

การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมเพื่อปรับพารามิเตอร์
ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกเพื่อลดการบิดตัวโก่งงอ
ด้วยเทคนิคการออกแบบทดลองร่วมกับกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พันธุ์รัช พานิชย์พันธุ์

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2567

APPLICATION OF CAE SOFTWARE FOR ENHANCING PARAMETERS IN INJECTION
MOLDING OF PLASTIC PART FOR WARPAGE REDUCTION BY DESIGN OF
EXPERIMENT AND FINITE ELEMENT METHOD

Puntad Panichayapun

TNII

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2024

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมเพื่อปรับพารามิเตอร์
ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกเพื่อลดการบิดตัวโก่งงอด้วย
เทคนิคการออกแบบทดลองร่วมกับกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

พันธุ์รัช พานิชพันธุ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.ดอน แก้วดก

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรารกร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.ดอน แก้วดก)

พันธุ์ชัย พานิชพันธ์ : การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมเพื่อปรับพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกเพื่อลดการบิดตัวโก่งงอด้วยเทคนิคการออกแบบทดลองร่วมกับกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ดอน แก้วดก, 84 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางวิศวกรรมเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ในรูปแบบ Full Factorial Design สำหรับกรณีศึกษาในครั้งนี้ กำหนดให้มีตัวแปรต้นจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature), ความดันอัดสูงสุด (Maximum Packing Pressure) และระยะเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ รวมเป็นเงื่อนไขการทดลอง 27 ชุด ดำเนินการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรม จากนั้นทำการทดลองฉีดจริงโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก TOSHIBA EC100S และใช้เม็ดพลาสติกชนิด PP-TD20 (Polypropylene Reinforced with 20% Talc) ในการผลิตชิ้นงาน จากนั้นทำการวัดค่าการบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นงานหลังเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยกล้องไมโครสโคป รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 81 ชิ้นงาน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าการบิดตัวที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลจากการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง โดยเงื่อนไขที่ 9 ให้ค่าการบิดตัวต่ำที่สุด โดยได้จากการจำลองเท่ากับ 0.435 มม. และจากการทดลองจริงเท่ากับ 0.335 มม. คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 23 ขณะที่เงื่อนไขที่ 19 ให้ค่าการบิดตัวสูงสุด โดยค่าที่ได้จากทั้งการจำลองและการทดลองจริงเท่ากับ 0.574 มม. และ 0.573 มม. ตามลำดับ ไม่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างกัน จากผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปในการคาดการณ์พฤติกรรมของการบิดตัวของชิ้นงานได้อย่างแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและควบคุมคุณภาพสำหรับการผลิตชิ้นงานในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PUNTAD PANICHAYAPUN : APPLICATION OF CAE SOFTWARE FOR ENHANCING PARAMETERS IN INJECTION MOLDING OF PLASTIC PART FOR WARPAGE REDUCTION BY DESIGN OF EXPERIMENT AND FINITE ELEMENT METHOD. ADVISOR : DR.DON KAEWDOOK, 84 PP.

This study aims to optimize process parameters in plastic injection molding by utilizing commercial engineering software in conjunction with a Design of Experiments (DOE) approach, specifically employing a Full Factorial Design. Three critical factors melt temperature, maximum packing pressure, and cooling time were investigated at three levels each, resulting in 27 experimental conditions. Simulations were conducted using engineering software, and the results were validated through actual molding experiments performed on a TOSHIBA EC100S machine with PP-TD20 (polypropylene reinforced with 20% talc) as the material. Warpage of the molded specimens was measured after 24 hours at room temperature using a microscope, with a total of 81 samples analyzed. The findings reveal a strong correlation between simulated and experimental warpage values. The lowest warpage was observed under condition 9, with simulated and experimental results of 0.435 mm and 0.335 mm, respectively, indicating a deviation of 23%. The highest warpage occurred in condition 19, with nearly identical values from both simulation and experiment (0.574 mm and 0.573 mm). These results underscore the reliability of injection molding simulation in predicting warpage behavior within an acceptable margin of error. The knowledge gained from this research can serve as a valuable reference for process planning and quality control in the plastic injection molding industry, ultimately improving manufacturing efficiency.

Graduate Studies

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2024

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาของ ดร.ดอน แก้วตก อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนคอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น และอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินการวิจัย รวมถึงอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานจนงานวิจัยสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และขอขอบคุณ นายภาณุภพ ศรีสม รวมถึงพี่น้องนักวิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดลองอย่างเต็มที่

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวเป็นอย่างยิ่ง ที่ได้ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางด้านจิตใจ คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนสามารถดำเนินงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์และคุณค่าในงานวิชาการ และเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในด้านนี้ต่อไป

พันธุ์รัช พานิชพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติกสำหรับงานฉีดขึ้นรูป.....	4
2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานพลาสติก	7
2.3 เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	23
2.4 การจำลองวิเคราะห์ทางวิศวกรรม.....	26
2.5 การประเมินคุณภาพชิ้นงานจากการจำลองการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D.....	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	ระเบียบวิธีการวิจัย..... 34
3.1	แผนภาพลำดับการวิจัย 34
3.2	การออกแบบชิ้นงาน, ทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) และการเลือกวัสดุชิ้นงาน 35
3.3	การสร้าง Finite element (Meshing) และเงื่อนไขต่างๆ โดย Moldex3D..... 36
3.4	การออกแบบการทดลอง และกำหนดเงื่อนไขในโปรแกรม Moldex3D..... 40
3.5	การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองด้วยเครื่องฉีดพลาสติก..... 42
3.6	การตรวจสอบการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดไมโครสโคป (Microscope) 43
3.7	เครื่องมือและอุปกรณ์วิจัย 44
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 47
4.1	ผลการจำลองการฉีดพลาสติก 47
4.2	การวิเคราะห์ผลการจำลองการฉีดด้วยเงื่อนไขที่ถูกปรับปรุง (Optimal Condition)..... 52
4.3	การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วยเครื่องฉีด Toshiba EC100S และวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน..... 57
4.4	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความบิดตัวโก่งงอของการจำลองและการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน 60
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ 62
5.1	บทสรุป 62
5.2	อภิปรายผล..... 62
5.3	ข้อเสนอแนะ 63
บรรณานุกรม	 64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก. ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติก	68
ภาคผนวก ข. เงื่อนไขการปรับพารามิเตอร์ของการจำลองการฉีดขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุ	70
ภาคผนวก ค. ผลลัพธ์ของการจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเงื่อนไข Optimization.....	76
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	84



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย	3
2.1 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run) เมื่อแทนด้วยรหัส 3 Level	25
3.1 ปัจจัยและระดับการทดลองสำหรับเงื่อนไขการฉีดพลาสติก.....	40
3.2 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย 3 ระดับสำหรับเงื่อนไขการฉีดพลาสติก	40
3.3 ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการโรงงาน.....	45
4.1 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย เพื่อควบคุมคุณภาพของการบดตัวโง่งอ	47
4.2 ลำดับผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ Quality Response	50
4.3 ลำดับผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ S/N Ratio Response	51
4.4 ผลการวัดความบดตัวโง่งอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข.....	57
4.5 ผลการเปรียบเทียบความบดตัวโง่งอของการจำลองและชิ้นงานฉีดขึ้นรูป.....	60



สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Injection Molding.....	7
2.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานพลาสติก.....	9
2.3 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง.....	10
2.4 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ.....	10
2.5 โครงสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	13
2.6 โครงสร้างชิ้นงานพลาสติก.....	13
2.7 ตัวอย่างคุณสมบัติของปริมาตรจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติกและพาร์เซียล คริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก.....	16
2.8 ตัวอย่างคุณสมบัติของความจุความร้อนจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก และพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก.....	16
2.9 ความสามารถในการอัดตัวของพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิและความร้อน	17
2.10 ปัจจัยของระบบทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวที่มีผลต่อความดันในแม่พิมพ์.....	18
2.11 ปัจจัยของความเร็วในการฉีด.....	19
2.12 ปัจจัยของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน	20
2.13 ปัจจัยของเวลาในการรักษาความดัน.....	21
2.14 ปัจจัยของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวที่มีต่อความดันในแม่พิมพ์	22
2.15 ปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความดัน.....	23
2.16 ปัจจัยกระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง	23
2.17 เส้นการแบ่ง Node.....	28
2.18 รูปร่างเอลิเมนต์ 2 มิติ	28
2.19 รูปร่างเอลิเมนต์ 3 มิติ	29
3.1 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการวิจัย	34
3.2 ชิ้นงานในการจำลองการฉีดพลาสติก	35
3.3 Gate ของชิ้นงานในการจำลองการฉีดพลาสติก.....	35
3.4 การกำหนดเงื่อนไข Meshing ของชิ้นงานและ Gate	36
3.5 Meshing ของชิ้นงาน และ Gate.....	37
3.6 การสร้าง Mold Base ด้วย Moldbase Wizard	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.7 การสร้างระบบหล่อเย็นด้วย Cooling Channel Layout Wizard.....	38
3.8 Molding Process Sheet ของชิ้นงาน.....	39
3.9 การกำหนดโครงสร้างและเงื่อนไขที่เสร็จสมบูรณ์.....	39
3.10 DOE Wizard เพื่อลดการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน	42
3.11 ทดลองฉีดงานตามเงื่อนไขการออกแบบด้วยเครื่องฉีดพลาสติก Toshiba EC100S.....	42
3.12 ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข	43
3.13 ตรวจวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดไมโครสโคป.....	43
3.14 โปรแกรมจำลองการฉีดพลาสติก Moldex3D.....	44
3.15 เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น Toshiba EC 100S.....	45
3.16 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	46
3.17 เครื่องมือ Microscope วัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้น	46
4.1 ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในแต่ละการจำลอง.....	49
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Control Factor และ Quality Response of Warpage	50
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Control Factor และ S/N Ratio Response of Warpage	51
4.4 เวลาเติมเต็มของชิ้นงาน (Filling Melt Front Time).....	52
4.5 การอั้นอากาศ (Air Trap).....	52
4.6 รอยประสาน (Weld Line).....	53
4.7 อุณหภูมิการฉีด (Filling Temperature).....	53
4.8 แรงดันการฉีด (Filling Pressure).....	53
4.9 การยุบตัว (Sink Mark).....	54
4.10 การหดตัว (Volume Shrinkage).....	54
4.11 ประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็น (Cooling System Efficiency).....	55
4.12 Warpage Total Displacement	56
4.13 Warpage X-Displacement.....	56
4.14 Warpage Y-Displacement.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.15 Warpage Z-Displacement	56
4.16 ความเค้นตกค้างของการบิดตัวโก่งงอ (Warpage Residual Stress).....	56
4.17 จุดวัดความบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นงาน.....	57
ก.1 ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย.....	69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาคการผลิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พลาสติกนับเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ด้วยต้นทุนที่ต่ำและความยืดหยุ่นในการผลิต ปัจจุบัน วัสดุพลาสติกได้รับการปรับปรุงและพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเฉพาะด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อิเล็กทรอนิกส์ เวชภัณฑ์ รวมถึงอุตสาหกรรมการยานยนต์ ซึ่งมีการนำพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ทั้งในส่วนของโครงสร้างภายในรถและองค์ประกอบภายนอกของตัวรถ ด้วยเหตุนี้ พลาสติกจึงเป็นวัสดุที่มีบทบาทครอบคลุมในแทบทุกขั้นตอนของการผลิตยานยนต์

แม้กระบวนการฉีดขึ้นรูปจะมีข้อดีหลายประการ แต่ในทางปฏิบัติกลับมักประสบปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงาน เนื่องจากมีปัจจัยแปรผันหลายด้านที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา ระบบทางน้ำพลาสติก และการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่างๆ บนชิ้นงาน เช่น การบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ซึ่งเกิดจากการหดตัวของพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอ รอยยุบตัว (sink mark) จากการเย็นตัวภายในไม่สมดุล และรอยเชื่อมประสาน (Weld Line) ที่ลดความแข็งแรงของชิ้นงานในบริเวณที่พลาสติกหลอมเหลวหลายสายไหลมาบรรจบกัน ข้อบกพร่องเหล่านี้ไม่เพียงกระทบต่อความสวยงามและความแม่นยำเชิงมิติของชิ้นงาน แต่ยังส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงเชิงกลและประสิทธิภาพของชิ้นส่วนในระยะยาว ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบในหลายมิติ ทั้งด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ด้านต้นทุนการผลิต และด้านสิ่งแวดล้อม ในด้านคุณภาพ ชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องไม่สามารถผ่านมาตรฐานที่เข้มงวดของอุตสาหกรรมการยานยนต์ได้ และอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ในด้านต้นทุน โรงงานจะต้องสูญเสียวัสดุ แรงงาน และเวลาในการผลิตซ้ำ ตลอดจนค่าปรับแม่พิมพ์หรือเครื่องจักร และในด้านสิ่งแวดล้อม ขยะพลาสติกจากของเสียในการผลิต รวมถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตซ้ำ ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลภาวะอื่นๆ ดังนั้น การลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตจึงเป็นเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการฉีดขึ้นรูป

เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความซับซ้อน การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการปรับค่าแบบทดลองทีละตัว (Trial-and-Error) จึงใช้เวลานาน และไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด วิธีการผลิตยุคใหม่จึงมุ่งเน้นการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมและสถิติเข้ามาช่วยในการวางแผนและปรับปรุงกระบวนการ โดยหนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมคือ การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design

of Experiments : DOE) ซึ่งสามารถช่วยในการวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละพารามิเตอร์ต่อคุณภาพชิ้นงาน และกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้ด้วยจำนวนการทดลองที่น้อยลง

นอกจากนั้น การประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Moldex3D ในการจำลองพฤติกรรมไหล การหดตัว และการเย็นตัวของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการก่อนการผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อผสานการใช้ CAE กับ DOE วิศวกรสามารถทดลองแบบจำลองต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและประหยัดมากขึ้น โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรหรือวัสดุจริงในทุกครั้ง ช่วยลดความเสี่ยงจากการลองผิดลองถูกในการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้วัสดุ พอลิโพรพิลีนผสมทัลก์ 20% (Polypropylene-Talc 20%) หรือ PP-TD20 ซึ่งเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่ได้รับคานิยมในอุตสาหกรรมยานยนต์ วัสดุนี้มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อสารเคมีดี และเมื่อผสมทัลก์จะทำให้มีความแข็งแรงและเสถียรภาพทางมิติเพิ่มขึ้น ลดการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีความคงรูปและคุณภาพสูงขึ้น PP-TD20 จึงมักถูกนำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา เช่น กันชนรถยนต์ แผงหน้าปัด และชิ้นส่วนภายในรถยนต์อื่นๆ ซึ่งจำเป็นต้องมีความแม่นยำในการผลิตและความทนทานต่อการใช้งานระยะยาว ด้วยคุณสมบัติของ PP-TD20 ที่ตอบโจทย์การใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างครบถ้วนจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้วัสดุชนิดนี้ถูกเลือกใช้ในการศึกษา โดยมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานคุณภาพสูง ลดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมและความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อหาพารามิเตอร์การฉีดที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน (Warpage) โดยแปรแกมจำลองทางวิศวกรรมร่วมกับเทคนิคการออกแบบการทดลองในกระบวนการฉีดพลาสติกของวัสดุ PP-TD20

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 การศึกษาครั้งนี้มุ่งศึกษาเฉพาะชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยวัสดุ PP-TD20
- 1.3.2 ใช้โปรแกรม Moldex3D จำลองการขึ้นรูป
- 1.3.3 การออกแบบการทดลอง โดย Full Factorial Design ในโปรแกรม Moldex3D
- 1.3.4 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงในส่วนของการทำออกแบบการทดลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกสำหรับงานฉีดขึ้นรูป

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและมีความซับซ้อนสูง ปัจจุบันมีการพัฒนาชนิดของพลาสติกให้มีคุณสมบัติที่หลากหลายเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์ และเครื่องมือแพทย์ ซึ่งในส่วนของอุตสาหกรรมยานยนต์มีการใช้พลาสติกเป็นวัสดุหลักในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติน้ำหนักเบา ทนทานต่อแรงกระแทก และสามารถขึ้นรูปได้ง่ายผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากพลาสติกสามารถลดน้ำหนักของรถยนต์ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.1 ชนิดของพลาสติกที่ใช้ในงานฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ [1]

2.1.1.1 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

เป็นพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมี และมีความเหนียวสูง โดยถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ในส่วนของกันชน แผงหน้าปัด แผงประตู และชิ้นส่วนภายในรถยนต์ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้ PP ยังสามารถเสริมเส้นใยแก้ว (GFPP) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงกระแทกได้อีกด้วย

2.1.1.2 อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)

เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทก และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดีในระดับปานกลาง นิยมใช้ในชิ้นส่วนภายในรถยนต์ เช่น แผงหน้าปัด คอนโซล และชิ้นส่วนตกแต่ง เพราะสามารถขึ้นรูปได้ดีและมีพื้นผิวที่สามารถทำสีหรือเคลือบได้ง่าย ABS ยังใช้ร่วมกับโพลีคาร์บอเนต (PC/ABS) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความทนทานต่อความร้อนและแรงกระแทก

2.1.1.3 โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งใสสูง แข็งแรง และทนต่อแรงกระแทกมากกว่ากระจกหลายเท่า จึงนิยมนำมาใช้ในชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงและความใส เช่น เลนส์ไฟหน้ากระจกกันรอย และหลังคาพาโนรามิก นอกจากนี้ PC ยังสามารถใช้ร่วมกับ ABS (PC/ABS) เพื่อเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและความร้อน

2.1.1.4 โพลีเอไมด์ (Polyamide, PA หรือ Nylon)

เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความแข็งแรง ทนต่อการเสียดสี ทนต่อความร้อน และสารเคมี จึงนิยมใช้ในชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เช่น ฝาครอบวาล์ว ท่อร่วมไอดี และชิ้นส่วนเกียร์ โดยโพลีเอไมด์สามารถเสริมเส้นใยแก้ว (PA-GF) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรของโครงสร้างได้

2.1.1.5 โพลีออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene, POM)

เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเชิงกลดีเยี่ยม ทนต่อแรงเสียดทาน และมีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปตัวเอง จึงนิยมใช้ในชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เพื่อง ลูกปืน บูช และกลไกล็อกประตู นอกจากนี้ POM ยังมีความทนทานต่อสารเคมีและการดูดซึมน้ำต่ำ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความเสถียรสูง

2.1.1.6 โพลีฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene Sulfide, PPS)

เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูงมาก ทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมีเกือบทุกชนิด และไม่ติดไฟ PPS นิยมนำมาใช้ในชิ้นส่วนที่ต้องทนความร้อนและสารเคมี เช่น ชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ ปั๊มน้ำมันเครื่อง และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์ เนื่องจากมีความเสถียรทางมิติสูงและสามารถเสริมเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้

2.1.2 การเสริมแรงวัสดุเติมแต่งในพลาสติก (Reinforce Filled)

ในงานกลุ่มยานยนต์ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก เช่น เพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง ความทนทานต่อความร้อน และลดต้นทุนการผลิต โดยสารเติมแต่งหลักที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใย (Fiber), ทัลค์ (Talcum) และแร่ (Mineral) ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะและการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.1.2.1 Glass Fiber Reinforced (พลาสติกเสริมใยแก้ว - GF Filled)

พลาสติกที่เติมเส้นใยแก้ว (GF-Filled Plastics) เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยไม่ทำให้น้ำหนักของวัสดุเพิ่มขึ้นมากเกินไป ด้านคุณสมบัติที่เสริมใยแก้วมีความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นและสามารถทนทานต่อแรงดึงได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการบิดตัวโก่งงอ (Warpage) และเพิ่มเสถียรภาพทางมิติของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงขึ้น ลดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเมื่อได้รับความร้อน อย่างไรก็ตาม พลาสติกชนิดนี้มีความยืดหยุ่นลดลง ทำให้ชิ้นงานแข็งและเปราะขึ้นเล็กน้อย ซึ่งถูกนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ท่อไอดี (Intake Manifold),

ฝาครอบเครื่องยนต์ (Engine Cover), และแผงหน้าปัดรถยนต์ (Dashboard) นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเรือนอุปกรณ์ไฟฟ้า, กรอบคอมพิวเตอร์ และชิ้นส่วนโทรคมนาคม รวมถึง อุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น ท่อพลาสติกที่ต้องการความแข็งแรงสูง

2.1.2.2 Carbon Fiber Reinforced (พลาสติกเสริมใยคาร์บอน - CF Filled)

พลาสติกที่เติมเส้นใยคาร์บอน (CF-Filled Plastics) มีความแข็งแรงสูงกว่า เส้นใยแก้ว แต่มีน้ำหนักเบากว่า ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงและ น้ำหนักเบา โดยคุณสมบัติของ CF-Filled Plastics พลาสติกเสริมใยคาร์บอนมีอัตราส่วนความแข็งแรง ต่อน้ำหนัก (Strength-to-Weight Ratio) สูงกว่าเส้นใยแก้ว อีกทั้งยังมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรง กระแทกได้ดี ในบางกรณีวัสดุชนิดนี้สามารถนำไฟฟ้าได้ ทำให้เหมาะกับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งพลาสติกเสริมใยคาร์บอนถูกนำไปใช้ ใน อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ สำหรับโครงสร้างอากาศยาน นอกจากนี้ยังใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ระดับสูง เช่น กันชน, คาร์บอนไฟเบอร์บอดี้ และชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงแต่น้ำหนักเบา รวมถึง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเรือนอุปกรณ์ที่ต้องการความทนทานและการป้องกัน ไฟฟ้าสถิต

2.1.2.3 Talcum Reinforced (พลาสติกเสริมทัลค์ - Talc Filled)

ทัลค์ (Talc) เป็นแร่ซิลิเกตชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกเพื่อเพิ่ม ความแข็งแรงและลดการหดตัวของชิ้นงาน โดยคุณสมบัติของ Talc-Filled Plastics จะมีความแข็ง (Stiffness) และเสถียรภาพทางมิติดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการหดตัวของพลาสติก (Shrinkage) ทำให้ชิ้นงานขึ้น รูปได้แม่นยำขึ้น อีกทั้งยังปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นภายใน (Internal Lubrication) ทำให้พลาสติก ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และสามารถทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งการใช้งานของ Talc-Filled Plastics ถูกนำไป ใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น แผงหน้าปัด, คอนโซลกลาง, แผงประตู และกันชน นอกจากนี้ยังใช้ใน อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น ตัวเรือนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึง อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงพลาสติกที่ต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.1.2.4 Calcium Carbonate Reinforced (แคลเซียมคาร์บอเนต - CaCO_3 Filled)

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate - CaCO_3) เป็นสารเติมแต่งที่ ช่วยลดต้นทุนของพลาสติกและเพิ่มความแข็งแรง โดย คุณสมบัติของ CaCO_3 -Filled Plastics คือ พลาสติก ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพทางมิติดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิต เนื่องจาก CaCO_3 มีราคาถูกกว่าวัสดุพลาสติกทั่วไป นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการทนต่อ

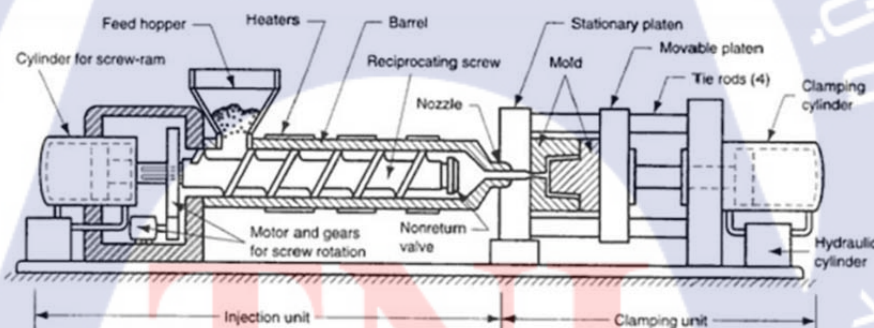
แรงกระแทกและลดความเปราะของพลาสติกบางชนิด ด้านการใช้งานของพลาสติกเสริมแคลเซียมคาร์บอเนตถูกนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น ท่อ PVC, แผ่นพลาสติกปูพื้น และวัสดุตกแต่ง นอกจากนี้ยังใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ฝาครอบเครื่องยนต์ และชิ้นส่วนภายใน รวมถึง อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น ฟิล์มพลาสติก, ถุงพลาสติก และภาชนะบรรจุ

