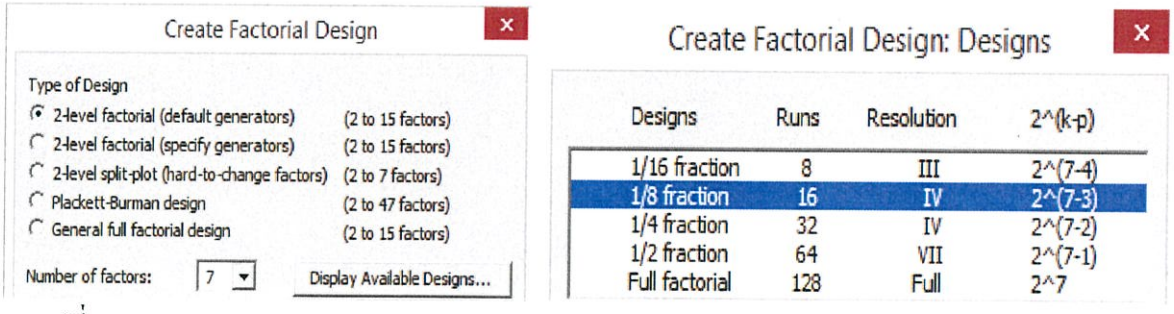
จากการศึกษาและสอบถามข้อมูล พบว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตปัจจุบัน (Current condition) ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนกรณีศึกษาสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3.5 ซึ่งจะแสดงค่าปัจจัยนำเข้า และค่าความเผื่อของทั้งหมด 7 ปัจจัย

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขกระบวนการผลิตที่ใช้ในปัจจุบัน (Current condition)

ปัจจัย (Factors)	หน่วย (Unit)	ค่าของแต่ละปัจจัย	ค่าความเผื่อ (Tolerance)
1) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	sec	$40 + X_1$	± 15
2) ความดันฉีดซ้ำ (Packing pressure)	MPa	$200 + X_2$	± 15
3) ความดันฉีด (Injection pressure)	MPa	$100 + X_3$	± 15
4) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดซ้ำ (Switching over)	mm	$100 + X_4$	± 5
5) ความเร็วในการฉีด (Injection velocity)	mm/sec	$20 + X_5$	± 5
6) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	°C	$90 + X_6$	± 10
7) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)	°C	$700 + X_7$	± 10

3.3.3 ออกแบบการทดลองเบื้องต้น

การออกแบบการทดลองเบื้องต้นสำหรับปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 7 ปัจจัย ผู้ดำเนินงานได้เลือกแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) เนื่องจากฟังก์ชันการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะทำให้ได้แผนการทดลองจำนวน 16 แผนการทดลอง ซึ่งเป็นแผนการทดลองที่มีข้อมูลเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยหลัก (Main effect) และวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยร่วม (Interaction effect) เพราะการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า Resolution 4 (IV) แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design)

จากนั้นนำแผนการทดลองทั้ง 16 แผนการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.6 ไปทำการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D จากนั้นทำการพิจารณาค่าการโก่งงอ

ตารางที่ 3.6 แผนการทดลองเบื้องต้น ที่ได้จากการออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design)

ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัย (Factors)							ค่าการโก่งงอ (Warpage)
	Cooling time	Packing pressure	Injection pressure	Switching over	Injection velocity	Mold temperature	Melting temperature	
หน่วย	sec	MPa	MPa	mm	mm/sec	°C	°C	
1	$25+X_1$	$185+X_2$	$85+X_3$	$95+X_4$	$15+X_5$	$80+X_6$	$690+X_7$	
2	$55+X_1$	$185+X_2$	$85+X_3$	$95+X_4$	$25+X_5$	$80+X_6$	$710+X_7$	
3	$25+X_1$	$215+X_2$	$85+X_3$	$95+X_4$	$25+X_5$	$100+X_6$	$690+X_7$	
4	$55+X_1$	$215+X_2$	$85+X_3$	$95+X_4$	$15+X_5$	$100+X_6$	$710+X_7$	
5	$25+X_1$	$185+X_2$	$115+X_3$	$95+X_4$	$25+X_5$	$100+X_6$	$710+X_7$	
6	$55+X_1$	$185+X_2$	$115+X_3$	$95+X_4$	$15+X_5$	$100+X_6$	$690+X_7$	
7	$25+X_1$	$215+X_2$	$115+X_3$	$95+X_4$	$15+X_5$	$80+X_6$	$710+X_7$	
8	$55+X_1$	$215+X_2$	$115+X_3$	$95+X_4$	$25+X_5$	$80+X_6$	$690+X_7$	
9	$25+X_1$	$185+X_2$	$85+X_3$	$105+X_4$	$15+X_5$	$100+X_6$	$710+X_7$	
10	$55+X_1$	$185+X_2$	$85+X_3$	$105+X_4$	$25+X_5$	$100+X_6$	$690+X_7$	
11	$25+X_1$	$215+X_2$	$85+X_3$	$105+X_4$	$25+X_5$	$80+X_6$	$710+X_7$	
12	$55+X_1$	$215+X_2$	$85+X_3$	$105+X_4$	$15+X_5$	$80+X_6$	$690+X_7$	
13	$25+X_1$	$185+X_2$	$115+X_3$	$105+X_4$	$25+X_5$	$80+X_6$	$690+X_7$	
14	$55+X_1$	$185+X_2$	$115+X_3$	$105+X_4$	$15+X_5$	$80+X_6$	$710+X_7$	
15	$25+X_1$	$215+X_2$	$115+X_3$	$105+X_4$	$25+X_5$	$80+X_6$	$690+X_7$	
16	$55+X_1$	$215+X_2$	$115+X_3$	$105+X_4$	$15+X_5$	$100+X_6$	$710+X_7$	

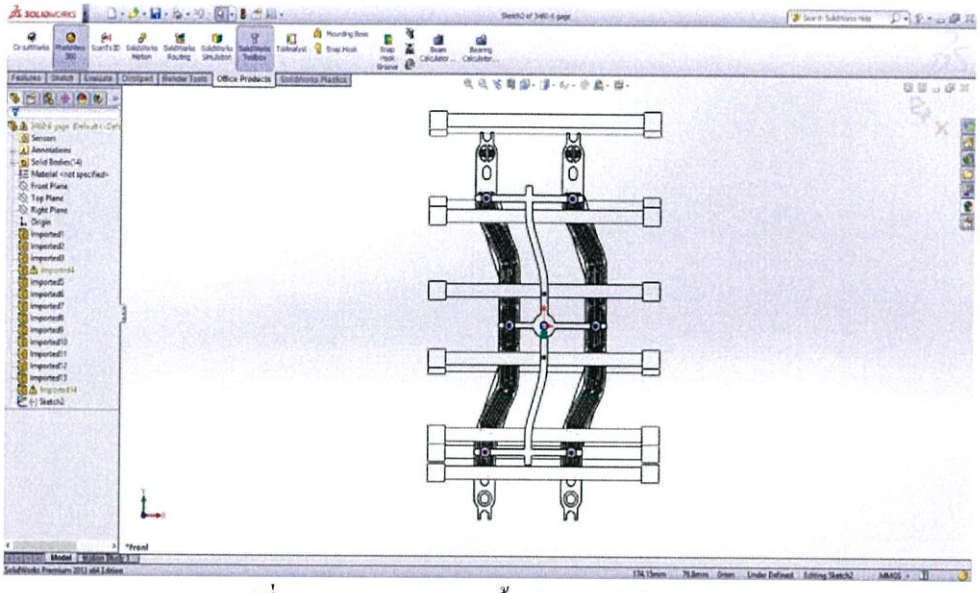
3.3.4 จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D

จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Minitab ตามการออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design (FFD)) ซึ่งได้แผนการทดลองทั้งหมด 16 แผนการทดลอง จากนั้นผู้ดำเนินงานได้นำแผนการทดลองทั้งหมดไปจำลองกระบวนการฉีดในโปรแกรม Moldex3D ซึ่งเมื่อโปรแกรมประมวลผลต่างๆเรียบร้อยแล้วผู้ดำเนินงาจะทำการพิจารณาค่าการโก่งงอที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Minitabในขั้นตอนต่อไป ซึ่งขั้นตอนในส่วนของการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.3.4.1 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D

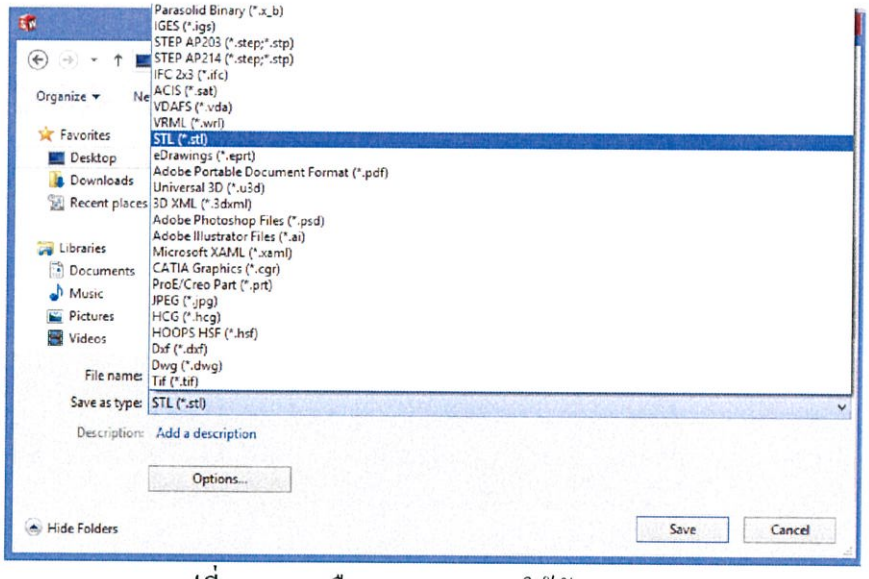
1) ขั้นตอนการเปลี่ยนนามสกุลของ CAD file จาก .stp เป็น .stl

1.1) เปิด CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ในโปรแกรม Solid work แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

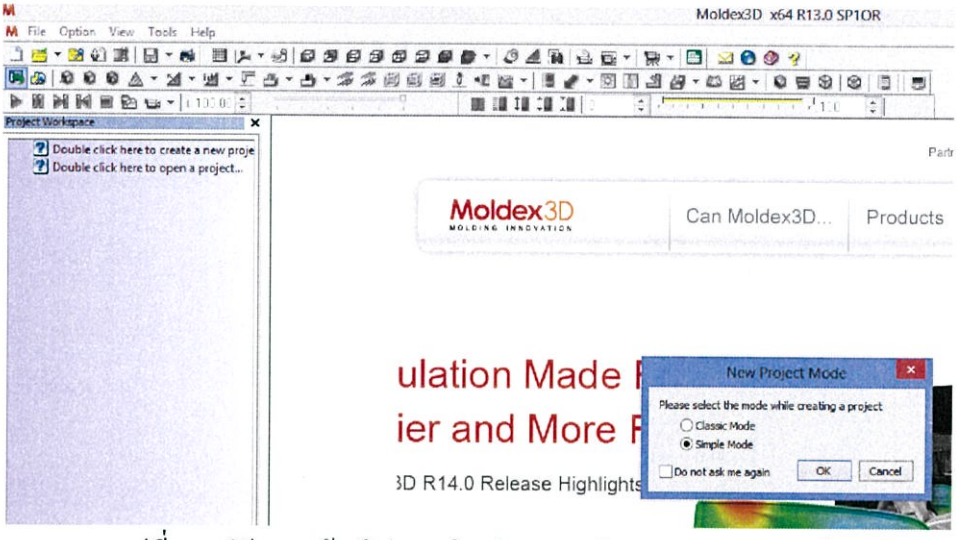
1.2) บันทึก CAD file พร้อมทั้งเปลี่ยนนามสกุลจาก .stp เป็น .stl แสดงดังรูปที่ 3.11 เนื่องจากโปรแกรม Moldex3D สามารถเปิดได้เฉพาะไฟล์ที่เป็นนามสกุล .stl



รูปที่ 3.11 การเลือกนามสกุล .stl ให้กับ CAD file

3.3.4.2ขั้นตอนการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก

1) เปิดโปรแกรม Moldex3D ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.12 จากนั้นเลือกที่คำสั่ง “Double click here to create a new project”จะปรากกฏหน้าต่าง “New Project Mode”และทำการเลือกคำสั่ง“Simple Mode”แล้วกดคำสั่ง “OK”แสดงดังรูปที่ 3.12

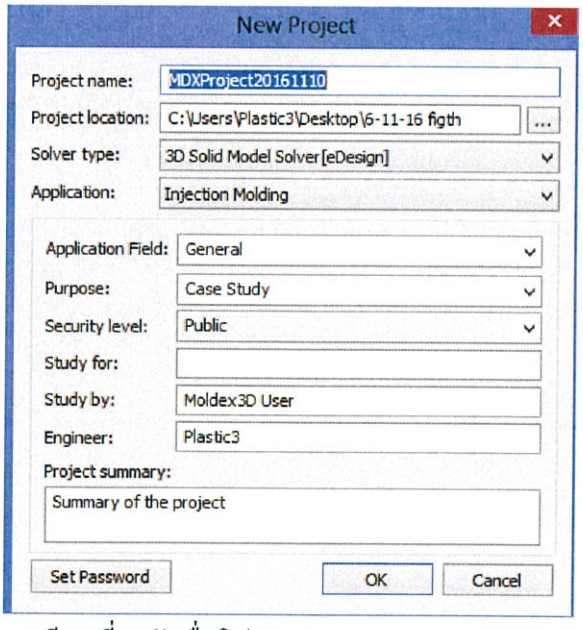


รูปที่3.12 วิธีการสร้างโปรเจคใหม่ของการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก

2) จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง แสดงดังรูปที่ 3.13 ให้กรอกรายละเอียดในส่วนของ

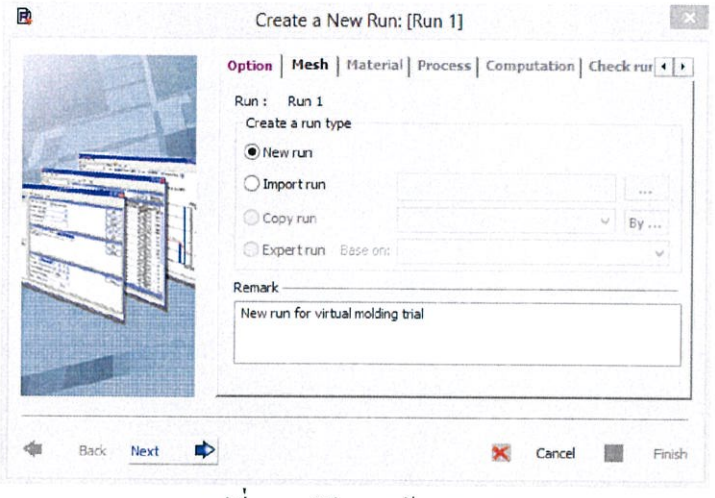
Project name: ตั้งชื่อโปรเจค

Project location : ระบุพื้นที่สำหรับการจัดเก็บโปรเจคที่สร้างขึ้น และเลือกคำสั่ง “OK”



