



การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทาง
วิศวกรรม CAE กรณีศึกษาชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์

โดย

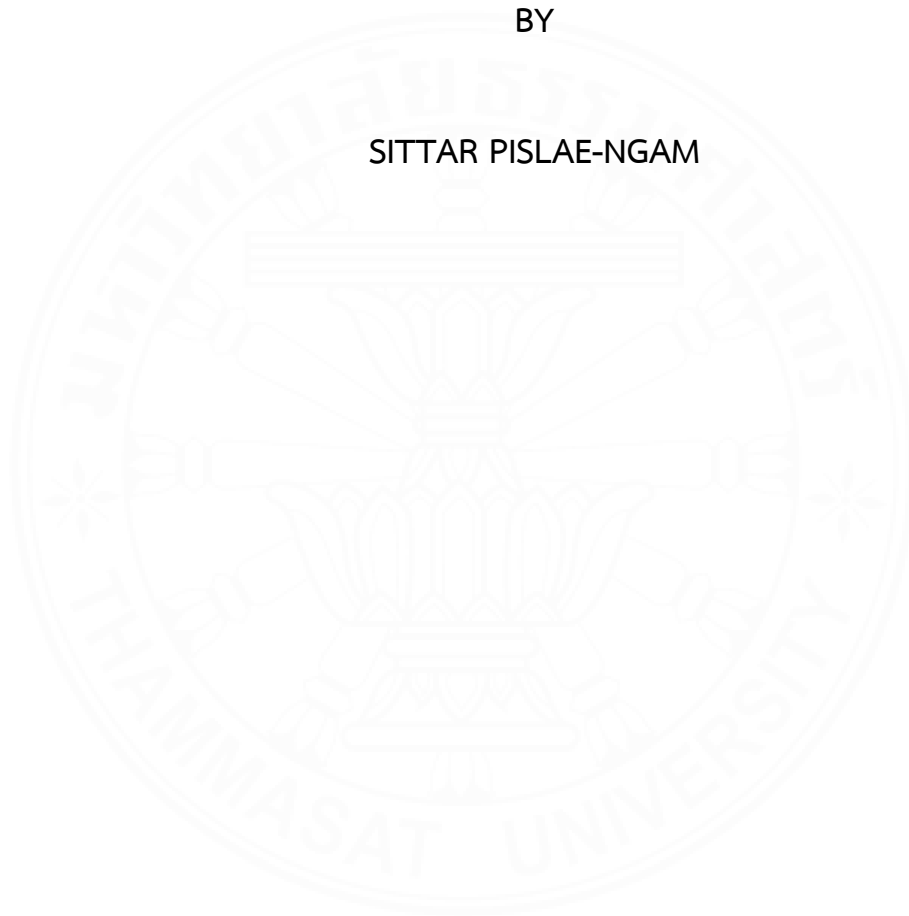
สิตตาร์ พิศแสงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2566

PREDICTION OF WARPAGE FOR INJECTION-MOLDED PLASTIC
PARTS USING COMPUTER-AIDED ENGINEERING A CASE STUDY OF
ECU COVER

BY

SITTAR PISLAE-NGAM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN
ENGINEERING MANAGEMENT
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2023

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

สิตตาร์ พิศแลงาม

เรื่อง

การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE กรณีศึกษา
ชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2567

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ กังสัมฤทธิ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

คณบดี

(ศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE กรณีศึกษาชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์
ชื่อผู้เขียน	สิตตาร์ พิศแลงาม
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุฑามระ
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกและปัจจัยที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวในชิ้นงาน โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) ในการวิเคราะห์และจำลอง พบว่าการบิดเบี้ยวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และการหดตัวของพลาสติก ABS ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐาน

การวิจัยเริ่มด้วยการศึกษาชิ้นงานจริงโดยใช้โปรแกรม Moldex3D จำลองพารามิเตอร์การผลิตเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นงานขณะอยู่ในแม่พิมพ์และหลังปลดออก พร้อมคำนวณเวลาหล่อเย็นที่เหมาะสม และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวด้วยการออกแบบการทดลองทางคูลิ พบว่าสามารถพยากรณ์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดการบิดเบี้ยวได้อย่างมีนัยสำคัญ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิศวกรรมในการจำลอง และวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการฉีดพลาสติกช่วยพยากรณ์และกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดการบิดเบี้ยวได้ โดยใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลว 190 องศาเซลเซียส และเวลาหล่อเย็น 42 วินาที ผลการทดสอบจริงลดการบิดเบี้ยวจาก 2.710 มิลลิเมตร เป็น 0.974 มิลลิเมตร แสดงถึงประสิทธิภาพของเทคโนโลยี CAE ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดของเสีย

คำสำคัญ: การฉีดขึ้นรูปพลาสติก, การบิดเบี้ยวของชิ้นงานพลาสติก, คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม, Moldex3D, การออกแบบการทดลอง, วิธีการทางคูลิ

Thesis Title	PREDICTION OF WARPAGE FOR INJECTION-MOLDED PLASTIC PARTS USING COMPUTER-AIDED ENGINEERING A CASE STUDY OF ECU COVER
Author	Sittar Pislai-ngam
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Engineering Management Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Apiwat Muttamara
Academic Years	2023

ABSTRACT

This research studies the injection molding process and the factors causing warpage in plastic parts, using Computer-Aided Engineering (CAE) for analysis and simulation. It was found that warpage is caused by temperature changes after demolding and the volumetric shrinkage of ABS plastic, an amorphous polymer.

The research began by studying real parts, using Moldex3D software to simulate production parameters, showing displacement both in-mold and post-demolding, and calculating optimal cooling time. It also analyzed the significant factors affecting warpage using Taguchi's experimental design. The findings indicated that it is possible to predict optimal parameters to significantly reduce warpage.

Using CAE to simulate and analyze various factors in the molding process helps predict and determine optimal parameters to reduce warpage. With a mold temperature of 40°C, melt temperature of 190°C, and cooling time of 42 seconds, the actual test results showed a reduction in warpage from 2.710 mm to 0.974 mm. This demonstrates the effectiveness of CAE technology in improving production processes and reducing waste.

Keywords: Plastic injection, Warpage, CAE, Moldex3D, DOE, Taguchi's method

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตะตามระ ทำให้งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณท่านคณะกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรารัตน์ กังสัณฤทธิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ที่ได้ร่วมให้ข้อคิด และให้คำแนะนำในการปรับปรุง แก้ไข ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และบริษัท Aresplus Co., Ltd. และ Moldex3D Thailand ที่อนุญาตให้ใช้โปรแกรมในงานวิจัย

สิตตาร์ พิศแลงาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(7)
สารบัญภาพ	(8)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ขอบเขตในการศึกษา	5
1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก	8
2.1.1 ประเภทของพลาสติก	8
2.1.2 เกรดของพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยและทดลอง	11
2.2 พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก	13
2.2.1 องค์ประกอบในการฉีดพลาสติก	13
2.3 การไหลของพลาสติกในงานฉีด	20

2.3.1 การหลอมเหลวและไหลในกระบอกฉีด	21
2.3.2 การไหลของพลาสติกขณะออกจากหัวฉีด	22
2.3.3 การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ฉีด	22
2.4 การหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก	24
2.4.1 การคำนวณหาเวลาในการหล่อเย็น	25
2.4.2 ลักษณะความสัมพันธ์ของดัน อุณหภูมิ และเวลา PVT ไดอะแกรม	26
2.5 การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน	29
2.6 ปัญหาในงานฉีดพลาสติก	29
2.6.1 ตัวอย่างปัญหาการบิดเบี้ยว (Warpage) ของชิ้นงาน	29
2.7 การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE ในงานฉีดพลาสติก	30
2.7.1 โปรแกรมจำลองและวิเคราะห์การไหลของพลาสติก Moldex3D	30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	38
3.1 ลักษณะการออกแบบของชิ้นงานตัวอย่าง	40
3.2 พารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง และการบิดเบี้ยวของชิ้นงานตัวอย่าง	42
3.2.1 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้งานจริง และใช้ในการทดลอง	42
3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตก่อนปรับปรุง	43
3.2.3 การหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงานจริง	45
3.3 การจำลองพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุงด้วย และหาค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานด้วย CAE	48
3.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว	49
3.4.1 สมมุติฐานที่ทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว	49
3.4.2 การบิดเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE	51
3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	52
3.5.1 การเลือกพารามิเตอร์ในการทดลอง	52
3.5.2 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดลอง	53
3.5.3 ตัวแปรกำหนดในโปรแกรม Moldex3D	56
3.6 การเตรียมแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ	57

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	60
4.1 พารามิเตอร์จำลองและพยากรณ์ด้วย CAE	60
4.2 การทดสอบด้วยกระบวนการจริง	71
4.3 อภิปรายผล	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เวลาหล่อเย็น	81
ภาคผนวก ข สมบัติของวัสดุ	82
ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่ปรับปรุงด้วย Moldex3D	83
ประวัติผู้เขียน	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงานวิจัย	6
2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโพลิเมอร์	11
2.2 สมบัติของ ABS Starex VH-0815	12
2.3 การแผ่ความร้อนของความร้อนของพลาสติก	26
2.4 ตัวอย่างฟังก์ชันการวิเคราะห์ผลของ Program Moldex3D	31
3.1 สมบัติเฉพาะของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตและทดลอง	43
3.2 พารามิเตอร์ฉีดสำหรับ ABS เกรด VH0815	43
3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวแกนของพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง	48
3.4 สมมติฐานของการบิดเบี้ยวในชิ้นงานตัวอย่าง	50
3.5 ผลกระทบที่ทำให้บิดเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE ก่อนปรับปรุง	51
3.6 เวลาหล่อเย็น (tk) จากการคำนวณ	53
3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	55
4.1 การจำลองพารามิเตอร์ด้วย CAE	60
4.2 วิเคราะห์ผลการหดตัวเชิงปริมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น	61
4.3 วิเคราะห์ผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น	62
4.4 วิเคราะห์การบิดเบี้ยวเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว, อุณหภูมิ แม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น	63
4.5 ผลกระทบที่ทำให้บิดเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE พยากรณ์ปรับปรุง	65
4.6 การเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวแกนของพารามิเตอร์พยากรณ์ปรับปรุง	69
4.7 ผลการทดลองฉีดจริงจากพารามิเตอร์พยากรณ์	72
4.8 ผลการทดลองของพารามิเตอร์จาก CAE และการทดสอบฉีดจริง	74
4.9 พารามิเตอร์ที่ทำการวิจัย	74

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างชิ้นงานดี	3
1.2 ตัวอย่างชิ้นงานบิดเบี้ยว	3
1.3 ตัวอย่างชิ้นงานดีและแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	3
1.4 ตัวอย่างชิ้นงานดี และประกอบฝาครอบชิ้นส่วน	4
1.5 ตัวอย่างงานบิดเบี้ยวและแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์	4
1.6 ตัวอย่างชิ้นบิดเบี้ยวและประกอบฝาครอบชิ้นส่วน	5
2.1 การเปลี่ยนรูปร่างของพลาสติกเมื่อผ่านความร้อนและปล่อยให้เย็นตัว	10
2.2 ภาพตัดแสดงชิ้นส่วนต่างๆของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	15
2.3 การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	15
2.4 ทางเข้าน้ำพลาสติกแบบต่างๆ (Gate type)	16
2.5 จำนวนควิตี้ และทางวิ่งของน้ำพลาสติก	16
2.6 เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน	17
2.7 เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวตั้ง	18
2.8 พารามิเตอร์สำหรับฉีดพลาสติกชนิด ABS เกรด VH0815	19
2.9 การไหลของพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์	20
2.10 การไหลและไหลของพลาสติกในกระบอกฉีดแบบมาตรฐาน	21
2.11 การไหลของพลาสติกออกจากหัวฉีด	22
2.12 ตำแหน่งการไหลแบบน้ำพุของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์	23
2.13 ความเร็วการไหลของพลาสติกตลอดพื้นที่หน้าตัด และด้านหน้าของการไหล	23
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ (PVT)	27
2.15 ตัวอย่างการบิดเบี้ยว (Warp) ของชิ้นงาน	30
3.1 โมเดลการทดลอง	39
3.2 ลักษณะทั่วไปของชิ้นงาน	40
3.3 แบบชิ้นงาน	40
3.4 วิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Moldex3D	41
3.5 ระบบหล่อเย็นและเกตของชิ้นงานทดสอบ	42
3.6 อุปกรณ์ตัดชิ้นงาน	45
3.7 การหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงานจริง	46

3.8 การเยื้องของรูยึคสกรูระหว่างแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากชิ้นงานบิตเบี้ยว	46
3.9 การปิดไม่สนิทและเกิดช่องว่าง (GAP) จากชิ้นงานบิตเบี้ยว	47
3.10 ค่าบิตเบี้ยวของชิ้นงานที่วัดได้ระหว่างผลิต	47
3.11 การหดตัวและบิตเบี้ยวของชิ้นงานทดสอบด้วย CAE	48
3.12 การบิตเบี้ยวโดยรวมแบบ 3 มิติทดสอบด้วย CAE	49
3.13 การบิตเบี้ยวที่เกิดจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และจากผลของการหดตัว เชิงปริมาตร	51
3.14 เวลาหล่อเย็นสำหรับชิ้นงานตัวอย่าง	54
3.15 ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D	56
3.16 แม่พิมพ์ที่ใช้ทดสอบ	58
3.17 เครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ (Sodick TR450EH2)	58
4.1 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean การหดตัวเชิงปริมาตร	62
4.2 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	63
4.3 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean การบิตเบี้ยว	64
4.4 การตอบสนองต่อการบิตเบี้ยววิเคราะห์ด้วย CAE	65
4.5 พยากรณ์ปรับปรุงการบิตเบี้ยวที่เกิดจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และจาก ผลของการหดตัวเชิงปริมาตร	66
4.6 โพรไฟล์การฉีด	66
4.7 อุณหภูมิพลาสติกไหลขณะฉีด และอุณหภูมิหล่อเย็นชิ้นงาน	67
4.8 ขนาดหดตัวแกน X	68
4.9 การหดตัวและบิตเบี้ยวของพารามิเตอร์พยากรณ์ CAE	68
4.10 การบิตเบี้ยวจากพารามิเตอร์ปรับปรุง CAE	69
4.11 โพรไฟล์ฉีดทดสอบเพิ่มแรงดันย้ำ	70
4.12 ชิ้นงานไม่เต็มแบบเมื่อลดแรงดันย้ำ	70
4.13 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องจักร	71
4.14 อุณหภูมิขณะทดสอบจริง	72
4.15 งานประกอบหลังจากทดสอบฉีดจริง	75

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำเต็ม/คำจำกัดความ

ABS

Acrylonitrile Butadiene Styrene

CAE

Computer Aided Engineering

CAD

Computer Aided Design

แพ็ค

ช่วงที่พลาสติกเหลวในกระบอกฉีดถูกขับเคลื่อนให้
เข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีพลาสติกเหลวอยู่เต็มแล้ว



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญและมีบทบาทสำคัญในสังคม ในปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นวัสดุที่ไม่หยุดเติบโตและก้าวสู่การใช้งานอย่างแพร่หลายในทุกส่วนของชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในอุตสาหกรรมการบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ จากข้อมูลการใช้งานเม็ดพลาสติกภายในประเทศ การนำเข้า และส่งออกชิ้นส่วนที่ผลิตจากพลาสติกซึ่งมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องแข่งขันผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของลูกค้า และสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

ชิ้นส่วนพลาสติกมีการใช้งานมีความหลากหลายตามประเภทอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกที่มีลักษณะทางด้านกายภาพและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ตัวอย่างของ การใช้งานชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น กลุ่มยางและพลาสติก กลุ่มยานยนต์ กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ และกลุ่มบรรจุภัณฑ์ การผลิตชิ้นส่วนพลาสติกมีหลายวิธี แต่วิธีที่พบบ่อยที่สุด คือ การใช้กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกโดยทั่วไป การฉีดพลาสติกประกอบด้วยขั้นตอนหลักต่อไปนี้ (1) ออกแบบแม่พิมพ์ (Mold Design) เพื่อให้ได้รูปทรงของชิ้นส่วนพลาสติกที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์ต้องออกแบบให้มีช่องว่างเพียงพอสำหรับวัตถุดิบพลาสติกเข้าไป และมีระบบการเติมเต็มพลาสติกเหลว และระบบการทำความร้อนเพื่อให้ได้รูปแบบที่ต้องการ (2) เตรียมวัตถุดิบ (Material Preparation) วัตถุดิบพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจะถูกเตรียมโดยการเติมลงในเครื่องฉีดพลาสติก วัตถุดิบจะถูกตรวจสอบคุณภาพและนำเข้าในรูปของเม็ดพลาสติก (3) กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding Process) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสำคัญที่มีการฉีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ วัตถุดิบพลาสติกที่ถูกเติมลงในเครื่องฉีดพลาสติกที่มีการทำความร้อน จะหลอมเหลวและไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยมีการใช้แรงดันในการฉีดพลาสติก ซึ่งต้องคำนึงถึงระยะเวลาฉีดพลาสติก ความดันที่ใช้ และอุณหภูมิที่เหมาะสม (4) การทดสอบและตรวจสอบ (Testing and Inspection) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นเพื่อตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบความเที่ยงตรงด้านขนาดน้ำหนัก และลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ร่วมกัน

นอกจากกระบวนการผลิตแล้วปัจจัยที่ผลต่อการใช้งานชิ้นส่วนต่าง ๆ คือ การเลือกชนิดพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและแอปพลิเคชัน มีหลายปัจจัยที่ควรพิจารณา (1) ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมพลาสติกที่ใช้ควรมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ทนทานต่อความร้อน ความชื้น แสงแดด และสารเคมี เพื่อให้กล่องควบคุมสามารถทำงานได้ดีในเงื่อนไขต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานจริง (2) ความแข็งแรง พลาสติกที่ใช้ควรมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับการใช้งานและป้องกันการเกิดความเสียหายจากแรงกระแทกหรือการใช้งานในระยะยาว (3) ความยืดหยุ่นในบางกรณีที่บางผลิตภัณฑ์ต้องมีการดัดแปลงรูปร่างหรือการเปลี่ยนแปลงขนาด พลาสติกที่มีความยืดหยุ่นสามารถเหมาะสมกับการใช้งานดังกล่าว (4) ความหนาแน่น ความหนาแน่นของพลาสติกจะส่งผลต่อน้ำหนักและความเรียบหรือสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ควรพิจารณาความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานและการติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง (5) ความต้านทานต่อการไฟฟ้าสถิต โดยเฉพาะกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้งานใกล้กับแหล่งพลังงานซึ่งมีไฟฟ้าสถิตเข้ามาเกี่ยวข้องอาจทำให้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์มีความเสียหายได้ และความต้องการต้านทานการลุกไหม้ของวัสดุก็เป็นมาตรฐานที่ผู้ผลิตต้องพิจารณาร่วมด้วย

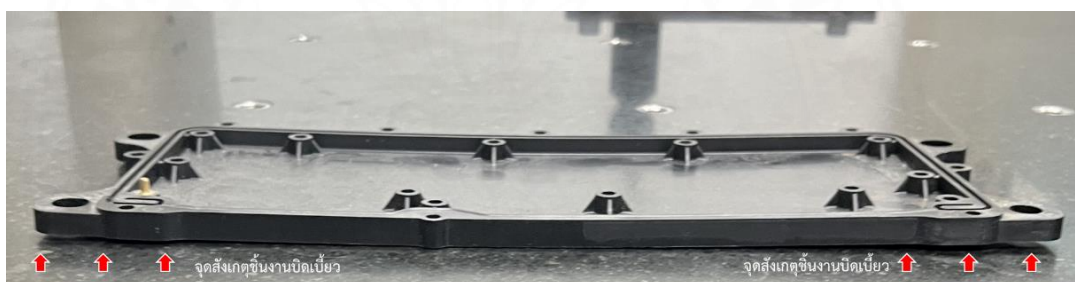
จากปัจจัยการผลิตที่เกี่ยวข้องเช่น เครื่องจักร (Machine) กระบวนการ (Method) วัสดุดิบ (Material) และบุคลากร (Man) ในการผลิตจริงการทำงานร่วมกันของปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพตามที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ และบางครั้งผลกระทบเชิงโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุก็ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา จึงเกิดปัญหาการบิดเบี้ยว เสียรูปร่าง และขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากสิ้นสุดกระบวนการไปแล้ว ซึ่งในปัจจุบันความก้าวหน้าของการตรวจสอบและเทคโนโลยีทางด้าน CAE (Computer-Aided Engineering) สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานและจำลองกระบวนการในการฉีดพลาสติก โดยวิศวกรหรือผู้ควบคุมการผลิตสามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ เช่น ปริมาณของรอยต่อ (Weld line) ช่องว่าง (Air traps) ตำแหน่งที่มีภาวะตึงเครียดเกิดขึ้น (Stress) และการบิดเบี้ยว (Deflection and warpage) ความแข็งแรง (Strength) ลักษณะการไหลตัวของพลาสติกเหลว (Molten flow) และการหดตัวของชิ้นงาน (shrinkage)

ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นจากการบิดตัวของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดพลาสติกที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่างของบริษัทที่ทำการศึกษาคือ ชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีปัญหาเกี่ยวกับการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนอื่น ซึ่งผู้ผลิตเกิดความไม่มั่นใจว่าการบิดเบี้ยวของชิ้นงานอาจจะส่งผลให้การทำงานมีความผิดพลาดและทำให้ชิ้นงานอื่น ๆ ได้รับความเสียหายได้



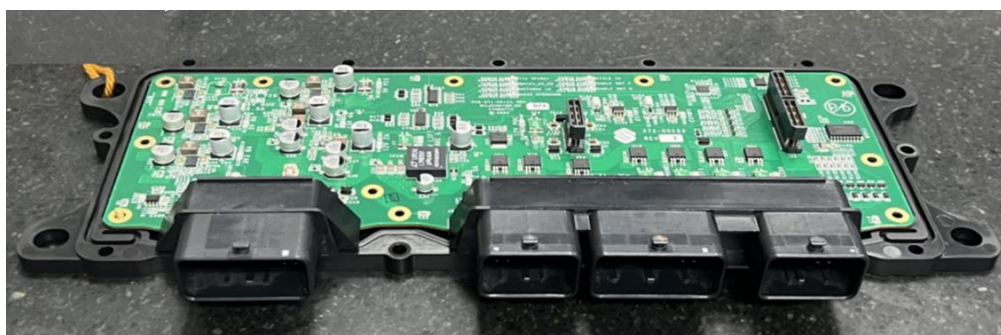
ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างชิ้นงานดี

จากภาพที่ 1.1 ชิ้นงานดีจะมีความเรียบตลอดทั้งแนวชิ้นงานโดยสามารถสังเกตได้จากการวางชิ้นงานบนแท่นระดับและมองไม่เห็นความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน



ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างชิ้นงานบิดเบี้ยว

จากภาพที่ 1.2 จะสังเกตได้จากตำแหน่งที่ลูกศรชี้มีการกระดกของชิ้นงานทั้งสองด้านเมื่อเทียบกับแท่นระดับ ลักษณะเช่นนี้คือชิ้นงานมีความบิดเบี้ยวให้เห็นอย่างชัดเจนและไม่สามารถใช้งานได้



ภาพที่ 1.3 ตัวอย่างชิ้นงานดีและแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 1.3 ชิ้นงานดีจะสามารถประกอบกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้พอดีโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์บังคับตำแหน่งใด ๆ เพราะระยะของรูที่ตัวชิ้นงาน และแผงวงจรมีความพอดีกัน และความเรียบตลอดทั้งชิ้นงานก็ทำให้จุดรองรับต่าง ๆ มีความพอดีตามที่ได้ออกแบบไว้

ทั้งนี้เมื่อนำชิ้นส่วนฝาครอบมาประกอบดังภาพที่ 1.4 จะเห็นว่าสามารถประกอบได้พอดี มีความเรียบตลอดทั้งแนว



ภาพที่ 1.4 ตัวอย่างชิ้นงานดี และประกอบฝาครอบชิ้นส่วน

จากภาพที่ 1.4 ชิ้นงานดีประกอบกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และทดสอบปิดฝาครอบ ชิ้นส่วนทั้งหมดจะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นส่วนมีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งแนวของชิ้นงาน และไม่มีลักษณะของการดิ่งรั้งหรือบิดเบี้ยวของชิ้นส่วน



ภาพที่ 1.5 ตัวอย่างงานบิดเบี้ยวและแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 1.5 แสดงการประกอบของชิ้นงานที่บิดเบี้ยวกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะสังเกตได้ว่ามีจุดที่ไม่แนบสนิทกับจุดรองรับชิ้นงานตรงกลางและที่ด้านปลายด้านขวา ส่วนตำแหน่งด้านขวาบนตำแหน่งรูของชิ้นงานและแผงวงจรไม่ตรงกันทำให้ไม่สามารถยึดสกรูได้



ภาพที่ 1.6 ตัวอย่างชิ้นบิดเบี้ยวและประกอบฝาครอบชิ้นส่วน

จากภาพที่ 1.6 ชิ้นงานบิดเบี้ยวเมื่อประกอบกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และปิดฝาครอบ ชิ้นส่วนทั้งหมดจะสังเกตเห็นได้ว่าชิ้นส่วนมีความบิดเบี้ยวกระดกขึ้นที่ส่วนปลายทั้งสองด้าน และตำแหน่งตรงกลางไม่สามารถประกอบให้สนิทกันได้ หากฝืนยึดสกรูจะเกิดการดึงรั้งซึ่งสร้างความเสียหายต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.2 ขอบเขตในการศึกษา

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาแบบเจาะลึกไปที่กระบวนการการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบิดเบี้ยว และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดการบิดเบี้ยวในกระบวนการจริง ซึ่งมีขอบเขตที่จะทำการศึกษาดังนี้

- 1.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกในบริษัทของกรณีศึกษา
- 1.2.2 ผลลัพธ์ที่นำมาศึกษาคือชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์
- 1.2.3 เครื่องฉีดที่ใช้ในการทดลองและศึกษาเป็นองศาแบบแบบแนวนอนใช้กำลังจากไฮดรอลิกส์ในการฉีดขึ้นรูป ขนาด 450 ตัน
- 1.2.4 ชนิดของเม็ดพลาสติกที่ใช้ ABS เกรด VH-0815

1.2.5 ใช้โปรแกรมใน Moldex3D ในการจำลองและวิเคราะห์ผล

1.2.7 ไม่มีการแก้ไขแม่พิมพ์เพิ่มเติม

1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1.3.1 ศักยภาพปัญหาของชิ้นงานตัวอย่าง

1.3.2 ศึกษาแบบชิ้นงานและการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อการผลิต

1.3.3 ศึกษาทฤษฎีกระบวนการฉีดพลาสติก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.4 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Moldex3D

1.3.5 สร้างแบบจำลองในการฉีดขึ้นงานพลาสติก และวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

1.3.6 นำค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการจำลองไปทดสอบจริง

1.3.7 วิเคราะห์ผลและหาความสัมพันธ์ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม และการผลิตจริง

1.3.8 สรุปข้อเสนอแนะของการทดลอง

1.3.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	การดำเนินงาน	มิถุนายน 2566 – มีนาคม 2567									
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1	ศึกษาสภาพปัญหาของชิ้นงานตัวอย่าง										
2	ศึกษาแบบขึ้นงานและการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อการผลิต										
3	ศึกษาทฤษฎีกระบวนการฉีดพลาสติกและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
4	ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Moldex3D										
5	สร้างแบบจำลองในการฉีดขึ้นงานพลาสติก และวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ										
6	นำค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการจำลองไปทดสอบจริง										

ลำดับ	การดำเนินงาน	มิถุนายน 2566 – มีนาคม 2567									
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
7	วิเคราะห์ผลและหาความสัมพันธ์ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม และการผลิตจริง										
8	สรุปข้อเสนอแนะของการทดลอง										
9	จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์										

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE

1.4.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม และการนำไปใช้งานในการผลิตจริง

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE ศึกษาภายใต้แนวคิดและทฤษฎีดังต่อไปนี้

- 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก
- 2.2 พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก
- 2.3 การไหลของพลาสติกในงานฉีด
- 2.4 การหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก
- 2.5 การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน
- 2.6 ปัญหาในงานฉีดพลาสติก
- 2.7 การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE ในงานฉีดพลาสติก
- 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก

พลาสติกคือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยการใช้ความร้อน และยังคงมีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนรูปร่าง พลาสติกเป็นวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเคมีที่เรียกว่าพอลิเมอไรเซชัน การสร้างพลาสติกเกิดจากการเชื่อมต่อหรือสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์ของสารเคมีชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อถูกทำให้เป็นรูปเพื่อใช้งาน และมีลักษณะเป็นสารพอลิเมอร์มีทั้งรูปแบบแข็งและเหลว

พลาสติกมีลักษณะที่หลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับสารเคมีหรือพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิต การเปลี่ยนรูปร่างของพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเป่า (Blow molding) การฉีด (Injection molding) หรือการอัด (Extrusion) เป็นต้น การสร้างวัสดุพลาสติกสามารถประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตได้มากกว่าวัสดุอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เช่น การนำขวดพลาสติกมาทำเป็นเส้นใยพลาสติก (plastic fiber) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรือการผลิตเสื้อผ้า

2.1.1 ประเภทของพลาสติก

การแบ่งประเภทของพลาสติกสามารถแบ่งได้หลากหลายประเภท และหลายกลุ่ม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการแบ่งประเภทเป็นสองแบบคือ การแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ และการแบ่งตามโครงสร้างของผลึก

2.1.1.1 แบ่งประเภทตามลักษณะทางกายภาพ

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers): มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและยืดหยุ่นได้ดี ซึ่งมักถูกนำมาใช้ในการผลิตยางซิลิโคน (Silicone Rubber) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber)