โดยสรุป Fiber (Glass Fiber และ Carbon Fiber) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง Talcum เหมาะสำหรับการเพิ่มความแข็งและลดการหดตัวของพลาสติก และ Mineral เหมาะสำหรับการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มความแข็งของพลาสติกในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย

2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก [2]

Injection Molding หรือ การฉีดขึ้นรูปพลาสติก ที่เป็นกระบวนการผลิตซ้ำของเครื่องใช้ที่พวกเราคุ้นเคยในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น ก่อ่งทิชชู ข้อนส้อม กระปุกใส่ครีม ก่อ่งเก็บอาหารในตู้เย็น และยังถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตอุปกรณ์ เครื่องมือ และชิ้นส่วนในอีกหลายอุตสาหกรรมที่เราอาจไม่ได้ใช้โดยตรง ทั้งการแพทย์ ยานยนต์ เกษตรกรรม สุขภัณฑ์ และวิศวกรรม

2.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Injection Molding



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Injection Molding

เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก หรือ Injection Molding Machine แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ Injection Unit และ Clamping Unit โดยเราจะต้องเริ่มจากส่วนแรกก่อนคือ

2.2.1.1 Injection Unit มีหน้าที่ในการรับวัตถุดิบที่บริเวณ Feed Hopper และหลอมเหลวด้วยความร้อน จากนั้นก็ฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปสู่แม่พิมพ์ในส่วนที่สองคือ

2.2.1.2 Clamping Unit ในส่วนนี้แม่พิมพ์จะถูกบีบให้อยู่ในสภาพปิด เมื่อได้รับพลาสติกเหลวแล้วก็จะเกิดการหล่อเย็น จากนั้นแม่พิมพ์จะเปิดออกโดยอัตโนมัติเพื่อให้ชิ้นงานถูกปลดออกมาเพื่อนำไปบรรจุต่อไป

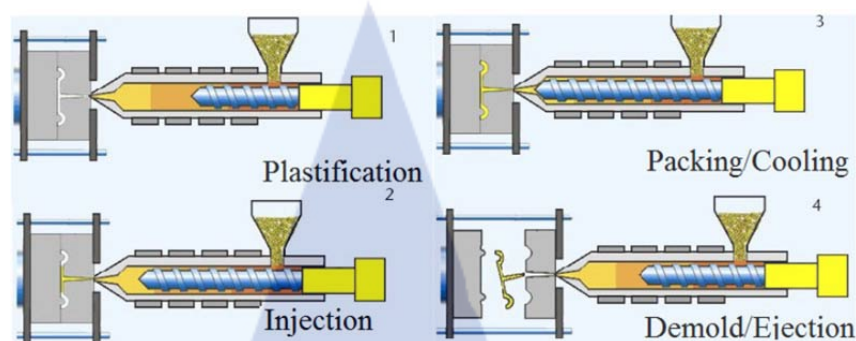
มีส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) ฮอปเปอร์ (Hopper) กรวยขนาดใหญ่อยู่ด้านบน ทำหน้าที่รับเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งต่างๆ ที่จำเป็น เช่น เม็ดสี เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องฉีดพลาสติก
- 2) กระบอกฉีดและสกรู (Injector and Screw) ภายในกระบอกฉีดตรงกลางจะมีสกรูเกลียวอยู่ด้านใน ทำหน้าที่หลอมเหลวเม็ดพลาสติกจากฮอปเปอร์โดยตัวทำความร้อนที่อยู่รอบๆ และฉีดพลาสติกที่หลอมเหลวแล้วเข้าสู่แม่พิมพ์ เกลียวนี้จะหมุนเคลื่อนถอยหลังและไปข้างหน้าได้เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้
- 3) หัวฉีด (Nozzle) ที่ปลายกระบอกฉีดจะมีหัวฉีดที่มีรูขนาดเล็กเชื่อมเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกสู่แม่พิมพ์
- 4) มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Drive Motor) มอเตอร์นี้ทำหน้าที่บังคับหมุนสกรูเกลียวด้านในกระบอกฉีดและขับเคลื่อนเพื่อฉีดพลาสติกที่หลอมแล้วเข้าสู่ช่องว่าง ซึ่งมี 2 ระบบ คือมอเตอร์ไฟฟ้า และมอเตอร์ไฮดรอลิก
- 5) แม่พิมพ์ (Mold) เป็นชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็กที่ถูกกัดให้เป็นช่องว่างภายในตามรูปทรงของสินค้าที่เราออกแบบไว้ โดยโครงสร้างหลักๆ นั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน มาประกบกัน คือ ชุดเข้า (Cavity) และ ชุดคอร์ (Core) ซึ่งภายในจะเป็นโพรงที่ถูกกัดผิวตามรูปชิ้นงาน
- 6) ตัวหนียึดแม่พิมพ์ (Hydraulic Clamp Unit) ตัวหนียึดแม่พิมพ์ หรือเรียกว่า “แคลมป์” ทำหน้าที่เป็นกลไกเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ และยังมีอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีดและอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ หรือที่เรียกว่าการหล่อเย็น (Cooling) ให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนจะปลดออกจากแม่พิมพ์
- 7) ชุดควบคุมกลาง (Central Control) คือส่วนสมองของเครื่องฉีดพลาสติก ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมระบบที่สำคัญทั้งหมดของเครื่อง ได้แก่ อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ตั้งเวลา เป็นต้น

2.2.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานพลาสติก

วงจรการผลิต หรือ ระยะเวลาในการผลิตของการฉีดขึ้นรูปพลาสติกนั้นสั้นมาก โดยปกติมักจะใช้เวลาเพียงแค่ 2 วินาที ถึง 2 นาทีเท่านั้น หลังจากมีการตกลงสรุปแบบชิ้นงาน รายละเอียดเรื่องและวางแผนการผลิตประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังนี้

- 1) Plastification (บรรจุเม็ดพลาสติก)
- 2) Injection (ฉีดพลาสติก)
- 3) Packing/Cooling (คงตัวชิ้นงาน)
- 4) Demold/Ejection (ปลดชิ้นงาน)



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานพลาสติก

2.2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก

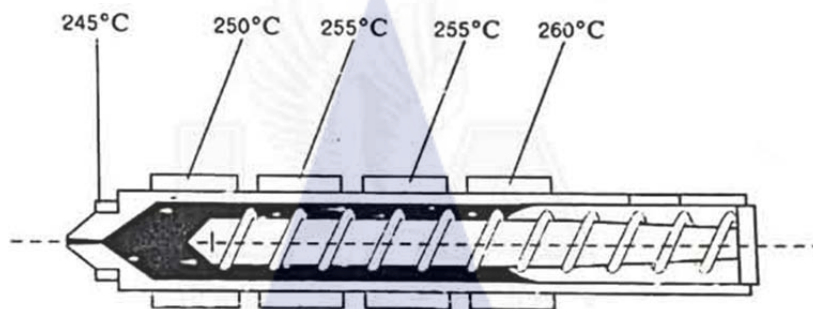
การฉีดพลาสติกต้องมาทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในงานฉีดพลาสติกด้วย เพื่อที่จะได้แก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสมกับลักษณะงาน ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานฉีดพลาสติกและมีอิทธิพลต่อเวลาการทำงานในโรงงานฉีดพลาสติก ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานนั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 กลุ่ม ใหญ่ๆ คือ

1. อุณหภูมิ (พลาสติกเหลว แม่พิมพ์)
2. เวลา (ฉีด ย้ำ หล่อเย็น และวงจรการทำงาน)
3. ความดัน (ฉีด ย้ำ ด้านการถอยของเกลียวหนอน และในแม่พิมพ์)
4. ความเร็ว (ฉีด ปิด-เปิดแม่พิมพ์พลาสติก ชุดฉีดเคลื่อนเข้า-ออก และรอบเกลียว

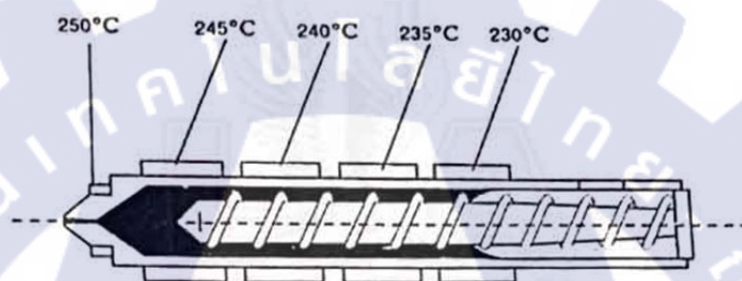
หนอน)

a) อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว

อุณหภูมิพลาสติกเป็นอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากเครื่องฉีดพลาสติก โดยหัวฉีดขณะทำการฉีด อุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดพลาสติกนั้นขึ้นอยู่กับพลาสติกที่ใช้ ซึ่งโดยปกติสามารถสอบถามได้จากผู้ผลิตเม็ดพลาสติก ส่วนมากจะบอกมาเป็นช่วงกว้างๆ เช่น 230-280°C การที่จะเลือกใช้อุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละลักษณะงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง



รูปที่ 2.4 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ

วิธีที่นิยมใช้กันมากคือใช้อุณหภูมิต่ำและค่อยๆสูงขึ้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันพลาสติกตรงตำแหน่งได้กรวยเติมพลาสติกอาจเกิดการหลอมเหลวจนเกิดอาการอุดตัน

b) อุณหภูมิของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหรือน้ำมันที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์พลาสติก อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่จะทำการตั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกคือ ถ้าเป็นพวอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก (Amorphous Thermoplastic) เราจะใช้อุณหภูมิต่ำ ส่วนพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก (Partial Crystalline Thermoplastic) จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า กล่าวคือถ้าต้องการอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเราสามารถเปิดน้ำเข้าไปในแม่พิมพ์พร้อมๆ กับการฉีดได้เลยแล้วค่อยๆ ปรับปริมาณและความเร็วของน้ำให้มากขึ้น เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากพลาสติกเหลว จนได้อุณหภูมิคงที่ แต่ถ้าต้องการอุณหภูมิสูงเราจะปิดน้ำเอาไว้ก่อน หลังจากทำการฉีดไปได้สักระยะหนึ่งจนอุณหภูมิแม่พิมพ์พลาสติกสูงขึ้นตามที่ต้องการแล้วจึงค่อยเปิดน้ำไหลผ่านแม่พิมพ์พลาสติก แล้วทำการปรับปริมาณและความเร็วของน้ำจนได้อุณหภูมิคงที่

c) เวลาในการฉีดพลาสติก

เวลาในการฉีดพลาสติก (Injection Time) เหลวเข้าแม่พิมพ์นั้นทางเราสามารถปรับตั้งค่าได้โดยตรงที่ตัวเครื่องฉีดซึ่งการฉีดจะสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของตัวเกลียวหนอน (ความเร็วฉีด) และระยะทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน

d) เวลาในการย่ำรักษาความดัน

เวลาในช่วงนี้มีบทบาทมากต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดที่ได้ เพราะถ้าใช้เวลาในการย่ำ (Holding Time) เพื่อรักษาความดันน้อยเกินไป ชิ้นงานก็จะเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้นานเกินไปก็อาจเกิดความเค้นภาพในเนื้อชิ้นงานได้

e) เวลาในการหล่อเย็น

เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) ที่เกิดขึ้นในการฉีดพลาสติกนี้จะมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นเวลาในการหล่อเย็นที่เราสามารถปรับตั้งให้กับเครื่องฉีดพลาสติกได้ ซึ่งเป็นเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้ง เวลาในการหล่อเย็นที่เราทำการปรับตั้งจะนานแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ที่เราต้องการว่าจะให้มีอุณหภูมิเท่าไร หรือลดลงพอที่จะเปิดแม่พิมพ์พลาสติกเพื่อปลดชิ้นงานออกโดยไม่เสียรูปทรงได้หรือยัง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตัวแม่พิมพ์พลาสติกและความหนาของชิ้นงาน และชนิดของเม็ดพลาสติก ส่วนเวลาในการหล่อเย็นช่วงที่สองเป็นเวลาหล่อเย็นที่แท้จริง คือ เป็นเวลาในการลดอุณหภูมิทั้งหมดของชิ้นงานพลาสติกตั้งแต่เริ่มฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ ทำการย่ำรักษาความดันและรวมเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้งจนกระทั่งแม่พิมพ์พลาสติกเริ่มเปิด

f) เวลาทำงานทั้งวงจร

เวลาทำงานทั้งวงจร (Cycle Time) เป็นเวลารวมที่ใช้ทั้งหมด ตั้งแต่แม่พิมพ์พลาสติกเริ่มเคลื่อนที่เข้าและปิดจนกระทั่งเสร็จสิ้นการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พลาสติก เวลานี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการย่ำรักษาความดันและเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้ง

g) ความดันฉีดพลาสติก

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน โดยเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันของน้ำมันไฮดรอลิกที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบไฮดรอลิก ความดันนี้เองที่เป็นตัวทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเคลื่อนที่เข้าไปในแม่พิมพ์พลาสติกและจะไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์พลาสติกหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดนี้เหมือนกัน ความดันนี้สามารถปรับได้โดยตรงที่ความดันของน้ำมันไฮดรอลิก

h) ความดันฉีดย่ำ

ความดันย่ำ (Holding) เป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเหมือนกับความดันฉีดทุกประการ แต่แตกต่างกันที่ขนาดของความดันย่ำนี้จะน้อยกว่า โดยทั่วไปโรงงานฉีดพลาสติกจะใช้ประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ ของความดันฉีด (ความดันของพลาสติก

เหลวหน้าปลายเกลียวหนอนที่ปรับตั้ง) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดพลาสติกด้วย ความดันย៉านี้บางที่เรียกว่า ความดันฉีดจังหวะสอง ความดันนี้มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานพลาสติก เช่น การหดตัว ความดันภายในน้ำหนัของชิ้นงาน และการยุบตัวของผิวชิ้นงานพลาสติก ด้วยเหตุนี้จึงต้องเลือกใช้ค่าความดันย៉าให้เหมาะสม

i) ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนหรือสกรู

ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน (Back Pressure) เป็นความดันที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งด้านท้ายของเกลียวหนอน เพื่อด้านทานการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนในจังหวะที่ทำการหลอมเหลวและป้อนพลาสติก ความดันเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยให้เกลียวหนอนถอยหลังกลับอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการหลอมเหลวและการผสมกันของวัสดุพลาสติก ความดันนี้โดยปกติเราจะใช้ประมาณ 50-150 บาร์ (ความดันด้านท้ายของเกลียวหนอน) หรือ 5-10 บาร์ (ความดันไฮดรอลิก)

j) ความดันในแม่พิมพ์พลาสติก

ความดันในแม่พิมพ์พลาสติกเป็นความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์พลาสติก เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์พลาสติกเนื่องจากความดันฉีด ความดันนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อพลาสติกเริ่มเต็มแม่พิมพ์ และจะเป็นตัวที่ก่อให้เกิดแรงกระทำภายในแม่พิมพ์พลาสติกทำให้แม่พิมพ์พลาสติกแยกออกถ้ามีความดันภายในแม่พิมพ์มากเกินไปหรือแรงปิดแม่พิมพ์ไม่เพียงพอ

k) ความดันในการค้ำหัวฉีดพลาสติกไว้ที่แม่พิมพ์

ความดันในการค้ำหัวฉีดพลาสติกไว้ที่แม่พิมพ์นี้จะคอยต้านแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีด ถ้าแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันนี้น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความดันฉีด พลาสติกเหลวก็มีโอกาสทะลักออกมาที่หัวฉีดพลาสติกได้แทนที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์พลาสติก

l) ความเร็วในการฉีดพลาสติก

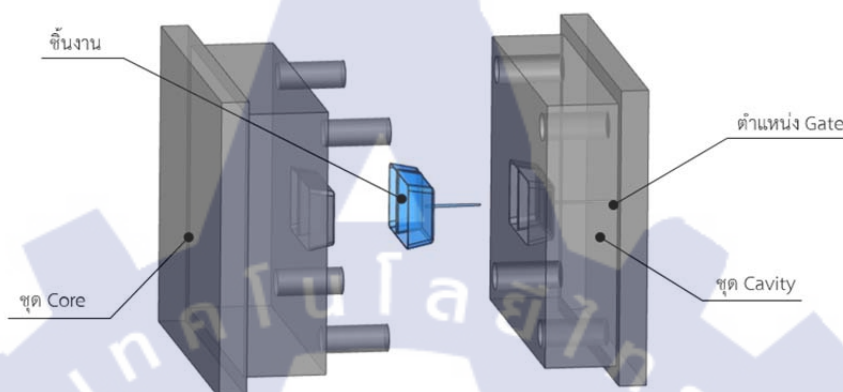
ความเร็วในการฉีดพลาสติกเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอนเพื่อดันพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าแม่พิมพ์พลาสติก ต้นกำลังขับเคลื่อนได้จากไฮดรอลิก ความเร็วในการฉีดพลาสติกจะเป็นตัวควบคุมความดันฉีด

m) ความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์พลาสติก

เวลาในการทำงานทั้งวงจรจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์พลาสติกเหมือนกันโดยทั่วไปจะมีอยู่ 3 ขั้นตอนความเร็วสำหรับเครื่องฉีดแบบใหม่ และจะมีช่วงป้องกันแม่พิมพ์ (Mold Protection) ด้วย โดยช่วงนี้โรงงานฉีดพลาสติกสามารถปรับตั้งความดันในการเลื่อนแม่พิมพ์พลาสติกเข้าปิดได้ ในกรณีที่ชิ้นงานพลาสติกเกิดค้างติดอยู่ที่แม่พิมพ์ โดยเฉพาะชิ้นงานพลาสติกที่แข็งซึ่งถ้าเราใช้ความดันในการเลื่อนแม่พิมพ์เข้าปิดสูงโดยมีชิ้นงานที่แข็งค้างอยู่ แม่พิมพ์ทั้งสองซีกของเราอาจเกิดการเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรใช้ความเร็วช้าในขณะที่แม่พิมพ์พลาสติกเริ่มปิดและเริ่มเปิด

2.2.4 โครงสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (Structure of Mold Injection)

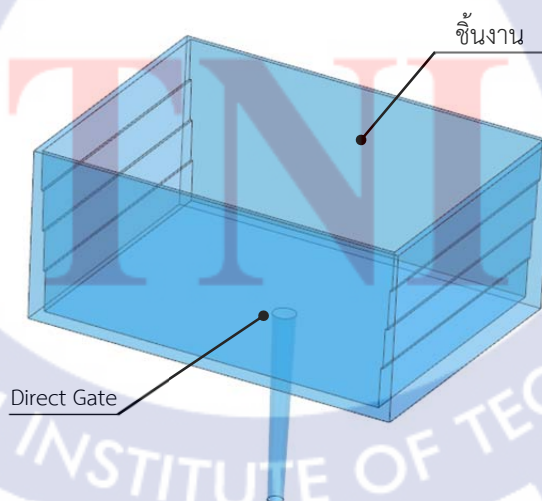
แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมีส่วนประกอบหลัก คือ ชุดเบ้า (Cavity) และ ชุดคอร์ (Core) โดยพลาสติกจะถูกทำให้ร้อนในกระบอกสูบก่อนที่จะถูกส่งไปยังแม่พิมพ์เข้ารูฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าพลาสติก (Gate) ไปยังโพรงภายในแม่พิมพ์เพื่อฉีดขึ้นงานพลาสติก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

2.2.5 โครงสร้างชิ้นงานพลาสติก (Structure of Plastic Part)

หลังจากที่ทำการฉีดขึ้นงานพลาสติกจะได้ โครงสร้างตามชิ้นงานดังรูป 2.6 ซึ่งมีในส่วนของทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) ที่จะต้องทำการตัดออก แล้วตกแต่งผิวให้เรียบ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างชิ้นงานพลาสติก

2.2.6 ลักษณะของปัญหาที่เกิดจากงานฉีดพลาสติก

ในกระบวนการฉีดพลาสติก อาจเกิดข้อบกพร่องที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งสามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.6.1 รอยฟ่น (Jetting)

รอยฟ่นเกิดขึ้นจากการฉีดพลาสติกเหลวที่มีความเร็วสูงผ่านช่องทางเข้าขนาดเล็กเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) พลาสติกที่ฉีดเข้ามาจะไหลไปเป็นแนวเส้นตรงแทนที่จะกระจายตัวทั่วพื้นที่ ส่งผลให้พลาสติกเย็นตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นงาน

2.2.6.2 ครีป (Flashing)

ครีปเกิดจากแรงดันพลาสติกที่สูงเกินไปในแม่พิมพ์ ส่งผลให้แม่พิมพ์แยกออกจากกัน พลาสติกไหลออกมาตามรอยต่อของแม่พิมพ์ เกิดเป็นครีปตามขอบชิ้นงาน ปัญหานี้มักเกิดจากการใช้แรงดันฉีดสูงเพื่อป้องกันปัญหาชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short Shot) หรือการใช้แรงดันย่ำ (Holding Pressure) สูงเกินไป

2.2.6.3 ประกายเงินที่ผิวชิ้นงาน (Silver Streak)

เกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิสูง หรือการค้างอยู่ในกระบอฉีดเป็นเวลานานจนเกิดการแยกตัวของก๊าซและความชื้น พลาสติกที่ถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความเร็วสูงจะทำให้ก๊าซที่อยู่ในเนื้อพลาสติกกระจายไปที่ผิวชิ้นงานเป็นรอยประกายสีเงิน

2.2.6.4 รอยไหม้ (Burn Marks)

รอยไหม้เกิดจากการอัดตัวของอากาศในแม่พิมพ์ที่ไม่สามารถระบายออกได้ทัน ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนทำให้พลาสติกไหม้ รอยไหม้มักปรากฏบริเวณตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติก ปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหานี้ได้แก่ อุณหภูมิพลาสติกที่สูงเกินไป และความเร็วในการฉีดที่สูงเกินไป

2.2.6.5 ชิ้นงานเกิดรอยแห้ว (Short Shot)

เกิดจากการที่พลาสติกไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ไม่เต็มก่อนที่จะแข็งตัว ทำให้เกิดช่องว่างหรือรอยแห้วที่ปลายชิ้นงาน สาเหตุหลักคือการไหลของพลาสติกช้าเกินไป ความหนืดของพลาสติกสูง หรือแรงดันฉีดไม่เพียงพอ

2.2.6.6 รอยยุบ (Sink Mark)

เป็นรอยบุ๋มบนผิวชิ้นงานซึ่งเกิดจากการหดตัวของพลาสติกขณะเย็นตัว โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความหนาสูง พลาสติกที่มีโครงสร้างผลึกมักมีแนวโน้มเกิดปัญหานี้มากขึ้น

2.2.6.7 ร่องรอยการไหล (Flow Mark)

เกิดจากความเร็วในการฉีดพลาสติกต่ำเกินไป ทำให้พลาสติกเย็นตัวก่อนที่จะเติมเต็มแม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดเป็นลายคลื่นคล้ายวงปีของต้นไม้บนผิวชิ้นงาน ปัญหานี้มักเกิดบริเวณใกล้ทางเข้าน้ำพลาสติก

2.2.6.8 การบิดตัวโก่งงอ (Warpage)

เกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากชิ้นงานมีความหนาไม่สม่ำเสมอ หรือระบบทำความเย็นของแม่พิมพ์ไม่ดี นอกจากนี้ การใช้แรงดันย้ำที่มากหรือนานเกินไป อาจทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดตัวโก่งงอเมื่อถูกปลดออกจากแม่พิมพ์

2.2.6.9 ขนาดคลาดเคลื่อน (Dimensional Defect)

เกิดจากแรงดันฉีดและแรงดันย้ำไม่เพียงพอ ทำให้พลาสติกเย็นตัวเร็วเกินไป จนเกิดการหดตัวมาก ส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานเล็กกว่าที่ออกแบบไว้

2.2.6.10 รอยเชื่อมประสาน (Weld Line Mark)

เกิดขึ้นที่บริเวณที่พลาสติกเหลวไหลมาบรรจบกัน หากอุณหภูมิของพลาสติกต่ำเกินไป จะทำให้การเชื่อมประสานไม่ดี ส่งผลให้เกิดรอยเชื่อมที่เห็นได้ชัด ปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหานี้ ได้แก่ ความเร็วในการฉีดต่ำ หรืออุณหภูมิของพลาสติกและแม่พิมพ์ต่ำเกินไป