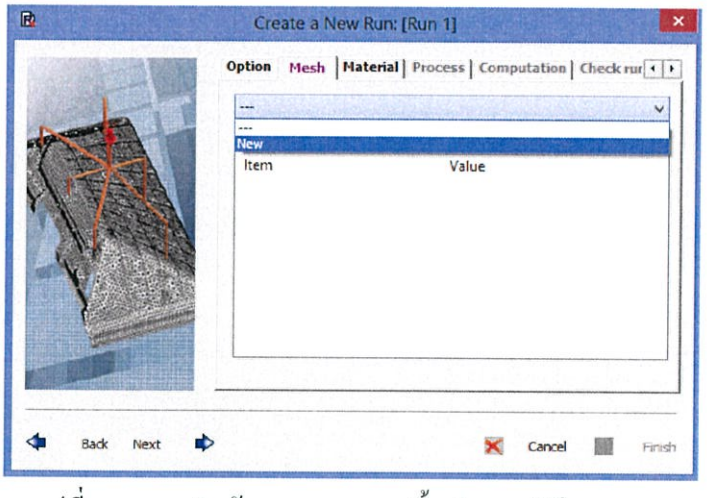
รูปที่ 3.13 การกรอกรายละเอียดเกี่ยวกับชื่อโปรเจค(Project name)และการระบุพื้นที่จัดเก็บโปรเจค

ต่อมาจะปรากฏหน้าต่าง "Create a New Run:[Run1]" แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยในส่วนของ "Option" ให้พิจารณาคำสั่งย่อยเกี่ยวกับ "Create a new type" ให้ทำการเลือก "New run" แล้วเลือกคำสั่ง "Next"



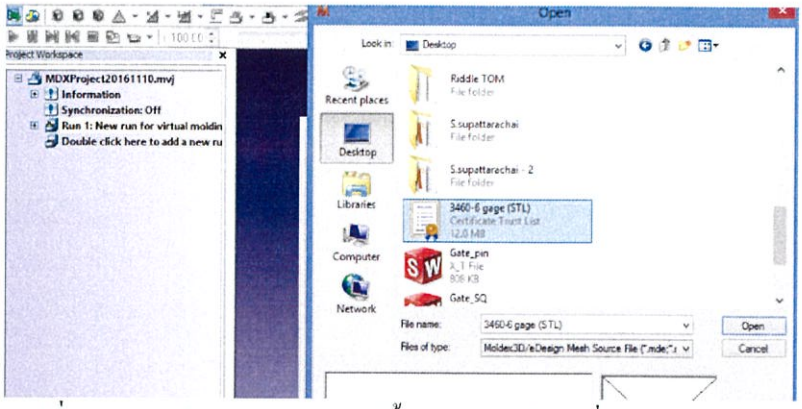
รูปที่ 3.14 วิธีการสร้าง Run 1

3) โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง แสดงดังรูปที่ 3.15 ให้พิจารณาที่คำสั่ง "Mesh" ซึ่งจะต้องนำเข้า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ต้องการ โดยให้เลือกไปที่คำสั่ง "New"



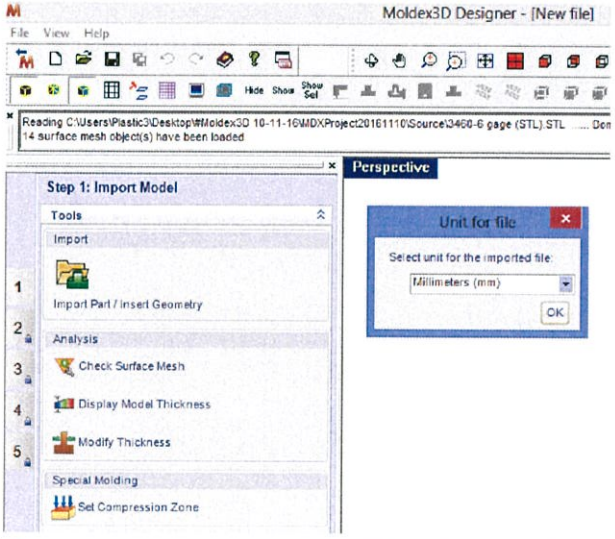
รูปที่ 3.15 การนำเข้า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง แสดงดังรูปที่ 3.16 แล้วทำการเลือก CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ต้องการ โดย CAD file ที่ต้องการดังกล่าวต้องมีนามสกุลเป็น .stl



รูปที่ 3.16 การเลือก CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีนามสกุล .stl

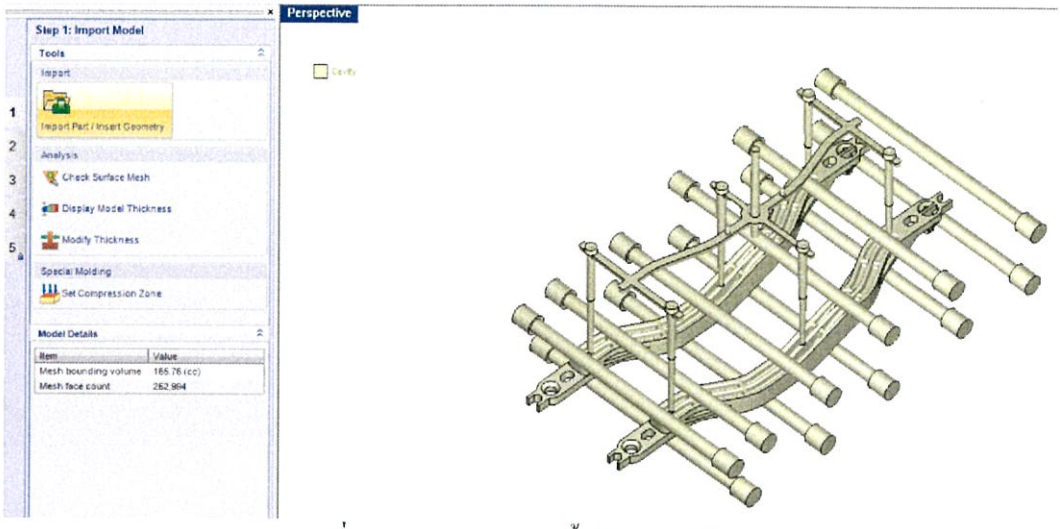
4) จากนั้นโปรแกรม Moldex3D จะทำการเปิดโปรแกรม Moldex3D Designer ขึ้นมา ให้ทำการกำหนดรายละเอียดที่สำคัญต่างๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตัวอย่างเช่น การกำหนดทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) ระบบการหล่อเย็น (Cooling unit) เป็นต้น โดยเริ่มจากการเลือกหน่วยของ CAD file เป็นหน่วย มิลลิเมตร (mm) แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โปรแกรม Moldex3D Design และวิธีการกำหนดหน่วยของ CAD file

3.3.4.3 ขั้นตอนสำหรับการใช้งานโปรแกรม Moldex3D Design จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก มีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

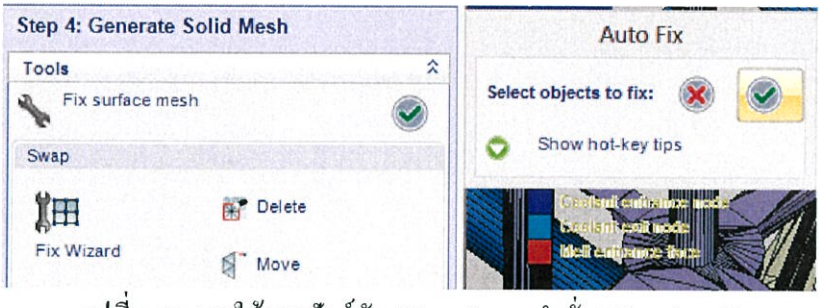
1) การนำเข้า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา (Import model) เปิด CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ที่มีนามสกุล .stl แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

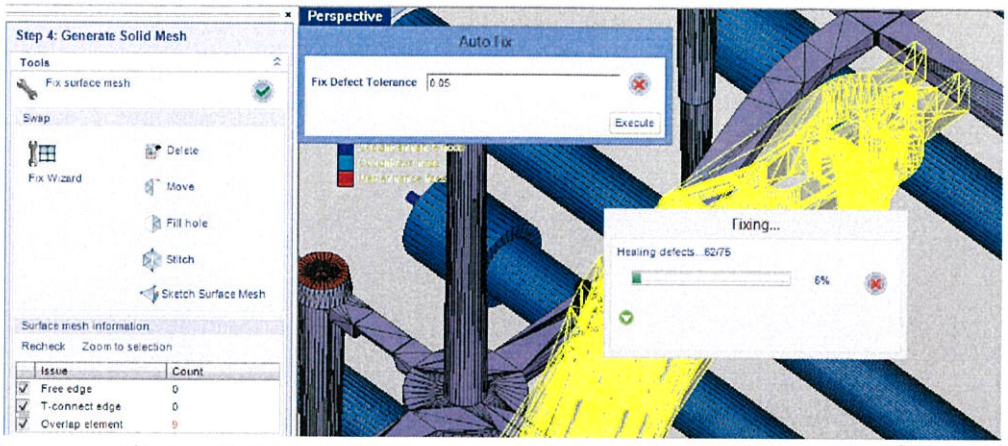
จากนั้นพิจารณาที่ฟังก์ชัน "Analyze" และเลือกคำสั่ง "Check surface mesh" เพื่อทำการตรวจสอบว่า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีปัญหาตรงจุดใดหรือไม่ โดยจากการตรวจสอบพบว่า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาเกิดการทับซ้อนกันขององค์ประกอบย่อยจำนวน 18 จุด ซึ่งจะต้องดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวก่อน จึงจะสามารถดำเนินงานในส่วนต่อไปได้ โดยมีขั้นตอนสำหรับการแก้ไขดังนี้

พิจารณาที่ฟังก์ชัน "Swap" และเลือกที่คำสั่ง "Fix wizard" ซึ่งจะปรากฏหน้าต่าง "Auto fix" ขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การใช้งานฟังก์ชัน "Swap" และคำสั่ง "Fix wizard"

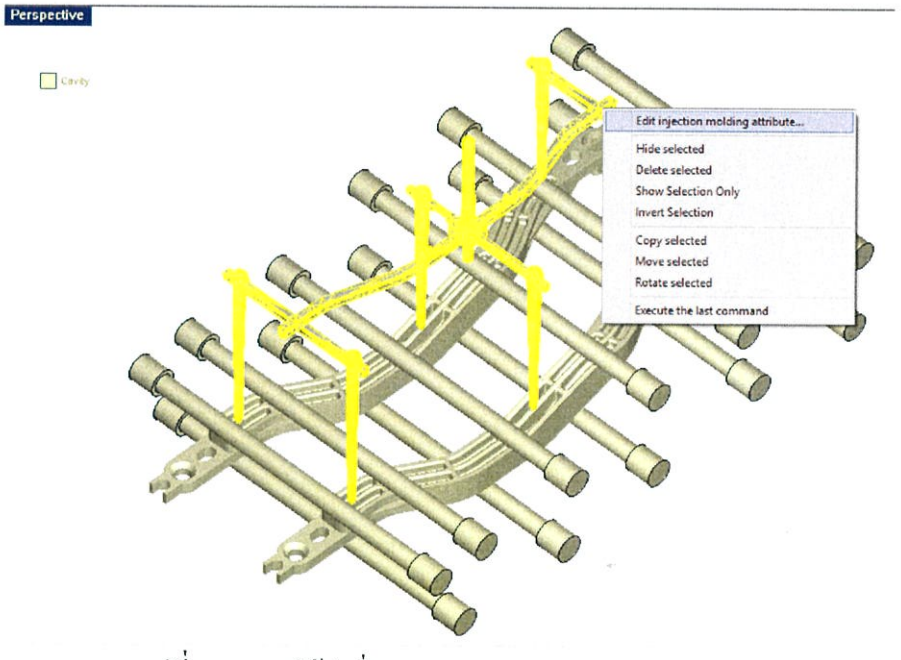
คำสั่ง "Fix wizard" เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับการแก้ไขการทับซ้อนขององค์ประกอบย่อย (Overlap element) ของ CAD file แบบอัตโนมัติ โดยเราจะต้องทำการเลือกพื้นที่ที่เกิดปัญหาซึ่งในส่วนนี้ก็คือพื้นที่สีเหลือง โดยทางโปรแกรมจะระบุให้ จากนั้นโปรแกรมจำดำเนินการแก้ไขเพื่อลดจำนวนการทับซ้อนขององค์ประกอบย่อย (Overlap element) จากจำนวน 18 จุด เหลือ 9 จุด และ 0 จุด ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.20



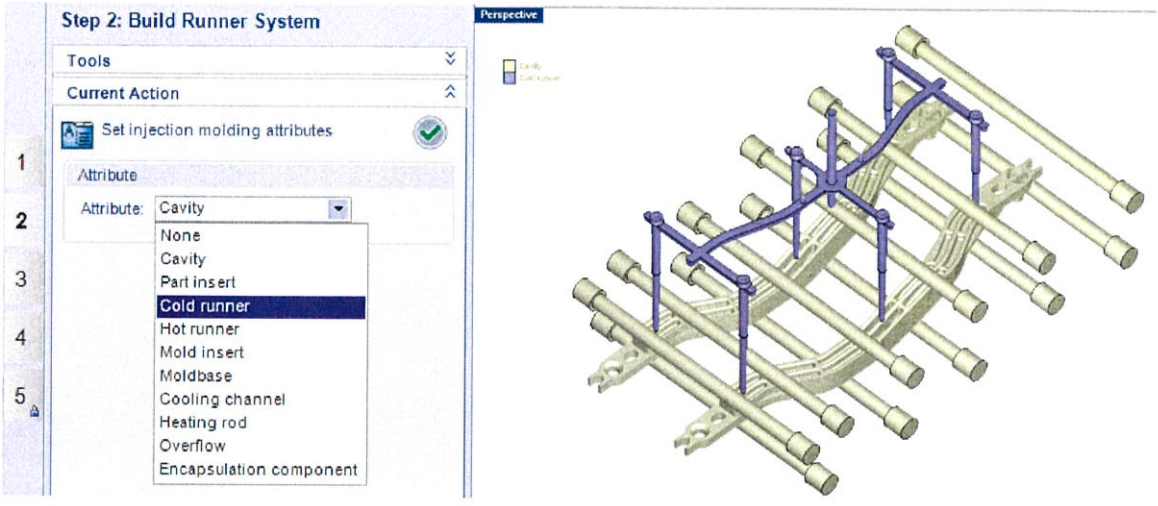
รูปที่ 3.20 การแก้ไขการทับซ้อนขององค์ประกอบย่อย (Overlap element) โดยการใช้คำสั่ง "Fix wizard

2) การสร้างระบบทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Build runner system)

การกำหนดเส้นทางการวิ่งของน้ำพลาสติก หลังจากที่เปิด CAD file ขึ้นมาแล้ว ให้ทำการกดเลือกบริเวณทางวิ่งน้ำพลาสติก (Runner) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา จากนั้นให้คลิ๊กซ้ายและเลือกคำสั่ง "Edit injection molding attribute" แล้วเลือกตรง Attribute เป็น "Cold runner" ซึ่งชนิดทางวิ่ง (Runner) ต้องเป็นไปตามกระบวนการผลิตจริงแสดงดังรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 ซึ่งหากการกำหนดสำเร็จในโปรแกรมจะเปลี่ยนทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) เป็นสีม่วง