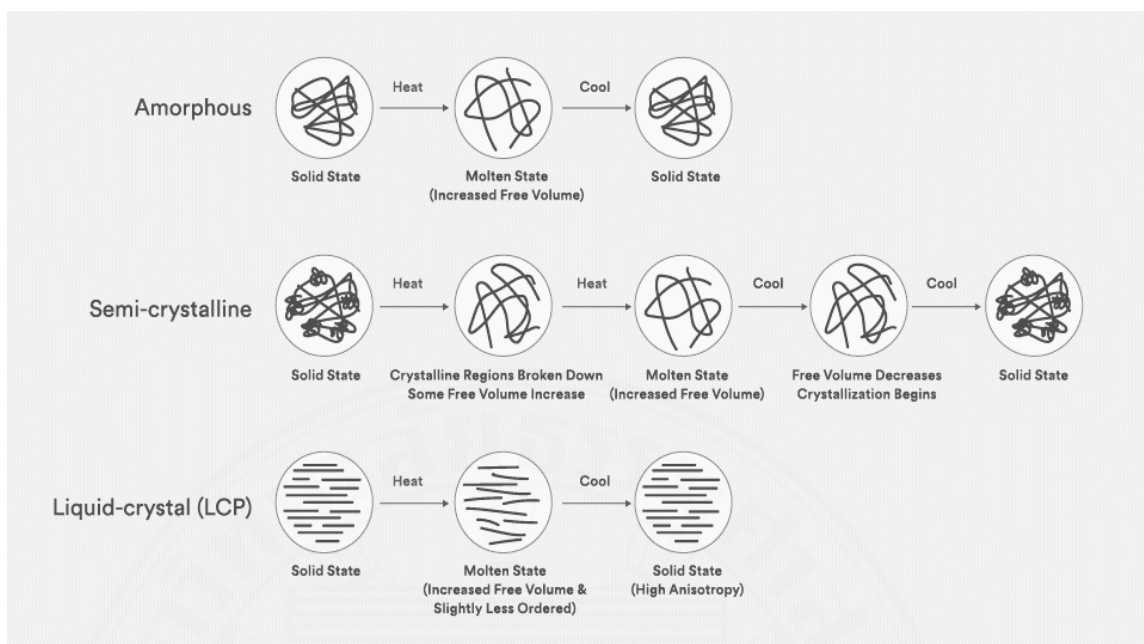
เทอร์โมเซตติง (Thermosetting Plastics): มีคุณสมบัติที่หลักการคือเมื่อใช้ความร้อนและแรงดัน มันจะผ่านขั้นตอนการทำให้อ่อนตัวก่อนซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ จากนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มต้นการ "บ่ม" ของโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นเวลาที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางและไม่สามารถแยกออกจากกันได้ การใช้ความร้อนซ้ำจะทำให้โพลิเมอร์เสื่อมสภาพเท่านั้น ตัวอย่างของพลาสติกชนิดนี้เช่น โฟม (Foam) เมลามีน (Melamine) เป็นต้น

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่เมื่อถูกแปรรูป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่โดยพื้นฐานแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ดังนั้นเมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัวลงจนสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ต้องการได้ การทำให้วัสดุเย็นลงจะทำให้วัสดุกลับคืนสู่สภาพเดิมที่เป็นของแข็ง กระบวนการนี้สามารถทำซ้ำได้หลายครั้งหรือจนกว่าผลกระทบของวงจรความร้อนจะลดโพลิเมอร์จนไม่มีประโยชน์ต่อการใช้งาน ตัวอย่างเช่นอะคริลิก (Acrylic), โพลีโพรพิลีน (Polypropylene), โพลีเอทิลีน (Polyethylene), เอบีเอส (Acrylonitrile Butadiene Styrene) เป็นต้น

2.1.1.2 แบ่งประเภทของพลาสติกตามโครงสร้างของผลึก

อสัณฐาน (Amorphous) : โพลิเมอร์อสัณฐานมีโมเลกุลแบบสุ่มและพันกันยุ่งเหยิงในสถานะหลอมเหลวเช่นเดียวกับในสถานะของแข็ง พวกเขาไม่มีโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน ตัวอย่างของโพลิเมอร์อสัณฐานรวมถึง อคริลิก (PMMA) โพลีสไตรีน (PS) เอบีเอส (ABS) โพลีคาร์บอเนต (PC) กึ่งผลึก (Semi-crystalline): โพลิเมอร์กึ่งผลึกมีการรวมกันของบริเวณอสัณฐานและผลึก ในขั้นตอนการหลอมเหลว โซโพลิเมอร์จะถูกจัดเรียงแบบสุ่มอย่างไรก็ตามในระหว่างการทำ ความเย็นโซโพลิเมอร์บางส่วนเรียงตัวกันอย่างเป็นรูปแบบที่ ในขณะที่โซที่เหลือยังคงอยู่ในสถานะอสัณฐาน ตัวอย่างของโพลิเมอร์กึ่งผลึก ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE) และโพลิโพรพิลีน (PP) ไนลอน (PA)

โพลิเมอร์ผลึกเหลว (Liquid Crystal Polymers): โพลิเมอร์ผลึกเหลว (LCPs) มีโครงสร้างที่ค่อนข้างคงที่ทั้งในสถานะหลอมเหลวและสถานะของแข็ง โมเลกุลมีรูปร่างคล้ายแท่งและเรียงตัวขนานกัน ด้วยโครงสร้างนี้ทำให้ LCPs มีสมบัติทางกลและทางแสงที่ไม่เหมือนใคร โดยทั่วไปจะใช้โพลิเมอร์ผลึกเหลวในการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง และความเสถียรของรูปร่าง รูปทรงที่อยู่ในระดับสูง ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนรูปร่างของผลึกพลาสติกเมื่อผ่านความร้อนและปล่อยให้เย็นตัว
ที่มา: <https://www.protolabs.com/resources/guides-and-trend-reports/scientific-molding-helps-ensure-repeatable-part-function/> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

จากภาพที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ว่าโพลิเมอร์แบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน ส่วนโพลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) จะมีการเปลี่ยนรูปร่างของผลึกหลายตัวหลวม ๆ เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน และเกิดการเรียงตัวใหม่เมื่อทำให้เย็นตัว ส่วนโพลิเมอร์ผลึกเหลว (Liquid Crystal Polymers) จะเกิดการคลายตัวเล็กน้อยเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนและจะรวมผลึกเหมือนเดิมเมื่อทำให้เย็นลง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโพลิเมอร์

โพลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน (Amorphous Polymers)	โพลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline Polymers)
คุณสมบัติ การหดตัวและการบิดงอเล็กน้อย อ่อนตัวลงอย่างช้าๆ ความแข็งแรงต่ำ มีความโปร่งใส ทนต่อสารเคมีได้ไม่ดี แรงเสียดทานสูง การสึกหรอและต้านทานความล้าได้น้อย ความต้านทานความร้อนต่ำ มีความหนืดของการหลอมสูง ขึ้นรูปได้ง่ายและขอบเขตของตัวแปรทาง กระบวนการกว้าง	คุณสมบัติ การหดตัวและการบิดงอสูง จุดหลอมเหลวที่แตกต่างชัดเจน ความแข็งแรงสูง ทึบแสงหรือโปร่งแสง ทนต่อสารเคมีได้ดีเยี่ยม ลดแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอและความล้าสูง ทนความร้อนได้สูง ความหนืดเมื่อหลอมเหลวต่ำ ขึ้นรูปได้ยากและขอบเขตของตัวแปรทาง กระบวนการแคบ
ตัวอย่างชนิดของพลาสติก อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) โพลีคาร์บอเนต (PC) โพลีสไตรีน (PS) โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) สไตรีน อะครีโลไนไตรล์ (SAN) พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตไกลคอล (PETG) โพลีซัลโฟน (PSU) เทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU) อะคริลิก (PMMA)	ตัวอย่างชนิดของพลาสติก ไนลอน (PA) อะซีทัล (POM) โพลีเอทิลีน (PE) โพรพิลีน (PP) โพลีเอสเตอร์ (PBT) เอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) โพลีอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (PEEK) โพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (PPS)

2.1.2 เกรดของพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยและทดลอง

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าพลาสติกชนิด เอบีเอส (ABS) เป็นวัสดุกลุ่มโพลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน ที่ประกอบด้วย อครีโลไนไตรด์ (Acrylonitrile) ซึ่งมีคุณสมบัติการทนต่อความร้อนและสารเคมี บิวทาไดน (Butadiene) มีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง และสไตรีน (Styrene) มีความโดดเด่นเรื่องความเงาและราคาต่ำ ทำให้การผสมผสานที่ลงตัวระหว่างคุณสมบัติทางกลกายภาพ และต้นทุน

ABS Starex VH-8015 เป็นแบรนด์ผลิตภัณฑ์สไตรีนของ LOTTE Chemical มีความแข็งแรงในการรับแรงกระแทกได้ดี และความสามารถในการแปรรูปที่หลากหลายโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น วัตถุประสงค์การใช้งานทั่วไป การอัดขึ้นรูป สารท่วงไฟ การทนความร้อน และการชุบ/การพ่นสี โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและทนความร้อน เป็นสูตรพิเศษที่สามารถดับไฟได้เอง ทำให้ปลอดภัยยิ่งขึ้นสำหรับการใช้งานในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ ABS Starex VH-0815 ที่มา: <https://www.lottechem.com> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

รายการ (Item)	วิธีทดสอบ (Method)	หน่วยวัด (Unit)	เงื่อนไข (Condition)	ผลการ ทดสอบ (Value)
สมบัติทางกายภาพ (Physical)				
Specific Gravity	ASTM D792	g/cm ³	Natural or color	1.15
Melt Flow Index	ASTM D1238	g/10min	200degree C, 5kg	3.8
Mold Shrinkage (MD)	ASTM D955	%	Flow at 3.2mm (MD)	0.34~0.41
Mold Shrinkage (TD)	ASTM D955	%	X-Flow at 3.2mm (TD)	0.36~0.44
สมบัติทางกล (Mechanical)				
Tensile Strength at Yield	ASTM D638	kgf/cm ²	5mm/min	400
Tensile Strain at break	ASTM D638	%	5mm/min	17
Tensile Modulus	ASTM D638	kgf/cm ²	5mm/min	20400
Tensile Strength at break	ASTM D638	kgf/cm ²	5mm/min	280
Flexural Strength	ASTM D790	kgf/cm ²	2.8mm/min	600
Flexural Modulus	ASTM D790	kgf/cm ²	2.8mm/min	22000
Izod Impact Strength (notched)	ASTM D256	kgf-cm/cm	1/4 inch at 23°C	25
Izod Impact Strength (notched)	ASTM D256	kgf-cm/cm	1/8 inch at 23°C	
Rockell Hardness	ASTM D785	-	R-Scale	100

รายการ (Item)	วิธีทดสอบ (Method)	หน่วยวัด (Unit)	เงื่อนไข (Condition)	ผลการ ทดสอบ (Value)
สมบัติทางความร้อน (Thermal)				
Heat Deflection Temperature	ASTM D648	°C	18.56kgf/cm ² , 6.4mm	77
VICAT Softening Temperature	ISO R 306	°C	B/50	86
สมบัติการลามไฟ (Flammability)				
Flammability	UL94	mm	V-1	1.5
Flammability	UL94	mm	V-0	2
Flammability	UL94	mm	5VB	2

2.2 พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการฉีดพลาสติก

กระบวนการฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold) เพื่อสร้างชิ้นงานพลาสติกที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในวิธีการผลิตพลาสติกที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต ด้วยความสามารถในการผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีความซับซ้อนและรายละเอียดสูง ผู้ที่จะเป็นช่างฉีดพลาสติกระดับอาชีพได้นั้นถูกต้องหมั่นฝึกฝนอยู่ตลอดเวลาทั้งทางด้าน การปฏิบัติ การควบคุม และใช้เครื่องฉีด และแนวคิดความรู้พื้นฐานต่าง ๆ การสร้างสรรค์ทางความคิด โดยเฉพาะแนวคิด หรือความคิดจะเป็นสิ่งที่บอกได้ว่าบุคคลนั้นจะก้าวไปสู่ช่างฉีดมืออาชีพได้หรือไม่ ช่างฉีดมืออาชีพไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องได้เป็นอย่างดี หรือใช้ได้อย่างคล่องแคล่วแต่ต้องรู้จักวิเคราะห์และแก้ปัญหาได้อย่างยั่งยืนตลอดจนสามารถอธิบายถึงสาเหตุของปัญหาได้เป็นอย่างดี โดยปัจจุบันนี้สามารถศึกษาเก็บข้อมูลได้ทั้งจากการทดสอบหน้างานจริง และการศึกษาทดสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรม (CAE)

2.2.1 องค์ประกอบในการฉีดพลาสติก

กระบวนการฉีดพลาสติกประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วนที่ทำงานร่วมกัน เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติกได้ องค์ประกอบหลักประกอบด้วย

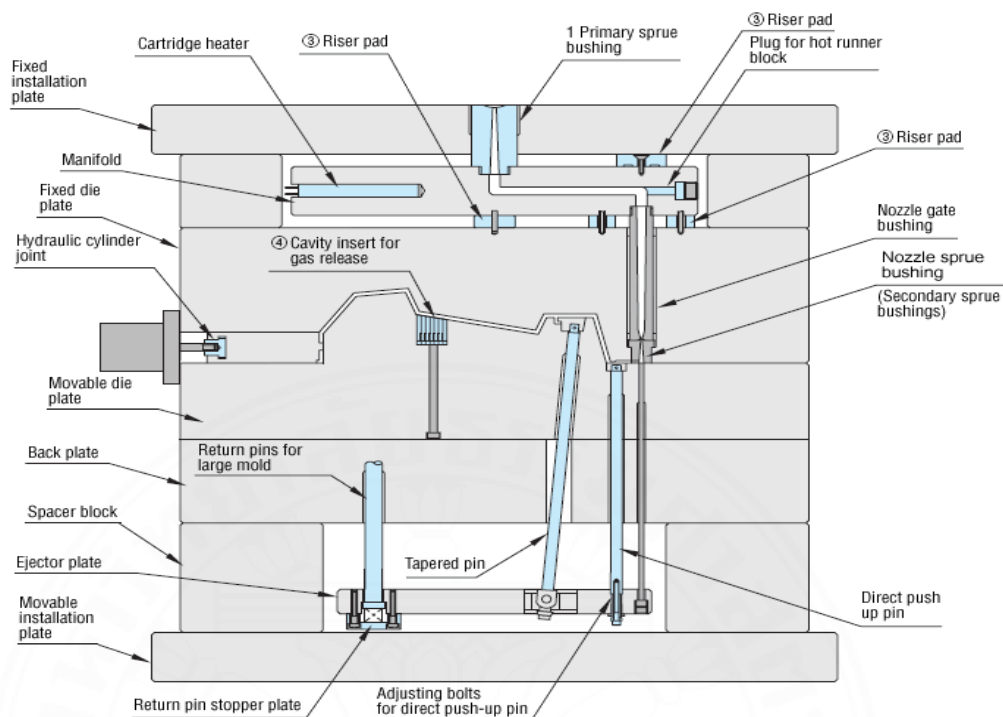
2.2.1.1 วัตถุดิบพลาสติก (Material)

การเลือกวัสดุเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบและอาจเป็นสาเหตุของความล้มเหลวโดยตรง องค์ประกอบสำคัญในโปรแกรมชิ้นงานพลาสติกที่ประสบความสำเร็จคือการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน กระบวนการในการเลือกวัสดุซับซ้อนเนื่องจากความจริงที่มีพอลิเมอร์หลายพันชนิด ผสมรวมกลับกลายเป็นสารอัลลอยและสารผสมที่มีอยู่ในปริมาณมากทั้งยังหลากหลายผู้ผลิต กระบวนการในการเลือกสามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยการเข้าใจ ความต้องการในการทำงานของชิ้นงาน วิธีการจัดประเภทวัสดุ วิธีการทดสอบ

การเลือกพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพต้องประมวลผลจากมุมมองของพลาสติก ซึ่งหมายถึง การพิจารณาเกี่ยวกับพลาสติกในเชิงกว้างขึ้น เพื่อเข้าใจว่าการปรับปรุงหรือปรับแต่งกระบวนการต่าง ๆ จะมีผลให้พลาสติกมีคุณสมบัติที่ต้องการหรือไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเพื่อให้ได้ผลผลิตพลาสติกที่มีคุณภาพและความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

2.2.1.2 แม่พิมพ์ฉีด (Mold)

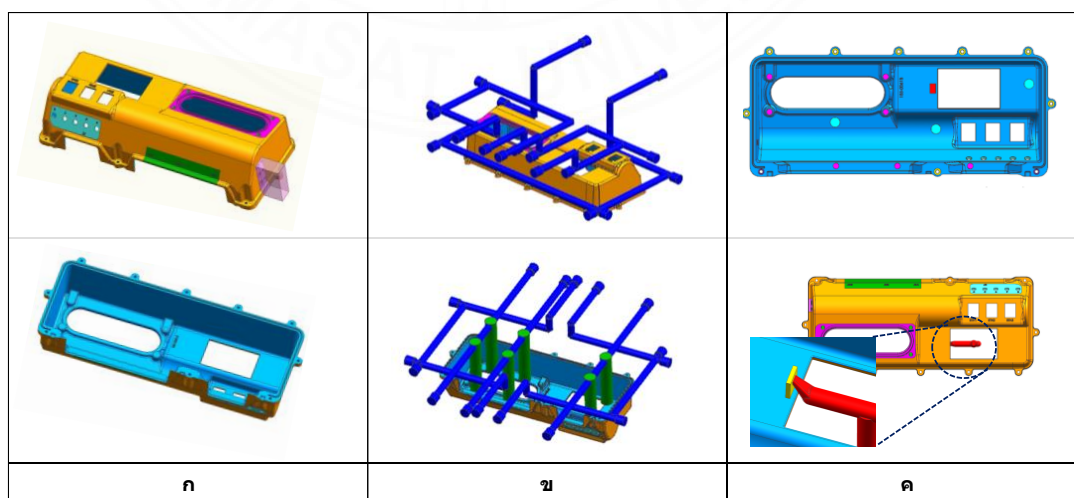
การออกแบบที่ดีและเหมาะสมเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยลดปัญหาของงานระหว่างผลิต เช่น การกำหนดชนิดของแม่พิมพ์ว่าเป็นแบบ 2 แผ่น (2plate mold) หรือ 3 แผ่น (3plate mold) จำนวนของคาวิตีที่ (Cavity) ที่เหมาะสมกับกำลังการผลิต ระบบการหล่อเย็นภายในและภายนอกแม่พิมพ์ ระบบการคลายปลดชิ้นงาน ตำแหน่งรอยประกบแม่พิมพ์ ขนาดของทางน้ำพลาสติก (Runner) การกำหนดรูปแบบทางน้ำพลาสติกเข้าชิ้นงาน (Gate) การระบายอากาศออกจากแม่พิมพ์ การเลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์



ภาพที่ 2.2 ภาพตัดแสดงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

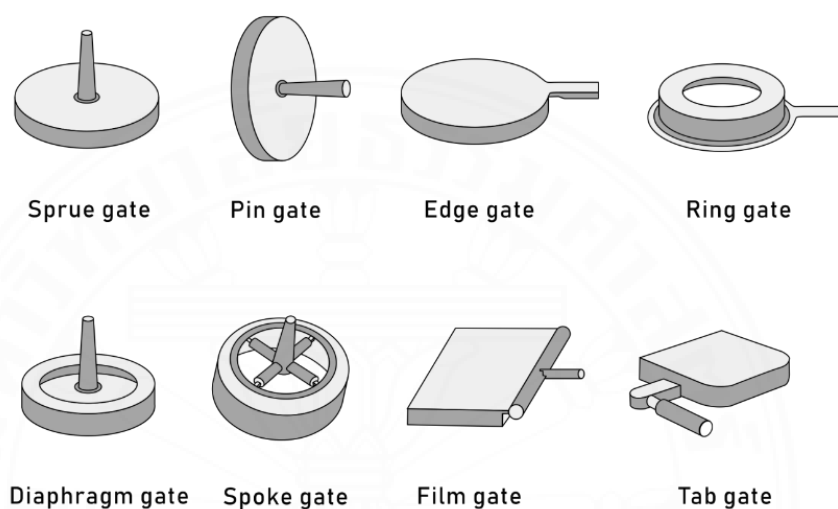
ที่มา: <https://th.misumi-ec.com/th/> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

จากภาพที่ตัดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่แสดงในภาพที่ 2.2 จะอธิบายชื่อเรียกชิ้นส่วนในแม่พิมพ์ที่ใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก



ภาพที่ 2.3 การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

จากภาพที่ 2.3 แสดงแนวความคิดในการออกแบบแม่พิมพ์โดย ก) แสดงให้เห็นการกำหนดตำแหน่งรอยประกบของแม่พิมพ์ (Parting line) ข) ลักษณะของเส้นทางหล่อเย็นแม่พิมพ์ (Cooling channel) และ ค) ตำแหน่งแท่งกดชิ้นงาน (Ejector pin) ส่วนด้านล่างคือทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate)

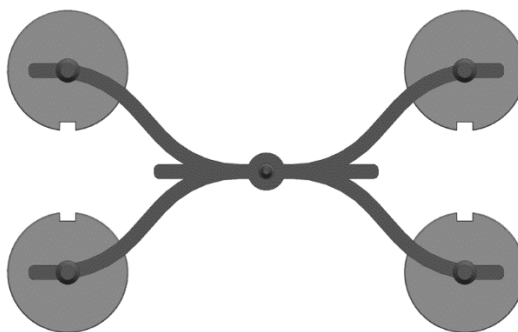


ภาพที่ 2.4 ทางเข้าน้ำพลาสติกแบบต่าง ๆ (Gate type)

ที่มา: <https://www.madearia.com/blog/types-of-injection-molding-gates/>

(สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

การเรียกชื่อทางเข้าน้ำพลาสติกแบบต่าง ๆ เรียกตามหลักสากลดังภาพที่ 2.4 ซึ่งการไหลของพลาสติกเหลวจะแตกต่างกันตามชนิดของทางเข้าน้ำพลาสติก ทั้งนี้การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับการออกแบบแม่พิมพ์



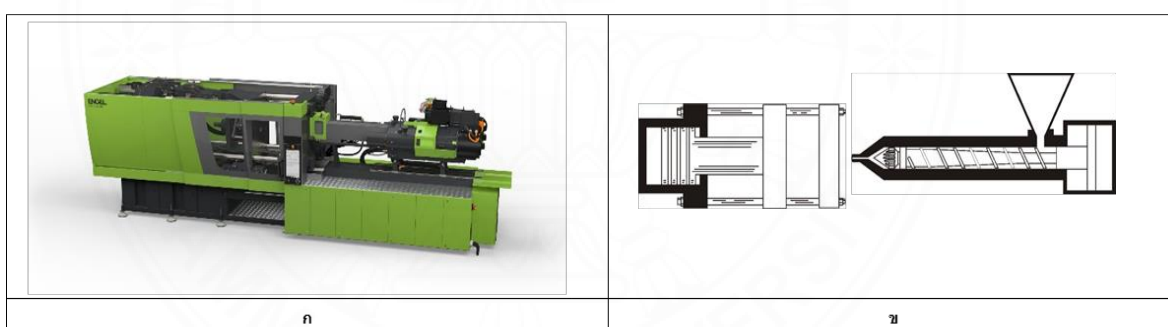
ภาพที่ 2.5 จำนวนควาตี และทางวิ่งของน้ำพลาสติก

จากภาพที่ 2.5 เป็นชิ้นงานที่มีจำนวน4ควิตี การกำหนดทางวิ่งน้ำพลาสติกที่เหมาะสมและเท่ากันจะทำให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์พร้อมกัน ทั้งนี้ต้องพิจารณาให้ทางวิ่งพลาสติกสั้นที่สุด และมีความราบรื่นในการไหลเข้าสู่ชิ้นงาน

2.2.1.3 เครื่องฉีดพลาสติก (Machine)

การเลือกขนาดและชนิดของเครื่องฉีดพลาสติกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลกับคุณภาพของชิ้นงาน โดยปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาคือ ขนาดของแรงปิดแม่พิมพ์ ปริมาตรของพลาสติกเหลวที่ต้องการเติมเต็มเข้าสู่แม่พิมพ์ ความเร็วของเครื่องเพื่อให้เพียงพอต่อปริมาณการผลิต กำลังฉีดที่ใช้ในการดันให้น้ำพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และคงขนาดไว้จนกว่าชิ้นงานจะเซตตัว ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดพลาสติก และการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเป็นตัวช่วยที่สามารถทำให้การผลิตมีความสม่ำเสมอทั้งทางด้านคุณภาพ และจำนวน

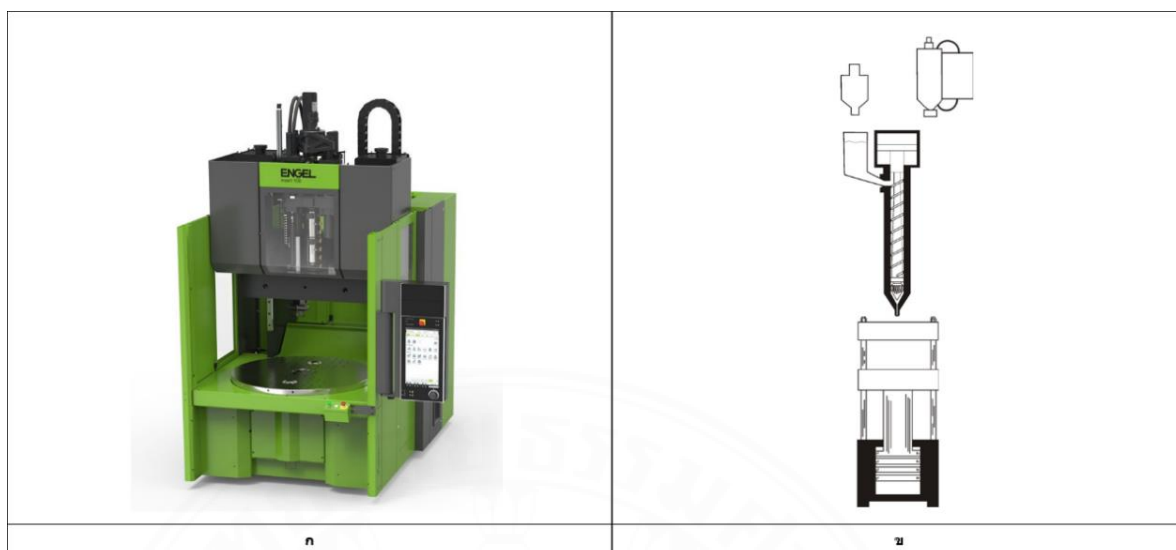
โดยทั่วไปเครื่องฉีดพลาสติกสามารถแบ่งได้สองประเภทตามลักษณะการวางโครงสร้างของเครื่องจักร คือ เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน (Horizontal molding machine) และเครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวตั้ง (Vertical molding machine)



ภาพที่ 2.6 เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน

ที่มา : <https://www.engelglobal.com/> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

เครื่องฉีดแบบแนวนอนลักษณะโครงสร้างของชุดฉีดจะขนานไปในแนวนอนดังภาพที่ 2.6 โดยจากภาพ ก) คือ ตัวอย่างเครื่องฉีดพลาสติกที่พบเห็นได้ทั่วไป ส่วนภาพ ข) คือ ลักษณะการออกแบบของชุดฉีด และชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ ที่แสดงให้เห็นโครงสร้างไปทางแนวนอน



ภาพที่ 2.7 เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวตั้ง

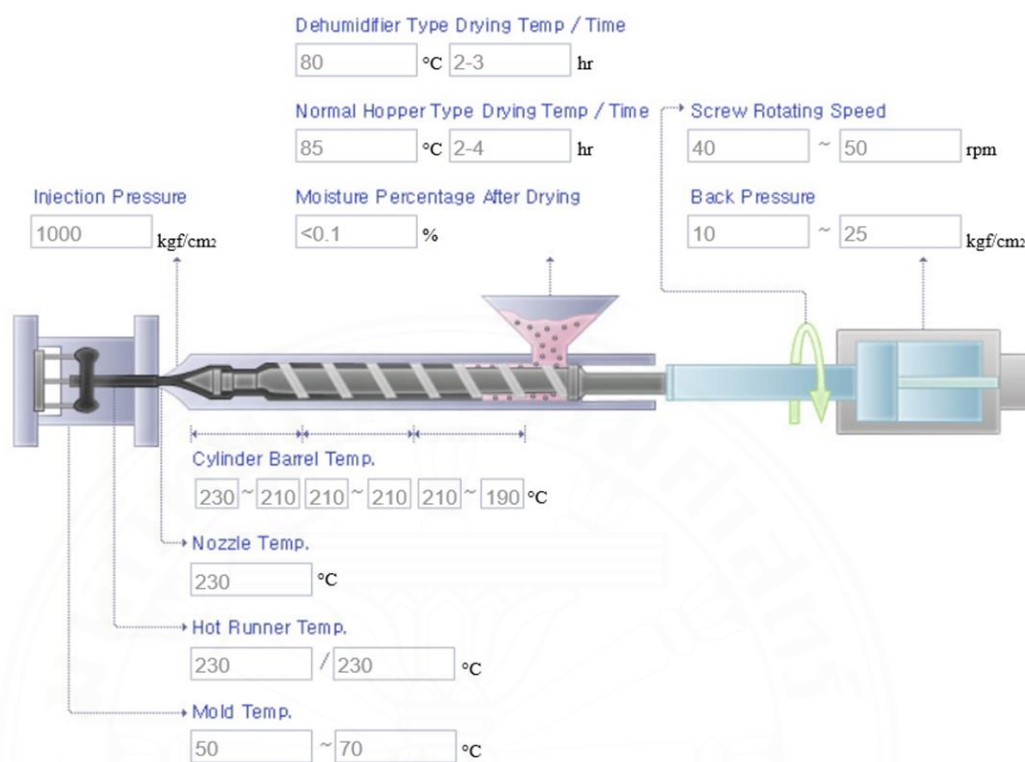
ที่มา : <https://www.engelglobal.com/> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

ส่วนของชุดฉีดพลาสติกแบบแนวตั้งจะมีทิศทางการไหลของพลาสติกในแนวตั้งดังภาพที่ 2.7 ตัวอย่างเครื่องฉีดพลาสติกที่พบได้ทั่วไปดังภาพ ก และลักษณะการออกแบบชุดฉีด และติดตั้งแม่พิมพ์ของเครื่องฉีดพลาสติกแนวตั้งดังภาพ ข

2.2.1.4 วิธีการหรือพารามิเตอร์ที่ปรับตั้งเครื่องฉีด (Method)

การปรับพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้น การปรับพารามิเตอร์ที่ถูกตั้งค่าอย่างถูกต้องสามารถมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิตด้วย นี่คือการที่พารามิเตอร์ที่ถูกตั้งค่าไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดปัญหาในการผลิต เช่น ผลิตภัณฑ์ไม่คุ้มค่า มีข้อบกพร่อง หรือแม้แต่เกิดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของพนักงานและผู้บริโภค

ในกระบวนการนี้เป็นการรวมกันของ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ คน เครื่องจักร และวัตถุดิบ (Man, Machine and Material) ดังนั้น การปรับพารามิเตอร์เครื่องฉีดเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับความสำเร็จของกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยควรให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์และทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงและปลอดภัยในกระบวนการผลิตดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 พารามิเตอร์สำหรับฉีดพลาสติกชนิด ABS เกรด VH0815
ที่มา: <https://www.lottechem.com> (สืบค้นวันที่ 25 สิงหาคม 2566)