2.2.6.11 การแตกร้าวของชิ้นงาน (Cracking)

รอยร้าวมักเกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของน้ำพลาสติกหรือบริเวณที่มีการไหลของพลาสติกสิ้นสุด ปัญหานี้พบได้มากในพลาสติกที่ไม่มีโครงสร้างผลึก และมักเกิดขึ้นชัดเจนในชิ้นงานพลาสติกใส โดยรอยร้าวอาจปรากฏทันทีหลังจากเย็นตัวหรือภายหลังการใช้งาน เช่น จากกระบวนการพ่นสีหรือแรงกระแทก

จากปัญหาข้างต้น การปรับค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก เช่น ความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ และระบบทำความเย็นของแม่พิมพ์ ถือเป็นแนวทางสำคัญในการลดข้อบกพร่องของชิ้นงาน และช่วยให้สามารถผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีคุณภาพสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปพลาสติก

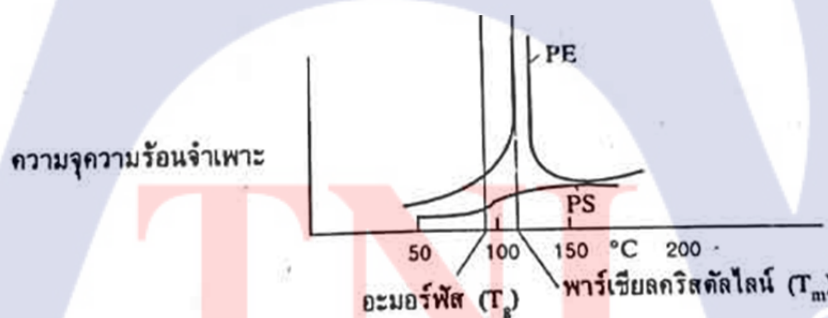
2.2.7.1 ปัจจัยของตัววัสดุพลาสติก

เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้ทำการฉีดจะเป็นกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นจึงขอเปรียบเทียบเฉพาะคุณสมบัติของอะมอร์ฟัสและพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกเท่านั้น คุณสมบัติบางประการที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อน ซึ่งปริมาณจำเพาะพลังงานจำเพาะที่ใช้ของวัสดุพลาสติกประเภทพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกจะมีค่ามากกว่าอะมอร์ฟัสเทอร์โม

พลาสติก โดยที่จุด T_m ซึ่งเป็นจุดที่ส่วนที่เป็นผลึกเริ่มหลอมเหลวละลายออกค่าปริมาตรจำเพาะและพลังงานที่ใช้จำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนคุณสมบัติในการนำคำนวณความร้อนและความจุความร้อนจำเพาะของพาร์เซิลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกก็ยังมีบทบาทเช่นเคย คือความสามารถในการนำความร้อนจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้จุด T_m และจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดที่จุดนี้ ส่วนความจุความร้อนจำเพาะจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าจุด T_m และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย หลังจากสิ้นสุดช่วง T_m ค่านี้ก็จะลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าที่จุด T_m นี้ พลาสติกต้องการพลังงานความร้อนเพื่อช่วยในการหลอมละลายของผลึก ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



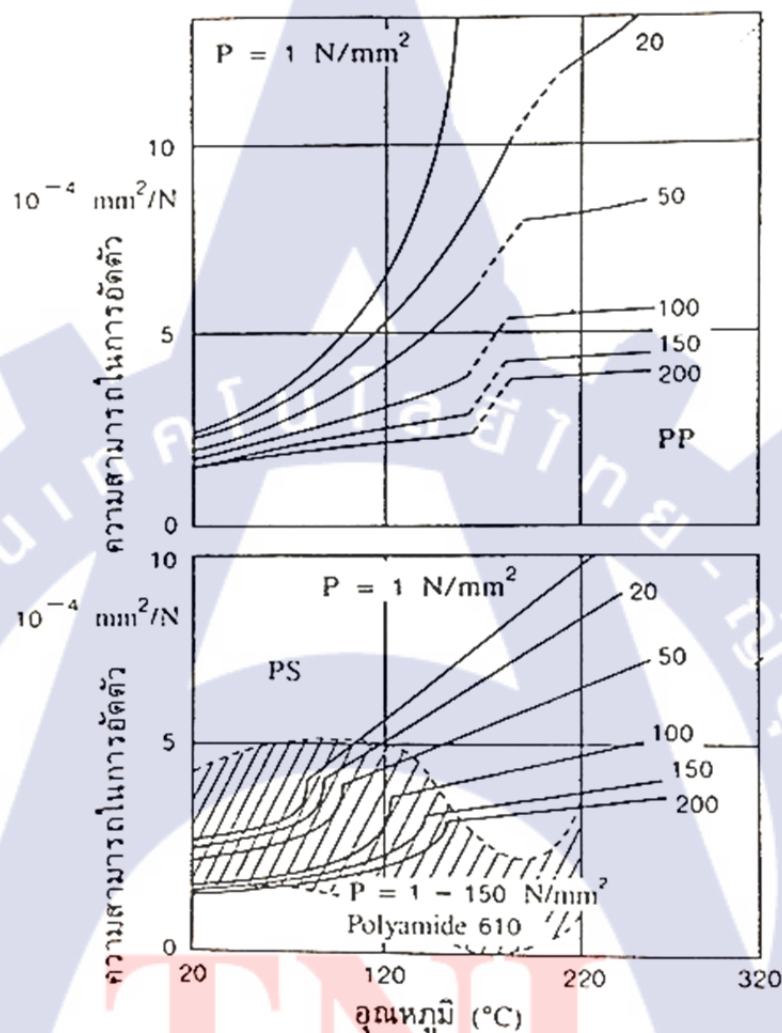
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างคุณสมบัติของปริมาตรจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติกและพาร์เซิลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างคุณสมบัติของความจุความร้อนจำเพาะของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติกและพาร์เซิลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก

คุณสมบัติบางประการของเทอร์โมพลาสติกทั้งสองประเภทอาจจะไม่เด่นชัดในช่วงจังหวะฉัด เพราะต้องใช้เวลาในการให้ความดัน เช่น ความสามารถในการอัดตัวและความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในรูปที่ 2.9 ความสามารถในการอัดตัวของพาร์เซิลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก

จะน้อยกว่าของอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก เพราะว่าปริมาตรจำเพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนมีค่ามากกว่าแต่ความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นจะอยู่นานกว่า

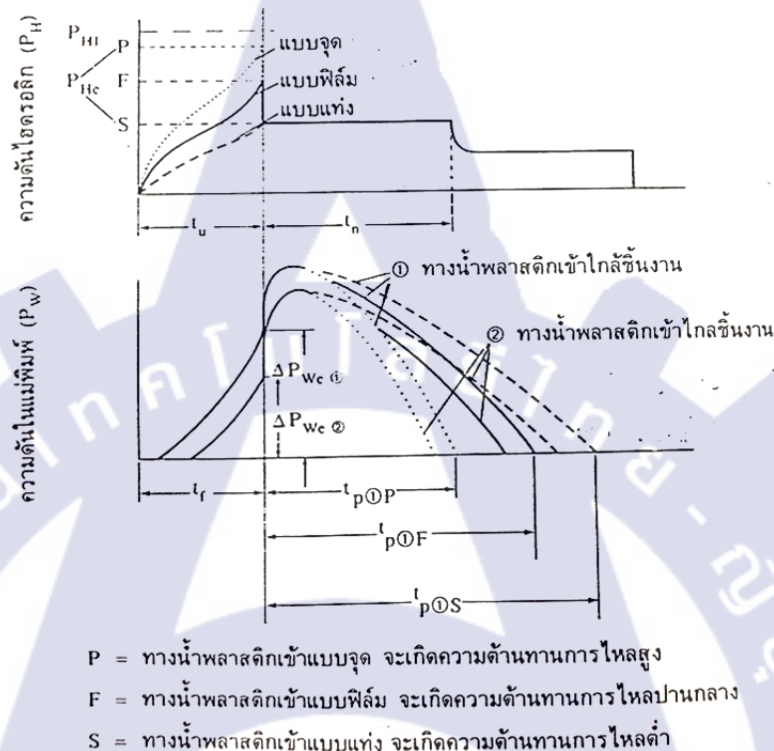


รูปที่ 2.9 ความสามารถในการอัดตัวของพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิและความร้อน

2.2.7.2 ปัจจัยของระบบทางน้ำพลาสติก

ลักษณะและรูปร่างของรูเข้าของน้ำพลาสติกหลอมเหลว (Gate) ตลอดจนระยะทางวิ่งของน้ำพลาสติกหลอมเหลว (Runner) ก็มีผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานฉีดเช่นกัน ซึ่งสามารถดูได้จากค่าความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากความต้านทานการไหลของพลาสติกในระบบแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าลักษณะของรูเข้าพลาสติกเป็นแบบจุด (Point Gate) จะเกิดความดันของระบบสูงกว่าแบบฟิล์ม (Film Gate) และแบบแท่ง (Pin Gate) ตามลำดับ ซึ่งใช้ความดันและความดัน

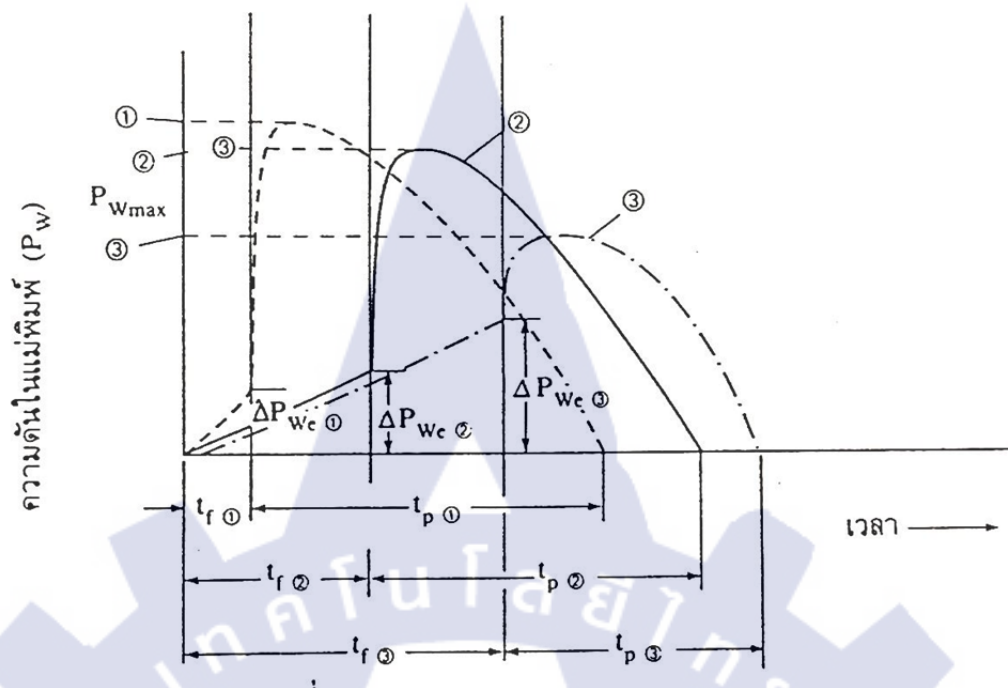
ในการฉีดคงที่ ส่วนทางวิ่งของน้ำพลาสติกที่ใกล้กับตัวชิ้นงานจะให้ความดันในแม่พิมพ์ที่สูงกว่า เนื่องจาก การต้านทานการไหลของพลาสติกมีน้อยกว่า แต่การไหลตัวไม่ดีของพลาสติกหลอมเหลวสามารถเพิ่มได้ จากการเพิ่มความดันและความเร็วในการฉีดให้สูงขึ้นได้



รูปที่ 2.10 ปัจจัยของระบบทางวิ่งของพลาสติกหลอมเหลวที่มีผลต่อความดันในแม่พิมพ์

2.2.7.3 ปัจจัยของความเร็วในการฉีด

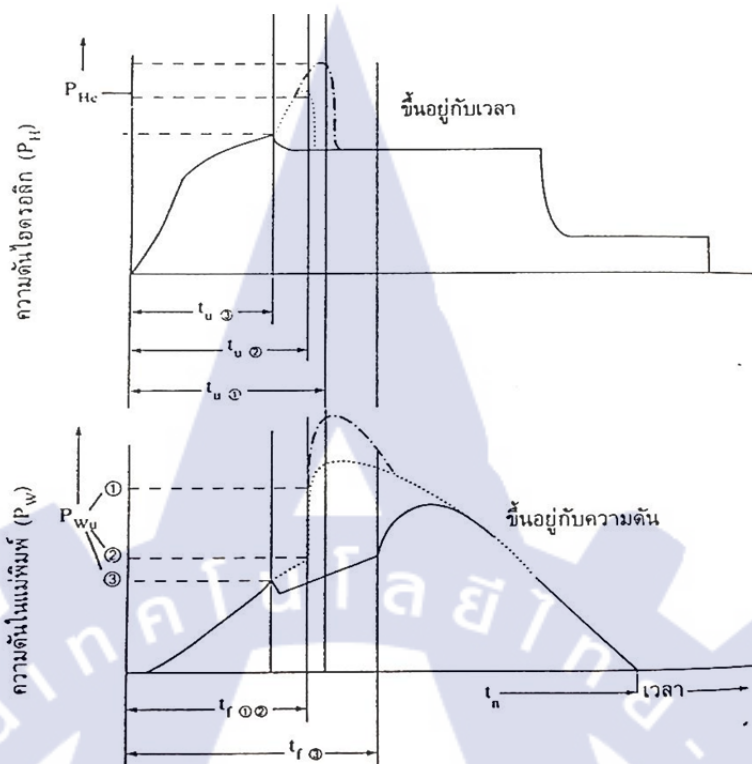
ความเร็วในการฉีดจะอิทธิพลมากต่อความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11 ถ้าความเร็วในการฉีดสูงขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ก็จะสูงขึ้นตามและใช้เวลาในการสร้างความดันเร็วกว่าด้วย เนื่องมาจากพลาสติกหลอมเหลวถูกเติมในแม่พิมพ์ในระยะเวลาที่สั้นกว่า



รูปที่ 2.11 ปัจจัยของความเร็วในการฉีด

2.2.7.4 ปัจจัยของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน

การสับเปลี่ยนจังหวะนี้อาจกำหนดโดย เวลาในการฉีด ระยะทางในการฉีด และความดันในแม่พิมพ์ ที่จะเริ่มเข้าสู่จังหวะ ฉีดย้ำเพื่อรักษาความดัน เมื่อใด อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ทั้งสามปัจจัยนี้ถูกใช้ร่วมกัน แต่จะเลือกใช้ปัจจัยใดเป็นหลักขึ้นอยู่กับ การตั้งค่าของเครื่องฉีดพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติกรุ่นเก่ามักใช้ ระยะทางเป็นหลัก (ปริมาณเนื้อพลาสติกที่ถูกฉีด) โดยสามารถกำหนดว่า ควรเหลือปริมาณพลาสติกไว้เพื่อรักษาความดันเท่าใด และสามารถตั้งค่าเวลาและความดันในการฉีดได้ ตัวอย่างเช่น หากตั้งเวลาในการฉีดน้อยเกินไป เกลียวหนอน (Screw) อาจไม่สามารถเคลื่อนที่ตามระยะที่กำหนดได้ และอาจหยุดค้างอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ส่งผลให้เครื่องหยุดทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการฉีดให้มากขึ้น ในทางกลับกัน หากใช้เวลาในการฉีดมากเกินไป เกลียวหนอนจะหยุดค้างที่ระยะทางที่กำหนดเป็นเวลานานขึ้น ส่งผลให้เสียรอบเวลาในการฉีด ด้วยเหตุนี้เครื่องฉีดพลาสติกสมัยใหม่จึงใช้ทั้ง เวลาและระยะทางในการฉีดร่วมกัน โดยกำหนดผ่าน ความเร็วในการฉีด ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ ระยะทางต่อเวลา (Distance/Time) และยังขึ้นอยู่กับ ความดันไฮดรอลิก ด้วย หากใช้ ความเร็วฉีดสูง ความดันที่ใช้ฉีดจะสูงตามไปด้วย ดังนั้นการสับเปลี่ยนจังหวะจาก กระบวนการฉีดเข้าสู่กระบวนการรักษาความดัน จึงเป็นกระบวนการที่ต้องควบคุมอย่างแม่นยำเพื่อให้ได้คุณภาพชิ้นงานที่ดีที่สุดแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปัจจัยของการสับเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเข้าสู่จังหวะรักษาความดัน

กรณีที่ 1 การสับเปลี่ยนช้า เนื่องจากระยะทางในการฉีดมาก เวลาที่ใช้จึงต้องนานขึ้น ความดันก็จำเป็นต้องใช้สูงขึ้นและความดันในแม่พิมพ์ก็มีโอกาสเกิดสูงขึ้นตาม จึงควรระวังการฉีดเกินซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดครีบได้

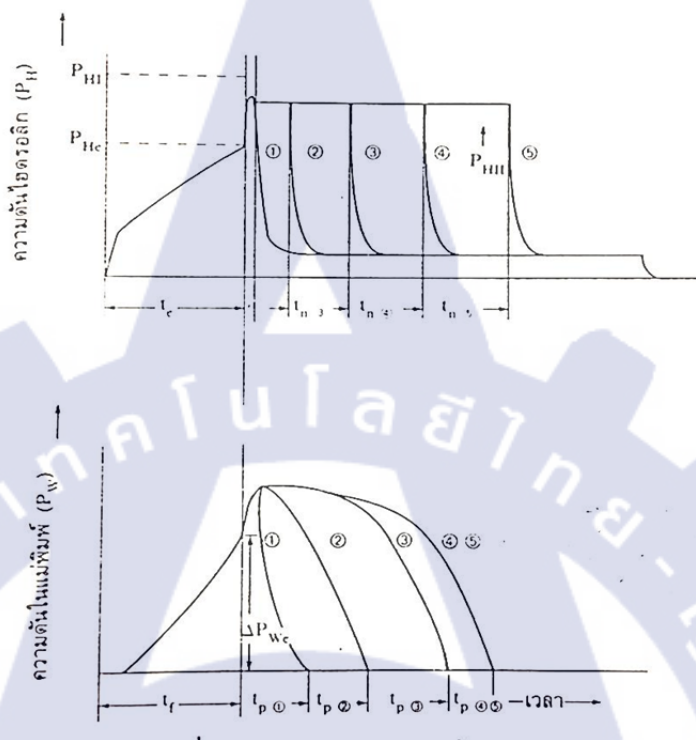
กรณีที่ 2 การสับเปลี่ยนค่อนข้างเร็ว คือจะสับเปลี่ยนเข้าสู่จังหวะฉีดย้ารักษาความดันทันทีที่พลาสติกเต็มในโพรงแม่พิมพ์ ความดันในแม่พิมพ์จึงไม่สูงเกินไป

กรณีที่ 3 การสับเปลี่ยนเร็วเกินไปทำให้ความดันในแม่พิมพ์ต่ำเกินไปจนพลาสติกไม่เต็มแม่พิมพ์ในจังหวะฉีด

2.2.7.5 ปัจจัยของเวลาในการฉีดย้ารักษาความดัน

การเป็นไปของความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะฉีดย้ารักษาความดันมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานฉีด โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของขนาดของชิ้นงาน ส่วนเวลานี้ถ้าสั้นเกินไป ความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นก็คงคงสภาพอยู่ไม่นานพอที่จะทำให้เนื้อพลาสติกแน่นเต็มแม่พิมพ์ แต่ถ้านานเกินไปความดันในแม่พิมพ์จะอยู่นานเกินไปทำให้พลาสติกถูกอัดแน่นเป็นเวลานานจนอาจเกิดความ

เสียหายแก่ชิ้นงานและอายุของแม่พิมพ์อีกด้วย ลักษณะของความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะของการใช้เวลาในการย่ำรักษาความดันสามารถดูได้จากรูปที่ 2.13 ซึ่งเวลาที่เหมาะสมคือเวลาที่ t_n ④



รูปที่ 2.13 ปัจจัยของเวลาในการรักษาความดัน

2.2.7.6 ปัจจัยของเวลาในการฉีดย่ำรักษาความดัน

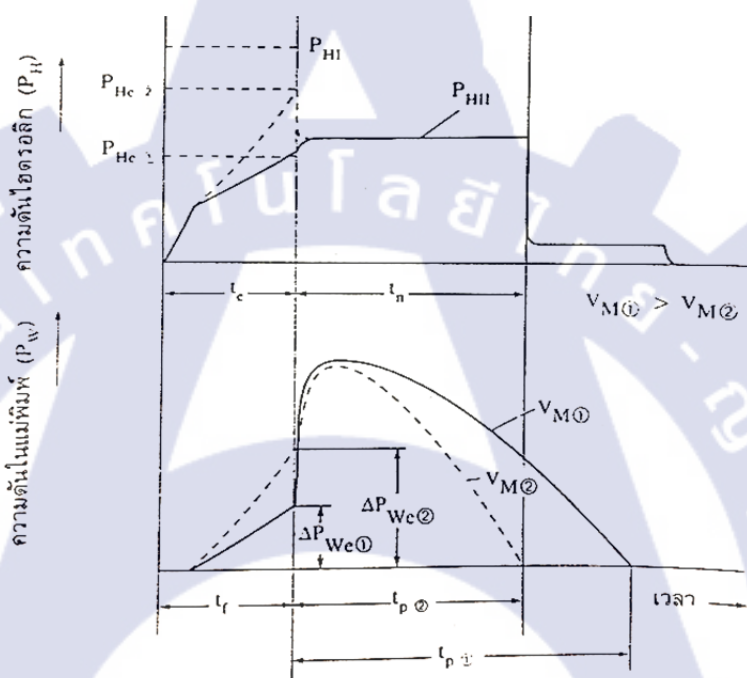
เวลาในการหล่อเย็นไม่มีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์ แต่จะมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ เพราะถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นน้อยเกินไปอุณหภูมิของชิ้นงานในแม่พิมพ์จะยังไม่ต่ำพอที่จะปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ เพราะถ้าทำการปลดออกจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ และถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นมากเกินไป เวลาในการทำงานทั้งวงจรก็จะมากเกินความจำเป็น ดังนั้นจึงใช้วิธีคำนวณหาเวลาในการหล่อเย็นช่วยแล้วปรับแต่งเวลานี้อีกเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานจริงในทางปฏิบัติ

2.2.7.7 ปัจจัยของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว

เมื่ออุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเปลี่ยนไปด้วย เช่น ความหนืด เอนทัลปี ปริมาตรจำเพาะ กล่าวคือถ้าอุณหภูมิพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้น ความหนืดก็จะลดลง นั่นก็หมายถึงในช่วงจังหวะฉีดสามารถใช้ความดันที่ต่ำลงมาเล็กน้อยได้ โดย

ยังใช้ความเร็วในการฉีดเท่าเดิม เพราะว่าพลาสติกเหลวไหลได้ดีและทำให้ความดันที่ใช้ฉีดเดิมเข้าแม่พิมพ์ต่ำลงได้อีกด้วย รูปที่ 2.14 ตลอดทั้งความดันในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในช่วงจังหวะฉีดรักษาคความดันก็จะดีขึ้นด้วย คือความดันสูงขึ้นและเกิดขึ้นเป็นเวลาที่ยาวนานกว่าการใช้อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวต่ำ

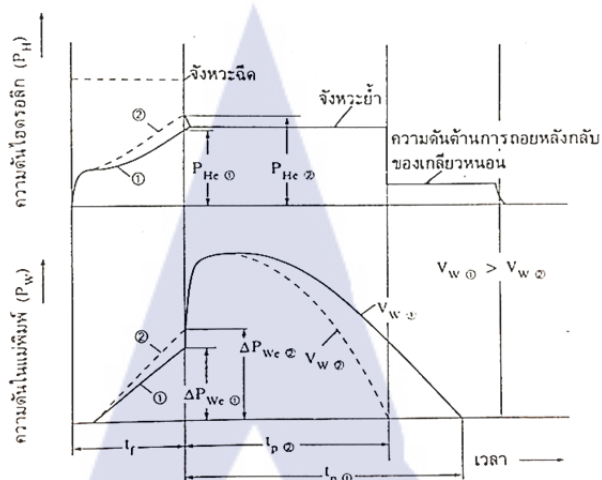
นอกจากนี้เส้นโค้งการเย็นตัวของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นก็จะเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะถ้าใช้อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวสูง เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นก็จะนานขึ้น



รูปที่ 2.14 ปัจจัยของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวที่มีต่อความดันในแม่พิมพ์

2.2.7.8 ปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์

การเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์ คล้ายกับอิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว กล่าวคือในช่วงจังหวะการฉีด ความหนืดของพลาสติกเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะไม่ค่อยมีผลกระทบต่องานที่มีความหนา แต่จะกระทบต่องานที่บางและมีระยะทางในการไหลของพลาสติกที่ยาว และเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำ ความดันที่เกิดขึ้นในจังหวะฉีดเพื่อเติมพลาสติกเหลวเข้าจนเต็มในแม่พิมพ์ก็จะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และเส้นโค้งแสดงความดันในแม่พิมพ์ก็จะเกิดขึ้นเป็นเวลาที่สั้นลง

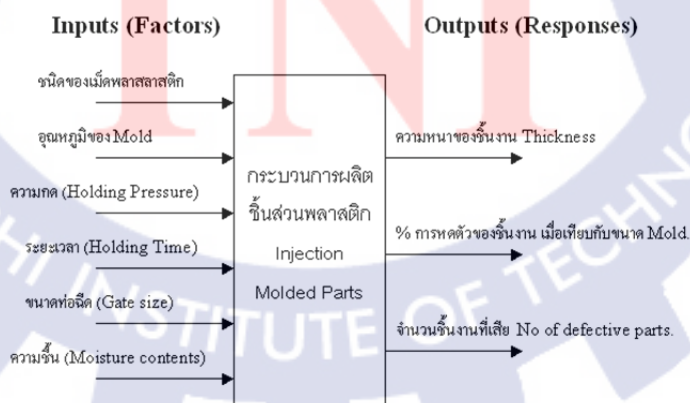


รูปที่ 2.15 ปัจจัยของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความดัน

2.3 เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [3-4]

การออกแบบการทดลอง มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าปัจจัย (factors) ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนอง (Response) ของกระบวนการนั้น

กระบวนการ (Process) คือการทำงานร่วมกัน ผสมผสานกันของเครื่องจักร (Machine) วัสดุดิบ (Material) มนุษย์ (People) กรรมวิธีการทำงาน (Methods) สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Environment) และกระบวนการวัดค่า (Measurement) เพื่อให้เกิดเป็นผลผลิตหรือการบริการ รูปต่อไปนี้เป็นตัวอย่างกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในหมวดการผลิตสินค้าอุตสาหกรรม เพื่อชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยกระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง



รูปที่ 2.16 ปัจจัยกระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง

ในกระบวนการหนึ่ง อาจมีปัจจัยมากมายที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ บางปัจจัยเราไม่สามารถควบคุมได้ แม้ว่ามันอาจมีผลกระทบต่อกระบวนการก็ตาม เราจำเป็นต้องละเลยหรือปล่อยให้ตัวแปรเหล่านี้เป็นไปตามธรรมชาติ ซึ่งใน การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เราเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Noise Variable อย่างไรก็ตาม ตัวแปรบางตัวไม่สามารถปล่อยให้เปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติได้ เนื่องจากมันมีผลต่อกระบวนการมากกว่าตัวแปร Noise เราจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อกระบวนการให้มากที่สุด ซึ่งเราเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Key Process Input Variable (KPIV) ในขณะเดียวกัน เราจะสามารถประเมินประสิทธิภาพหรือความเป็นไปของกระบวนการได้โดยการใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสม ซึ่งในกระบวนการหนึ่งๆ อาจใช้ตัวชี้วัดเพียงตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ วิธีการวัดสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ การวัดเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) ได้ค่าที่เป็นตัวเลขต่อเนื่อง (Continuous Data) เช่น การวัดด้วยเครื่องมือที่ให้ค่าตัวเลข เช่น น้ำหนัก อุณหภูมิ หรือแรงดัน และการวัดเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) ได้ค่าที่เป็นข้อมูลไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) เช่น การนับจำนวนของข้อบกพร่อง หรือการสังเกตลักษณะของชิ้นงาน

อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถวัดตัวแปร Output ของกระบวนการได้ทุกตัว จึงจำเป็นต้องเลือกเฉพาะตัวแปรที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ดีที่สุด ซึ่งเราเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Key Process Output Variable (KPOV) จากรูปที่ 2.16 ตัวแปรเข้า Input Factors ที่เห็นนั่นคือตัวแปรที่พิสูจน์แล้วว่าเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการมาก และ Output Factors ที่ปรากฏก็เป็นตัวชี้วัดที่จะบ่งบอกถึงกระบวนการได้ดีที่สุด ซึ่งมีทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดได้คือความหนา การหดตัวของชิ้นงาน และที่นับหรือสังเกตด้วยคนเท่านั้น คือจำนวนชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์หรือมีตำหนินั่นเอง เมื่อต้องใช้ DOE นั้นจะไม่นิยมใช้ Response หลายตัวในการทำครั้งหนึ่ง

2.3.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

2.3.1.1 กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem Statement) จะต้องชัดเจน เข้าใจได้ง่ายและเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นเช่นไรขนาดไหน (How) และพบปัญหานั้นที่ใดในช่วงเวลาใด (Where)

2.3.1.2 การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ จำพวก Univariate เช่น T-Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

2.3.1.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ เช่น การนับ และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษานั้นได้ดีด้วย

2.3.1.4 เลือกแบบทดลอง (Experiment Design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

2.3.1.5 ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment) ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

2.3.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ไม่ใช่แค่การ Run Computer Program เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การพิสูจน์ทราบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model Adequacy Checking) หาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลข้อมูล

2.3.2 การออกแบบการทดลอง โดย Full Factorial Design

คือ วิธีการทดลองที่จะต้องนำเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณี โดยการทดลองนี้จะเลือกใช้ 3 - Level Full Factorial Design แต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 3^k โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย (Main Effect) จะเขียนแทนด้วย A,B และ C ตามลำดับ และใช้รหัส (Code) เพื่อปรับเปลี่ยนหน่วยสเกลของแต่ละปัจจัยให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน สำหรับ 3 - Level Code จะใช้ 0 แทนค่าตรงกลางของแต่ละปัจจัย, -1 แทนกรณีที่ค่าปัจจัยเป็น Low และ 1 แทนกรณีที่ค่าปัจจัยเป็น High ดังนั้น จำนวนรอบการทดลองทั้งหมด $\text{Run} = 3^3 = 27$ รอบ ตามดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run) เมื่อแทนด้วยรหัส 3 Level

Run	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1

ตารางที่ 2.1 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง (Run) เมื่อแทนด้วยรหัส 3 Level (ต่อ)

Run	A	B	C
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

2.4 การจำลองวิเคราะห์ทางวิศวกรรม [5]

การขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยแม่พิมพ์แบบปิดเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนหลายขั้นตอน ตั้งแต่การคัดเลือกวัตถุดิบ การออกแบบชิ้นงาน การเลือกใช้เครื่องฉีดพลาสติก การออกแบบแม่พิมพ์ ไปจนถึงการออกแบบกระบวนการผลิต เช่น การตัดแต่งผิวงาน การพ่นสี และการประกอบชิ้นงาน

เมื่อมีการนำพลาสติกชีวภาพมาใช้ในการบวนการฉีดพลาสติก จำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความสามารถในการขึ้นรูป ความเหนียว และความทนทานต่อความร้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดพลาสติกชีวภาพ และใช้เทคโนโลยี Finite Element Method (FEM) มาประยุกต์ในการจำลองการไหลของพลาสติก

ภายในแม่พิมพ์ โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE - Computer-Aided Engineering) ผ่านโปรแกรม Moldex3D

การใช้เทคโนโลยี CAE ในงานวิศวกรรมเทคโนโลยี CAE (Computer-Aided Engineering) เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้วิศวกรสามารถวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมของวัสดุหรือกระบวนการผลิตก่อนที่จะนำไปสร้างต้นแบบจริง โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ ซึ่งรวมถึง Finite Element Analysis (FEA) - การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงและพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำ และ Computational Fluid Dynamics (CFD) - การจำลองพฤติกรรมของของไหล เช่น การไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์

การใช้ CAE ช่วยให้สามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ลดต้นทุนในการสร้างต้นแบบ และเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น วิศวกรสามารถใช้ FEA เพื่อตรวจสอบจุดอ่อนของล้ออัลลอยของรถยนต์ก่อนผลิตต้นแบบจริง และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด เทคโนโลยีนี้ช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำ ทดลองซ้ำได้ไม่จำกัด ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ง่าย และลดเวลาในการสร้างต้นแบบ ลดเวลาการทดสอบ รวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการวิจัยและพัฒนา

2.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM Analysis Process)

องค์ประกอบพื้นฐานของการวิเคราะห์ FEM ประกอบด้วย แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ (Geometry) - สร้างรูปทรงของชิ้นงานให้มีลักษณะใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด, ค่าเฉพาะของวัสดุ (Material Parameters) - ระบุคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) - กำหนดแรงกระทำและข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

2.4.2 ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์

แบบจำลองที่ดีควรมีความเหมือนกับสภาวะจริงมากที่สุด เพื่อให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำ ขั้นตอนสำคัญของการสร้างแบบจำลองใน FEM มีดังนี้ การขึ้นรูปแบบจำลอง (Model Simulation) ด้วยการสร้างแบบจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD เช่น SolidWorks, NX, Pro/Engineer, ใช้เทคนิคการถ่ายภาพหรือการสแกนพื้นผิว (Scanning) ของวัตถุต้นแบบ

2.4.3 แปลงข้อมูลเป็นแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ด้วย FEM

2.4.3.1 การแบ่งเอลิเมนต์ (Meshing Model)

เป็นกระบวนการแยกชิ้นงานออกเป็นองค์ประกอบขนาดเล็กเรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น แต่ละเอลิเมนต์จะมีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ความหนา ความหนาแน่น มอดูลัสของยัง และอัตราส่วนปัวซอง เอลิเมนต์สามารถมีจุดต่อ (Node) เพื่อเชื่อมโยงระหว่างกัน โดยบางจุดต่อจะอยู่บริเวณมุมของเอลิเมนต์ และบางจุดต่ออยู่ตรงขอบระหว่างเอลิเมนต์

การเพิ่มจำนวนจุดต่อบนแบบจำลองช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม จำนวนเอลิเมนต์ที่มากขึ้นก็ต้องใช้พลังงานในการคำนวณเพิ่มขึ้น ดังนั้นต้องเลือกโครงสร้างเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและประหยัดเวลาในการคำนวณ

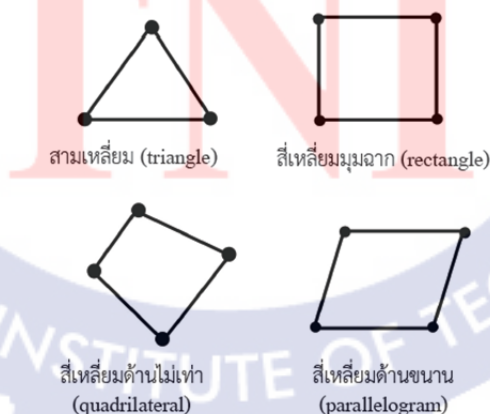


รูปที่ 2.17 เส้นการแบ่ง Node

จากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถจำแนกรูปร่างและความสัมพันธ์ของจุดต่อได้ดังนี้

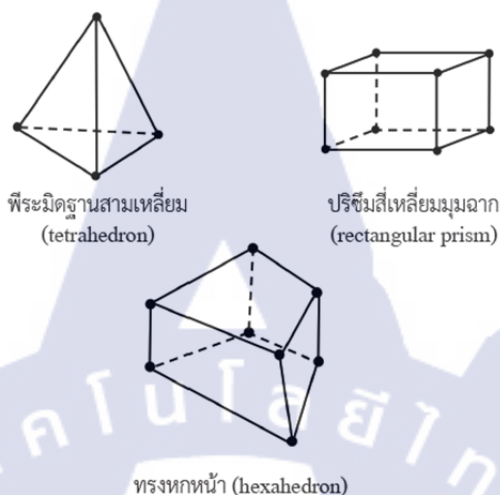
a) รูปร่างเอลิเมนต์ 1 มิติ ได้แก่ ลักษณะเชิงเส้น (Linear) เช่น คาน (Beam) โครงถัก (Truss) คานประกอบด้วย 3 จุดต่อ (Quadratic Beam) คานประกอบด้วย 4 จุดต่อ (Cubic Beam)

b) รูปร่างเอลิเมนต์ 2 มิติ ได้แก่ เอลิเมนต์พื้นที่เชิงเส้นเป็นระนาบความเค้น ความเครียด ลักษณะเป็นแผ่น (Plate) หรือเปลือกบาง (Shell) มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมรูปร่างต่าง



รูปที่ 2.18 รูปร่างเอลิเมนต์ 2 มิติ

c) รูปร่างเอลิเมนต์ 3 มิติ ได้แก่ เอลิเมนต์ปริมาตรอาจเป็นโครงสร้างพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ปริซึมสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Prism) หรือทรงหกหน้า (Hexahedron)



รูปที่ 2.19 รูปร่างเอลิเมนต์ 3 มิติ

2.4.4 กำหนดเงื่อนไข (Condition)

หลังจากสร้างเอลิเมนต์ 3 มิติ (3D Element Meshing) สำหรับการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกแล้ว จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำและสอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง โดยเงื่อนไขที่ต้องกำหนด ได้แก่

2.4.4.1 ชนิดของวัสดุ (Material Type) - กำหนดคุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้ เช่น โพลีโพรพิลีน (PP), อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) หรือ โพลีคาร์บอเนต (PC) โดยต้องพิจารณาคุณสมบัติทางความร้อนและการไหลของวัสดุ

2.4.4.2 รุ่นของเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine Type) - ระบุประเภทและขนาดของเครื่องฉีดพลาสติก เพื่อให้โปรแกรมคำนวณอัตราการฉีด ความสามารถในการสร้างแรงดัน และการควบคุมกระบวนการได้ถูกต้อง

2.4.4.3 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) - กำหนดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมเพื่อให้พลาสติกเย็นตัวลงอย่างสม่ำเสมอ ลดปัญหาการหดตัวและรอยตำหนิของชิ้นงาน

2.4.4.4 ตำแหน่งของทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate Location) - ระบุตำแหน่งของ Gate เพื่อให้การไหลของพลาสติกเข้าสู่โพรงแม่พิมพ์มีประสิทธิภาพ ลดการเกิดรอยเชื่อมประสาน (Weld Line) และฟองอากาศ

2.4.4.5 การตั้งค่าการฉีดพลาสติก (Injection Molding Process Parameters) - กำหนดตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการฉีดพลาสติก ได้แก่

a) ความดัน (Pressure): แรงดันที่ใช้ฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งต้องปรับให้เหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (Short Shot) หรือเกิดครีบ (Flashing)

b) ความเร็ว (Velocity): อัตราการไหลของพลาสติกขณะฉีด ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานและการกระจายตัวของวัสดุ

c) อุณหภูมิ (Temperature): อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวที่ถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งต้องควบคุมให้เหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพของวัสดุ

ตัวแปรเหล่านี้ต้องถูกนำไปใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ก่อนนำไปใช้กับเครื่องฉีดพลาสติกจริง ซึ่งช่วยให้สามารถปรับปรุงกระบวนการผลิต ลดของเสีย และเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 การประเมินคุณภาพชิ้นงานจากการจำลองการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D [6]

การใช้ โปรแกรม Moldex3D ในการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยสามารถใช้ประเมินคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกในหลายแง่มุมเพื่อลดข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการจริง การประเมินคุณภาพของชิ้นงานจากการจำลองสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆ ดังนี้

2.5.1 การประเมินการไหลของพลาสติก (Flow Analysis)

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกหลอมเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการตรวจสอบว่าพลาสติกสามารถเต็มแม่พิมพ์ได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น พฤติกรรมการไหลของพลาสติก (Flow Pattern) เพื่อวิเคราะห์ว่าเนื้อพลาสติกกระจายตัวในแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอหรือไม่, จุดเชื่อมประสาน (Weld Line Analysis) เพื่อระบุบริเวณที่เกิดรอยเชื่อมของพลาสติก ซึ่งอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน และแรงดันเติมเต็มแม่พิมพ์ (Filling Pressure) เพื่อวิเคราะห์ว่าความดันในกระบวนการฉีดมีความเหมาะสมหรือมีจุดที่เกิดแรงดันสูงเกินไป

2.5.2 การประเมินความผิดปกติของชิ้นงาน (Defect Prediction Analysis)

โปรแกรม Moldex3D สามารถใช้ตรวจสอบและทำนายข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการฉีดพลาสติก เช่น โพรงอากาศ (Air Traps) ซึ่งเป็นจุดที่อากาศถูกกักอยู่ภายในแม่พิมพ์ ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพของพื้นผิว, รอยไหม้ (Burn Marks) ที่เกิดจากการไหลของพลาสติกที่มีความเร็วสูงเกินไป หรือการระบายอากาศที่ไม่ดี, การยุบตัวของชิ้นงาน (Sink Marks Analysis) ซึ่งเกิดจากการหดตัวของ

พลาสติกหลังจากเย็นตัว ส่งผลต่อรูปร่างและความสวยงามของชิ้นงาน และการบิดเบี้ยวและบิดตัวโก่งงอ (Warping & Deformation Analysis) เพื่อตรวจสอบว่าชิ้นงานหลังการขึ้นรูปมีความผิดเพี้ยนทางมิติหรือไม่

2.5.3 การประเมินการแข็งตัวและการเย็นตัว (Cooling and Solidification Analysis)

การวิเคราะห์กระบวนการทำให้เย็นตัวของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาจาก เวลาการเย็นตัว (Cooling Time Analysis) ซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่ชิ้นงานสามารถถอดออกจากแม่พิมพ์ได้, อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven Cooling Distribution) ซึ่งอาจทำให้เกิดการหดตัวและบิดเบี้ยวของชิ้นงาน และการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature Distribution in Mold) เพื่อให้แน่ใจว่าระบบทำความเย็นของแม่พิมพ์สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างเหมาะสม

2.5.4 การประเมินแรงดันและแรงหนีบแม่พิมพ์ (Pressure and Clamping Force)

การวิเคราะห์แรงดันและแรงหนีบแม่พิมพ์ช่วยให้มั่นใจได้ว่าเครื่องฉีดพลาสติกสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณา แรงดันฉีดพลาสติก (Injection Pressure) เพื่อให้แน่ใจว่าพลาสติกถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างเหมาะสม, แรงดันภายในโพรงแม่พิมพ์ (Cavity Pressure Analysis) เพื่อตรวจสอบแรงดันในแต่ละจุดของแม่พิมพ์และป้องกันการแตกร้าวของแม่พิมพ์ และแรงหนีบแม่พิมพ์ (Clamping Force) เพื่อป้องกันการเปิดแม่พิมพ์ระหว่างการฉีดพลาสติก

2.5.5 การประเมินการหดตัวและความเสถียรทางมิติของชิ้นงาน (Shrinkage and Dimensional Stability Analysis)

พลาสติกส่วนใหญ่มีการหดตัวเมื่อเย็นตัวลง ซึ่ง Moldex3D สามารถช่วยวิเคราะห์และพยากรณ์ได้ เช่น อัตราการหดตัวของพลาสติก (Shrinkage Rate Analysis) เพื่อตรวจสอบว่าชิ้นงานจะหดตัวมากน้อยเพียงใด และความเสถียรทางมิติของชิ้นงาน (Dimensional Accuracy Analysis) เพื่อตรวจสอบว่าขนาดของชิ้นงานที่ผลิตได้ใกล้เคียงกับการออกแบบหรือไม่

2.5.6 การประเมินความแข็งแรงและสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Property)

Moldex3D สามารถช่วยจำลองและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป เช่น ความแข็งแรงของจุดเชื่อมประสาน (Weld Line Strength Analysis) เพื่อประเมินความแข็งแรงของบริเวณที่พลาสติกไหลมารวมกัน, แรงเค้นและแรงดึง (Stress and Strain Analysis) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของชิ้นงานในการรับแรง และอายุการใช้งานของชิ้นงาน (Fatigue Analysis) เพื่อตรวจสอบว่าชิ้นงานสามารถทนต่อการใช้งานในระยะยาวได้หรือไม่

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐภัทร สังข์ทอง [7] ทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ซึ่งได้นำการออกแบบการทดลอง แบบวิธี Full Factorial Design เข้ามาใช้เพื่อกำหนดขอบเขตการทดลองหาค่าที่เหมาะสมแข็ง ด้วยเงื่อนไขการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ หลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความดันฉีด ซึ่งแต่ละปัจจัยแตกต่างกัน 3 ระดับ ทำให้แบ่งเงื่อนไขการทดลองได้ทั้งหมด 27 เงื่อนไข และการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, Shimadzu, Model AG-X 50 KN)

สิตตารั พิศแลงาม [8] ได้ศึกษาการพยากรณ์การบิดเบี้ยวของชิ้นงานพลาสติกที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) เพื่อจำลองและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน โดยเน้นกรณีศึกษาของฝารอบกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (ECU Cover) งานวิจัยพบว่าการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลังจากการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และการหดตัวของพลาสติก ABS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D เพื่อจำลองพารามิเตอร์ในการผลิต และใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

S. Pitjamit et al. [9] ได้ศึกษากระบวนการผลิต กันชนหลังของรถจักรยานยนต์ (Rear Fender) โดยใช้กระบวนการฉีดพลาสติกและจำลองกระบวนการด้วยซอฟต์แวร์ Moldex3D งานวิจัยมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกโดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบ เช่น ตำแหน่งทางเข้าของวัสดุ การไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด และความดันฉีด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเลือกตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมช่วยให้วัสดุไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ดีขึ้น ลดปัญหาการเกิดรอยเชื่อมประสาน และการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน นอกจากนี้ การใช้ซอฟต์แวร์ CAE ยังช่วยลดข้อผิดพลาดในการออกแบบแม่พิมพ์และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพสูงขึ้น

Y. Tang [10] ได้ศึกษาการใช้การวิเคราะห์การไหลของแม่พิมพ์ (Mold Flow Analysis) เพื่อช่วยออกแบบกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยใช้ CAE (Computer-Aided Engineering) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ CAE ช่วยให้ผู้สามารถคาดการณ์ปัญหาการเสีรูปของชิ้นงานฉีดขึ้นรูป โดยการจำลองกระบวนการเติมพลาสติก การบรรจุแม่พิมพ์ และการระบายความร้อน ซึ่งช่วยให้สามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำและลดต้นทุนการผลิต

Y. Ryu et al. [11] บทความวิจัย (Materials, MDPI): งานวิจัยระดับนานาชาติที่ศึกษาการหดตัวและการบิดรูปของชิ้นงานฉีดพลาสติกโดยเน้นวัสดุ โพลีโพรพิลีนผสมสารเติมแต่ง (PP คอมโพลีต) ทั้งที่เติมทัลค์และไฟเบอร์กลาสในสัดส่วนต่างๆ (0-20% โดยน้ำหนัก) ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสมในการลดการหด-โก่งของชิ้นงาน. ผลปรากฏว่าชนิดของสารเติมแต่งมีอิทธิพลสูงสุด รองลงมาคือเปอร์เซ็นต์

การเติม ส่วนขนาดอนุภาคของทัลค์มีผลน้อยที่สุด สำหรับการลดการบิดงอ (ความต่างการหดตัวระหว่างทิศทางการไหลและขวางการไหล) พบว่า การเติมทัลค์ 20% ให้ผลดีที่สุดในการลดความต่างการหดตัวของ PP (ลดการโก่งงอ) ขณะที่การเติมแก้ว 20% ช่วยลดการหดตัวโดยรวมมากที่สุด ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับการใช้งาน PP-TD20 ในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการมิติคงตัวสูง เนื่องจากทัลค์ช่วยลดการหดและการโก่งของชิ้นงานพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

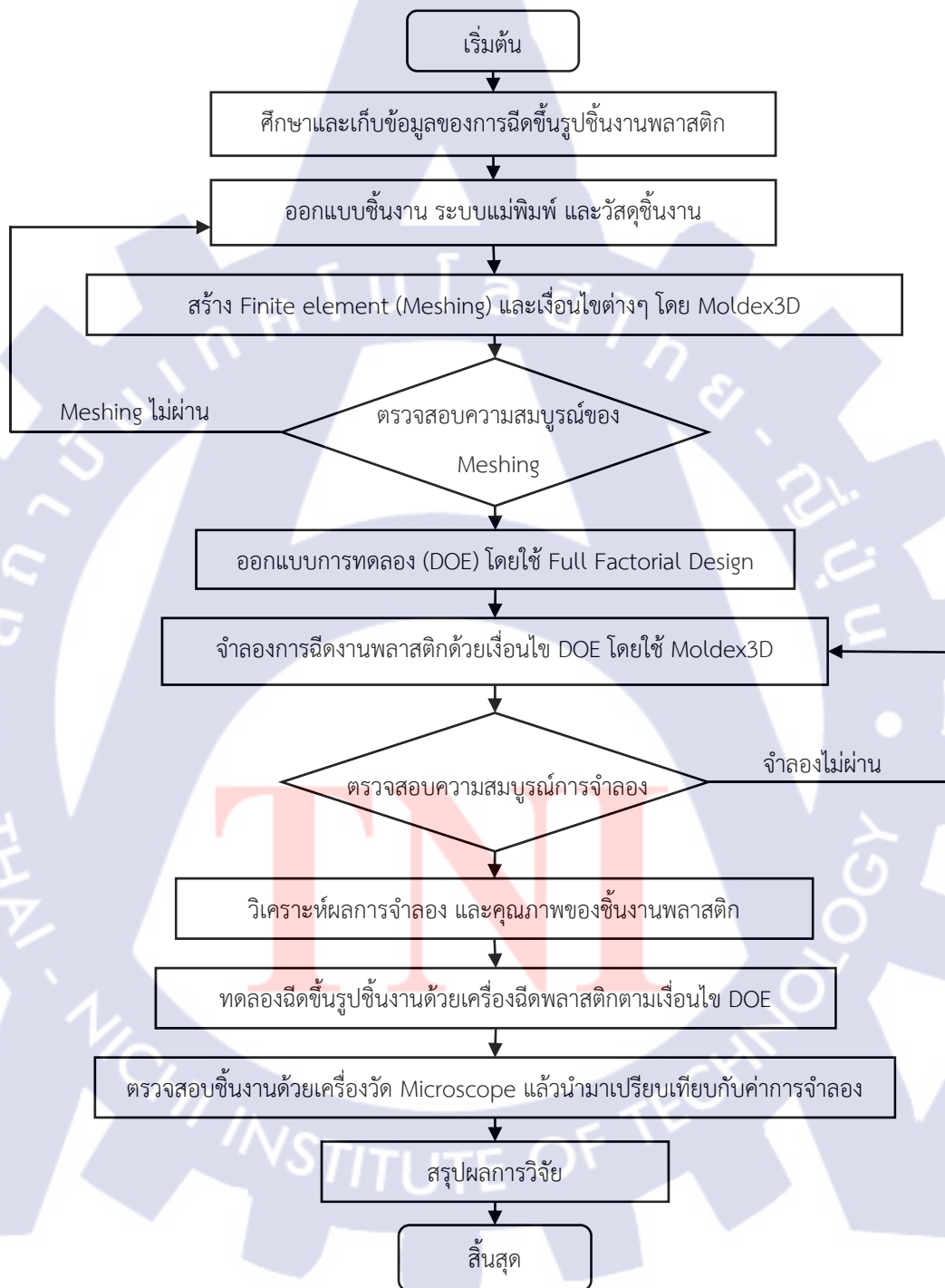
M. S. Zainudin et al. [12] บทความการประชุมวิชาการ (Materials Today: Proceedings) งานวิจัยนี้ใช้ การจำลองด้วย Moldex3D ร่วมกับ Taguchi Grey Relational Analysis เพื่อปรับกระบวนการฉีดพลาสติกโดยมีเป้าหมายลด แนวเชื่อมประสานพลาสติก (Weld-Line) และ รอยยุบตัว (Sink mark) พร้อมกัน. การทดลองปรับปรุงปัจจัยกระบวนการทำให้สามารถลดความกว้างแนวเชื่อมลงได้ถึง 56.4% และ ลดความลึกของรอยยุบตัวลง 68.9% เมื่อเทียบกับสภาวะเริ่มต้น งานนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงผสมผสานสามารถแก้ไขหลายๆ ข้อบกพร่องพร้อม

N. Y. Zhao et al. [13] บทความปริทัศน์ (Int. J. Adv. Manuf. Technol., Springer): งานปริทัศน์ที่ครอบคลุมความก้าวหน้าในการลดการโก่งงอและการหดตัวในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยสรุปว่างานวิจัยจำนวนมากได้มุ่งเน้นการ ปรับค่าพารามิเตอร์กระบวนการ (เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์/หลอมเหลว แรงอัดฉีด เวลาอัดฉีด/หล่อเย็น เป็นต้น) เพื่อแก้ปัญหา Warpage และ Shrinkage วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติอย่างวิธีของ Taguchi ได้รับการยืนยันว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าการตั้งเครื่องที่เหมาะสม ด้วยจำนวนการทดลองที่น้อยเมื่อเทียบกับวิธีทั่วไป ช่วยลดทั้งความแปรปรวนและปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานอย่างได้ผล โดยสรุป งานวิจัยช่วงทศวรรษที่ผ่านมาชี้ว่าการปรับกระบวนการอย่างเป็นระบบด้วย CAE และ DOE เป็นแนวทางที่เป็นไปได้และมีประสิทธิผลที่สุดในการลดการบิดงอของชิ้นงานก่อนการผลิตจริงกันได้ โดยระบุชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งให้ทั้งแนวเชื่อมแคบลงและรอยยุบตื้นลง อันจะช่วยยกระดับคุณภาพชิ้นงานฉีดพลาสติกในภาคอุตสาหกรรม

M. Huszar et al. [14] ได้ศึกษาผลกระทบของการเลือกวัสดุและตำแหน่งเกตที่มีต่อการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและแรงดันในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Moldflow เพื่อวิเคราะห์การไหลของวัสดุในแม่พิมพ์. การศึกษานี้พบว่า การเลือกวัสดุที่เหมาะสมและการกำหนดตำแหน่งเกตที่ถูกต้องสามารถลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและแรงดันในการฉีดได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความยั่งยืนมากขึ้น โดยลดการใช้พลังงานและของเสีย.

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 แผนภาพลำดับการวิจัย

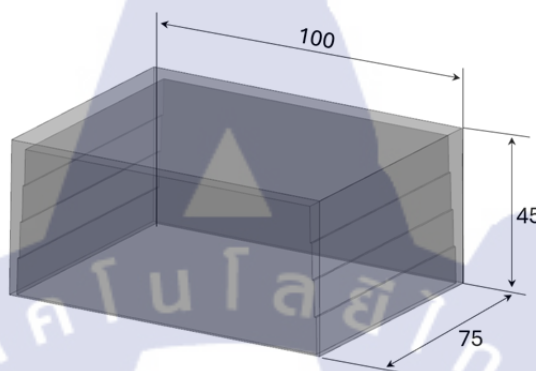


รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการวิจัย

3.2 การออกแบบชิ้นงาน, ทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) และการเลือกวัสดุชิ้นงาน

3.2.1 การออกแบบชิ้นงาน

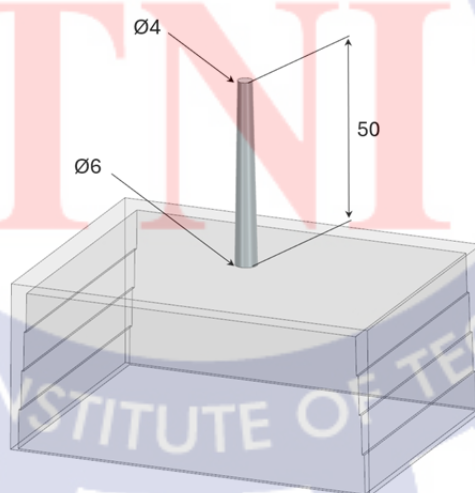
เริ่มต้นจากการเลือกชิ้นงานที่จะนำมาวิเคราะห์จำลองการฉีดพลาสติก โดยชิ้นงานจะเป็นลักษณะกล่องสี่เหลี่ยม และมีรูปร่างขึ้นบันไดด้านในของชิ้นงานมีขนาด 100x75x45 ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานในการจำลองการฉีดพลาสติก

3.2.2 การออกแบบทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate)

ทางเข้าน้ำพลาสติกของชิ้นงานใช้เป็น Sprue Gate (Direct gate) ต่อเข้ากับชิ้นงาน โดยตรงที่ตำแหน่งกลางของชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 6 mm, ด้านบน 4 mm และความยาว 50 mm. ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Gate ของชิ้นงานในการจำลองการฉีดพลาสติก

3.2.3 การเลือกวัสดุชิ้นงาน

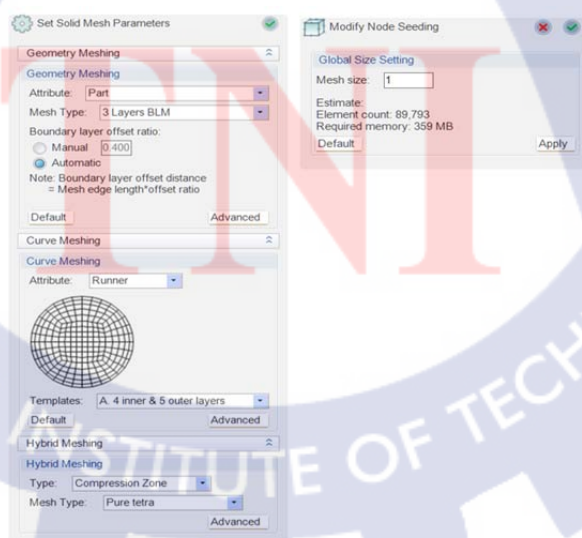
ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุ PP-TD20 (Polypropylene-Talc 20%) ซึ่งเป็นพลาสติกโพลิโพรพิลีนที่เสริมด้วยทัลค์ 20% เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล ความแข็ง และเสถียรภาพทางมิติให้ดียิ่งขึ้น โดยวัสดุนี้มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีสูง รวมถึงมีอัตราการหดตัวต่ำ ซึ่งมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1.2% ทำให้ลดปัญหาการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ PP-TD20 ถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนภายในและภายนอกของรถยนต์ เช่น แผงหน้าปัด แผงประตู คอนโซล

3.3 การสร้าง Finite element (Meshing) และเงื่อนไขต่างๆ โดย Moldex3D

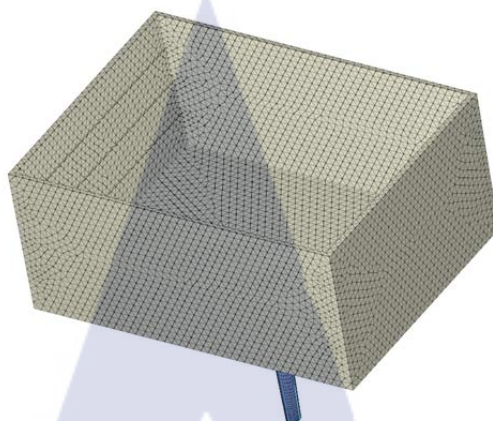
หลังจากที่ออกแบบชิ้นงานสามมิติ และออกแบบการทดลองแล้ว จะทำการจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก ด้วยโปรแกรม Moldex3D จะต้องมีการกำหนดรูปแบบของทางเข้าของน้ำพลาสติก (Gate) สู่ชิ้นงาน เช่น ขนาด รูปร่าง และชนิด

3.3.1 การสร้าง Finite Element (Meshing)

นำชิ้นงาน Import เข้าสู่โปรแกรม Moldex3D แล้วทำการกำหนด Attribute ในส่วนของชิ้นงานและ Gate จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไข Meshing โดยกำหนดให้ Element Size ของชิ้นงานมีขนาด 1 mm. และสร้าง Boundary Layer Mesh 3 ชั้น ในส่วนของ Gate และ Runner จะใช้ค่าตั้งจากจากโปรแกรม ดังรูปที่ 3.4 หลังจากสร้างเสร็จแล้วจะได้ Meshing ของชิ้นงานและ Gate ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การกำหนดเงื่อนไข Meshing ของชิ้นงานและ Gate

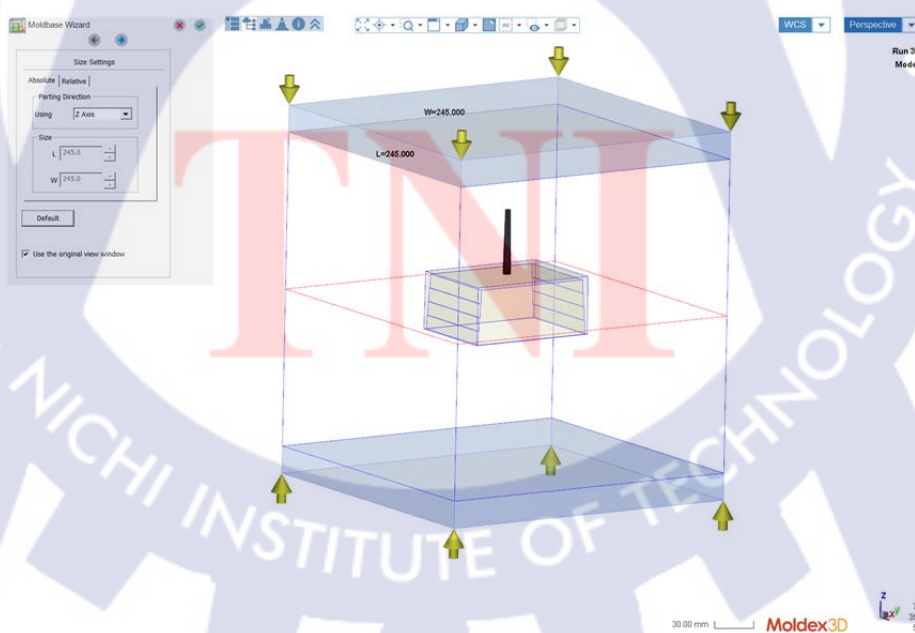


รูปที่ 3.5 Meshing ของชิ้นงาน และ Gate

3.3.2 สร้าง Boundary Molding

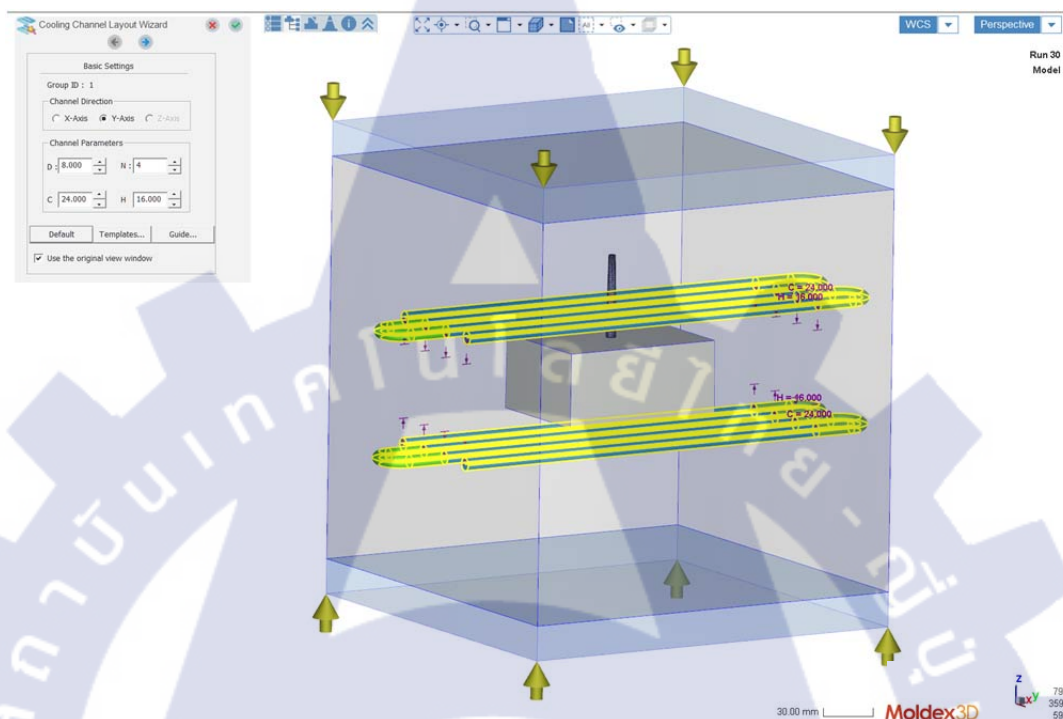
ในการจำลองการฉีดพลาสติกนั้นจะต้องสร้างก่อนแม่พิมพ์ (Mold base) และระบบหล่อเย็น (Cooling System) ซึ่งทั้งหมดนี้จะใช้โปรแกรม Moldex3D สร้างขึ้นมาตามความเหมาะสมของชิ้นงาน, Gate และ Runner

การสร้าง Mold base ในโปรแกรม Moldex3D จะใช้ Moldbase Wizard โดยกำหนดให้ชุดแม่พิมพ์ของชิ้นงานนี้มีขนาด 245x245x245 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสร้าง Mold Base ด้วย Moldbase Wizard

จากนั้นทำการสร้างระบบหล่อเย็นด้วย Cooling Channel Layout Wizard ซึ่งกำหนดให้ท่อหล่อเย็นมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 mm. จำนวน 4 ท่อ ทั้งชุด Core และ Cavity โดยมีระยะห่างระหว่างท่อ 24 mm. และระยะห่างจากชิ้นงาน 16 mm. ดังรูปที่ 3.7



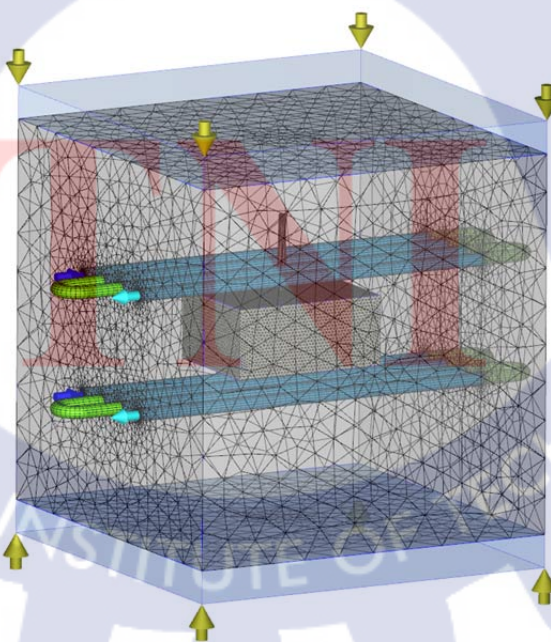
รูปที่ 3.7 การสร้างระบบหล่อเย็นด้วย Cooling Channel Layout Wizard

3.3.3 กำหนดเงื่อนไขการจำลองการฉีดพลาสติก

การสร้างเงื่อนไขการฉีดพลาสติก (Injection Condition) จะใช้ CAE mode ของโปรแกรม Moldex3D เพื่อออกแบบเงื่อนไขที่เหมาะสมกับชิ้นงาน และวัสดุที่เลือกนำมาจำลองการฉีดพลาสติก โดยใช้ Material PP-TD20 (Hifax X M2 U16) ดังนั้นโปรแกรมจึงคำนวณเงื่อนไขการฉีดได้ดังนี้ อุณหภูมิชุดแม่พิมพ์ (Mold Temperature) 35°C, อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt Temperature) 220°C, อัตราการไหล (Flow Rate) 50%, แรงดันในการฉีด (Injection Pressure) 140 MPa 100%, การเปลี่ยนเฟสสู่การอัดย้า (VP Switch) 98% ของการฉีด, การอัดย้า (Packing profile) 78.57% ที่ 3.22s, 62.86% ที่ 1.1s และ 50.29% ที่ 1.1s และเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) 13.7s ดังรูปที่ 3.8 และเมื่อทุกอย่างกำหนดเสร็จสิ้นก็พร้อมที่จะจำลองการฉีดพลาสติกดังรูปที่ 3.9

Moldex3D Molding Process Sheet						
Model						
Customer	Mold No.	Project Name	Mesh File Name	Run ID	Date	
		TNI Thesis	Trial BOX	Run01		
Part Dimension (mm x mm x mm)		Runner Type	Part Count	Total Part Weight (g)	Total Runner Weight (g)	
75.40x100.65x45.00		Cold Runner	1	41.7449	0.900902	
Material						
Polymer	Producer	Grade Name	Fiber (%)	MFI (g/10min)	MVR (cm ³ /10min)	
PP	LyondellBasell	Hifax X M2 U16	0	12 (230, 2.16)	14.2796 (230, 2.16)	
Machine						
Manufacturer	Grade Name	Serial No.	Clamping Force (Ton(m))	Screw Diameter (mm)	Screw Stroke (mm)	
Plasticizing				Mold Temperature (°C)		
Back Pressure (MPa)	Screw Speed (rpm)	Suck Back (mm)	Dosage Stroke (mm)	Cavity	Core	
				35	35	
Barrel Temperature (°C)				Nozzle		
Nozzle	H1	H2	H3	H4		
Injection Setting						
Flow Rate				Injection Pressure		
Section#	1		2		3	
Flow Rate	50					
Injection Pressure	100					
Position						
Time	sec					
VP Switch	By Volume Filled		98 (%)		Maximum Filling Time	
					1.547 (sec)	
Packing Pressure Profile						
Section#	1		2		3	
Packing Pressure	78.5714		62.8571		50.2857	
Time	3.216		1.072		1.072	
Max Pressure						
Time Record (sec)						
Close	Plasticizing	Injection	Packing	Cooling	Mold Open	Ejection
		1.19	5.36	13.7	5	
						Cycle Time
						25.25

รูปที่ 3.8 Molding Process Sheet ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 การกำหนดโครงสร้างและเงื่อนไขที่เสร็จสมบูรณ์

3.4 การออกแบบการทดลอง และกำหนดเงื่อนไขในโปรแกรม Moldex3D

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องของเงื่อนไขการบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ในการฉีดรูปพลาสติกนั้น แบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature), ความดันฉีดสูงสุด (Max. Packing Pressure) และระยะเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Full Factorial Design เพื่อสร้างเงื่อนไขของการทดลอง โดย 3 เงื่อนไขนี้จะใช้จำนวนรอบการทดลองทั้งหมด $\text{Run} = 3^3 = 27$

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับการทดลองสำหรับเงื่อนไขการฉีดพลาสติก

ปัจจัยควบคุม	ระดับการทดลอง		
	1	2	3
อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (°C)	210	220	230
ความดันฉีดสูงสุด (MPa)	130	140	150
เวลาหล่อเย็น (Cooling Time)	10	15	20

จากนั้นจึงออกแบบลำดับการทดลอง สำหรับตัวแปร 3 ปัจจัย 3 ระดับโดย วิธี Full-Factorial ดังแสดงที่ตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย 3 ระดับสำหรับเงื่อนไขการฉีดพลาสติก

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		
	Melt Temp (°C)	Packing Pressure (MPa)	Cooling Time (sec)
1	210	130	10
2	210	130	15
3	210	130	20
4	210	140	10
5	210	140	15
6	210	140	20
7	210	150	10
8	210	150	15
9	210	150	20
10	220	130	10

ตารางที่ 3.2 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย 3 ระดับสำหรับเงื่อนไขการฉีดพลาสติก (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		
	Melt Temp (°C)	Packing Pressure (MPa)	Cooling Time (sec)
11	220	130	15
12	220	130	20
13	220	140	10
14	220	140	15
15	220	140	20
16	220	150	10
17	220	150	15
18	220	150	20
19	230	130	10
20	230	130	15
21	230	130	20
22	230	140	10
23	230	140	15
24	230	140	20
25	230	150	10
26	230	150	15
27	230	150	20

จากนั้นนำเอาเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 เข้าไปป้อนใน DOE Wizard ของโปรแกรม Moldex3D เพื่อควบคุมปัจจัยคุณภาพของ การบิดตัวโก่งงอโดยรวม (Total Displacement of Warp) ให้ได้ค่าน้อยที่สุด โดยปรับเงื่อนไขด้วยวิธีการ Full Factorial 3 เงื่อนไข ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature), ความดันฉีดสูงสุด (Max. Packing Pressure), และระยะเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) ดังรูปที่ 3.10 และทำการจำลองการฉีดพลาสติกทั้ง 27 เงื่อนไข พร้อมทั้ง Optimization DOE condition อีก 1 เงื่อนไข

DOE Wizard

Setting Summary

DOE Information

Name: DOE Warpage

Base Run: Run01

Analysis Sequence: Transient Analysis - Ct F P Ct W

DOE Method: Full Factorial Experiments

Factors

No. of Runs: 27

#	Control Factor	Level	Level 1	Level 2	Level 3
1	Melt Temperature [°C]	3	210	220	230
2	Max. Packing Pressure [MPa]	3	130	140	150
3	Cooling Time [sec]	3	10	15	20

#	Quality Factor	Target	Goal	Weighting	%	Property
1	Warpage_Total Displacement [mm]	Global	Smaller	1	100.0%	

Next Close

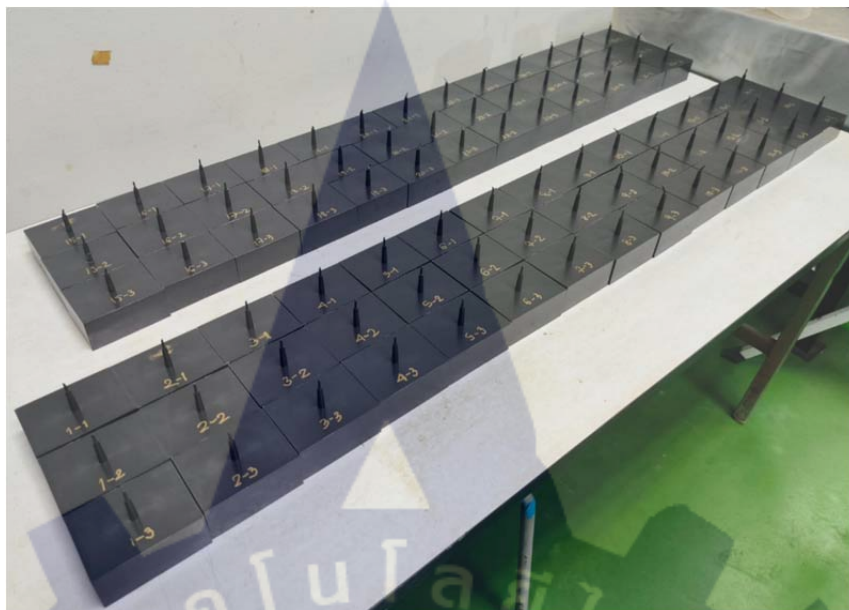
รูปที่ 3.10 DOE Wizard เพื่อลดการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน

3.5 การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

หลังจากได้ผลลัพธ์จากการจำลองการฉีดพลาสติกด้วยเงื่อนไข DOE แล้ว ผู้วิจัยทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามการออกแบบการทดลอง 27 เงื่อนไข โดยฉีดเงื่อนไขละ 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก Toshiba EC100S และใช้เม็ดพลาสติกชนิด Polypropylene-Talc 20% ดังรูปที่ 3.11 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างในอุณหภูมิห้องเพื่อนำไปตรวจวัดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.12



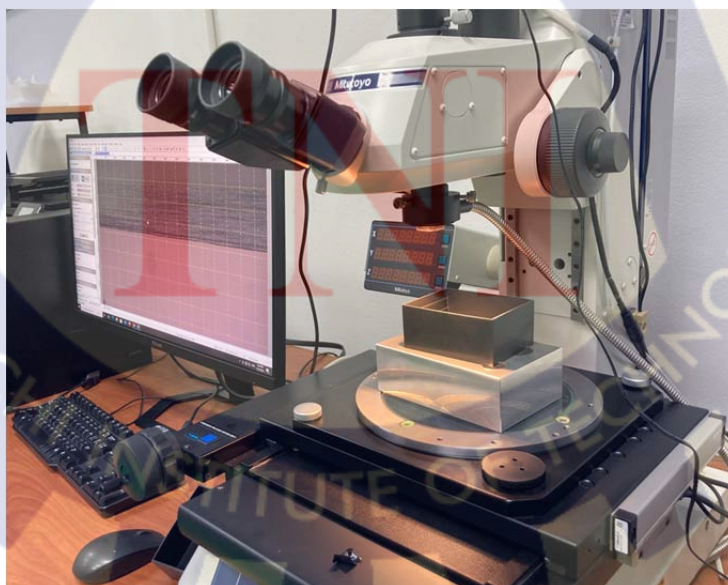
รูปที่ 3.11 ทดลองฉีดงานตามเงื่อนไขการออกแบบด้วยเครื่องฉีดพลาสติก Toshiba EC100S



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข

3.6 การตรวจสอบการบิตตัวโก่งงอของชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดไมโครสโคป (Microscope)

เมื่อชิ้นงานเก็บไว้ในอุณหภูมิจนครบ 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาวัดความบิตตัวโก่งงอของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องมือวัดไมโครสโคป (Microscope) ชิ้นงานทั้ง 27 เงื่อนไข โดยทำการวัดเงื่อนไขละ 3 ชิ้น รวมทั้งหมดเป็น 81 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาค่าการบิตตัวโก่งงอของชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไข ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตรวจวัดความบิตตัวโก่งงอของชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดไมโครสโคป

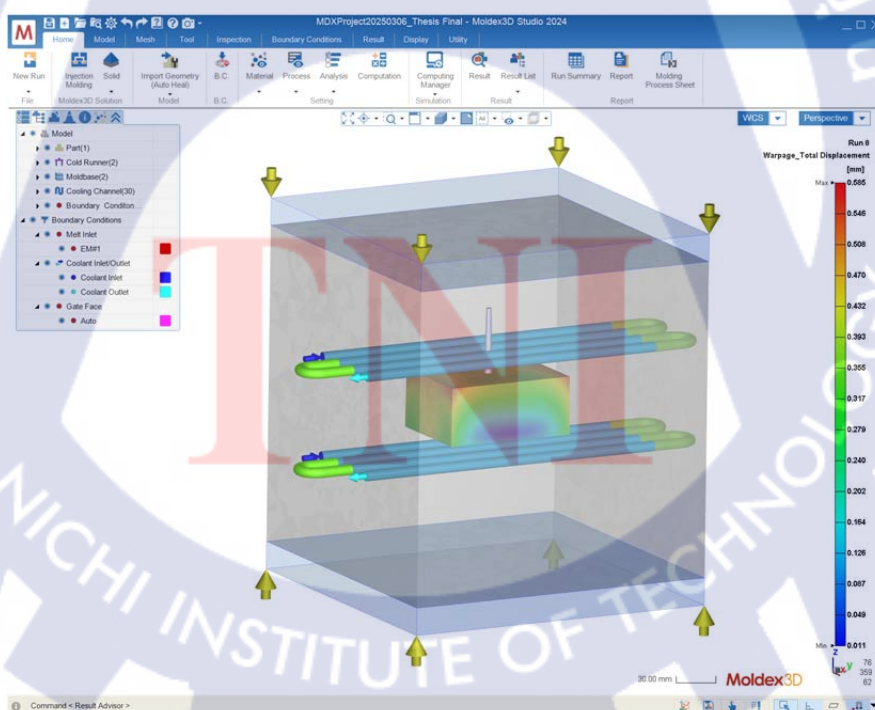
3.7 เครื่องมือและอุปกรณ์วิจัย

3.7.1 วัสดุ PP-TD20 (Polypropylene-Talc 20%)

เป็นพลาสติกโพลิโพรพิลีนที่เสริมด้วยทัลค์ 20% เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล ความแข็ง และเสถียรภาพทางมิติให้ดียิ่งขึ้น โดยวัสดุนี้มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีสูง รวมถึงมีอัตรา การหดตัวต่ำ ทำให้ลดปัญหาการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ PP-TD20 ถูกนำมาใช้ ในการผลิตชิ้นส่วนภายในและภายนอกของรถยนต์ เช่น แผงหน้าปัด แผงประตู คอนโซลกลาง กันชน และคิ้วขอบล้อ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ช่วยลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของ ชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.7.2 โปรแกรมการจำลองการฉีดพลาสติก

Moldex3D เป็นซอฟต์แวร์จำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่สามารถใช้เทคนิค Design of Experiments (DOE) เพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยช่วยออกแบบ การทดลองที่เป็นระบบเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แรงดัน และความเร็วใน การฉีดต่อคุณภาพของชิ้นงาน ทำให้สามารถปรับปรุงกระบวนการให้เหมาะสม ลดข้อบกพร่อง และเพิ่ม ความแม่นยำในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โปรแกรมจำลองการฉีดพลาสติก Moldex3D

3.7.3 เครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีดพลาสติกชนิดฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine) ของบริษัท Toshiba รุ่น EC100S ดังแสดงในรูปที่ 3.15



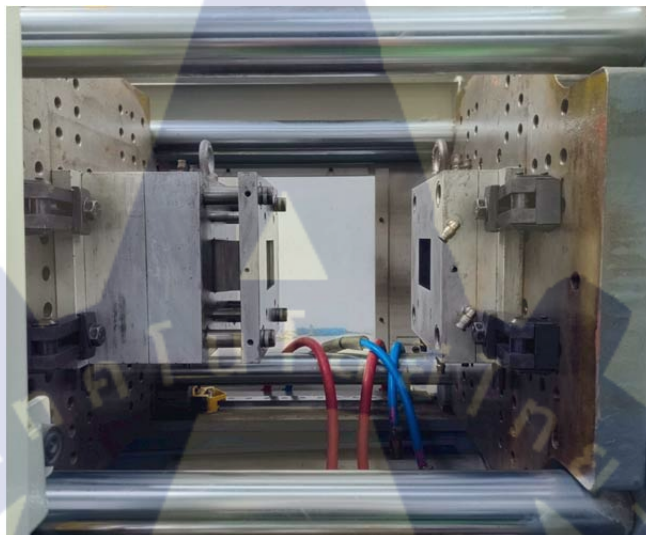
รูปที่ 3.15 เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น Toshiba EC 100S

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการโรงงาน

รายการ	หน่วย	ค่าที่กำหนด
แรงปิดแม่พิมพ์	ตัน	100
ระยะไต่บาร์	มิลลิเมตร	460 x 410
ขนาดแผ่นแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	660 x 610
ระยะปิดแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	350
ความสูงแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	180 ~ 550
แรงกระทุ้งแม่พิมพ์	ตัน	3
ระยะกระทุ้งแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	90
ความดันในการฉีด	เมกะปาสกาล	158~287
อัตราการฉีด	เซนติเมตร ³ /วินาที	76 ~ 557
ความเร็วในการฉีด	มิลลิเมตร/วินาที	200 ~ 350

3.7.4 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

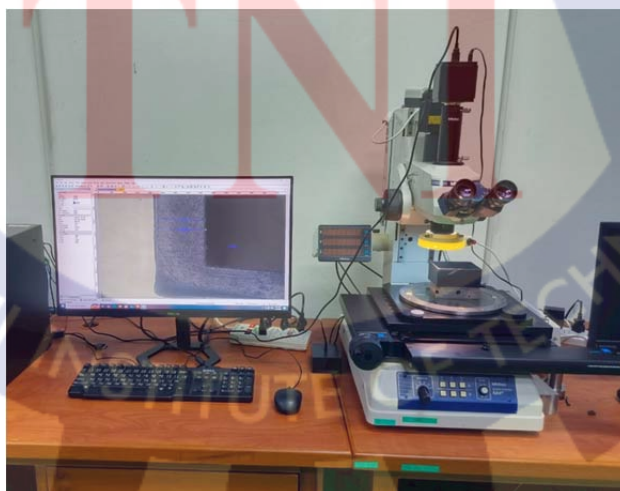
แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับทดสอบ วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ S50°C สำหรับฝังคอร์และควิตี้ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะเป็นวัสดุ P20 ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

3.7.5 เครื่องมือวัดชิ้นงาน

เครื่องมือในการวัดการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน โดยใช้ Microscope ของบริษัท Mitutoyo รุ่น Measuring Microscope MF ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องมือ Microscope วัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้น

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการจำลองการฉีดพลาสติก

จากการออกแบบการทดลอง (DOE) โดยใช้ วิธี Full Factorial Design เพื่อสร้างเงื่อนไขของการทดลอง เพื่อลดการบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน จาก 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature), ความดันฉีดสูงสุด (Max. Packing Pressure) และระยะเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) ด้วยเงื่อนไขนี้จึงได้แบ่งการจำลองออกเป็น 27 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในแต่ละตัวแปร และนำไปสู่เงื่อนไขที่ถูกปรับปรุง (Optimal Condition) ดังตารางที่ 4.1

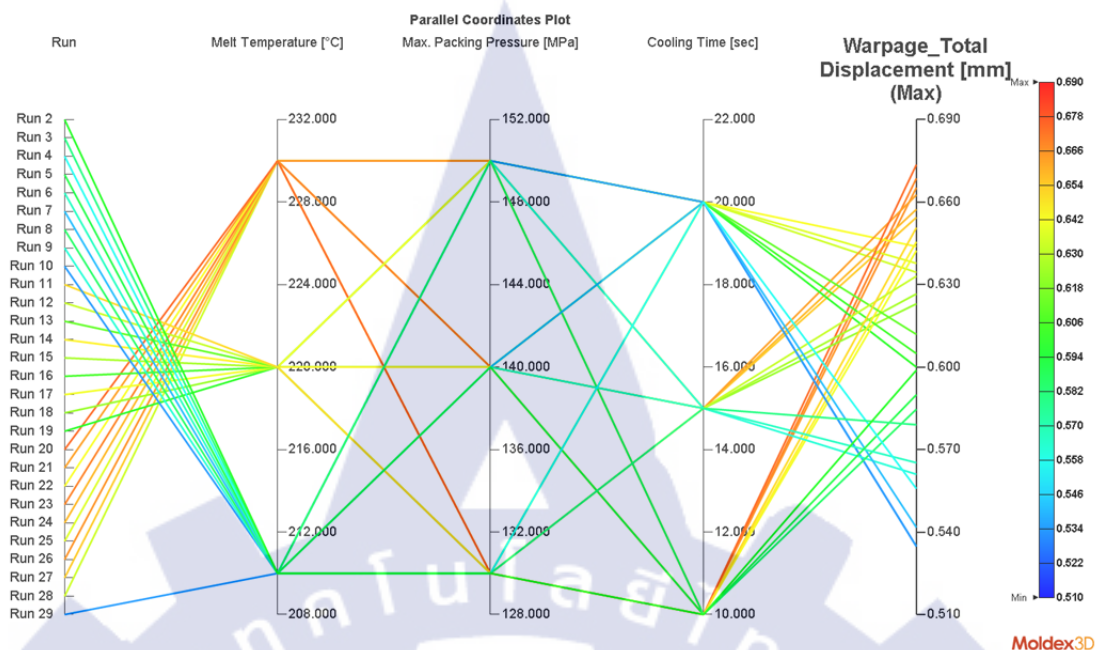
ตารางที่ 4.1 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย เพื่อควบคุมคุณภาพของการบิดตัวโก่งงอ

#	ปัจจัยควบคุม			ปัจจัยคุณภาพ
	1	2	3	
ลำดับ	อุณหภูมิหลอมเหลว [°C]	ความดันฉีดสูงสุด [MPa]	เวลาหล่อเย็น [Sec.]	ความบิดตัวโก่งงอ [mm.]
Max	230	150	20	
Mid	220	140	15	
Min	210	130	10	
1	210	130	10	0.499
2	210	130	15	0.479
3	210	130	20	0.456
4	210	140	10	0.49
5	210	140	15	0.465
6	210	140	20	0.442
7	210	150	10	0.485
8	210	150	15	0.461
9	210	150	20	0.435
10	220	130	10	0.551
11	220	130	15	0.533
12	220	130	20	0.512
13	220	140	10	0.546
14	220	140	15	0.527
15	220	140	20	0.505

ตารางที่ 4.1 ลำดับของการทดลองที่มี 3 ปัจจัย เพื่อควบคุมคุณภาพของการบดตัวโก่งงอ (ต่อ)

ปัจจัยควบคุม				ปัจจัยคุณภาพ
#	1	2	3	
ลำดับ	อุณหภูมิหลอมเหลว [°C]	ความดันอัดยี้สูงสุด [MPa]	เวลาหล่อเย็น [Sec.]	ความบิดตัวโก่งงอ [mm.]
16	220	150	10	0.542
17	220	150	15	0.523
18	220	150	20	0.500
19	230	130	10	0.574
20	230	130	15	0.563
21	230	130	20	0.544
22	230	140	10	0.569
23	230	140	15	0.557
24	230	140	20	0.538
25	230	150	10	0.565
26	230	150	15	0.554
27	230	150	20	0.534
28 (Final)	210	150	20	0.435

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลลัพธ์การบิดตัวโก่งงอโดยรวม (Warpage Total Displacement) ในแต่ละเงื่อนไข จึงได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ทำให้การบิดตัวโก่งงอโดยรวมทั้งชิ้นงาน มีค่า 0.535 mm. จาก 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) มีค่า 210°C, ความดันอัดยี้สูงสุด (Max. Packing Pressure) มีค่า 150 MPa และระยะเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) มีค่า 20 วินาที ซึ่งสามารถดูความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในแต่ละการจำลอง ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในแต่ละการจำลอง

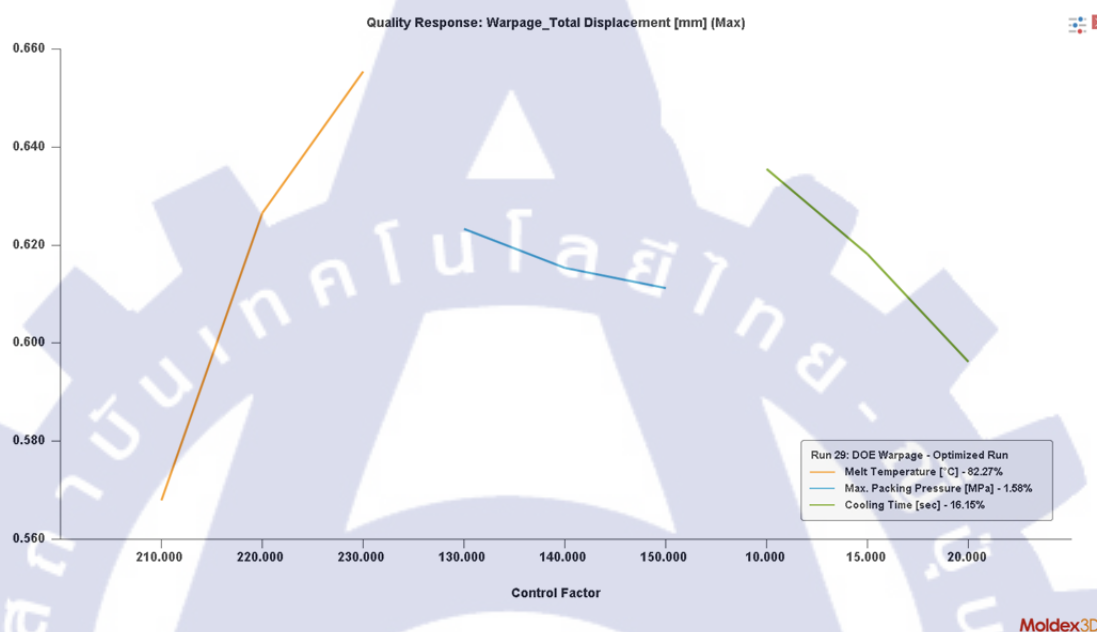
โดยงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Full Factorial เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยวิเคราะห์ผลกระทบของ 3 ปัจจัยที่กล่าวมาจึงทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบต่อ Quality Response และ S/N Ratio Response ได้ดังนี้

4.1.1 ผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ Quality Response

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) มีผลกระทบสูงสุดต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยมีค่าผลกระทบ 0.087426 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวนสูงถึง 82.27%, เวลาหล่อเย็น (Cooling Time) มีผลกระทบรองลงมา โดยมีค่าผลกระทบ 0.039385 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวนที่ 16.15% และความดันฉีดสูงสุด (Max. Packing Pressure) มีผลกระทบน้อยที่สุด โดยมีค่าผลกระทบ 0.012164 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวนเพียง 1.58% จากการวิเคราะห์พบว่าระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยคือ อุณหภูมิหลอมเหลว ระดับ 1 (210°C), ความดันฉีดสูงสุด ระดับ 3 (150 MPa) และเวลาหล่อ ระดับที่ 3 (20 sec) ตามตารางที่ 4.2 สัมพันธ์กับรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลำดับผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ Quality Response

Factor Effect						ANOVA			
Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Best Level	SS	DOF	Variance	Contribution (%)
1 Melt Temperature	0.567895	0.626451	0.655321	0.087426	1	0.035717	2	0.017858	82.269732
2 Max. Packing Pressure	0.62327	0.61529	0.611106	0.012164	3	6.87E-04	2	3.44E-04	1.583581
3 Cooling Time	0.635505	0.618041	0.59612	0.039385	3	0.00701	2	0.003505	16.146687



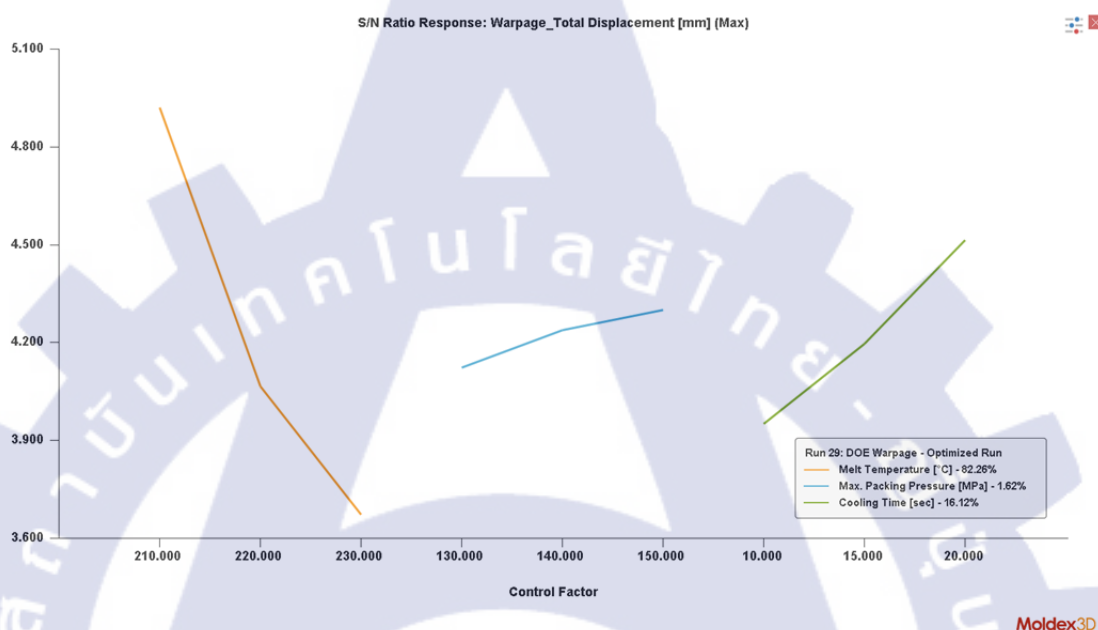
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Control Factor และ Quality Response of Warpage

4.1.2 ผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ S/N Ratio Response

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) ยังคงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด โดยมีค่าผลกระทบ 1.24774 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวน 82.26%, เวลาหล่อเย็น (Cooling Time) มีค่าผลกระทบ 0.563403 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวน 16.12 และความดันฉีดสูงสุด (Max. Packing Pressure) มีค่าผลกระทบ 0.175972 และมีสัดส่วนการอธิบายความแปรปรวน 1.62% จากการวิเคราะห์พบว่า ระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยคือ อุณหภูมิหลอมเหลว ระดับ 1 (210°C), ความดันฉีดสูงสุด ระดับ 3 (150 MPa) และเวลาหล่อ ระดับที่ 3 (20 sec) ตามตารางที่ 4.3 สัมพันธ์กับรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลำดับผลลัพธ์ของการทดลองที่ผลกระทบต่อ S/N Ratio Response

Factor Effect						ANOVA			
Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Best Level	SS	DOF	Variance	Contribution (%)
1 Melt Temperature	4.920406	4.065516	3.672666	1.24774	1	7.326068	2	3.663034	82.262217
2 Max. Packing Pressure	4.122417	4.237782	4.298389	0.175972	3	0.143845	2	0.071923	1.615193
3 Cooling Time	3.949559	4.196066	4.512963	0.563403	3	1.435838	2	0.717919	16.12259



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Control Factor และ S/N Ratio Response of Warpage

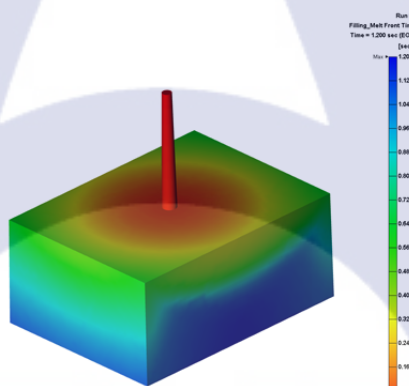
จากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยมีผลกระทบสูงทั้งในแง่ของคุณภาพชิ้นงานและ S/N Ratio ในขณะที่ความดันฉีดต่ำสุดมีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานน้อยที่สุด และในขณะเวลาที่หล่อเย็นก็มีผลกระทบรองลงมา แต่ยังมีความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน โดยค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์การฉีดที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลวที่ระดับ 1 (210°C), แรงความดันฉีดต่ำสุดที่ระดับ 3 (150 MPa), เวลาหล่อเย็นที่ระดับ 3 (20 sec) ที่ทำให้มีผลบิดตัวโก่งงอโดยรวม (Warpage Total Displacement) มีค่าเท่ากับ 0.535 mm.

4.2 การวิเคราะห์ผลการจำลองการฉีดด้วยเงื่อนไขที่ถูกปรับปรุง (Optimal Condition)

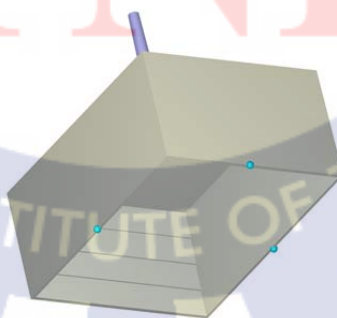
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการฉีดพลาสติกในโปรแกรม Moldex3D นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 4 โหมดใหญ่ คือ การเติมเต็ม (Filling), การอัดย้า (Packing), การหล่อเย็น (Cooling) และ การบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดจากการฉีดพลาสติกได้ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์การเติมเต็มของชิ้นงาน (Filling Analysis)

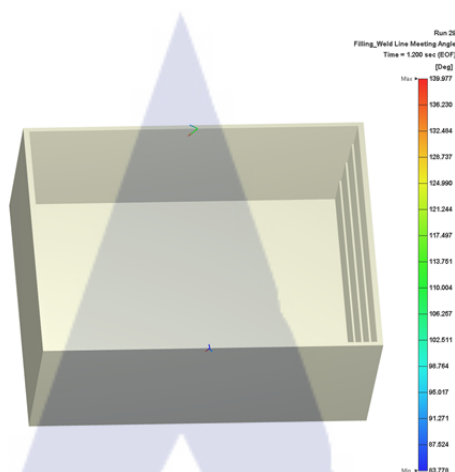
จากโหมดใหญ่การวิเคราะห์การเติมเต็มของชิ้นงาน จะได้ผลดังนี้ เวลาเติมเต็มของชิ้นงาน (Filling Melt Front Time) 1.2 วินาที ดังรูปที่ 4.4 และมีการอั้นอากาศ (Air Trap) เกิดขึ้น 3 จุด ดังรูปที่ 4.5 จึงต้องทำช่องระบายอากาศ (Air Vent) ชิ้นงานเกิดรอยผสานขึ้นมา 2 จุด ด้วยองศาการผสานที่ต่ำกว่า 135° อาจจะทำให้เกิดรอยผสานที่มองเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 4.6 ส่วนสุดท้าย อุณหภูมิในการฉีด (Filling Temperature) มีค่าสูงสุด 219.92°C และ แรงดันการฉีด (Filling Pressure) มีค่าสูงสุด 48.78 MPa ซึ่งอยู่ในช่วงของคุณสมบัติวัสดุ



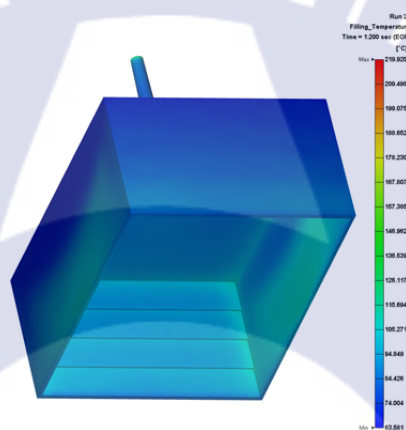
รูปที่ 4.4 เวลาเติมเต็มของชิ้นงาน (Filling Melt Front Time)



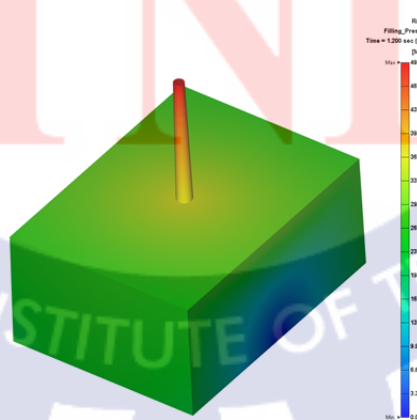
รูปที่ 4.5 การอั้นอากาศ (Air Trap)



รูปที่ 4.6 รอยประสาน (Weld Line)



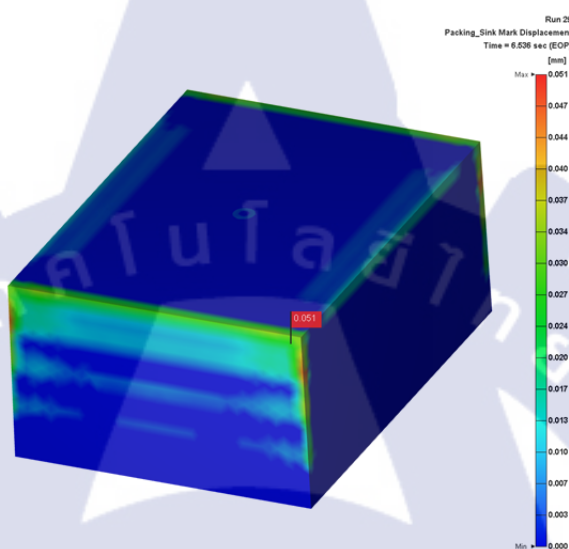
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการฉีด (Filling Temperature)



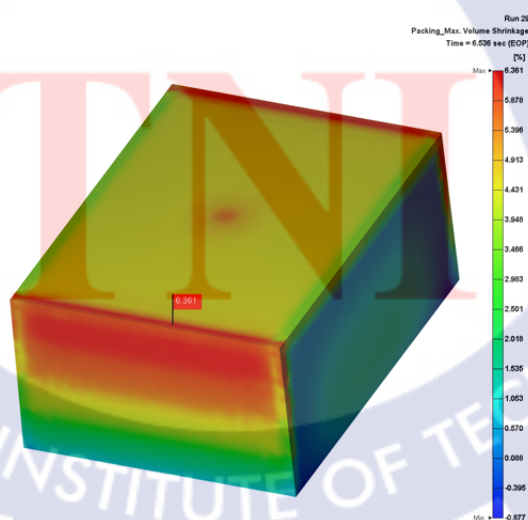
รูปที่ 4.8 แรงดันการฉีด (Filling Pressure)

4.2.2 การวิเคราะห์การอัดย่ำ (Packing Analysis)

ในส่วนของการอัดย่ำจะพิจารณาในด้านของการยุบตัว (Sink Mark) และการหดตัว (Volume Shrinkage) ซึ่งมีอิทธิพลมาจากแรงดันและระยะเวลาในการอัดย่ำ ด้วยเงื่อนไขการอัดที่ถูกปรับปรุงจาก DOE ทำให้ชิ้นงานนี้ เกิดการยุบตัวสูงสุด 0.051 mm ดังรูปที่ 4.9 และการหดตัวสูงสุด 6.361% ดังรูปที่ 4.10



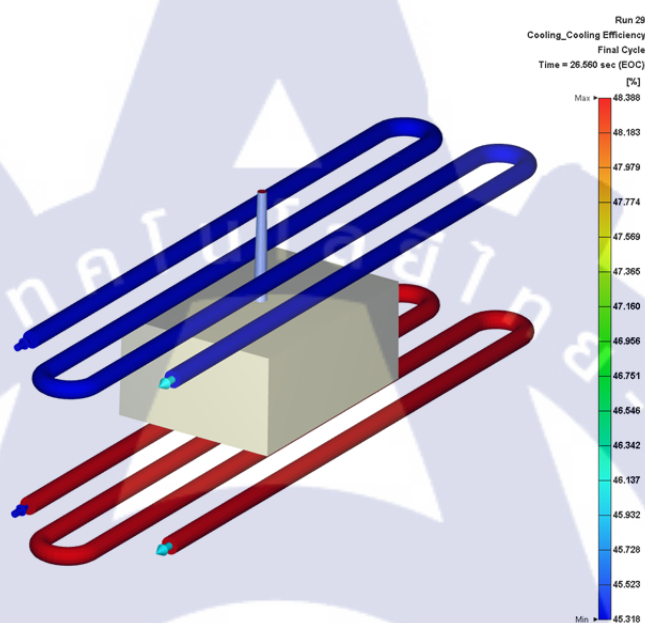
รูปที่ 4.9 การยุบตัว (Sink Mark)



รูปที่ 4.10 การหดตัว (Volume Shrinkage)

4.2.3 การวิเคราะห์การหล่อเย็น (Cooling Analysis)

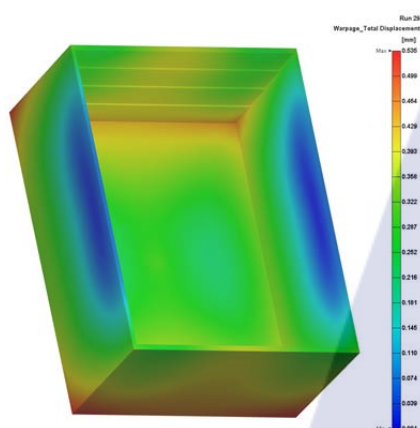
จากการสร้างระบบหล่อเย็นอัตโนมัติของโปรแกรม Moldex3D ทำให้การนำพาความร้อนของชิ้นงานในแม่พิมพ์มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลลัพธ์แสดงประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ฝั่ง Cavity 45.32% และแม่พิมพ์ฝั่ง Core 48.39% โดยใช้ระยะเวลาในการหล่อเย็น 26.56 วินาที ดังรูปที่ 4.11



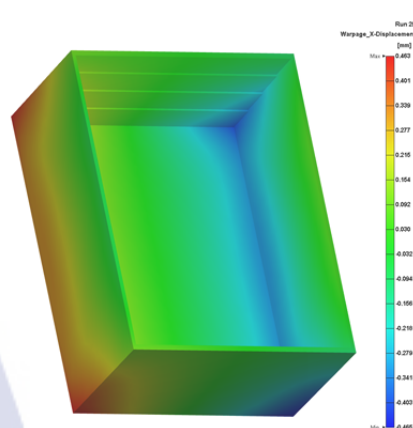
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็น (Cooling System Efficiency)

4.2.4 การวิเคราะห์การบิดตัวโก่งงอ (Warpage Analysis)

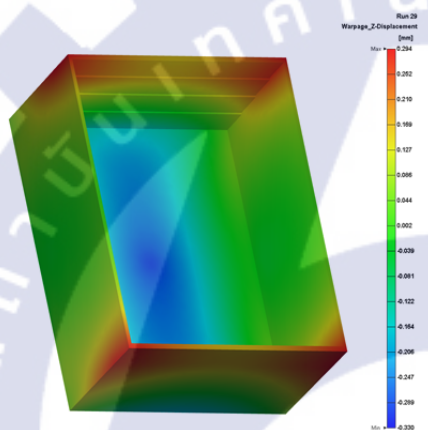
การเกิดการบิดตัวโก่งงอมีอิทธิพลโดยตรงจากระบบหล่อเย็นถ้าหากระบบหล่อเย็นไม่มีประสิทธิภาพ และเวลาในการหล่อเย็นไม่เพียงก็ทำให้เกิดการบิดตัวโก่งงอที่มากขึ้น ด้วยเงื่อนไขการฉีดที่ถูกปรับปรุงจาก DOE ทำให้ชิ้นงานนี้ มีการบิดตัวโก่งงอโดยรวม (Warpage Total Displacement) มีค่าสูงสุด 0.535 mm. และการบิดตัวโก่งงอตามแนวแกน X,Y,Z มีค่าสูงสุด 0.463 mm., 0.294 mm. และ 0.439 mm. ตามลำดับ ตามรูปที่ 4.12-4.15 รวมไปถึงการเกิดความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังจากปลดแม่พิมพ์ มีค่าสูงสุด 11.735 MPa ตามรูปที่ 4.16



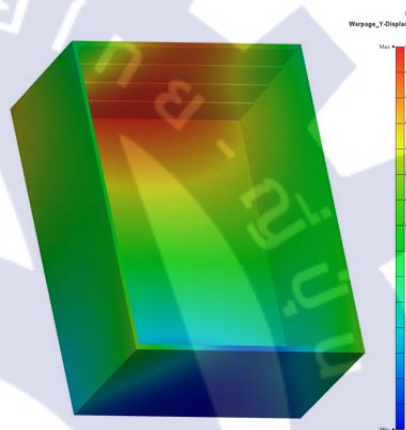
รูปที่ 4.12 Warpage Total Displacement



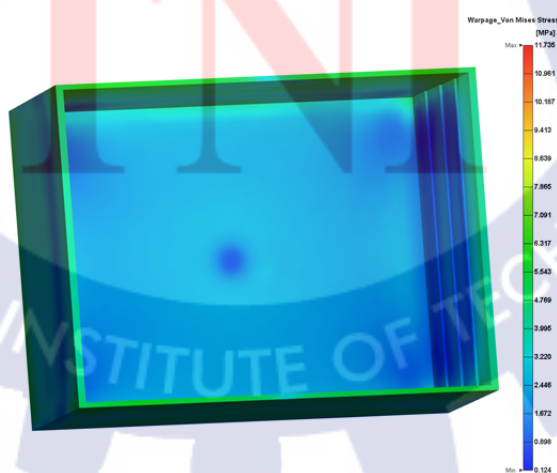
รูปที่ 4.13 Warpage X-Displacement



รูปที่ 4.14 Warpage Y-Displacement



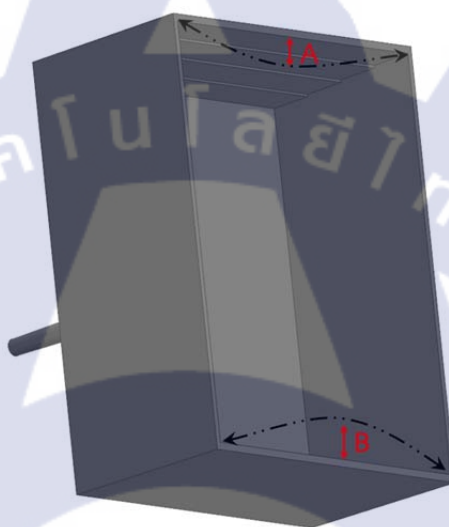
รูปที่ 4.15 Warpage Z-Displacement



รูปที่ 4.16 ความเค้นตกค้างของการปิดตัวโค้งงอ (Warpage Residual Stress)

4.3 การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วยเครื่องฉีด Toshiba EC100S และวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน

หลังจากจำลองการฉีดขึ้นรูปด้วย DOE ของโปรแกรม Moldex3D แล้ว ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามเงื่อนไขที่ออกแบบทั้งหมด 27 เงื่อนไข ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก Toshiba EC100S จากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปวัดความบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ด้วยเครื่องมือวัด Mitutoyo Microscope ที่ตำแหน่งจุดวัด A และ B ตามรูปที่ 4.17 จึงได้ค่าความบิดตัวโก่งงอในแต่ละเงื่อนไขตามตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.17 จุดวัดความบิดตัวโก่งงอ (Warpage) ของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข

ชิ้นงาน	ตัวอย่าง	จุดวัด A					จุดวัด B				
		1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม	1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
1	1-1	0.395	0.390	0.414	0.400	0.383	0.355	0.372	0.382	0.370	0.363
	1-2	0.339	0.376	0.369	0.361		0.340	0.359	0.368	0.356	
	1-3	0.370	0.390	0.400	0.387		0.352	0.364	0.373	0.363	
2	2-1	0.424	0.446	0.430	0.433	0.399	0.348	0.360	0.385	0.364	0.382
	2-2	0.356	0.375	0.370	0.367		0.347	0.402	0.395	0.381	
	2-3	0.396	0.397	0.396	0.396		0.380	0.406	0.411	0.399	
3	3-1	0.426	0.425	0.463	0.438	0.418	0.399	0.420	0.430	0.416	0.381
	3-2	0.428	0.439	0.432	0.433		0.359	0.364	0.376	0.366	
	3-3	0.377	0.385	0.389	0.384		0.356	0.356	0.372	0.361	

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข (ต่อ)

ชิ้นงาน	ตัวอย่าง	จุดวัด A					จุดวัด B				
		1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม	1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
4	4-1	0.377	0.397	0.407	0.394	0.378	0.292	0.320	0.354	0.322	0.367
	4-2	0.321	0.365	0.376	0.354		0.379	0.394	0.387	0.387	
	4-3	0.372	0.388	0.398	0.386		0.349	0.402	0.428	0.393	
5	5-1	0.379	0.384	0.384	0.382	0.388	0.372	0.368	0.388	0.376	0.392
	5-2	0.352	0.363	0.372	0.362		0.403	0.412	0.424	0.413	
	5-3	0.417	0.421	0.422	0.420		0.364	0.396	0.400	0.387	
6	6-1	0.366	0.383	0.391	0.380	0.384	0.367	0.391	0.383	0.380	0.377
	6-2	0.378	0.344	0.401	0.374		0.364	0.398	0.401	0.388	
	6-3	0.407	0.375	0.415	0.399		0.357	0.384	0.349	0.363	
7	7-1	0.447	0.448	0.452	0.449	0.410	0.421	0.425	0.426	0.424	0.412
	7-2	0.406	0.403	0.410	0.406		0.363	0.381	0.390	0.378	
	7-3	0.373	0.366	0.382	0.374		0.428	0.439	0.436	0.434	
8	8-1	0.400	0.390	0.410	0.400	0.372	0.390	0.410	0.400	0.400	0.381
	8-2	0.320	0.324	0.328	0.324		0.344	0.336	0.346	0.342	
	8-3	0.387	0.400	0.393	0.393		0.420	0.373	0.411	0.401	
9	9-1	0.320	0.320	0.330	0.323	0.337	0.260	0.313	0.320	0.298	0.333
	9-2	0.370	0.360	0.380	0.370		0.320	0.340	0.350	0.337	
	9-3	0.310	0.320	0.320	0.317		0.370	0.360	0.360	0.363	
10	10-1	0.330	0.350	0.335	0.338	0.362	0.350	0.350	0.370	0.357	0.357
	10-2	0.380	0.380	0.400	0.387		0.380	0.390	0.390	0.387	
	10-3	0.350	0.360	0.370	0.360		0.320	0.320	0.340	0.327	
11	11-1	0.327	0.310	0.311	0.316	0.382	0.400	0.400	0.412	0.404	0.405
	11-2	0.410	0.420	0.427	0.419		0.400	0.405	0.410	0.405	
	11-3	0.410	0.400	0.420	0.410		0.400	0.410	0.410	0.407	
12	12-1	0.390	0.410	0.400	0.400	0.392	0.344	0.350	0.352	0.349	0.366
	12-2	0.390	0.391	0.393	0.391		0.380	0.389	0.391	0.387	
	12-3	0.387	0.380	0.390	0.386		0.360	0.364	0.364	0.363	
13	13-1	0.387	0.378	0.340	0.368	0.421	0.462	0.458	0.493	0.471	0.472
	13-2	0.463	0.477	0.498	0.479		0.414	0.441	0.446	0.434	
	13-3	0.400	0.428	0.414	0.414		0.516	0.511	0.511	0.513	
14	14-1	0.413	0.418	0.428	0.420	0.494	0.389	0.400	0.404	0.398	0.422
	14-2	0.444	0.455	0.460	0.453		0.418	0.406	0.419	0.414	
	14-3	0.483	0.850	0.495	0.609		0.438	0.414	0.510	0.454	

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความบิดตัวโก่งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข (ต่อ)

ชิ้นงาน	ตัวอย่าง	จุดวัด A					จุดวัด B				
		1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม	1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
15	15-1	0.390	0.396	0.390	0.392	0.421	0.400	0.398	0.410	0.403	0.371
	15-2	0.471	0.472	0.469	0.471		0.353	0.354	0.380	0.362	
	15-3	0.397	0.400	0.407	0.401		0.341	0.350	0.350	0.347	
16	16-1	0.453	0.461	0.450	0.455	0.399	0.460	0.446	0.452	0.453	0.413
	16-2	0.352	0.346	0.353	0.350		0.428	0.434	0.434	0.432	
	16-3	0.394	0.385	0.393	0.391		0.356	0.351	0.360	0.356	
17	17-1	0.360	0.396	0.400	0.385	0.392	0.417	0.423	0.444	0.428	0.414
	17-2	0.391	0.398	0.390	0.393		0.411	0.412	0.417	0.413	
	17-3	0.390	0.399	0.400	0.396		0.387	0.400	0.418	0.402	
18	18-1	0.433	0.444	0.450	0.442	0.464	0.400	0.402	0.423	0.408	0.416
	18-2	0.495	0.500	0.495	0.497		0.412	0.421	0.414	0.416	
	18-3	0.455	0.444	0.463	0.454		0.421	0.420	0.429	0.423	
19	19-1	0.486	0.486	0.490	0.487	0.515	0.419	0.425	0.430	0.425	0.530
	19-2	0.574	0.570	0.574	0.573		0.523	0.533	0.535	0.530	
	19-3	0.477	0.487	0.488	0.484		0.639	0.634	0.636	0.636	
20	20-1	0.480	0.484	0.491	0.485	0.565	0.575	0.581	0.598	0.585	0.580
	20-2	0.620	0.632	0.632	0.628		0.562	0.576	0.579	0.572	
	20-3	0.574	0.585	0.590	0.583		0.579	0.584	0.587	0.583	
21	21-1	0.524	0.539	0.537	0.533	0.554	0.650	0.650	0.664	0.655	0.569
	21-2	0.559	0.570	0.570	0.566		0.512	0.518	0.519	0.516	
	21-3	0.555	0.563	0.566	0.561		0.533	0.535	0.537	0.535	
22	22-1	0.456	0.445	0.439	0.447	0.549	0.577	0.580	0.584	0.580	0.569
	22-2	0.582	0.581	0.594	0.586		0.589	0.594	0.597	0.593	
	22-3	0.606	0.613	0.621	0.613		0.507	0.533	0.556	0.532	
23	23-1	0.499	0.500	0.502	0.500	0.504	0.528	0.540	0.549	0.539	0.529
	23-2	0.523	0.551	0.547	0.540		0.513	0.524	0.523	0.520	
	23-3	0.467	0.476	0.472	0.472		0.528	0.532	0.525	0.528	
24	24-1	0.451	0.452	0.464	0.456	0.459	0.486	0.531	0.512	0.510	0.481
	24-2	0.490	0.500	0.500	0.497		0.437	0.462	0.490	0.463	
	24-3	0.410	0.424	0.443	0.426		0.458	0.465	0.485	0.469	
25	25-1	0.498	0.528	0.510	0.512	0.492	0.485	0.482	0.525	0.497	0.502
	25-2	0.463	0.488	0.495	0.482		0.483	0.489	0.470	0.481	
	25-3	0.480	0.504	0.502	0.482		0.528	0.541	0.513	0.527	

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความบิตตัวโค้งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก 27 เงื่อนไข (ต่อ)

ชิ้นงาน	ตัวอย่าง	จุดวัด A					จุดวัด B				
		1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม	1	2	3	เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
26	26-1	0.467	0.492	0.483	0.481	0.518	0.450	0.473	0.457	0.460	0.518
	26-2	0.495	0.506	0.504	0.502		0.531	0.546	0.536	0.538	
	26-3	0.554	0.561	0.597	0.571		0.568	0.535	0.567	0.557	
27	27-1	0.496	0.511	0.513	0.507	0.482	0.496	0.511	0.511	0.506	0.511
	27-2	0.455	0.483	0.492	0.477		0.550	0.534	0.535	0.540	
	27-3	0.447	0.476	0.462	0.462		0.488	0.476	0.500	0.488	

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดความบิตตัวโค้งงอของชิ้นงานทั้ง 27 เงื่อนไขซึ่งมี 3 ชิ้นงานต่อเงื่อนไข โดยมีการวัดค่า 3 ครั้งต่อจุด และนำไปหาค่าเฉลี่ยรวมในแต่ละเงื่อนไข จึงสามารถสรุปค่าการบิตตัวโค้งงอของชิ้นงานที่น้อยที่สุดคือเงื่อนไขที่ 9 โดยมีค่าความบิตตัวโค้งงอเฉลี่ย คือ 0.335 mm.

4.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความบิตตัวโค้งงอของการจำลองและการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำผลลัพธ์ที่ได้จากค่าเฉลี่ยความบิตตัวโค้งงอในแต่ละเงื่อนไขของการจำลองการฉีดขึ้นรูปมาเปรียบเทียบกับค่าการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบความบิตตัวโค้งงอของการจำลองและชิ้นงานฉีดขึ้นรูป

เงื่อนไข	ค่าความบิตตัวโค้งงอจากการจำลอง (mm.)	ค่าความบิตตัวโค้งงอจากชิ้นงานฉีดขึ้นรูป (mm.)	ความคลาดเคลื่อน
1	0.499	0.373	25%
2	0.479	0.390	19%
3	0.456	0.400	12%
4	0.49	0.373	24%
5	0.465	0.390	16%
6	0.442	0.381	14%
7	0.485	0.411	15%
8	0.461	0.377	18%
9	0.435	0.335	23%
10	0.551	0.359	35%

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบความบิดตัวโค้งงอของการจำลองและชิ้นงานฉีดขึ้นรูป (ต่อ)

เงื่อนไข	ค่าความบิดตัวโค้งงอจาก การจำลอง (mm.)	ค่าความบิดตัวโค้งงอจาก ชิ้นงานฉีดขึ้นรูป (mm.)	ความคลาดเคลื่อน
11	0.533	0.393	26%
12	0.512	0.379	26%
13	0.546	0.447	18%
14	0.527	0.458	13%
15	0.505	0.396	22%
16	0.542	0.406	25%
17	0.523	0.403	23%
18	0.500	0.440	12%
19	0.574	0.573	0%
20	0.563	0.523	7%
21	0.544	0.561	3%
22	0.569	0.559	2%
23	0.557	0.517	7%
24	0.538	0.470	13%
25	0.565	0.497	12%
26	0.554	0.518	7%
27	0.534	0.496	7%

ผลลัพธ์ที่ได้จากเปรียบเทียบแสดงได้ว่าแนวโน้มการบิดตัวโค้งงอชิ้นงานของการจำลอง และการฉีดขึ้นรูปมีความสอดคล้องกัน โดยเงื่อนไขที่ 9 มีค่าการบิดตัวโค้งงอต่ำสุด (Minimum Warpage) คือ 0.435 mm. และ 0.335 mm. ของการจำลองการฉีด และการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 23% ในส่วนของค่าการบิดตัวโค้งงอสูงสุด (Maximum Warpage) เป็นเงื่อนไข 19 คือ 0.574 mm. และ 0.573 mm. ของการจำลองการฉีด และการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามลำดับ โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองทางวิศวกรรม (CAE Software) เพื่อปรับพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (DOE) ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง ลดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต จากการทดลองพบว่า โปรแกรม Moldex3D สามารถจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ได้อย่างแม่นยำ โดยให้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปปรับปรุงค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น อุณหภูมิหลอมละลาย (Melt Temperature), ความดันฉีดสูงสุด (Maximum Packing Pressure) และเวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)

การใช้ DOE (Full Factorial Design) ในการทดลอง ทำให้สามารถระบุค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานการปรับค่าพารามิเตอร์ตามผลลัพธ์ของการจำลอง ช่วยลดข้อบกพร่องหลักที่พบบ่อย ได้แก่ การอั้นอากาศ (Air Trap), รอยยุบตัว (Sink Mark), การบิดตัวโก่งงอของชิ้นงาน (Warpage) และการเกิดรอยเชื่อมประสาน (Weld Line) โดยวัสดุที่เลือกใช้ PP-TD20 (Polypropylene-Talc 20%) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมในอุตสาหกรรมยานยนต์ สามารถปรับค่าการฉีดขึ้นรูปให้เหมาะสมได้ ส่งผลให้ผลิตชิ้นส่วนกันชนรถยนต์ และชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น

โดยสรุป การใช้ CAE Software ควบคู่กับ DOE และ FEM สามารถช่วยลดข้อบกพร่องในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงานที่ได้มาตรฐาน

5.2 อภิปรายผล

เนื่องด้วยการทดลองใช้ชิ้นงานลักษณะกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 100x75x45 mm. โดยใช้วัสดุ PP-TD20 ซึ่งนำไปสู่การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ Full Factorial Design ที่มีปัจจัยควบคุมจำนวน 3 ตัวแปร แต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ ส่งผลให้เกิดเงื่อนไขในการจำลองทั้งหมด 27 เงื่อนไข จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ผลการบิดตัวโก่งงอโดยรวม (Warpage Total Displacement) ต่ำที่สุด (0.435 mm.) คือ อุณหภูมิหลอมเหลวที่ระดับ 1 (210°C), แรงความดันฉีดสูงสุดที่ระดับ 3 (150 MPa), และเวลาหล่อเย็นที่ระดับ 3 (20 sec)

นอกจากนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการฉีดขึ้นรูปจริง ยังแสดงให้เห็นแนวโน้มที่มีความสอดคล้องกัน โดยพบว่าเงื่อนไขที่ 9 มีค่าการบิดตัวโก่งงอต่ำสุด (Minimum Warpage) อยู่ที่ 0.435 mm. จากการจำลอง และ 0.335 mm. จากการฉีดขึ้นรูปจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 23% ส่วนเงื่อนไขที่ 19 มีค่าการบิดตัวโก่งงอสูงสุด (Maximum Warpage) อยู่ที่ 0.574 mm. จากการจำลอง และ 0.573 mm. จากการฉีดขึ้นรูปจริง โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการคาดการณ์แนวโน้มพฤติกรรมของชิ้นงานด้วยวิธีการจำลองที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากความแปรปรวนของสภาพการผลิตจริงรวมถึงวัสดุ หรือปัจจัยอื่นที่ไม่ได้ควบคุมในการทดลอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบอื่น เช่น Taguchi Method หรือ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดข้อบกพร่องของชิ้นงาน รวมไปถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยนำ Finite Element Analysis (FEA) มาวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] Fictiv, “The Ten Most Common Plastic Injection Molding Materials,” [Online]. Available : <https://www.fictiv.com/articles/the-ten-most-common-plastic-injection-molding-materials>. [Accessed : January 27, 2025].
- [2] S. K. Saha, “A brief review on injection moulding manufacturing process,” *Procedia Manufacturing*, vol. 20, no. 3, pp. 1-6, May-June 2018.
- [3] S. Norman, “Types of DOE Design : A User’s Guide,” [Online]. Available : <https://www.synthace.com/blog/types-of-doe-design-a-users-guide>. [Accessed : January 27, 2025].
- [4] M. S. Zainudin et al., “Integration of taguchi-grey relational analysis technique in parameter process optimization for rice husk composite,” *BioResources*, vol. 13, no. 1, pp. 1-10, July 2018.
- [5] V. J. Agota et al., “Finite element method : An overview,” *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, April 2013.
- [6] Moldex3D, “A Case Study on Identifying Optimal Design Parameters with Moldex3D and Isight,” [Online]. Available : <https://www.moldex3d.com/blog/editors-pick/a-case-study-on-identifying-optimal-design-parameters-with-moldex3d-and-isight/>. [Accessed : January 27, 2025].
- [7] ณัฐภัทร สังข์ทอง, การศึกษาเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดของไบโอพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2563.
- [8] สิตตาร์ พิศแสงงาม, การพยากรณ์การบิดเบี้ยวในชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม CAE กรณีศึกษาชิ้นส่วนกล่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์, กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2566.
- [9] S. Pitjamit et al., “The experimental study of rear fender production using plastic injection molding with Moldex3D simulation,” *Engineering and Applied Science Research*, vol. 50, no. 6, pp. 646-656, March 2023.
- [10] Y. Tang, “Application of CAE for mold flow analysis in plastic molding mold design,” *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, January 2024.
- [11] Y. Ryu et al., “Shrinkage optimization in talc and glass-fiber-reinforced polypropylene composites,” *Materials*, vol. 12, no. 5, pp. 1-10, April 2019.

- [12] M. S. Zainudin et al., "Integration of taguchi-grey relational analysis technique in parameter process optimization for rice husk composite," *BioResources*, vol. 13, no. 1, pp. 1-10, May 2018.
- [13] N. Y. Zhao et al., "Recent progress in minimizing the warpage and shrinkage deformations by the optimization of process parameters in plastic injection molding," *Journal of Systems Engineering and Information Technology*, vol. 120, no. 1-2, pp. 85-101, February 2022.
- [14] M. Huszar et al., "Sustainable injection moulding : The impact of materials selection and gate location on part warpage and injection pressure," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 5, no. 5, pp. 1-8, July 2015.



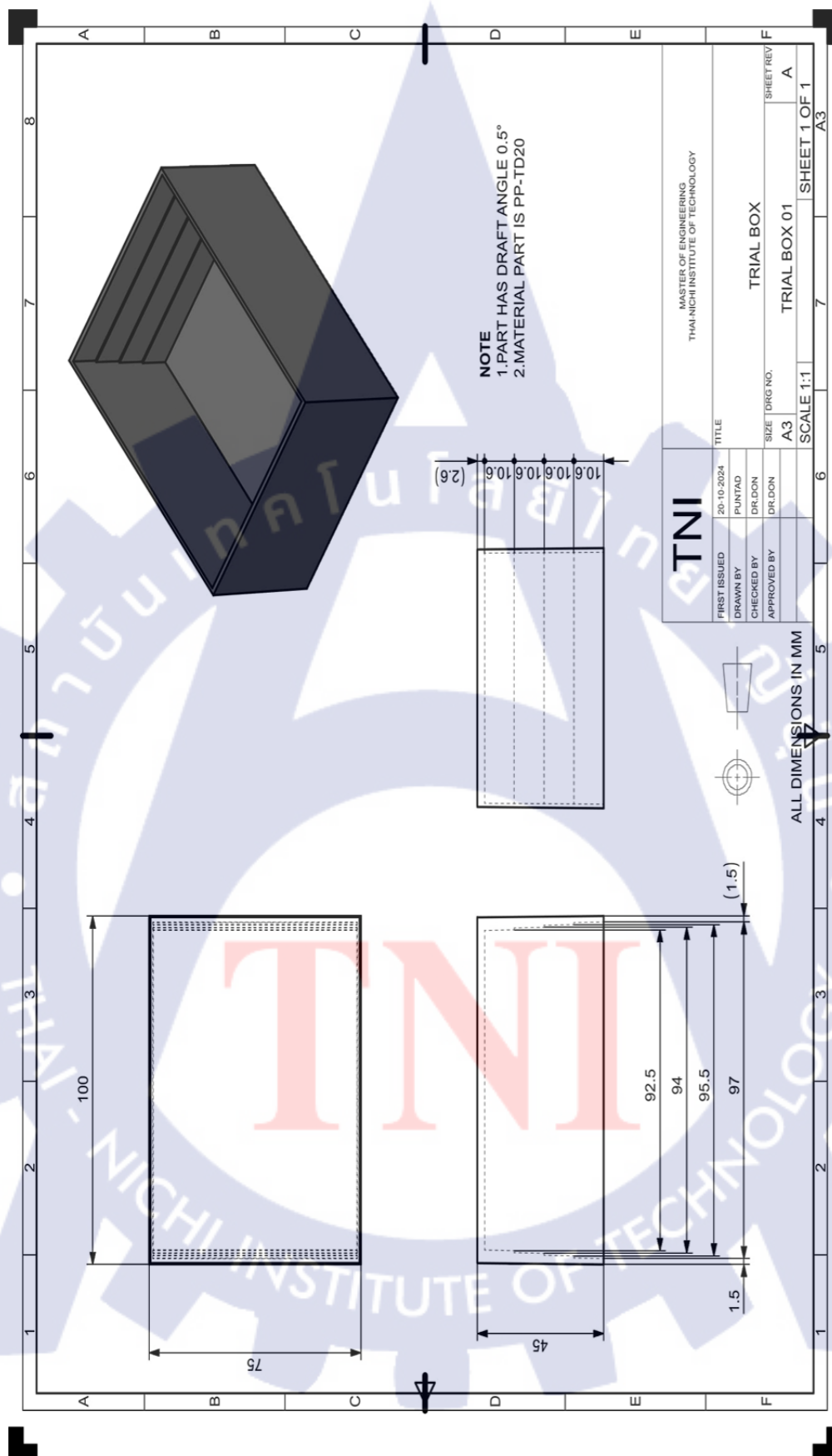
ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติก

TNII

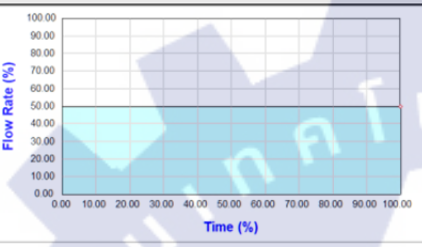
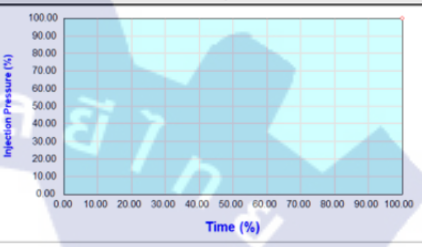


รูปที่ ก.1 ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

ภาคผนวก ข.

เงื่อนไขการปรับพารามิเตอร์ของการจำลองการฉีดขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุ

TNII

Moldex3D Molding Process Sheet																																																										
Model																																																										
Customer	Mold No.	Project Name	Mesh File Name	Run ID	Date																																																					
		Thesis Final	Box Mold.mfe	Run 29	Mon, 26-05-2025																																																					
Part Dimension (mm x mm x mm)		Runner Type	Part Count	Total Part Weight (g)	Total Runner Weight (g)																																																					
75.40x100.65x45.00		Cold Runner	1	43.8587	0.946602																																																					
Material																																																										
Polymer	Producer	Grade Name	Fiber (%)	MFI (g/10min)	MVR (cm³/10min)																																																					
PP	LyondellBasell	Hifax X M2 U16	0	12 (230, 2.16)	14.2796 (230, 2.16)																																																					
Machine																																																										
Manufacturer	Grade Name	Serial No.	Clamping Force (Ton(m))	Screw Diameter (mm)	Screw Stroke (mm)																																																					
Plasticizing					Mold Temperature (°C)																																																					
Back Pressure (MPa)	Screw Speed (rpm)	Suck Back (mm)	Dosage Stroke (mm)	Cavity	Core																																																					
				35	35																																																					
Barrel Temperature (°C)																																																										
Nozzle	H1	H2	H3	H4																																																						
Injection Setting																																																										
Flow Rate					Injection Pressure																																																					
																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Section#</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Flow Rate</td> <td>%</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Injection Pressure</td> <td>%</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Position</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Time</td> <td>sec</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VP Switch</td> <td>By Volume Filled</td> <td>98 (%)</td> <td colspan="2">Maximum Filling Time</td> <td colspan="2">1.547 (sec)</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Max Pressure</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Section#	1	2	3	4	5	6	Flow Rate	%	50					Injection Pressure	%	100					Position							Time	sec						VP Switch	By Volume Filled	98 (%)	Maximum Filling Time		1.547 (sec)						Max Pressure		
Section#	1	2	3	4	5	6																																																				
Flow Rate	%	50																																																								
Injection Pressure	%	100																																																								
Position																																																										
Time	sec																																																									
VP Switch	By Volume Filled	98 (%)	Maximum Filling Time		1.547 (sec)																																																					
				Max Pressure																																																						
Packing Pressure Profile																																																										
Section#	1	2	3	4	5	6																																																				
Packing Pressure	%	78.5714	62.8571	50.2857																																																						
Time	sec	3.216	1.072	1.072																																																						
Max Pressure						Packing pressure refers to machine pressure																																																				
Time Record (sec)																																																										
Close	Plasticizing	Injection	Packing	Cooling	Mold Open	Ejection	Cycle Time																																																			
		1.19	5.36	20	5		31.55																																																			

Material

Item Name	Item Data	Unit
Melt Temperature (minimum)	200	°C
Melt Temperature (normal)	220	°C
Melt Temperature (maximum)	240	°C
Melt Temperature Range	200~240	°C
Mold Temperature (minimum)	20	°C
Mold Temperature (normal)	35	°C
Mold Temperature (maximum)	50	°C
Mold Temperature Range	20~50	°C

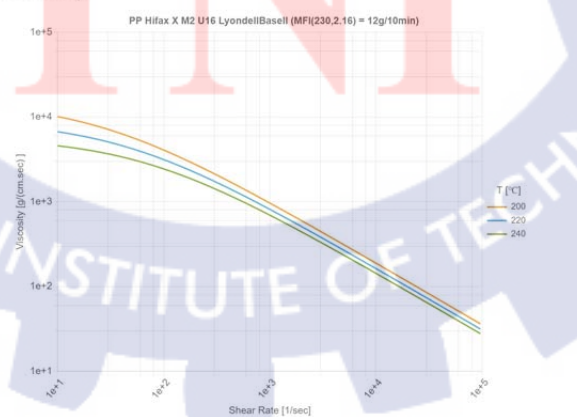
Moldex3D

Material - MFI/MVR

Item Name	Item Data	Unit
Melt Flow Index	12	g/10min
Temperature	230	°C
Load	2.16	kg
Melt Volume-Flow Rate	14.2796	cm ³ /10min
Temperature	230	°C
Load	2.16	kg

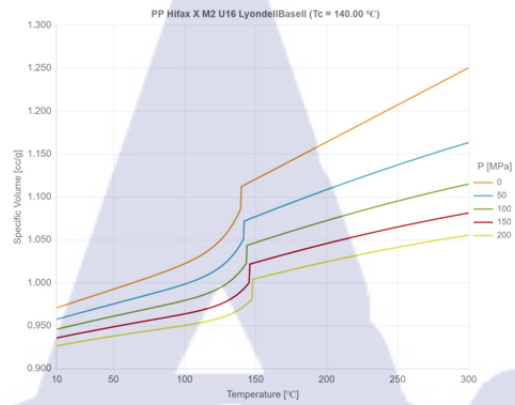
Moldex3D

Material - Viscosity

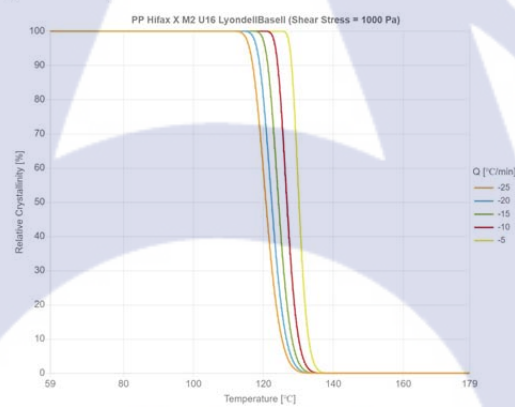


Moldex3D

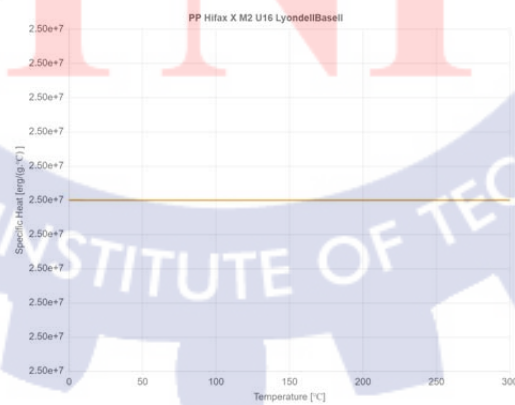
Material - PVT



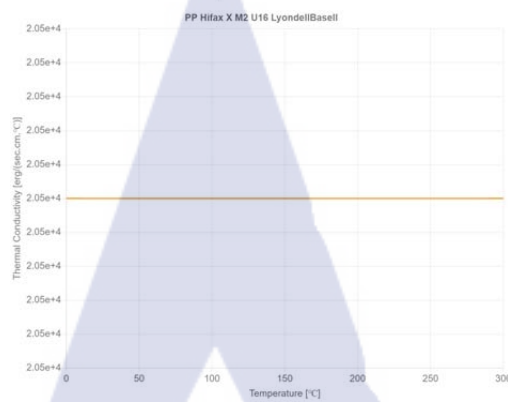
Material - Crystallinity



Material - Specific Heat

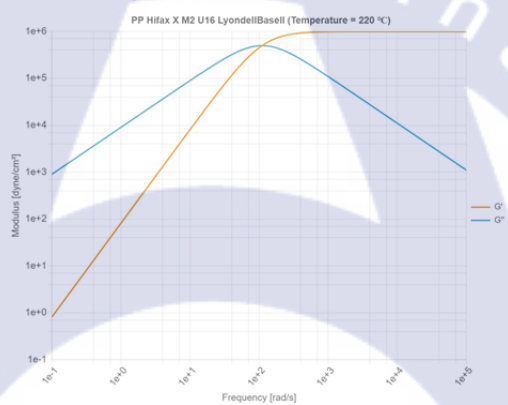


Material - Thermal Conductivity



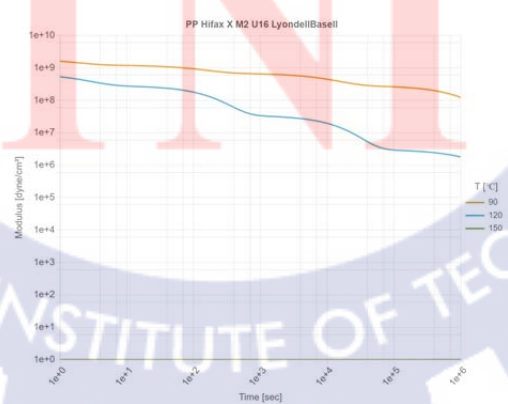
Moldex3D

Material - Viscoelasticity



Moldex3D

Material - Structure VE



Moldex3D

Material - Content

Type	PP
Grade Name	Hifax X M2 U16
Producer	LyondellBasell
Comment	20%Talc
Density	1.05 g/cc
MF1	12 g/10min @230°C, 2.16kg
Version	2023.04.2 - 1.0.0
Melt Temperature (Minimum)	200 °C
Melt Temperature (Normal)	220 °C
Melt Temperature (Maximum)	240 °C
Mold Temperature (Minimum)	20 °C
Mold Temperature (Normal)	35 °C
Mold Temperature (Maximum)	50 °C
Ejection Temperature	110 °C
Freeze Temperature	130 °C

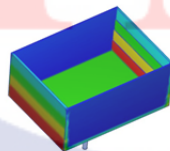
Moldex3D

Material - Mechanical Properties

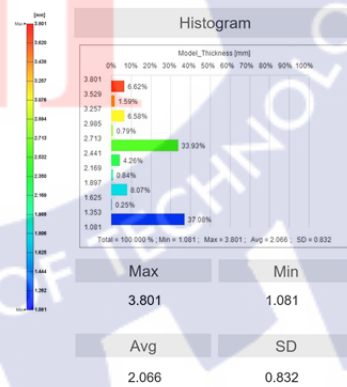
Type	PP
Grade Name	Hifax X M2 U16
Producer	LyondellBasell
Mechanical Properties	Anisotropic Pure Polymer
Modulus E1 (Flow Direction)	1.55e+10 (dyne/cm ²)
Modulus E2 (Transverse Direction)	1.55e+10 (dyne/cm ²)
Poisson's Ratio v12	0.3844 (-)
Poisson's Ratio v23	0.3844 (-)
Shear Modulus G12	5.59971e+9 (dyne/cm ²)
CLTE a1 (Flow Direction)	8.281e-5 (1/K)
CLTE a2 (Transverse Direction)	8.281e-5 (1/K)

Moldex3D

Thickness

Run ID:
Model_Thickness

2D
3D
Perspective
WCS
Residual Stress
Moldex3D
10.00 mm
Thickness



Moldex3D

ภาคผนวก ค.

ผลลัพธ์ของการจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเงื่อนไข Optimization

TNII