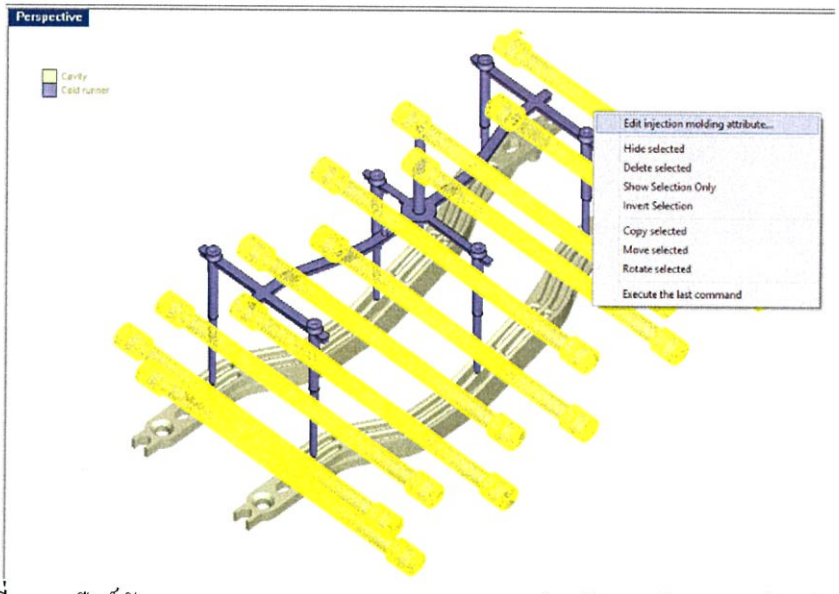


รูปที่ 3.21 การใช้คำสั่ง "Edit injection molding attribute"

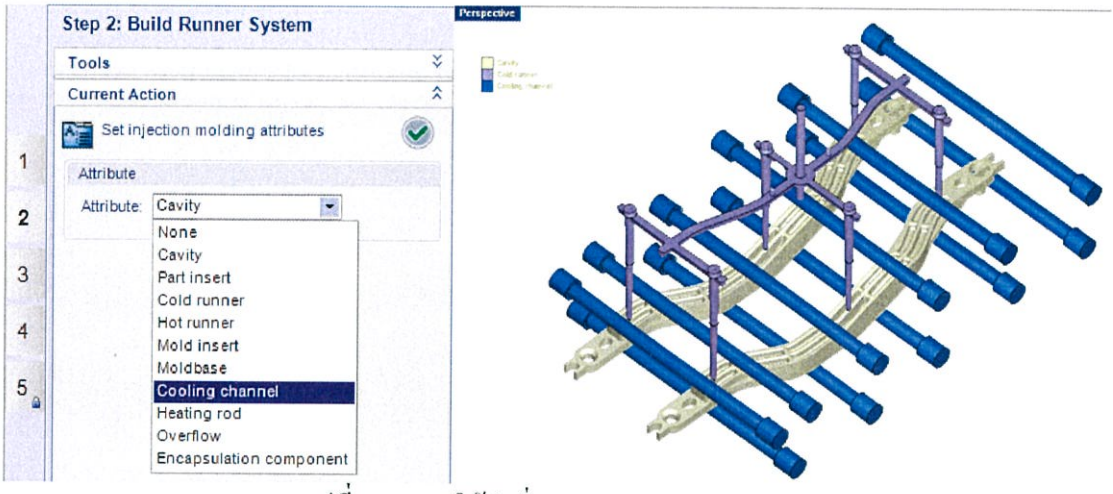


รูปที่ 3.22 การกำหนดทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner)

จากนั้นระบุแท่งหล่อเย็นของกระบวนการผลิต โดยเลือกแท่งหล่อเย็นทั้งหมดของระบบ จากนั้นให้คลิ๊กขวาและเลือกคำสั่ง "Edit injection molding attribute" แสดงดังรูปที่ 3.23 ต่อมาจะปรากฏหน้าต่าง แสดงดังรูปที่ 3.24 และทำการพิจารณาที่ฟังก์ชัน "Attribute" แล้วเลือกที่คำสั่ง "Cooling channel" เพื่อกำหนดแท่งหล่อเย็นให้กับระบบทำความเย็น (Cooling unit) ของการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกหลังจากกำหนดแท่งหล่อเย็นแล้วโปรแกรมจะเปลี่ยนแท่งหล่อเย็นทั้งหมดที่ทำการเลือกเป็นสีฟ้า



รูปที่ 3.23 ฟังก์ชัน "Edit injection molding attribute" สำหรับการกำหนดแท่งหล่อเย็น

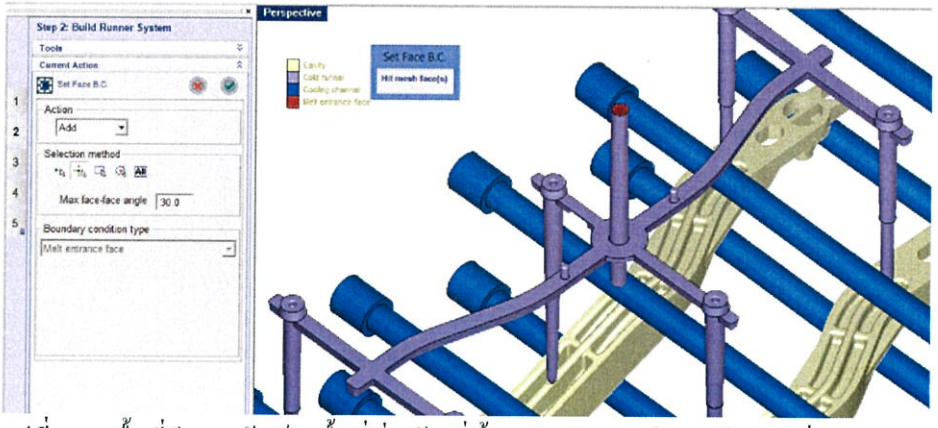


รูปที่ 3.24 การใช้คำสั่ง "Cooling channel"

จากนั้นทำการกำหนดพื้นที่เริ่มต้น ที่น้ำพลาสติกจะไหลเข้าสู่ทางวิ่ง (Runner) โดยการใช้ฟังก์ชัน "Melt entrance" และเลือกคำสั่ง "Specific face" แสดงดังรูปที่ 3.25

รูปที่ 3.25 ฟังก์ชัน "Melt entrance" และการใช้คำสั่ง "Specific face"

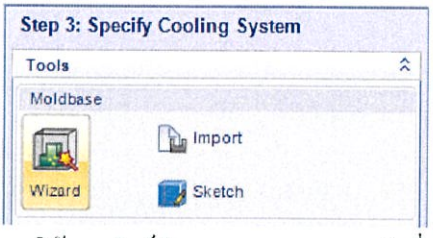
ต่อมาก็ทำการกำหนดหรือเลือกพื้นที่ ที่จะให้น้ำพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่ระบบ โดยเมื่อทำการเลือกพื้นที่ที่ต้องการแล้ว บริเวณที่เลือกนั้นจะกลายเป็นสีแดงเข้ม และถูกระบุว่าเป็นพื้นที่ Melt entrance แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 พื้นที่สีแดงเข้มเป็นพื้นที่เริ่มต้น ที่น้ำพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่ทางวิ่ง (Runner)

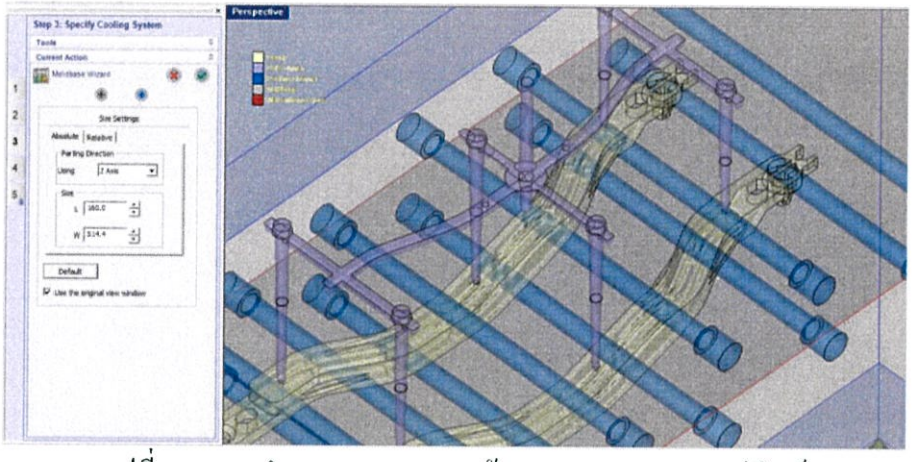
3) การสร้างระบบการหล่อเย็น (Specify cooling system)

สำหรับขั้นตอนที่ 3 ต้องทำการกำหนดลักษณะและขนาดของแม่พิมพ์ โดยการพิจารณาที่ฟังก์ชัน "Moldbase" และเลือกคำสั่ง "Wizard" แสดงดังรูปที่ 3.27



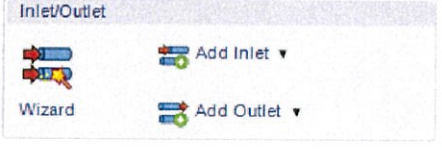
รูปที่ 3.27 การใช้งานฟังก์ชัน "Moldbase' และคำสั่ง "Wizard"

การกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของแม่พิมพ์ ต้องกำหนดให้เท่ากับขนาดที่แท้จริงของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนกรณีศึกษา แสดงดังรูปที่ 3.28



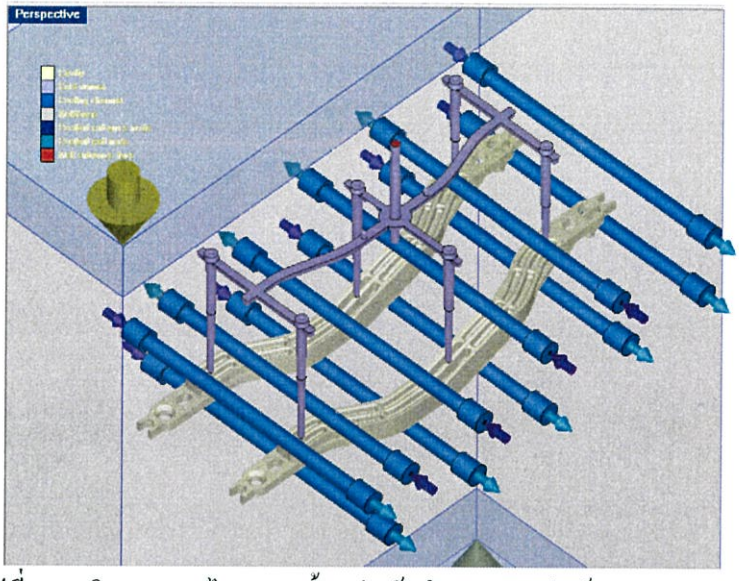
รูปที่ 3.28 การกำหนดขนาดความกว้าง และความยาวของแม่พิมพ์

จากนั้นทำการพิจารณาที่ฟังก์ชัน "Inlet/outlet" และเลือกที่คำสั่ง "Wizard" เพื่อให้โปรแกรมกำหนดทิศทางการไหลเข้า และออกของน้ำหล่อเย็นแบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การใช้งานฟังก์ชัน "Inlet/Outlet" และคำสั่ง "Wizard"

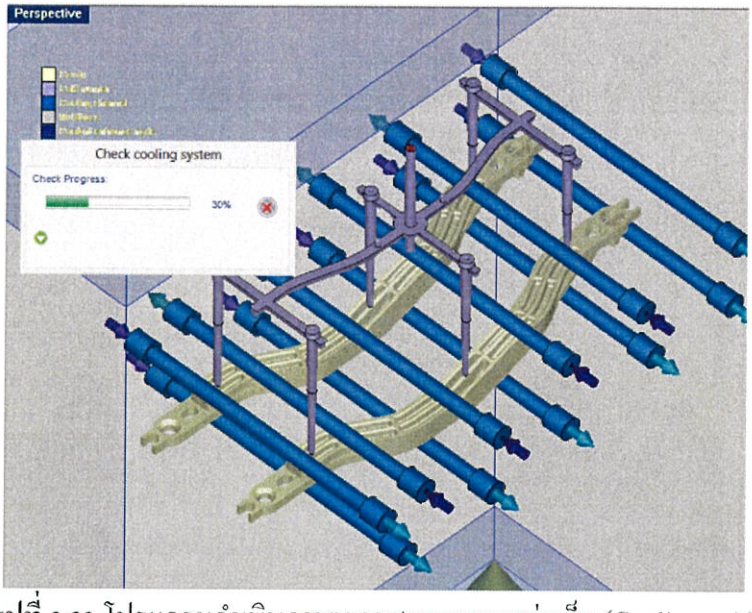
หลังจากการใช้คำสั่ง "Wizard" แล้ว โปรแกรมจะกำหนดทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็นให้ สามารถพิจารณาทิศทางการไหลได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็นในระบบหล่อเย็น (Cooling unit)

จากนั้นทำการพิจารณาในส่วนของฟังก์ชัน "Check" และเลือกคำสั่ง "Check cooling channel" เพื่อให้โปรแกรมทำการตรวจสอบว่า ระบบหล่อเย็น (Cooling unit) มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานมากน้อยเพียงใด แสดงดังรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32

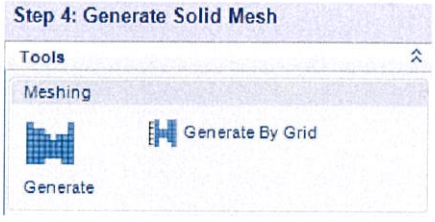
รูปที่ 3.31 การใช้งานฟังก์ชัน "Check" และคำสั่ง "Check cooling channel"



รูปที่ 3.32 โปรแกรมดำเนินการตรวจสอบระบบหล่อเย็น (Cooling unit)

4) การกำหนดให้ระบบทำงานร่วมกัน (Generate solid mesh)

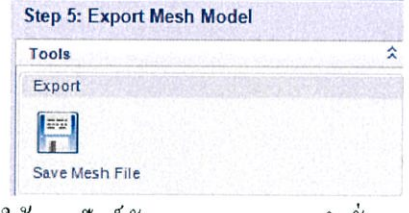
สำหรับขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนที่กำหนดให้ทุกองค์ประกอบของกระบวนการฉีดพลาสติกทำงานร่วมกัน ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ ทางวิ่งของน้ำพลาสติกเหลว (Runner) ระบบหล่อเย็น (Cooling unit) แม่พิมพ์ (Mold) และชิ้นส่วนกรณีศึกษา กล่าวคือเป็นการรวมทุกองค์ประกอบของกระบวนการฉีดพลาสติก โดยการใช้ฟังก์ชัน "Meshing" แล้วเลือกคำสั่ง "Generate" ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การใช้งานฟังก์ชัน "Meshing" และคำสั่ง "Generate"

5) การบันทึกไฟล์ (Export mesh model)

สำหรับขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการนำเข้า CAD file ใหม่ เพื่อการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D โดยทำการพิจารณาที่ฟังก์ชัน "Export" และเลือกคำสั่ง "Save mesh file" แสดงดังรูที่ 3.34 จากนั้นทำการตั้งชื่อไฟล์ และเลือกพื้นที่ในการจัดเก็บ



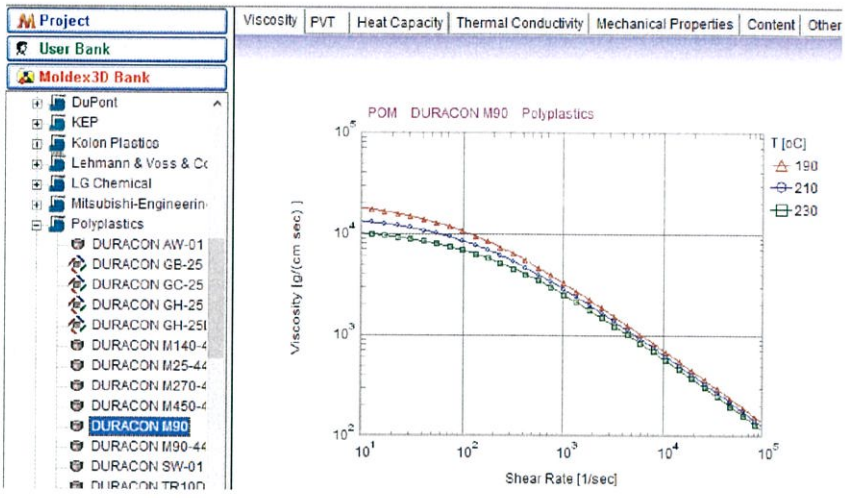
รูปที่ 3.34 การใช้งานฟังก์ชัน "Export" และคำสั่ง "Save mesh file"