2.2.1.5 ข้างฉีดหรือบุคลากร (Man)

บุคลากรที่จะปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติกได้เป็นอย่างดีนั้นจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับประเภทของวัสดุพลาสติก แม่พิมพ์ และเครื่องจักรที่จะใช้ในการฉีดพลาสติกเป็นอย่างดี เพราะพลาสติกแต่ละชนิดมีค่าทางด้านเทคนิคที่แตกต่างกันมาก เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น ความดันที่ใช้ในการฉีด อัตราการไหลของพลาสติก ลักษณะของทางวิ่ง และทางทางเข้าของน้ำพลาสติก ตลอดจนถึงตอนและกลไกในการปลดชิ้นงานออกแม่พิมพ์ โดยปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มี 5 สิ่งที่ผู้ปฏิบัติงานต้องเข้าใจอย่างถ่องแท้ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว ระยะทาง และเวลา ทั้งนี้การฝึกอบรมเพื่อเพิ่มทักษะของบุคลากรเป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ปฏิบัติงาน และผู้ประกอบการ

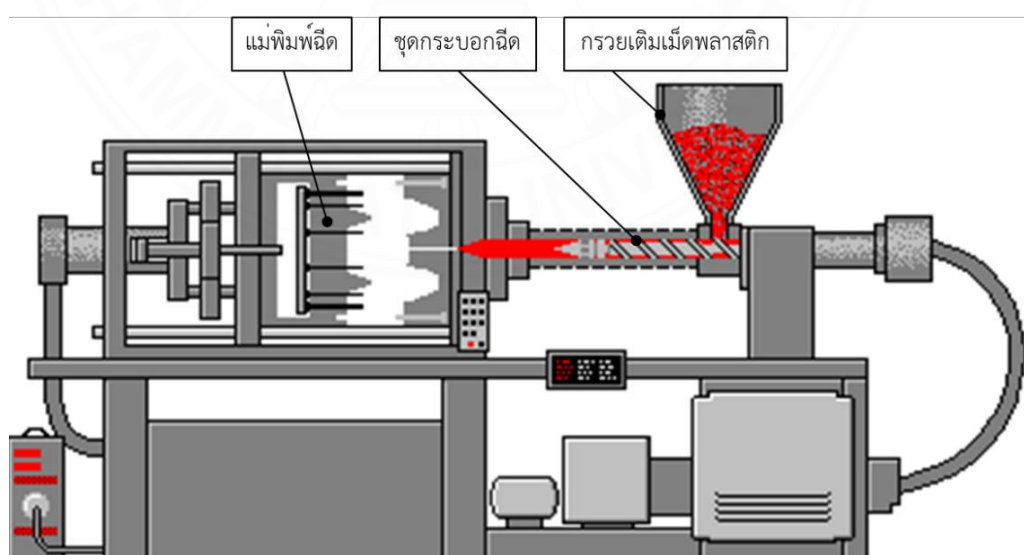
2.2.1.6 การจัดการในการฉีด (Management)

การจัดการในการฉีด คือ การวางแผนการผลิตอย่างเหมาะสม เช่นการกำหนดลำดับชนิดของพลาสติกที่ใช้ในสายการผลิต การเรียงลำดับของสี ลำดับความต้องการของลูกค้า ปริมาณที่ต้องการผลิต การจัดการเหล่านี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดความสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตและลดเวลาในการสับเปลี่ยนงาน

ตัวอย่างเช่น การจัดลำดับการผลิตของชิ้นงานสีอ่อน และไล่เรียงลำดับไปสู่สีที่เข้มกว่าจะสามารถลดเวลาในการล้างทำความสะอาดชุดฉีดพลาสติกได้

2.3 การไหลของพลาสติกในงานฉีด

การไหลของพลาสติกเหลวเคลื่อนที่ผ่านกระบอกหลอมเหลวไปยังหัวฉีด และไหลจากหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันที่สูง ผ่านทางทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) และทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) จนกระทั่งเต็มเต็มช่องว่างในแม่พิมพ์เป็นรูปร่างชิ้นงาน การไหลที่ดีนั้นต้องเกิดจากการไหลแบบเป็นระเบียบ ไม่ให้เกิดลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ความเร็วและอัตราการไหลที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมจากการออกแบบชิ้นงาน และชนิดของวัตถุดิบ



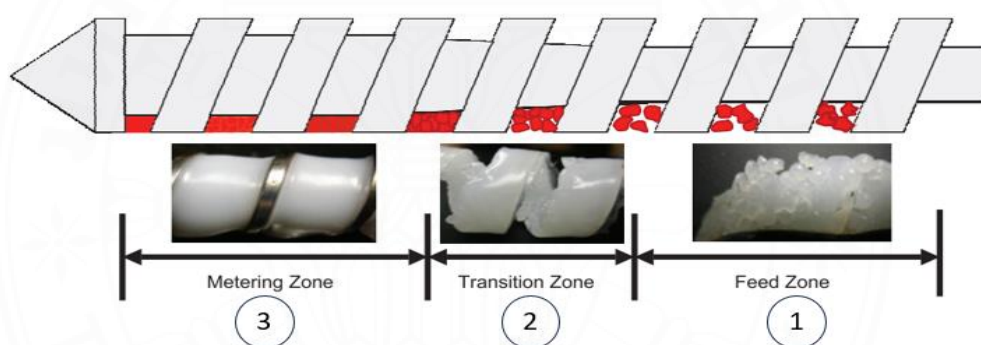
ภาพที่ 2.9 การไหลของพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์

ที่มา: <https://www.deemarkthailand.com/> (สืบค้นวันที่ 8 พฤศจิกายน 2566)

จากภาพที่ 2.9 เม็ดพลาสติกจะถูกเติมเข้าสู่กรวยเติมที่ด้านบนของเครื่องจักร และไหลเข้าสู่ชุดกระบอกฉีดแปรสภาพเป็นของเหลวจากความร้อน หลังจากนั้นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์กลายเป็นรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการ

2.3.1 การหลอมเหลวและไหลในกระบอกฉีด

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพลาสติกจากของแข็งเป็นของเหลวโดยใช้ความร้อน และเคลื่อนที่ผ่านร่องของสกรูจากการหมุนป้อนพลาสติก กระบวนการนี้เป็นการเตรียมเนื้อพลาสติกเหลวให้มีความหนาแน่น ความร้อน และสีที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดพลาสติก



ภาพที่ 2.10 การหลอมและไหลของพลาสติกในกระบอกฉีดแบบมาตรฐาน

ที่มา: Suhas Kulkarni (2017)

จากภาพที่ 2.10 สามารถอธิบายส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

บริเวณที่ 1 ส่วนป้อนพลาสติก (Feeding Zone) วัสดุติดยังมีสภาพเป็นเม็ดแข็งและไม่เกิดการหลอมเหลวแต่ยังมีกระบวนการอัดและทำความร้อนของเรซินเกิดขึ้นด้วย

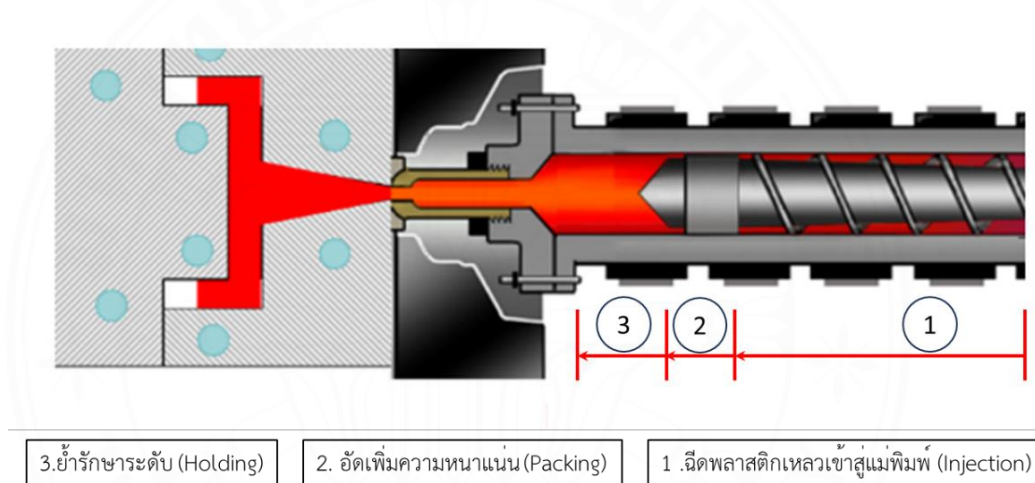
บริเวณที่ 2 ส่วนการเปลี่ยนสภาพ (Transition Zone) การหลอมเหลวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณนี้โพลีเมอร์แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ เรียงตัวแข็งอัดแน่น ฟิล์มละลายตามพื้นผิวกระบอก บ่อหลอมเหลว ฟิล์มที่หลอมเหลวจะถูกไหลผ่านเข้ามาและการหลอมเหลวยังคงดำเนินต่อไปเป็นผลมาจากการเสียดสีเลื่อนของพลาสติกแข็งกับกระบอกที่ร้อน เป็นการละลายที่มีประสิทธิภาพอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง เกิดคล้ายๆกับการใส่ก้อนน้ำแข็งเข้าสู่วงล้อเครื่องบดที่ร้อน

บริเวณที่ 3 โซนการฉีด (Metering Zone) จะเป็นช่วงที่มีการเนียนกันของพลาสติกมากที่สุดและจะเพิ่มมากขึ้นระหว่างกระบอกกับสกรูทั้งยังเพิ่มการหลอมเหลวของพลาสติก

บางส่วนที่ยังหลอมเหลวไม่ดีพอ ในโซนนี้พลาสติกที่ได้ถูกเตรียมพร้อมให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีด พลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ต่อไป

2.3.2 การไหลของพลาสติกขณะออกจากหัวฉีด

การไหลของพลาสติกเหลวออกจากหัวฉีดเป็นลำดับการไหลต่อเนื่องจากการไหลในกระบอกฉีดซึ่งขั้นตอนนี้พลาสติกเหลวจะถูกกระทำด้วยแรงอัดฉีดเปรียบเทียบได้กับการฉีดยา การไหลของพลาสติกเหลวจากหัวฉีดต้องมีการไหลเป็นรูปร่าง ไม่มีฟองอากาศและต้องไหลขนานไปในทิศทางเดียวกับหัวฉีด



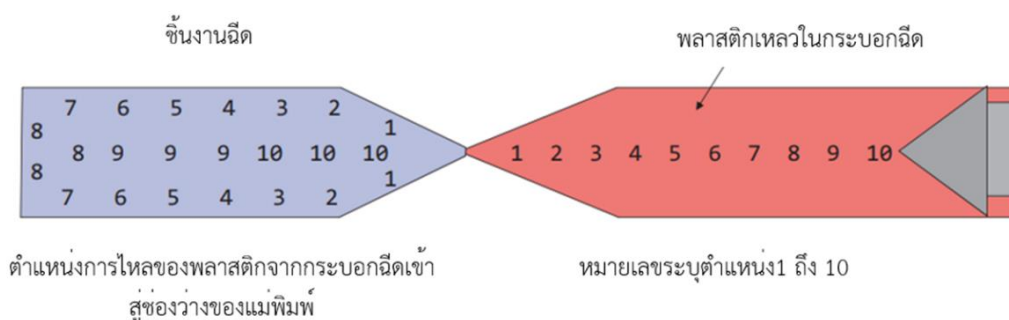
ภาพที่ 2.11 การไหลของพลาสติกออกจากหัวฉีด

ที่มา: <https://www.quora.com/What-is-a-transfer-position-in-injection-molding>
(สืบค้นวันที่ 8 พฤศจิกายน 2566)

จากภาพที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการไหลของพลาสติกออกจากหัวฉีดสามารถแบ่งการทำงานเป็นสามช่วงคือ การเติมเนื้อพลาสติกเหลวเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ ช่วงการอัดกดเซตเนื้อพลาสติก และช่วงการย้ารักษาแรงดันให้คงที่ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เป็นทักษะที่ผู้ปฏิบัติงานต้องมีความรู้และความเข้าใจอย่างเพียงพอจึงจะสามารถควบคุมกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพได้

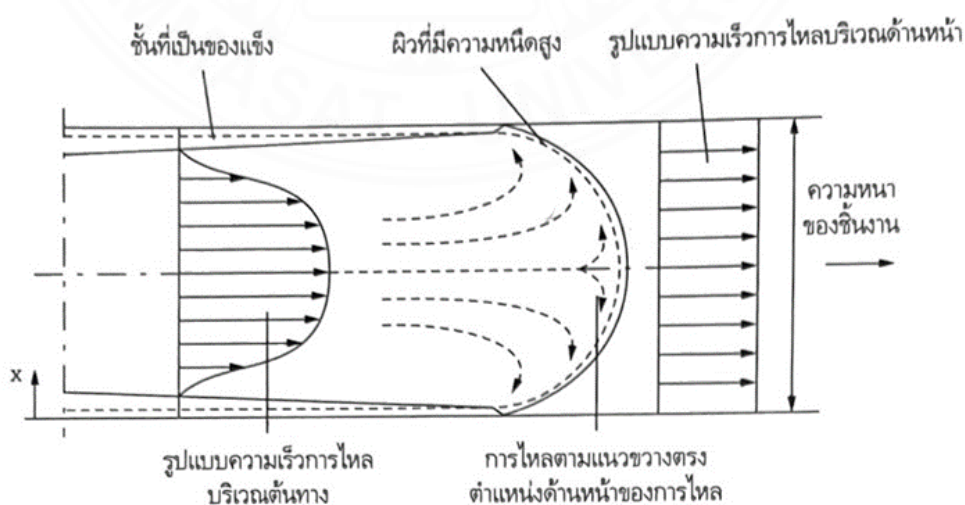
2.3.3 การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ฉีด

การไหลของพลาสติกเหลวที่เข้าสู่แม่พิมพ์นั้น พลาสติกเหลวที่อยู่ตำแหน่งด้านหน้าจะเข้าไปอยู่ในส่วนแรกของแม่พิมพ์ และพลาสติกที่อยู่ลำดับถัดไปจะถูกดันเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างที่เหลือซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.12 ตำแหน่งการไหลแบบน้ำพุของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์
ที่มา: Suhas Kulkarni (2017)

ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วในการไหลของพลาสติกเหลวจะเป็นไปตามภาพที่ 2.12 นั่นคือ พลาสติกเหลวบริเวณตรงกลางของช่องทางไหลจะมีความเร็วในการไหลเร็วที่สุด ส่วนพลาสติกเหลวที่ผิวแม่พิมพ์จะไหลช้าที่สุดเนื่องจากผนังแม่พิมพ์ที่เย็นและเกิดการแข็งตัวของพลาสติก รูปแบบการเย็นตัวของพลาสติกเหลวตรงบริเวณด้านหน้า (Front Flow) ของการไหลมีลักษณะเหมือนน้ำพุ กล่าวคือ พลาสติกที่ไหลอยู่ตรงกลางของช่องทางไหลซึ่งมีการไหลตัวได้เร็วที่สุดนั้นจะมีการไหลแหวกออกด้านข้างที่ผนังแม่พิมพ์ด้วยด้วย ดังนั้นพลาสติกที่ตำแหน่งด้านหน้าสุดของการไหลจะมีความเร็วในการไหลที่เท่ากันตามภาพ 2.13



ภาพที่ 2.13 ความเร็วการไหลของพลาสติกตลอดพื้นที่หน้าตัด และด้านหน้าของการไหล (Front Flow), ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม (2553)

เนื่องจากพลาสติกบริเวณตรงกลางของช่องทางไหลมีการไหลออกไปด้านข้าง แทนที่จะพุ่งไปข้างหน้าทำให้ความเร็วการไหลลดลง ตลอดระยะทางการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ จะพบว่าความเร็วในการไหลของพลาสติกบริเวณตรงกลางของช่องทางไหลจะลดลงเรื่อย ๆ นอกจากนี้โซโมเลกุลของของพลาสติกยังเกิดการเรียงตัว (Orientation) ที่บริเวณด้านหน้าของการไหลนี้ด้วย โดยเฉพาะที่ตำแหน่งด้านหน้าสุดจะเกิดการเรียงตัวของโซโมเลกุลมากที่สุด

2.4 การหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก

การระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าพลาสติกจะมีสถานะเป็นของแข็ง สามารถรักษารูปร่างและคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ ชิ้นงานที่ออกมาจากแม่พิมพ์ ควรจะมีระดับความร้อนไม่เกินค่าอุณหภูมิการโก่งตัว (HDT, Heat Deflection Temperature) ของพลาสติกชนิดที่ขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกเหลวเกิดขึ้นสองช่วงดังนี้

การกำจัดความร้อนออกจากพลาสติก เมื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ จะมีความร้อนจำนวนมากที่ถูกเพิ่มเข้าไปในระหว่างกระบวนการหลอม ความร้อนนี้จะต้องค่อย ๆ ขจัดออกจากพลาสติกเพื่อให้แข็งตัวและเป็นรูปร่างของแม่พิมพ์ ขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้าเนื่องจากเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนจากภายในพลาสติกไปยังพื้นผิวแม่พิมพ์อย่างค่อยเป็นค่อยไป

การกำจัดความร้อนออกจากแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันความร้อนจะต้องถูกกำจัดออกจากแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยทั่วไปแม่พิมพ์จะถูกระบายความร้อนโดยใช้ช่องที่มีของเหลวหล่อเย็นโดยปกติคือน้ำ ที่ไหลเวียนผ่านแม่พิมพ์ กระบวนการทำความเย็นนี้ช่วยลดความร้อนออกจากพื้นผิวแม่พิมพ์ได้เร็วกว่าที่พลาสติกจะเย็นตัวลงเองตามธรรมชาติได้มาก ด้วยการทำให้แม่พิมพ์เย็นลงอย่างรวดเร็ว ช่วยให้สามารถเร่งวงจรการผลิตโดยรวมให้เร็วขึ้น และรับประกันว่าชิ้นส่วนพลาสติกจะแข็งตัวโดยเร็วที่สุด

การสร้างสมดุลระหว่างกระบวนการกำจัดความร้อนทั้งสองนี้เป็นสิ่งสำคัญในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่มีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ การควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม การออกแบบช่องระบายความร้อน และการปรับเวลารอบให้เหมาะสม ล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการทำความเย็นในกระบวนการขึ้นรูป การมีสมดุลการทำความเย็นที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันปัญหาต่าง ๆ เช่น การบิดงอ รอยยุบ และข้อบกพร่องอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์พลาสติกขั้นสุดท้าย

2.4.1 การคำนวณหาเวลาในการหล่อเย็น

การหล่อเย็นจะต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) ร่วมกับการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transformation) โดยสูตรคำนวณที่ต้องใช้ในการหล่อเย็นมีดังนี้

2.4.1.1 สำหรับชิ้นงานแผ่นแบน สูตรเวลาหล่อเย็นชิ้นงานที่คิดจากอุณหภูมิสูงสุดตรงกลางของความหนาชิ้นงานใช้สูตรดังนี้

$$tk = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_{melt} - T_{mold}}{T_{eject} - T_{mold}} \right) \quad (1)$$

2.4.1.2 สำหรับชิ้นงานทรงกระบอก เวลาหล่อเย็นชิ้นงานที่มีรูปทรงกระบอกจะใช้สูตรดังนี้

$$tk = \frac{d^2}{23.14 \alpha} \ln \left(0.692 \frac{T_{melt} - T_{mold}}{T_{eject} - T_{mold}} \right) \quad (2)$$

2.4.1.3 สำหรับชิ้นงานทรงกลม เวลาหล่อเย็นชิ้นงานที่มีรูปทรงกลมจะใช้สูตรดังนี้

$$tk = \frac{D^2}{4\pi^2 \alpha} \ln \left(0.608 \frac{T_{melt} - T_{mold}}{T_{eject} - T_{mold}} \right) \quad (3)$$

ความหมายของตัวแปรต่างๆ

tk = เวลาในการหล่อเย็น (วินาที)

T_{melt} = อุณหภูมิพลาสติกไหล (องศาเซลเซียส)

T_{mold} = อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)

T_{eject} = อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (องศาเซลเซียส)

α = การแผ่ความร้อน (Thermal Diffusivity, mm^2/s)

s = ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

r = รัศมีของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

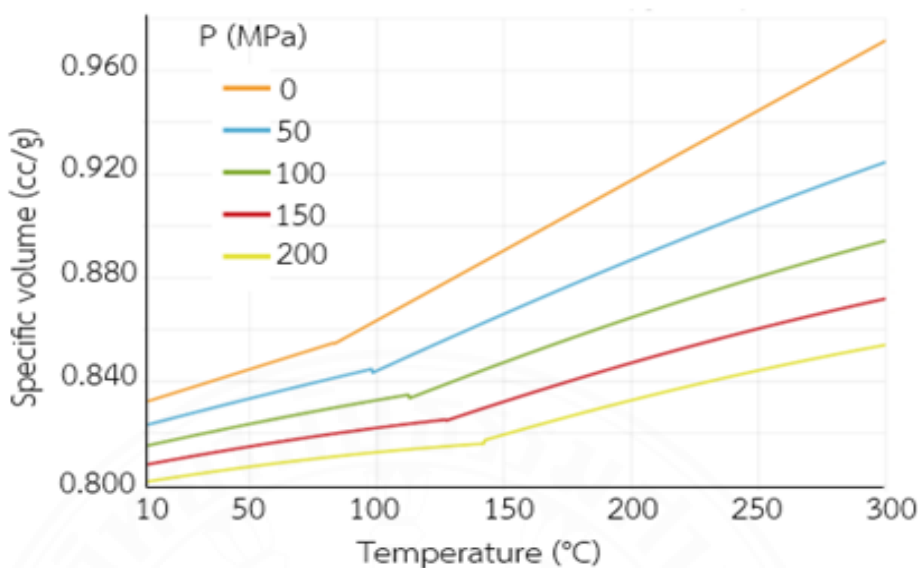
ตารางที่ 2.3 การแผ่ความร้อนของความร้อนของพลาสติก, ที่มา : วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม (2553)

พลาสติก	ค่า α (mm ² /s)	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	อุณหภูมิ ชิ้นงาน (°C)	อุณหภูมิ พลาสติกเหลว (°C)	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ที่ใช้ (°C)
ABS	0.085-0.080	20-80	60-100	200-280	40-80
PC	0.110	20-120	90-140	260-320	80-120
PA66	0.090	20-110	70-140	250-320	40-120
PMMA	0.080-0.070	10-80	110	200-280	40-80
SAN	0.085	20-80	60-110	180-260	40-80
PS	0.090-0.075	20-100	60-110	180-250	10-50
POM	0.080-0.040	20-120	90-150	170-210	60-120
PP	0.070-0.060	10-100	60-100	190-270	20-60
HDPE	0.110-0.040	10-100	60-110	240-290	10-50
LDPE	0.100-0.070	10-70	50-90	180-240	10-50

หมายเหตุ ค่า α จะลดลงเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ พลาสติกเหลวจะถ่ายเทความร้อนให้กับแม่พิมพ์ได้น้อยลงดังนั้นการเลือกใช้ค่า α ควรคำนึงถึงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริงโดยพิจารณาจากตาราง 2.3 เช่น ค่า α ของ ABS ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20 °C คือ 0.085 mm²/s และที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 80 °C คือ 0.080 mm²/s

2.4.2 ลักษณะความสัมพันธ์ของดัน อุณหภูมิ และเวลา PVT ไดอะแกรม

เป็นไดอะแกรมกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pressure) ปริมาตร (Volume) และอุณหภูมิ (Temperature) ของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติก การดู PVT ไดอะแกรมช่วยในการเข้าใจและควบคุมกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีคุณภาพและเที่ยงตรง



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ (PVT)

ที่มา : Moldex3D

ความดัน (Pressure) แกน y ของกราฟแสดงความดันในแม่พิมพ์ขณะที่พลาสติกถูกฉีด ความดันเป็นองค์สำคัญที่สัมพันธ์กับการเข้าใจว่าพลาสติกจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์อย่างไรและความดันที่เกิดในแม่พิมพ์มีค่าเท่าไร

ปริมาตร (Volume) แกน x ของกราฟแสดงปริมาตรของพลาสติกในแม่พิมพ์ ปริมาตรมีความสัมพันธ์กับการควบคุมปริมาตรของพลาสติกที่ถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ

อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิของพลาสติกมีผลต่อความแข็งตัวและการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ กราฟ PVT สามารถแสดงว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรตลอดทั้งกระบวนการ

การวิเคราะห์ PVT ไดอะแกรมในบรรยากาศของกระบวนการฉีดพลาสติกช่วยในการควบคุมความดันและอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและคุณสมบัติที่ถูกต้อง การปรับความดันและอุณหภูมิในขณะที่พลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์มีผลในการควบคุมความหนาแน่นของพลาสติกและการแข็งตัวของชิ้นงาน ผู้ใช้สามารถติดตามและปรับความดันและอุณหภูมิเพื่อควบคุมการฉีดพลาสติกให้สอดคล้องกับความต้องการและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่กำลังผลิต

จากภาพที่ 2.14 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ PVT ของ ABSเกรด VH0815 ซึ่งกระบวนการแปรรูปพลาสติกพลาสติกจะผ่านกระบวนการทำความเย็นที่รวดเร็วมากภายใต้อุณหภูมิและความดันที่ควบคุมโดยการขึ้นรูปกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหลอมเหลวเป็นสถานะของแข็ง โดยปกติปริมาตรจะเปลี่ยนไปอย่างมากและการเปรียบเทียบอย่างง่ายเป็นไปได้ยากต่อไป เพื่ออธิบายค่าคงที่ความดันและความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิ (PVT) ถูกกำหนดเพื่อคำนวณระดับการบีบอัดของวัสดุในขั้นตอนการอัดฉีดจนอัตราการผลิตและการหดตัวของการบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนพลาสติกขั้นสุดท้ายหลังจากการปลดออกจากแม่พิมพ์ สมการที่ใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิ ของวัสดุถึงผลึกที่แนะนำใน Moldex 3D

$$\alpha(\square, \square) = \alpha_0(\square) \left[1 - \alpha \square \left(1 + \frac{\square}{\alpha(\square)} \right) \right] + \alpha_{\square}(\square, \square) \quad (3)$$

โดยที่ $\alpha(T, P)$ คือปริมาตรเฉพาะ α_0 คือ ปริมาตรเฉพาะที่ความดันเกจศูนย์ T คือ อุณหภูมิ P คือ ความดัน และ C คือ ค่าคงที่ 0.0894

$$\alpha_0(T) = \begin{cases} b_{1S} + b_{2S}\bar{T} & ,if T \leq T_t \\ b_{1L} + b_{2L}\bar{T} & ,if T > T_t \end{cases} \quad (4)$$

$$B = \begin{cases} b_{3S} \exp(-b_{4S}\bar{T}) & ,if T \leq T_t \\ b_{3L} \exp(-b_{4L}\bar{T}) & ,if T > T_t \end{cases} \quad (5)$$

$$v_t(T, P) = \begin{cases} b_7 \exp(b_8\bar{T} - b_9P) & ,if T \leq T_t \\ 0 & ,if T > T_t \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{T} = T - b_5$$

$$T_t = b_5 + b_6P \quad (7)$$

โดยที่ α_t คือ ค่าของพลาสติกถึงผลึกใช้กับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง T_t ใช้เพื่อระบุลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างกะทันหันของวัสดุ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง 13 พารามิเตอร์ ($b_{1S}, b_{2S}, b_{3S}, b_{4S}, b_{1L}, b_{2L}, b_{3L}, b_{4L}, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่พอดีกับข้อมูลด้วยการเปลี่ยน PVT เชิงเส้นเท่านั้น b_7, b_8 และ b_9 คือสำหรับวัสดุอสัณฐาน

2.5 การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน

ค่าการบิดเบี้ยวจากการหดตัวคำนวณ จากการกระจายการหดตัวตามปริมาตรเฉลี่ยของความหนาบรรณานาตามรูปแบบของกราฟ PVT

$$S_{AVG}(x,y) \equiv \int_{Zmin}^{Zmax} S(x,y,z) dz / (Zmax - Zmin) \quad (8)$$

ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงขนาดจะแสดงในแต่ละทิศทาง X, Y หรือ Z โดยพิจารณาถึงผลการหดตัวที่แตกต่างกัน หลังจากชิ้นงานถูกปลดออกจากแม่พิมพ์และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องการเปลี่ยนแปลงขนาดจากผลของอุณหภูมิที่ต่างกันหลังจากที่ชิ้นส่วนถูกปลดออกจากแม่พิมพ์และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง พิจารณาจากส่วนประกอบทั้งหมดในทิศทาง x, y และ z ด้วยระบบพิกัดฉากคำนวณด้วยผลต่างของปริมาตรและการหดตัวผ่านความหนาดังนี้

$$\square_{DIF} \square \square (\square, \square, \square) - \square_{AVG}(\square, \square) \quad (9)$$

เมื่อ S คือขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

2.6 ปัญหาในงานฉีดพลาสติก

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีดพลาสติกเกิดจากตัวแปรหลัก คือวัตถุดิบ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เครื่องจักร อุปกรณ์ต่อพ่วง บุคคลกรณ และวิธีการหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับฉีดพลาสติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างมีรูปแบบและเกิดคล้ายๆกันในวงการทำงานฉีดพลาสติก ทั่วไป การแก้ไขปัญหาล้วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การสร้างค่ามาตรฐานในการปรับฉีดชิ้นงาน โดยผ่านกระบวนการทดสอบทดลองแม่พิมพ์ กับเครื่องจักรตัวนั้น แล้วจึงนำไปใช้ในการผลิตจริง

2.6.1 ตัวอย่างปัญหาการบิดเบี้ยว (Warpage) ของชิ้นงาน

ชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยพลาสติกเบี่ยงเบนไปจากรูปร่างที่ต้องการ แสดงให้เห็นการบิด การบิดงอ พื้นผิวเป็นคลื่น และการเบี่ยงเบนของมุม สาเหตุมาจากแนวโน้มการหดตัวที่แตกต่างกัน (shrinkage potential) ของพื้นที่ต่าง ๆ ของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูป ความแตกต่างของการ

หัตถ์มีสาเหตุมาจากระดับที่แตกต่างกันของการฉีดอัด (Packing, Holding) ที่เกิดขึ้นไม่เท่ากันบนชิ้นส่วนที่ขึ้นรูป และกระทำในทิศทางที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างการบิดเบี้ยว (Warp) ของชิ้นงาน

ที่มา: <https://plastics-rubber.basf.com/global/en.html> (สืบค้นวันที่ 5 กันยายน 2566)