6) หลังจากนำเข้า CAD file ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชัน "Mesh" แล้วต้องทำการระบุข้อมูลขององค์ประกอบต่างๆ เพิ่มเติม โดยส่วนต่อไปที่ทำการพิจารณาคือ การระบุวัตถุดิบ (Material) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา โดยทำการเลือกที่คำสั่ง "Material" และเลือกที่คำสั่ง "New" โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 3.35 ให้ทำการเลือกวัตถุดิบ (Material) ที่ใช้ ซึ่งในที่นี้คือ

พลาสติก : โพลีอะซีทัล (Polyacetal)

ชนิด : DURACOM90 (ชื่อชนิดขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต)

ผู้ผลิต : บริษัท Polyplastic

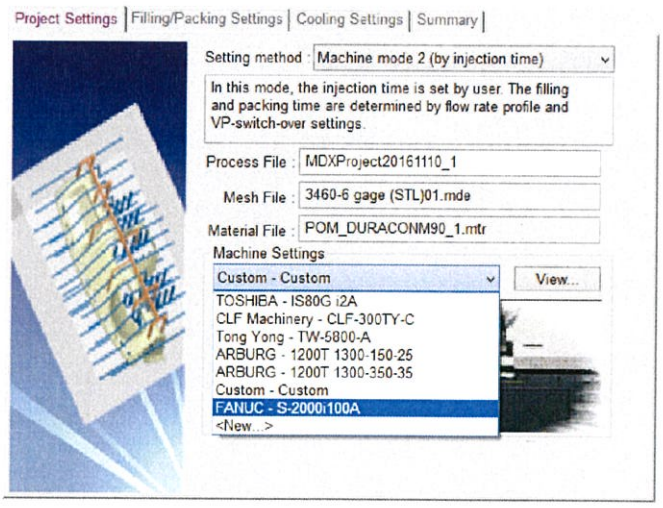


รูปที่ 3.35 รายละเอียดของพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal) ที่ได้จากโปรแกรม Moldex3D

7) การกำหนดและระบุเงื่อนไขการผลิต โดยพิจารณาในฟังก์ชัน "กระบวนการ (Process)" ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำแผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นตามการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design (FFD)) จำนวน 16 แผนการทดลอง มาจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อพิจารณาค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ซึ่งวิธีการในการกำหนด และระบุแผนการทดลองต่างๆ นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้

7.1) การตั้งค่าโครงการ (Project setting)

สำหรับการตั้งค่าโครงการ (Project setting) จะทำการพิจารณา 2 ส่วนคือ ส่วนของคำสั่ง "Setting method" ให้ทำการเลือกที่ "Machine mode 2 (by injection time)" เพื่อให้สามารถกำหนดรายละเอียดในขั้นตอนต่อไปได้ ต่อมาพิจารณาคำสั่ง "Machine setting" เป็นขั้นตอนที่เลือกชนิดของเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา ซึ่งในที่นี้คือ เครื่องฉีด FANUC-S-2000i 100A ดังรูปที่ 3.36



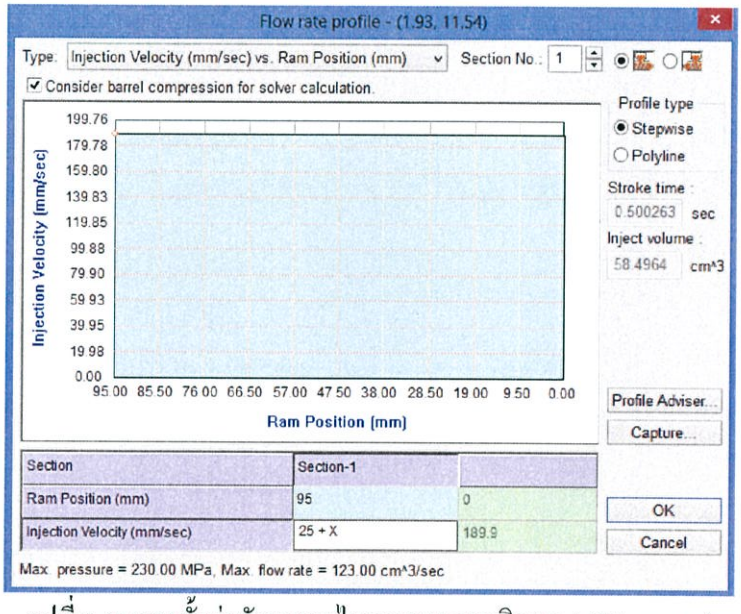
รูปที่ 3.36 การตั้งค่าโครงการ (Project setting) เกี่ยวกับเครื่องฉีดพลาสติก

7.2) การตั้งค่าการฉีดพลาสติก และการตั้งค่าการฉีดย้ำ (Filling/Packing setting)

สำหรับการตั้งค่าเกี่ยวกับการฉีดพลาสติก และการฉีดย้ำ มีปัจจัยที่สำคัญและต้องทำการพิจารณาทั้งหมด 8 ปัจจัย ประกอบด้วย

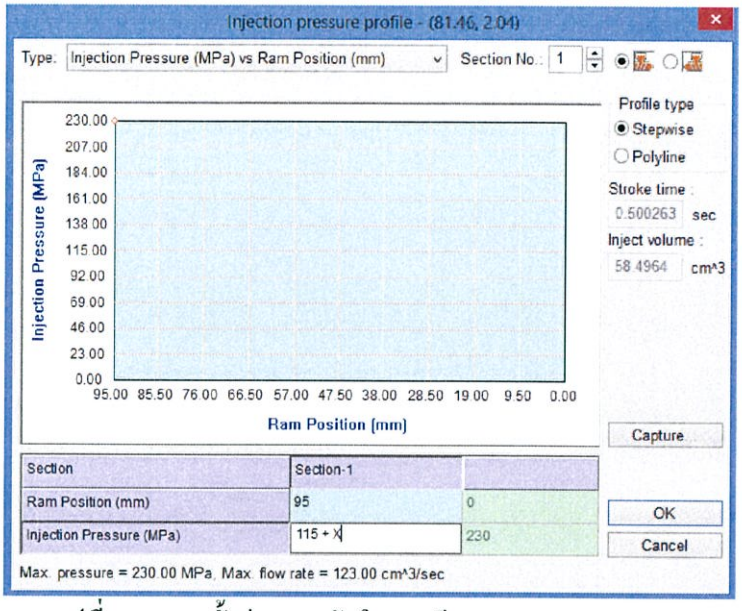
7.2.1) เวลาในการฉีด (Injection time) ใช้ค่าที่โปรแกรมกำหนดให้ซึ่งเท่ากับ 6.48 วินาที และกำหนดให้ใช้กับทุกแผนการทดลอง

7.2.2) อัตราการไหลของพลาสติกเหลว (Flow rate) หรือความเร็วในการฉีดพลาสติก (Injection velocity) ซึ่งสามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้ โดยเลือกที่คำสั่ง "Flow rate profile" แสดงดังรูปที่ 3.37 ทำการเปลี่ยนหน่วยได้โดยใช้คำสั่ง "Type" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.37 การตั้งค่าอัตราการไหลของพลาสติกเหลว (Flow rate)

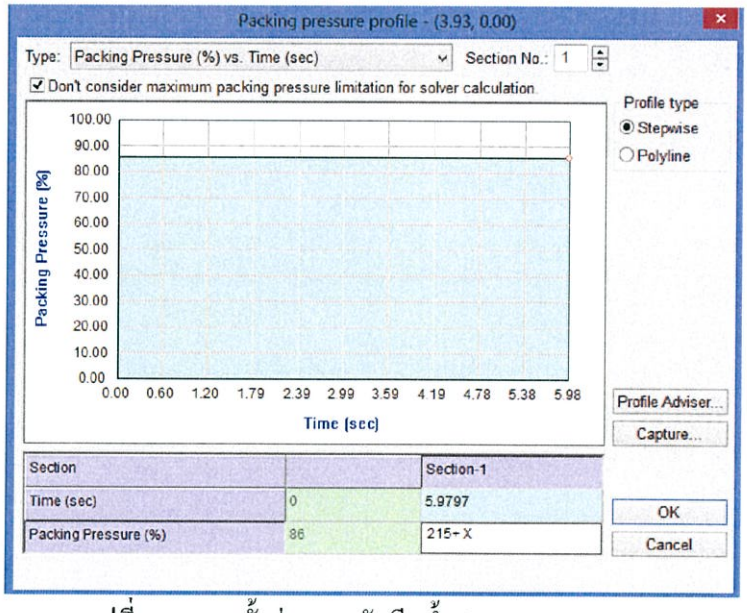
7.2.3) ความดันในการฉีด (Injection pressure) สามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้โดยเลือกที่คำสั่ง "Injection pressure profile" แสดงดังรูปที่ 3.38 ทำการเปลี่ยนหน่วยโดยใช้คำสั่ง "Type" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.38 การตั้งค่าความดันในการฉีด (Injection pressure)

7.2.4) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over) สามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้ โดยพิจารณาที่คำสั่ง "VP switch-over" และเลือกคำสั่ง "By ram position" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

7.2.5) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure) สามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้ โดยเลือกที่คำสั่ง "Injection pressure profile" แสดงดังรูปที่ 3.39 สามารถทำการเปลี่ยนหน่วยโดยใช้คำสั่ง "Type" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้



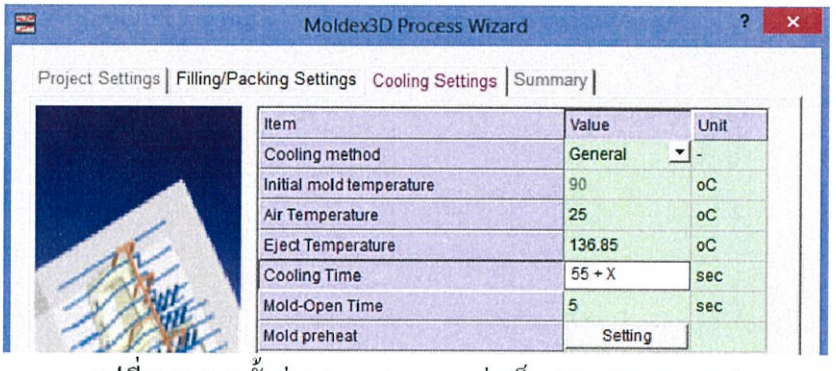
รูปที่ 3.39 การตั้งค่าความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)

7.2.6) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) สามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้ โดยพิจารณาที่คำสั่ง "Melt temperature" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

7.2.7) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) สามารถกำหนดค่าให้กับการจำลองได้ โดยพิจารณาที่คำสั่ง "Mold temperature" จากนั้นทำการกำหนดค่าตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

7.3) การตั้งค่าระบบการหล่อเย็น (Cooling system)

จากการศึกษาการตั้งค่าเกี่ยวกับระบบการหล่อเย็น (Cooling system) พบว่าค่าของปัจจัยที่ผู้ดำเนินงานสามารถกำหนดให้กับการจำลองกระบวนการฉีดได้นั้น คือระยะเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (Cooling time) แสดงดังรูปที่ 3.40 โดยปัจจัยอุณหภูมิอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการหล่อเย็น (Cooling system) โปรแกรมจะทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้ โดยพิจารณาจากฐานข้อมูลของเครื่องฉีดพลาสติก และชนิดพลาสติกที่ได้ทำการระบุไปในขั้นตอน "การตั้งค่าโครงการ (Project setting)"

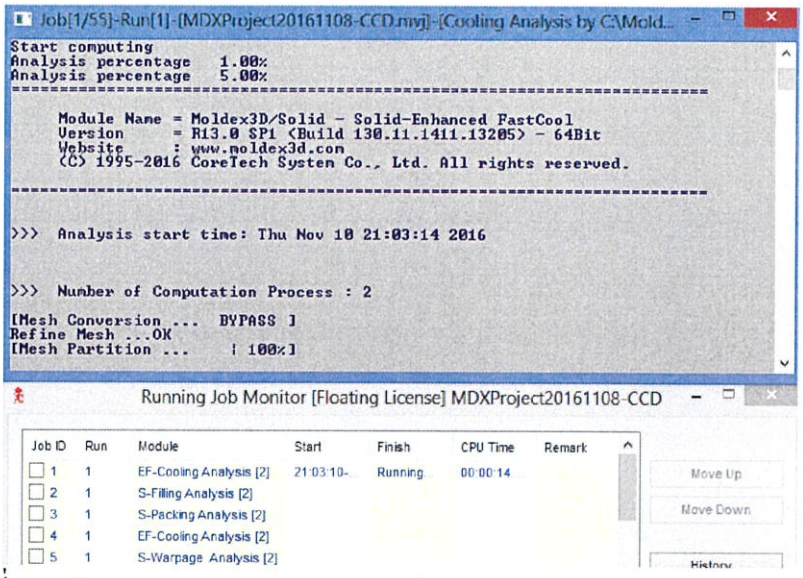


รูปที่ 3.40 การตั้งค่าของระบบการหล่อเย็น (Cooling system)

หลังจากทำการกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆ ตามเงื่อนไขการผลิตที่ออกแบบขึ้น ให้ทำการพิจารณาที่คำสั่ง "Summary" โดยจะแสดงผลค่าของปัจจัยต่างๆ ไว้รวมกัน ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำการพิจารณาและตรวจสอบได้ง่ายมากขึ้น

8) เมื่อกำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับคำสั่ง "Mesh, Material, Process" เรียบร้อยแล้ว ให้เลือกที่คำสั่ง "Check run" ตามด้วยคำสั่ง "Finish" ซึ่งก็จะทำให้ได้การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก 1 การจำลอง (Run 1) โดยหากต้องการเพิ่มจำนวนการทดลอง สามารถเลือกที่คำสั่ง "Double click here to add a new run" และทำตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

หลังจากที่ได้จำนวนการทดลองตามที่ต้องการแล้ว ต้องสั่งการให้โปรแกรมจำลองกระบวนการฉีดจริง (Run) ของทุกแผนการทดลองที่สร้างขึ้น โดยให้เลือกที่คำสั่ง "Analyze" จากนั้นโปรแกรมจะทำการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก (Run) แสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 ลักษณะการจำลองกระบวนการฉีดจริง (Run) ของโปรแกรม Moldex3D

3.3.5 พิจารณาค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาและประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab

พิจารณาค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ของทุกๆ แผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design (FFD)) ต่อมาทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อศึกษาและค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ หลังจากนั้นนำปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ได้ไปออกแบบแผนการทดลองในลำดับถัดไป เพื่อทำการวิเคราะห์ในระดับที่ละเอียดมากขึ้น

3.3.6 ออกแบบแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางและวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

ออกแบบแผนการทดลองและวิเคราะห์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ซึ่งเป็นการพิจารณาและวิเคราะห์ในระดับที่สูงขึ้น โดยใช้เครื่องมือในการดำเนินงานดังนี้