2.7 การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) ในงานฉีดพลาสติก

ในงานฉีดพลาสติก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม เป็นเครื่องมือที่สำคัญในกระบวนการออกแบบและประเมินการผลิตชิ้นงานพลาสติก มีส่วนช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ การวิเคราะห์การไหลของพลาสติก การวิเคราะห์และคำนวณความแข็งแรง การวิเคราะห์อุณหภูมิ การจำลองการหดหรือการย่นตัวของพลาสติก และการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการผลิต การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม ช่วยลดความเสี่ยงและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต และช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูงขึ้นในงานฉีดพลาสติก

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม มีผู้ผลิตซอฟต์แวร์จำนวนมากในตลาดภาคอุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ งานวิจัยฉบับนี้ขอยกตัวอย่างโปรแกรม Moldex 3D มาอธิบายความสามารถในการวิเคราะห์ผลและลักษณะการใช้งานของโปรแกรม

2.7.1 โปรแกรมจำลองและวิเคราะห์การไหลของพลาสติก Moldex3D

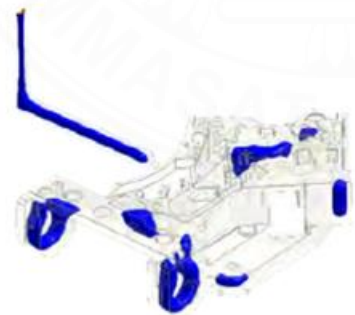
Moldex3D เป็นผลิตภัณฑ์ CAE ชั้นนำของโลกสำหรับอุตสาหกรรมการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดในระดับเดียวกัน สามารถช่วยจำลองช่วงการใช้งานที่

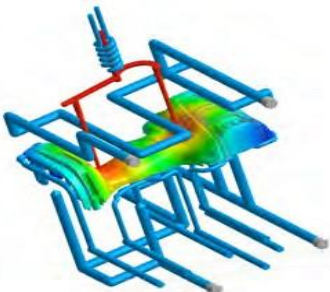
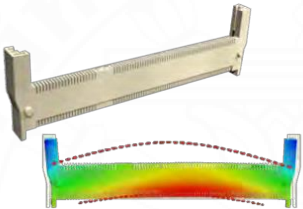
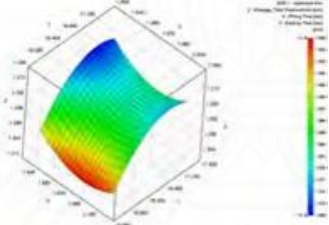
กว้างที่สุดของกระบวนการฉีดขึ้นรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบผลิตภัณฑ์และความสามารถในการผลิต ลดระยะเวลาในการทดสอบชิ้นงาน และสามารถการออกสู่ตลาดได้รวดเร็วขึ้น

2.7.1.1 ฟังก์ชันหลักในการใช้งาน และวิเคราะห์ผล

โปรแกรม Moldex3D มีฟังก์ชันการใช้งานที่ครอบคลุมทั้งกระบวนการด้านงานฉีดพลาสติก โดยสามารถช่วยวิเคราะห์ผลตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Part/Mold design) การพิสูจน์ทางวิศวกรรม (CAE Verification) การผลิตเครื่องมือ (Tool Making) และกระบวนการผลิต (Production) ในส่วนที่เกี่ยวกับงานวิจัยจะยกตัวอย่างเฉพาะบางฟังก์ชันดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างฟังก์ชันการวิเคราะห์ผลของ Program Moldex3D

ฟังก์ชัน	ภาพประกอบ	วิเคราะห์ผล
การไหล (Flow)		- พยากรณ์อุณหภูมิการหลอม และการไหลที่บริเวณด้านหน้า (Front flow) - แนะนำตำแหน่งทางเข้าพลาสติกที่เหมาะสม - พิจารณาปัญหาที่เกิดในการผลิต เช่น รอยประสาน(Weld line) การเติมเต็มที่ไม่สมดุล(Flow imbalance) การอั้นอากาศ(Air trap) การฉีดไม่เต็ม(Short shot) และอื่นๆ
การเติมเต็มและเซตแข็งชิ้นงาน (Pack)		- ประเมินเวลาการเย็นตัวของทางเข้าพลาสติก(Evaluate gate freeze time) - ลดปัญหาชิ้นงานยุบ (sink mark) และมีครีบ (flash) - แนะนำรูปแบบพารามิเตอร์สำหรับการย่ำชิ้นงาน (packing profile)

ฟังก์ชัน	ภาพประกอบ	วิเคราะห์ผล
การหล่อเย็น (Cool)		● เพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเย็นชิ้นงาน ● ลดเวลาของรอบการผลิต ● พยากรณ์หาจุดที่ความร้อนสะสม (Predict hot spots)
การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน (Warp)		● พยากรณ์รูปร่างชิ้นงานหลังจาก ● ระบุสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานบิด ● ทำการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการเสียรูปขนาดใหญ่
การออกแบบการทดลอง (Expert DOE)		● ออกแบบและประเมินสถานะกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด เช่น ความเร็วการฉีด เวลาในการอัด เวลาในการทำความเย็น หรือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Beomkeun Kim, Juwon Min (2017) ได้ศึกษาเรื่อง “การกระจายความเค้นตกค้างและอิทธิพลต่อการเสียรูปหลังการผลิตของชิ้นส่วนพลาสติกฉีดขึ้นรูป” มีการดำเนินงานวิจัยด้วยการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (CAE) รวมถึงการวิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ในการดำเนินงานเพื่ออธิบายการเสียรูปตามวัฏจักรความร้อน ผลการวิเคราะห์เหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองและพบว่าความเครียดที่เหลือตกค้างในชิ้นงานซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นสาเหตุหลักของการเสียรูปถาวรหลังจากการหมุนเวียนให้ความร้อนหลังการผลิต

Du-Soon Choi, Yong-Taek Im (1999) ได้ศึกษาเรื่อง “การทำนายการหดตัวและการบิดงอโดยพิจารณาจากความเค้นตกค้างในการจำลองแบบผสมผสานของการฉีดขึ้นรูป” ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการหดตัวและการบิดงอของชิ้นส่วนฉีดขึ้นรูป โดยคำนึงถึงความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการย่ำและการหล่อเย็น มีการนำแบบจำลองวัสดุยืดหยุ่นหนืดแบบเทอร์โมรีโอโลยีอย่างง่ายมาใช้ในการพิจารณาผลการผ่อนคลายความเครียด และเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การวิเคราะห์ความผิดปกติของชิ้นส่วนที่ฉีดขึ้นรูปโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น เพื่อตรวจสอบการคาดการณ์เชิงตัวเลข ผลการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่มีอยู่ในงานวิจัย ในกรณีของความเค้นตกค้าง พบว่าผลการทดลองกับค่าความเค้นตกค้างที่พื้นผิวของชิ้นส่วนที่ฉีดขึ้นรูปที่คาดการณ์มากเกินไป อย่างไรก็ตาม พบว่าการหดตัวที่คาดการณ์ไว้มีความสมเหตุสมผลในการอธิบายผลกระทบของสภาวะการประมวลผลได้ดี และการวิเคราะห์การหดตัวและการบิดงอก็ประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับชิ้นส่วนที่มีรูปร่างโค้งที่ซับซ้อนมากขึ้น

Hao-Hsuan Tsou, Chung-Ching Huang, Yi-Cheng Chen and Syu-Yang Shih (2022) ได้ศึกษาเรื่อง “การตรวจจับความเค้นตกค้างใกล้ทางเข้าน้ำพลาสติกแบบออนไลน์ โดยการใช้แรงดันควาวิตีในการฉีดขึ้นรูป” ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากความเครียดตกค้างบริเวณใกล้ทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) ของชิ้นส่วนพลาสติกนำแสง พบว่าด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดพลาสติก เมื่อใช้เซ็นเซอร์ตัวเดียวในการวัด จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่าง 0.48 ถึง 0.59 และเมื่อใช้เซ็นเซอร์หลายตัว จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่าง 0.80 ถึง 0.92 ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่ง ดังนั้น การติดตามความเครียดตกค้างที่ใกล้ทางเข้าน้ำพลาสติก เมื่อนำมาใช้เป็นเทคโนโลยีการตรวจสอบออนไลน์สำหรับการฉีดขึ้นรูปสามารถลดของเสียในกระบวนการได้

K. K. Kabanemi, H. Vaillancourt, H. Wang, G. Salloum (2004) ได้ศึกษาเรื่อง “ความเค้นตกค้าง การหดตัว และการบิดงอของผลิตภัณฑ์ฉีดขึ้นรูปที่มีรูปร่างซับซ้อน ด้วยการจำลองเชิงตัวเลขและการตรวจสอบความถูกต้องเชิงทดลอง” วิธีการนี้ช่วยให้สามารถคาดการณ์การเสียรูปของสารตกค้างและความเค้นตกค้างที่ละชั้นได้เหมือนกับการคำนวณสามมิติอย่างแท้จริง ในขณะที่ช่วยลดต้นทุนการคำนวณได้อย่างมาก เทคนิคการเจาะรูใช้เพื่อวัดความเค้นตกค้างตามความหนาของผลิตภัณฑ์ มีการใช้ระบบเลเซอร์ดิจิทัลสามมิติ เทคนิคการประมวลผลภาพ และระบบทรานสดิวเซอร์แบบดิสเพลสเมนต์คู่เพื่อวัดการบิดงอ ทำการทดลองกับโพลีคาร์บอเนต (PC) และชิ้นส่วนโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ผลลัพธ์เชิงตัวเลขสอดคล้องกันกับการสังเกตการทดลอง กล่าวคือ ผิวของกล่องถูกล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีแรงอัด ในขณะที่บริเวณแกนกลางอยู่ในแรงฉุด แนวโน้มของโปรไฟล์ความเค้นตกค้างทั้งจากการทดลองและที่คาดการณ์ไว้นั้นใกล้เคียงกัน มีการนำเสนอตัวอย่างต่าง ๆ

เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความซับซ้อนทางเรขาคณิตของรูปร่างที่มีต่อการเสียรูปขั้นสุดท้ายและความเค้นตกค้าง นอกจากนี้ยังวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อความเค้นตกค้างและการบิดงออีกด้วย

Ming-Yu Lin, Yong-Jie Zeng, Sheng-Jye Hwang, Ming-Han Wang, Hui-Ping Liu & Chin-Lung Fang (2022) ได้ศึกษาเรื่อง “การวิเคราะห์การบิดเบี้ยวและความเครียดตกค้างของกระบวนการอบขึ้นงานฉีดพลาสติกชิ้นส่วน IC package” มีการใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์การไหลของแม่พิมพ์ Moldex 3D ใช้ในการพัฒนาขั้นตอนการวิเคราะห์ผลทางวิศวกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองข้อผิดพลาดของผลการจำลองการบิดเบี้ยวอยู่ระหว่าง 10% ถึง 50% พบข้อผิดพลาดที่ใหญ่ที่สุดในทิศทางสั้น ในระหว่างรอบความร้อนสองรอบจะพบว่าความเค้นสูงสุดของเฟรมตะกั่ว คือ 505.7 MPa และตำแหน่งของความล้มเหลวที่เป็นไปได้อยู่ที่ด้านบนซ้ายของแม่พิมพ์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหรือไม่พิจารณาความเครียดตกค้างที่เกิดจากกระบวนการอบให้ความร้อนสถานะความเครียดจะแตกต่างกันมาก

Lina F. Kadhim, ALI A. A. AL-Zubiedy, Hanaa J. Kadhim (2022) ได้ศึกษาเรื่อง “การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างโดยวิธีโฟโตอีลาสติก” มีการแนะนำวิธีการใช้งานการวิเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้งานได้จริง รวดเร็ว และต้นทุนต่ำ การวัดความเค้นภายในของรูปทรงทั้งแบบเรียบง่ายและซับซ้อน วิธีโฟโตอีลาสติกนั้นขึ้นอยู่กับการวัดการรบกวนของแสงโพลาไรซ์ ตลอดจนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วและทิศทางของความเร็วแสงที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวอย่างโพลีเมอร์ ความยืดหยุ่นของแสงเป็นเทคนิคการทดลองแบบไม่ทำลายสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของแสงที่ระบุว่าเป็นการหักเหของแสงสองทาง คุณสมบัตินี้มีอยู่ในวัสดุโปร่งใสหลายชนิด เช่น แก้ว คริสตัล และโพลีเมอร์บางชนิด

Richard Dominik Parizs, Daniel Torok, Tatyana Ageyeva and Jozsef Gobor Kovacs (2013) ได้ศึกษาเรื่อง “การติดตั้งเซ็นเซอร์หลายตัวในแม่พิมพ์สำหรับการควบคุมคุณภาพและกระบวนการในการฉีดขึ้นรูป” จากการใช้งานกับการผสมผสานระหว่างเทคนิคการใช้เซ็นเซอร์และข้อมูล ให้สอดคล้องกับแนวคิดอุตสาหกรรม 4.0 ทำการศึกษาในแม่พิมพ์แบบหลาย cavity ที่พบว่าการพาความร้อน และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับแรงดันที่เหมาะสมสามารถบอกถึงค่าแรงบิดแม่พิมพ์ที่สอดคล้องกันได้ และเซ็นเซอร์ใน cavity ที่เท่ากันที่สามารถบ่งบอกถึงเวลาและความดันในการฉีดขึ้นงานได้อย่างเหมาะสมที่สุด

Wei Guo, Lin Hua, Huajie Mao and Zhenghua Meng (2011) ได้ศึกษาเรื่อง “การทำนายการบิดเบี้ยวในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยอาศัยการออกแบบการทดลอง” แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการบิดเบี้ยวถูกกำหนดขึ้นตามการออกแบบการทดลอง (DOE)

ประการแรก ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุด ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ทางสถิติและจากซอฟต์แวร์ Moldflow ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้เพื่อทำนายการบิดเบี้ยวได้อย่างแม่นยำเพียงพอ ดังนั้นจึงบ่งชี้ว่าการออกแบบแก้ไขและวนซ้ำสามารถเริ่มต้นและดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ เพื่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น โดยไม่ต้องอาศัยการทดลองจริงในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยสามารถแทนที่ด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Xuejuan Li, Jie Ouyang, Wen Zhou (2013) ได้ศึกษาเรื่อง “การจำลองแบบสามมิติ จากผลของความเครียดตกค้างจากความร้อน และการบิดเบี้ยวในการฉีดขึ้นรูป” ศึกษาโดยอาศัยข้อดีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และนิวรัล มีการหาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเฟสต่ออุณหภูมิ การจำลองเชิงตัวเลขของความเค้นตกค้างจากความร้อนและการบิดเบี้ยวเกิดขึ้นจริง และได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การประมวลผลต่อความเค้นตกค้างจากความร้อนและการบิดงอ ผลลัพธ์เชิงตัวเลขเป็นไปตามผลลัพธ์ในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

เชิดธวัช วรราช (2565) ได้ศึกษาเรื่อง “การจำลองการฉีดพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ” ตอนที่ 15 ได้กล่าวถึงการบิดเบี้ยวในชิ้นงานพลาสติกไว้ว่า สาเหตุพื้นฐานของการเกิดบิดเบี้ยว (warpage) คือ การการหดตัวที่แตกต่างกันบนชิ้นงาน หากชิ้นงานหดตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทางและทุกตำแหน่งของชิ้นงาน ชิ้นงานนั้นจะเพียงแค่อ่อนตัวแต่จะไม่เกิดการบิดเบี้ยว (warpage) ในงานวิจัยนี้ใช้ โปรแกรมซิมูเลชัน (Moldflow) มีแบบจำลองการทำนาย การหดตัว 3 แบบคือ ความเค้นตกค้าง (Residual Strain) ความเครียดตกค้าง (Residual Stress) และความเครียดตกค้างจริงในแม่พิมพ์ (Corrected Residual In-Mold Stress, CRIMS) ผลลัพธ์ของการหดตัวและการเกิด warpage มีความสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของข้อมูลคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะของพลาสติกแต่ละเกรด ในฐานะข้อมูลของโปรแกรมซิมูเลชันยังมีการจำแนกความสมบูรณ์หรือระดับคุณภาพของข้อมูลออกได้ 3 ระดับ คือ ระดับ Gold, Silver, และ Bronze ซึ่งเรียงลำดับตามระดับความแม่นยำของผลลัพธ์จากมาก-น้อย

ศุภชัย ดวงทองพล และ ชาคริต สุวรรณจรัส (2561) ได้ศึกษาเรื่อง การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสมผสาน CAD/CAE งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการผสมผสาน CAD/CAE สำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นงานพลาสติก ด้วยผลการวิเคราะห์ที่สามารถกำหนดรูปร่างและสภาวะของการฉีดของแม่พิมพ์ที่ออกแบบได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังจากนำแม่พิมพ์ไปผลิตและทำการฉีดพลาสติก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีคุณภาพดี และมีขนาดรูปร่างตรงตามการออกแบบในขั้นต้นโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5.02%

Lin, C. M., & Chen, Y. J. (2021) ทำการศึกษาเรื่อง “กลยุทธ์การแก้ปัญหาการเพิ่มความไม่สมดุลในแม่พิมพ์ฉีดที่มีความสมดุลทางเรขาคณิต” ปราบกฏการนี้ได้รับการศึกษาทั้งทางจำลอง

และการทดลองโดยใช้ระบบรันเนอร์ที่แตกต่างกันที่มีพารามิเตอร์ของวัสดุที่มีความหลากหลายทางอุณหภูมิและเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ มีการใช้วิธีการปรับปรุงทั้งสามวิธี คือ Response Surface Methodology (RSM), Taguchi method, และ Artificial Neural Networks (ANN) โดยทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ของกระบวนการ รวมถึงรูปทรงของระบบรันเนอร์ เพื่อวัดการกระจายไม่สมดุลในการกระทำของแม่พิมพ์และพารามิเตอร์เป็นตัววัดในการปรับปรุง สรุปว่าทุกวิธีการปรับปรุงได้เสริมสมบูรณ์ในการลดการกระจายไม่สมดุลในการกระทำของแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการ Artificial Neural Networks จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และขั้นตอนวิธีสร้างสมอง (Brain Construction Algorithm - BSM) ถูกแนะนำเพื่อการแก้ไขปัญหาการกระจายไม่สมดุลในกระบวนการนี้

กัชย ไทยไชนนต. (2552) “การปรับปรุงคุณภาพการฉีดพลาสติก โดยวิธีการของ ทากูชิ” งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการศึกษาและปรับตั้งค่าการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ เพื่อให้ความยาวของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายของลูกค้า การทดลองใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์แบบสุ่มเพื่อตรวจสอบปัจจัยที่สำคัญ และผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของความยาวของชิ้นงานเข้าใกล้กับค่าเป้าหมายของลูกค้า ดังนั้น สามารถปรับตั้งค่าการฉีดพลาสติกให้เหมาะสมได้โดยพิจารณาอุณหภูมิและแรงดันในการฉีดที่แนะนำ

งานวิจัยอ้างอิงเหล่านี้เป็นการสร้างและใช้แบบจำลองในกระบวนการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยวิธี CAE (Computer Aided Engineering) เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์การบิดเบี้ยวของชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นระบบ ทั้งหมดนี้เป็นการศึกษาที่มุ่งเน้นการปรับปรุงและปรับตั้งค่ากระบวนการฉีดพลาสติก และกระบวนการที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและความแม่นยำสูงขึ้นโดยใช้การศึกษาการผลาน CAD/CAE เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ใช้วิธีการการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการต่าง ๆ RSM, Taguchi method, รวมถึงการศึกษากการบิดเบี้ยวของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยซอฟต์แวร์ชนิดเดียวกัน คือ Moldex3D และซอฟต์แวร์อื่น คือ Moldflow

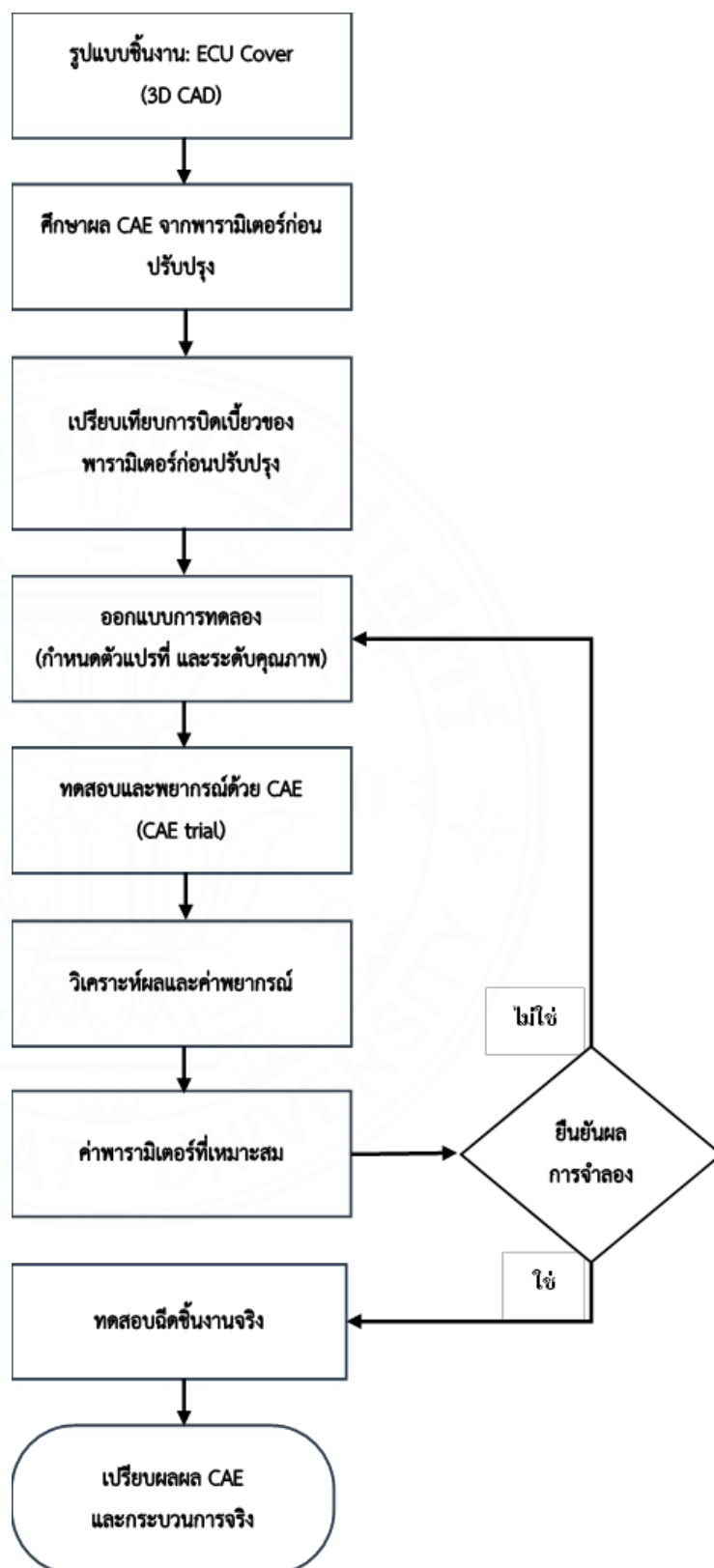
บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเรื่องการพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE กรณีศึกษาชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ข้อมูลการจำลองการด้วยโปรแกรม Moldex3D และนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับการปรับตั้งที่เครื่องจักรเพื่อลดปัญหาในการผลิต สำหรับวิธีการดำเนินการวิจัยได้กำหนดดังนี้

- 3.1 ลักษณะการออกแบบของชิ้นงานตัวอย่าง
- 3.2 พารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง และการบิดเบี้ยวของชิ้นงานตัวอย่าง
- 3.3 การจำลองพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุงด้วย และหาค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานด้วย CAE
- 3.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว
- 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
- 3.6 การเตรียมแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ

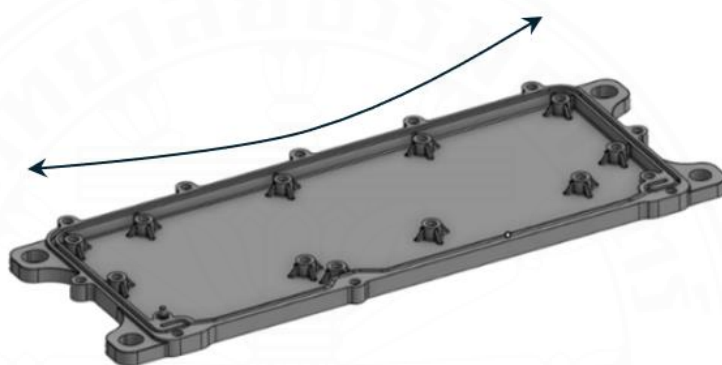
โมเดลการทดลองสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานตามแผนผังดังภาพที่ 3.1 งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการใช้โมเดล 3 มิติของ ECU Cover (3D CAD) และนำเข้าสู่การวิเคราะห์ผลด้วย CAE จากพารามิเตอร์ก่อนการปรับปรุงช่วยให้เราทราบถึงผลกระทบ ความไม่สมบูรณ์และข้อบกพร่องของกระบวนการ โดยเน้นการศึกษาผลลัพธ์การบิดเบี้ยวของชิ้นงานก่อนการปรับปรุง จากนั้นออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่สำคัญและระดับคุณภาพที่ต้องการ เพื่อช่วยให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์และการตอบสนองของแต่ละตัวแปรด้วยการทดลองและหาค่าพยากรณ์ โดยใช้ผลจาก CAE หลังจากได้พารามิเตอร์พยากรณ์ปรับปรุงที่เหมาะสม การทดสอบด้วยกระบวนการจริงช่วยให้เราเข้าใจและประเมินประสิทธิภาพของการจำลองด้วย CAE



ภาพที่ 3.1 โมเดลการทดลอง

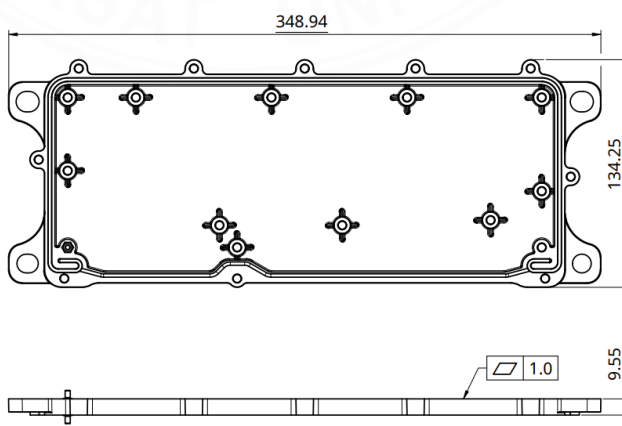
3.1 ลักษณะการออกแบบของชิ้นงานตัวอย่าง

ชิ้นงานตัวอย่างมีการออกแบบเพื่อประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้แก่ แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และฝาครอบ ดังนั้น ตำแหน่งของจุดประกอบชิ้นงานร่วมจึงมีความสำคัญ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดค่าความเรียบ (Flatness) ของชิ้นงานซึ่งหากบิดเบี้ยวมากกว่าค่าที่กำหนดอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ ประกอบกับการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อขนาดความกว้าง และความยาวของชิ้นงานด้วย ดังภาพที่ 3.2



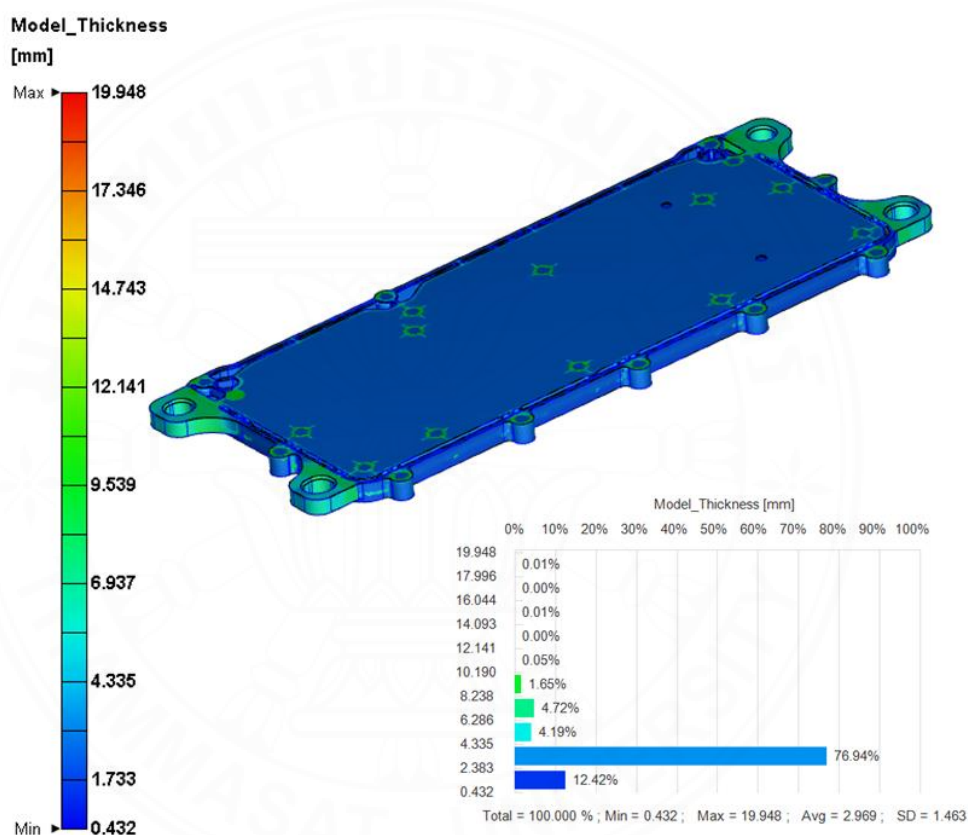
ภาพที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานแบบ 3 มิติ

ลักษณะของชิ้นงานและทิศทางการบิดเบี้ยวดังภาพที่ 3.2 รูปร่างโดยทั่วไปทั้งด้านนอกที่มีลักษณะผิวนูนเรียบ และด้านในของชิ้นงานที่มีรูเพื่อร้อยสกรูกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ค่าการหดตัวที่กำหนดคือ 0.5% ตามคุณสมบัติของวัสดุโดยมีขนาดกำหนดดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แบบชิ้นงาน