3.3.6.1 ออกแบบแผนการทดลองโดยการใช้การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

การออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้จะพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วนในโปรแกรม Minitab มาเป็นปัจจัยนำเข้าให้กับแผนการทดลองซึ่งจากการประเมินเบื้องต้นผู้ดำเนินงานมีความคิดเห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีลักษณะความสัมพันธ์แบบส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งจากการศึกษาในบทที่ 2 พบว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษา เนื่องจากสามารถสร้างตัวแบบ และพิจารณาความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Quadratic model) ได้

ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในโปรแกรม Minitab มาออกแบบแผนการทดลอง เพื่อพิจารณาระดับความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ละเอียดขึ้น

3.3.6.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาค่าผลตอบที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดพลาสติกกรณีศึกษา เป็นการนำข้อมูลค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปในโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลางไปประมวลผลในโปรแกรม Minitab เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าผลตอบที่เหมาะสม กล่าวคือ เป็นการประมาณค่าปัจจัยที่ทำให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าการโก่งงอต่ำที่สุด โดยการใช้เทคนิควิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมะสม

3.3.7 พิจารณาผลการดำเนินงาน

โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.3.7.1 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาซึ่งได้จากโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน

3.3.7.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วนโดยการใช้โปรแกรม Minitab

3.3.7.3 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองส่วนประสมกลาง

3.3.7.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

3.3.7.5 ผลการทดลองเพื่อการยืนยัน และเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน

หลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าการโก่งงอมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยัน และเปรียบเทียบผลโดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

การทดลองนี้คือ การนำค่าปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำที่สุดมาทำการจำลองกระบวนการฉีดด้วยโปรแกรม Moldex3D แล้วเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอที่ได้จากโปรแกรม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

2) การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

การทดลองนี้คือ การนำค่าปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำที่สุดมาทดลองฉีดพลาสติกในกระบวนการผลิตจริงของบริษัทกรณีศึกษา โดยใช้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น ขนาด และคุณสมบัติต่างๆ เป็นเครื่องฉีดเดียวกันกับที่กำหนดไว้ในกระบวนการจำลองการฉีดของโปรแกรม Moldex3D

โดยสามารถพิจารณารายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับผลการดำเนินงานได้ในบทที่ 4

3.4 ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการดำเนินงานในครั้งนี้ โดยการสรุปผลการดำเนินงานจะอ้างอิงตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินงานเป็นหลัก กล่าวคือเป็นการยืนยันว่าผลของการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ สามารถทำการพิจารณาได้ดังนี้

3.4.1 วิเคราะห์และระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

3.4.2 กำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุด

3.4.3 พิจารณาผลลัพธ์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาหลังจากทดลองผลิตจริง

โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสรุปผลการดำเนินงานสามารถศึกษาได้ในบทที่ 4

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

สำหรับบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินงานตามแผนการทดลองต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลของการทดลองสามารถแยกพิจารณาได้ทั้งหมด 5 ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน

4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าการโก่งงอพิจารณาจากกราฟกึ่งปกติและแผนภูมิพาเรโต

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure)

4.2.3 การพิจารณากราฟปัจจัยหลัก (Main effect plot) และกราฟปัจจัยร่วม (Interaction effect plot)

4.3 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองส่วนประสมกลาง

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

4.5 ผลการทดลอง เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน

4.5.1 การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

4.5.2 การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

4.1 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน

หลังจากทำการออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยใช้การออกแบบการทดลองบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab และนำแผนการทดลองดังกล่าวมากำหนดค่าปัจจัยในแบบจำลอง (Simulation) กระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนกรณีศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3}

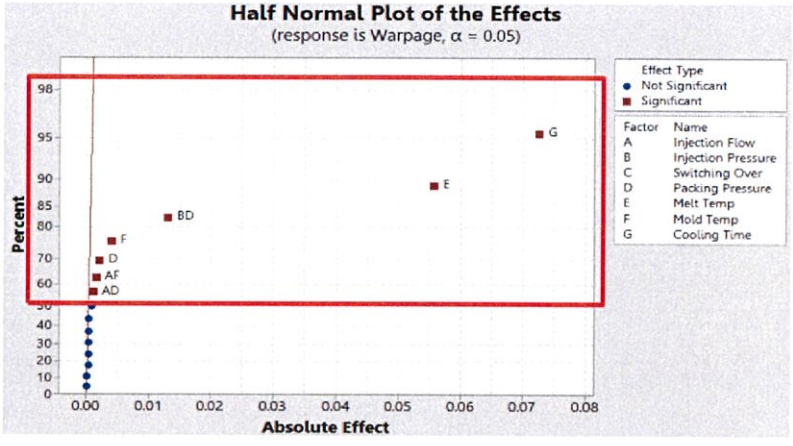
ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัย (Factors)							ค่าการโก่งงอ (Warpage) (mm)
	Cooling time (sec)	Packing pressure (MPa)	Injection pressure (MPa)	Switching over (mm)	Injection velocity (mm/sec)	Mold temperature (°C)	Melting temperature (°C)	
1	$25 + x_1$	$185 + x_2$	$85 + x_3$	$95 + x_4$	$15 + x_5$	$80 + x_6$	$690 + x_7$	1.9860
2	$55 + x_1$	$185 + x_2$	$85 + x_3$	$95 + x_4$	$25 + x_5$	$80 + x_6$	$710 + x_7$	0.9920
3	$25 + x_1$	$215 + x_2$	$85 + x_3$	$95 + x_4$	$25 + x_5$	$100 + x_6$	$690 + x_7$	1.0830
4	$55 + x_1$	$215 + x_2$	$85 + x_3$	$95 + x_4$	$15 + x_5$	$100 + x_6$	$710 + x_7$	1.0020
5	$25 + x_1$	$185 + x_2$	$115 + x_3$	$95 + x_4$	$25 + x_5$	$100 + x_6$	$710 + x_7$	0.9960
6	$55 + x_1$	$185 + x_2$	$115 + x_3$	$95 + x_4$	$15 + x_5$	$100 + x_6$	$690 + x_7$	1.0147
7	$25 + x_1$	$215 + x_2$	$115 + x_3$	$95 + x_4$	$15 + x_5$	$80 + x_6$	$710 + x_7$	0.9790
8	$55 + x_1$	$215 + x_2$	$115 + x_3$	$95 + x_4$	$25 + x_5$	$80 + x_6$	$690 + x_7$	1.9740
9	$25 + x_1$	$185 + x_2$	$85 + x_3$	$105 + x_4$	$15 + x_5$	$100 + x_6$	$710 + x_7$	0.9890
10	$55 + x_1$	$185 + x_2$	$85 + x_3$	$105 + x_4$	$25 + x_5$	$100 + x_6$	$690 + x_7$	1.8430
11	$25 + x_1$	$215 + x_2$	$85 + x_3$	$105 + x_4$	$25 + x_5$	$80 + x_6$	$710 + x_7$	0.9960
12	$55 + x_1$	$215 + x_2$	$85 + x_3$	$105 + x_4$	$15 + x_5$	$80 + x_6$	$690 + x_7$	1.8740
13	$25 + x_1$	$185 + x_2$	$115 + x_3$	$105 + x_4$	$25 + x_5$	$80 + x_6$	$690 + x_7$	1.9800
14	$55 + x_1$	$185 + x_2$	$115 + x_3$	$105 + x_4$	$15 + x_5$	$80 + x_6$	$710 + x_7$	0.9750
15	$25 + x_1$	$215 + x_2$	$115 + x_3$	$105 + x_4$	$15 + x_5$	$80 + x_6$	$690 + x_7$	1.7850
16	$55 + x_1$	$215 + x_2$	$115 + x_3$	$105 + x_4$	$25 + x_5$	$100 + x_6$	$710 + x_7$	0.9820

จากตารางแสดงค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) พบว่าลำดับการทดลองที่ 14 นั้นได้ค่าการโก่งงอต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9750 มิลลิเมตร และค่าปัจจัยต่างๆ ก็แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งอย่างไรก็ตามผลการทดลองดังกล่าวนั้นยังไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างละเอียด เนื่องจากไม่สามารถแยกแยะอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้โดยตรง ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงนำค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาไปทำการวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยใช้โปรแกรม Minitab ในขั้นตอนถัดไป

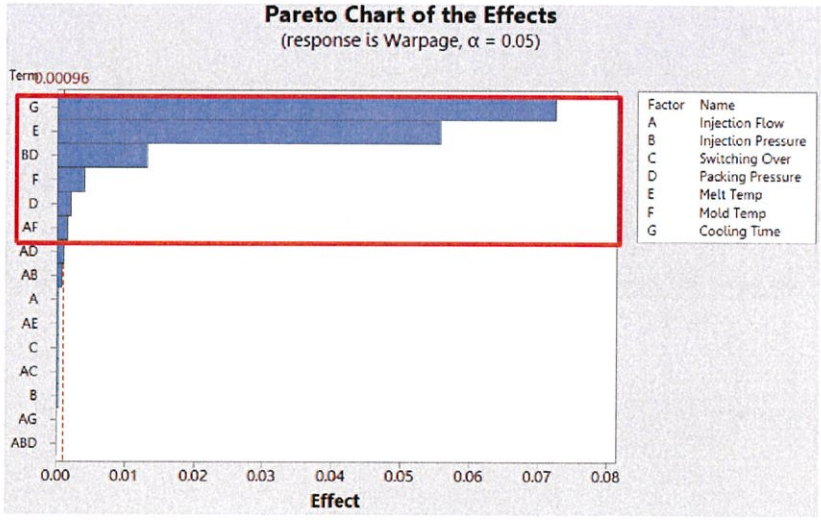
4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าการโก่งงอจากกราฟกึ่งปกติและแผนภูมิพาเรโต

การวิเคราะห์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาในโปรแกรม Minitab นั้นจะทำการพิจารณาจากการพล็อตตัวของกราฟกึ่งปกติ (Half normal plot) และแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการพิจารณาเพื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา



รูปที่ 4.1 ลักษณะของกราฟกึ่งปกติ (Half normal plot)



รูปที่ 4.2 ลักษณะของแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram)

จากการพิจารณาข้อมูลของกราฟกึ่งปกติ (Half normal plot) และแผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลในลักษณะปัจจัยหลัก (Main effect) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีทั้งหมด 4 ปัจจัย เรียงตามลำดับการมีอิทธิพลได้ดังนี้

1) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time, G)

2) อุณหภูมิพลาสติกหลอมหลว (Melting temperature, E)

3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature, F)

4) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure, D)

โดยนอกจากปัจจัยที่มีอิทธิพลในลักษณะปัจจัยหลัก (Main effect) ยังมีปัจจัยที่มีอิทธิพลในลักษณะปัจจัยร่วม (Interaction effect) ซึ่งจากการพิจารณากราฟทำให้ทราบว่าปัจจัยร่วม ที่ส่งผลกระทบต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีทั้งหมด 2 ปัจจัย เรียงตามลำดับการมีอิทธิพลได้ดังนี้

1) ความดันในการฉีด (Injection pressure) และความดันฉีดย้ำ (Packing pressure, BD)

2) ความเร็วในการฉีด (Injection velocity) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature), AF

อย่างไรก็ตามผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ยังไม่สามารถระบุได้ว่ามีการส่งผลกระทบหรือมีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาจริงหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาข้อมูลที่สำคัญอีก 2 ส่วน คือการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) และการพิจารณาข้อมูลของกราฟปัจจัยหลักและกราฟปัจจัยร่วม

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure)

สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ของแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) ซึ่งการทดลองนี้จะมีลักษณะรูปแบบโครงสร้างซ้ำซ้อนแบบ Resolution 4 (IV) ความหมายคือ อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่สามารถตรวจพบได้จากผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาในแผนการทดลองนี้ จะเป็นอิทธิพลร่วมที่มีโครงสร้างซ้ำซ้อนแบบ 2 ปัจจัยร่วมคู่กับ 2 ปัจจัยร่วม กล่าวคือในทางทฤษฎีจะมีผลต่อค่าการโก่งงอกรณีศึกษาน้อยมาก และสามารถตัดออก หรือไม่จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยร่วมที่เกิดขึ้นได้โดยรายละเอียดของโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 4.3

Fractional Factorial Design

Factors:	7	Base Design:	7, 16	Resolution:	IV
Runs:	16	Replicates:	1	Fraction:	1/8
Blocks:	1	Center pts (total):	0		

Design Generators: E = ABC, F = BCD, G = ACD

Alias Structure

I + ABCE + ABFG + ACDG + ADEF + BCDF + BDEG + CEFG

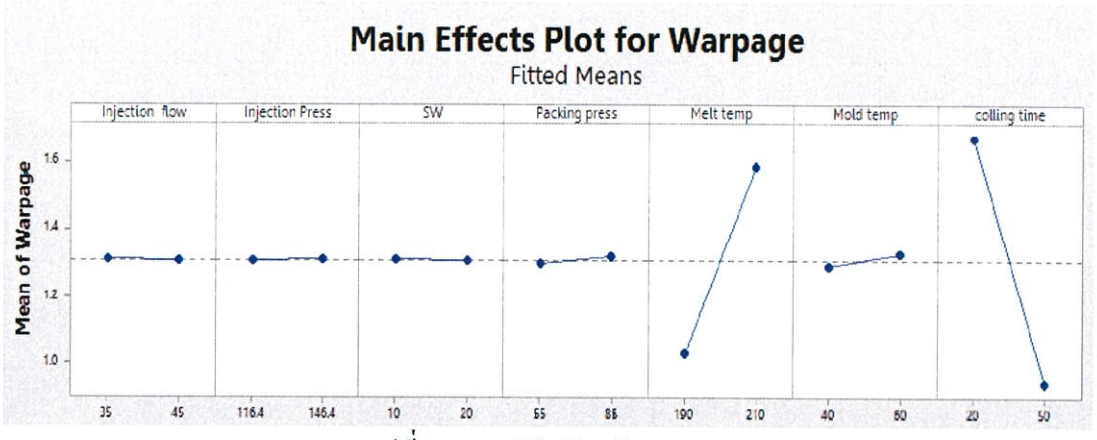
A + BCE + BFG + CDG + DEF + ABCDF + ABDEG + ACEFG
B + ACE + AFG + CDF + DEG + ABCDG + ABDEF + BCEFG
C + ABE + ADG + BDF + EFG + ABCFG + ACDEF + BCDEG
D + ACG + AEF + BCF + BEG + ABCDE + ABDFG + CDEFG
E + ABC + ADF + BDG + CFG + ABEFG + ACDEG + BCDEF
F + ABG + ADE + BCD + CEG + ABCEF + ACDFG + BDEFG
G + ABF + ACD + BDE + CEF + ABCEG + ADEFG + BCDFG
AB + CE + FG + ACDF + ADEG + BCDG + BDEF + ABCEFG
AC + BE + DG + ABDF + AEFG + BCFG + CDEF + ABCDEG
AD + CG + EF + ABCF + ABEG + BCDE + BDFG + ACDEFG
AE + BC + DF + ABDG + ACFG + BEFG + CDEG + ABCDEF
AF + BG + DE + ABCD + ACEG + BCEF + CDFG + ABDEFG
AG + BF + CD + ABDE + ACEF + BCEG + DEFG + ABCDFG
BD + CF + EG + ABCG + ABEF + ACDE + ADFG + BCDEFG
ABD + ACF + AEG + BCG + BEF + CDE + DFG + ABCDEFG

รูปที่ 4.3 โครงสร้างซ้ำซ้อนของปัจจัยหลัก (Main effect) และปัจจัยร่วม (Interaction effect)

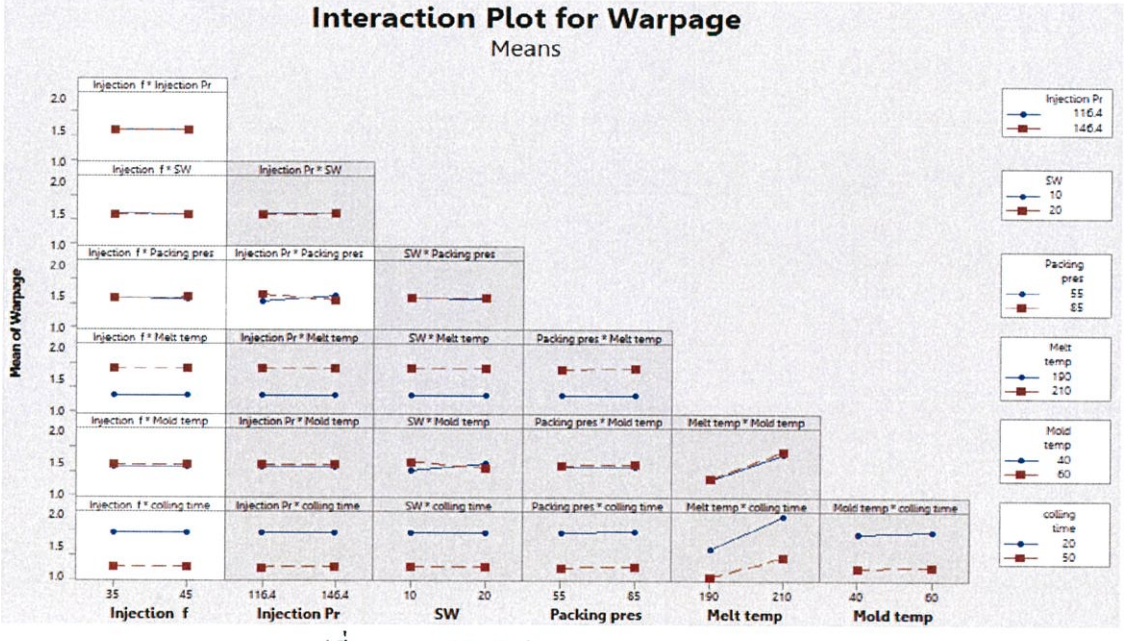
จากการพิจารณาโครงสร้างซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นของแผนการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน 2^{7-3} (2^{7-3} Fractional factorial design) จะเห็นว่ามีโครงสร้างซ้ำซ้อนเกิดขึ้นมากมาย ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างซ้ำซ้อนของ BD + CF + EG + ABCG + ABEF + ACDE + ADFG + BCDEFG กล่าวคือปัจจัยร่วม BD จะส่งผลกระทบต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาเหมือนกับปัจจัยร่วม ADFG หรือปัจจัยร่วมอื่นๆ ทุกประการ ทำให้ในทางทฤษฎีปัจจัยร่วม (Interaction effect) เหล่านี้จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาว่ามีอิทธิพลต่อสิ่งที่กำลังศึกษา

4.2.3 การพิจารณากราฟปัจจัยหลัก (Main effect plot) และกราฟปัจจัยร่วม (Interaction plot)

การพิจารณาข้อมูลเกี่ยวกับกราฟปัจจัยหลัก และกราฟปัจจัยร่วมนั้นจะทำให้สามารถทำการควบคุม และระบุได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่าปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมที่เกิดขึ้นตามแผนการทดลองนั้น ปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาโดยแสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟปัจจัยหลัก (Main effect plot)



รูปที่ 4.5 กราฟปัจจัยร่วม (Interaction effect plot)

จากการพิจารณากราฟปัจจัยหลัก และกราฟปัจจัยร่วมสามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลและไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพล และไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา				ปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา		
7 ปัจจัย	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	Injection velocity (mm/sec)	Injection pressure (MPa)	Switching over (mm)
ค่าปัจจัยที่ทำให้ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุด	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	$15 + x_5$	$115 + x_3$	$105 + x_4$

จากการพิจารณาพบว่าค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.9750 มิลลิเมตร ซึ่งค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพล และไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 4.2 จากนั้นให้นำค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลไปเป็นปัจจัยนำเข้าให้กับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในลำดับถัดไป ส่วนปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลให้นำไปกำหนดเป็นเงื่อนไขการผลิต เพื่อให้สามารถจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D ในลำดับถัดไปได้

4.3 การเก็บข้อมูลค่าการโก่งงอตามแผนการทดลองส่วนประสมกลาง

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design (FFD)) โดยการใช้โปรแกรม Minitab เพื่อให้สามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาปรากฏว่า มีทั้งหมด 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพล ซึ่งต่อมาผู้ดำเนินงานได้นำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มาทำการวิเคราะห์ระดับการส่งผลกระทบต่อค่าการโก่งงออย่างละเอียดมากขึ้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากแผนการทดลองเบื้องต้น ด้วยการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design (CCD)) โดยใช้ปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้ง 4 ปัจจัยมาเป็นปัจจัยนำเข้า ซึ่งจากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง นั้นมีข้อดีตรงที่ สามารถทำการวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์กำลังสอง (Second order) ได้ ซึ่งสามารถพิจารณาระดับของปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

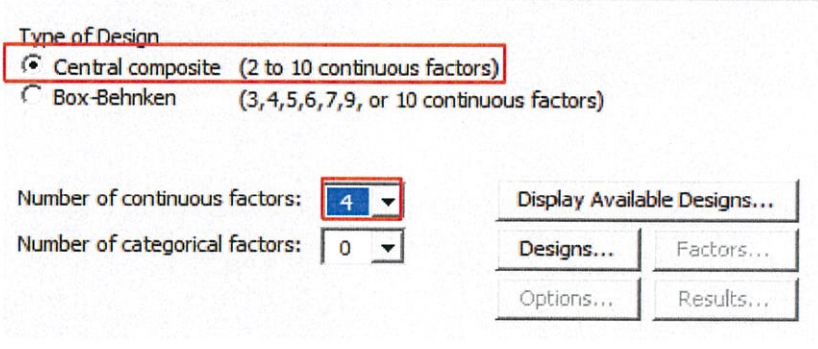
ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัยนำเข้า				
			$-\alpha$	-1	0	1	α
1) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	G	sec	$10 + x_1$	$25 + x_1$	$40 + x_1$	$55 + x_1$	$70 + x_1$
2) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)	E	°C	$680 + x_7$	$690 + x_7$	$700 + x_7$	$710 + x_7$	$720 + x_7$
3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	F	°C	$70 + x_6$	$80 + x_6$	$90 + x_6$	$100 + x_6$	$110 + x_6$
4) ความดันจีดซ้ำ (Packing pressure)	D	MPa	$170 + x_2$	$185 + x_2$	$200 + x_2$	$215 + x_2$	$230 + x_2$

เมื่อกำหนดให้ $-\alpha, \alpha$ คือ การทดลองที่จุดแนวแกน (Axial point) ของการออกแบบการทดลอง

-1, 1 คือ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design)

0 คือ การทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center point) ของการออกแบบการทดลอง

โดยการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลางหากพิจารณาจากโปรแกรม Mintab แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จะพบว่ามีแผนการทดลองทั้งหมด 31 แผนการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design) 16 แผนการทดลอง การออกแบบการทดลองที่เพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center point) 8 แผนการทดลอง และการออกแบบการทดลองที่เพิ่มจุดแนวแกน (Axial point) 7 แผนการทดลอง ซึ่งสามารถพิจารณาแผนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 การสร้างแผนการทดลองส่วนประสมกลาง โดยพิจารณาปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย

Available Response Surface Designs

Design		Continuous Factors								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Central composite full	unblocked	13	20	31	52	90	152			
	blocked	14	20	30	54	90	160			
Central composite half	unblocked				32	53	88	154		
	blocked				33	54	90	160		
Central composite quarter	unblocked							90	156	
	blocked							90	160	
Central composite eighth	unblocked									158
	blocked									160
Box-Behnken	unblocked		15	27	46	54	62		130	170
	blocked			27	46	54	62		130	170

รูปที่ 4.7 จำนวนแผนการทดลอง ของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

ตารางที่ 4.4 แผนการทดลองตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัยนำเข้า (Input factors)				ค่าการโก่งงอ (Warpage)
	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	
1	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	
2	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	
3	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	
4	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	
5	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	
6	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	
7	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	
8	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	
9	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	
10	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	
11	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	
12	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	
13	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	
14	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	
15	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	
16	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	
17	$10 + x_1$	$700 + x_7$	$70 + x_6$	$200 + x_2$	
18	$70 + x_1$	$700 + x_7$	$110 + x_6$	$200 + x_2$	
19	$40 + x_1$	$680 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
20	$40 + x_1$	$720 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
21	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$70 + x_6$	$200 + x_2$	

ตารางที่ 4.4 แผนการทดลองตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัยนำเข้า (Input factors)				ค่าการโก่งงอ (Warpage)
	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	
22	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$110 + x_6$	$200 + x_2$	
23	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$170 + x_2$	
24	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$230 + x_2$	
25	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
26	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
27	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
28	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
29	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
30	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	
31	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	

จากนั้นนำแผนการทดลอง ที่ได้จากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design (CCD)) ไปจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D แล้วบันทึกค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลอง แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าการโก่งงอตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัยนำเข้า (Input factors)				ค่าการโก่งงอ (Warpage)
	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	
1	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	2.1120
2	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	1.1510
3	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	1.9810
4	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$185 + x_2$	1.1460
5	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	1.7850
6	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	1.0970
7	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	1.6580
8	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$185 + x_2$	1.0890
9	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	1.9580
10	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	1.1060

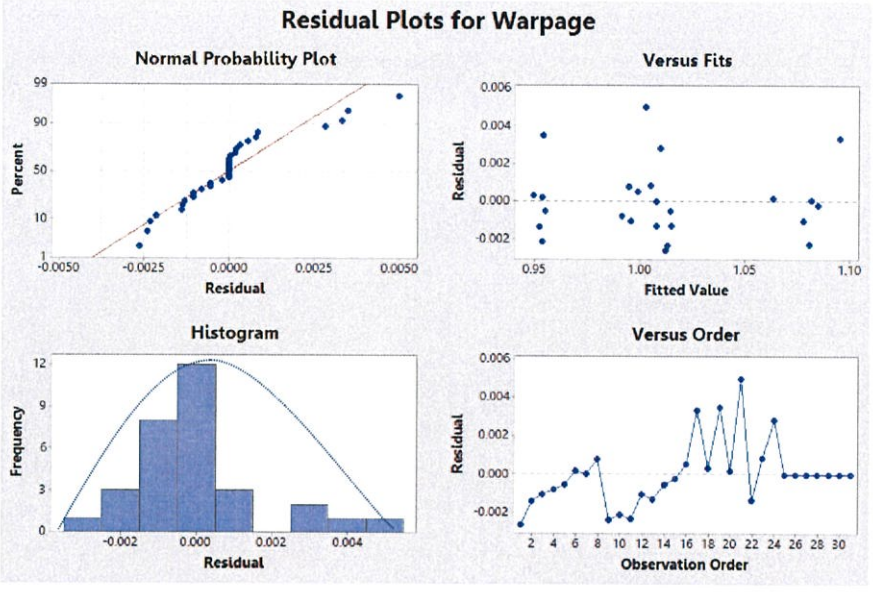
ตารางที่ 4.5 ค่าการโก่งงอตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง (Run order)	ปัจจัยนำเข้า (Input factors)				ค่าการโก่งงอ (Warpage)
	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	
11	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	1.7780
12	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$80 + x_6$	$215 + x_2$	1.0980
13	$25 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	1.7260
14	$55 + x_1$	$690 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	1.1450
15	$25 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	1.9650
16	$55 + x_1$	$710 + x_7$	$100 + x_6$	$215 + x_2$	1.1260
17	$10 + x_1$	$700 + x_7$	$70 + x_6$	$200 + x_2$	2.9540
18	$70 + x_1$	$700 + x_7$	$110 + x_6$	$200 + x_2$	0.9710
19	$40 + x_1$	$680 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.450
20	$40 + x_1$	$720 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.5020
21	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.3980
22	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.4880
23	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$170 + x_2$	1.5870
24	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$230 + x_2$	1.6500
25	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
26	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
27	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
28	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
29	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
30	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260
31	$40 + x_1$	$700 + x_7$	$90 + x_6$	$200 + x_2$	1.7260

จากตารางค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดในโปรแกรม Moldex3D ของแผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design (CCD)) พบว่าลำดับการทดลองที่ 18 ให้ค่าการโก่งงอต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9710 มิลลิเมตร โดยเพื่อให้ได้มาซึ่งเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดทางผู้ดำเนินงานจึงทำการวิเคราะห์ระดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยอย่างละเอียดมากขึ้นโดยการใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมโดยสามารถพิจารณารายละเอียดได้ในขั้นตอนต่อไป

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบและการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางมาทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำที่สุดโดยพิจารณาที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 95% (α = 0.05) ซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



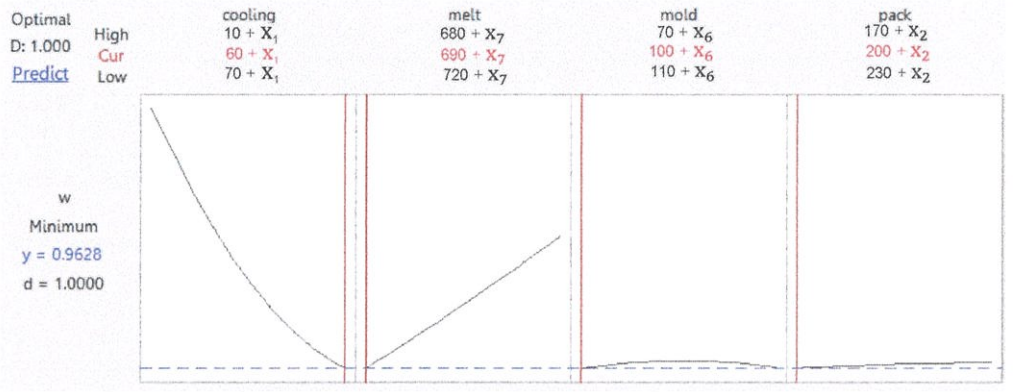
รูปที่ 4.8 กราฟเศษเหลือ (Residual plot) ของค่าการโก่งงอที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO))

จากการพิจารณาทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของข้อมูลสำหรับแบบจำลองได้ว่า

1) พิจารณากราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal propability plot) จะเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรง หมายความว่าข้อมูลมีแนวโน้มของการแจกแจงแบบปกติ

2) พิจารณากราฟฮีสโตแกรม (Histrogram) จะเห็นได้ว่าสามารถลากเส้นโค้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับทรงระฆังคว่ำ หมายความว่าข้อมูลมีแนวโน้มการแจกแจงแบบปกติ

3) พิจารณากราฟความเสถียรของความแปรปรวน (Versus fits, Versus order) จะเห็นได้ว่าข้อมูลมีการกระจัดกระจายเรียงตัวไม่แน่นอน และมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งด้านบน ด้านล่างที่เท่าๆ กันไม่อยู่ด้านใดเพียงด้านเดียว หมายความว่าข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มของข้อมูลมีแนวโน้มความแปรปรวนเท่าๆ กัน ข้อมูลแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุด โดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

หลังจากทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากแผนการทดลองส่วนประสมกลางโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมสามารถกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขของกระบวนการผลิต (Condition of process) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา

	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา				ปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา		
7 ปัจจัย	Cooling time (sec)	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	Injection velocity(flow) (mm/sec)	Injection pressure (MPa)	Switching over (mm)
เงื่อนไขของกระบวนการผลิต	$30 + X_1$	$690 + X_7$	$100 + X_6$	$200 + X_2$	$15 + X_5$	$115 + X_3$	$105 + X_4$

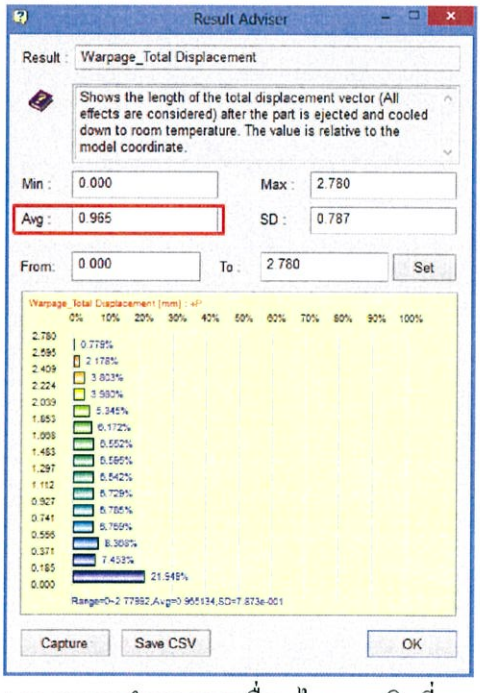
4.5 ผลการทดลอง เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน

4.5.1 การยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

การทดลองนี้ คือ การนำค่าปัจจัยหรือเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) ซึ่งทำให้ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำที่สุด มาทำการจำลองกระบวนการฉีดด้วยโปรแกรม Moldex3D ซึ่งค่าการโก่งงอ ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการดำเนินงาน ควรจะต้องมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดได้ดังนี้

- ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization) มีค่าเท่ากับ 0.9628 มิลลิเมตร

- ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ได้จากจำลองตามเงื่อนไขผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) ในโปรแกรม Moldex3D มีค่าเท่ากับ 0.9650 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองตามเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า เงื่อนไขการผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) สามารถทำการจำลองกระบวนการผลิตในโปรแกรม Moldex3D และให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ใกล้เคียงกัน

4.5.2 การยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

การทดลองนี้คือ การนำค่าปัจจัยหรือเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) ซึ่งทำให้ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำที่สุด มาทดลองฉีดในกระบวนการผลิตจริงของบริษัทกรณีศึกษา โดยใช้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น ขนาด และคุณสมบัติต่างๆ ของเครื่องฉีดเดียวกันกับที่กำหนดไว้ในกระบวนการจำลองการฉีดของโปรแกรม Moldex3D จากนั้นพิจารณาว่าค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาว่ามีค่าลดลงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ และพิจารณาขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 (เงื่อนไขการผลิตเดิมของบริษัทกรณีศึกษา) แสดงดังตารางที่ 4.7 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 (เงื่อนไขการผลิตเดิมของบริษัทกรณีศึกษา)

ตำแหน่ง	รายละเอียด			ผลการทดลอง				หน่วย	ผลการตัดสิน
	ขนาดมาตรฐาน	ค่าความเผื่อ	เครื่องมือวัด	ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 (Cavity 1)		ช่องแม่พิมพ์ที่ 2 (Cavity 2)			
				ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2		
35	9.40	(± 0.35)	CMM	- 0.5150	-0.4060	- 0.8530	- 0.5920	mm	ไม่ผ่าน
36	15.40	(± 0.20)	CMM	- 0.9800	- 0.8180	- 1.4680	- 1.1950	mm	ไม่ผ่าน

จากการพิจารณาข้อมูลการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตำแหน่งที่ 35 และ 36 โดยเครื่องมือที่ใช้วัดคือ เครื่องวัดละเอียด 3 มิติ (Coordinate measuring machine (CMM)) สำหรับการพิจารณาว่าขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าตามมาตรฐานการออกแบบหรือไม่ ให้พิจารณาที่ "ค่าความเผื่อ (Tolerance)" แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่ง 35 ชิ้นงานที่ 1 ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 ได้เท่ากับ -0.5150 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเผื่อพบว่าขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งตามค่าความเผื่อมีช่วงตั้งแต่ -0.35 ถึง +0.35 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานไปถึง -0.1650 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ณ ตำแหน่ง 35 ชิ้นงานที่ 1 ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 ไม่ผ่านตามค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ

โดยจากการพิจารณาข้อมูลทั้งหมด ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และ 36 ซึ่งใช้เงื่อนไขการผลิตเดิมของบริษัท ไม่ผ่านตามมาตรฐานการออกแบบ

จากนั้นนำเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) ไปทดลองผลิตในกระบวนการผลิตจริง และนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปทำการวัดขนาดแล้วเปรียบเทียบผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 (เงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO))

ตำแหน่ง	รายละเอียด			ผลการทดลอง				หน่วย	ผลการตัดสิน
	ขนาดมาตรฐาน	ค่าความเผื่อ	เครื่องมือวัด	ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 (Cavity 1)		ช่องแม่พิมพ์ที่ 2 (Cavity 2)			
				ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2		
35	9.40	(± 0.35)	CMM	-0.057	+0.027	+0.114	-0.032	mm	ผ่าน
36	15.40	(± 0.20)	CMM	-0.037	+0.141	+0.151	+0.035	mm	ผ่าน

จากการพิจารณาข้อมูลการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตำแหน่งที่ 35 และ 36 โดยเครื่องมือที่ใช้วัดคือ เครื่องวัดละเอียด 3 มิติ (Coordinate measuring machine (CMM)) สำหรับการพิจารณาว่าขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าตามมาตรฐานการออกแบบหรือไม่ ให้พิจารณาที่ "ค่าความเผื่อ (Tolerance)" แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่ง 35 ชิ้นงานที่ 1 ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 ได้เท่ากับ -0.057 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเผื่อพบว่าขนาดเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งตามค่าความเผื่อมีช่วงตั้งแต่ -0.35 ถึง +0.35 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกินอยู่ภายในช่วงมาตรฐาน

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวว่า ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ณ ตำแหน่ง 35 ชิ้นงานที่ 1 ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 ผ่านตามค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ โดยหลังจากการพิจารณาข้อมูลทั้งหมด ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และ 36 ซึ่งใช้เงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตมีขนาดผ่านตามมาตรฐานการออกแบบในทุกๆ ตำแหน่งที่ทำการศึกษา

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับเป้าหมายของการดำเนินงานที่กำหนดไว้ โดยพิจารณาดัชนีวัดผล (Key performance indicator) และเป้าหมายการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา และเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่ได้จากจากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) แสดงดังตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ดัชนีวัดผล (Key performance indicator) และเป้าหมายการดำเนินงาน

ดัชนีวัดผล (Key performance indicator)	เป้าหมายการดำเนินงาน
1) ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา (ทดลองในโปรแกรม Moldex3D)	ค่าการ โก่งงอ ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาต้องลดลง 40 % จาก 100%
2) ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36 (ทดลองในกระบวนการผลิตจริง)	ขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานของชิ้นส่วนกรณีศึกษาตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 ต้องลดลง 40 % จาก 100 %

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ลดลง โดยการจำลองในโปรแกรม Moldex3D

เงื่อนไขกระบวนการผลิตปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา (mm)	เงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่ได้จากจากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization (RO)) (mm)	ค่าเปอร์เซ็นที่ลดลง (%)
2.1000 mm	0.9660 mm	54.00

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36 ที่ลดลง

ตำแหน่ง	ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง (%)				ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็น (%)
	ช่องแม่พิมพ์ที่ 1 (Cavity 1)		ช่องแม่พิมพ์ที่ 2 (Cavity 2)		
	ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่1	ชิ้นที่ 2	
35	88.93	93.34	86.63	94.59	90.87
36	96.22	82.76	89.71	97.07	91.44

ดังนั้นจากการพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่ได้จากจากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization) และการดำเนินงานต่างๆ สามารถทำให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) และขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ไม่ได้ตามมาตรฐานการออกแบบ (ตำแหน่ง 35 และตำแหน่งที่ 36) ลดลงจนมีขนาดตามค่ามาตรฐานที่ออกแบบไว้ และที่สำคัญคือสามารถทำให้เป้าหมายของการดำเนินงานที่ตั้งไว้สำเร็จได้ ดังนั้นการดำเนินงานในครั้งนี้จึงถือว่าบรรลุตามวัตถุประสงค์ในการทดลอง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงงานฉบับนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปในกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์ ซึ่งการเสียรูปที่เกิดขึ้นคือ เกิดการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นงานส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานไม่ตรงตามค่ามาตรฐานการออกแบบ ดังนั้นจึงทำการศึกษาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองในโปรแกรม Minitab และการใช้เทคโนโลยีการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D มาทำการวิเคราะห์ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปหรือการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตลอดจนการกำหนดเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดให้กับกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนกรณีศึกษา

5.1 สรุปผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองโดยการใช้วิธีการออกแบบการทดลองในโปรแกรม Minitab และการใช้เทคโนโลยีการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนกรณีศึกษา และสามารถวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อทำการกำหนดเงื่อนไขการผลิตที่ทำให้ค่าดัชนีวัดผลของชิ้นส่วนกรณีศึกษาเป็นไปตามเป้าหมายการดำเนินงาน จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าเท่ากับ 0.9628 มิลลิเมตร เมื่อกำหนดให้ค่าของปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้ง 4 ปัจจัยมีค่าดังนี้ เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) เท่ากับ $30 + x_1$ วินาที อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) เท่ากับ $590 + x_7$ องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) เท่ากับ $100 + x_6$ องศาเซลเซียส ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure) เท่ากับ $200 + x_2$ เมกะปาสคาล และเมื่อกำหนดให้ค่าของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญอีก 3 ปัจจัยมีค่าดังนี้ ความเร็วในการฉีด (Injection velocity) เท่ากับ $15 + x_5$ มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันในการฉีด เท่ากับ $85 + x_3$ เมกะปาสคาล ระยะเปลี่ยนการฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over) เท่ากับ $105 + x_4$ มิลลิเมตร

จากนั้นนำเงื่อนไขการผลิตดังกล่าวมาจำลองกระบวนการฉีดในโปรแกรม Moldex3D พบว่าค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าเท่ากับ 0.9650 มิลลิเมตรซึ่งเพื่อทำการพิสูจน์ว่าเงื่อนไขการผลิตที่วิเคราะห์ได้นั้นสามารถลดค่าการโก่งงอ หรือทำให้ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานได้จริงหรือไม่ ดังนั้นจึงได้ทำการยืนยันโดยนำเงื่อนไขการผลิตดังกล่าวไปทดลองผลิตในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานทั้งหมด

จากการพิจารณาผลการทดลอง สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัยได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) จากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์และระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญหรือมีอิทธิพลต่อค่าการโก่งงอของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้ทั้งหมด 4 ปัจจัย ประกอบด้วย เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)

2) จากผลการทดลองสามารถกำหนดเงื่อนไขการผลิต (Condition of process) ที่มีความเหมาะสมที่สุดกล่าวคือ เป็นเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่ทำให้ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าต่ำสุด และทำให้ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษามีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน มีรายละเอียดดังนี้

- ค่าของปัจจัยที่มีนัยสำคัญหรือมีอิทธิพลทั้ง 4 ปัจจัยมีค่าดังนี้ เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) เท่ากับ $30 + x_1$ วินาที อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) เท่ากับ $590 + x_7$ องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) เท่ากับ $100 + x_6$ องศาเซลเซียส ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure) เท่ากับ $200 + x_2$ เมกะปาสคาล

- ค่าของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญหรือไม่มีอิทธิพลทั้ง 3 ปัจจัยมีค่าดังนี้ ความเร็วในการฉีด (Injection velocity) เท่ากับ $15 + x_5$ มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันในการฉีด เท่ากับ $85 + x_3$ เมกะปาสคาล ระยะเปลี่ยนการฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching over) เท่ากับ $105 + x_4$ มิลลิเมตร ซึ่งค่าของปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลได้จากการพิจารณาตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

จากการพิจารณาเป้าหมายของการดำเนินงานซึ่งได้แก่ ค่าการโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษาต้องลดลง 40 % จาก 100 % (ทดลองในโปรแกรม Moldex3D) และขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 ต้องลดลง 40 % จาก 100 % (ทดลองในกระบวนการผลิตจริง) ซึ่งจากการพิจารณาผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นค่าการโก่งงอของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ที่ทำการทดลองในโปรแกรม Moldex3D ลดลง 54.00 % จาก 100 % และเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ตำแหน่งที่ 35 และตำแหน่งที่ 36 ซึ่งพิจารณาโดยเฉลี่ยนั้นมีค่าลดลง 90.87 % , 91.84 % ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ผลของการดำเนินงานในครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำเงื่อนไขการผลิตที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตจริงนั้น นอกจากจะพิจารณาการเกิดการโก่งงอ (Warpage) แล้วก็มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาปัญหาการเสียรูปในลักษณะอื่นๆ ด้วย ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการฉีดไม่เต็มแบบ (Short mold) ปัญหารอยยุบ (Sink mark) หรือปัญหารอยย่นผิว (Jetting) เป็นต้น

5.2.2 การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D จะต้องระบุค่าปัจจัยต่างๆ ให้ครบถ้วนและถูกต้อง เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการจำลอง และการเสียเวลาในการดำเนินงานทดลอง เนื่องจากการจำลองกระบวนการผลิตหนึ่งกระบวนการใช้ระยะเวลาที่นานพอสมควร

5.2.3 ผลของการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab และโปรแกรม Moldex3D กับการปรับใช้ในกระบวนการผลิตจริงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนกันได้ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัยรบกวนต่างๆ ที่ไม่สามารถทำการควบคุมได้

เอกสารอ้างอิง

[1] เสน่ห์ เอกะวิภาต, วัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

[2] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2553

[3] ธนรัตน์ แต้วัฒนา และมณฑล แสงประไพทิพย์, กรรมวิธีการผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2546.

[4] เจริญ นาคะสรรค์, กระบวนการแปรรูปพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โฟร์เพซ, 2544.

[5] บรรเลง ศรนิล, เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 21 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2546.

[6] สุเทพ บุตรดี, การศึกษาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องฉีด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

[7] ประไพรศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, 2551.

[8] สุรพล อุปดิสสกุล, สถิติและการวางแผนการทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร: บริษัท สหมิตรออฟเซท, 2536.

[9] ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยลัย, 2545.

[10] กิติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ, ระบบการควบคุมคุณภาพที่หน้างาน คิวซีเซอร์เคิล (QC cycle). พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร: บริษัท เทคนิคคอลแอพโพรชเคาน์เซลลิ่งแอนด์เทรนนิ่ง จำกัด, 2543.

[11] สิริวรรณ ขาวอุไร สุธินี ตุ้นสกุล และโสรยา สุขพอดี, การตั้งค่าปัจจัยสำหรับการฉีดพลาสติกเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของฝาครอบฐานถ้วยรางวัล, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

[12] พิชกรณ์กร ชวนาทนุสรณ์, การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมแบบจำลองโครงข่ายเพื่อลดการโก่งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.