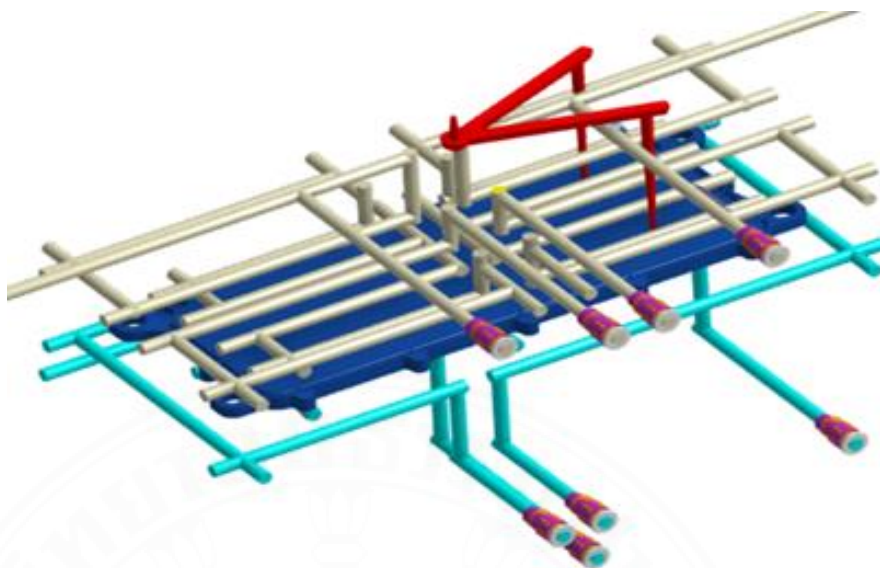
แบบชิ้นงานมีขนาด (X × Y × Z) คือ 134.25 × 348.94 × 9.55 มิลลิเมตร กำหนดขนาดของชิ้นงานในแนวแกนที่ใช้ในการประกอบไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งหากชิ้นงานมีการบิดเบี้ยวอยู่ในค่าพิกัดนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานใด ๆ จากภาพที่ 3.3 สามารถสังเกตได้ว่าชิ้นงานมีตำแหน่งใช้งานเพื่อประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ตลอดทั้งในแนวกว้าง แนวยาว มีรูปร่างของสัน รู้อยู่นูน และจุดจับยึดต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความหนาที่ต่างกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 3.4 วิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Moldex3D

วิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานด้วย Moldex3D ดังภาพที่ 3.4 ความต่างของความหนาชิ้นงานและข้อมูลการกระจายตัวของความหนาโดยรวม ซึ่งค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.43 มิลลิเมตร ค่าที่หนาสุดประมาณ 9 มิลลิเมตร และค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานส่วนใหญ่จะประมาณ 2.96 มิลลิเมตร

การออกแบบพิมพ์ใช้ทางวิ่งแบบเย็น (Cold runner) และทางเข้าน้ำพลาสติกแบบเข็ม (Pinpoint gate) ถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ด้วยน้ำ



ภาพที่ 3.5 ระบบหล่อเย็นและเกตของชิ้นงานทดสอบ

จากภาพที่ 3.5 สังเกตได้ว่าทางวิ่งของพลาสติกหลังจากผ่านทางฉีดแล้วจะแยกเป็นสองทางเข้าสู่ตัวชิ้นงาน ส่วนระบบระบายความร้อนใช้ระบบน้ำวนโดยกำหนดจุดน้ำเข้าและน้ำออกฝั่งละสองคู่ที่แม่พิมพ์ด้านตัวเมีย (Cavity) และด้านตัวผู้ (Core)

3.2 พารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง และการบิดเบี้ยวของชิ้นงานตัวอย่าง

3.2.1 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้งานจริง และใช้ในการทดลอง

การผลิตปัจจุบันใช้เครื่องฉีดขนาด 450 ตันยี่ห้อ Sodick ข้อมูลและคุณสมบัติโดยรวมของเครื่องจักรมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เดือนปีที่ผลิตเครื่องจักรคือ พฤษภาคม 2558 ข้อมูลด้านเทคนิค และประสิทธิภาพของเครื่องจักรมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติเฉพาะของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตและทดลอง

รายการ	สมบัติเฉพาะ
Brand	Sodick
Model	TR450EH2
Max. clamping force (kN)	4410
Screw diameter (mm)	50L
Max. injection pressure (MPa)	166.6
Theoretical injection volume (cm ³)	621
Injection rate (cm ³ /s)	847
Max. injection speed mm/s	300
Max. screw revolution (rpm)	200

เครื่องฉีดพลาสติกชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องฉีดความเร็วสูงซึ่งมีอัตราไหล และความเร็วของระบบฉีด ดังตารางที่ 3.1 เป็นข้อมูลในโปรแกรม Moldex3D เช่นกัน โดยใช้เป็นฐานข้อมูลของ CAE ในการประมวลผลทดลอง

3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตก่อนปรับปรุง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตปัจจุบันได้รับการปรับแต่งโดยช่างชำนาญจากประสบการณ์เพื่อให้สามารถขึ้นผลิตได้ และค่าแนะนำคือข้อมูลที่ระบุไว้ในเอกสารทางเทคนิคของวัสดุจากผู้ผลิตวัสดุ ตารางที่ 3.2 เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิต

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ฉีดสำหรับ ABS เกรด VH0815

พารามิเตอร์	ค่าปรับตั้ง	ค่าแนะนำ
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	230	190-230
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	90	40-70
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (°C)	75	70-80
อุณหภูมิอบไล่ความชื้น (°C)	80	60-90
เวลาอบไล่ความชื้น (Hrs)	4	2-4
เวลาหล่อเย็น (sec)	30	-
ความดันฉีด (MPa)	117	98
ความดันด้านสกรู (MPa)	3.3	0.98-2.45

ค่าแนะนำดังตารางที่ 3.2 สามารถใช้ได้เฉพาะในกรณีทำงานไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูง แต่ละตัวแปรที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกมีความสำคัญและมาจากแหล่งที่มีการศึกษาและประสบการณ์ในการผลิต ดังนี้

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุพลาสติกถูกทำให้ละลายและเตรียมพร้อมสำหรับการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ การตั้งค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ถูกต้องมีผลต่อคุณภาพและความสมดุลของชิ้นงานที่ผลิตออกมา

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) เป็นอุณหภูมิที่ใช้สำหรับควบคุมการหล่อเย็นของวัสดุพลาสติกในแม่พิมพ์ การตั้งค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์อย่างเหมาะสมมีผลต่อการสร้างรูปแบบของชิ้นงานและการเป็นรูปที่สมบูรณ์

อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Part Ejection Temperature) เป็นอุณหภูมิที่ชิ้นงานเซ็ดตัวและพร้อมปลดออกจากแม่พิมพ์ การตั้งค่าอุณหภูมิปลดชิ้นงานที่เหมาะสมจะช่วยลดการเสียตทานของแม่พิมพ์และชิ้นงาน

อุณหภูมิอบไล่ความชื้น (Dryer Temperature) เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบไล่ความชื้นของวัสดุพลาสติก การตั้งค่าอุณหภูมิอบไล่ความชื้นที่เหมาะสมช่วยลดความชื้นภายในวัสดุและป้องกันการเกิดปัญหาด้านความแข็งแรง และความสวยงาม

เวลาอบไล่ความชื้น (Dryer Time) เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการอบไล่ความชื้นของวัสดุพลาสติก การตั้งค่าเวลาอบไล่ความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้วัสดุพลาสติกมีความแข็งแรงและคงทนต่อสภาพแวดล้อม

เวลาหล่อเย็น (Cooling Time) เป็นระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำให้ชิ้นงานเย็นลงหลังจากการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ การตั้งค่าเวลาหล่อเย็นที่เหมาะสมสามารถลดเวลาการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

ความดันฉีด (Injection Pressure) เป็นความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ การตั้งค่าความดันฉีดที่เหมาะสมสามารถควบคุมการกระจายของพลาสติกเหลว และคุณภาพของชิ้นงาน

ความดันต้านสกรู (Screw Resistance Pressure) เป็นความดันที่ใช้สำหรับท่ายสกรูในกระบวนการฉีดพลาสติก การตั้งค่าความดันต้านสกรูที่เหมาะสมสามารถช่วยให้การฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอและมีปริมาตรคงที่

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดด้วยพารามิเตอร์ปัจจุบันต้องมีการใช้อุปกรณ์ตัดชิ้นงาน หลังปลดจากแม่พิมพ์ดังภาพที่ 3.6 เพื่อแก้ปัญหการบิดเบี้ยวเพิ่มเติมหลังจากชิ้นงานเซ็ดตัวแล้ว

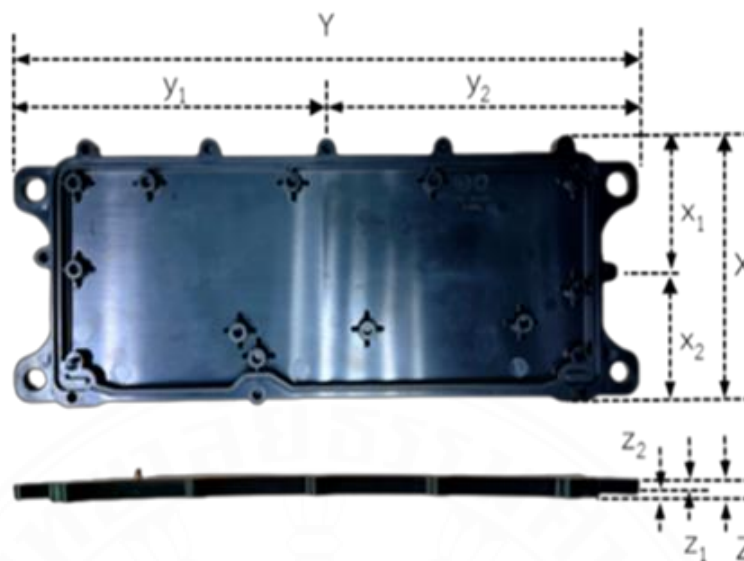


ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์ตัดชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้ยังมีชิ้นงานบางตัวที่ยังตรวจเจอว่าบิดเบี้ยวมากกว่าค่ากำหนดในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพซึ่งต้องทดสอบประกอบกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ 100% เพื่อป้องกันการหลุดรอดไปหาลูกค้า

3.2.3 การหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงานจริง

หลังจากผ่านกระบวนการฉีดแล้วและหากไม่นำชิ้นงานเข้าตัดโดยอุปกรณ์จับยึด ตัวชิ้นงานจะเกิดการบิดเบี้ยวในทิศทางทั้งด้านกว้าง และด้านยาว ทำให้ไม่สามารถประกอบกับชิ้นส่วนอื่นได้ โดยชิ้นงานที่บิดเบี้ยวมากกว่า 1 มิลลิเมตร จะไม่สามารถยอมรับได้ในกระบวนการผลิต



ภาพที่ 3.7 การหัดตัวและบิตเปี้ยวของชิ้นงานจริง

ชิ้นงานในกระบวนการผลิตจะมีการบิตเปี้ยวหลักในทิศทางดังภาพที่ 3.7 สามารถหาค่าการหัดตัว และบิตเปี้ยวดังสมการต่อไปนี้

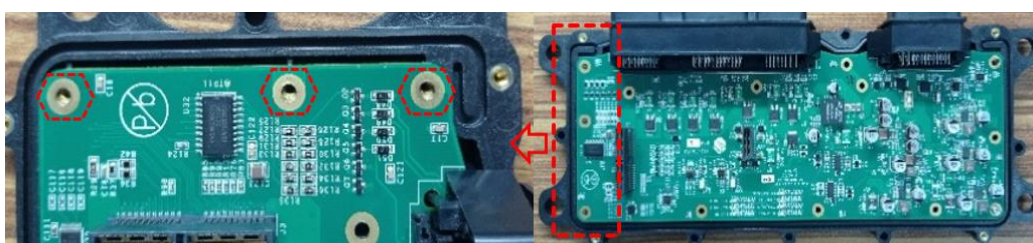
$$\Delta X = X - (x_1 + x_2) \quad (10)$$

$$\Delta Y = Y - (y_1 + y_2) \quad (11)$$

$$\Delta Z = Z - (z_1 + z_2) \quad (12)$$

เมื่อ X, Y, Z คือ ขนาดที่ออกแบบและ $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ คือ ขนาดชิ้นงานจริง หลังจากหัดตัวที่อุณหภูมิห้อง

ผลกระทบจากชิ้นงานบิตเปี้ยวคือไม่สามารถประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ปัญหาแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถวางแนบสนิทกับพื้นผิวที่กำหนด และตำแหน่งรูมีการเยื้องทำให้ไม่สามารถขันสกรูยึดได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การเยื้องของรูยึดสกรูระหว่างแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากชิ้นงานบิตเปี้ยว

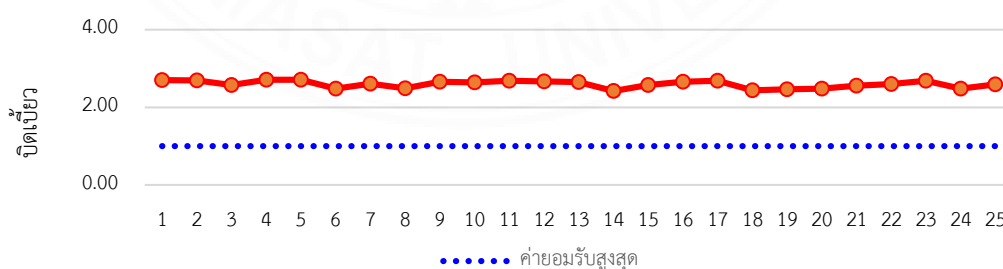
การที่รูสกรูของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานไม่ตรงกันดังภาพที่ 3.8 หากมีการฝืนขันสกรูยึดให้แน่นจะทำให้เกิดการเสียดสีของสกรูกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความร้อนทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ นอกจากนี้แล้วยังเกิดปัญหาตัวฝาปิดพลาสติกซึ่งไม่สามารถปิดได้สนิทดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การปิดไม่สนิทและเกิดช่องว่าง (GAP) จากชิ้นงานบิดเบี้ยว

ช่องว่างระหว่างชิ้นงานดังภาพที่ 3.9 เป็นสาเหตุให้กล่องควบคุมควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากการร้าวซึม และฝุ่นจากภายนอกจะเข้าจับกับตัวแผ่นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้ตัวผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหาย

ความบิดเบี้ยวของชิ้นงานจริงที่ไม่ใช้อุปกรณ์จับยึดมีการบิดเบี้ยว ตั้งแต่ 2.42 มิลลิเมตร สูงสุด 2.71 มิลลิเมตร และไม่สามารถยอมรับได้ในการผลิต

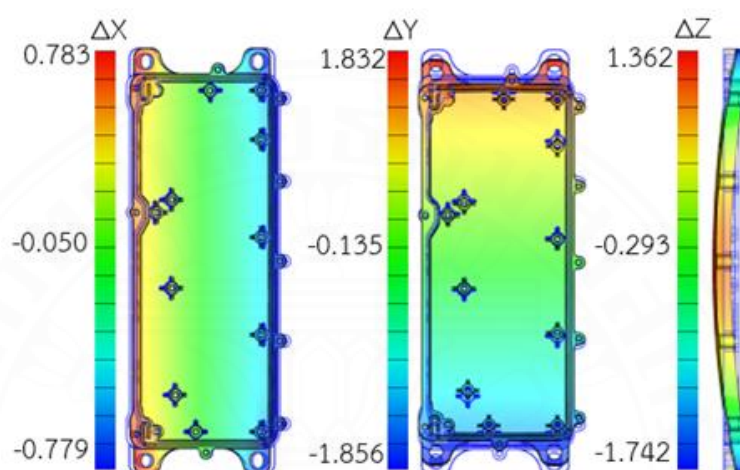


ภาพที่ 3.10 ค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่วัดได้ระหว่างผลิต

กราฟดังภาพ 3.10 ค่าบิดเบี้ยวที่สุ่มวัดจากตัวอย่างชิ้นงาน 25 ชิ้น เทียบกับขอบเขตค่ายอมรับ สูงสุดที่ 1 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการฉีดอย่างเดียวไม่สามารถควบคุมการบิดเบี้ยวของชิ้นงานให้เป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบได้จึงเกิดปัญหาการทำงานซ้ำซ้อนเพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน

3.3 การจำลองพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุงด้วย และหาค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานด้วย CAE

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ผลิต ของเครื่องจักรมาทำการศึกษาการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ด้วยโปรแกรม Moldex3D ได้ผลดังนี้คือ



ภาพที่ 3.11 การหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงานทดสอบด้วย CAE ก่อนปรับปรุง

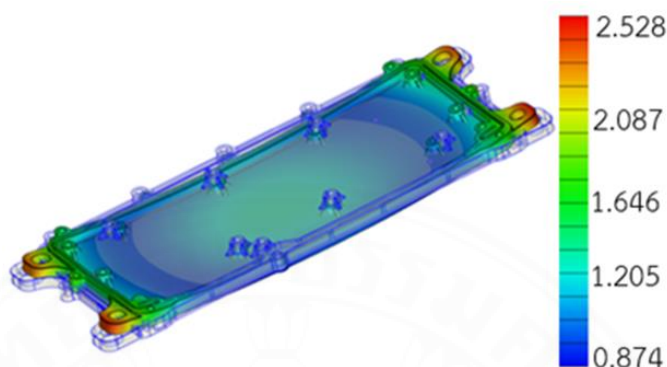
จากภาพที่ 3.11 พบว่าชิ้นงานไม่เกิดการบิดเบี้ยวในแนวแกน X, Y การเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นในทิศทางนี้ค่อนข้างสมมาตรเป็นการหดตัวให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงเท่านั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน Z พบว่า ชิ้นงานมีการการหดตัวและบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน ผลการเปลี่ยนแปลงสรุปดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวแกนของพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง

ทิศทาง	Min (มม)	Max (มม)	เปลี่ยนแปลงรวม (Max-Min)
X	-0.779	0.783	1.562
Y	-1.856	1.832	3.688
Z	-1.742	1.362	3.104

ระยะการเปลี่ยนแปลงรวม X คือ 1.562 มิลลิเมตร Y คือ 3.688 มิลลิเมตร และ Z คือ 3.104 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาแบบ 3 มิติ สัดส่วนการหดตัวทั้งสามทิศทางไม่เป็นไปแนวทางเดียวกัน และมีสัดส่วนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการบิดเบี้ยวรวมซึ่งมีผลจากการหดตัวที่สอดคล้องกับผลของชิ้นงานจริงเช่นกันโดยผลการจำลองวิเคราะห์ด้วย CAE แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การบิดเบี้ยวโดยรวมแบบ 3 มิติทดสอบด้วย CAE

จากภาพที่ 3.12 ค่าที่ได้จากการจำลองแบบค่าพารามิเตอร์ในเบื้องต้นมีค่าดังนี้ ค่าการบิดเบี้ยวรวมสูงสุด 2.528 มิลลิเมตร

3.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว

การเกิดบิดเบี้ยวในชิ้นงานพลาสติกมีหลายสาเหตุ และแนวทางการแก้ไขปัญหามีการทดลองจากผู้ผลิตและสถาบันที่เชี่ยวชาญด้านงานฉีดพลาสติกซึ่งยกตัวอย่างในหัวข้อถัดไป

3.4.1 สมมุติฐานที่ทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว

การเกิดการบิดเบี้ยวในชิ้นงานพลาสติกเป็นปัญหาที่พบอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีสาเหตุหลายประการและมีแนวทางในการแก้ไขที่แตกต่างกันไป การวิเคราะห์ปัญหานี้จึงเริ่มต้นด้วยการสร้างสมมุติฐานเกี่ยวกับสาเหตุของการบิดเบี้ยวในชิ้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายสาเหตุตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 สมมุติฐานของการบิดเบี้ยวในชิ้นงานตัวอย่าง

สาเหตุของการบิดเบี้ยว	ความสอดคล้อง	ตัวแปรที่มีผล	ตัวแปรหลัก
ความต่างของอัตราหล่อเย็น	ชิ้นงานมีความหนาที่แตกต่างกันในหลายตำแหน่ง	เวลาหล่อเย็น	อุณหภูมิ
ระดับของของแรงดันฉีดและแรงดันย้ำไม่เหมาะสม	ขนาด และความหนาของชิ้นงานไม่คงที่	ความดันฉีด และความดันย้ำ	ความดัน
ความเครียดตกค้างจากกระบวนการผลิต	ชิ้นงานเสียรูปต่อเนื่องหลังปลดออกจากแม่พิมพ์	การหล่อเย็น ความดันฉีด และความดันย้ำ	อุณหภูมิและความดัน
การหดตัวที่ไม่สมมาตรในแต่ละระนาบ	ชิ้นงานส่วนที่หนายังมีการหดตัวต่อเนื่อง	อุณหภูมิปลดชิ้นงาน และอุณหภูมิห้อง	การหดตัวเชิงปริมาตร

ความต่างของอัตราหล่อเย็น สมมุติฐานว่าการบิดเบี้ยวเกิดจากความต่างของความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหล่อเย็นลดลง และเกี่ยวข้องโดยตรงกับอุณหภูมิของกระบวนการ

ระดับของของแรงดันฉีดและแรงดันย้ำไม่เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาของชิ้นงานแบบกะทันหันอาจทำให้ความดันฉีดและความดันย้ำไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อปริมาตรและการหดตัว

ความเครียดตกค้างจากกระบวนการผลิต ความเครียดที่สะสมในชิ้นงานหลังจากกระบวนการฉีดอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหลังจากการปลดออกจากแม่พิมพ์ โดยความเครียดนี้มีความเชื่อมโยงกับอุณหภูมิและความดันในกระบวนการผลิต

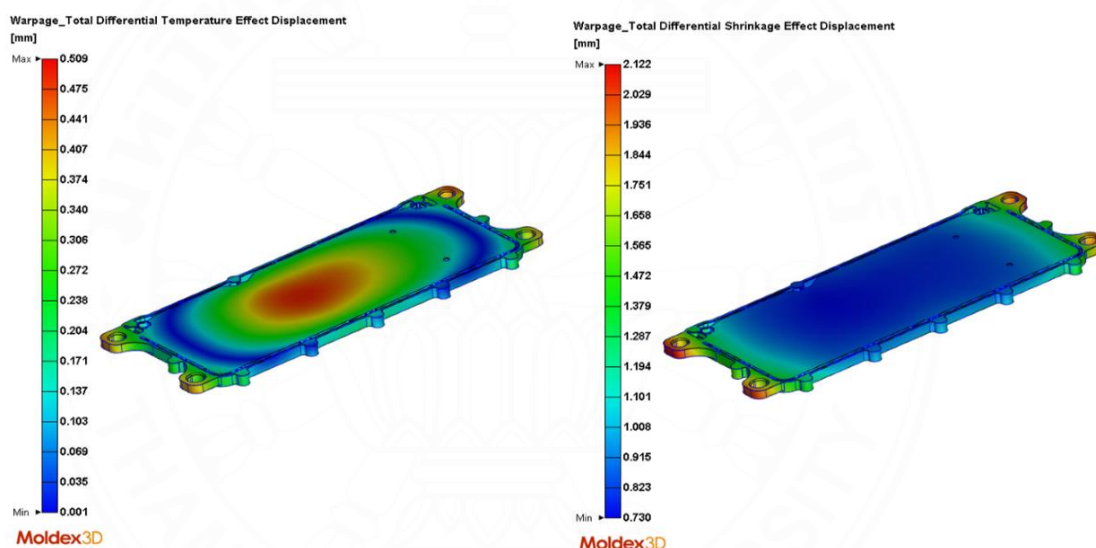
การหดตัวที่ไม่สมมาตรในแต่ละระนาบ สมมุติฐานว่าชิ้นงานยังมีการหดตัวต่อเนื่องที่ไม่สมมาตรในระหว่างการคายความร้อน ซึ่งส่งผลต่อการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน โดยการหดตัวนี้มีความเชื่อมโยงกับอุณหภูมิปลดชิ้นงานและอุณหภูมิห้องขณะทำงาน

จากสมมุติฐานข้างต้นสามารถเห็นว่าปัจจัย และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรมีความสำคัญในการกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาการบิดเบี้ยวในชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี และกราฟความสัมพันธ์ PVT

3.4.2 การบิดเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE

จากการจำลองสภาพการผลิตจริงด้วยซอฟต์แวร์ Moldex3D แบ่งการวิเคราะห์สาเหตุของการบิดเบี้ยวในชิ้นงานออกเป็นสองส่วนคือ

การบิดเบี้ยวจากการหดตัวคำนวณจากการกระจายการหดตัวตามปริมาตรเฉลี่ยของความหนาบนระนาบ โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 8 และการเปลี่ยนแปลงขนาดจากผลของอุณหภูมิที่ต่างกันหลังจากที่ชิ้นส่วนถูกปลดออกจากแม่พิมพ์และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 9 ผลจากทั้งสองปัจจัยสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและบิดเบี้ยวดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 การบิดเบี้ยวที่เกิดจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (ซ้าย) และจากผลของการหดตัวเชิงปริมาตร (ขวา)

จากภาพที่ 3.13 ผลของความแตกต่างของอุณหภูมิ และการหดตัวเชิงปริมาตร เป็น 2 ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดระยะการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์และส่งผลต่อการบิดเบี้ยว สามารถรวบรวมค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดเบี้ยวดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.5 ผลกระทบที่ทำให้บิดเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE ก่อนปรับปรุง

ผลกระทบ	Min	Max	เปลี่ยนแปลงรวม (Max-Min)
อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (มม)	0.001	0.509	0.508
การหดตัวเชิงปริมาตร (มม)	0.730	2.122	1.392

ผลจากการเปลี่ยนแปลงดังตาราง 3.5 จะส่งผลให้ค่าเปลี่ยนแปลงขนาดรวมและบิดเบี้ยวเป็น 2.528 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการหดตัวเชิงปริมาตรรวมเป็น 1.392 มิลลิเมตร และเกิดจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 0.508 มิลลิเมตร

ผลจากตารางที่ 3.5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการหดตัวเชิงปริมาตรส่งผลกระทบมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากพิจารณาจากระยะการหดตัวโดยรวมที่สัดส่วนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการหดตัวเชิงปริมาตร มีสัดส่วน 0.508 : 1.392 หรือเป็นร้อยละ 27 : 73 ตามลำดับ และสามารถให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเพื่อกำหนดเป้าหมายดังนี้

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง = ร้อยละ 27

การหดตัวเชิงปริมาตร = ร้อยละ 73

3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์สมมุติฐานที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานตัวอย่างจะพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดปัญหาคืออุณหภูมิ ปริมาตรและความความดัน (PVT) ในงานวิจัยฉบับนี้จึงอธิบายการเลือกพารามิเตอร์และตัวแปร กำหนดตัวแปรขอบเขตของตัวแปร และวิธีการทาง CAE ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.5.1 การเลือกพารามิเตอร์ในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi Method) เพื่อศึกษาผลของการบิดเบี้ยวของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก การเลือกพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบสำคัญเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จะอธิบายถึงเหตุผลในการเลือกพารามิเตอร์ 3 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) และเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) รวมถึงการกำหนดค่าความดันย้ำ (Holding Pressure) ในการทดลองนี้

1. อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิหลอมเหลวเป็นตัวแปรตรง (Temperature) ตามความสัมพันธ์ของ PVT ไดอะแกรม ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรและการบิดเบี้ยวของชิ้นงานโดยตรง การควบคุมอุณหภูมิหลอมเหลวอย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน

2. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการหดตัวและปริมาตรของชิ้นงาน (Volume) ทั้งก่อนและหลังการปลดชิ้นงาน การควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้เหมาะสมจะช่วยลดการบิดเบี้ยวและการหดตัวของชิ้นงาน

3. เวลาหล่อเย็น (Cooling Time) เวลาหล่อเย็นเป็นค่าผันตรงที่เกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาหล่อเย็นที่เหมาะสมจะช่วยให้ชิ้นงานมีความเสถียรและลดการบิดเบี้ยวได้

4. แรงดันฉีด (Injection Pressure) แรงดันฉีดถูกกำหนดให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของเครื่องจักรและคำแนะนำจาก CAE โดยใช้ค่าความดันฉีดที่ 117 MPa ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถรองรับได้โดยเครื่องฉีดพลาสติก (ค่าความดันฉีดสูงสุดที่เครื่องฉีดสามารถทำได้คือ 167 MPa) โดยการเลือกช่วงการเปลี่ยนเฟสที่ 98% ของปริมาตรการฉีด

5. แรงดันย่ำ (Holding Pressure) สำหรับค่าความดันย่ำ (Holding Pressure) ถูกกำหนดไว้ที่ 5 MPa เนื่องจากน้ำหนักของชิ้นงานมีค่าคงที่แล้ว และทางฉีดของชิ้นงานมีการแข็งตัวเต็มที่แล้ว การเพิ่มแรงดันย่ำเกินความจำเป็นอาจส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานและทรัพยากรโดยไม่จำเป็น และมีงานวิจัยหลายงานที่ระบุว่า การเพิ่มแรงดันย่ำที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวและเกิดความเครียดตกค้างในชิ้นงานได้ (Hakimian & Sulong, 2012) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงไม่เลือกเปลี่ยนค่าความดันย่ำและควบคุมให้คงที่ที่ 5 MPa

3.5.2 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดลอง

หลังจากเลือกพารามิเตอร์ในการทดลองนี้แล้ว ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาหล่อเย็น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบิดเบี้ยวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ตัวแปรเกี่ยวกับอุณหภูมิมีสองส่วน คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ด้วยสมบัติของวัสดุโดยผู้ผลิต และ Moldex3D อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ที่แนะนำ คือ 75 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิแม่พิมพ์แนะนำที่ 40-70 องศาเซลเซียส และกำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวแนะนำที่ 190-230 องศาเซลเซียส สามารถหาเวลาหล่อเย็นชิ้นงานจากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 3.6 เวลาหล่อเย็น (tk) จากการคำนวณ

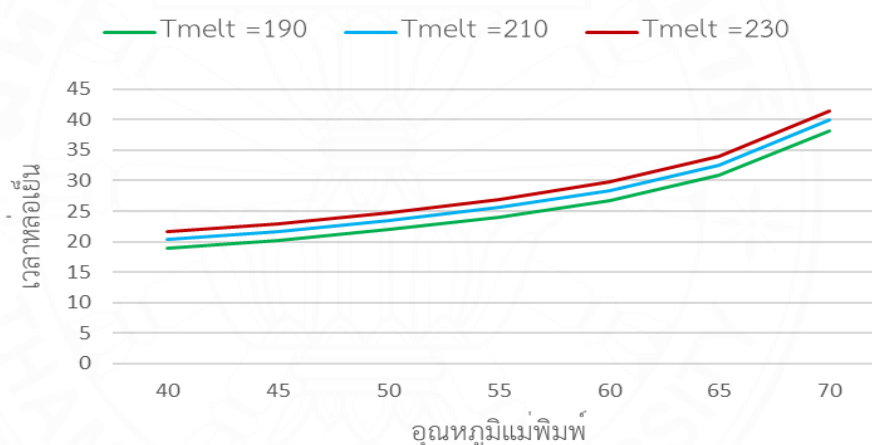
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เวลาหล่อเย็น (sec)
75	40	190	19
75	55	210	26
75	70	230	42

ค่า $\alpha = 0.08$ (ตาราง 2.6)

$s = 2.96$ มิลลิเมตร

$T_{\text{eject}} = 75$ องศาเซลเซียส

เมื่อคำนวณแบบละเอียดและกำหนดค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์แบบแปรผันสามารถแสดงแนวโน้มของเวลาหล่อเย็นดังภาพที่ 3.14 โดยภาพนี้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของเวลาหล่อเย็นขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันในช่วงเวลาหล่อเย็น โดยมีค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นแกน X และเวลาหล่อเย็นเป็นแกน Y การทำคำนวณแบบละเอียดและการกำหนดค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์แบบแปรผันช่วยให้ใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์ปรับปรุงและปรับแต่งกระบวนการเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม



ภาพที่ 3.14 เวลาหล่อเย็นสำหรับชิ้นงานตัวอย่าง

เวลาหล่อเย็น (tk) ตารางที่ 3.6 เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณเมื่อเลือกใช้ค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิหลอมเหลวในสามช่วงค่า คือ ค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด ซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิงที่ได้จากสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Moldex3D ส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.7 ได้กำหนดเพื่อให้ CAE ทดลองผลกระทบและการตอบสนองต่อการการบิดเบี้ยว ซึ่งซอฟต์แวร์จะประมวลผลหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์บิดเบี้ยวที่ดีที่สุด โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

1. อุณหภูมิหลอมเหลว (°C): ค่าต่ำสุด 190, ค่ากลาง 210, ค่าสูงสุด 230
2. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C): ค่าต่ำสุด 40, ค่ากลาง 55, ค่าสูงสุด 70
3. อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (°C): 75 (ค่าคงที่)
4. เวลาหล่อเย็น (sec): ค่าต่ำสุด 20, ค่ากลาง 26, ค่าสูงสุด 42

การเลือกค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุดในการทดลองเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อให้การวิจัยสามารถทดสอบและวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อผลลัพธ์ได้อย่างครอบคลุม และทันที การเลือกค่าที่ต่างกันของพารามิเตอร์นี้ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถทดลองการทำงานในเงื่อนไขที่แตกต่างกันได้ ทำให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์และผลลัพธ์ได้มากขึ้น ตลอดจนช่วยในการหาขอบเขตและเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของกระบวนการทำงานในขณะที่พารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง การเลือกพารามิเตอร์นี้จึงช่วยให้ผลการทดลองมีความหมายและเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	190	210	230
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	40	55	70
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (°C)	75	75	75
เวลาหล่อเย็น (sec)	20	26	42
ค่าควบคุมคุณภาพ	เป้าหมาย		ความสำคัญ
หลุดตัวจากอุณหภูมิ	น้อยที่สุด		27%
หลุดตัวเชิงปริมาตร	น้อยที่สุด		73%

การใช้พารามิเตอร์ทดลองเหล่านี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการปรับปรุงและปรับแต่งกระบวนการเพื่อให้ CAE สามารถทำการประมวลผลและทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ที่สอดคล้องกับเป้าหมายการควบคุมคุณภาพที่กำหนดไว้ ซึ่งประกอบไปด้วยการควบคุมการหลุดตัวจากอุณหภูมิ และการหลุดตัวเชิงปริมาตร หลังจากนั้นซอฟต์แวร์ CAE จะทำการประมวลผลเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์บิดเบี้ยวที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ เหตุผลที่พารามิเตอร์ปัจจุบันใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงที่ 90°C ซึ่งมากกว่าคำแนะนำ เพราะต้องการให้ชิ้นงานมีผิวเงา แต่เมื่อพิจารณาการใช้งานแล้วพบว่า ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องมีผิวเงามากจึงสามารถใช้อุณหภูมิแนะนำในการทดลองได้ ส่วนเวลาหล่อเย็นที่ใช้ 30 sec เนื่องจากพิจารณาชิ้นงานหลังจากปลดออกแม่พิมพ์พบว่าชิ้นงานภายนอกมีการเซตตัวแล้วประกอบกับกระบวนการปกติไม่สารมมองเห็นการเย็นตัวภายในแกนกลางชิ้นงานได้

3.5.3 การกำหนดค่าในโปรแกรม Moldex3D

การวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Moldex3D เพื่อการจำลองการออกแบบแบบหลายตัวแปร (DOE) โดยใช้วิธี Taguchi Method ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทดลองและปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพและมีรายละเอียดดังนี้

1. รูปแบบของการทดลอง (DOE Method) การใช้วิธี Taguchi Method เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการทดลองและปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อผลิตภัณฑ์

2. ปัจจัยควบคุม (Control factor) มี 3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิพลาสติกเหลว และเวลาหล่อเย็น

3. ปัจจัยคุณภาพ (Quality factor) มี 2 ปัจจัย คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดจากผลของอุณหภูมิให้ค่าน้ำหนักเป้าหมายที่ร้อยละ 27 และการหดตัวเชิงปริมาตรให้ค่าน้ำหนักร้อยละ 73 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยว

4. การกำหนดค่าในการทดลอง (Experimental setup) การใช้ฟังก์ชันการออกแบบการทดลอง (DOE Wizard) ของ Moldex3D เพื่อกำหนดค่าที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้ฟังก์ชันนี้จะช่วยให้สามารถเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ด้วย Moldex3D จะมีขั้นตอนต่อไปที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีสัญญาณและการตอบสนองต่อการบิดเบี้ยว เพื่อพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าบิดเบี้ยวที่ต่ำที่สุด การใช้เทคนิคและเครื่องมือดังกล่าวช่วยให้กระบวนการวิจัยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพในการพัฒนากระบวนการ

DOE Wizard

Setting Summary

DOE Information

Name: DOE 5

Base Run: Run01

Analysis Sequence: DOE (Run cooling for mold temperature)

DOE Method: Taguchi Method

Method

Levels: 3 (2~5 or mixed level)

Control Factors: 3 (2~13)

Taguchi Array: L9(3⁴) - 9 Runs, 4 Factors with 3 Levels

Factors

#	Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3
1	Melt Temperature [°C]	190	210	230
2	Mold Temperature [°C]	40	55	70
3	Cooling Time [sec]	20	26	42

#	Quality Factor	Target	Goal	Weighting	%	Property
1	Warpage_Total Thermal Displacement [mm]	Global	Smaller	0.27	27.0%	
2	Warpage_Volumetric Shrinkage [%]	Global	Smaller	0.73	73.0%	

ภาพที่ 3.15 การกำหนดค่าโปรแกรม Moldex3D

การปรับตั้งเงื่อนไขดังภาพที่ 3.15 และการใช้ทาгуชิในการทดลองเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญสำหรับการพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. ความเร็วและความสะดวก การใช้ทาгуชิช่วยลดเวลาในการทดลอง และการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต ทำให้เกิดความสะดวกและประหยัดทรัพยากรในการทดลอง
2. ความแม่นยำ ทาгуชิช่วยให้เราสามารถควบคุมและตรวจสอบผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ ทำให้เราสามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. การทดลองเชิงกำหนดการ การใช้ทาгуชิช่วยในการทดลองช่วยให้เราสามารถวางแผนและกำหนดเวลาในการทดลองได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบ

การออกแบบ L9 เป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาการบิดเบี้ยวและหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยใช้เครื่องมือ CAE เพื่อศึกษาและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ระหว่างระดับค่าน้อย ค่ากลาง และค่าสูงสุด ซึ่งสามารถสร้างแมทริกซ์การทดลองและแสดงผลได้อย่างชัดเจนและมีประสิทธิภาพในการทดลองและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติก

3.6 การเตรียมแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ

การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการฉีดพลาสติกเครื่องมือหลักที่ใช้คือเครื่องฉีด และแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และความสำเร็จของกระบวนการ ก่อนการทดสอบเครื่องจักร และแม่พิมพ์ที่จะใช้จำเป็นต้องเตรียมอย่างเหมาะสมมีความพร้อมอย่างสมบูรณ์ เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ขั้นตอนนี้มีดังนี้

1. ตรวจสอบความพร้อมของแม่พิมพ์ การตรวจสอบการไหลเวียนของระบบหล่อเย็น ความเรียบร้อยของของผิวหน้า และความสะอาดของแม่พิมพ์โดยรวม เพื่อให้แม่พิมพ์มีความพร้อมในการทดสอบ
2. การติดตั้งแม่พิมพ์ หลังจากที่แม่พิมพ์มีความพร้อมแล้ว จะนำแม่พิมพ์ติดตั้งบนเครื่องจักร เพื่อต่อระบบปลดชิ้นงาน ระบบหล่อเย็น และเชื่อมการทำงานกับแขนกลเพื่อนำชิ้นงานออกจากเครื่องจักร
3. การทดสอบและการสอบเทียบเครื่องจักร เครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบจะต้องผ่านการสอบเทียบจากผู้ผลิตเป็นรายปี และมีความแม่นยำในการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อที่จะใช้ผลิตได้อย่างมีนัยยะสำคัญก่อน

ลักษณะแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นระบบทางวิ่งเย็น ทางเข้าน้ำพลาสติกเข้ม และมีการระบายความร้อนด้วยน้ำดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 แม่พิมพ์ที่ใช้ทดสอบ

เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบเป็นระบบผสมระหว่างไฟฟ้าและไฮดรอลิก โดยฝั่งที่ติดตั้งแม่พิมพ์ใช้ระบบขับเคลื่อนตรงด้วยไฟฟ้า ในขณะที่ชุดฉีดขับเคลื่อนและส่งกำลังด้วยระบบไฮดรอลิก ลักษณะเครื่องจักรที่ใช้ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ (Sodick TR450EH2)

การผสมระบบไฟฟ้าและไฮดรอลิกในเครื่องฉีดพลาสติกเป็นเทคโนโลยีที่นำเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการทำงาน มีจุดเด่นคือ ความแม่นยำและเร็ว ความยืดหยุ่นในการปรับความแรงและการดูแลรักษา ประหยัดพลังงานและปลอดภัยสูง



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองค่าพารามิเตอร์ด้วย CAE และการนำพารามิเตอร์พยากรณ์มาทดสอบฉีดจริง เพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ความต่างของการบิดเบี้ยวในชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความมั่นใจได้ว่าการผลของ CAE สอดคล้องกับการผลิตจริงสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสามส่วนดังนี้

4.1 พารามิเตอร์จำลองและพยากรณ์ด้วย CAE

4.2 การทดสอบด้วยกระบวนการจริง

4.3 อภิปรายผล

4.1 พารามิเตอร์จำลองและพยากรณ์ด้วย CAE

การใช้ CAE เพื่อศึกษาการบิดเบี้ยวและหาค่าพารามิเตอร์พยากรณ์โดยใช้ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณและค่าแนะนำของโปรแกรม Moldex3D ซึ่งแบ่งเป็นสามช่วงจากค่าน้อยสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด สามารถสร้างเมทริกซ์การทดลองด้วยวิธีทาคูชิ แบบ 3 ตัวแปร 3 ระดับ (L9) สำหรับการทดลองนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องของความละเอียด ความสามารถในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และประหยัดทรัพยากรในการทดลอง สามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การจำลองพารามิเตอร์ด้วย CAE

ครั้งที่	อุณหภูมิ หลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาหล่อเย็น (Sec)	หดตัวเชิง ปริมาตร (มม)	อุณหภูมิ เปลี่ยนแปลง (มม)	บิดเบี้ยว (มม)
1	190	40	20	0.980	0.178	1.163
2	190	55	26	1.057	0.126	1.17
3	190	70	42	0.955	0.073	1.057
4	210	40	26	0.990	0.113	1.141
5	210	55	42	0.967	0.062	1.024
6	210	70	20	1.432	0.525	2.639
7	230	40	42	0.970	0.054	1.012
8	230	55	20	1.186	0.408	1.871
9	230	70	26	1.345	0.432	2.250
พยากรณ์	190	40	42	0.934	0.054	0.960

เมทริกซ์พารามิเตอร์ตารางที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ออกแบบด้วยวิธีการของทาคุชิ (Taguchi Methods) โดยสร้างตารางตอบสนอง (Response Table) สำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio) และค่าเฉลี่ย (Means) เพื่อช่วยในการระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ตอบสนองและผลกระทบของแต่ละปัจจัยสามารถอธิบายความหมายของค่าในตารางดังนี้

Level คือ ระดับของปัจจัย

S/N คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน S/N ที่แต่ละระดับของปัจจัย

Delta คือ ช่วงของค่าระหว่างระดับสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งช่วยระบุปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด (ค่าช่วงที่สูงสุด)

Rank คือ อันดับของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทดลอง

Response Table for Signal-to-Noise Ratios (S/N Ratios) คือ ตารางตอบสนองสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนใช้เพื่อหาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ให้ค่าคุณภาพสูงสุด (ความทนทานต่อความผันแปร) โดยอัตราส่วน S/N กำหนดประเภทเป็น the smaller the better

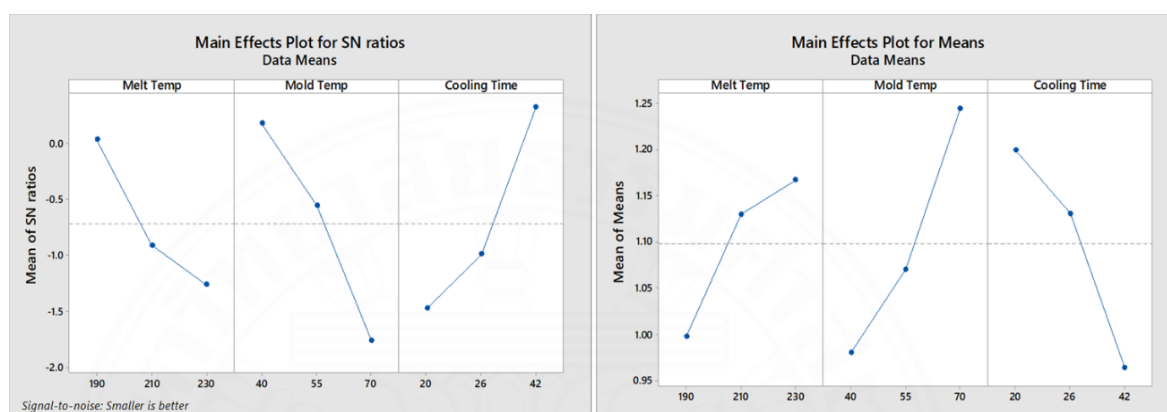
Response Table for Means ตารางตอบสนองสำหรับค่าเฉลี่ยใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่แต่ละระดับของปัจจัย เพื่อหาแนวโน้มและระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ผลการหัตถ์เชิงปริมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น

Level	Response Table for Signal to Noise Ratios (Smaller is better)			Response Table for Means		
	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time
1	0.0313	0.17578	-1.47503	0.9973	0.98	1.1993
2	-0.91336	-0.55724	-0.98955	1.1297	1.07	1.1307
3	-1.26386	-1.76446	0.31866	1.167	1.244	0.964
Delta	1.29516	1.94024	1.79368	0.1697	0.264	0.2353
Rank	3	1	2	3	1	2

จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp) มีผลกระทบมากที่สุดต่อการหัตถ์เชิงปริมาตรของชิ้นงาน (Delta = 1.9402 สำหรับ Signal to Noise Ratios และ

0.2640 สำหรับ Means) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) มีผลกระทบรองลงมา (Delta = 1.7937 สำหรับ Signal to Noise Ratios และ 0.2353 สำหรับ Means) อุณหภูมิหลอม (Melt Temp) มีผลกระทบต่อการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยที่สุดในทั้งสองตาราง (Delta = 1.2952 สำหรับ Signal to Noise Ratios และ 0.1697 สำหรับ Means) สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean การหดตัวเชิงปริมาตร

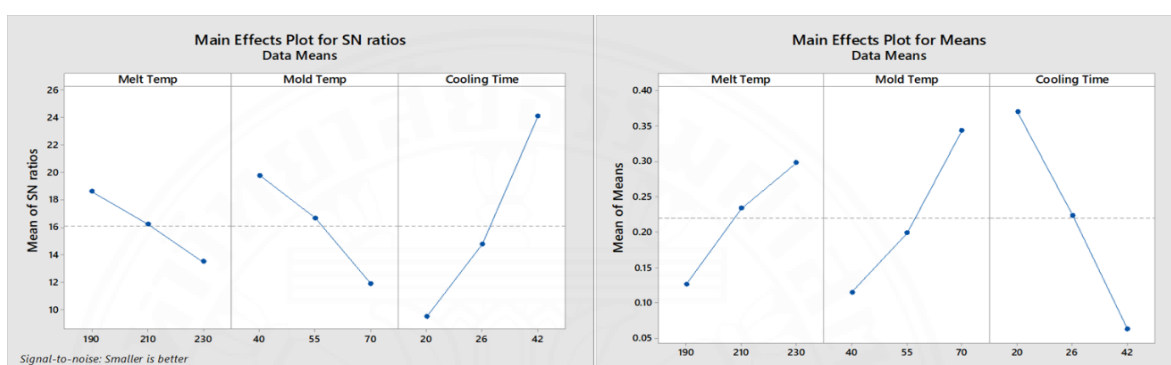
การจัดอันดับ (Rank) จากภาพที่ 4.1 ของปัจจัยทั้งสามที่ส่งผลกระทบต่อ การหดตัวเชิงปริมาตร มีลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยดังนี้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาในการหล่อเย็น และอุณหภูมิหลอมเหลว

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น

Level	Response Table for Signal to Noise Ratios (Smaller is better)			Response Table for Means		
	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time
1	18.573	19.761	9.458	0.12567	0.115	0.37033
2	16.229	16.644	14.74	0.23333	0.19867	0.22367
3	13.476	11.874	24.079	0.298	0.34333	0.063
Delta	5.096	7.887	14.621	0.17233	0.22833	0.30733
Rank	3	2	1	3	2	1

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่า เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) มีผลกระทบมากที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Delta = 14.6210 สำหรับ Signal to Noise

Ratios และ 0.3073 สำหรับ Means) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp) มีผลกระทบรองลงมา (Delta = 7.8870 สำหรับ Signal to Noise Ratios และ 0.2283 สำหรับ Means) อุณหภูมิหลอม (Melt Temp) มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยที่สุดในทั้งสองตาราง (Delta = 5.0960 สำหรับ Signal to Noise Ratios และ 0.1723 สำหรับ Means) สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังภาพต่อไปนี้



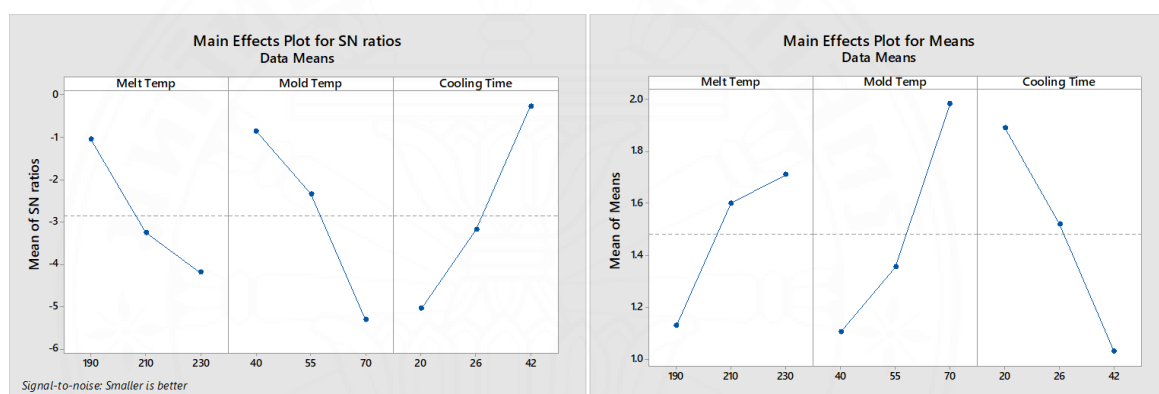
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

การจัดอันดับ (Rank) จากภาพที่ 4.2 ของปัจจัยทั้งสามที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนขนาดที่ส่งผลจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจึงมีลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยดังนี้ เวลาในการหล่อเย็น อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิหลอม

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์การบิดเบี้ยวเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น

Level	Response Table for Signal to Noise Ratios (Smaller is better)			Response Table for Means		
	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time	Melt Temp	Mold Temp	Cooling Time
1	-1.0523	-0.8536	-5.0606	1.13	1.105	1.891
2	-3.2602	-2.3371	-3.1844	1.601	1.355	1.52
3	-4.1962	-5.318	-0.2637	1.711	1.982	1.031
Delta	3.144	4.4643	4.7969	0.581	0.877	0.86
Rank	3	2	1	3	1	2

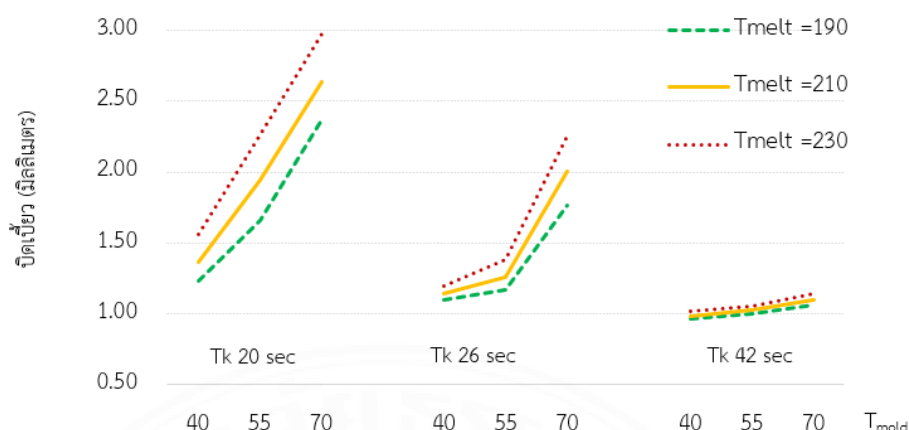
จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.4 สามารถสรุปได้ว่า เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากตาราง S/N Ratios โดยอยู่ในอันดับ 1 ด้วยค่า Delta สูงสุด คือ 4.7969 และในตาราง Means อยู่ในอันดับ 2 ด้วยค่า Delta คือ 0.8600 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากตาราง Means โดยอยู่ในอันดับ 1 ด้วยค่า Delta สูงสุดคือ 0.8770 และในตาราง S/N Ratios อยู่ในอันดับ 2 ด้วยค่า Delta คือ 4.4643 และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temp) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองปัจจัย โดยอยู่ในอันดับ 3 ทั้งในตาราง S/N Ratios (ค่า Delta คือ 3.1440) และในตาราง Means (ค่า Delta คือ 0.5810)



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot of SN ratios และ Main Effects Plot of mean การบิดเบี้ยว

ดังนั้น สามารถอธิบายความหมายจากภาพที่ 4.3 คือการปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์และเวลาในการหล่อเย็นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการลดการบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลวมีผลกระทบน้อยกว่าในการควบคุมการบิดเบี้ยว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาหล่อเย็น สามารถอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลง และการตอบสนองต่อการบิดเบี้ยวดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 การตอบสนองต่อการบิตเบี้ยววิเคราะห์ด้วย CAE

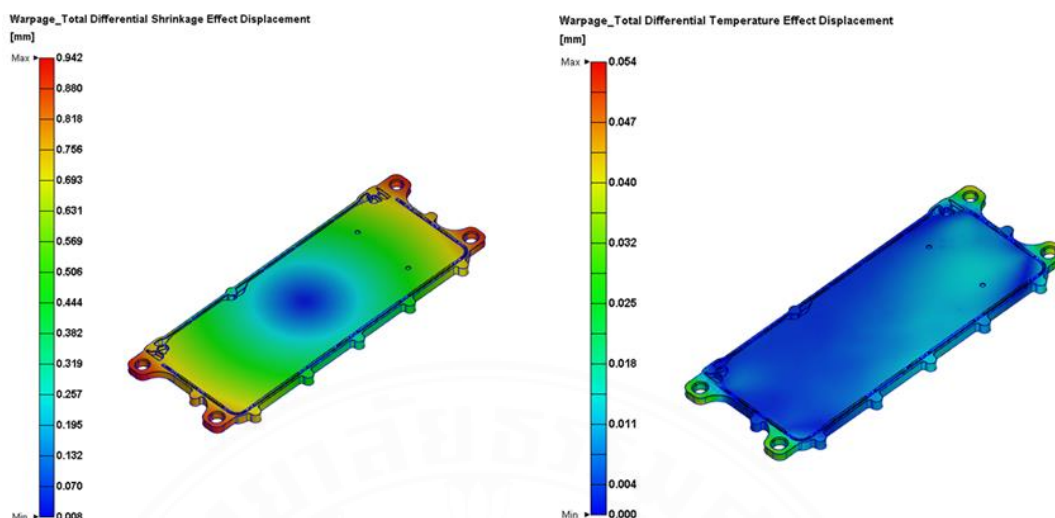
จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นมีผลให้เกิดการบิตเบี้ยวมากขึ้น ในขณะเดียวกันเวลาหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้นช่วยลดการบิตเบี้ยวลง พารามิเตอร์พยากรณ์แนะนำ อุณหภูมิหลอมเหลว (T_{melt}) 190 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_{mold}) 40 °C และเวลาหล่อเย็น (tk) 42 sec สามารถแสดงค่าบิตเบี้ยวน้อยที่สุด

การประมวลผลด้วย CAE และการออกแบบการทดลองของทาคูชิ สามารถพยากรณ์พารามิเตอร์ที่ลดการบิตเบี้ยว โดยสามารถแสดงผลจากสองปัจจัยควบคุมคุณภาพคือ การเปลี่ยนขนาดและบิตเบี้ยวที่เกิดจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และการหดตัวเชิงปริมาตร ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลกระทบที่ทำให้บิตเบี้ยวจากการวิเคราะห์ด้วย CAE พยากรณ์ปรับปรุง

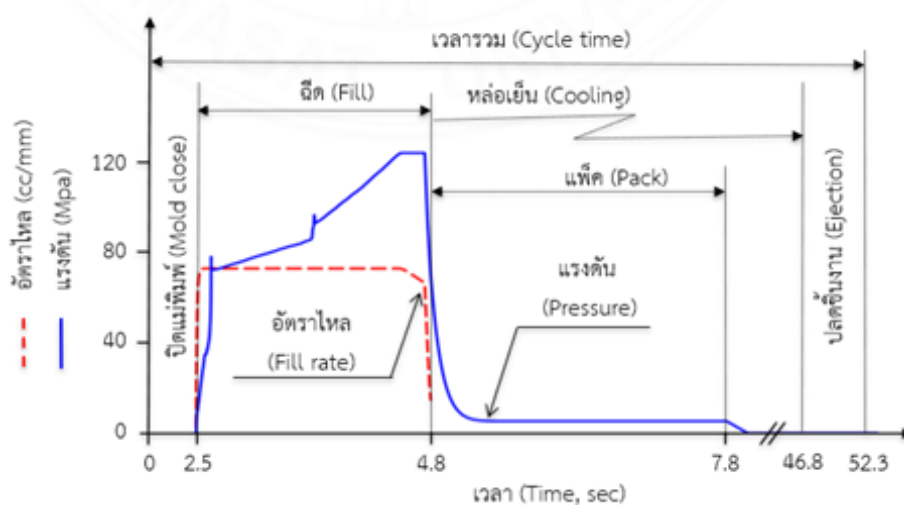
ผลกระทบ	Min	Max	เปลี่ยนแปลงรวม (Max-Min)
อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (mm)	0.000	0.054	0.054
การหดตัวเชิงปริมาตร (mm)	0.008	0.942	0.934

ผลจากตารางที่ 4.5 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดคือ 0.054 มิลลิเมตร (ก่อนปรับปรุงตารางที่ 3.4 คือ 0.508 มิลลิเมตร) ส่วนผลของการหดตัวเชิงปริมาตร พยากรณ์ปรับปรุงคือ 0.934 มิลลิเมตร (ก่อนปรับปรุงตารางที่ 3.4 คือ 1.392 มิลลิเมตร) จากพารามิเตอร์ปรับปรุงทำให้ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงขนาดทั้งแต่ละแนวแกนและแบบผลรวมลดลง สามารถแสดงการการบิตเบี้ยวที่เกิดจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และจากผลของการหดตัวเชิงปริมาตร ด้วยการประมวลแบบ 3 มิติดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 พยากรณ์ปรับปรุงการบิดเบี้ยวที่เกิดจากผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (ขวา)
และจากผลของการหดตัวเชิงปริมาตร (ซ้าย)

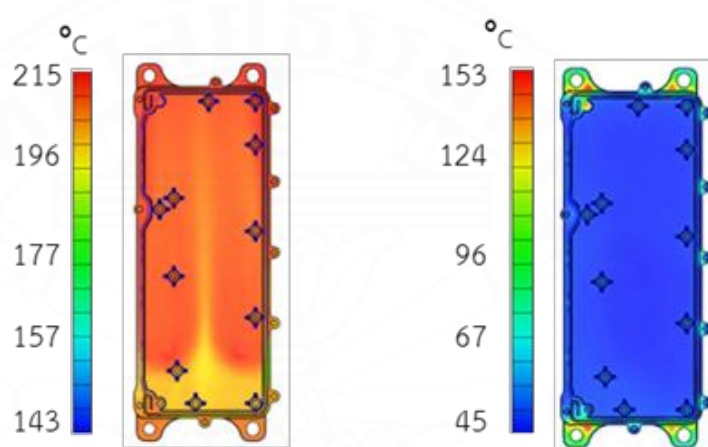
ผลของพารามิเตอร์พยากรณ์ภาพที่ 4.5 สามารถแสดงได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีส่งผลให้ขนาดเปลี่ยนแปลงน้อยลงมาก ในขณะที่การหดตัวเชิงปริมาตรที่ก็มีผลที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนแต่มีสัดส่วนลดลงที่น้อยกว่า โดยทั้งสองผลกระทบยังส่งผลทำให้ชิ้นงานยังบิดเบี้ยวอยู่ อย่างไรก็ตาม กระบวนการฉีดด้วยพารามิเตอร์พยากรณ์ด้วย CAE สามารถแสดงโปรไฟล์การไหล ระดับของแรงดันฉีด แรงดันอัด ในช่วงเวลาต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 โปรไฟล์การฉีด

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.6 อัตราไหลมีความสม่ำเสมอเท่ากับ 68.7 cc/mm ในช่วงการฉีดใช้เวลา 2.3 sec (จาก 2.5 ถึง 4.8) ในขณะที่แรงดันมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 0-70 MPa ในช่วงเริ่มต้นฉีด และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 70-117 MPa และนิ่งเมื่อขึ้นงานใกล้เต็มแม่พิมพ์ หลังจากนั้นลดลงเหลือ 5 MPa ในช่วงการแพ็ค โดยใช้เวลาแพ็ค 3 sec (จาก 4.8 ถึง 7.8) และเวลารวม 52.3 sec

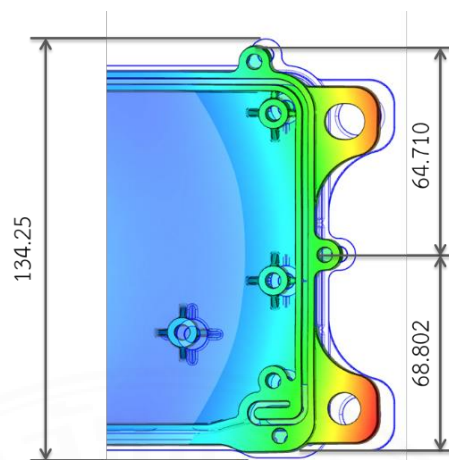
เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านอุณหภูมิระหว่างกระบวนการ โดยแบ่งเป็นช่วงการฉีด และหล่อเย็นสามารถแสดงผลดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิพลาสติกเหลวขณะฉีด (ซ้าย) และอุณหภูมิหล่อเย็นขึ้นงาน (ขวา)

อุณหภูมิพลาสติกเหลวขณะฉีดต่ำสุด 192 °C สูงสุด 213 °C และอุณหภูมิเฉลี่ย 209 °C ลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วขึ้นงานดังภาพที่ 4.4 (ซ้าย) อุณหภูมิหล่อเย็นขึ้นงานต่ำสุด 45 °C อุณหภูมิเฉลี่ย 54 °C และสูงสุด 153 °C เกิดเป็นจุดความร้อนบริเวณที่ขึ้นงานมีความหนาแน่นกว่าจุดอื่นดังภาพที่ 4.7 (ขวา)

ผลของพารามิเตอร์พยากรณ์ต่อการหดตัวในแนวแกนต่าง ๆ ส่งผลให้ขนาดของขึ้นงานมีการหดตัว สามารถแสดงขนาดที่เปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 4.8

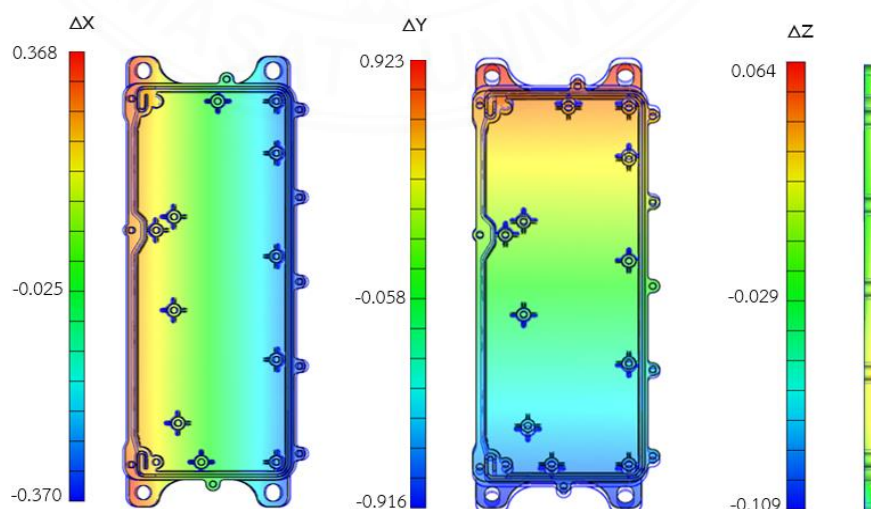


ภาพที่ 4.8 ขนาดตัดตัวแกน X

การหัดตัวที่เกิดขึ้นดังภาพ 4.8 สามารถคำนวณหาค่า (ΔX , ΔY , ΔZ) ด้วยสมการที่ 10, 11, 12 ตัวอย่างคำนวณและแทนค่าสมการสำหรับแกน X ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta X &= X - (x_1 + x_2) \\ &= 134.25 - (68.802 + 64.710) \\ &= 0.738\end{aligned}$$

การจำลองด้วย CAE สามารถแสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับสมการดังกล่าว โดยสามารถแทนค่าจากภาพที่ 4.9 ด้วยผลต่างของแกน X (Max-Min) ซึ่งให้ผลที่เท่ากัน คือ 0.738 มิลลิเมตร



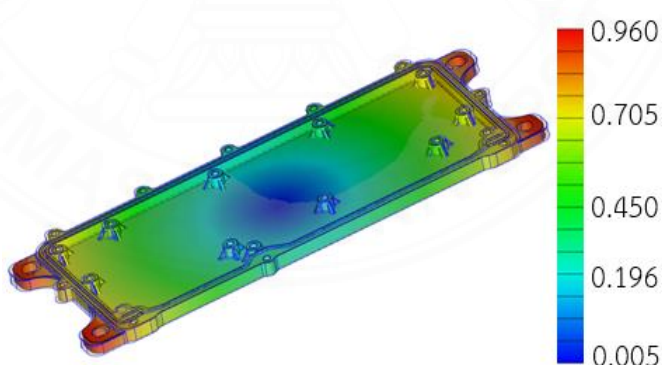
ภาพที่ 4.9 การหัดตัวและบิดเบี้ยวของพารามิเตอร์พยากรณ์ CAE

ผลที่ได้จากพารามิเตอร์พยากรณ์การเปลี่ยนแปลงขนาดแกน X คือ 0.738 มิลลิเมตร ก่อนปรับปรุง คือ 1.542 มิลลิเมตร แกน Y คือ 1.839 มิลลิเมตร ก่อนปรับปรุง คือ 3.688 มิลลิเมตร และแกน Z คือ 0.173 มิลลิเมตร ก่อนปรับปรุง คือ 3.104 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงของขนาดจากการปรับปรุงพารามิเตอร์นี้สามารถรวบรวมผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวแกนของพารามิเตอร์พยากรณ์ปรับปรุง

ทิศทาง	Min (มม)	Max (มม)	เปลี่ยนแปลงรวม (Max-Min)
X	-0.370	0.368	0.738
Y	-0.916	0.923	1.839
Z	-0.109	0.064	0.173

ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวแกน และการหดตัวของชิ้นงานที่ไม่สมมาตรในภาพรวมแบบ 3 มิติ จึงยังส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ค่าบิดเบี้ยวสูงสุดของ CAE ก่อนปรับปรุง คือ 2.52 มิลลิเมตร (ตาราง 3.4) ค่าที่ได้จากช่วงทดสอบคือ 1.012-2.444 มิลลิเมตร และพารามิเตอร์ปรับปรุงสามารถพยากรณ์บิดเบี้ยวที่ 0.96 มิลลิเมตร ผลจากค่าพยากรณ์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วย CAE สามารถจำลองโมเดลการบิดเบี้ยวได้ดังภาพต่อไปนี้

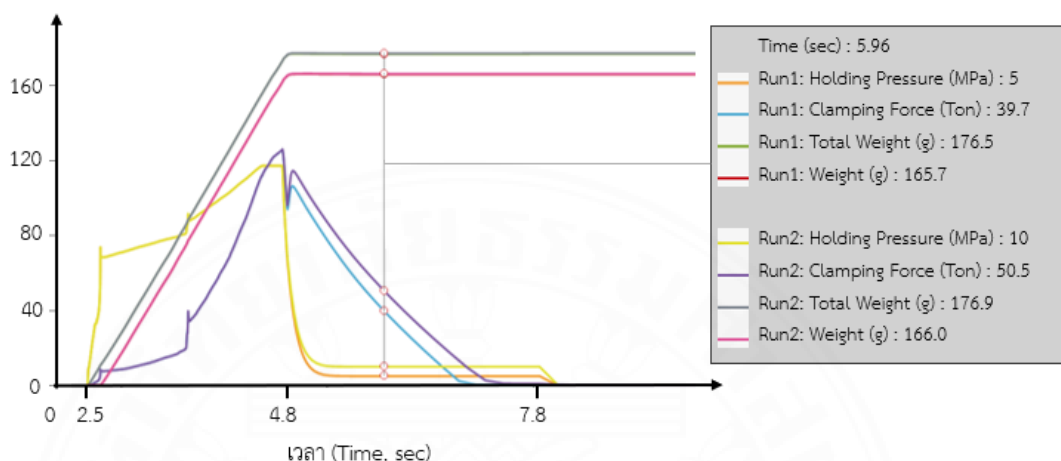


ภาพที่ 4.10 การบิดเบี้ยวจากพารามิเตอร์ปรับปรุง CAE

ค่าพยากรณ์ปรับปรุงที่ได้จากภาพที่ 4.10 สามารถควบคุมค่าบิดเบี้ยวให้อยู่ในขอบเขตน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถยอมรับในการผลิตจริง

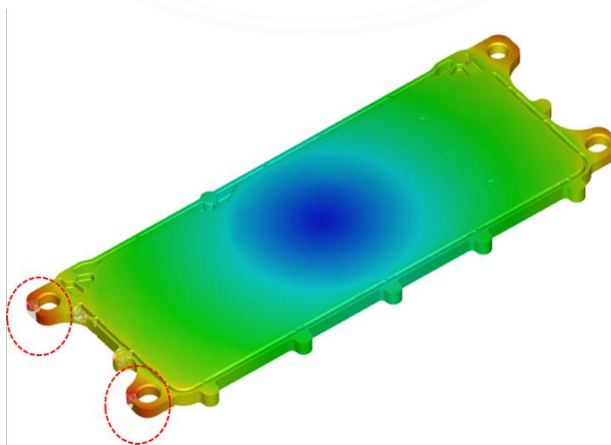
ด้วยปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวจากที่เกิดจากความสัมพันธ์ของไดอะแกรม PVT และเพื่อยืนยันเหตุผลก่อนหน้านี้นี้ที่กำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันย้าจึงได้นำพารามิเตอร์

พยากรณ์ทดสอบเพิ่มแรงดันย้ำแบบเท่าตัวจาก 5 MPa เป็น 10 MPa สามารถแสดงผลด้วยโปรไฟล์การฉีดทดลองดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 โปรไฟล์ฉีดทดสอบเพิ่มแรงดันย้ำ

จากภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของการฉีดด้วยพารามิเตอร์พยากรณ์ (Run1) และการทดสอบเพิ่มแรงดันย้ำ (Run2) พบว่าเมื่อเปลี่ยนเฟสจากการฉีดเป็นการย้ำหรือแพ็ค ค่าน้ำหนักของชิ้นงาน (Part Weight) และน้ำหนักรวม (Total Weight) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แรงดันย้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 5 MPa เป็น 10 MPa ไม่มีผลต่อน้ำหนักเนื่องจากทางฉีดมีการเซตและแข็งตัวแล้วโดยปริมาตรของพลาสติกเหลวที่ใช้ฉีดชิ้นงาน คือ 158.06 ซีซี เท่ากัน และการบิดเบี้ยวมีค่าเท่าเดิมไม่มีค่านัยยะสำคัญอื่นที่แสดงให้เห็นได้ว่าดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อลดแรงดันย้ำส่งผลให้ชิ้นงานฉีดไม่เต็มแบบดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ชิ้นงานไม่เต็มแบบเมื่อลดแรงดันย้ำ

จากผลข้างต้นสามารถอ้างอิงได้ว่าแรงดันที่ใช้จากพารามิเตอร์พยากรณ์เป็นระดับที่เหมาะสมที่จะนำไปทดสอบในกระบวนการฉีดจริงต่อไป

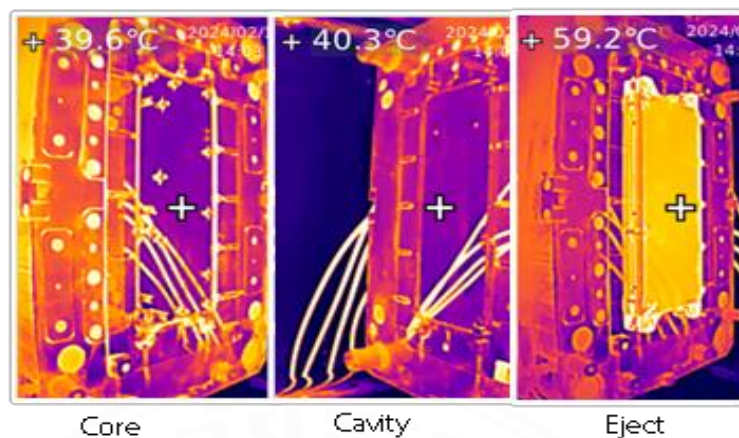
4.2 การทดสอบด้วยกระบวนการจริง

จากผลการพยากรณ์ด้วย CAE ในหัวข้อ 4.1 สามารถทำนายพารามิเตอร์ปรับปรุงและให้ผลการบิดเบี้ยวอยู่ในเกณฑ์การออกแบบจึงทำการทดสอบด้วยกระบวนการจริง การติดตั้งแม่พิมพ์กับเครื่องจักร ดังภาพที่ 4.13 หลังจากนั้นต่อระบบหล่อเย็นด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ใช้ระบบน้ำอุ่นเพื่อให้การหล่อเย็นขึ้นงาน และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลาที่ทดสอบจริง



ภาพที่ 4.13 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องจักร

เมื่อนำพารามิเตอร์ปรับปรุงโดย CAE ไปทดสอบกระบวนการจริง วัดค่าอุณหภูมิขณะทดสอบด้วยกล้องเทอร์โมสแกน ได้ค่าดังภาพที่ 4.14 แม่พิมพ์ทั้งสองฝั่ง (Core, Cavity) มีอุณหภูมิ 39.6 และ 40.3 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 อุณหภูมิขณะทดสอบจริง

อุณหภูมิชิ้นงานขณะปลดออกจากแม่พิมพ์ คือ 59.2 °C ซึ่งน้อยกว่าค่าแนะนำ คือ 75 °C แสดงว่าชิ้นงานเซ็ดตัวได้ดีและการหล่อเย็นมีประสิทธิภาพที่ดี หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงแบบอิสระ จนถึงอุณหภูมิห้อง ผลของการฉีดจริงแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองฉีดจริงจากพารามิเตอร์พยากรณ์

ตัวอย่าง	ΔX (มม)	ΔY (มม)	ΔZ (มม)	Warpage (มม)
1	0.745	1.779	0.101	0.845
2	0.736	1.828	0.121	0.929
3	0.756	1.827	0.109	0.786
4	0.787	1.832	0.099	0.965
5	0.739	1.800	0.092	0.820
6	0.787	1.895	0.102	0.935
7	0.740	1.777	0.118	0.915
8	0.776	1.767	0.125	0.790
9	0.766	1.742	0.087	0.760
10	0.761	1.851	0.102	0.750
11	0.717	1.711	0.079	0.845
12	0.759	1.730	0.095	0.849
13	0.746	1.854	0.119	0.964
14	0.755	1.805	0.108	0.945
15	0.733	1.928	0.089	0.749
16	0.745	1.774	0.082	0.765

ตัวอย่าง	ΔX (มม)	ΔY (มม)	ΔZ (มม)	Warpage (มม)
17	0.770	1.845	0.118	0.894
18	0.736	1.788	0.090	0.971
19	0.770	1.754	0.127	0.931
20	0.768	1.798	0.095	0.974

หลังจากทดสอบด้วยการฉีดพลาสติกจริงจำนวน 20 ครั้งแล้วพบว่าค่าบิดเบี้ยว (Warpage) ที่ได้ทั้งหมดอยู่ในช่วงค่ากำหนดที่ต่ำกว่า 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ค่า Warpage จะมีค่าต่ำกว่า 1.00 มิลลิเมตร ในการฉีดพลาสติกจริง ๆ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีตามคาดหวัง

ค่า Warpage ที่ได้จากการทดลองฉีดพลาสติกจริง ๆ มีค่าต่ำสุด (Min) อยู่ที่ 0.749 มิลลิเมตร และค่าสูงสุด (Max) อยู่ที่ 0.974 มิลลิเมตร ซึ่งทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในช่วงค่ากำหนดที่ต่ำกว่า 1.00 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีตามที่คาดหวัง

ค่าเฉลี่ย (Mean) ของ Warpage ที่ได้จากการฉีดพลาสติกจริง ๆ คือ 0.869 มิลลิเมตร ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงค่ากำหนดที่ต่ำกว่า 1.00 มิลลิเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของ Warpage ที่ได้จากการฉีดพลาสติกจริง ๆ คือ 0.082 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูล Warpage ซึ่งยังคงอยู่ในขีดความน่าเชื่อถือ

ผลการทดลองเป็นไปตามคาดหวังและยืนยันสมมุติฐานว่าการปรับพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกมีผลทำให้ค่า Warpage ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น กระบวนการฉีดพลาสติกจริงจึงสามารถพัฒนาต่อไปในทิศทางที่ดีขึ้นตามผลการทดลองนี้

4.3 อภิปรายผล

พารามิเตอร์ฉีดจริงก่อนปรับปรุงและปรับปรุงมีให้ผลที่น่าพอใจโดยมีค่าการบิดเบี้ยวที่ดีขึ้นและสามารถยอมรับได้ในการผลิต การบิดเบี้ยวของชิ้นงานจริงลดลงจาก 2.572 มิลลิเมตร เป็น 0.974 มิลลิเมตร ปัจจัยและผลกระทบที่ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงขนาด และการบิดเบี้ยวสามารถรวบรวมดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองของพารามิเตอร์จาก CAE และการทดสอบฉีดจริง

พารามิเตอร์	CAE		ฉีดจริง	
	ก่อนปรับปรุง	ปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	ปรับปรุง
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	230	190	230	190
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	90	40	90	39.6/40.3
เวลาหล่อเย็น (sec)	30	42	30	42
เวลารวม (sec)	40.3	52.3	45	57
ΔX (มม)	1.562	0.738	1.63	0.79
ΔY (มม)	3.688	1.839	3.74	1.97
ΔZ (มม)	3.104	0.173	3.05	0.12
บิดเบี้ยว (มม)	2.528	0.96	2.710	0.97

พารามิเตอร์ฉีดก่อนปรับปรุงเป็นค่าที่ใช้ในการผลิตส่วน CAE ก่อนปรับปรุงเป็นการนำพารามิเตอร์ผลิตจริงมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D เพื่อใช้ตั้งต้นในการพยากรณ์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และนำไปทบทวนด้วยการฉีดจริงหลังปรับปรุงด้วย CAE เพื่อยืนยันผลการทดลอง สามารถรวบรวมพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยดังนี้

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่ทำการวิจัย

พารามิเตอร์	CAE		ฉีดจริง	
	ก่อนปรับปรุง	ปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	ปรับปรุง
ความดันฉีด (MPa)	117	117	117.9	117.9
เวลาฉีด (sec)	2.3	2.3	3	3
ช่วงเปลี่ยนเฟส (%)	98	98	98	98
ความดันย้ำ (MPa)	5	5	5	5
เวลาย้ำ (sec)	3	3	3	3
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	230	190	230	190
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	90	40	90	39.6/40.3
เวลาหล่อเย็น (sec)	30	42	30	42
เวลารวม (sec)	40.3	52.3	45	57
น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)	165.71	162.28	170.96	166.85
น้ำหนักทางฉีด (กรัม)	10.68	10.90	11.21	10.96
บิดเบี้ยว (มม)	2.52	0.96	2.71	0.974

พารามิเตอร์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือ

ช่วงการเปลี่ยนเฟส = 98%

ความดันยำ = 5 MPa

ความดันฉีด = 117 MPa

เวลานี้ด = CAE 2.3 (ฉีดจริง3) sec

เวลายำ = 3 sec

การทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่งผลให้ น้ำหนักชิ้นงาน น้ำหนักทางฉีด และเวลารวมเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งเกิดจากผลกระทบทางอ้อมของพารามิเตอร์หลัก



ภาพที่ 4.15 งานประกอบหลังจากทดสอบฉีดจริง

ด้วยการปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ดี ชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงให้มีความสม่ำเสมอในการผลิตจริง ๆ และสามารถประกอบกับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และฝาครอบได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการตัดเพิ่มเติมดังภาพที่ 4.15 ทำให้กระบวนการผลิตมีความเรียบง่ายมากขึ้น และสามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตลงได้เช่นกัน ทั้งนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการผลิตอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การจำลองด้วย CAE พิสูจน์ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการคาดการณ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ผลการทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่าค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังปรับปรุงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับสำหรับการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับผลการคาดการณ์จาก CAE ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากการจำลองด้วย CAE ประกอบด้วย อุณหภูมิหลอมเหลว 190°C, อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40°C, เวลาหล่อเย็น 42 วินาที

การนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปปรับใช้จริงส่งผลให้ค่าบิดเบี้ยวของชิ้นงานลดลงจาก 2.710 มิลลิเมตร เหลือ 0.974 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ CAE ในการควบคุมและปรับแต่งกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการบิดเบี้ยว

ในกระบวนการผลิตจริงของปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างจากผลของ CAE และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตควรเป็นค่าที่ผ่านการทดสอบจริงซ้ำ ๆ มีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อสอดคล้องกับการสีกหรือ และความเสื่อมสภาพตามอายุของเครื่องจักรและอุปกรณ์

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. (2553). วิศวกรรมการฉีดพลาสติก. กรุงเทพมหานคร. ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

Suhas Kulkarni. (2017). Robust Process Development and Scientific Molding. Germany Hanser.

บทความวารสาร

เชิดวิช วรรณ. (2565). บริษัท ฟลูเอนท์ จำกัด. ชีมูลชิ้นจำลองการฉีดพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ : ข้อควรรู้เพื่อชีมูลชิ้น Warpage.วารสารแม่พิมพ์ MOULD & DIE JOURNAL. 34(1), 56-62.

วิธาน จริยะประเสริฐสิน. (2565). พื้นฐานสำคัญของการควบคุมคุณภาพชิ้นงานฉีดพลาสติก. กรุงเทพมหานคร. วารสารแม่พิมพ์ MOULD & DIE JOURNAL. 34(1), 12-20.

ศุภชัย ดวงทองพล และ ชาคริต สุวรรณจำรัส. (2561). การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสาน CAD/CAE.วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 29(4), 65-75.

Choi, D. S., & Im, Y. T. (1999). Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding. Composite Structures. 47(1-4), 655-665.

Guo, W., Hua, L., Mao, H., & Meng, Z. (2012). Prediction of warpage in plastic injection molding based on design of experiments. Journal of Mechanical Science and Technology. 26, 1133-1139.

KADHIM, L. F., AL-ZUBIEDY, A. L. I. A. A., & KADHIM, H. J. The Analysis of Residual Stresses by Photoelastic Method. International Polymer Processing 18(1), 95-106

Kim, B., & Min, J. (2017). Residual stress distributions and their influence on post-manufacturing deformation of injection-molded plastic parts. Journal of Materials Processing Technology. 245, 215-226.

- Lin, M. Y., Zeng, Y. J., Hwang, S. J., Wang, M. H., Liu, H. P., & Fang, C. L. (2023). Warpage and residual stress analyses of post-mold cure process of IC packages. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 124(4), 1017-1039.
- Li, X., Ouyang, J., & Zhou, W. (2013). Simulations of Three-dimensional Thermal Residual Stress and Warpage in Injection Molding. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 96(6).379-407
- Párizs, R. D., Török, D., Ageyeva, T., & Kovács, J. G. (2023). Multiple In-Mold Sensors for Quality and Process Control in Injection Molding. *Sensors*. 23(3), 1735.
- Tsou, H. H., Huang, C. C., Chen, Y. C., & Shih, S. Y. (2023). Online detection of residual stress near the gate using cavity pressure for injection molding. *Journal of Polymer Engineering*, 43(1), 89-99.
- Zhou, H. M.; Wang, Z. Y.; Li, J. H.; Li, D. Q. (2011): A Surface Model-Based Simulation for Warpage of Injection-Molded Parts. *Polymer Engineering and Science*. 51, 785–794.
- Lin, C. M., & Chen, Y. J. (2021). Taguchi Optimization of Roundness and Concentricity of a Plastic Injection Molded Barrel of a Telecentric Lens. *Polymers*, 13(19), 3419.
- Wilczynski, K., & Narowski, P. (2020). A Strategy for Problem Solving of Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds. *Polymers*, 12(4), 805.
- Gao, Y. and Wang, X. (2009). Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1302-1309. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.048>
- Li J, Bei J, Liu W, Xia X, Zhou B, Peng X, Jiang S. Warpage Prediction of RHCM Crystalline Parts Based on Multi-Layers. *Polymers*. 2021; 13(11):1814. <https://doi.org/10.3390/polym13111814>
- Hakimian, E. and Sulong, A. (2012). Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, 42, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.058>

วิทยานิพนธ์

- ชัยยา ฉวยฉาย. (2552). การออกแบบการทดลองแก้ไขปัญหการฉีดขึ้นงานพลาสติกในงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ปรินญา อังตระกูล. (2556). การประมวลความรู้ในการทดลองแม่พิมพ์และแนวทางตัดสินใจการแก้ปัญหางานฉีดพลาสติก. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศุภโชค เส็งหนองแบน. (2560). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงต้นทุนในการลดจุดตำในอุตสาหกรรมการฉีดพลาสติก. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กำชัย ไทยไชยนต์. (2552). การปรับปรุงคุณภาพการฉีดพลาสติก โดยวิธีการของทากูชิ. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- Fimm Tech Resources for Scientific Molding and Scientific Processing. (2023). การพัฒนากราฟความหนืดที่เครื่องฉีดพลาสติก. สืบค้นจาก <https://fimmtech.com/>
- สถาบันพลาสติก. (2565). รายงานสภาวะอุตสาหกรรมพลาสติกไทย ไตรมาสหนึ่ง ปี 2565. สืบค้นจาก [http://plastic.oie.go.th/Articles/2022/06/บทวิเคราะห์เกี่ยวอุตสาหกรรมพลาสติกของไทย%20\(รายไตรมาส\)%20\(43\)/22225/พลาสติกรายไตรมาส1-65.pdf](http://plastic.oie.go.th/Articles/2022/06/บทวิเคราะห์เกี่ยวอุตสาหกรรมพลาสติกของไทย%20(รายไตรมาส)%20(43)/22225/พลาสติกรายไตรมาส1-65.pdf)
- North America Performance Polymers. (2023). Injection Molding Troubleshooter. สืบค้นจาก https://plastics-rubber.basf.com/northamerica/en/performance_polymers/services/product_support_troubleshooting/injection_moulding_troubleshooter.html
- ENGEL AUSTRIA GmbH. (2023). Injection moulding machines. สืบค้นจาก <https://www.engelglobal.com>
- Moldex3D. (2023). Moldex3D 2023 Software. สืบค้นจาก <https://www.moldex3d.com>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

เวลาหล่อเย็น

เวลาหล่อเย็นที่ได้จากการคำนวณโดยละเอียดจากสมการที่ 1 โดยภาพ 3.14 อ้างอิงค่านี้
เพื่อแสดงในรูปกราฟเส้น

Teject (°C)	Tmelt (°C)	Tmold (°C)	Tk 9sec)
75	190	40	19
75	190	45	20
75	190	50	22
75	190	55	24
75	190	60	27
75	190	65	31
75	190	70	38
75	210	40	20
75	210	45	22
75	210	50	23
75	210	55	26
75	210	60	28
75	210	65	33
75	210	70	40
75	230	40	22
75	230	45	23
75	230	50	25
75	230	55	27
75	230	60	30
75	230	65	34
75	230	70	41

ภาคผนวก ข

สมบัติของวัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลสมบัติของวัสดุตามฐานข้อมูลของซอฟต์แวร์ Moldex3D ซึ่งกำหนดไว้เป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบทดลอง

Material

Item Name	Item Data	Unit
Polymer	ABS	
Grade Name	STAREX VH-0815	
Producer	LOTTE Chemical	
Ejection Temperature	75	°C
Freeze Temperature	83	°C
Glass Transition Temperature	83.4	°C

Moldex3D

Material

Item Name	Item Data	Unit
Melt Temperature (minimum)	190	°C
Melt Temperature (normal)	210	°C
Melt Temperature (maximum)	230	°C
Melt Temperature Range	190~230	°C
Mold Temperature (minimum)	40	°C
Mold Temperature (normal)	55	°C
Mold Temperature (maximum)	70	°C
Mold Temperature Range	40~70	°C

Moldex3D

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ปรับปรุงด้วย Moldex3D

การทดลองที่ถูกประมวลผลด้วย Moldex3D สามารถแสดงลักษณะของกระบวนการ และผลด้านอื่นที่เกิดขึ้นในช่วงต่าง ๆ ดังนี้

Moldex3D

DOE - Optimized Run

Moldex3D Studio 2023R2OR
Sun, 10-03-2024



Summary - Mesh

Item Name	Item Data	Unit
Mesh Type	Solid	
Solid Mesh Element Count	3,566,937	
Part Elements	983,710	
Cold Runner Elements	187,535	
Nozzle Zone Elements	0	
Surface Mesh Element Count	208,456	
Part Dimension	134.25x349.07x9.59	mm x mm x mm
Mold Dimension	350.00x550.00x759.44	mm x mm x mm
Part Volume	148.368	cc
Cold Runner Volume	9.69161	cc

Moldex3D

Summary - Process Condition

Filling	Item Data	Unit
Filling Time	2.3	sec
Melt Temperature	190	°C
Mold Temperature	40	°C
Max Injection Pressure	167	MPa
Injection Volume	158.06	cc
Packing		
Packing Time	3	sec
Max Packing Pressure	167	MPa

Moldex3D

Summary - Process Condition

Cooling	Item Data	Unit
Cooling Time	42	sec
Mold Open Time	5	sec
Ejection Temperature	75	°C
Air Temperature	25	°C
Cycle Time	52.3	sec

Moldex3D

Summary - Filling

Item Name	Item Data	Unit
Actual Filling Time	2.334	sec
Average Melt Front Temperature	208.515	°C
Max. Melt Front Temperature	212.576	°C
Max. Sprue Pressure	117.000	MPa
Max. Clamp Force	125.494	Ton(m)

Moldex3D

Summary - Packing

Item Name	Item Data	Unit
Max. Sprue Pressure	117.000	MPa
Max. Clamp Force	125.494	Ton(m)
Gate Freeze Time	2.423, 2.423	sec

Moldex3D

Process

Item Name	Item Data	Unit
VP Switch	By Volume Filled	98 %
Packing Pressure Profile		
Packing pressure refers to machine pressure		
Section		1
Time		3 sec
Pressure		5 MPa

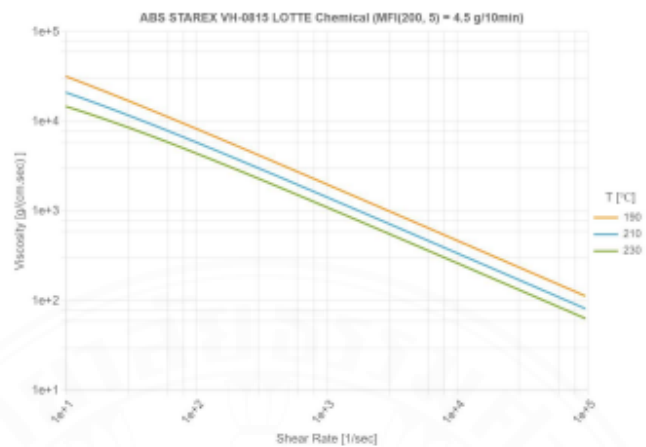
Moldex3D

Material - MFI/MVR

Item Name	Item Data	Unit
Melt Flow Index	4.5	g/10min
Temperature	200	°C
Load	5	kg
Melt Volume-Flow Rate	3.81356	cm ³ /10min
Temperature	200	°C
Load	5	kg

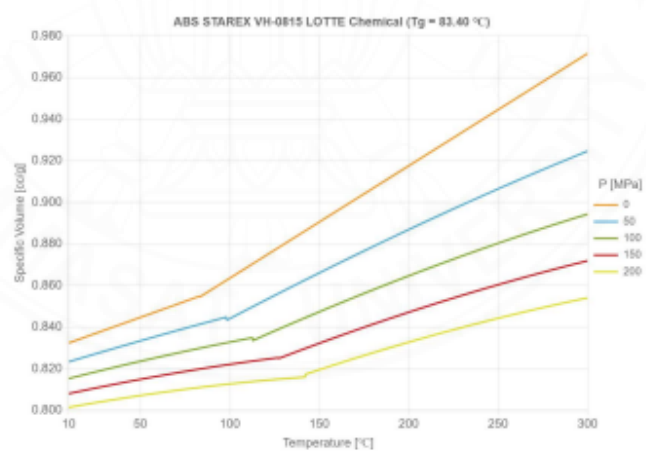
Moldex3D

Material - Viscosity



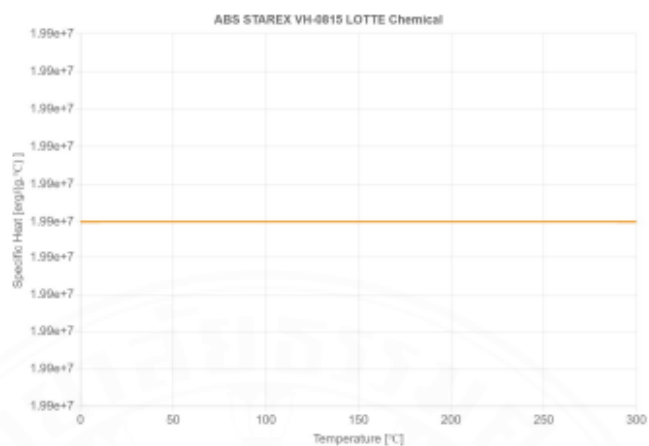
Moldex3D

Material - PVT



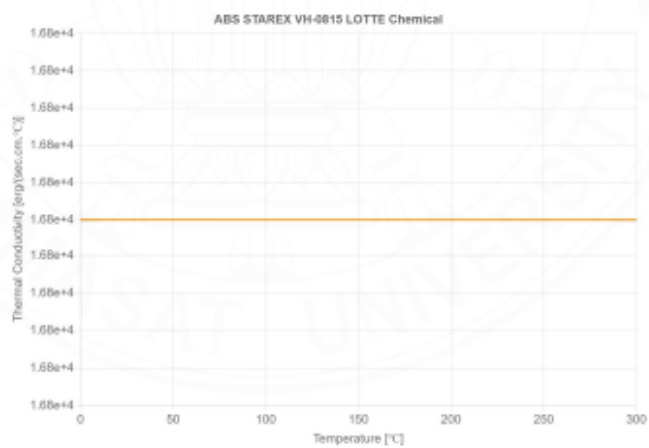
Moldex3D

Material - Specific Heat



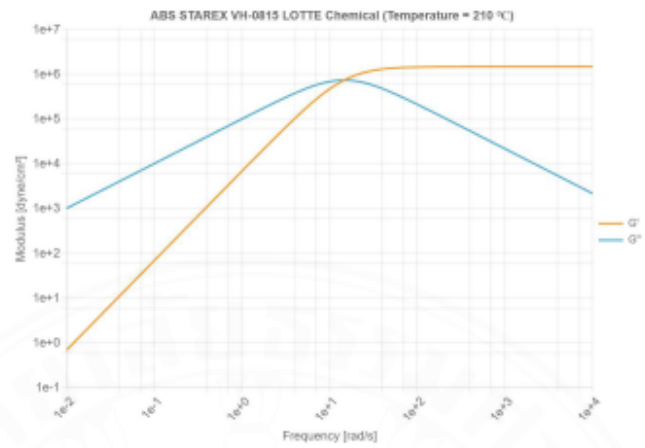
Moldex3D

Material - Thermal Conductivity



Moldex3D

Material - Viscoelasticity



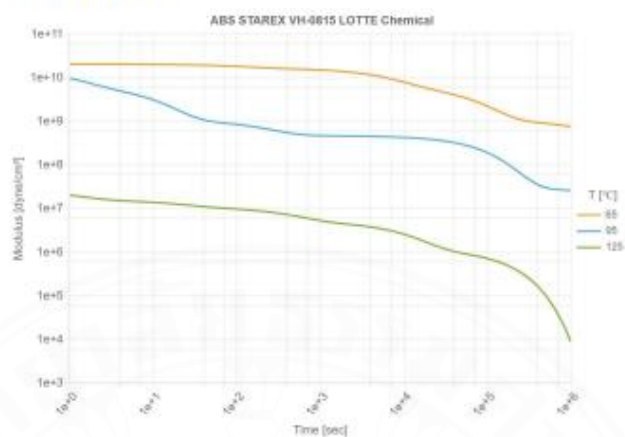
Moldex3D

Material - Mechanical Properties

Type	ABS
Grade Name	STAREX VH-0815
Producer	LOTTE Chemical
Mechanical Properties	Isotropic Pure Polymer
Elastic Modulus	2.24e+10 (dyne/cm²)
Poisson's Ratio	0.392 (-)
CLTE	8e-5 (1/K)

Moldex3D

Material - Structure VE



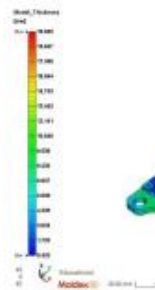
Moldex3D

Material - Content

Type	ABS
Grade Name	STAREX VH-0615
Producer	LOTTE Chemical
Comment	MP(200, 5)=4.5 g/10min, D=1.18 g/cm3
Moldex3D Data Version	2023.03.02
Melt Temperature (Minimum)	190.00 °C
Melt Temperature (Normal)	210.00 °C
Melt Temperature (Maximum)	230.00 °C
Mold Temperature (Minimum)	40.00 °C
Mold Temperature (Normal)	60.00 °C
Mold Temperature (Maximum)	70.00 °C
Ejection Temperature	75.00 °C
Freeze Temperature	80.00 °C

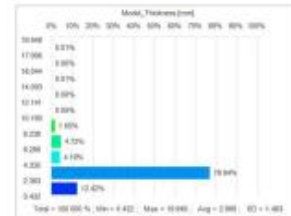
Moldex3D

Thickness



Thickness

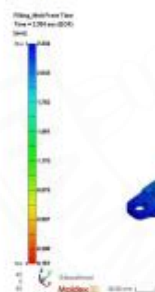
Histogram



Max	Min
19.948	0.432
Avg	SD
2.909	1.463

Moldex3D

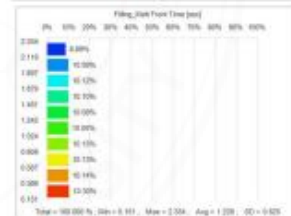
Filling_Melt Front Time



Melt front advancement is a position indicator as melt front boundary movement in different time duration in the filling process. From the melt front advancement one can:

- Examine the filling pattern of the molding
- Check potential incomplete filling (short shot) problem
- Identify weld line locations
- Identify air trap locations
- Check gate contribution for runner balance
- Check proper gate location to balance flow and eliminate weldline.

Histogram

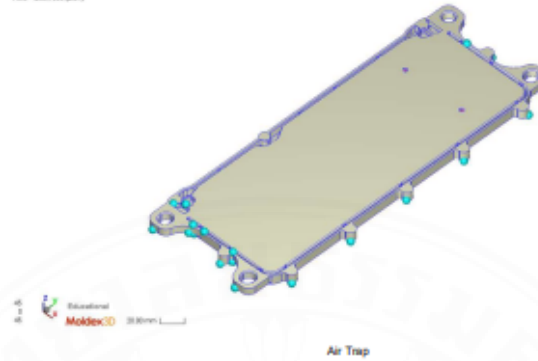


Max	Min
2.334	0.151
Avg	SD
1.228	0.625

Moldex3D

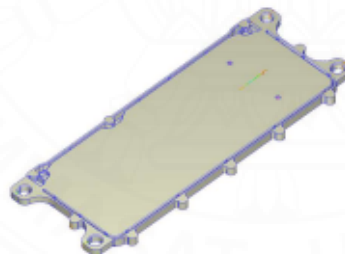
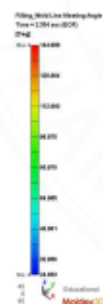
Filling_Air Trap

Filling_Air Trap
Time = 1.33E+001



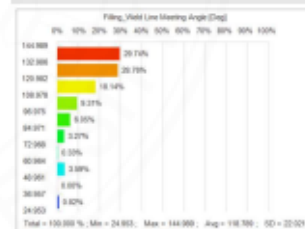
Moldex3D

Filling_Weld Line Meeting Angle



Display meeting angle distribution on weld line.

Histogram



Max

144.989

Min

24.953

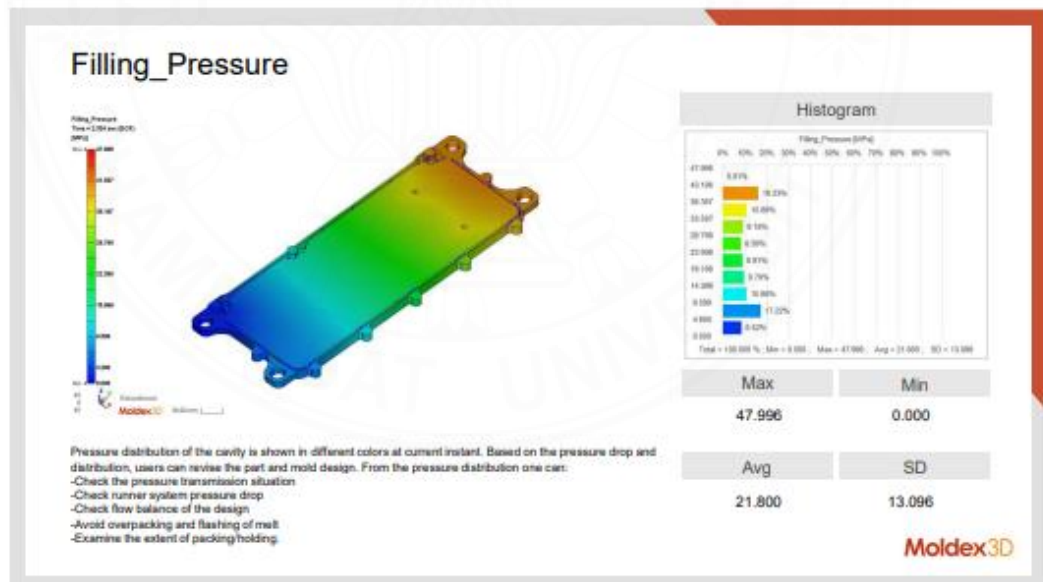
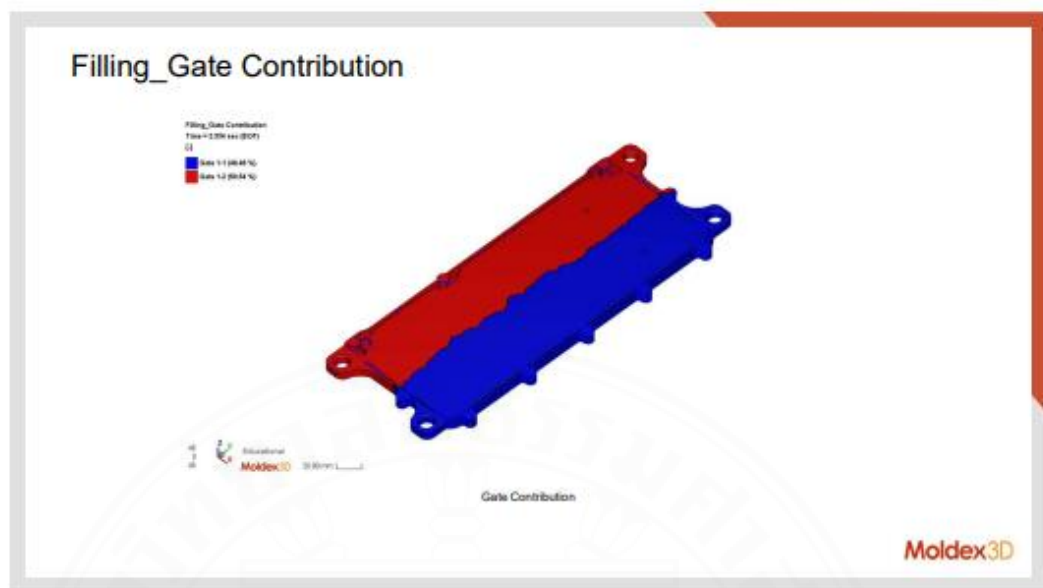
Avg

118.789

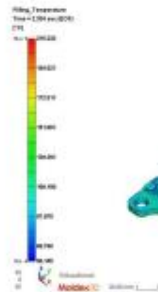
SD

22.021

Moldex3D



Filling_Temperature

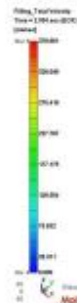


Plastic melt temperature distribution at current instant. For 3D calculation, the temperature distribution expresses temperatures in all three dimensional for the fully cavity.

Histogram

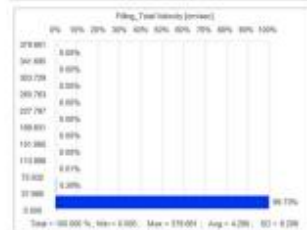


Filling_Total Velocity



Total velocity is the length (norm) of the velocity vector of plastic melt at current instant. This data can give you the idea about how plastic melt flow at current instant.

Histogram



Max	Min
379.661	0.000

Avg	SD
4.288	6.206

Moldex3D

Filling_X-Velocity



X-Component of the flow velocity of plastic melt at current instant.

Histogram



Max	Min
119.637	-110.197

Avg	SD
-0.277	2.083

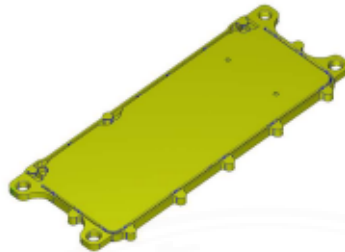
Moldex3D

Filling_Y-Velocity

Filling_Y-Velocity
Time = 1.280 sec (20%)
(m/sec)

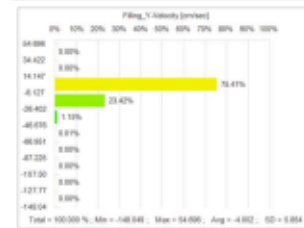


Min: -148.049
Max: 54.696



Y-Component of the flow velocity of plastic melt at current instant.

Histogram



Max	Min
54.696	-148.049

Avg	SD
-4.002	5.854

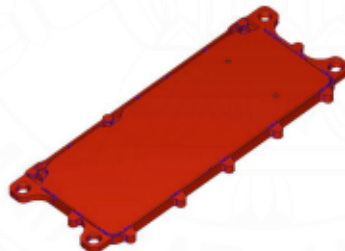
Moldex3D

Filling_Z-Velocity

Filling_Z-Velocity
Time = 1.280 sec (20%)
(m/sec)

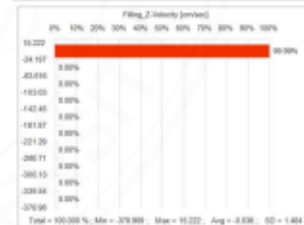


Min: -378.969
Max: 15.222



Z-Component of the flow velocity of plastic melt at current instant.

Histogram



Max	Min
15.222	-378.969

Avg	SD
-0.036	1.484

Moldex3D

Filling_Velocity Vector



Velocity vector is the vector plot of the velocity vector at current instant.

Histogram



Max

Min

379.661

0.000

Avg

SD

4.288

6.206

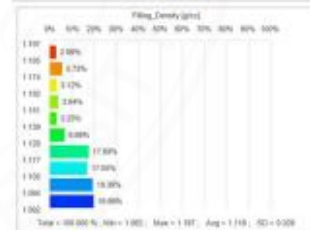
Moldex3D

Filling_Density



This shows the density distribution at current instant. In general, frozen region will show a greater value of density and molten region will have a lower density value. Non-uniformity in density is a source of part warpage.

Histogram



Max

Min

1.197

1.000

Avg

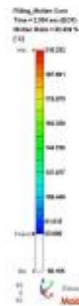
SD

1.118

0.028

Moldex3D

Filling_Molten Core

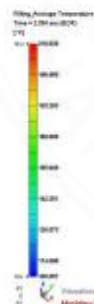


Molten Core result shows the temperature distribution specifically inside the molten plastic, so in other words, the enclosed region is the molding plastic that have not solidified. This 3D isosurface display can be used to check melt freeze condition such around the gate area, and thus to better evaluate packing pressure setting, gating design, etc. Note: the freeze temperature applied here is defined in the selected material.



Moldex3D

Filling_Average Temperature



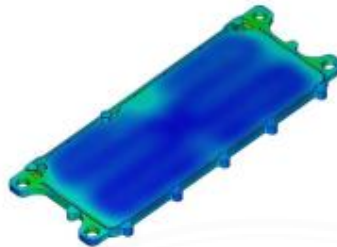
Average temperature is the averaged temperature across the part thickness at current instant. It considers the effect of mold cooling and viscous heating of melt. Therefore, average temperature is representative for the part temperature. This data can be used to check the combined effect of viscous heating of polymer melt and mold cooling. One should examine if there is any hot spot that will cause burning problem and the possibility of short shot due to flow hesitation and excess mold cooling.



Moldex3D

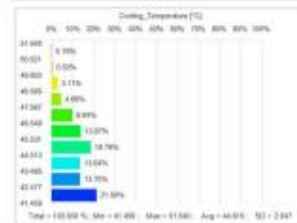
Cooling_Temperature

Cooling_Temperature
Post Data
Result Units: (°C)
Min = 41.459
Max = 51.640



Temperature result shows the 3D temperature distribution throughout the result display domain at current time slice.
From Temperature result interpretation, one can determine heat accumulation inside the part or if cooling/heating performance meets the design and setting.
Note: For Temperature result in Cooling stage, the Max/Min values on the color bar refer to the result on surface only, instead of considering the whole model (back to the regular display when using Inspect tool).

Histogram



Max	Min
51.640	41.459

Avg	SD
44.615	2.047

Moldex3D

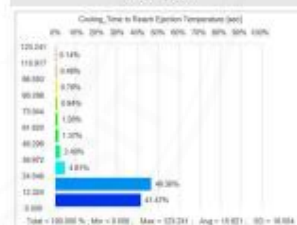
Cooling_Time to Reach Ejection Temperature

Cooling_Time to Reach Ejection Temperature
Post Data
Result Units: (sec)
Min = 0.000
Max = 123.241



This is the time estimated from end of packing results for the computed mold cavity surface temperature and the estimated center temperature of the plastic part to be cooled enough to be ejected. This value can be used as an indicator of hot spot and cycle-time-restriction location. Use (Slicing) or (Clipping) function to view interior distribution.

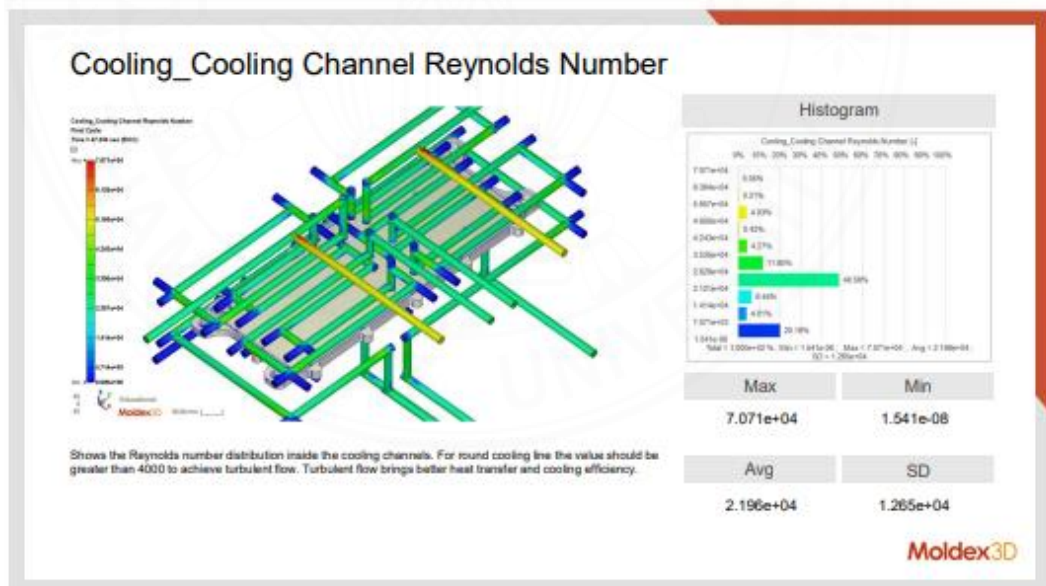
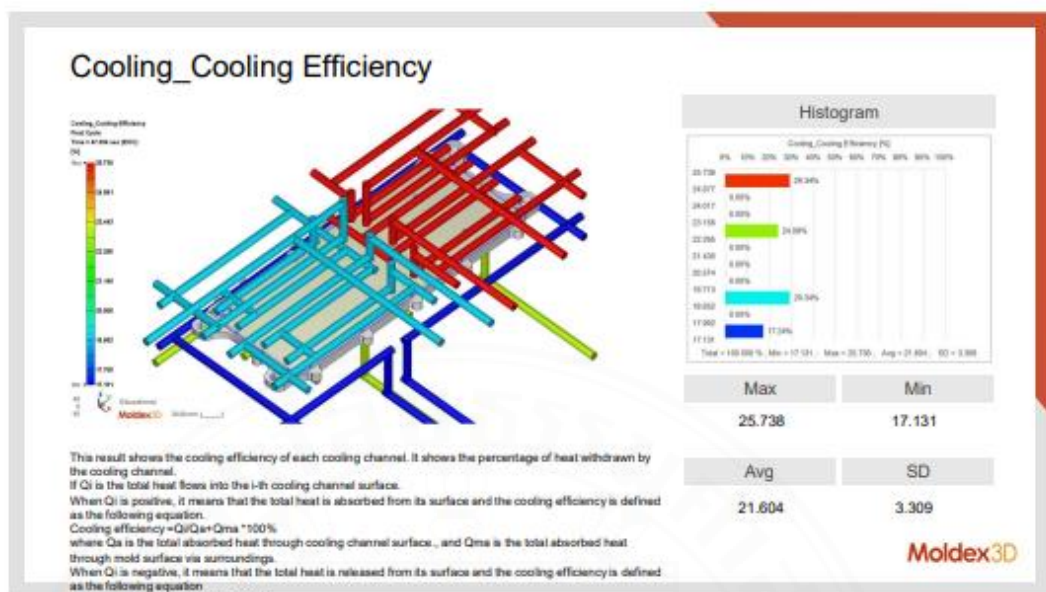
Histogram



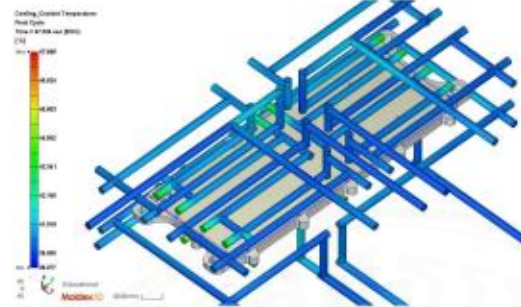
Max	Min
123.241	0.000

Avg	SD
15.921	16.554

Moldex3D



Cooling_Coolant Temperature



Shows the coolant temperature distribution inside the cooling channels.

Histogram



Max

47.986

Min

39.277

Avg

40.440

SD

0.804

Moldex3D

Cooling_Molten Core



This shows isosurface of plastic melt-zone. Region enclosed by the isosurface has temperature higher than freeze temperature specified in the process condition. This data can be used to check frozen layer thickness (region outside the molten core).

Histogram



Max

156.165

Min

83.000

Avg

106.644

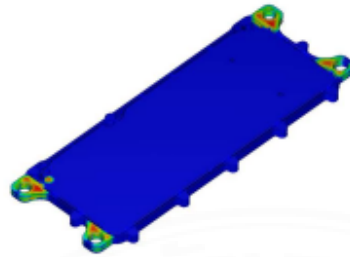
SD

17.402

Moldex3D

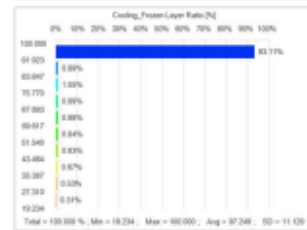
Cooling_Frozen Layer Ratio

Cooling_Frozen Layer Ratio
Real Cavity
Total = 100.000 (100%)
[N]



Solidification caused by cooling results in the forming of frozen layer near the cavity surface. With the increasing of time, the frozen ratio increases. The increase of frozen ratio not only reduces the cross-section along the flow path, but also increases the flow resistance and sprue pressure. Furthermore, the residual stress and flow-induced orientation will be affected.

Histogram



Max

Min

100.000

19.234

Avg

SD

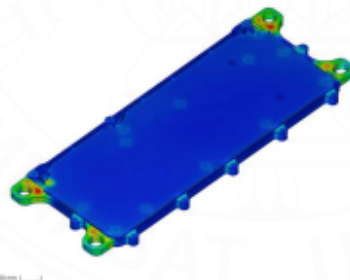
97.249

11.129

Moldex3D

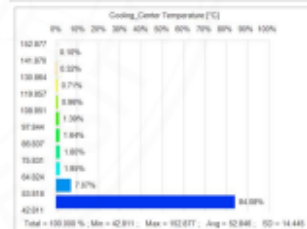
Cooling_Center Temperature

Cooling_Center Temperature
Real Cavity
Total = 100.000 (100%)
[°C]



Center temperature is the melt temperature of the middle layer (part line) in the thickness direction at current instant. Center temperature is an indicator of thermal energy supply of the fresh hot melt. In general, the center temperature is an indicator of incomplete filling (short shot). If the center temperature is too low, flow hesitation happens and there will be a short shot problem.

Histogram



Max

Min

152.877

42.811

Avg

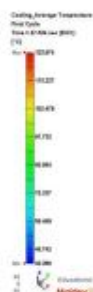
SD

52.846

14.445

Moldex3D

Cooling_Average Temperature



Average temperature is the averaged temperature across the part thickness at current instant. It considers the effect of mold cooling and viscous heating of melt. Therefore, average temperature is representative for the part temperature. This data can be used to check the combined effect of viscous heating of polymer melt and mold cooling. One should examine if there is any hot spot that will cause burning problem and the possibility of short shot due to flow hesitation and excess mold cooling.

Histogram

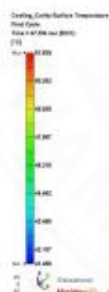


Max	Min
123.974	43.368

Avg	SD
50.462	16.457

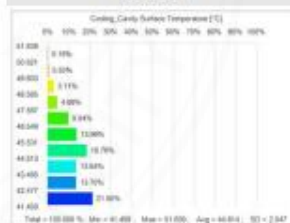
Moldex3D

Cooling_Cavity Surface Temperature



Current temperature distribution on the side of the mold base adjacent to the plastic part.

Histogram



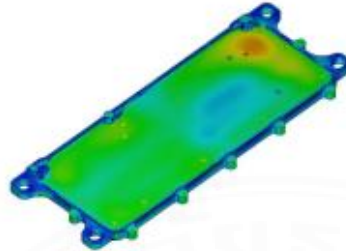
Max	Min
51.639	41.459

Avg	SD
44.614	2.047

Moldex3D

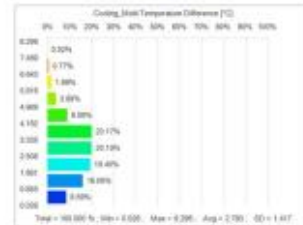
Cooling_Mold Temperature Difference

Cooling_Mold Temperature Difference
Real Cycle
Max = 8.296 (sec) (Max)
(sec)



Shows the temperature difference between the upper cavity wall and lower.

Histogram



Max

8.296

Min

0.028

Avg

2.783

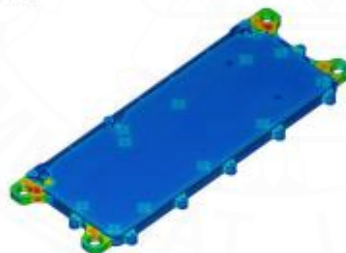
SD

1.417

Moldex3D

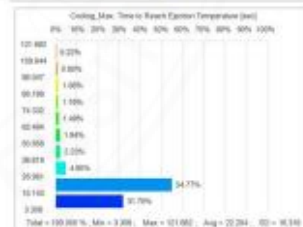
Cooling_Max. Time to Reach Ejection Temperature

Cooling_Max. Time to Reach Ejection Temperature
Real Cycle
Max = 121.682 (sec) (Max)
(sec)



This is the 2D result on part surface showing the distribution of maximum value of Time to Reach Ejection Temperature for elements on the thickness direction under corresponding location.

Histogram



Max

121.682

Min

3.306

Avg

22.204

SD

16.318

Moldex3D

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสิตตารักษ์ พิศแสงงาม
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2546: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งงานปัจจุบัน	ผู้จัดการอาวุโสฝ่ายปฏิบัติการ บริษัท ปิยอนนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด
ผลงานวิชาการ	การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วย คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE กรณีศึกษาชิ้นส่วน กล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ การประชุมวิชาการ ระดับชาติด้านการพัฒนาการดำเนินงานทาง อุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 15 ประจำปี 2567 (CIOD 2024)
ประสบการณ์การทำงาน	2560 - ปัจจุบัน บริษัท ปิยอนนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549 -2560 บริษัท ซูเซน (ประเทศไทย) จำกัด 2546-2549 บริษัท สหวัฒนาพลาสติก จำกัด