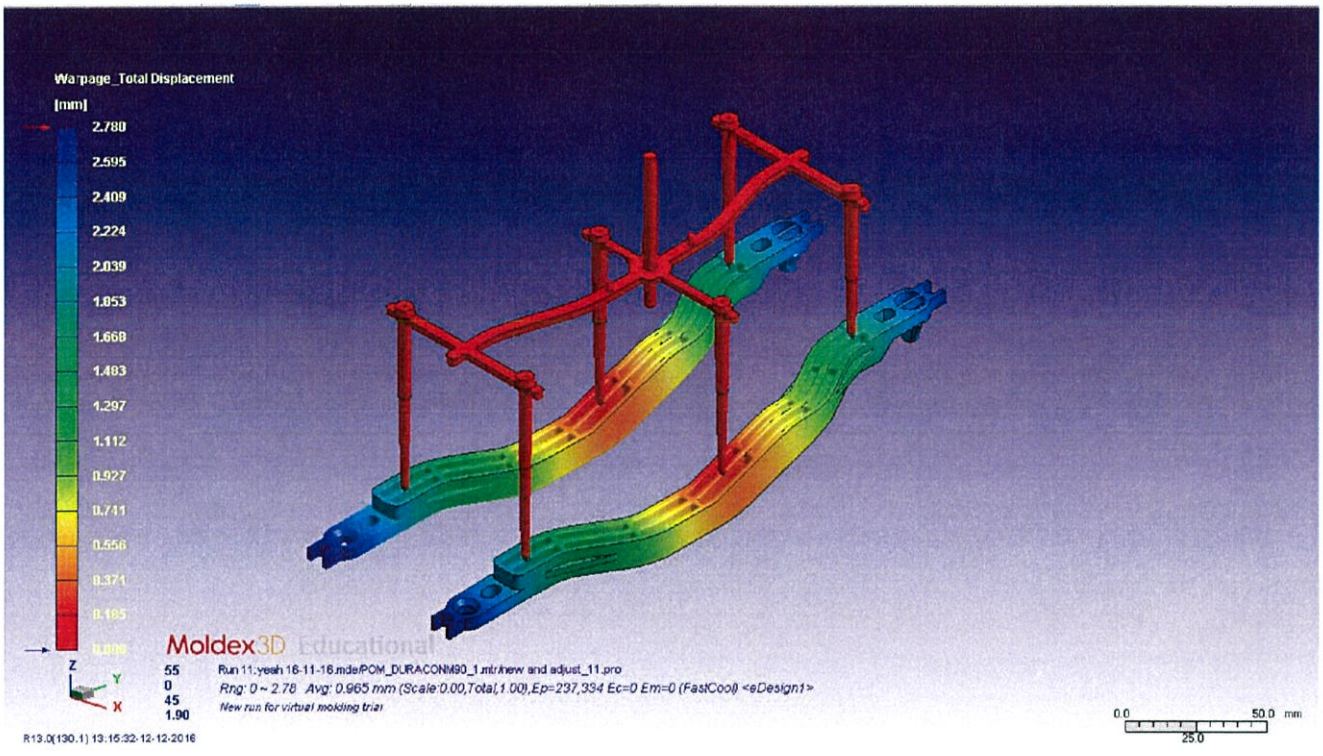
[13] สิทธิศักดิ์ ธุรกิจ, การออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นส่วนพลาสติกของเครื่องใช้ไฟฟ้า, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.

[14] พรนภา สนองบุญ, การศึกษาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

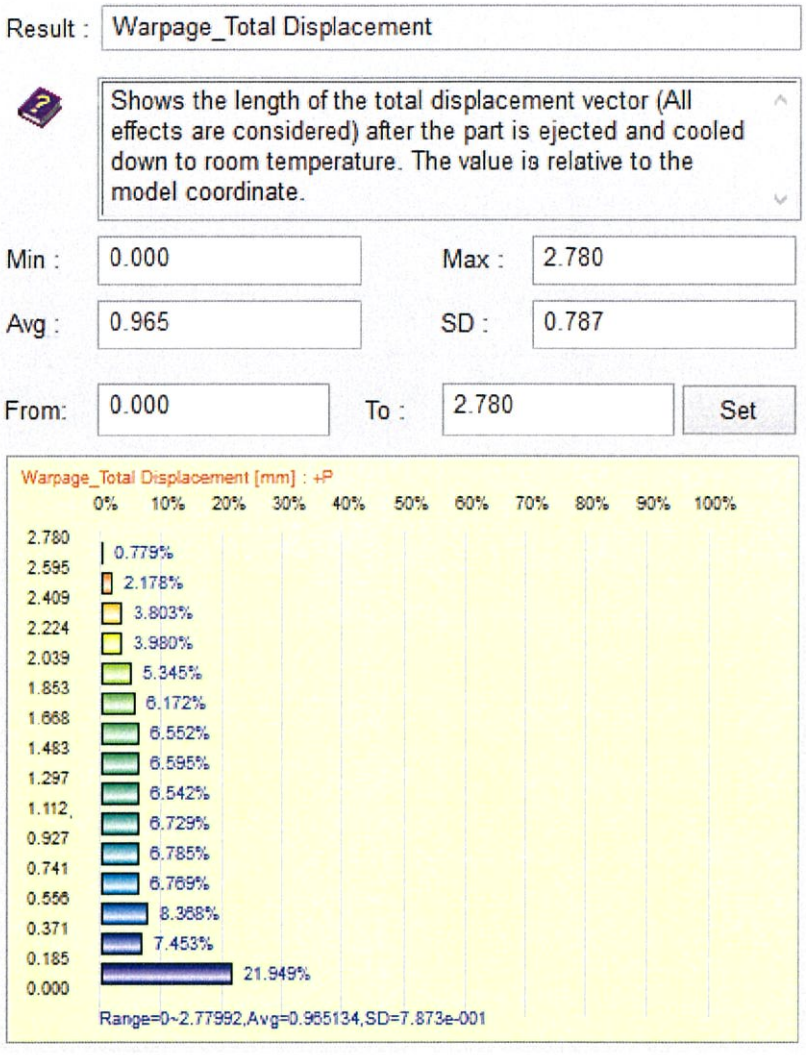
[15] จิตตสุภา ไกรจักร์ และกณิดา ต่อสกุล, การศึกษาวิธีการชำระล้างกระบอกฉีดพลาสติกของเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ทางร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D



รูปที่ ก 1 ข้อมูลแสดงผลการโก่งงอ (Warpage) ของแบบจำลองในโปรแกรม Moldex3D



รูปที่ ก 2 ข้อมูลการจำลองในโปรแกรม Moldex3D

ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab

ข้อมูลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแฟคทรอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab

Fractional Factorial Design

```
Factors:   7   Base Design:          7, 16   Resolution:   IV
Runs:     16   Replicates:               1   Fraction:    1/8
Blocks:    1   Center pts (total):       0

Design Generators: E = ABC, F = BCD, G = ACD

Alias Structure
I + ABCE + ABFG + ACDG + ADEF + BCDF + BDEG + CEFG
A + BCE + BFG + CDG + DEF + ABCDF + ABDEG + ACEFG
B + ACE + AFG + CDF + DEG + ABCDG + ABDEF + BCEFG
C + ABE + ADG + BDF + EFG + ABCFG + ACDEF + BCDEG
D + ACG + AEF + BCF + BEG + ABCDE + ABDFG + CDEFG
E + ABC + ADF + BDG + CFG + ABEFG + ACDEG + BCDEF
F + ABG + ADE + BCD + CEG + ABCEF + ACDFG + BDEFG
G + ABF + ACD + BDE + CEF + ABCEG + ADEFG + BCDFG
AB + CE + FG + ACDF + ADEG + BCDG + BDEF + ABCEFG
AC + BE + DG + ABDF + AEFG + BCFG + CDEF + ABCDEG
AD + CG + EF + ABCF + ABEG + BCDE + BDFG + ACDEFG
AE + BC + DF + ABDG + ACFG + BEFG + CDEG + ABCDEF
AF + BG + DE + ABCD + ACEG + BCEF + CDFG + ABDEFG
AG + BF + CD + ABDE + ACEF + BCEG + DEFG + ABCDFG
BD + CF + EG + ABCG + ABEF + ACDE + ADFG + BCDEFG
ABD + ACF + AEG + BCG + BEF + CDE + DFG + ABCDEFG
```

Factorial Regression: Warpage versus Injection Fl, Injection Pr, Switching Ov,

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Model	15	0.034230	0.002282	*
Linear	7	0.033538	0.004791	*
Injection Flow	1	0.000000	0.000000	*
Injection Pressure	1	0.000000	0.000000	*
Switching Over	1	0.000000	0.000000	*
Packing Pressure	1	0.000016	0.000016	*
Melt Temp	1	0.012432	0.012432	*
Mold Temp	1	0.000064	0.000064	*
Cooling Time	1	0.021025	0.021025	*
2-Way Interactions	7	0.000692	0.000099	*
Injection Flow*Injection Pressure	1	0.000002	0.000002	*
Injection Flow*Switching Over	1	0.000000	0.000000	*
Injection Flow*Packing Pressure	1	0.000004	0.000004	

ข้อมูลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab

Injection Flow*Melt Temp	1	0.000000	0.000000
*			
Injection Flow*Mold Temp	1	0.000009	0.000009
*			
Injection Flow*Cooling Time	1	0.000000	0.000000
*			
Injection Pressure*Packing Pressure	1	0.000676	0.000676
*			
3-Way Interactions	1	0.000000	0.000000
*			
Injection Flow*Injection Pressure*Packing Pressure	1	0.000000	0.000000
*			
Error	0	*	*
Total	15	0.034230	

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
*	100.00%	*	*

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value
Constant		1.011	*	*
Injection Flow	-0.000250	-0.000125	*	*
Injection Pressure	0.000250	0.000125	*	*
Switching Over	-0.000250	-0.000125	*	*
Packing Pressure	0.002000	0.001000	*	*
Melt Temp	0.05575	0.02788	*	*
Mold Temp	0.004000	0.002000	*	*
Cooling Time	-0.07250	-0.03625	*	*
Injection Flow*Injection Pressure	-0.000750	-0.000375	*	*
Injection Flow*Switching Over	0.000250	0.000125	*	*
Injection Flow*Packing Pressure	0.001000	0.000500	*	*
Injection Flow*Melt Temp	0.000250	0.000125	*	*
Injection Flow*Mold Temp	0.001500	0.000750	*	*
Injection Flow*Cooling Time	-0.000000	-0.000000	*	*
Injection Pressure*Packing Pressure	-0.013000	-0.006500	*	*
Injection Flow*Injection Pressure*Packing Pressure	0.000000	0.000000	*	*

Term	P-Value	VIF
Constant	*	
Injection Flow	*	1.00
Injection Pressure	*	1.00
Switching Over	*	1.00
Packing Pressure	*	1.00
Melt Temp	*	1.00
Mold Temp	*	1.00
Cooling Time	*	1.00
Injection Flow*Injection Pressure	*	1.00
Injection Flow*Switching Over	*	1.00
Injection Flow*Packing Pressure	*	1.00
Injection Flow*Melt Temp	*	1.00
Injection Flow*Mold Temp	*	1.00
Injection Flow*Cooling Time	*	1.00
Injection Pressure*Packing Pressure	*	1.00
Injection Flow*Injection Pressure*Packing Pressure	*	1.00

ข้อมูลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab

```
Alias Structure (up to order 3)
Factor  Name
A       Injection Flow
B       Injection Pressure
C       Switching Over
D       Packing Pressure
E       Melt Temp
F       Mold Temp
G       Cooling Time

Aliases
I
A + BCE + BFG + CDG + DEF
B + ACE + AFG + CDF + DEG
C + ABE + ADG + BDF + EFG
D + ACG + AEF + BCF + BEG
E + ABC + ADF + BDG + CFG
F + ABG + ADE + BCD + CEG
G + ABF + ACD + BDE + CEF
AB + CE + FG
AC + BE + DG
AD + CG + EF
AE + BC + DF
AF + BG + DE
AG + BF + CD
BD + CF + EG
ABD + ACF + AEG + BCG + BEF + CDE + DFG
```

ข้อมูลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology) ตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design) ด้วยโปรแกรม Minitab

Central Composite Design

Factors:	4	Replicates:	1
Base runs:	31	Total runs:	31
Base blocks:	1	Total blocks:	1

Two-level factorial: Full factorial

Cube points:	16
Center points in cube:	7
Axial points:	8
Center points in axial:	0

α: 0.05

Response Surface Regression: w versus cooling, melt, mold, pack

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	0.051088	0.003649	654.19	0.000
Linear	4	0.049985	0.012496	2240.22	0.000
cooling	1	0.031974	0.031974	5732.03	0.000
melt	1	0.017931	0.017931	3214.46	0.000
mold	1	0.000043	0.000043	7.65	0.014
pack	1	0.000038	0.000038	6.72	0.020
Square	4	0.000416	0.000104	18.65	0.000
cooling*cooling	1	0.000384	0.000384	68.92	0.000
melt*melt	1	0.000002	0.000002	0.44	0.518
mold*mold	1	0.000010	0.000010	1.74	0.205
pack*pack	1	0.000000	0.000000	0.04	0.853
2-Way Interaction	6	0.000687	0.000115	20.54	0.000
cooling*melt	1	0.000676	0.000676	121.19	0.000
cooling*mold	1	0.000000	0.000000	0.04	0.835
cooling*pack	1	0.000001	0.000001	0.18	0.678
melt*mold	1	0.000004	0.000004	0.72	0.410
melt*pack	1	0.000006	0.000006	1.12	0.306
mold*pack	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Error	16	0.000089	0.000006		
Lack-of-Fit	10	0.000089	0.000009	*	*
Pure Error	6	0.000000	0.000000		
Total	30	0.051178			

ข้อมูลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology) ตามการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central composite design) ด้วยโปรแกรม Minitab

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0023618	99.83%	99.67%	99.00%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1.00800	0.00089	1129.19	0.000	
cooling	0.073000	0.036500	0.000482	75.71	0.000	1.00
melt	0.054667	0.027333	0.000482	56.70	0.000	1.00
mold	0.002667	0.001333	0.000482	2.77	0.014	1.00
pack	0.002500	0.001250	0.000482	2.59	0.020	1.00
cooling*cooling	0.007333	0.003667	0.000442	8.30	0.000	1.03
melt*melt	0.000583	0.000292	0.000442	0.66	0.518	1.03
mold*mold	-0.001167	-0.000583	0.000442	-1.32	0.205	1.03
pack*pack	-0.000167	-0.000083	0.000442	-0.19	0.853	1.03
cooling*melt	-0.013000	-0.006500	0.000590	-11.01	0.000	1.00
cooling*mold	-0.000250	-0.000125	0.000590	-0.21	0.835	1.00
cooling*pack	0.000500	0.000250	0.000590	0.42	0.678	1.00
melt*mold	0.001000	0.000500	0.000590	0.85	0.410	1.00
melt*pack	0.001250	0.000625	0.000590	1.06	0.306	1.00
mold*pack	0.000000	0.000000	0.000590	0.00	1.000	1.00

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นางสาวชลธิชา สังข์น้อย

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 2 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2537

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 1037/3 ต. บางเสาธง อ. บางเสาธง
จ. สมุทรปราการ 10540

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นอนุบาล จากโรงเรียนสวนครุณ จังหวัดสมุทรปราการ
พ.ศ. 2549	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนเกวลินวิทยา จังหวัดสมุทรปราการ
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนเกวลินวิทยา จังหวัดสมุทรปราการ
พ.ศ. 2555	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จังหวัดสมุทรปราการ
พ.ศ. 2559	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร