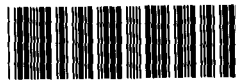


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด
ชนิดโพลีเอททีสึนชนิดความหนาแน่นสูง

EFFECTS OF GATE TYPES AND INJECTION SPEEDS ON SHRINKAGE OF
HIGH-DENSITY POLYETHYLENE FOR INJECTION MOLDING PARTS

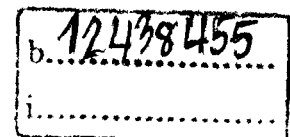


T123082

พิชัย เล็กโล่ง
PICHAI LAGLONG

077.
ท 6430
2555

เลขหมู่..... 123082
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... 18 ต.ค. 2555



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-M-217-054

**EFFECTS OF GATE TYPES AND INJECTION SPEEDS ON SHRINKAGE OF
HIGH-DENSITY POLYETHYLENE FOR INJECTION MOLDING PARTS**

PICHAJ LAGLONG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-217-054**


COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วที่ฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด
ชนิดโพลีเอทที่สึนชนิดความหนาแน่นสูง
Thesis Title Effects of Gate Types and Injection Speeds on Shrinkage of High-Density
Polyethylene for Injection Molding Parts
นักศึกษา นายพิชัย เล็กโล่ง
รหัสประจำตัว 52612011
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-217-054

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	
ดร.วิญญู	ตัมชะพานิชกุล	
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ้จ้ง	
ดร.วิภู	ศรีสืบสาย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดชนิดโพลีเอทที่สั่นชนิดความหนาแน่นสูง
นักศึกษา	นายพิชัย เล็กโล่ง
รหัสนักศึกษา	52612011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดชนิดโพลีเอทที่สั่นชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้วิธีการจำลองการฉีดด้วยการประมาณค่าทางทฤษฎีคณิตศาสตร์ จากโปรแกรมสำเร็จรูป Moldex3D R10. ทำการศึกษาผลกระทบของชนิดทางเข้า ได้แก่ ทางเข้าแบบฟิล์ม ทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม โดยใช้ความเร็วฉีดเต็มเต็มแบบที่ 0.14 0.26 0.5 1 2.5 5 และ 10 วินาที โดยอาศัยโปรแกรมที่ออกแบบจากรูปแบบความหนืดชนิด Cross model 2 กับรูปแบบจำลองความหนืดชนิด Power-law model[1] เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าการหดตัวกับชิ้นงานฉีดจริง ผลการจำลองการฉีดพบว่าทางเข้าแบบฟิล์มมีค่าการหดตัวมากที่สุด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบพัดเล็กน้อย ผลจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวรูปแบบจำลองความหนืดชนิด Cross model 2 มากกว่ารูปแบบจำลองความหนืดชนิด Power-law model ทุกค่าความเร็วฉีด โดยทั้งสองรูปแบบจำลองความหนืดมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวมีแนวโน้มเดียวกัน และจากผลการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบจำลองความหนืดชนิด Cross model 2 มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกับการทดลองฉีดชิ้นงานจริงมากกว่ารูปแบบจำลองความหนืดชนิด Power-law model ผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่มีคุณภาพสูงได้[2]

Thesis Title	EFFECTS OF GATE TYPES AND INJECTION SPEEDS ON SHRINKAGE OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE FOR INJECTION MOLDING PARTS
Student	Mr. Pichai Laglong
Student ID	52612011
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis studied of the effect of gate types and injection speed on the shrinkage of high-density polyethylene for injection molding part. The experiments were performed with two mathematical models of viscosity, cross model 2 and Power law model [1], to simulate and compare the shrinkage of plastic part by Moldex3D R10 program following the ASTM D955-08. The film gate, fan gate, and edge gate were designed with the criteria of the same cross section area. The injection speeds were set as 0.14, 0.26, 0.5, 1, 2.5, 5 and 10 sec. The results showed that when using the fan gate, the shrinkage was highest. The percentage of shrinkage when using edge gate was higher than using the fan gate. Moreover, the simulation of the shrinkage from cross model 2 was higher when compared with the power law model. The all results were acceptable when compared with the shrinkage of plastic part by injection molding machine [2].

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยมี ดร.วิภู ศรีสืบสาย เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้คำแนะนำ สั่งสอน และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดเวลาในการทำวิจัย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ดร.วิญญู ตันตะพานิชกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่ให้แนวทางแก้ไขและคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์ ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัท Cadsoft Technology ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม Moldex3D R10. และแนะนำการแก้ไขปัญหา

ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่อบรม สั่งสอน เป็นกำลังใจ ให้โอกาส และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งกำลังใจจากทุกท่านที่ไม่ได้กล่าว ณ ที่นี้ด้วย

คุณค่า ประโยชน์ และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และผู้มีพระคุณ

พิชัย เล็กโล่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	6
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	6
1.6 ประโยชน์ของการวิจัย.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติก.....	8
2.2.1 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติกในยุคปี 90.....	8
2.2.1.1 Moldflow.....	8
2.2.1.2 SDRC	9
2.2.1.3 AC Technology/C-MOLD.....	10
2.2.1.4 Simcon	10
2.2.1.5 Sigma Engineering	11
2.2.1.6 Transvalor.....	11
2.2.1.7 CoreTech Systems.....	11
2.2.2 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติกในปี 2000	11
2.2.2.1 Moldflow	11
2.2.2.2 Timon	11
2.2.2.3 CoreTech Systems	11
2.3 ขั้นตอนกระบวนการในการฉีดพลาสติก	12
2.3.1 การหัดตัวของชิ้นงานพลาสติกฉีด.....	14
2.2.1.1 การใช้ PVT ในการประมาณค่าการหัดตัว.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.2 ความสัมพันธ์ของ PVT ไดอะแกรม.....	15
2.2.1.3 PVT ไดอะแกรม กับพฤติกรรมของโพลิเมอร์.....	15
2.3.2 การหดตัวแบบ Anisotropic และการบิดงอ	21
2.3.3 การหดตัวโดยเติมสารเพิ่มความแข็งแรง	21
2.3.4 การประยุกต์ใช้.....	22
2.3.4.1 ตัวแปรในการหดตัว.....	22
2.3.4.2 การปลดชิ้นงาน.....	23
2.3.4.3 เวลาในการหดตัว.....	23
2.3.4.4 การอ่อนตัวของชิ้นงาน	23
2.3.4.5 ความหนาของชิ้นงาน	23
2.3.4.6 ผลกระทบของการหดตัว	24
2.3.4.7 ผลกระทบเมื่อเปิดแม่พิมพ์.....	24
2.3.4.8 การประมาณค่าการหดตัว	24
2.3.4.9 ผลกระทบอื่นๆ.....	26
บทที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุ และทฤษฎีการฉีดพลาสติก	28
3.1 ชนิดของพลาสติก.....	28
3.1.1 เทอร์โมพลาสติก	28
3.1.2 เทอร์โมเซต	28
3.1.3 อีลาสโตเมอร์.....	29
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติก	29
3.2.1 พลาสติกสังเคราะห์	29
3.2.2 โครงสร้างของโพลิเมอร์และการจัดรูปร่างโมเลกุลของโพลิเมอร์	29
3.2.3 โครงสร้างของโพลิเมอร์.....	29
3.2.3.1 โพลิเมอร์แบบเส้นยาวตลอด.....	29
3.2.3.2 โพลิเมอร์แบบแขนโดยรอบ.....	30
3.2.3.3 โพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห.....	30
3.3 คุณสมบัติของ crystalline และ Amorphous thermoplastic.....	30
3.3.1 Crystalline	30
3.3.2 Amorphous thermoplastics	31
3.4 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางการภาพของการฉีดพลาสติก.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพด้านความร้อน	32
3.4.1.1 คุณสมบัติเชิงปริมาตร	32
3.4.1.2 คุณสมบัติของ Calorimetric.....	32
3.4.1.3 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะ	32
3.4.2 คุณสมบัติเชิงปริมาตร	33
3.4.2.1 ปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่น	33
3.4.2.2 ความร้อนในการหลอมละลายและความร้อนของการเกิด Crystallization	33
3.5 พฤติกรรมการไหลของพลาสติก	34
3.5.1 พฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล.....	34
3.5.2 การลดลงของความดันภายในโพรงแบบ	35
3.6 พื้นฐานกระบวนการฉีดพลาสติก	36
3.6.1 รูปแบบการฉีดพื้นฐาน.....	36
3.6.2 พื้นฐานการฉีดพลาสติก.....	36
3.7 รูปแบบการไหล.....	37
3.7.1 การไหลในแผ่นประกบคู่.....	37
3.7.2 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดันภายในท่อ.....	37
3.8 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในการไหลแบบเฉือน.....	38
3.8.1 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนิวทอนเนียน.....	38
3.8.2 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนอนนิวทอนเนียน	38
3.8.2.1 ของไหลแบบบิงแอม.....	39
3.8.2.2 ของไหลแบบติลาแทน	39
3.8.2.3 ของไหลแบบซูโดพลาสติก.....	39
3.9 ความหนืดของพลาสติก.....	39
3.9.1 แบบจำลอง Newtonian fluid.....	40
3.9.2 แบบจำลอง Power-law model.....	40
3.9.3 แบบจำลอง Cross Model 1	42
3.9.4 แบบจำลอง Cross Model 2.....	43
3.9.5 แบบจำลอง Cross Model 3.....	44
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืด อุณหภูมิ และอัตราเฉือน.....	44
3.11 การประมาณค่านอกช่วงของข้อมูลความหนืด.....	44
3.12 ข้อผิดพลาดของการประมาณค่านอกช่วงความหนืด.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.13 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะ	46
3.13.1 อุณหภูมิ Glass transition T_g	46
3.13.2 อุณหภูมิหลอมเหลว	47
3.14 การฉีดพลาสติกและหลักพื้นฐานในการออกแบบแม่พิมพ์	48
3.14.1 ขั้นตอนในกระบวนการฉีดพลาสติก	48
3.14.2 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก	48
3.15 ระบบป้อน (Feed system)	50
3.15.1 บ่อดัก (Cold slug)	50
3.15.2 ทางวิ่ง (Runner)	51
3.15.3 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดทางวิ่ง	52
3.15.4 ทางเข้า (Gate)	53
3.15.5 ชนิดของทางเข้า (Type of gate)	54
3.15.6 ระบบหล่อเย็น (Cooling system)	59
3.15.6.1 การออกแบบระบบหล่อเย็น	60
บทที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D	62
4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D. R10	62
4.1.1 ขั้นตอนการออกแบบ	63
4.1.2 แบบจำลองสำหรับใช้วิเคราะห์ CAE	66
4.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีด	67
4.2.1 อุณหภูมิพลาสติกเหลว	67
4.2.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์	67
4.2.3 เวลาในการฉีด	67
4.2.4 ความเร็วในการฉีด	68
4.2.5 ความดันในการฉีด	68
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	70
5.1 อุปกรณ์การทดลอง	70
5.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	70
5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	70
5.2 แบบจำลอง (Model) ของชิ้นงานและแม่พิมพ์	71
5.2.1 แบบจำลองของชิ้นงาน	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 ลักษณะแม่พิมพ์ฉีดขึ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955-08.....	72
5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบพลาสติก.....	73
5.4 การวัดขึ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติก.....	74
5.5 ผลการทดลอง.....	75
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	98
5.6.1 การวิเคราะห์ผลการฉีดพลาสติกจากการทดลอง.....	98
5.6.2 วิเคราะห์ผลการทดลองระหว่างชนิดทางเข้า Film gate Fan gate และEdge gate.....	98
5.6.2.1 รูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2.....	99
5.6.2.2 ผลวิเคราะห์รูปแบบจำลองความหนืด Power law model.....	99
5.6.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Cross model2 กับPower law model100	
5.6.4 การจำลองการฉีดกับผลการทดลองฉีดขึ้นงานจริงโดยการออกแบบแม่พิมพ์ ..	101
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	102
6.1 บทสรุป.....	102
6.1.1 การทดลองศึกษาผลกระทบของชนิดทางเข้า.....	102
6.1.2 เปรียบเทียบรูปแบบจำลองความหนืด.....	102
6.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว.....	102
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต.....	102
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	108
ภาคผนวก ข. สมบัติของวัสดุ.....	117
ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม Moldex3D R10.....	127
ภาคผนวก ง. ข้อมูลเม็ดพลาสติก.....	137
ภาคผนวก จ. แบบโมลฉีดพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D955-08.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการหดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ.....	24
3.1 ตารางแสดงการออกแบบทางไหลน้ำหล่อเย็น.....	61
5.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกชนิด High-density-polyethylene เกรด MARLEX HXM50100	70
5.2 พื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและขนาดของชิ้นงานฉีด	73
5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบชิ้นงานฉีด	74
5.4 เปอร์เซนต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองฉีดจริง (Film gate).....	88
5.5 เปอร์เซนต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองฉีดจริง (Fan gate)	89
5.6 เปอร์เซนต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองฉีดจริง (Edge gate)	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปัญหาของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก	1
1.2 ชิ้นงานฉีดในอุตสาหกรรมรถยนต์	2
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความดันและปริมาตรจำเพาะที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด	4
1.4 แบบจำลองการหดตัวของพลาสติกภายในภาชนะ	5
2.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในผลิตชิ้นงานฉีด.....	7
2.2 การจำลองการไหลที่ขอบของชิ้นงานกล่องที่มีพองอากาศบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง.....	8
2.3 รูป Layflat ที่ทำการคลี่กล่องออกในแนวระนาบ	9
2.4 ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้วิธี Layflat ที่ทำการคลี่ออกในแนวระนาบ.....	9
2.5 รูปชิ้นงาน 3D (ซ้าย) และรูปชิ้นงาน 2.5D midplane (ขวา).....	10
2.6 รูปชิ้นงานฉีดที่ใช้เทคนิค Dual domain.....	10
2.7 พฤติกรรมการไหลชิ้นงาน 3D (ซ้าย) และชิ้นงาน 2.5D midplane (ขวา)	12
2.8 ความแตกต่างของความหนาของชิ้นงานฉีดที่ส่งผลต่อกระบวนการฉีด.....	13
2.9 การออกแบบระบบหล่อเย็น	13
2.10 ความดันในกระบวนการฉีดพลาสติก	14
2.11 ความดันแต่ละช่วงเวลาในกระบวนการฉีด	15
2.12 ความดันและอุณหภูมิของพลาสติกในแม่พิมพ์.....	16
2.13 P v T ไดอะแกรม แสดงวัสดุพลาสติกชนิด Amorphous และชนิด Semi-crystalline.....	17
2.14 การใช้ P v T ไดอะแกรม ในการทำนายการหดตัว.....	18
2.15 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955-08.....	19
2.16 โมเดลการทดสอบการหดตัว Chang (2003).....	20
2.17 ความสัมพันธ์ของความชื้นที่มีผลต่อโครงสร้างของชิ้นงานฉีด	20
2.18 การหดตัวเนื่องจากความชื้นของชิ้นงานฉีด	21
2.19 พฤติกรรมการหดตัวในทิศทางการไหลและทิศทางตั้งฉากการไหล	21
2.20 ความแตกต่างของการหดตัวของโพลีเมอร์ชนิด semi-crystalline ที่เติมไฟเบอร์	22
2.21 การออกแบบระบบปลดชิ้นงาน.....	24
3.1 ลักษณะเส้นใยพลาสติกแบบ Thermoplastics	28
3.2 ลักษณะเส้นใยพลาสติกแบบ Thermosetting.....	29
3.3 โพลีเมอร์แบบเส้นยาวตลอด.....	29
3.4 โพลีเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ	30
3.5 โพลีเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห	30
3.6 โพลีเมอร์แบบ Crystalline thermoplastic.....	31
3.7 โพลีเมอร์แบบ Amorphous thermoplastics.....	32
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาตรจำเพาะ	33
3.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อพลังงานความร้อน	34
3.10 พฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (a) และพฤติกรรมการไหลแบบนิวทอนเนียน(b).....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 พฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุลหลังจากทางเข้าเย็นตัว	35
3.12 การเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ผนังแม่พิมพ์ ที่เกิดจากอุณหภูมิผนังโพรงแบบเย็น	36
3.13 รูปแบบการไหลพื้นฐานในกระบวนการฉีดพลาสติก	36
3.14 ลักษณะเคลื่อนตัวของพลาสติกเหลว Melt front ผ่านแม่พิมพ์ที่หนาแตกต่างกัน.....	37
3.15 การไหลแบบแผ่นประกบคู่.....	37
3.16 รูปแบบการไหลที่เกิดความแตกต่างของความดันภายในช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม	38
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่างๆ.....	38
3.18 การไหลของของเหลวแบบ Newtonian fluids	39
3.19 พฤติกรรมความหนืดของพลาสติก	40
3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด Power law model	41
3.21 พฤติกรรมความหนืดของพลาสติกแบบ Cross-WLF และ Power-law model	42
3.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืดใน Cross-Model 2.....	43
3.23 แสดงการประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ.....	45
3.24 ข้อมูลของความหนืดกับเส้นยุติการไหล.....	45
3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของ Semi-Crystalline และ Amorphous	46
3.26 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ Elastic modulus.....	47
3.27 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก.....	48
3.28 องค์ประกอบของกระบวนการฉีดพลาสติก.....	49
3.29 เครื่องฉีดพลาสติก.....	49
3.30 โครงสร้างเครื่องฉีด	50
3.31 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก.....	50
3.32 ระบบป้อนของแม่พิมพ์พลาสติก	50
3.33 บ่อดัก (Cold slug).....	51
3.34 รูวึ่งหน้าตัดทรงกลม	53
3.35 รูวึ่งหน้าตัดรูปParabolic	53
3.36 รูวึ่งหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....	53
3.37 รูปทางเข้าและระบบป้อน	54
3.38 ทางเข้าแบบรูฉีด (Sprue gate).....	54
3.39 ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate).....	55
3.40 รูเข้าแบบฟิล์ม (Film gate).....	55
3.41 ทางเข้าแบบไดอะแฟรม (Diaphragm gate).....	55
3.42 ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate).....	56
3.43 ทางเข้าแบบเหลื่อม (Overlap gate).....	56
3.44 ทางเข้าแบบแถบ (Tab gate).....	57
3.45 ทางเข้าแบบ Tunnel gate (Submarine gate).....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 ทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate)	58
3.47 ทางเข้าแบบพัด (Fan gate).....	59
3.48 รูปการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ โดยรูป (a) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ รูป (b) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอ	60
4.1 ผังการทำงานของโปรแกรม moldex 3D R10.....	63
4.2 ชั้นงานทดสอบทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate).....	64
4.3 ชั้นงานทดสอบทางเข้าแบบพัด (Fan gate).....	64
4.4 ชั้นงานทดสอบทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate)	65
4.5 แบบทดสอบการหดตัวของ P.K. Kennedy	65
4.6 การวางท่อน้ำหล่อเย็น.....	66
4.7 จำนวน Mesh	66
4.8 การสร้าง Mesh Model แบบสามมิติ	67
4.9 ความดันที่เกิดขึ้นขณะฉีดพลาสติกที่ตำแหน่งต่างๆ	69
5.1 แบบจำลอง Film gate	71
5.2 แบบจำลอง Fan gate	71
5.3 แบบจำลอง Edge gate	72
5.4 ลักษณะแม่พิมพ์ฉีดขึ้นงานตามมาตรฐานASTM D955-08(ซ้าย) และลักษณะโพรงแบบ(ขวา) 73	73
5.5 ชั้นงานตัวอย่างและตำแหน่งการวัดของชั้นงานทดสอบ.....	74
5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นและความหนืด Cross-Model 2.....	76
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดพลาสติกชนิด Cross-Model 2	77
5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นและความหนืด Power law model.....	77
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดพลาสติกชนิด Power law model	78
5.10 อัตราเย็นต่อความเร็วฉีด (Cross model 2).....	79
5.11 อัตราเย็นต่อความเร็วฉีด (Power law model).....	79
5.12 อุณหภูมิฉีด และอุณหภูมิฉีดช้าต่อความเร็วฉีด (Cross model 2).....	80
5.13 อุณหภูมิฉีด และอุณหภูมิฉีดช้าต่อความเร็วฉีด (Power law model).....	81
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อความเร็วฉีด (Cross model 2)	82
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อความเร็วฉีด (Power law model)	82
5.16 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบและความดันฉีดช้าของชั้นงานฉีด(Cross model 2)....	83
5.17 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบและความดันฉีดช้าของชั้นงานฉีด(Power law model)84	84
5.18 เวลาที่ทางเข้าปิด Gate freeze-off (Cross model 2).....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 เวลาที่ทางเข้าปิด Gate freeze-off (Power law model).....	85
5.20 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X.....	86
5.21 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y.....	87
5.22 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z.....	87
5.23 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Film gate..	91
5.24 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Film gate.....	91
5.25 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Film gate..	92
5.26 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Fan gate ...	93
5.27 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Fan gate.....	93
5.28 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Fan gate ...	94
5.29 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Edge gate .	95
5.30 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Edge gate..	95
5.31 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Edge gate .	96
5.32 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดย่ำที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Film gate ที่ 0.5 วินาที.....	97
5.33 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดย่ำที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Fan gate ที่ 0.5 วินาที.....	97
5.34 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดย่ำที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Edge gate ที่ 0.5 วินาที.....	98
5.35 ค่าเฉลี่ยการหดตัว.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในวิถีการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ที่ผูกพันเกี่ยวข้องกับโพลิเมอร์ (Polymer) เป็นอย่างมาก สิ่งของเครื่องใช้อุปกรณ์ต่างๆ ล้วนแต่มีโพลิเมอร์หรือที่รู้จักกันในชื่อพลาสติก (Plastic) เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เช่น ของเล่นเด็ก เครื่องประดับ เครื่องครัว ภาชนะใส่อาหาร และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น

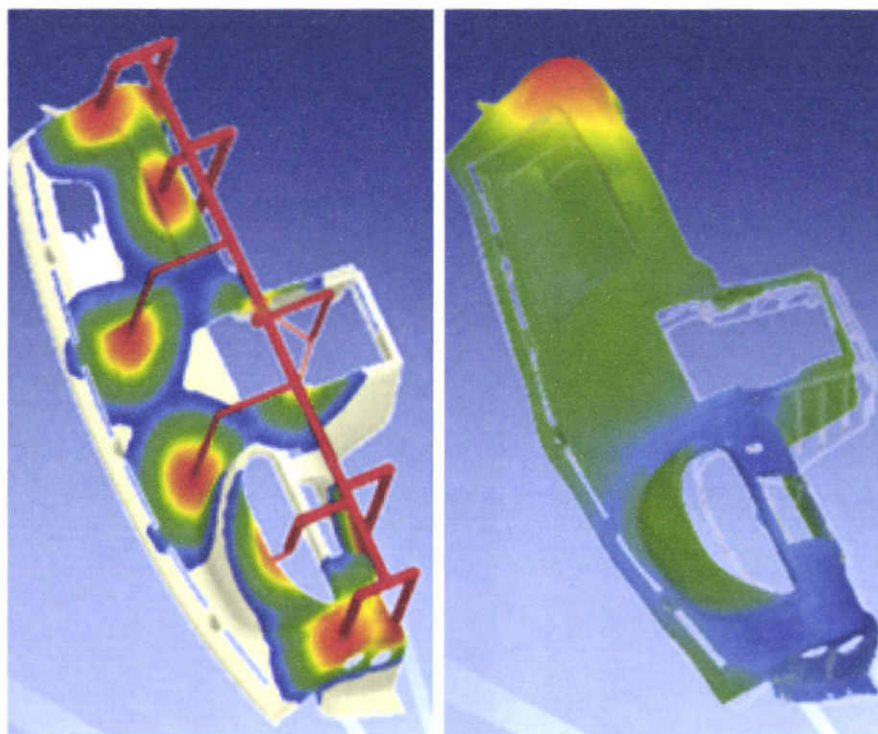
โพลิเมอร์เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น และนำมาใช้ในงานเมื่อประมาณร้อยกว่าปีมานี้ โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมโพลิเมอร์ได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย [1] แต่ปัญหาที่ส่งผลให้ชิ้นงานฉีดด้อยคุณภาพ เช่น การฉีดไม่เต็ม (Short shot) การเกิดรอยไหม้ (Burn mark) การเกิดรอยประสาน (Weld line) การเกิดรอยยุบ (Sink mark) เกิดครีบ (Flash) และการหดตัว (Shrinkage) [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยที่ปัญหาการเกิดการหดตัว ในชิ้นงานพลาสติกฉีดนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญและน่าสนใจ โดยอาจกล่าวได้ว่า “ทุกชิ้นงานฉีดพลาสติกเกิดการหดตัว” [1] ในการเกิดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความดันในแม่พิมพ์ ชนิดของพลาสติก และทิศทางการไหลของพลาสติก เป็นต้น [3-6] และการหดตัวของพลาสติกมีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก



รูปที่ 1.1 ปัญหาของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก [1]

จากปัญหาการหดตัวในการฉีดพลาสติกเป็นสิ่งที่สำคัญมากกับหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ [7] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 พฤติกรรมหดตัวของพลาสติกเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างมากที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดที่ยากต่อการพิจารณาและการแก้ไข ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหลายอย่าง โดยที่ปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน พฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับ

แม่พิมพ์การตัดสินใจในการปรับค่าตัวแปรตามความสามารถของเครื่องฉีดในกระบวนการผลิตเพื่อ การเติมเต็มพลาสติกในแม่พิมพ์นั้นเป็นการแก้ไขปัญหาในกรรมวิธีการฉีดพลาสติกที่ปลายเหตุของ ปัญหา และทำให้ต้นทุนในการฉีดพลาสติกสูงขึ้น โดยที่ชิ้นงานที่ถูกต้องสมบูรณ์นั้นมีส่วนเกี่ยวข้อง โดยตรงกับชนิดของทางเข้า (Gate) [8-11] และความเร็วในการฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน ฉีด จากสภาวะการไหลแบบเฉือน (Shear stress) [2][12-13] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการหดตัวของ ชิ้นงานฉีด [14-17]



รูปที่ 1.2 ชิ้นงานฉีดในอุตสาหกรรมรถยนต์ [1]

แต่เดิมปัญหาคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมนั้น อาศัยประสบการณ์ของช่างพิมพ์ และทำการทดลองซ้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดเงื่อนไขการฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีแต่วิธีนี้มีจุดด้อยคือ เสียเวลามากและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ในการทดลองซ้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมไม่สามารถแก้ปัญหาพฤติกรรมต่างๆ ได้ทั้งหมด และในปัจจุบันเทคนิคการใช้แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ เช่นการจำลองทางไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element analysis) มีความถูกต้อง แม่นยำสูงและรวดเร็วมากขึ้น [18] จึงมีการนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมในกระบวนการด้านการ ขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย [1],[4-5] มาทดสอบคุณสมบัติของชนิดทางเข้าที่มีผลต่อ การหดตัวของชิ้นงานฉีด ที่เกิดขึ้นจากชนิดทางเข้า โดยที่ทางเข้าเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างชิ้นงาน ฉีดกับระบบรูวิ่ง (Runner system) เนื่องจากทางเข้าจะเป็นส่วนที่เล็กที่สุดในการเชื่อมต่อของ ชิ้นงานฉีดกับระบบรูวิ่งด้วยเหตุนี้ ขนาดของทางเข้า รูปร่างของทางเข้า และตำแหน่งทางเข้า จึง ส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือน และเกิดการถ่ายเทความร้อนของทางเข้า ที่มีผลในขั้นตอนกระบวนการ ฉีดเติมแบบ (Filling stage) และขั้นตอนในการอัดย้า (Packing stage) ที่มีผลต่อชิ้นงาน ในการ ปรับปรุงนี้ เป็นแนวทางที่จะช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดที่มีความถูกต้อง มีความ แม่นยำสูง ประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์และการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดได้

ในงานวิจัยนี้ศึกษาให้เห็นถึงอิทธิพลของชนิดทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ที่ออกแบบตามคำแนะนำของ Mengen [19] ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ที่ขนาดของทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้พลาสติกในการทดลองชนิดโพลีเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในการฉีดแต่ละครั้ง มีตัวแปรควบคุมคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ความดัน และความเร็วฉีด (Injection speed) โดยศึกษาผลกระทบที่ทำให้เกิดการหดตัว ที่พิจารณาถึง ระยะเวลาถึง ระยะเวลาฉีด (Filling stage) และการเติมเต็ม (Packing stage) โดยทำการจำลองการกระจายตัวของพลาสติกเหลวด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Moldex3D R10 มาประยุกต์ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการฉีดชิ้นงานจริงโดยการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดเพื่อทดสอบความแม่นยำของการจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลกระทบการหดตัว ระหว่างสมการประมาณค่าความหนืด (Viscosity) ระหว่าง Power-law model และ Cross model 2

1.2.2 จำลองตัวอย่างของผลกระทบของชนิดทางเข้าและความเร็วในการฉีดที่มีต่อค่าการหดตัวของชิ้นงานฉีด

1.2.3 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการหดตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับชิ้นงานฉีดทดสอบจริง

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย [20]

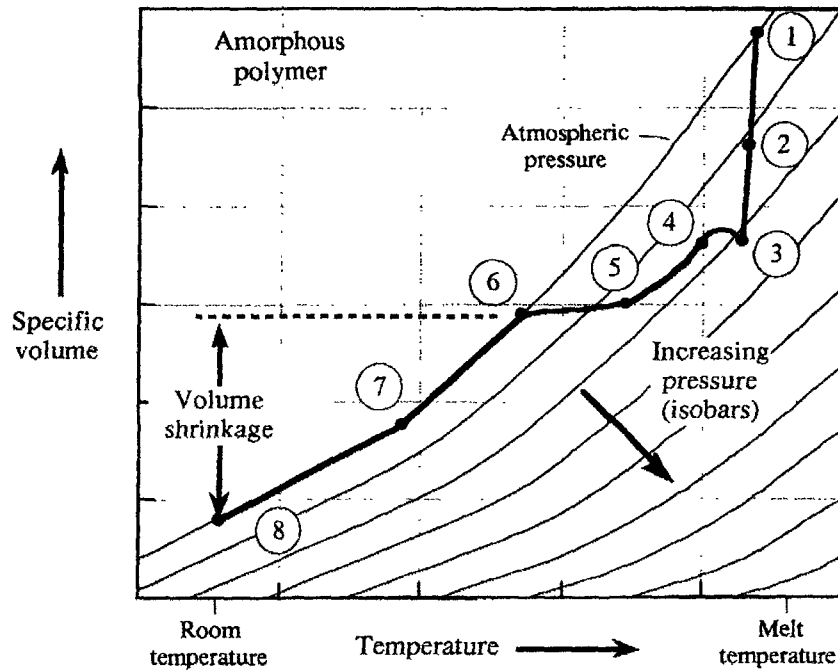
ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกมีบทบาทมากขึ้น ต่อชีวิตประจำวัน โดยอุตสาหกรรมได้มีการผลิตสินค้าให้เพียงพอเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องเกิดความเสียหายน้อยที่สุด และหนึ่งในปัญหาที่พบมากคือ การเกิดการหดตัวขึ้นในชิ้นงาน การหดตัวคือผลต่างของขนาดระหว่างขนาดของชิ้นงานพลาสติกและขนาดของโพรงแบบ (Cavity) [21] ภายใต้ความดันและอุณหภูมิส่วนใหญ่จะมีหน่วยคือ mm/mm, in/in หรือ เปอร์เซ็นต์ โดยมีหลักพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน, ปริมาตร และอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะเงื่อนไข ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีผลกระทบกับค่าการหดตัว

2. เมื่อปริมาตรพลาสติกถูกทำให้ร้อนขึ้นจะขยายตัว เมื่อเย็นตัวจะกลับสู่อุณหภูมิปกติและปริมาตรตามเดิม

3. เมื่อพลาสติกถูกอัดตัว ปริมาตรจะลดลง และเมื่อความดันลดลงสู่ความดันบรรยากาศ พลาสติกจะกลับสู่สภาวะเดิม

ในการวิเคราะห์การหดตัว $P \nu T$ ไดอะแกรมเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของพลาสติกแต่ละชนิดได้เป็นอย่างดี $P \nu T$ ไดอะแกรมแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pressure, P) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, ν) และอุณหภูมิ (Temperature, T) โดยแกนนอนเป็นอุณหภูมิของพลาสติก แกนตั้งเป็นปริมาตรต่อน้ำหนัก 1 กรัมหรือปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) [8-9] เส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความดันและปริมาตรจำเพาะที่ความดันค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความดันและปริมาตรจำเพาะที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด

โดยสาเหตุที่ชิ้นงานพลาสติกหดตัวเนื่องจากปริมาตรที่เข้าไปในโพรงนั้นขาดหายไป จึงเป็นผลมาจากการขยายตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.4 การชดเชยการหดตัวของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถทำได้ 2 วิธี

กรณีที่ 1 ชดเชยการหดตัวของพลาสติก ด้วยการอัดพลาสติกเหลวเข้าโพรงแบบด้วยความดันสูง ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อให้พลาสติกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ข้อดีวิธีนี้คือ เหมาะสำหรับงานที่บาง มีความเค้นตกค้างน้อย

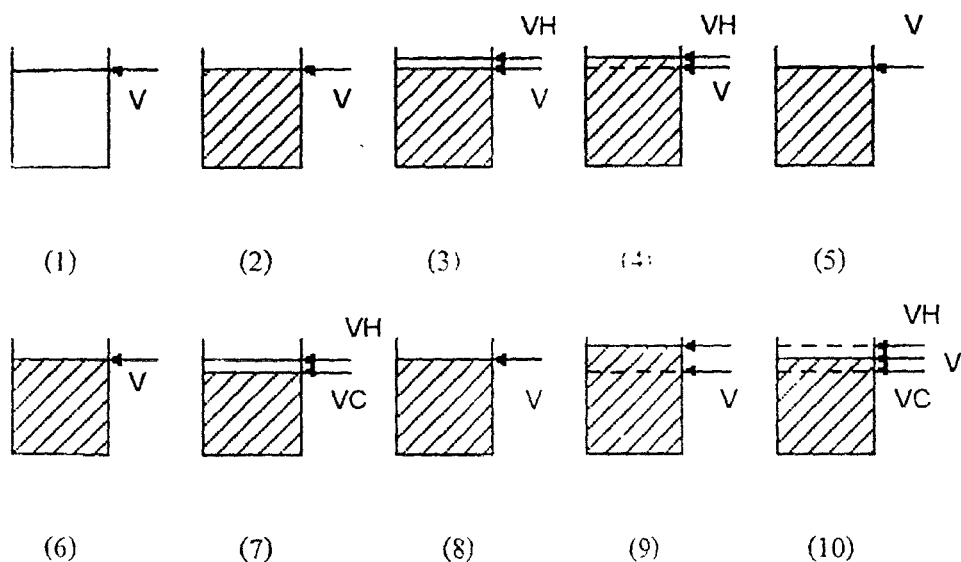
ข้อเสีย ต้องการแรงเปิดแม่พิมพ์สูง

กรณีที่ 2 อัดเนื้อพลาสติกเข้าโพรงแบบด้วยแรงปานกลาง อย่างต่อเนื่อง โดยการรักษาระดับความดันฉีดไว้ในแม่พิมพ์ให้คงที่

ข้อดีวิธีนี้คือ เหมาะกับงานหนา ใช้แรงในการเปิดแม่พิมพ์น้อย

ข้อเสีย มีความเค้นตกค้างสูงโดยเฉพาะบริเวณใกล้ Gate

การหดตัวของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถอธิบายตามแบบโมเดลโดย Herbert Rees ในการหดตัวในภาชนะได้ โดยที่การหดตัวนั้นเกิดขึ้นจากการขยายตัวเนื่องจากสัมประสิทธิ์ทางความร้อนของวัสดุ เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้พลาสติกขยายตัวและเมื่อถ่ายเทความร้อนออกที่ส่งผลให้ปริมาตรพลาสติกจะกลับสู่ดั้งเดิม และเมื่ออยู่ในสภาวะแรงดันจะทำให้พลาสติกหดตัวลง



รูปที่ 1.4 แบบจำลองการหดตัวของพลาสติกภายในภาชนะ [20]

1. ภาชนะมีปริมาตร V
2. พลาสติกในสถานะของแข็งอยู่ในภาชนะ ปริมาตร V
3. พลาสติกถูกทำให้ร้อนขึ้น ทำให้ขยายตัวจนปริมาตรเพิ่มขึ้น VH

สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว (Coefficient of heat expansion) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่

1.1

$$\left(\frac{VH - V}{V} \right) \times 100\% \quad (1.1)$$

4. พลาสติกหลอมเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงในภาชนะ
5. พลาสติกหลอมเหลวจะหดตัว การหดตัวจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิห้อง ถ้าพลาสติกที่กำลังเย็นตัวถูกปลดออกจากภาชนะก่อนการแข็งตัว จะทำให้การหดตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายนอกภาชนะจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

6. พลาสติกในสถานะของแข็งอยู่ในภาชนะ ปริมาตร V
7. พลาสติกมีความสามารถหดตัวได้ เมื่อถูกความดันกระทำ จะทำให้พลาสติกหดตัว

VC

8. เมื่อเอาความดันออก ปริมาตรจะกลับสู่ดั้งเดิม ปริมาตร V
9. เมื่อถูกทำให้ร้อนและขยายตัวภายใต้ความดัน
10. เมื่อพลาสติกเย็นตัวลงในภาชนะภายใต้ความดัน ซึ่งอาจเป็นความดันที่ใช้กระบวนการเติมเต็มหรือการฉีดอัด พลาสติกจะหดตัว

บทสรุป

1. อุณหภูมิ ควรมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิปลดชิ้นงานและอุณหภูมิห้อง จะทำให้การหดตัวน้อยลง

2. ความดัน ถ้าความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีดอัดมีค่าสูงการหดตัวจะน้อย กลับกันถ้าความดันต่ำจะให้การหดตัวสูง

3. เวลาที่ใช้ในการฉีดที่นาน ทำให้การหดตัวน้อยลง

4. คุณสมบัติของพลาสติก พลาสติกแต่ละชนิดค่าการหดตัวไม่เท่ากัน จากที่ได้กล่าวมานั้น สามารถทำนายการหดตัวของพลาสติกได้โดย การใช้วิธีการจำลองทางไฟไนท์อีลิเมนต์ ซึ่งพบว่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังที่กล่าวมาข้างต้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 กำหนดชนิดทางเข้าได้แก่ ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ที่แต่ละชนิดมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

1.4.2 เป็นการศึกษาวิจัยโดยใช้กรณีตัวอย่างเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วฉีดและเวลาที่ใช้ในการฉีด ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมหดตัวของพลาสติก

1.4.3 เม็ดพลาสติกที่ใช้ทดลองเป็นชนิดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง High-Density-Polyethylene (HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด MARLAX HXM 50100

1.4.4 เป็นการศึกษาวิจัยระหว่างตัวแปรความดันและเวลาที่ส่งผลกระทบต่อของการหดตัวของชิ้นส่วนพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D955-08

1.4.5 เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองการฉีดชิ้นงานจริง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการฉีดพลาสติก

1.5.2 ศึกษาหลักการทฤษฎีพื้นฐานและสภาวะเงื่อนไขของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมาณค่าการหดตัว

1.5.3 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

1.5.4 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมทางด้าน CAD (Computer Aided Design) คือ Program Solid work 2010 เพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างแบบโมเดลในการทดลอง

1.5.4.1 ทำการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D955-08

1.5.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมทางด้าน CAE (Computer Aided Engineer) โดย Program Moldex3D R10. เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมในการฉีดพลาสติกในการประมาณค่าการหดตัวของชิ้นงานฉีด

1.5.5.1 ทำการวิเคราะห์ปัญหาการฉีดพลาสติกด้วย Program Moldex3D R10

1.5.6 การทดลองและเก็บผล และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

1.5.7 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ของการวิจัย

1.6.1 เป็นแนวทางในการพัฒนาในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดได้

1.6.2 นำผลการทดลองไปเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ปัญหาการหดตัวได้

1.6.3 นำข้อมูลจากการทดลองไปพัฒนางานฉีดพลาสติกต่อไป

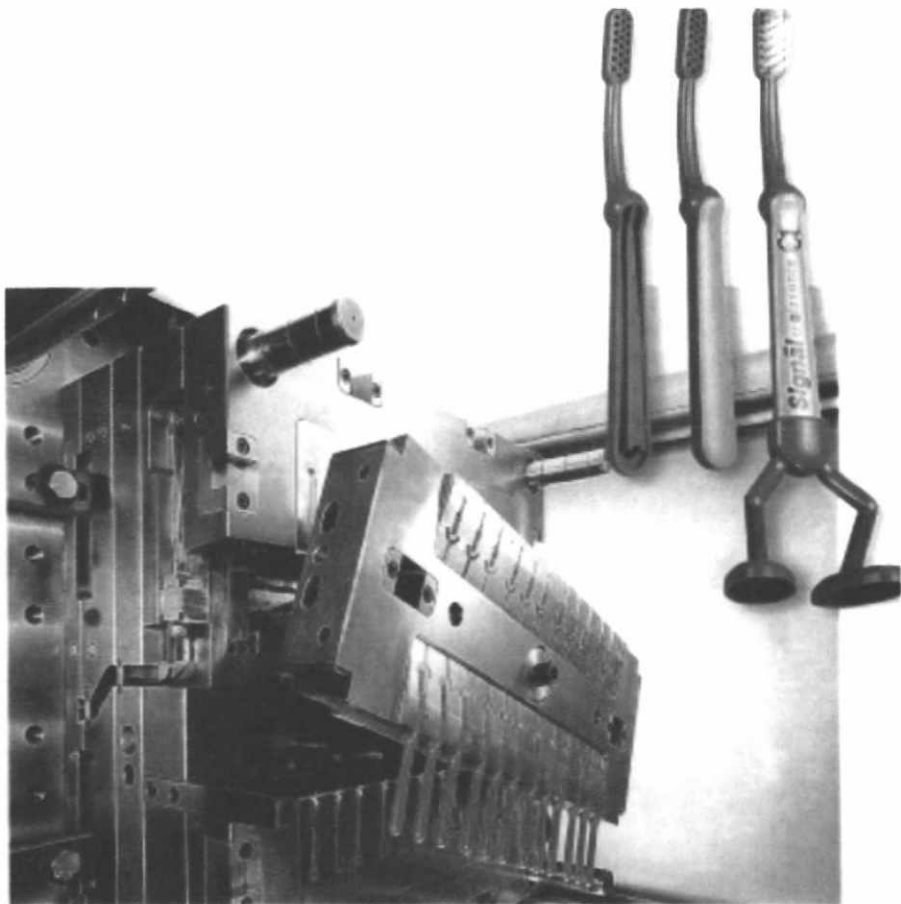
1.6.4 สามารถนำโปรแกรม Moldex3D มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในงานฉีดพลาสติก

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ถูกนำมาใช้แทนที่ผลิตภัณฑ์โลหะ แก้ว กระดาษ ยาง และไม้กันอย่างแพร่หลาย ในการผลิตชิ้นงานที่ทำด้วยพลาสติกจำนวนมากขึ้น (Mass product) จะอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่าแม่พิมพ์ (Mould) ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบกับเครื่องจักรที่ช่วยในการผลิตที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานฉีด เช่น แก้วน้ำ กรอบโทรศัพท์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ฯลฯ [1] โดยขนาดและคุณภาพของชิ้นงานฉีดที่ได้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบแม่พิมพ์ที่ถูกต้อง และการปรับตั้งพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดชิ้นงานพลาสติกที่เหมาะสม เป็นต้น [5] เพื่อช่วยให้ชิ้นงานฉีดมีคุณภาพที่ดีเหมาะสมในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.1 แม่พิมพ์ที่ใช้ในผลิตชิ้นงานฉีด [19]

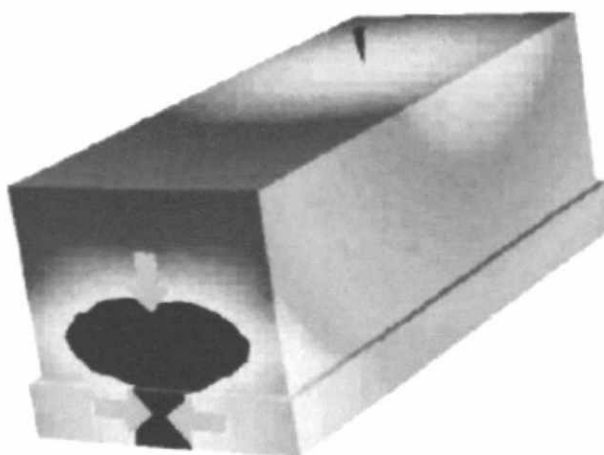
2.2 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติก

วิวัฒนาการในการใช้โปรแกรมจำลองพฤติกรรมในกระบวนการฉีดพลาสติก ในปัจจุบันเทคนิคการใช้การจำลองทางไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element analysis) เป็นวิธีหนึ่งที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และมีความรวดเร็ว จึงมีการนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมในกระบวนการขึ้นรูปของโพลีเมอร์ [18] ที่มีความถูกต้อง รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการฉีดขึ้นงานพลาสติก โดยมีวิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติกดังนี้

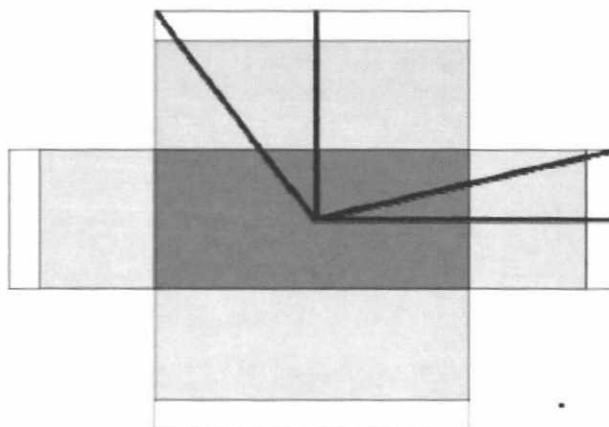
2.2.1 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติกในยุคปี 90 [5]

2.2.1.1 Moldflow

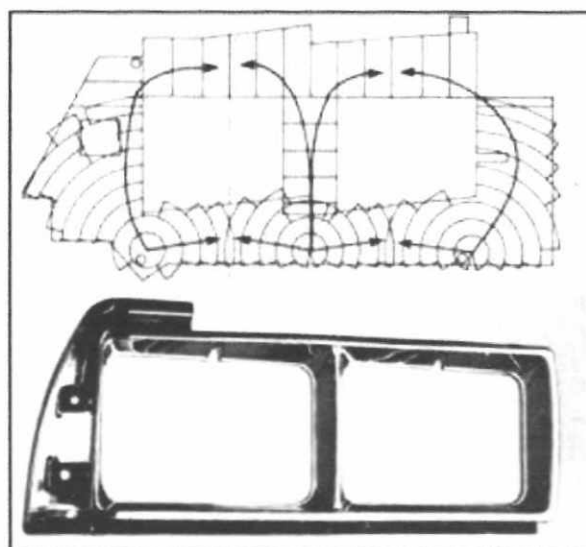
ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยเกิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศออสเตรเลีย ที่ Colin Austin ในปี 1978 โดย Kamal และ kenig [6] ที่เป็นชื่อทางการค้าที่รู้จักในปัจจุบันคือ Moldflow ที่รู้จักในปี 1980 โดย Moldflow เป็นบริษัทที่เริ่มต้นที่พัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมในกระบวนการฉีดพลาสติก ที่ได้ในการพัฒนาชิ้นงานฉีดพลาสติกและระบบทางวิ่งร้อน (Runner system) โดยใช้วิธี Layflat เป็นการจำลองโดยลดปัญหาจาก 3D จากตัวอย่างรูปที่ 2.2 ที่แสดงให้เห็นถึงฟองอากาศที่ตกค้างที่ขอบของชิ้นงาน และรูป 2.3 ที่แสดง Layflat ที่ผลการวิเคราะห์พบว่าการลดลงของความดัน เนื่องจากสูญเสียอุณหภูมิจากความหนาของชิ้นงาน แต่วิธี Layflat เป็นวิธีที่เหมาะสมกับชิ้นงานรูปร่างง่าย ไม่ซับซ้อน เนื่องจากรูปร่างที่ซับซ้อนวิธี Layflat จะทำให้เกิดการทับซ้อนกัน ตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ดังรูปที่ 2.4 ที่แสดงการทับซ้อนของชิ้นงานบางจุดทำให้วิธี Layflat เกิดการทับซ้อนและทำให้เกิดการฉีดพลาดในที่สุด



รูปที่ 2.2 การจำลองการไหลที่ขอบของชิ้นงานกล่องที่มีฟองอากาศบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง[5]



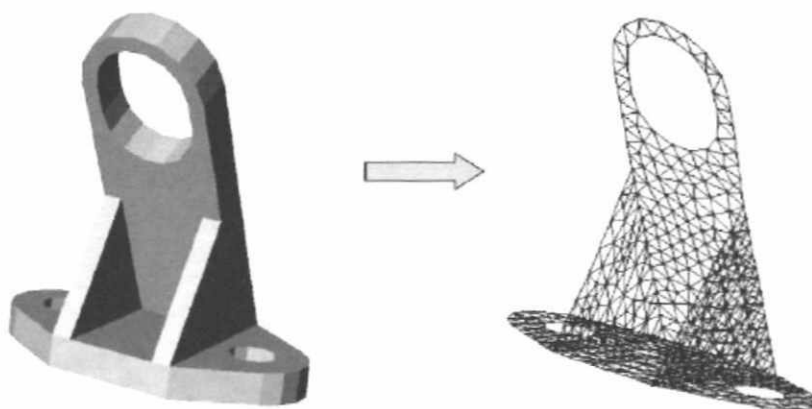
รูปที่ 2.3 รูป Layflat ที่ทำการคลี่กล่องออกในแนวระนาบ [5]



รูปที่ 2.4 ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้วิธี Layflat ที่ทำการคลี่ออกในแนวระนาบ [5]

2.2.1.2 SDRC

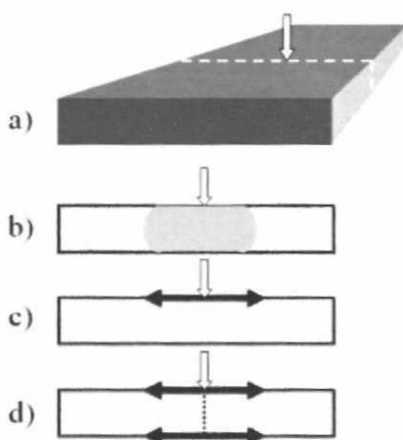
ในปี 1980 SDRC ได้เผยแพร่และร่วมพัฒนาโปรแกรม Moldflow ที่สามารถวิเคราะห์การไหลและการวิเคราะห์การหล่อเย็นในแม่พิมพ์ และการบิดงอ (Warpage) ในชิ้นงานฉีด โดยใช้รากฐานในการวิเคราะห์จาก 2.5D midplane ที่รวมการคำนวณความเค้นตกค้างเพื่อทำนายการบิดงอ โดยแสดงในรูปที่ 2.5 [22]



รูปที่ 2.5 รูปชิ้นงาน 3D (ซ้าย) และรูปชิ้นงาน 2.5D midplane (ขวา) [5]

2.2.1.3 AC Technology/C-MOLD

ในระหว่างช่วงปี 90 AC Technology ได้เปลี่ยนชื่อเป็น C-MOLD ได้พัฒนา การฉีดยา การฉีดอัด และการหล่อเย็น บริษัท C-MOLD เริ่มเพิ่มการคำนวณความเค้นตกค้างใน C-PACK/WIN ในปี 1991 [23-26] และแสดงผลความเค้นตกค้าง การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างในกระบวนการฉีดอัดและในผลการวิเคราะห์การหล่อเย็น ที่คำนวณความเค้นตกค้างที่มีผลในช่วงการฉีดอัด และสามารถวิเคราะห์รูปร่างหลังการปลดชิ้นงานได้ ในปี 1992 C-MOLD ที่รู้จักในชื่อ C-STRESS และวิเคราะห์การบิดงอจากความเค้นตกค้างที่ขยายในชื่อ C-PACK/W โดยได้รับการตอบรับที่ดีของผู้ใช้งาน และหลังจากนั้นในปี 1998 ได้ออกวางจำหน่ายชื่อ 3D Quick ที่ใช้เทคนิค dual domain ในการจำลองการฉีด ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปชิ้นงานฉีดที่ใช้เทคนิค Dual domain [5]

2.2.1.4 Simcon

Simcon ได้พัฒนาต่อเนื่องจากโปรแกรม 2.5D รวมเข้ากับการบิดงอ ในปี 1998 Simcon ได้พัฒนาการสร้าง Mesh อย่างรวดเร็ว โดยสร้าง Mesh ภายนอกรูปร่างแบบ 3D ที่รวมเทคนิค Moldflow กับ C-MOLD เอาไว้ด้วยกัน ที่พัฒนาจากรากฐานจากวิธี 2.5D ที่รู้จักในชื่อ Cadmould Pro.

2.2.1.5 Sigma Engineering

Sigma Engineering จากบริษัท IKV Aachen เป็นการรวมกันของ Simcon กับ MAGMA GmbH. MAGMA ได้พัฒนาการจำลองแบบ 3D MAGMASOFT ในปี 1998 Sigma ได้สร้างการจำลองแบบ 3D ที่รวมเอาเทคนิคต่างๆ ในกระบวนการฉีด และได้พัฒนาการแบ่ง mesh เป็นส่วนๆ ในการทดลองที่เพิ่มสมการ Finite differences ที่รวมเอาแรงโน้มถ่วง และผิว ด้านหน้าการไหลที่สามารถทำนาย การเกิดรอยฉีกได้ ที่เป็นพื้นฐานในการฉีดเต็มแบบขึ้นงาน

2.2.1.6 Transvalor

Transvalor เป็นธุรกิจของ CEMEF ที่เป็นธุรกิจที่ต้องการขาย และ สนับสนุนซอฟต์แวร์ที่พัฒนาจาก CEMEF ในปี 1990 ได้วางจำหน่ายในชื่อ Rem3D ที่เป็นการจำลอง แบบ 3D เหมือนกับ Sigma Engineering

2.2.1.7 CoreTech Systems

จากรายงานของรัฐบาลไต้หวัน และมหาวิทยาลัย Tsing-Hua (NTHU) ไต้หวัน ได้ค้นคว้าการฉีดพลาสติกตั้งแต่ปี 1989-1999 จึงทำให้เกิดการสร้างขึ้นของบริษัท CoreTech Systems Co. Ltd, ในปี 1995 [27] โดยใช้ชื่อว่า Moldex โดยเริ่มต้นจากเทคนิค 2.5D midplane ในการจำลองการไหลของพลาสติกฉีด

2.2.2 วิวัฒนาการในการจำลองการฉีดพลาสติกในปี 2000 [5]

ในยุคสมัยที่อุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญขึ้นส่วนภายในแม่พิมพ์ ในพื้นฐานที่สร้างระบบที่เป็นไปได้ของแม่พิมพ์ ที่ทำให้เกิดการพัฒนา Insert ภายในแม่พิมพ์ที่เหนือกว่าแม่พิมพ์ทั่วไป และ ต่อมาได้มีการออกแบบที่มีการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า และเทคโนโลยีการวิเคราะห์ แบบ 3D ที่เป็นประโยชน์ต่อการผลิตมาก โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน (Complex geometry) ที่สามารถอธิบายผลกระทบของปัญหาได้ยาก โดยที่ราคาของซอฟต์แวร์การจำลองมี ราคาที่ลดลงโดยแบ่งตามระดับการใช้งานของผู้ใช้

2.2.2.1 Moldflow

บริษัท Moldflow ได้ว่าจ้างนักวิจัยจาก C-MOLD ในการพัฒนา อันดับแรกคือการเอาเทคโนโลยี Moldflow รวมเข้ากับ C-MOLD ที่ปรับปรุงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ของ midplane dual domain และระบบวิเคราะห์แบบ 3D

ที่เป็นการพัฒนาเป็นอย่างมากของระบบวิเคราะห์แบบ 3D คือการริเริ่ม ของการวิเคราะห์ การบดงอในระบบวิเคราะห์แบบ 3D [28] ที่นำเอาระบบวิเคราะห์แบบ 3D มา วิเคราะห์การบดงอที่รวมค่าคุณสมบัติเชิงกลเข้าไว้ในการคำนวณพฤติกรรมและการกระจายตัวของ ไฟเบอร์

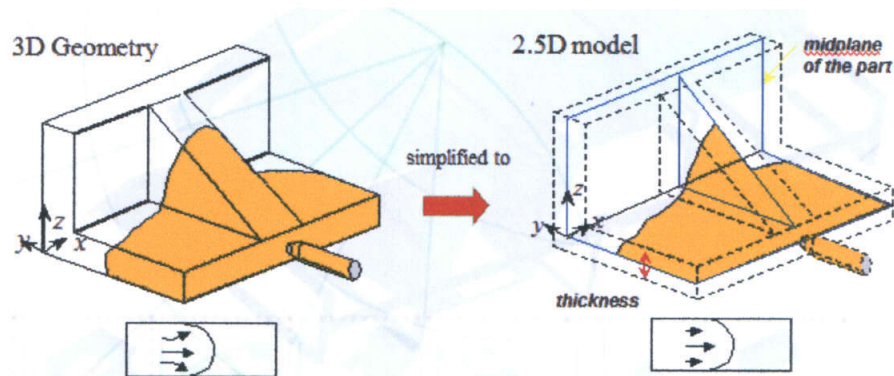
2.2.2.2 Timon

Timon ได้พัฒนาภายใต้แนวคิดระบบวิเคราะห์แบบ 3D อย่างต่อเนื่อง Timon ได้พัฒนาการวิเคราะห์แบบผสม [29] ที่ใช้วิธีการสร้าง Mesh ในการทำนายพฤติกรรมใน การฉีดพลาสติก โดยมีเป้าหมายแรกคือการทำนายคุณสมบัติในการออกแบบเลนส์

2.2.2.3 CoreTech Systems

CoreTech Systems ได้ใช้วิธี Finite volume ที่พัฒนาโดย Chang และ Yang [7] CoreTech ได้สร้างระบบวิเคราะห์แบบ 3D ในปี 2001 ในนาม Moldex3D/Solid และได้รวมวิธีการจำลองทาง Finite Element Method (FEM) กับการจำลองทาง Finite

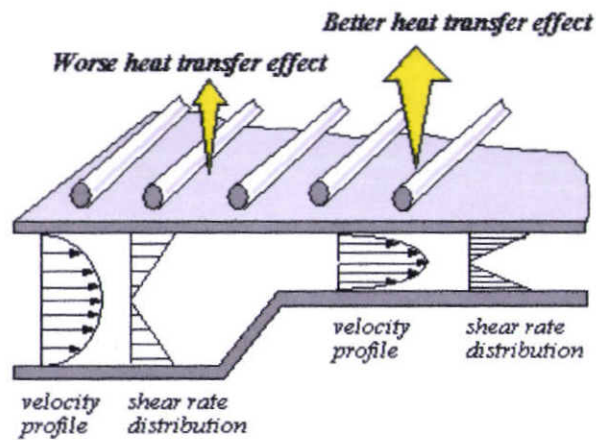
Volume Method (FVM) เข้าไว้ด้วยกันที่สามารถทำนายรูปร่างภายหลังกระบวนการฉีดได้ โดยใช้วิธีการสร้าง Mesh สามเหลี่ยมในการจำลองตามรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ เช่น การสร้าง Mesh ให้ใกล้ผนังของแม่พิมพ์ (Mold wall) ที่เป็นการปรับปรุงการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer) บริเวณใกล้กับผนังแม่พิมพ์ ที่ทำให้เข้าใจได้ง่ายในขั้นตอนการฉีด ตำแหน่งที่เกิดการแข็งตัวในระหว่างกระบวนการฉีดทำได้อย่างแม่นยำ Moldex3D/Solid มีการวิเคราะห์ที่ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการการฉีด ขั้นตอนการการฉีดเย็น การหล่อเย็น และการหดตัวและการบิดงอ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการไหลของชิ้นงาน 3D (ซ้าย) และชิ้นงาน 2.5D midplane (ขวา) [1]

2.3 ขั้นตอนกระบวนการในการฉีดพลาสติก

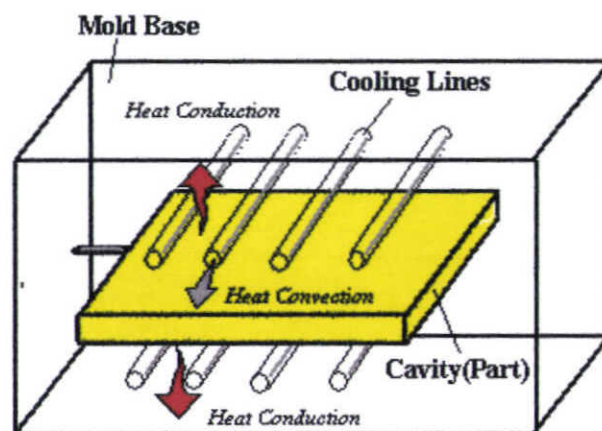
ขั้นตอนที่หนึ่ง ในกระบวนการฉีดพลาสติก กระบวนการฉีด (Filling stage) เป็นขั้นตอนแรกในการเติมเต็มโพรงแบบ โดยทางวิ่ง และความหนืดส่งผลในการไหลของพลาสติก โดยที่ความหนืดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลของพลาสติกเหลว และยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความหนืดอีกเช่น อุณหภูมิ อัตราการถ่ายเทความร้อน อัตราเฉือน และความหนาของชิ้นงานเป็นต้น [30] โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อขั้นตอนในกระบวนการฉีด โดยที่ความหนาของชิ้นงานฉีดเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ดังรูปที่ 2.8 ที่แสดงแรงต้านการไหลที่น้อยต่อการไหลเมื่อชิ้นงานฉีดมีความหนามาก และเมื่อความหนาชิ้นงานฉีดน้อยจะทำให้มีแรงต้านการไหลมากที่เวลาเดียวกันของชิ้นงานฉีด [7], [10] โดย Jansen (1998)



รูปที่ 2.8 ความแตกต่างของความหนาของชั้นงานฉีดที่ส่งผลต่อกระบวนการฉีด [1]

ขั้นตอนที่สอง กระบวนการฉีดย่ำ (Packing stage) เป็นกระบวนการภายหลังจากการเติมเต็มโพรงแบบไปแล้วประมาณ 95-99% เพื่อรักษาความดันไว้เพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติก หลังจากกระบวนการฉีด โดยที่กระบวนการฉีดย่ำจะทำการรักษาความดันไว้จนกระทั่งทางเข้าจะแข็งตัว (Gates freeze-off) เพื่อชดเชยการหดตัวอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน และไม่ทำให้พลาสติกหลอมเหลวไหลย้อนกลับออกจากโพรงแบบ ซึ่งเป็นสาเหตุของการยุบตัว (Sink mark) เนื่องจากการหดตัวของพลาสติกเหลวที่เย็นตัว การฉีดย่ำจะใช้ความดันประมาณ 50-80% ของความดันฉีด โดยปัจจัยความดัน มีผลมากต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก [6], [8-11], [13]

ขั้นตอนที่สาม กระบวนการหล่อเย็น เป็นกระบวนการหลังการกระบวนการฉีดย่ำ โดยอุณหภูมิของพลาสติกในแม่พิมพ์จะลดลงพร้อมกับปริมาตรจำเพาะที่ลดลง ในการหล่อเย็นของกระบวนการฉีดพลาสติกนั้น จะต้องทำการออกแบบช่องของระบบหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพที่สามารถลดเวลาในการผลิตลงได้ [31] ระบบหล่อเย็นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด เช่นการบิดงอ [30] และการหดตัวที่ไม่ปกติของชิ้นงานฉีด (Non-uniform shrinkage) ระบบหล่อเย็นเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการนำพาความร้อนออกจากโมลจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิลดชิ้นงานดังรูปที่ 2.9 [31-32]

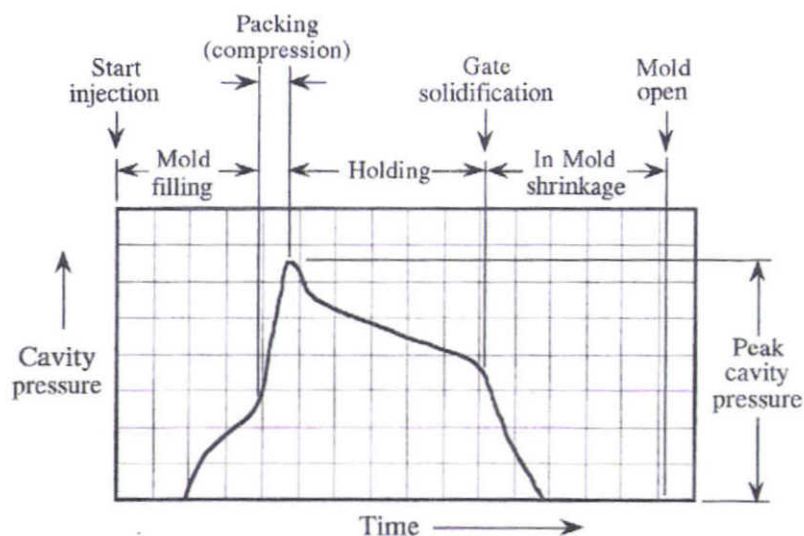


รูปที่ 2.9 การออกแบบระบบหล่อเย็น [1]

2.3.1 การหดตัวของชิ้นงานพลาสติกฉีด [33]

การหดตัวเป็นปัญหาที่ยากต่อการพิจารณาและการแก้ไข ชิ้นงานพลาสติกฉีดถูกกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนตามลักษณะการใช้งานของชิ้นงานฉีด โดยในการสร้างชิ้นงานฉีดพลาสติกส่วนใหญ่จะต้องนำชิ้นส่วนต่างๆ นำมาประกอบกันโดยจึงจะต้องมีมิติของชิ้นงานฉีดที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ เพราะฉะนั้นการหดตัวของชิ้นงานฉีดจึงมีความสำคัญมาก และเมื่อสามารถทำนายลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมหดตัวได้ก็สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและการแก้ไขในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดได้ [34]

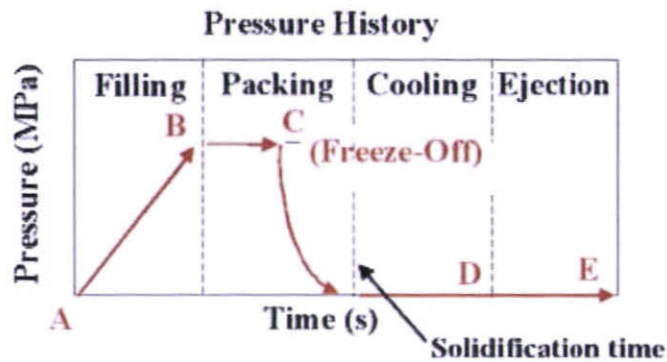
จากรูปที่ 2.10 กระบวนการฉีดพลาสติกนั้นพลาสติกหลอมเหลวจะถูกอัดในกระบวนการฉีดที่กำหนดโดยรูปร่างของโพรงแบบ ในกระบวนการฉีดอัดจะทำการป้อนพลาสติกหลอมจนเต็มโพรงแบบและฉีดอัดโดยรักษาแรงดันจนกว่าทางเข้าจะเย็นตัวลง ซึ่งหลังจากนั้นชิ้นงานพลาสติกจะเกิดการหดตัวภายในแม่พิมพ์ (In Mold shrinkage) จนกระทั่งปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ [8-11], [35]



รูปที่ 2.10 ความดันในกระบวนการฉีดพลาสติก [33]

2.3.1.1 การใช้ PVT ในการประมาณค่าการหดตัว

การใช้ PVT ในการประมาณค่าการหดตัวโดยแสดงกราฟความดันภายในโพรงแบบของโมลที่แสดงถึงความดันแต่ละช่วงในกระบวนการฉีดพลาสติก [8-12] ได้แก่ การเติมเต็ม (Filling) การฉีดอัด (Packing) การหล่อเย็น (Cooling) และการปลดชิ้นงาน (Part ejection) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้



Calculation based on amount of material in mold at freeze-off.

รูปที่ 2.11 ความดันแต่ละช่วงเวลาในกระบวนการฉีด [1]

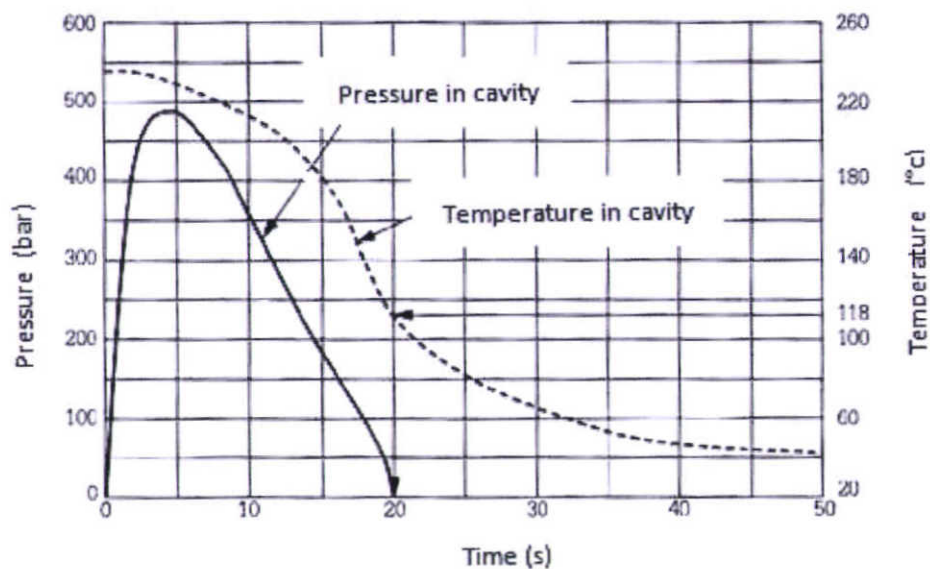
จากรูปที่ 2.11 เป็นค่าความดันแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการฉีดพลาสติกใน PVT diagram ที่ตำแหน่ง C เป็นจุดที่ทางเข้าปิด (Gate freeze-off) ทำให้หยุดกระบวนการเติมเต็มของเนื้อพลาสติกโดย [36] และ [2] Jansen, Pantani และ Titomanlio ได้ศึกษาการวัดการหดตัวของชิ้นงานฉีดโพลิสไตรีน พบว่า ความดันและเวลาในการฉีดย้ำ (Holding time) และทิศทางไหลมีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานพลาสติก โดยที่ความดันส่งผลมากที่สุดต่อการหดตัว และจุด E เป็นกระบวนการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากรูปพบว่าในการวัดการหดตัวนั้นเป็นการการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับความดันในกระบวนการฉีดแต่ละช่วงที่สัมพันธ์กับ PVT ไดอะแกรม [37]

2.3.1.2 ความสัมพันธ์ของ PVT ไดอะแกรม [33]

เนื่องจากปริมาตรจำเพาะหรือความหนาแน่นของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันซึ่งสามารถคำนวณ และหาค่าได้จากสมการความสัมพันธ์ของ PVT ไดอะแกรม ที่หาได้จากการทดลอง และสามารถคำนวณค่าปริมาตรจำเพาะหรือความหนาแน่นได้ทุกค่าที่กำหนดอุณหภูมิและความดัน และยังสามารถวัดอัตราการเปลี่ยนแปลง PVT ไดอะแกรม ของพลาสติก ได้โดยการทดลอง [8-11]

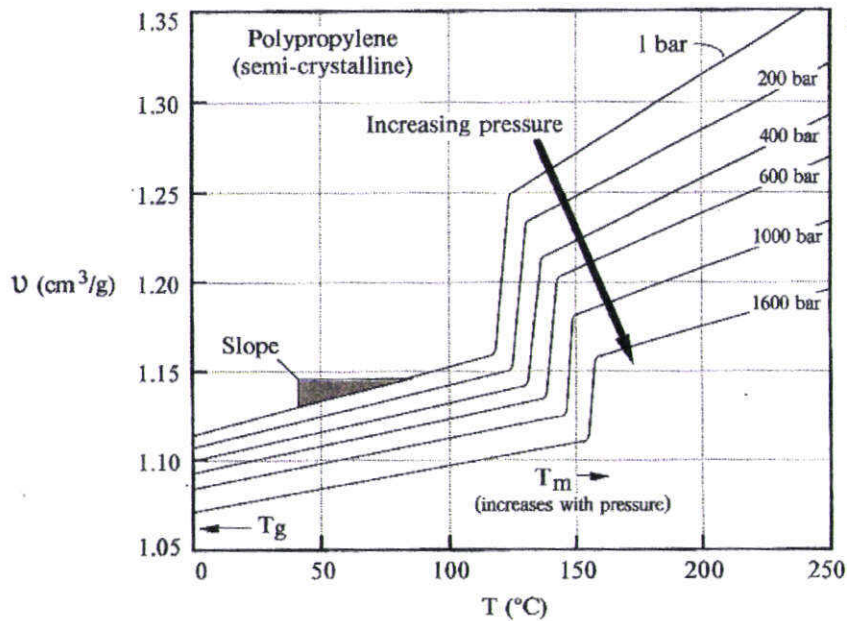
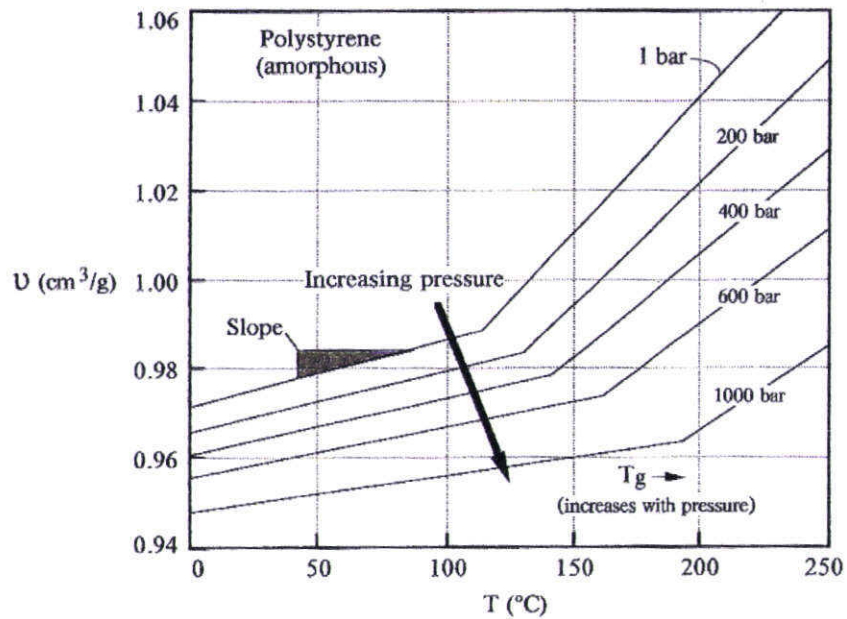
2.3.1.3 PVT ไดอะแกรม กับพฤติกรรมของโพลิเมอร์ [33]

วัสดุพลาสติกต้องการสัมพันธ์กับความร้อนและความดันจากภายนอกที่จะส่งผลโดยตรงกับปริมาตรในการเติมเต็ม โดยผลเหล่านี้สามารถศึกษาและทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ ตั้งแต่พลาสติกเหลวจนกระทั่งถูกปลดออกจากแม่พิมพ์ และเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องได้ง่ายขึ้นโดยใช้ PVT ไดอะแกรม ช่วยในการอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกับชิ้นงานพลาสติกฉีด โดยสังเกตจุดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของกราฟความดันในแม่พิมพ์ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของกราฟอุณหภูมิของพลาสติกในแม่พิมพ์ด้วย [8-11] จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตลงบน PVT ไดอะแกรม เพื่อดูค่าปริมาตรจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงไป และวิเคราะห์ความเป็นไปของพลาสติกในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



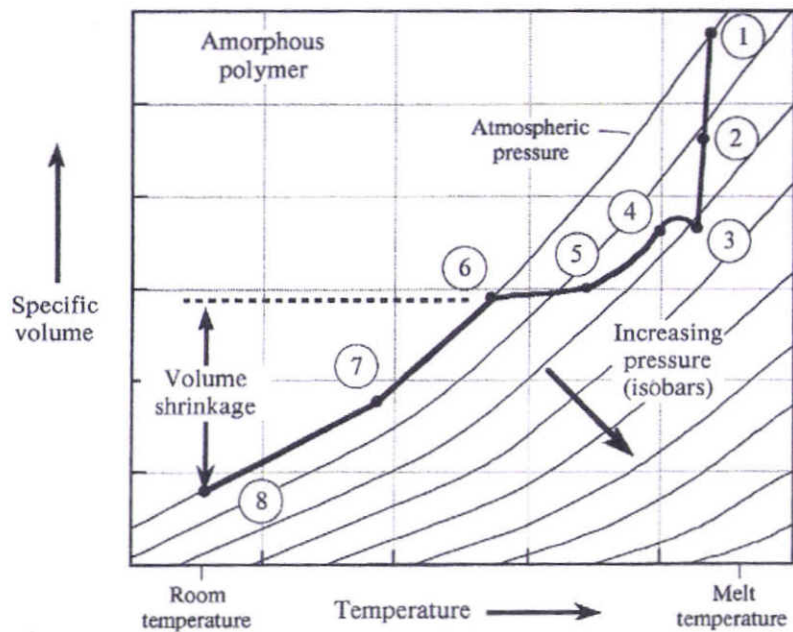
รูปที่ 2.12 ความดันและอุณหภูมิของพลาสติกในแม่พิมพ์

จากรูปที่ 2.13 กราฟ PVT ไดอะแกรม แสดงวัสดุพลาสติกภายใต้ความดันตั้งแต่
 อุณหภูมิห้องจนถึงความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีด จากรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของกราฟ PVT
 ไดอะแกรม ของโพลิเมอร์ชนิด Semi-crystalline และโพลิเมอร์ชนิด Amorphous



รูปที่ 2.13 PVT ไดอะแกรม แสดงวัสดุพลาสติกชนิด Amorphous และชนิด Semi-crystalline [33]

ในการหอดัชนีสามารถทำนายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตร และ อุณหภูมิของพลาสติกในแต่ละช่วงเวลาในการฉีด ที่แสดงได้จาก PVT ไดอะแกรมของพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงสามารถนำพฤติกรรมในช่วงเวลาต่างๆ ของขั้นตอนกระบวนการฉีด ของความดัน และอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.12 มาพล็อตลง PVT ของพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากความสัมพันธ์นี้สามารถทำนายการหดตัวของพลาสติกได้



รูปที่ 2.14 การใช้ P-v-T ไดอะแกรม ในการทำนายการหดตัว [33]

จากรูปที่ 2.4 อธิบายแต่ละช่วงในกระบวนการฉีดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของพลาสติกในแต่ละช่วงเวลาในการฉีด ดังต่อไปนี้

1. จุดเริ่มต้นของกระบวนการฉีด
- 1-2. ฉีดพลาสติกหลอมเข้าสู่โพรงแบบ
2. สิ้นสุดกระบวนการฉีด
- 2-3. ทำการฉีดย้ำ
3. จุดสูงสุดของการฉีดย้ำ
- 3-4. รักษาความดันเพื่อไม่ให้พลาสติกหลอมไหลย้อนกลับ (Switch-over)
4. รักษาแรงดัน
- 4-5. ความดันลดลงเนื่องจากเกิดการแข็งตัวของผนังมากขึ้น
5. ทางเข้าแข็งตัว (พลาสติกหลอมไม่สามารถเติมโพรงแบบได้)
- 5-6. ความดันลดลงชิ้นงานเริ่มเย็นตัว
6. ความดันภายในชิ้นงานเท่ากับความดันบรรยากาศ (ขนาดชิ้นงานเท่ากับขนาดของโพรงแบบ)
- 6-7. ทำการหล่อเย็นชิ้นงาน
7. เปิดโมลนำชิ้นงานออกจากโพรงแบบ
- 7-8. ปลดปล่อยให้เย็นตัวตามอุณหภูมิห้อง
8. ชิ้นงานสุดท้าย

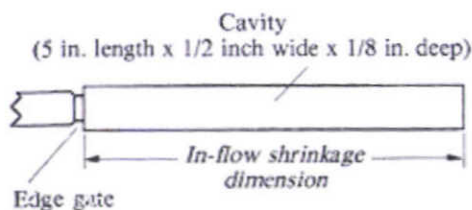
โดยสามารถสรุปได้ว่า การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ 6 - 8 ซึ่งเป็นการหดตัวในการทำงานหรือการหดตัวในแม่พิมพ์ ดังนั้นจึงสามารถหาการหดตัวของพลาสติกฉีดได้จากสมการ ที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 ดังต่อไปนี้

$$\text{Volume Shrinkage } (S_v) = \frac{VW - VF}{VW} = 1 - \frac{VF}{VW} \quad (2.1)$$

$$\text{Shrinkage } (S) = 1 - \frac{LF}{LW} \quad (2.2)$$

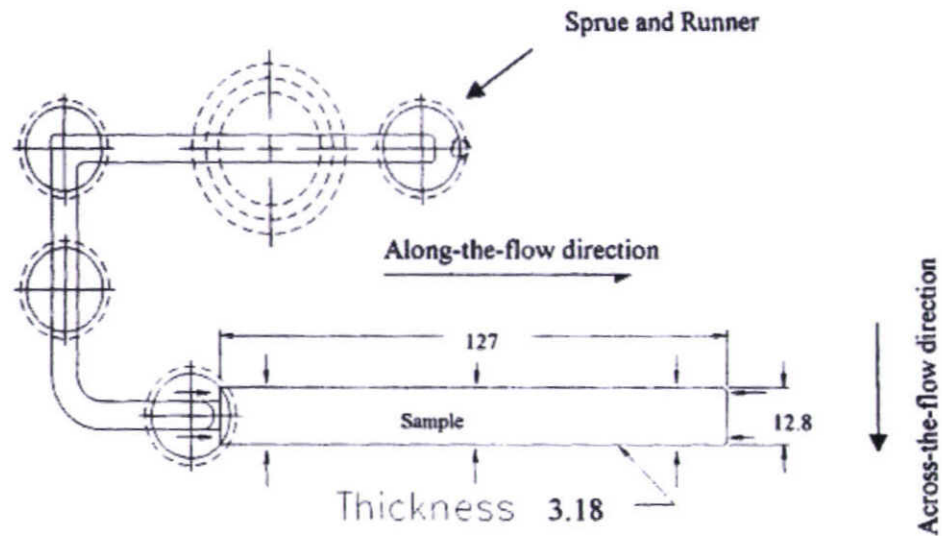
- เมื่อ
- S_v = การหดตัวตามปริมาตร
 - S = การหดตัวตามแนวระยะใดๆ
 - VF = ปริมาตรของชิ้นงาน
 - VW = ปริมาตรของแม่พิมพ์
 - LF = ขนาดความยาวของชิ้นงาน
 - LW = ขนาดความยาวของแม่พิมพ์

การหดตัวของชิ้นงานวัดจากการทดสอบจากการฉีดชิ้นงานจริงที่เปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานฉีดกับขนาดของโพรงแบบที่แตกต่างกัน โดยสามารถหาการหดตัวได้ในหน่วย (Inch/Inch), (mm/mm) หรือเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัว โดยมาตรฐานในการทดสอบการหดตัวนั้นมีรูปร่างตามดังแสดงในรูปที่ 2.15 ในการทดสอบการหดตัวในทิศทางการไหลจะมีการหดตัวและมีค่าความเค้นตกค้างมากกว่าในทิศทางตั้งฉากการไหล [27], [36]



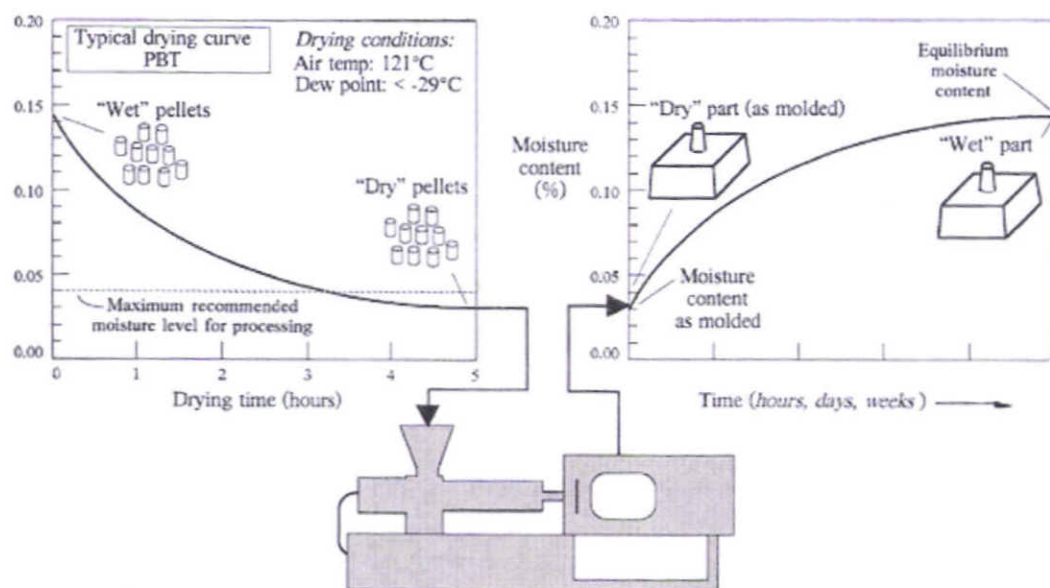
รูปที่ 2.15 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955-08 [33]

Chang (2001) [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการหดตัวและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีด โดย ใช้โมเดลตามมาตรฐาน ASTM D955-08 ในการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยผลที่ได้พบว่า ความดันฉีดต่ำ เวลาหล่อเย็น และเวลาในการฉีดต่ำมากส่งผลให้เกิดการหดตัวน้อย ส่วนอุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีด อุณหภูมิหลอมมากจะส่งผลให้เกิดการหดตัวมากขึ้น ในการทดลองนี้ พบว่าการหดตัวในทิศทางการไหลมีการหดตัวมากที่สุดทุกเงื่อนไขการทดลอง



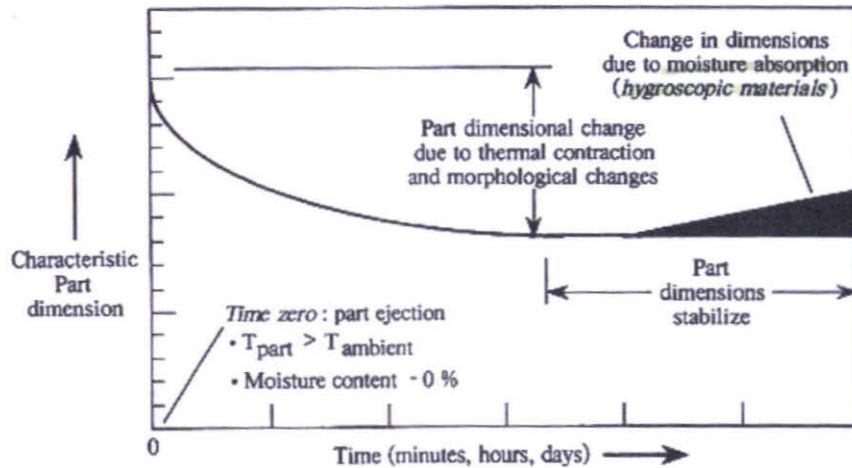
รูปที่ 2.16 โมเดลการทดสอบการหดตัว Chang (2003)

จากการทดสอบตามมาตรฐานสามารถวัดค่าการหดตัวได้ โดยปกติการหดตัวจะเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการฉีดเสร็จสิ้นที่ 48 ชั่วโมงแล้วทำการวัดค่าการหดตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกชนิด Semi-crystalline สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ที่สามารถเกิดการหดตัวได้ทีอาจเป็น ชั่วโมง หรือเป็นวัน โดยขึ้นอยู่กับการดูดซึมความชื้นของชิ้นงาน [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของความชื้นที่มีผลต่อโครงสร้างของชิ้นงานฉีด [7]

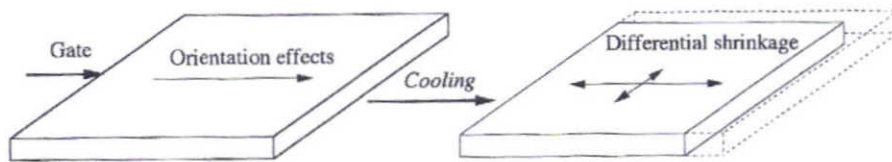
ในการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานฉีดของพลาสติกชนิด Semi-crystalline สามารถหดตัวได้หลังปลดออกจากแม่พิมพ์ โดยการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ในส่วนของ amorphous และ crystallization ที่เกิดขึ้นจากการดูดซึมความชื้นของชิ้นงานภายหลังจากปลดชิ้นงานที่ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงานฉีด [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การหดตัวเนื่องจากความชื้นของชิ้นงานฉีด [33]

2.3.2 การหดตัวแบบ Anisotropic และการบิดงอ

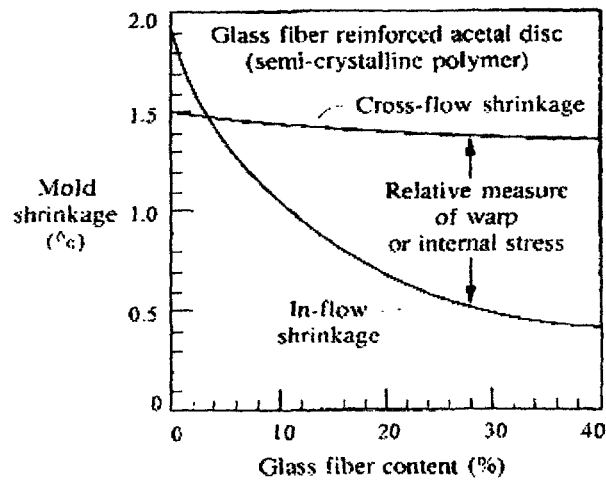
การหดตัวแบบ Anisotropic เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีด ในการทำนายขนาดชิ้นงานฉีด ความเค้นภายใน และการบิดงอเนื่องจากความเค้นภายในชิ้นงาน โดยปัจจุบันสามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในการหาค่าที่ดีที่สุดในการออกแบบชิ้นงานฉีด และค่าที่ดีที่สุดในการหดตัวและการบิดงอได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวที่ไม่ปกติของชิ้นงานฉีด ที่มีปัจจัยดังต่อไปนี้ 1.การถ่ายเทความร้อนที่ไม่เท่ากันของชิ้นงานฉีด 2. การหดตัวแบบไม่ปกติ 3. พฤติกรรมหดตัวของวัสดุในการไหลเป็นแบบ Anisotropic 4.ความเครียดเนื่องจากความร้อนที่กระทำต่อรูปร่างชิ้นงาน [1], [38-39] ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 พฤติกรรมหดตัวในทิศทางการไหลและทิศทางตั้งฉากการไหล [33]

2.3.3 การหดตัวโดยเติมสารเพิ่มความแข็งแรงของโพลิเมอร์

ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วจะทำการเติมไฟเบอร์ เพื่อที่ช่วยในการลดการหดตัวในกระบวนการฉีดของโพลิเมอร์ชนิด Amorphous หรือ Semi-crystalline โดยที่ไฟเบอร์จะไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของโพลิเมอร์ ที่สัมพันธ์กับการหดตัวในทิศทางการไหล (In-flow) กับการหดตัวในทิศทางตั้งฉากการไหล (Cross-flow) ดังรูปที่ 2.20 การเพิ่มไฟเบอร์จะส่งผลให้การหดตัวในทิศทางการไหลลดลงน้อยกว่าการหดตัวในทิศทางตั้งฉากการไหล [33]



รูปที่ 2.20 ความแตกต่างของการหดตัวของโพลิเมอร์ชนิด semi-crystalline ที่เติมไฟเบอร์ [33]

2.3.4 การประยุกต์ใช้ [1]

การหดตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ชนิดของวัสดุ (พลาสติก) วัสดุที่แตกต่างกันย่อมให้ค่าการขยายตัวและการหดตัวต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะทางเคมีและทางกายภาพเหมือนกันก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัว
2. รูปร่างของชิ้นงาน เช่น ความหนา รูปทรงของพื้นผิว ครีบกเสริมแรง และอื่นๆ
3. การออกแบบแม่พิมพ์ ผู้ออกแบบต้องรู้ค่าเมื่อหดตัวของพลาสติกที่ใช้ ระบบการหล่อเย็น ระบบรูปร่างและทางเข้า และการกระจายตัวของความร้อนในแม่พิมพ์
4. สภาพแวดล้อมของแม่พิมพ์ รวมถึงการวางตำแหน่งชิ้นงาน อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น ความชื้นของพลาสติก เวลาในการฉีด และความดันที่ใช้
5. สภาพะในการฉีด เช่น ความเร็วในการฉีด ความดัน เวลา อุณหภูมิ และประสิทธิภาพของเครื่องฉีด

2.3.4.1 ตัวแปรในการหดตัว

พลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดในโพรงแบบจนเต็ม โดยจะค่อยๆ เพิ่มความดันที่ใช้ จนคงที่และเป็นศูนย์ในที่สุด ขณะที่การหล่อเย็นเริ่มขึ้น พลาสติกจะสัมผัสกับผนังที่เย็นและปริมาตรจะลดลงพร้อมกับอุณหภูมิ

ภายหลังที่พลาสติกถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับการอัดตัวของความดันในโพรงแบบ นั่นคือผลกระทบหลักของการหดตัว ปกติความดันจะคงที่จนทางเข้า (Gate) แข็งตัวหรือทางเข้าเปิด หลังจากความดันลดลงพลาสติกจะเย็นตัวและหดตัว ดังนั้น

อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันในการฉีด และเวลาที่ทำให้ (Gate) แข็งตัว เป็นปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับการหดตัวและขนาดสุดท้ายของชิ้นงาน [8-11]

2.3.4.2 การปลดชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ถูกปลดออกโดยที่ชิ้นงานยังไม่ถึงอุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection temperature) จะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการเสีรูปและเสียหายได้ แต่การปลดชิ้นงานไม่จำเป็นต้องรอถึงอุณหภูมิห้องแต่ต้องให้ต่ำกว่าอุณหภูมิปลดชิ้นงาน เพื่อเป็นการลดเวลาในการฉีด

อย่างไรก็ตามความเย็นในชิ้นงานจะยังคงเก็บรักษาไว้ก่อนการปลดชิ้นงานออก และจะเย็นลงถึงอุณหภูมิของสารหล่อเย็นและอุณหภูมิห้อง ไม่เพียงแต่จะทำให้วงจรในการฉีดนานแล้ว ยังทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานอีกด้วยซึ่งทำให้ชิ้นงานเสียหาย เช่น กระทบแล้วแตก เกิดการบิดงอของชิ้นงาน หรือเกิดความเค้นที่มุมชิ้นงาน

2.3.4.3 เวลาในการหดตัว

วัสดุส่วนมากกว่า 90% ของการหดตัวจะใช้เวลาหลายชั่วโมง และอีก 10% จะเกิดการหดตัวภายในเวลา 10 วัน บางชนิดใช้เวลาหลายเดือน เนื่องจากการดูดซึมความชื้นของชิ้นงานภายหลังการปลดชิ้นงานที่ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงานฉีด

2.3.4.4 การอ่อนตัวของชิ้นงาน

การอ่อนตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้ลดและคลายความเค้นตกค้างในชิ้นงานได้เร็วขึ้น

2.3.4.5 ความหนาของชิ้นงาน

ความหนาจะมีผลกระทบกับการหดตัว โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เช่น PP, PE เป็นต้น ชิ้นการแข็งตัวจะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายใน บ่อยครั้งที่ชิ้นงานถูกปลดออกโดยขาดความแข็งแรง

ชิ้นงานที่เย็นตัวลงเมื่อสัมผัสกับอากาศภายนอก ขณะที่ภายในร้อนกว่าซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการลดความเค้นในชิ้นงาน

ชิ้นงานที่มีผนังหนาจะหดตัวมากกว่าชิ้นงานที่มีผนังบาง ข้อมูลส่วนใหญ่ของการหดตัวทำให้ทราบค่าการหดตัวโดยประมาณเป็นช่วง

สาเหตุของความแตกต่างของการหดตัวที่เกิดขึ้น เช่น ความหนาที่มากเกินไปของกล่องที่มีความหนาที่ขอบหรือที่ตัวชิ้นงาน บริเวณขอบและตัวชิ้นงานจะเย็นตัวลงเมื่อถูกปลดออก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเค้นในชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวของชิ้นงาน

การแก้ปัญหาคือควรออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนาเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการออกแบบจะนำมาซึ่ง การลดเวลาการหล่อเย็น ลดน้ำหนักชิ้นงาน เพิ่มผลผลิต และลดต้นทุนการผลิต

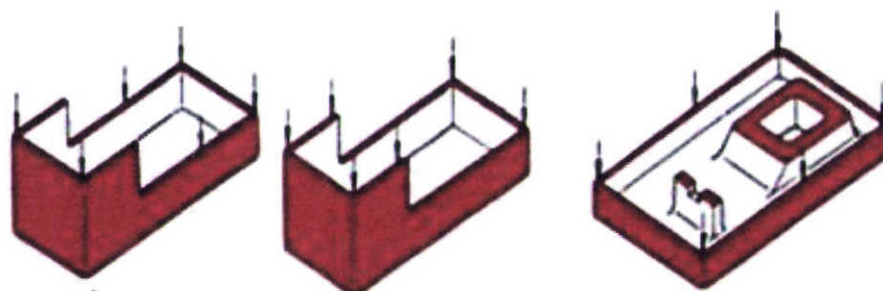
นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีผนังหนายังทำให้เกิดความเค้นสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการหดตัวและการยุบตัวมาก

2.3.4.6 ผลกระทบของการหดตัว

ปกติผู้ผลิตแม่พิมพ์จะไม่ทราบถึงผลกระทบของการเลือกค่าการหดตัว ผู้ออกแบบจึงต้องกำหนดให้ชัดเจนและสอบถามจากผู้ผลิตเม็ดพลาสติก เพราะการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อแม่พิมพ์

2.3.4.7 ผลกระทบเมื่อเปิดแม่พิมพ์

ในการออกแบบแม่พิมพ์ผนังด้านข้างที่บางกับมุมปลดชิ้นงานที่น้อยต้องใช้แรงในการปลดชิ้นงานมากเพราะแรงที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์คือแรงที่สามารถชนะสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพลาสติกและเหล็กได้ และการออกแบบที่ดีควรกระจายแรงดันในแม่พิมพ์แบบสม่ำเสมอและเวลาในการหล่อเย็นที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การออกแบบระบบปลดชิ้นงาน

2.3.4.8 การประมาณค่าการหดตัว

ตารางที่ 2.1 อัตราการหดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ[20]

ชนิดวัสดุ	อัตราการหดตัว mm/mm (นิ้ว/นิ้ว)	อัตราการหดตัว (%)
ABS		
high impact	0.005-0.007	0.5-0.7
heat resistant	0.004-0.005	0.4-0.5
medium impact	0.005	0.5
	0.020-0.035	2.0-3.5

ตารางที่ 2.1 อัตราการหดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ(ต่อ)

ชนิดวัสดุ	อัตราการหดตัว mm/mm (นิ้ว/นิ้ว)	อัตราการหดตัว (%)
Acetal		
Acrylic		
easy flow	0.020-0.035	0.2-0.7
general purpose	0.002-0.009	0.2-0.9
heat resistant	0.003-0.010	0.3-1.0
high impact	0.004-0.008	0.4-0.8
Cellulose acetate		
hard	0.002-0.005	0.2-0.5
medium	0.002-0.005	0.2-0.5
soft	0.002-0.005	0.2-0.5
high acetyl	0.002-0.005	0.2-0.5
Cellulose acetate butyrate	0.002-0.005	0.2-0.5
Cellulose propionate	0.002-0.005	0.2-0.5
Chlorinated polyether	0.004-0.008	0.4-0.8
Ethyl cellulose	0.005-0.010	0.5-1.0
Ethylene vinyl acetate	0.010-0.030	1.0-3.0
Fluorinated ethylene propylene copolymer	0.030-0.060	0.3-0.6
Lonomer	0.003-0.020	0.3-2.0
Nylon		
type 6-6	0.010-0.025	1.0-2.5
type 6	0.007-0.015	0.7-1.5
Nylon		
type 6-10	0.010-0.025	1.0-2.5
type 11	0.010-0.025	1.0-2.5
type 12	0.008-0.020	0.8-2.0
transparent (Trogamid T)	0.004-0.006	0.4-0.6
glass filled	0.005-0.010	0.5-1.0
Phenoxy	0.003-0.004	0.3-0.4
Poly 4-methyl-pantene 1	0.015-0.004	1.5-3.0
Polybutylene	0.020 (moulded)	2.0
	0.040 (aged)	4.0
Polycarbonate	0.005-0.007	0.5-0.7
Polychlorotrifluorethylene	0.010-0.020	1.0-2.0

ตารางที่ 2.1 อัตราการหดตัวของพลาสติกชนิดต่างๆ(ต่อ)

ชนิดวัสดุ	อัตราการหดตัว mm/mm (นิ้ว/นิ้ว)	อัตราการหดตัว (%)
Polyethylene		
low density	0.015-0.035	1.5-3.5
high density	0.015-0.030	1.5-3.0
Polyphenylene oxide	0.007-0.008	0.7-0.8
modified	0.005-0.007	0.5-0.7
Polypropylene	0.010-0.030	1.0-3.0
Polysulphone	0.008	0.8
Polytetrafluorethylene	0.050-0.100	5.0-10.0
Polyurthane elastomer	0.010	1.0
Polyvinyl chloride		
unplasticized	0.002-0.004	0.2-0.4
right	0.002-0.004	0.2-0.4
semi-right	0.005-0.025	0.5-2.5
flexible	0.015-0.030	1.5-3.0
Polyvinyl dichloride	0.003-0.007	0.3-0.7
Polyvinyl fluoride	0.030	3.0
Styrene-acrylonitrile	0.002-0.006	0.2-0.6
Styrene butadiene elastomer	0.001-0.005	0.1-0.5
Styrene methyl methacrylate	0.002-0.006	0.2-0.6
Vinylidene chloride	0.005-0.025	0.5-2.5

2.3.4.9 ผลกระทบอื่นๆ

2.3.4.9.1 รูปร่างของชิ้นงาน

สำหรับชิ้นงานที่ต้องควบคุมเรื่องการหดตัวหรือชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง จำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องรูปร่างของชิ้นงานเป็นพิเศษ เช่น มุม เพราะเป็นสาเหตุการเกิดของความเค้นซึ่งจะส่งผลเสียกับชิ้นงานสามารถแตกหรือหักได้

ฉะนั้นผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้มุมปลาดชิ้นงาน และการกำหนดให้มีมุมรัศมีเพื่อเป็นการลดความเค้นที่จะเกิดขึ้น และลดแรงในการเปิดแม่พิมพ์ได้

ความโค้งของชิ้นงานอาจจะทำให้ลูกค้าไม่พึงพอใจ แต่มีความสำคัญมากกับการปลาดชิ้นงานและลดการหดตัว

หลักการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับชิ้นงานที่มีความยาวหรือกว้างมาก เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการหดตัว เช่น การทำเป็นลูกคลื่น การทำเป็นชั้น และอื่นๆ

2.3.4.9.2 ทางเข้า (Gate)

เมื่อทางเข้าปิด (Gate freeze-off) จะทำให้ไม่สามารถอัดเนื้อพลาสติกเข้าในโพรงแบบได้ ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการฉีดจึงต้องสัมพันธ์กับการเพื่อปิดของทางเข้าเป็นการชดเชยการหด

ตัวของชิ้นงานเมื่อเกิดการเย็นตัว Gate ที่มีขนาดเล็กจะปิดเร็ว แต่ต้องเพียงพอกับการหดเซยการหดตัว

Gate ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การแข็งตัวช้า ส่วนใหญ่ใช้แก้ปัญหาการหดตัวได้ดี เพราะสามารถเพิ่มความดันในช่วงการฉีดได้มากขึ้น จำนวนของ Gate มีผลกระทบต่อหดตัว จึงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องจำนวนของ Gate เพราะทำให้ชิ้นงานเต็มเต็มได้เร็วขึ้นและเกิดความดันในชิ้นงานน้อย ที่จะส่งผลโดยตรงต่อชิ้นงาน [8-11]

ตำแหน่งของ Gate ก็มีผลกระทบต่อหดตัว Gate ที่ดีควรเข้าบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเพื่อสมดุลการไหลและเพื่อเป็นการลดความยาวในการไหล เพราะการหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามความยาวการไหล

2.3.4.9.3 การหล่อเย็น

ชิ้นงานจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งด้านตัวผู้ (Core) และตัวเมีย (Cavity) ถ้าอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ที่เกิดการหดตัวและการบิดงอ สำหรับชิ้นงานที่มีความยาว ความกว้าง และมีครีบลึกจึงต้องพิจารณาเป็นพิเศษ [40]

2.3.4.9.4 การจัดเรียงเชิงโมเลกุล

เมื่อพลาสติกได้รับความร้อน จากกระบอกฉีดและแรงเสียดทานจากการหมุนของสกรู พลาสติกจะหลอมละลายและทำให้โมเลกุลที่ต่อเนื่องกันเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

พลาสติกเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบแม่พิมพ์ โซโมเลกุลบริเวณใกล้ผิวของโพรงแบบจะไหลและถูกดึงให้ตั้งด้วยแรงที่เกิดจากความเร็วเฉือน และจะเรียงตัวในทิศทางการไหล ส่วนโซโมเลกุลพลาสติกบริเวณตรงกลางได้รับอิทธิพลจากความเร็วน้อย ทำให้โซโมเลกุลไม่มีการเรียงตัวกันตามแนวฉีด การเรียงตัวของสายโซโมเลกุลพลาสติก (Molecular orientation) ในแนวฉีด จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วฉีด ถ้าความเร็วฉีดมากจำนวนโซโมเลกุลที่เรียงตัวในแนวฉีดจะมากเนื่องจากความเค้นเฉือนที่กระทำต่อโมเลกุล[1]

ดังนั้นบริเวณผิวของชิ้นงานจะมีความเค้นเฉือน เนื่องจากการเรียงตัวของโซโมเลกุลที่ถูกดึงในแนวทิศทางการไหลและบริเวณตรงกลางจะเกิดความเค้นเฉือนน้อยที่สุดในขณะที่พลาสติกเหลวในโพรงแบบถูกหล่อเย็น และเมื่อการฉีดช้า การเรียงตัวของสายโซโมเลกุลเริ่มคลายตัว (Relaxation) โซโมเลกุลถูกดึงเริ่มหดตัวกลับที่บริเวณใกล้กับผนังแม่พิมพ์การเรียงตัวของสายโซโมเลกุล (Residual orientation) มีมากเนื่องจากการแข็งตัวที่เร็วมาก ดังนั้นโซโมเลกุลจึงมีเวลาในการผ่อนคลายน้อย การแข็งตัวที่ถูกดึงยึดค้างเอาไว้ ทำให้มีความเค้นตกค้างสูง บริเวณที่อยู่ห่างจากผนังแม่พิมพ์มีการถ่ายเทความร้อนที่ช้า การเรียงตัวของสายโซโมเลกุลตกค้างจึงน้อย [4]

บทที่ 3

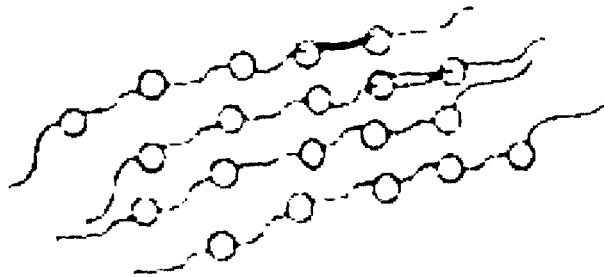
คุณสมบัติของวัสดุ และทฤษฎีการฉีดพลาสติก

3.1 ชนิดของพลาสติก

วัสดุที่ใช้สำหรับงานฉีดพลาสติกโดยทั่วไปนิยมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติก กลุ่มเทอร์โมเซต และกลุ่มอีลาสโตเมอร์ หรืออย่างสังเคราะห์ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันต่อไปนี้

3.1.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติก คือ พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลมีลักษณะไม่ถาวร เช่น PA (Polyamide, Nylon), PE (Polyethylene), PP (Polypropylene), PS (Polystyrene), PVC (Polyvinyl chloride), PMMA Polymethyl methacrylate), PC (Polycarbonate) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะเส้นใยพลาสติกแบบ Thermoplastics

3.1.2 เทอร์โมเซต (Thermoset)

เทอร์โมเซต คือพลาสติกที่มีรูปร่างถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน (Heat) และแรงอัด (Compression) หรือผ่านกรรมวิธีการผลิตประเภทหล่อพลาสติก (Casting) แล้วปล่อยให้เย็นตัวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแห (Molecule Cross-linking) ซึ่งจะไม่สามารถหลอมละลายนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น PF (Phenol formaldehyde), UF (Urea formaldehyde), MF (Melamine formaldehyde), UP (Unsaturated Polyester resin), PU (Polyurethane) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะเส้นใยพลาสติกแบบ Thermosetting

3.1.3 อีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

อีลาสโตเมอร์พลาสติกหรือ ยางสังเคราะห์ คือ พลาสติกที่เมื่อนำไปหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นจนแข็งด้วยกรรมวิธีวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห (Molecule Cross-linking) ภายใต้อิทธิพลของความร้อนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมเหลวได้อีก ตัวอย่างเช่น ยาง SBR ยาง NBR ยาง CR และ Engage% versify เป็นต้น

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติก

3.2.1 พลาสติกสังเคราะห์ (Synthetic materials)

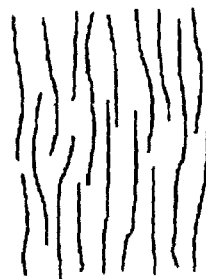
พลาสติกสังเคราะห์ที่มนุษย์สร้างขึ้นมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่มาก (Macromolecule) ประกอบด้วยธาตุสำคัญคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน คลอรีน เป็นต้น โพลีเมอร์เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดขึ้นในธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้นมาโพลีเมอร์ในธรรมชาติ (Natural polymers) ที่คุ้นเคยคือ ไม้ ฝ้าย เส้นใยธรรมชาติ ยาง หนัง ขนสัตว์ เป็นต้น โพลีเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) เช่น พลาสติก

3.2.2 โครงสร้างของโพลีเมอร์และการจัดรูปร่างโมเลกุลของโพลีเมอร์

โครงสร้างของโพลีเมอร์หรือลักษณะลำตัวและการจัดรูปร่างโมเลกุลของโพลีเมอร์ มีหลายแบบขึ้นอยู่กับประเภทของโพลีเมอร์กรรมวิธีสังเคราะห์ ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างมีผลต่อคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ความหนาแน่น ความเหนียว ความเปราะ ความยืดหยุ่น ความแข็ง ความใส เป็นต้น

3.2.3 โครงสร้างของโพลีเมอร์

3.2.3.1 โพลีเมอร์แบบเส้นยาวตลอด (Linear shape) ลำตัวยังยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นไป มีความแข็งแรงสูงขึ้นไป ทนความร้อนได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



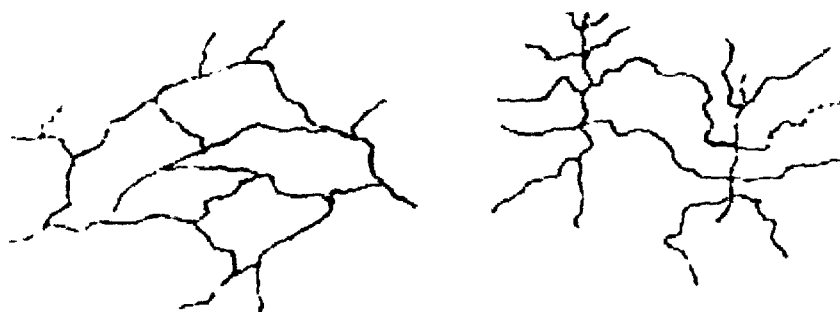
รูปที่ 3.3 โพลีเมอร์แบบเส้นยาวตลอด

3.2.3.2 โพลีเมอร์แบบแขนโดยรอบ (Branched shape) โดยสร้างแบบนี้ ทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน จึงทำให้มีความหนาแน่นน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โพลีเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ

3.2.3.3 โพลีเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห (Cross - linked or work shape) โครงสร้างแบบนี้ทำให้โพลีเมอร์มีความหนาแน่นสูง และมีความแข็งแรงสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



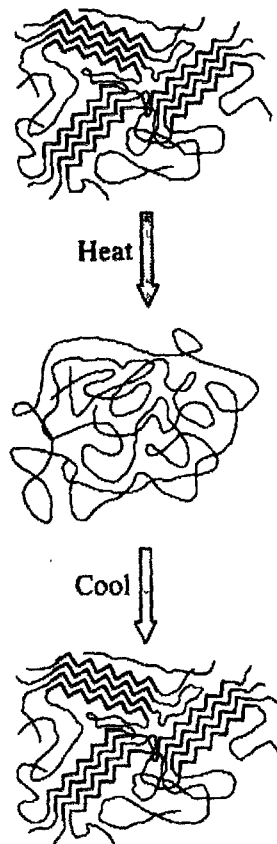
รูปที่ 3.5 โพลีเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห

3.3 คุณสมบัติของ crystalline และ Amorphous thermoplastic

คุณสมบัติของพลาสติก ยังสามารถจำแนกออกได้ตามลักษณะโครงสร้าง คือ Crystalline และ Amorphous (non-crystalline)

3.3.1 Crystalline

Thermoplastic บางชนิดมีลักษณะผลึกซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากจากสถานะของแข็งที่จะทำให้หลอมละลายโดยโมเลกุลของพลาสติกจะเรียงตัวกันอยู่ในรูปของผลึก ซึ่งทั่วไปที่เรียกว่าการเกาะตัวกันแบบโครงตาข่ายผลึก การเรียงตัวกันของผลึก จะเป็นตัวป้องกันพลังงานที่จะทำให้โมเลกุลแยกออกจากกัน หรือพลังงานที่ทำให้โมเลกุลรวมตัวกัน ตัวอย่างเช่นพลังงานความร้อนที่ทำให้โมเลกุลของพลาสติกแยกตัวออกจากกัน โดยจะพบการเกิดผลึกของพลาสติกชนิด Thermoplastic ในสถานะเปลี่ยนแปลงสถานะด้วยอุณหภูมิและความร้อนแฝง ลักษณะเฉพาะของโครงร่างผลึก Thermoplastics จะมีลักษณะที่บิตามคุณสมบัติทางกายภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกัน non-homogeneous (anisotropic) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

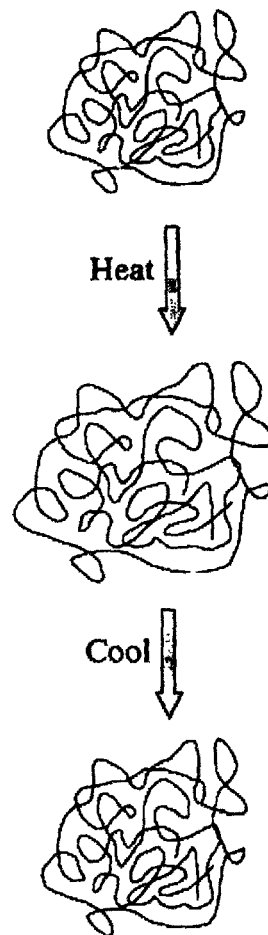


รูปที่ 3.6 โพลีเมอร์แบบ Crystalline thermoplastic

ลักษณะเฉพาะของโมเลกุลที่แพร่กระจายในรูปของโมเลกุลที่แพร่กระจายในรูปของผลึกในความเป็นจริงแล้วจะอยู่ในรูปของผลึก 100% เป็นไปไม่ได้ซึ่งตัวบ่งชี้ (X_c) คืออัตราส่วนของการสุ่มกระจายพื้นที่ non-crystallized ดังนั้นโครงสร้างผลึก Thermoplastic อาจเรียกในอีกชื่อหนึ่งได้ว่า semi-crystalline thermoplastic เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการที่โมเลกุลสร้างตัวเป็นผลึกโครงตาข่าย ตัวอย่างของ crystalline thermoplastic ประกอบด้วยพลาสติกดังนี้ PE ($X_c=80\%$), PP($X_c=50\%$)

3.3.2 Amorphous thermoplastics

Amorphous thermoplastic มีโครงสร้างโมเลกุลแบบสุ่มเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จากจุดเล็กๆ ที่พิจารณา Amorphous thermoplastics อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะไม่ชัดเจน ในกระบวนการหลอมเหลวทั้งหมดจะมีอุณหภูมิตั้งที่อยู่นิ่งค่า และหลอมเหลวก็มีลักษณะใส และตามคุณสมบัติทางกายภาพเป็นเนื้อเดียวกัน Homogeneous ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โพลีเมอร์แบบ Amorphous thermoplastics

โดยพลาสติกทั่วไปที่จัดอยู่ในชนิด Amorphous thermoplastics เช่น Polystyrene (PS), Acrylics, Polycarbonates (PC), Polyvinyl Chloride (PVC) เป็นต้น

3.4 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางการภาพของการฉีดพลาสติก

3.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพด้านความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

3.4.1.1 คุณสมบัติเชิงปริมาตร

ปริมาตรจำเพาะ V , ความหนาแน่น ρ และความสัมพันธ์ระหว่าง PVT (Pressure Volume Temperature)

3.4.1.2 คุณสมบัติของ Calorimetric

ความร้อนจำเพาะ c_p , ค่าความร้อน k , ความร้อนในการหลอมละลายและความร้อนที่ทำให้เกิดการเกาะตัวกันเป็นผลึก

3.4.1.3 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะ

Glass transition temperature T_g , melting point T_m

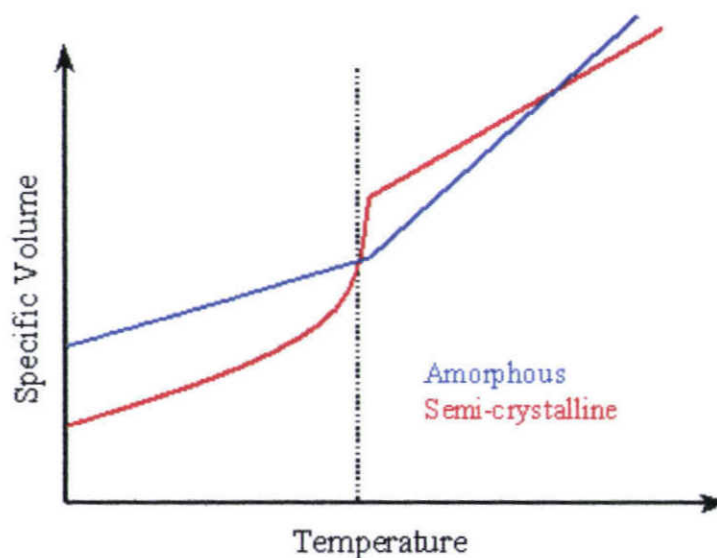
3.4.2 คุณสมบัติเชิงปริมาตร

3.4.2.1 ปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่น

ปริมาตรจำเพาะมีผลโดยตรงกับความหนาแน่นของพลาสติกที่เกิดการหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงสถานะ Thermoplastic สามารถใช้ความร้อนในการทำให้หลอมเหลวเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวในขณะฉีดพลาสติก หรือทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการโดยเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งปริมาตรจำเพาะ และความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนสถานะจาก (สถานะของแข็ง หรือสถานะของเหลว) โดยคุณสมบัติดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงไป

ส่วนสำคัญ Thermoplastic ที่สถานะของเหลวภายใต้โครงสร้างโมเลกุลแบบต่อเนื่องทำให้ปริมาตรจำเพาะมีค่ามาก ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นมีค่าน้อยลง หรือในอีกกรณีหนึ่ง Thermoplastic ที่สถานะของแข็งภายใต้โครงสร้างโมเลกุลแบบต่อเนื่องทำให้ปริมาตรจำเพาะมีค่าน้อย จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่ามากขึ้น หนึ่งในสองกรณีที่กล่าวมาเป็นเหตุผลของการหดตัวของพลาสติกในการผลิต ซึ่งสาเหตุเกิดขึ้นจากปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะของแข็งและสถานะของเหลว

จากรูปที่ 3.8 ได้แสดง crystalline thermoplastic ที่ความหนาแน่นสูงของพลาสติกชนิด Polyethylene (HDPE) โดยมีปริมาตรจำเพาะ และความหนาแน่นที่แสดงไว้ใกล้กับอุณหภูมิหลอมเหลวของ Amorphous thermoplastic เช่น PS ในอีกลักษณะหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะอย่างช้าๆ แต่จากการเปรียบเทียบ Crystalline thermoplastic จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากจากสภาวะของแข็งที่จะทำให้หลอมละลายโดยโมเลกุลของพลาสติกค่าความหนาแน่นมากกว่า Amorphous ดังแสดงในรูปที่ 3.8

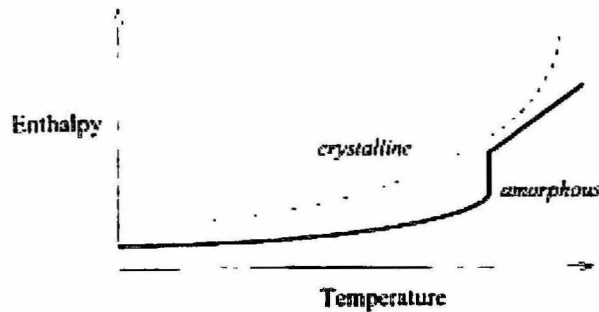


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาตรจำเพาะ [1]

3.4.2.2 ความร้อนในการหลอมละลายและความร้อนของการเกิด Crystallization

ความร้อนในการหลอมละลายคือ พลังงานความร้อนที่ต้องการต่อหนึ่งหน่วยมวลของพลาสติกที่ทำให้ Crystalline กลายเป็นของเหลว Heat of crystallization คือพลังงานความ

ร้อนที่เพิ่มขึ้นของพลาสติกระหว่างกระบวนการ Crystallization ของ crystalline หรือ Semi-crystalline ซึ่งพลังงานความร้อนทั้งสองกรณี Heat of crystallization สามารถวัดได้ตามวิธีการ Differential Scanning Calorimeter (DSC)



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับพลังงานความร้อน

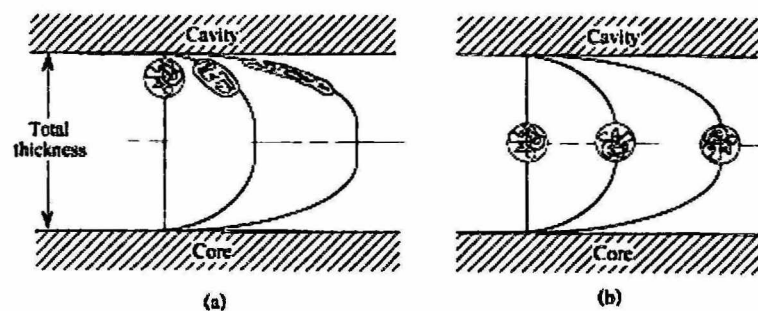
Crystalline thermoplastic จับตัวกันแน่นที่สภาวะของแข็งในรูปของโครงสร้างโมเลกุล โดยพลังงานความร้อนที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะได้จะต้องเพิ่มพลังงานความร้อนให้แก่โมเลกุลก่อนที่โมเลกุลจะเกาะกันโครงตาข่ายเช่นอุณหภูมิหลอมเหลว และพลังงานความร้อนของการหลอมเหลว ตัวอย่างเช่นพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวของ HDPE คือ 267.8 J/g (63.24 cal/g), LDPE เท่ากับ 131.2 J/g (31.36 cal/g)

3.5 พฤติกรรมการไหลของพลาสติก [5]

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกต้องพิจารณาถึง พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลในการฉีดพลาสติก การหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุลเมื่อขึ้นงานฉีดเย็นตัวลง (Relaxation characteristics) ที่แปรผันตามความเค้นเฉือนในทิศทางการไหลและตั้งฉากการไหล ที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดไม่เท่ากัน

3.5.1 พฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล

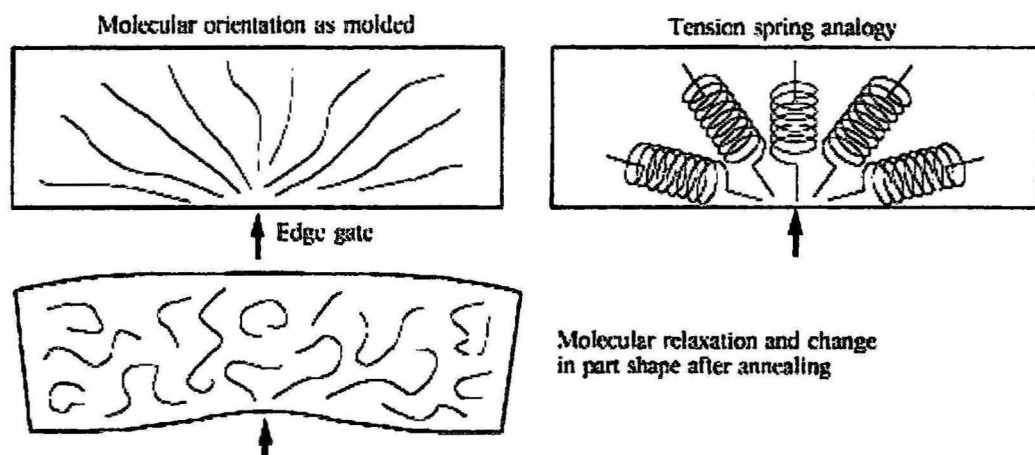
พฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล ที่อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงหรืออุณหภูมิหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงส่งผลเล็กน้อยต่อพฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล แต่การเปลี่ยนแปลงนั้นส่งผลต่อรอบการผลิตชิ้นงานฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 พฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (a) และพฤติกรรมการไหลแบบนิวทอเนียน (b) [6]

โดยพฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โพลิเมอร์นั้นจะเกิดจากความเค้นเฉือนในการฉีดและการหดตัวของสายโซ่โพลิเมอร์หลังกระบวนการฉีด การเปลี่ยนแปลงอัตราฉีดนั้นมีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โพลิเมอร์กับเวลาในการฉีด การฉีดที่เร็วสูงนั้นจะส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์ยืดออกและการฉีดที่ความเร็วสูงส่งผลให้อุณหภูมิของพลาสติกหลอมนั้นสูงด้วย จึงส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์สามารถหดตัวกลับคืนสถานะดั้งเดิมได้หลังกระบวนการฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.11

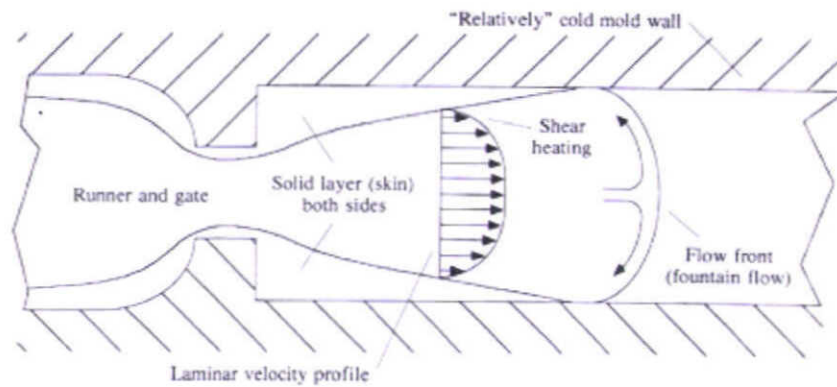
รูปที่ 3.11 แสดงพฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โพลิเมอร์ที่อุณหภูมิหลอมที่ผ่านรูฉีทางเข้า และโพรงแบบ โดยที่พฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติกนั้นจะไหลที่สัมพันธ์กับการเย็นตัวของผนังแม่พิมพ์ โดยค่าความเค้นเฉือนในขณะที่พลาสติกหลอมกับการแข็งตัวของผนังจะส่งผลต่อการหดตัวหลังจากทางเข้าเย็นตัว (Gate freeze off) ในขณะที่ช่วงการฉีดยังส่งผลให้เกิดการหดตัวของพลาสติก (Volume shrinkage) ที่สัมพันธ์กับเวลาที่ทางเข้าเย็นตัว



รูปที่ 3.11 พฤติกรรมการหดตัวกลับของสายโซ่โพลิเมอร์หลังจากทางเข้าเย็นตัว [7]

3.5.2 การลดลงของความดันภายในโพรงแบบ

จากการจำลองการฉีดโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สามารถดูพฤติกรรมการไหลของพลาสติกหลอมในกระบวนการฉีด ที่สัมพันธ์กับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ผนังแม่พิมพ์ (Solid layer) ที่เกิดจากการเย็นตัวของผนังแม่พิมพ์ต่อพลาสติกหลอม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เป็นพฤติกรรมการแข็งตัวของผนังของโพรงแบบขณะทำให้พลาสติกหลอมไหลเต็มเต็มโพรงแบบ ในการแข็งตัวนั้นจะสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนและการป้องกันความร้อนที่สูญเสียในกระบวนการไหลของพลาสติกหลอมที่จะส่งผลต่อความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนขึ้นที่สัมพันธ์กันระหว่างพื้นผิวที่เย็นตัวกับพลาสติกหลอม โดยส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนที่สูงได้

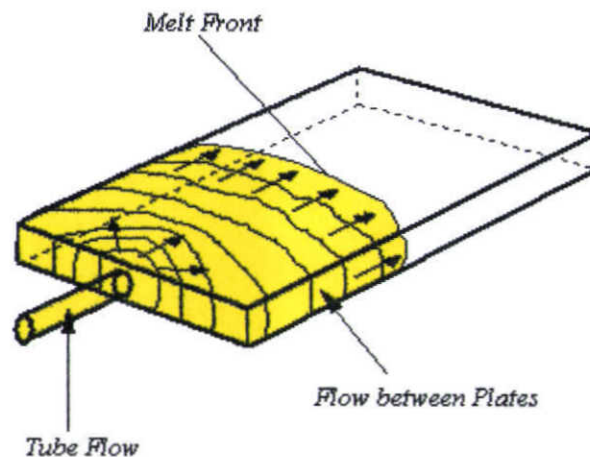


รูปที่ 3.12 การเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ผนังแม่พิมพ์ ที่เกิดจากอุณหภูมิผนังโพรงแบบเย็น [7]

3.6 พื้นฐานกระบวนการฉีดพลาสติก

3.6.1 รูปแบบการฉีดพื้นฐาน

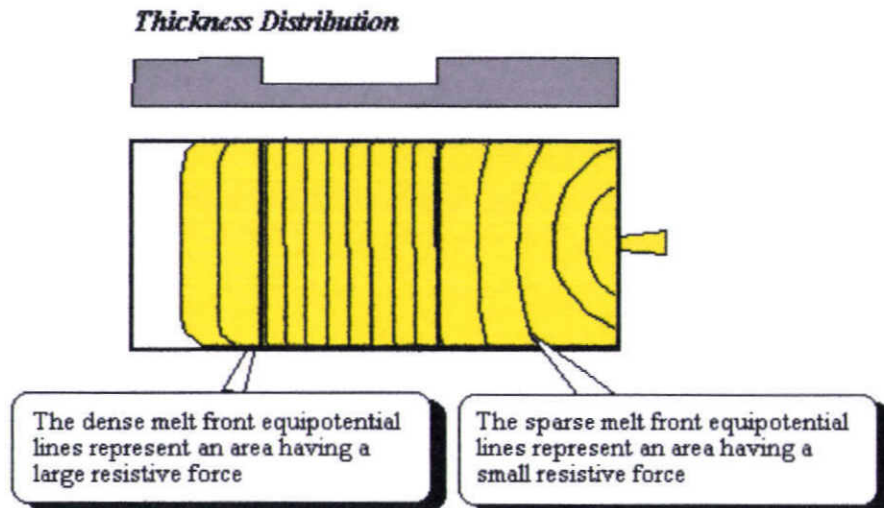
การฉีดพลาสติกเป็นการไหลพลาสติกเหลวตั้งแต่ออกจากหัวฉีด เข้าสู่แม่พิมพ์ ที่ไหลผ่านรูวง และทางเข้า จนกระทั่งไหลเข้าไปในโพรงแบบ (Cavity) ซึ่งเป็นบริเวณที่กำหนดรูปร่างของชิ้นงานฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปแบบการไหลพื้นฐานในกระบวนการฉีดพลาสติก [1]

3.6.2 พื้นฐานการฉีดพลาสติก

กระบวนการฉีดพลาสติกสามารถอธิบายได้ดังนี้ พลาสติกจะถูกหลอมเหลวอยู่ภายใต้สกรูส่งกำลังและฉีดเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ด้วยความดันค่าหนึ่งโดยค่าความดันที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เกิดจากแรงที่ทำให้ พลาสติกเหลวเคลื่อนตัวผ่านไปยังแม่พิมพ์แหล่งความดันพิจารณาจากหัวฉีดแม่พิมพ์ จะเกิดความดันสูงชันสูงสุดที่ตำแหน่งดังกล่าวจากระยะห่างของรูทางเข้าพลาสติกเหลว Gate จนถึงปลายสุดของแม่พิมพ์ ซึ่งค่าความดันจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากความเสียดทานของการไหล และค่าความดันจะน้อยที่สุดของการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.14

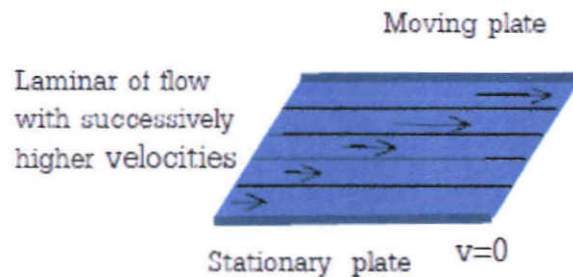


รูปที่ 3.14 ลักษณะเคลื่อนตัวของพลาสติกเหลว Melt front ผ่านแม่พิมพ์ที่หนาแตกต่างกัน [1]

3.7 รูปแบบการไหล

3.7.1 การไหลในแผ่นประกบคู่

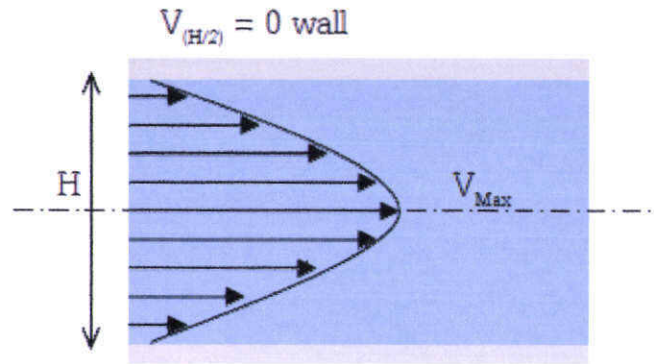
โดยที่การไหลที่ด้านหนึ่งเคลื่อนที่อีกด้านอยู่กับที่ ของไหลที่อยู่ฝั่งด้านเคลื่อนที่จะมีอัตราเร็วสูงสุด ส่วนที่อยู่ระหว่างชั้นที่เคลื่อนที่กับหยุดนิ่งนั้น จะมีความเร็วลดลงจนถึงด้านที่หยุดนิ่งตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 รูปแบบลักษณะนี้เกิดขึ้นที่ผนังกระบอกฉีดกับร่องสกรูเกลียวหนอนที่กำลังผลักดันพลาสติกเหลวออกจากกระบอก จะเห็นว่าชั้นที่เคลื่อนที่มีความเร็วสูงสุด



รูปที่ 3.15 การไหลแบบแผ่นประกบคู่ [1]

3.7.2 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดันภายในท่อ

โดยที่วัสดุจะไหลจากความดันที่สูงกว่าไปความดันที่ต่ำกว่า ที่ผนังท่อจะเกิดอัตราเฉือนสูงสุดและความเร็วต่ำสุด เมื่อเทียบกับการไหลที่บริเวณศูนย์กลางของท่อซึ่งมีความเร็วสูงสุดอัตราเฉือนต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปแบบการไหลที่เกิดความแตกต่างของความดันภายในช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม [1]

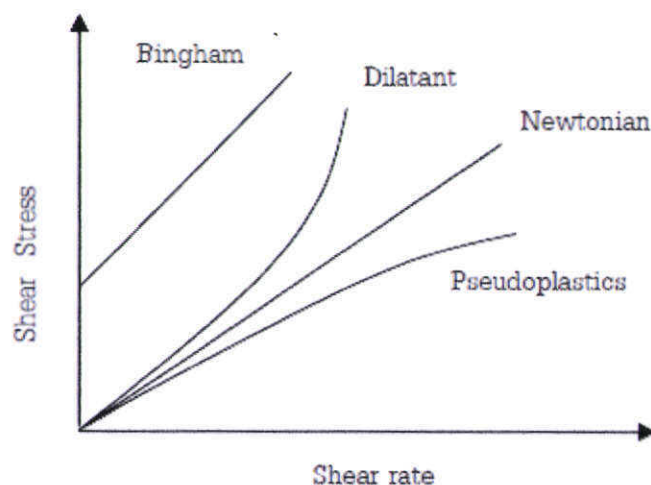
3.8 สมบัติการไหลของโพลิเมอร์ในการไหลแบบเฉือน

สมบัติการไหลของโพลิเมอร์ในการไหลแบบเฉือนแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ ของไหลที่สมบัติเป็นแบบนิวตันเนียน (Newtonian) และของไหลที่สมบัติเป็นแบบนอนิวตันเนียน (Non-Newtonian)

3.8.1 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนิวตันเนียน (Newtonian) หมายถึงของไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนมีค่าคงที่ $\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$ โดยที่ η คือความหนืดหน่วย

(Pa-s) τ_w คือความเค้นเฉือนหน่วย (Pa) และ $\dot{\gamma}_w$ คืออัตราเฉือนหน่วย (s^{-1}) ของไหลประเภทนี้เช่น น้ำ อากาศ เอเทอร์นอล และ เบนซิน เป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือน ทำให้ความชันมีลักษณะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.17

3.8.2 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนอนิวตันเนียน (Non-Newtonian) ลักษณะของไหลแบบนอนิวตันเนียนมีหลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่างๆ [1]

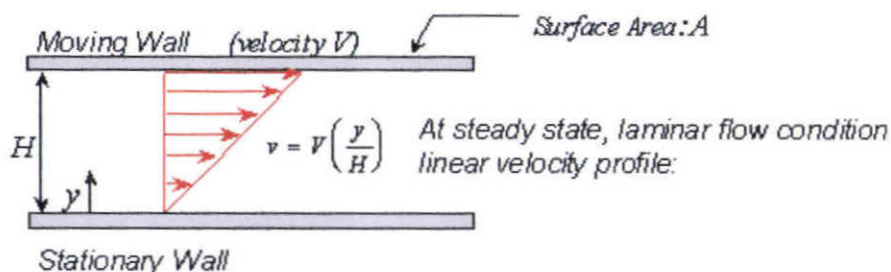
3.8.2.1 ของไหลแบบบิงแฮม (Bingham) ของไหลประเภทนี้จะเกิดการไหลต่อเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนสูงเกินค่าหนึ่ง และเมื่อของไหลเกิดการไหลจะมีอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนคงที่เช่นในกลุ่ม น้ำปูนซีเมนต์ จาระบี

3.8.2.2 ของไหลแบบดิลาแทน (Dilatant) ของไหลประเภทนี้เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดสูงเมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราเฉือน โดยมีสาเหตุมาจากการที่ห้วงโซโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกัน หรือเมื่อมีแรงมากกระทำจะทำให้เกิดการจับตัวหนาแน่นมากขึ้น เช่น น้ำแป้ง

3.8.2.3 ของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastics) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของอัตราเฉือน กับความเค้นเฉือนมีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่น้อยลง ซึ่งสามารถอธิบายการลดลงของความหนืดได้ว่า ขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการคลายตัวของห้วงโซโมเลกุลที่พันกัน เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากอัตราเฉือน จากกราฟความสัมพันธ์ที่เกิดจากอัตราเฉือนและความหนืดแบ่งขอบเขตเป็นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3.17

3.9 ความหนืดของพลาสติก [3]

ความหนืดเป็นดัชนีการต้านการไหลของของเหลวในการไหล โดยความหนืดของน้ำ หรือน้ำมัน จะเป็นการไหลแบบ Newtonian fluids แต่การไหลของพลาสติกเป็นการไหลแบบ Nonlinear ที่แปรผันตามโครงสร้างทางเคมีและเงื่อนไขในการผลิต โดยความหนืดเริ่มแรกนั้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ อัตราเฉือน และความดัน ที่แสดงธรรมชาติของความหนืดของพลาสติก ที่ต้องการกำหนด ความเค้นเฉือน อัตราเฉือนและความหนืดเป็นอันดับแรก



รูปที่ 3.18 การไหลของของเหลวแบบ Newtonian fluids [1]

จากรูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างการไหลแบบ Newtonian fluids ที่ไหลระหว่างผนังที่ขนานกันทั้งสองแผ่นที่ทำให้เกิดการไหลแบบเส้นตรง และสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

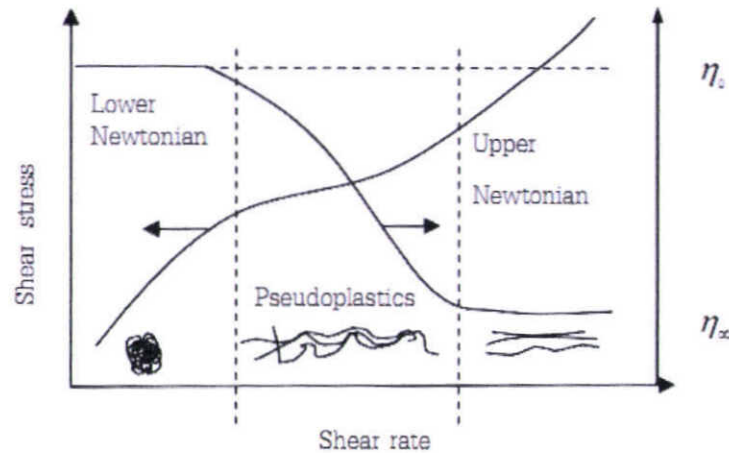
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{H} \quad (3.2)$$

เมื่อ τ เป็น ความเค้นเฉือน และ $\dot{\gamma}$ เป็น อัตราเฉือน โดยที่อัตราเฉือนจะแปรผันกับความเร็วระหว่างความหนาดตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 และสามารถกำหนดความหนืดของ τ และ $\dot{\gamma}$ เป็น

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.3)$$

เมื่อความหนืด η เป็นการต้านการไหลที่ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน
เส้นความหนืดของพลาสติกที่ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 พฤติกรรมความหนืดของพลาสติก [1]

ช่วงแรก ที่ค่าอัตราเฉือนน้อย Upper Newtonian region ค่าความหนืดเกือบจะเป็นค่าคงที่ โดยที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอที่มีขอบเขตตั้งแต่ Zero shear viscosity จนถึงช่วง Shear thinning region ช่วงที่สอง เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น Shear thinning region เป็นช่วงที่เกิดความหนืดเฉือนที่เหมาะสมกับการใช้จำลองในการฉีดของพลาสติก โดยที่ช่วงนี้อัตราเฉือนสูงขึ้นแต่ความหนืดจะต่ำลง และความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนมีลักษณะไม่คงที่ และช่วงที่สาม Lower Newtonian region เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมกับไหลของพลาสติกเพราะเป็นช่วงที่เกิดอัตราเฉือนมากเกินไปที่ส่งผลต่อการเสื่อมคุณสมบัติของวัสดุ (Molecular degradation)

3.9.1 แบบจำลอง Newtonian fluid

Newtonian fluid ที่แสดงพฤติกรรมความหนืดที่ อุณหภูมิ และอัตราเฉือนที่ไม่สัมพันธ์กัน ที่แสดงพฤติกรรมแบบเส้นตรง เป็นไปตามสมการที่ 3.4

$$\eta = \eta_0 \quad (3.4)$$

เมื่อ η เป็นความหนืด และ

η_0 เป็น ความหนืด Newtonian

3.9.2 แบบจำลอง Power-law model

Power-law model เป็นช่วงความหนืดที่ไม่พิจารณาช่วง Upper Newtonian region โดย Power-law model เป็นความหนืดที่สัมพันธ์กับอัตราเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 3.20 แต่ Power-law model นั้นไม่สามารถประมาณค่าความหนืดได้ในช่วงอัตราเฉือนต่ำ เพราะจะทำให้

ประมาณค่าความหนืดมากกว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยความหนืดเป็นไปตามความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.5

$$\eta = \eta_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3.5)$$

$$\eta_0 = B \exp(Tb / T) \quad (3.6)$$

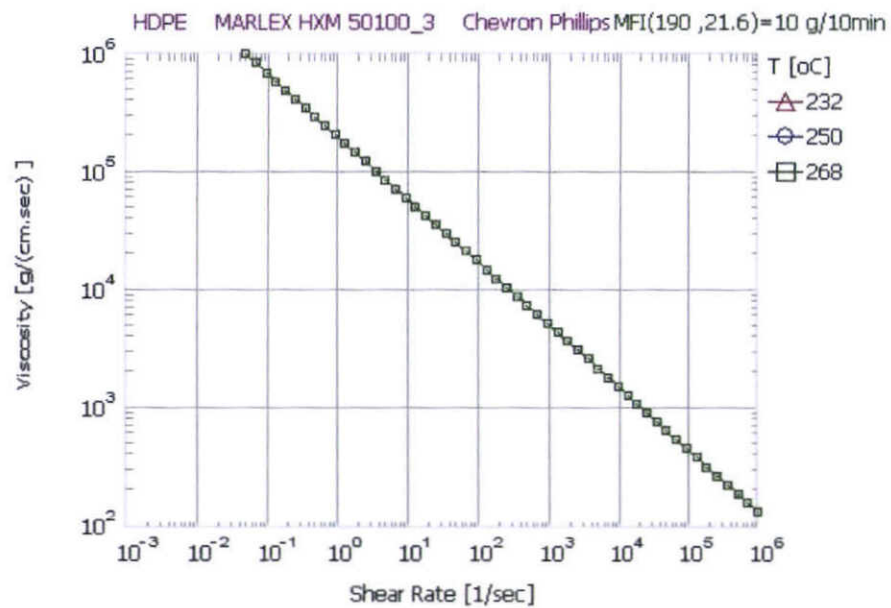
เมื่อ n เป็น Power-law index ที่อยู่ในช่วง 0 และ 1 ;

Tb แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ

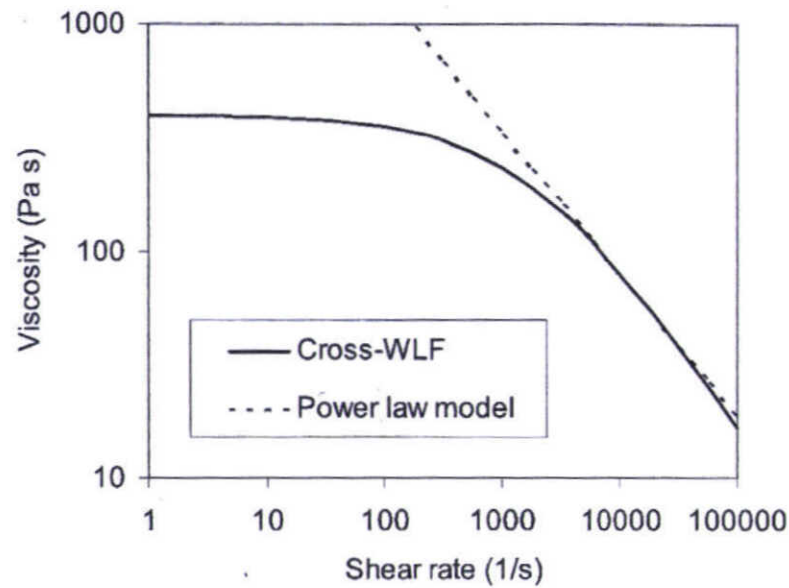
T เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวหน่วยเป็น เคลวิน (K)

η_0 เป็น Zero shear viscosity

B เป็น Consistency index



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด Power law model [1]



รูปที่ 3.21 พฤติกรรมความหนืดของพลาสติกแบบ Cross-WLF และ Power-law model [24]

3.9.3 แบบจำลอง Cross Model 1

Cross Model 1 แบบจำลองนี้อาศัยกลศาสตร์การหลอมละลายของวัสดุโพลิเมอร์ ซึ่งอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อความหนืด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระและเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แสดง อัตราเฉือนตลอดช่วง Upper Newtonian Region และ Shear-Thinning Region ตามสมการที่ 3.7

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C(\eta_0 \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (3.7)$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T} + DP\right) \quad (3.8)$$

เมื่อ D เป็นความดันเริ่มต้นจนถึงความดันลดลงเนื่องจากความหนืด

C เป็นอัตราเฉือน

n เป็น Power-law index ที่อยู่ในช่วง 0 และ 1 ;

T_b แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ

T เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวหน่วยเป็น เคลวิน (K)

η_0 เป็น Zero shear viscosity

B เป็น Consistency index

3.9.4 แบบจำลอง Cross Model 2

Cross Model 2 เหมือนกับแบบจำลอง Cross Model 1 ที่เป็นแบบจำลองที่แสดงอัตราเฉือนตลอดช่วง Upper Newtonian Region และ Shear-Thinning Region ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ที่เหมาะสมกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป กับการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ที่มีจุดประสงค์ตอบสนองกับ เกรตของพลาสติก เป็นไปตามสมการที่ 3-9

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (3.9)$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{Tb}{T} + DP\right) \quad (3.10)$$

เมื่อ τ^* เป็น Relaxation stress

D เป็นความดันเริ่มต้นจนถึงความดันลดลงเนื่องจากความหนืด

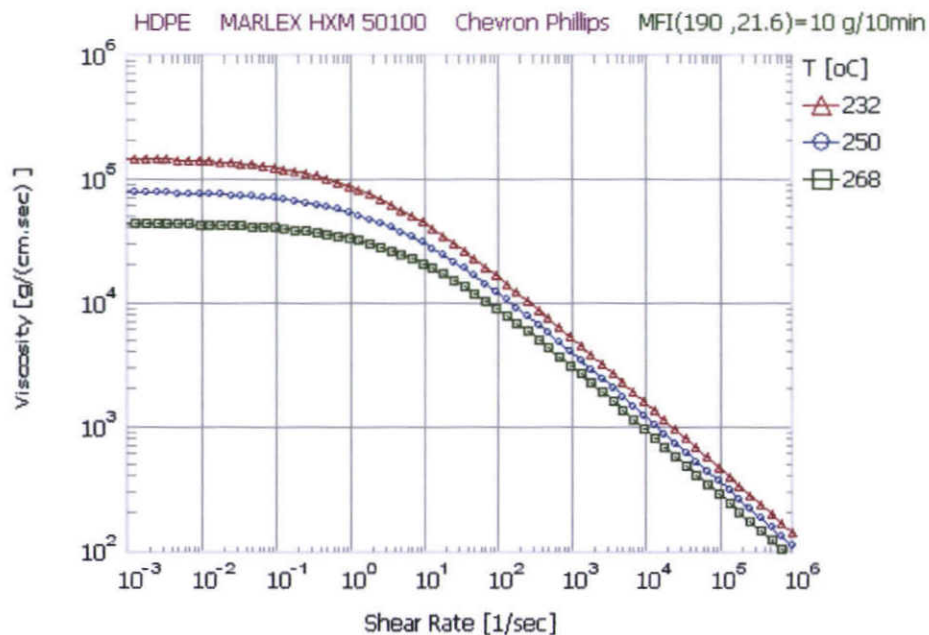
n เป็น Power-law index ที่อยู่ในช่วง 0 และ 1;

Tb แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ

T เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวหน่วยเป็น เคลวิน (K)

η_0 เป็น Zero shear viscosity

B เป็น Consistency index



รูปที่ 3.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืดใน Cross-Model 2 [1]

3.9.5 แบบจำลอง Cross Model 3

Cross Model 3 เป็นแบบจำลองที่ทำการปรับปรุงของ Cross Model 2 โดยอุณหภูมิที่อาศัย Exponential ที่รวมกับ Willam-Landel-Ferry (WLF) หรือเรียกแบบจำลองนี้ว่า Cross-WLF model เป็นไปตามสมการที่ 3.10

$$\eta = \frac{\eta_o}{1 + \left(\frac{\eta_o \gamma}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (3.10)$$

$$\eta_o = D_1 \exp \left(\frac{-A_1(T-T_c)}{A_2+(T-T_c)} \right) \quad (3.11)$$

$$T_c = D_2 + D_3 P \quad (3.12)$$

$$A_2 = \bar{A}_2 + D_4 P \quad (3.13)$$

Cross-WLF model เป็นการปรับปรุง ความหนืดในช่วงอุณหภูมิต่ำ ในช่วงต่ำกว่า $T_g + 100^\circ\text{C}$ โดยที่ A_1 , A_2 และ D_1 เป็นตัวแปรคงที่ ที่ได้จากสมบัติของวัสดุ T คืออุณหภูมิทดสอบ T_c คืออุณหภูมิอ้างอิงในรูปแบบสมบัติของวัสดุในรูปแบบความหนืดชนิด Cross-WLF model

3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืด อุณหภูมิ และอัตราเฉือน

ความสำคัญของแบบจำลองความหนืดที่สามารถสังเกตพฤติกรรมของโพลิเมอร์ หลอมเหลวโดยเฉพาะความสัมพันธ์ของแบบจำลองความหนืดต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ระหว่าง ความหนืด/อุณหภูมิ

1. ความหนืดควรลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
2. อัตราเฉือนลดลงกับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. อัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ควรสูงเกินไประหว่าง ความหนืด/อุณหภูมิ

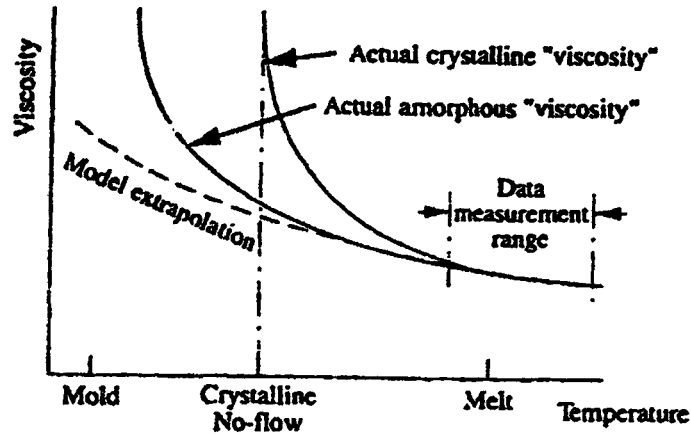
ระหว่าง ความหนืด/อัตราเฉือน

4. ความหนืดลดลงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน

3.11 การประมาณค่านอกช่วงของข้อมูลความหนืด

การเลือกแบบจำลองอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การไหล เพราะช่วงของอุณหภูมิและอัตราเฉือนเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการวัดความหนืดในการทดลองซึ่งอาจไม่ครอบคลุมช่วงการจำลองทั้งหมด โดยเฉพาะการจำลองจะต้องรวมผลกระทบของ Solidification ตลอดขบวนการเติมฉีด (Filling Phase) และกระบวนการอัดยี้ (Packing Phase) หรืออาจกล่าวได้ว่า จำเป็นต้องมีข้อมูลความหนืดที่อุณหภูมิต่ำสุดแน่ชัด เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความหนืดได้ที่

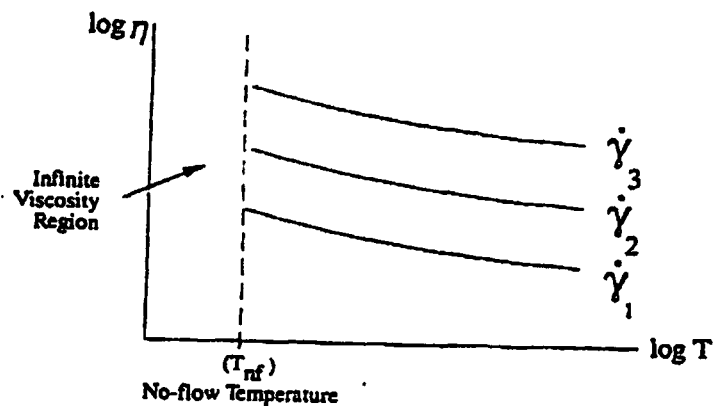
อุณหภูมิต่ำ การประมาณค่านอกช่วงจากการประมาณค่านอกช่วงจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

จากรูปสังเกตว่าการประมาณค่านอกช่วงจะแสดงความสัมพันธ์ของความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำการประมาณค่านอกช่วงของรูปแบบความหนืดทั่วไป ไม่สามารถทำนายความหนืดที่อุณหภูมิต่ำได้การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์จะใช้การประมาณค่านอกช่วงทำนายความดัน เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมทั้งหมด

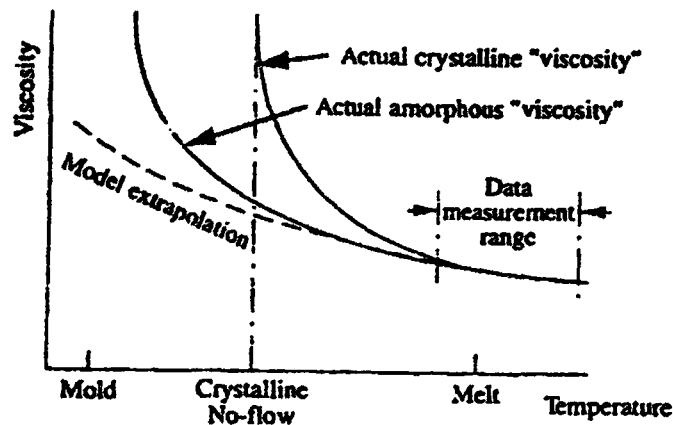
ข้อสรุปของ No-Flow Temperature คือเป็นวิธีการกำหนดค่าความหนืดภายใต้อัตราเฉือนและอุณหภูมิต่ำเพื่อนำไปวิเคราะห์การจำลองการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ข้อมูลของความหนืดกับเส้นยุติการไหล

3.12 ข้อผิดพลาดของการประมาณค่านอกช่วงความหนืด

เพื่อที่จะคำนวณค่า Fluidity จะต้องใช้ข้อมูลต่างๆ เช่นการกระจายตัวของความหนืดตลอดความหนา การประมาณค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ การเปลี่ยนแปลงความร้อนในช่วง glass ช่วงการแข็งตัวของแม่พิมพ์ โดยสังเกตได้ว่าการวัดอุณหภูมิทุกค่าทำได้ยากมากโดยเฉพาะวัสดุ Semi-Crystalline ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างรวดเร็วและเป็นไปได้อย่างยากที่การไหลจะสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของ Semi-Crystalline และ Amorphous

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของ Semi-Crystalline จะเกิดขึ้นเร็วกว่าวัสดุ Amorphous ไดอะแกรมแสดงช่วงการวัดค่าของความหนืดต่างๆ ไป ซึ่งข้อมูลจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันของคณิตศาสตร์โดยการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ จะพิจารณาความสามารถของฟังก์ชันในการพล็อตข้อมูลที่วัดได้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันอาจเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมจริงของวัสดุเมื่อมีการประมาณค่านอกช่วง

3.13 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะ

3.13.1 อุณหภูมิ Glass transition T_g

คืออุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของ Thermoplastic เริ่มมีการเคลื่อนตัวถ้าให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ Glass transition จะทำให้โครงสร้างโมเลกุลแข็งตัว โดยพฤติกรรมดังกล่าวทำให้โครงสร้างโมเลกุลแข็งเปราะ Glassy state อย่างไรก็ตามถ้าให้อุณหภูมิแก่โมเลกุลสูงกว่าอุณหภูมิ Glass transition ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเคลื่อนที่อย่างอิสระ และพฤติกรรมของพลาสติกสามารถให้ตัวและจะอ่อนตัว Rubbery stag

อุณหภูมิ Glass transition เป็นอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสภาพเกิดขึ้นเมื่อ Thermoplastic เปลี่ยนแปลงสภาพ Glassy state หรือ Rubbery state ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ ถ้าต้องการให้พลาสติกแข็งตัวอุณหภูมิที่ออกแบบจะต้องน้อยกว่าอุณหภูมิ Glass transition แต่ถ้าต้องการให้พลาสติกอ่อนตัวได้อุณหภูมิที่ออกแบบจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิ Glass transition

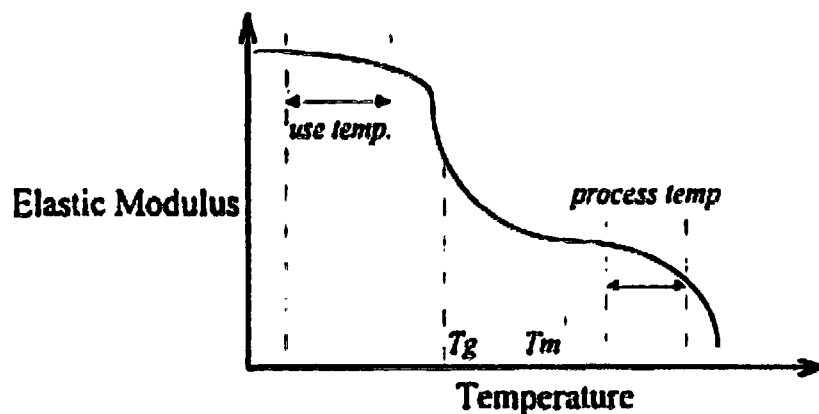
3.13.2 อุณหภูมิหลอมเหลว

อุณหภูมิหลอมเหลวคือพลังงานความร้อนที่ทำให้พลาสติกเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะของแข็งเป็นของเหลวมทั้ง Crystalline thermoplastic กระบวนการที่ใช้ในการหลอมเหลวของ Thermoplastic อุณหภูมิจะใกล้กับจุดหลอมเหลว ซึ่งอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิ Glass transition สามารถวัดได้โดยใช้วิธี DSC จากการสังเกตสำหรับ Thermoplastic หลายๆ ชนิดความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิ Glass transition สามารถเขียนได้เป็น

$$T_m / T_g = 1.5 \text{ non - symmetric thermoplastic} \quad (3.14)$$

$$T_m / T_g = 2.0 \text{ symmetric thermoplastic} \quad (3.15)$$

ในรูปที่ 3.26 แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณอุณหภูมิ Glass transition ของพลาสติกกระบวนการหลอมเหลวกำหนดโดยช่วงของอุณหภูมิหลอมเหลว



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ Elastic modulus

กระบวนการความร้อนของ Thermoplastic โดยส่วนมากจะถูกกำหนดไว้สองหรือสามขั้นก่อนอุณหภูมิหลอมเหลว หรือกำหนดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว โดยทั่วไปกระบวนการฉีดพลาสติกจะกำหนดไว้สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว 60-80 °c และกำหนดให้ต่ำกว่าอุณหภูมิ Cracking 10-30 °c

Thermoplastic ภายใต้กระบวนการที่จำกัดขอบเขตของอุณหภูมิไม่ง่ายขึ้นที่จะเริ่มกระบวนการฉีด สำหรับ Thermoplastic บางชนิดเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการ โดยมีช่วงของอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่แนะนำคือ 10-20 °c ช่วงอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในการหลอมละลายของ Thermoplastic คืออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ Cracking 5-15 °c

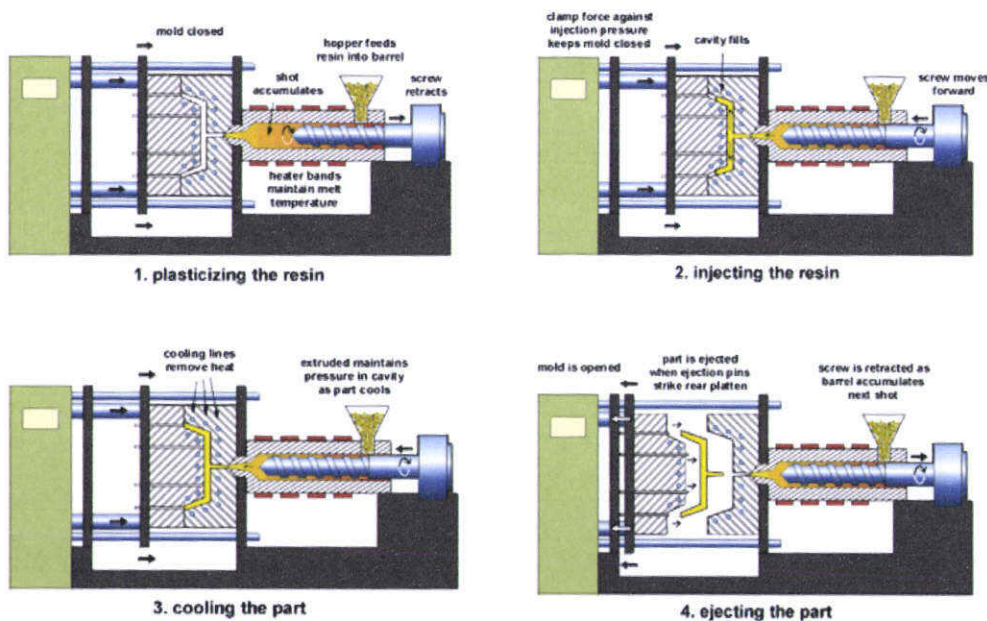
3.14 การฉีดพลาสติกและหลักพื้นฐานในการออกแบบแม่พิมพ์

3.14.1 ขั้นตอนในกระบวนการฉีดพลาสติก [5]

ในส่วนใหญ่แล้วโมลด์จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันที่ประกอบกับเครื่องฉีด โดยสองส่วนนี้จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ ถูกทำการขึ้นรูปโพรงแบบตามชิ้นงานที่ทำการฉีด [5] ในการฉีดจะประกอบด้วยเครื่องมือและเครื่องจักรที่สำคัญ คือ แม่พิมพ์และเครื่องฉีดพลาสติก เม็ดพลาสติกจะถูกป้อนเข้าไปในกรวย สกรูส่งหรือก้านส่งจะพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกส่งไปยังแม่พิมพ์โดยผ่านตัวทำความร้อน ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดและพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกส่งไปยังแม่พิมพ์โดยผ่านตัวทำความร้อน ที่ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นและปลดออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.27

จากรูปที่ 3.27 แสดงขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติกได้ดังนี้

1. เป็นช่วงกระบวนการหลอมเหลวพลาสติกโดยสกรูจะหมุนและถอยหลังเพื่อให้ได้ปริมาตรในการฉีดชิ้นงานตามที่กำหนดไว้
2. เป็นช่วงกระบวนการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ และทำการฉีดย้ำเพื่อรักษาความดัน โดยการรักษาความดันนี้เพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติก
3. เป็นช่วงกระบวนการหล่อเย็นชิ้นงานฉีดจนกระทั่งชิ้นงานฉีดมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิปลดชิ้นงาน
4. เป็นช่วงกระบวนการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



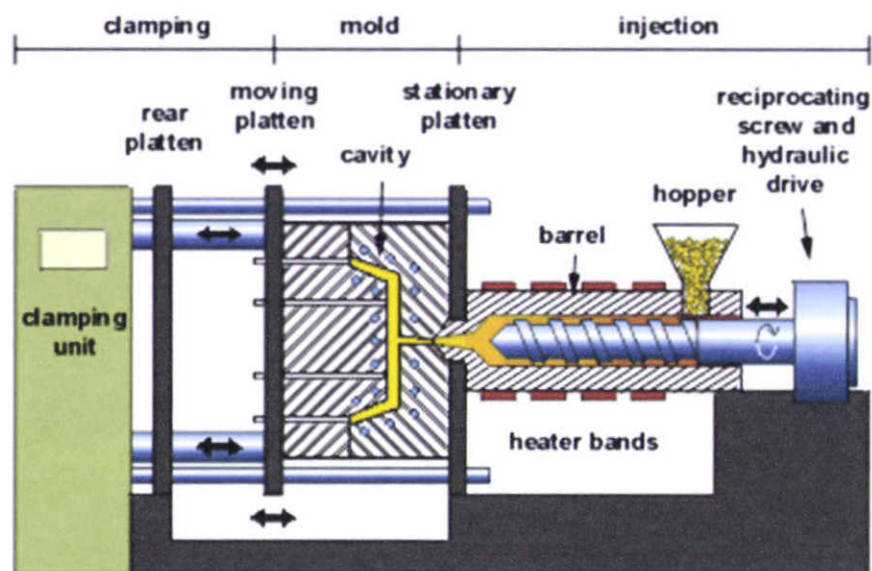
รูปที่ 3.27 ขั้นตอนกระบวนการฉีดพลาสติก [5]

3.14.2 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

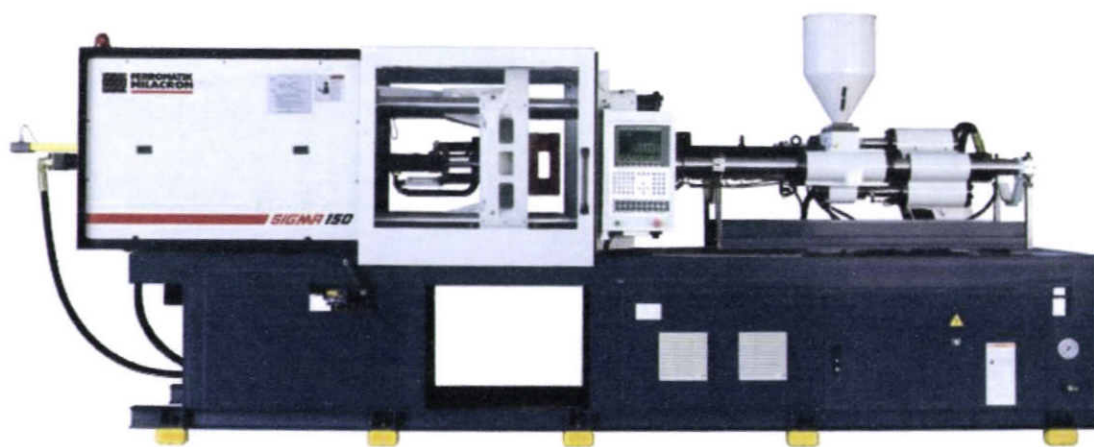
เครื่องฉีด (Injection Machine) หมายถึงเครื่องจักรที่ทำการแปรสภาพวัสดุเม็ดพลาสติกจากของแข็งให้เป็นของเหลว ทำการฉีดและปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์แบบปิดสนิทตามลักษณะรูปร่างที่ต้องการ โดยมี 2 ส่วนหลักที่สำคัญตาม ดังแสดงในรูปที่ 3.28

3.14.2.1 ชุดฉีด (Injection Unit) ทำหน้าที่หลอมเหลวเม็ดพลาสติกจากของแข็งเป็นของเหลวในสกรูเกลียวหนอนซึ่งสกรูเกลียวหนอน ทำหน้าที่ส่งถ่ายพลาสติกเหลวต่อไปยังหัวฉีดและฉีดพลาสติกตามอัตราการฉีดที่ต้องการไปยังชุดแม่พิมพ์ฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.29

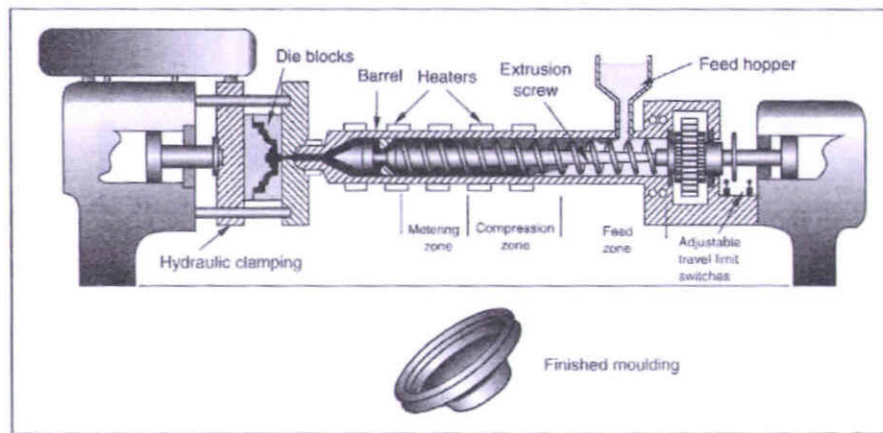
3.14.2.2 ชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการปิดแม่พิมพ์เพื่อต้านแรงดันสูงที่เกิดจากการฉีด และทำการเปิดแม่พิมพ์เพื่อทำการปลดชิ้นงานฉีดออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.28 องค์ประกอบของกระบวนการฉีดพลาสติก [5]



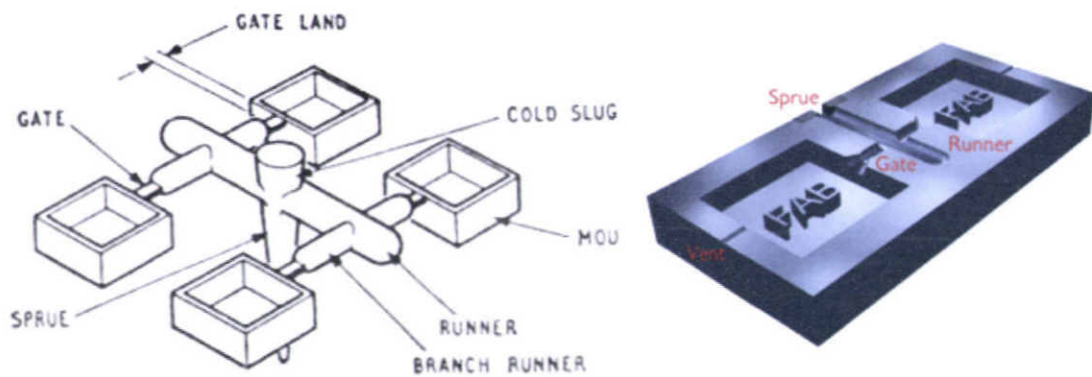
รูปที่ 3.29 เครื่องฉีดพลาสติก [5]



รูปที่ 3.30 โครงสร้างเครื่องฉีด [19]

3.15 ระบบป้อน (Feed system)

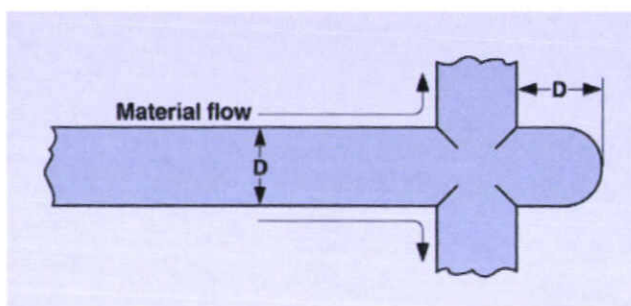
ในชุดแม่พิมพ์ฉีด จำเป็นจะต้องจัดเตรียมทางวิ่งสำหรับเนื้อพลาสติกหลอมเหลวจากหัวฉีดของเครื่องฉีดไปยังโพรงแบบแต่ละแห่ง ทางวิ่งทั้งหมดนี้เรียกว่าระบบป้อน โดยปกติระบบป้อนจะประกอบด้วย รูฉีด (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) เมื่อกระบวนการฉีดเสร็จสิ้น ระบบป้อนจะถูกปลดออก เพื่อเตรียมสำหรับการฉีดในครั้งต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ระบบป้อนของแม่พิมพ์พลาสติก [1]

3.15.1 บ่อดัก (Cold slug)

บ่อดัก (Cold slug) มีไว้เพื่อดักหรือกักเศษพลาสติก ป้องกันไม่ให้ไหลเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ จะอยู่ตรงปลายด้านหน้ารูวิ่งซึ่งจะเย็นตัวลง และใช้สำหรับดึงแกนรูฉีดสำหรับขั้นตอนการปลดชิ้นงานฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 บ่อดัก (Cold slug) [1]

3.15.2 ทางวิ่ง (Runner)

ทางวิ่ง (Runner) เป็นส่วนที่รับพลาสติกเหลวจากรูฉีดเพื่อจ่ายพลาสติกเหลวให้กับโพรงแบบโดยผ่านทางเข้า (Gate) ภายใต้แรงดันเท่าๆ กัน

หน้าที่สำคัญและความต้องการทางวิ่งในระบบป้อน

1. ส่งให้พลาสติกเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์เต็มโพรงแบบโดยมี Weld line น้อยที่สุด
2. มีสิ่งกีดขวางการไหลน้อยที่สุด
3. มีน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อคิดจากสัดส่วนโดยรวมของชิ้นงาน
4. ปลดชิ้นงานได้ง่าย
5. ไม่มีผลกระทบกับรูปร่าง
6. ความยาวน้อยที่สุด เพื่อลดการสูญเสียแรงดัน อุณหภูมิ และเนื้อพลาสติกน้อยที่สุด
7. ขนาดของหน้าตัดจะต้องออกแบบให้สามารถเติมพลาสติกหลอมเหลวจนเต็มชิ้นงาน
8. ระบบทางวิ่งควรมีผลกระทบกับรอบเวลาฉีดให้น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย พลาสติกจะต้องเข้าสู่ทุกโพรงแบบในเวลาเดียวกัน ภายใต้แรงดันเท่ากันและอุณหภูมิที่เท่ากันทุกโพรงแบบ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพที่เหมือนกันทุกชิ้นงานฉีด

การกำหนดขนาดของทางวิ่ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น แรงดันที่ลดลง อัตราการไหล คุณสมบัติของพลาสติก ความหนืด อุณหภูมิ และค่าคงที่บางอย่างของพลาสติก ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบ สมการที่กำหนดหาขนาดของทางวิ่งในเบื้องต้น คือ

$$D = S_{\max} + 1.5 \quad (3.4)$$

โดย D = เส้นผ่านศูนย์กลางของของทางวิ่ง (mm.)

S_{\max} = ความหนาสูงสุดของชิ้นงาน (mm.)

3.15.3 ลักษณะรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดทางวิ่ง

1. หน้าตัดกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.33

ข้อดี

- มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหน้าตัดอื่นๆ
- อัตราการเย็นตัวช้าสุด
- การสูญเสียความร้อนและความเสียดทานน้อยสุด
- แกนกลางของทางวิ่งจะแข็งตัวช้ากว่าส่วนอื่น จึงให้การส่งถ่ายแรงดันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสีย

- การกัดเซาะร่องที่แม่พิมพ์ให้มีลักษณะโค้งทั้งสอง ด้านทำได้ยาก, ค่าใช้จ่ายสูง

2. หน้าตัดรูป Parabolic ดังแสดงในรูปที่ 3.34

ข้อดี

- คล้ายกับหน้าตัดรูปวงกลม แต่การกัดร่องที่แม่พิมพ์ด้านเดียวทำได้ง่ายกว่ามักจะอยู่บนแม่พิมพ์ส่วนที่เคลื่อนที่เพราะปลดได้ง่ายกว่า

ข้อเสีย

- มีการสูญเสียความร้อน และเสียดทานมากกว่า เมื่อเทียบกับหน้าตัดรูปทรงกลม

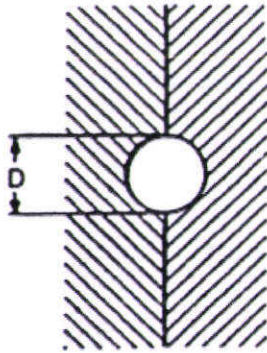
3. หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 3.35

ข้อดี

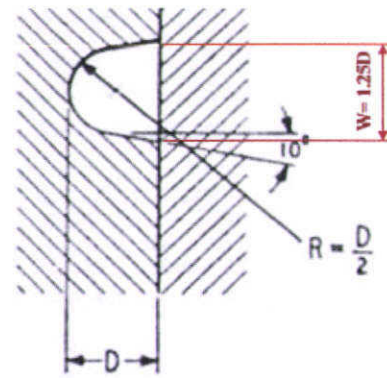
- คล้ายกับหน้าตัด Parabolic การกัดร่องทำได้ง่าย

ข้อเสีย

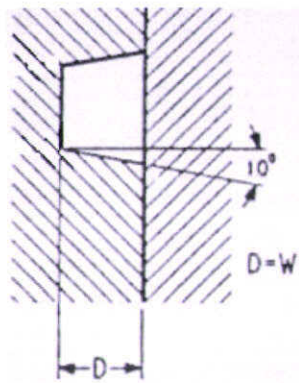
- มีการสูญเสียความร้อนและเสียดทานมากกว่าหน้าตัดรูป Parabolic



รูปที่ 3.33 ทางวึ่งหน้าตัดทรงกลม [19]



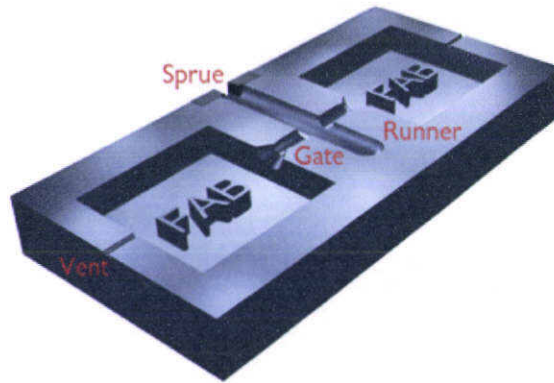
รูปที่ 3.34 ทางวึ่งหน้าตัดรูป Parabolic [19]



รูปที่ 3.35 ทางวึ่งหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู [19]

3.15.4 ทางเข้า (Gate)

ทางเข้า (Gate) คือ ร่องหรือรูเล็กๆ ที่ต่อระหว่างทางวึ่งกับโพรงแบบขนาดพื้นที่หน้าตัดจะเล็กเพื่อเพิ่มแรงดันให้กับพลาสติกเหลววึ่งเข้าสู่โพรงแบบอย่างรวดเร็ว ปลดชิ้นงานออกจากทางวึ่งได้ง่ายและเกิดรอยบนชิ้นงานให้น้อยที่สุด ตำแหน่งของทางวึ่งควรอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดการไหลเต็มเนื้อพลาสติกในโพรงแบบอย่างสม่ำเสมอ และกระจายการไหลของพลาสติกไปยังส่วนต่างๆ ของโพรงแบบในเวลาใกล้เคียงกันมากที่สุด ส่วนมากแล้วจะนิยมกำหนดให้ทางเข้าอยู่ในตำแหน่งที่ชิ้นงานหนาที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.36

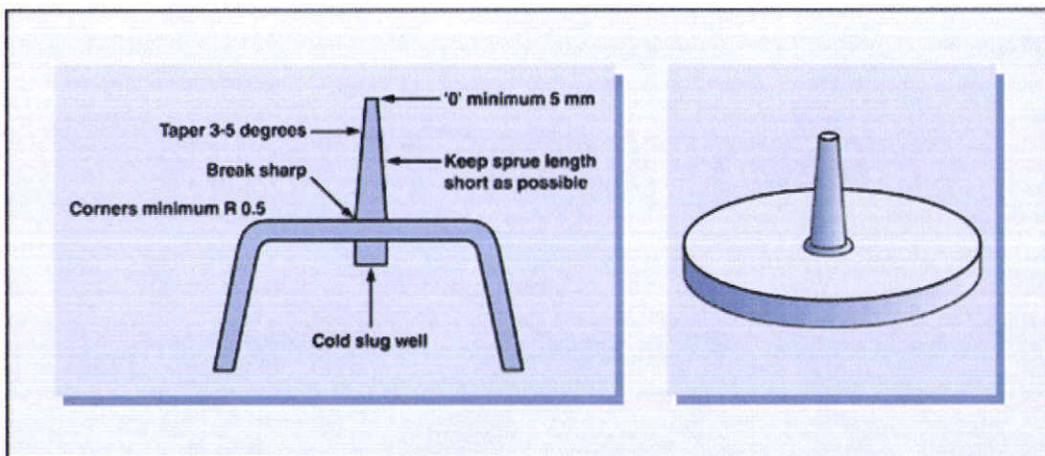


รูปที่ 3.36 ทางเข้าและระบบป้อน [1]

3.15.5 ชนิดของทางเข้า (Type of gate)

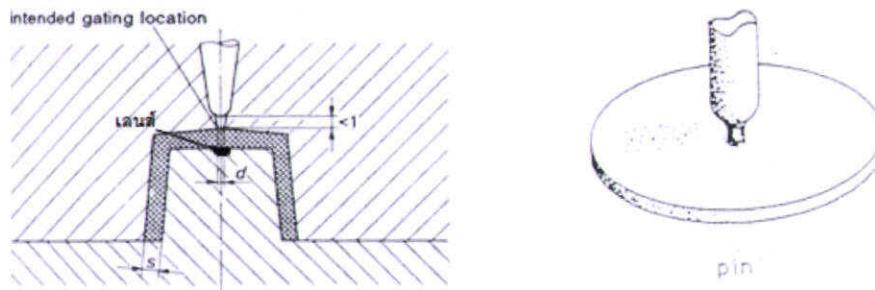
ชนิดของทางเข้าที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ทางเข้าแบบรูฉีดยิ่ง (Sprue gate) ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate) ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบไดอะแฟรม (Diaphragm gate) ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) ทางเข้าแบบเหลื่อม (Overlap gate) ทางเข้าแบบแท็บ (Tab gate) ทางเข้าแบบ Tunnel gate (Submarine gate) ทางเข้าแบบขอบ (Edge gate) และทางเข้าแบบพัด (Fan gate)

1. ทางเข้าแบบรูฉีดยิ่ง (Sprue gate) มีลักษณะของทางเข้าที่ฉีดพลาสติกเข้าโพรงแบบโดยตรงจากรูฉีดยิ่ง ส่วนของทางเข้าก็คือรูฉีดยิ่งนั่นเอง โดยใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่และรูปทรงสมมาตรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูฉีดยิ่งแบบนี้จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.37



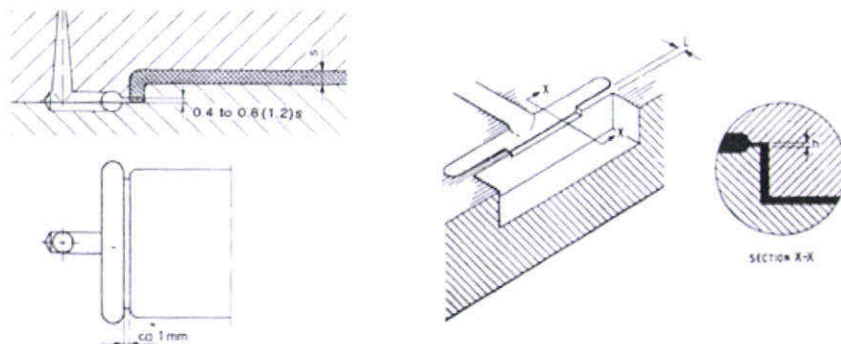
รูปที่ 3.37 ทางเข้าแบบรูฉีดยิ่ง (Sprue gate)

2. **ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate)** ทางเข้าแบบนี้จะใช้กับชิ้นงานขนาดเล็กและมีผิวบาง ที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก รูเข้าไปแบบนี้สามารถวางในตำแหน่งตรงกลางชิ้นงาน ส่วนมากแล้วทางเข้าจะอยู่ในตำแหน่งด้านใต้ของชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าประมาณ 0.6-1.2 มิลลิเมตร ถ้ากรณีที่ชิ้นงานบางจะมีส่วนที่คล้ายเลนส์อยู่ด้านตรงข้ามกับทางเข้าแบบเข็มซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ชิ้นงานขาดเมื่อปลดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate) [19]

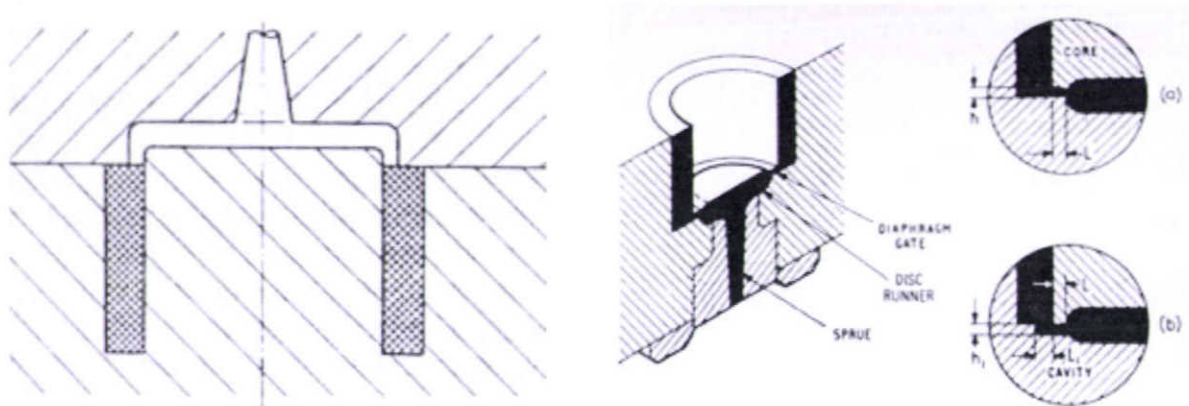
3. **ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate)** ทางเข้าแบบนี้จะเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และแบน หลีกเลี่ยงการเกิดรอยเชื่อมประสาน (Weld line) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีทางเข้าแบบหลายจุด ทางเข้าแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่งด้านข้างหรือตรงกลางก็ได้ ลักษณะคล้ายฟิล์มบางๆ ความหนาของทางเข้าจะเพิ่มจากตรงกลางไปจนถึงขอบตั้งแต่ 0.6-1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 รูเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) [19]

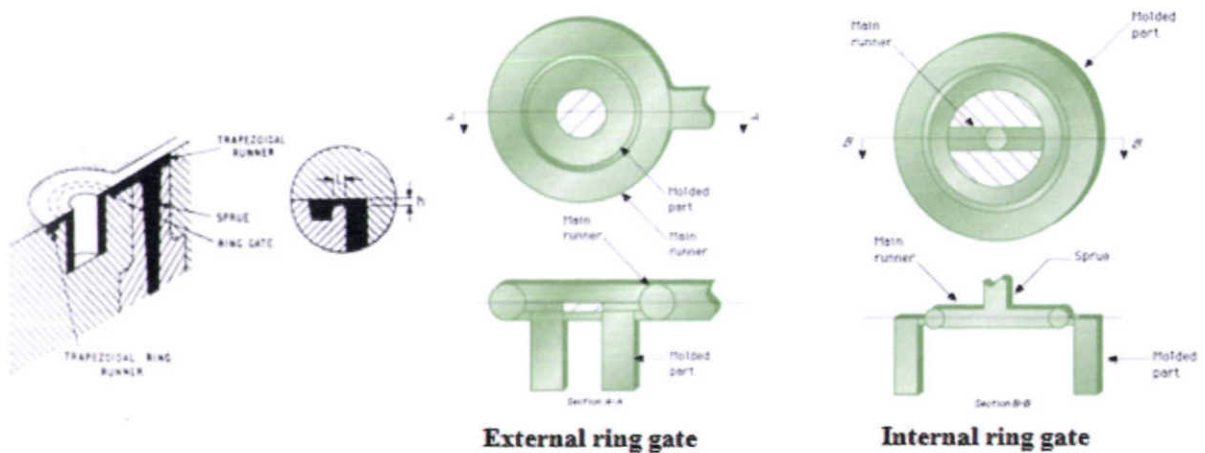
4. **ทางเข้าแบบไดอะแฟม (Diaphragm gate)** ทางเข้าแบบนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานลักษณะปloverกวางแหวน หรืองานที่มีลักษณะกลมๆ ทางเข้าแบบนี้จะทำให้พลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบอย่างสม่ำเสมอลดการเกิดรอยเชื่อมประสาน (Weld line) ขึ้นในชิ้นงาน และกรณีที่ชิ้นงานมีคอร์สำหรับงาน

ทรงกระบอก อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5/1 เพื่อป้องกันการเลื่อนของคอร์เนื่องจากแรงดันของการฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.40



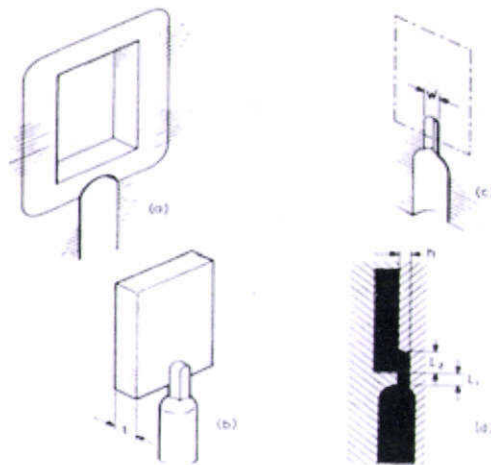
รูปที่ 3.40 ทางเข้าแบบไดอะแฟม (Diaphragm gate)

5. ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) ทางเข้าแบบนี้จะคล้ายกับ Diaphragms gate เหมาะสำหรับชิ้นงานทรงกระบอกที่ยาวมากๆ (มีอัตราส่วนมากกว่า 5/1) และต้องมีการยึดคอร์ทั้งสองข้าง พลาสติกเหลวจะถูกฉีดผ่านส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดแคบๆ ทำให้พลาสติกเหลวเต็มส่วนที่เป็นวงแหวนก่อนแล้วค่อยฉีดเข้าสู่โพรงแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.41



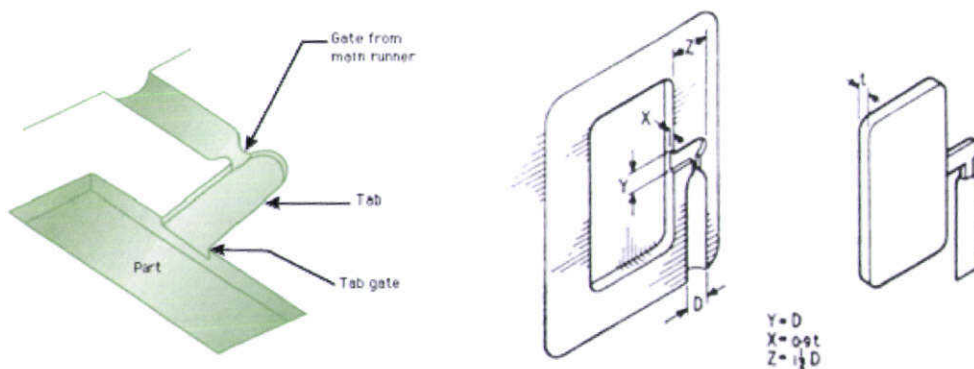
รูปที่ 3.41 ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate)

6. รูเข้าแบบเหลื่อม (Overlap gate) ทางเข้าแบบนี้เหมาะสำหรับการฉีดชิ้นงานที่มีหน้าตัดหนา ทางเข้าแบบนี้จะบังคับให้พลาสติกเหลวซึ่งพุ่งเข้าเป็นมุม หรือพุ่งเข้าชนกับผนังด้านข้างก่อน จากนั้นจะดันให้พลาสติกไหลไปจนเต็มโพรงแบบ ลดการเกิดรอยคลื่นที่บนผิวชิ้นงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ทางเข้าแบบเหลื่อม (Overlap gate)

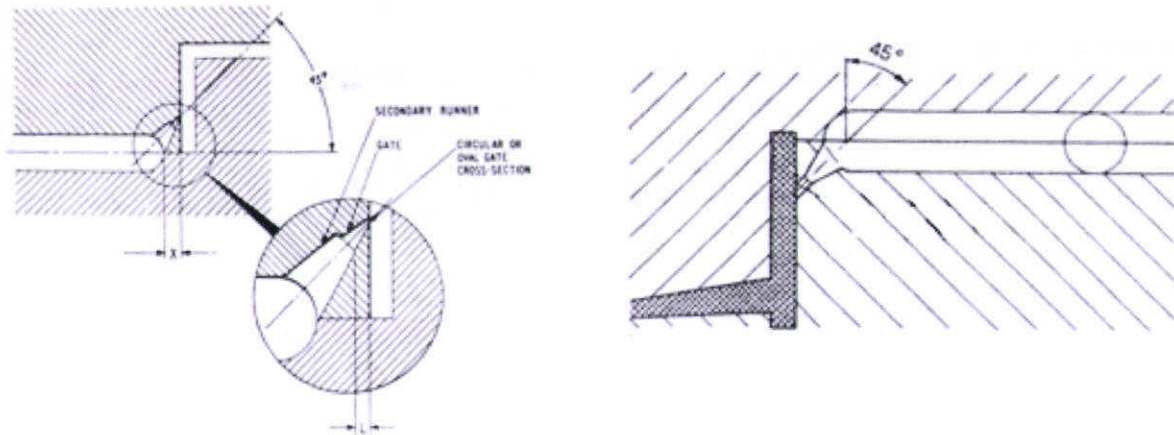
7. ทางเข้าแบบแถบ (Tab gate) เป็นการเปลี่ยนรูปของ Overlap gate ทางเข้าแบบนี้จะบังคับให้พลาสติกเหลวไหลผ่านทางเข้าขนาดเล็กก่อน แล้วจึงไหลผ่านทางเข้าครั้งที่สอง แล้วจึงไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ ป้องกันการเกิดรอยคลื่นของการไหลที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 ทางเข้าแบบแถบ (Tab gate)

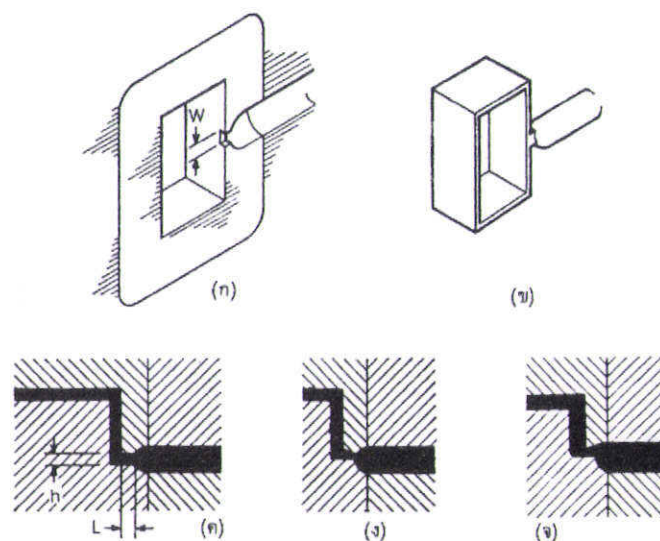
8. ทางเข้าแบบ Tunnel gate (Submarine gate) ทางเข้าแบบนี้จะเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กบาง และมีหลายโพรงแบบซึ่งจะให้อยู่ในตำแหน่งด้านข้างและสามารถปลดออกได้โดยอัตโนมัติ ขอบของ

ชั้นงานจะอยู่ในเส้นแบ่งเดียวกันที่จุดใกล้กับโพรงแบบจะทำทางเข้าให้เอียงเป็นมุมเรียว ต่อกับโพรงแบบด้วยพื้นที่เล็กๆ เข้าสู่โพรงแบบคล้ายกับลักษณะของอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.44



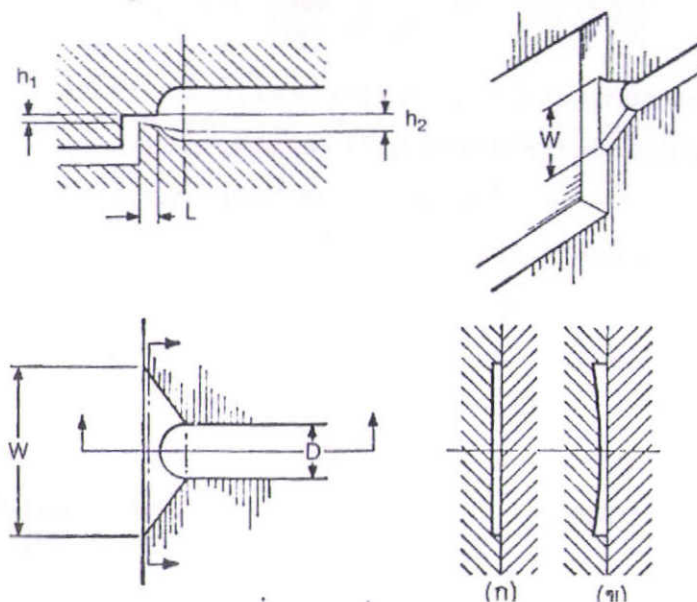
รูปที่ 3.44 ทางเข้าแบบ Tunnel gate (Submarine gate)

9. ทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ทางเข้าแบบนี้เป็นแบบที่ใช้ในวัตถุประสงค์ต่างๆ ไปและเป็นแบบง่ายๆ จะทำเพียงการตัดเฉือนเป็นร่องสี่เหลี่ยมบนแม่พิมพ์ด้านหนึ่งเพื่อต่อระหว่างทางวิ่งกับโพรงแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 ทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate)

10. ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) เป็นทางเข้าขอบอีกแบบหนึ่งแต่ไม่เหมือนกับทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างและความลึกคงที่ ขนาดความกว้างและความลึกของทางเข้าแบบพัดจะไม่คงที่ โดยที่ความกว้างที่ติดกับโพรงแบบจะมีขนาดค่อนข้างกว้างและเพราะเหตุนี้ทำให้สามารถฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้เป็นปริมาณมากในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นทางเข้าแบบนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีพื้นที่มากและมีผนังบาง รูปร่างทางเข้าแบบพัดจะช่วยกระจายการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบทำให้การไหลสม่ำเสมอ และรอยทางไหลในชิ้นงานน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 ทางเข้าแบบพัด (Fan gate)

3.15.6 ระบบหล่อเย็น (Cooling system)

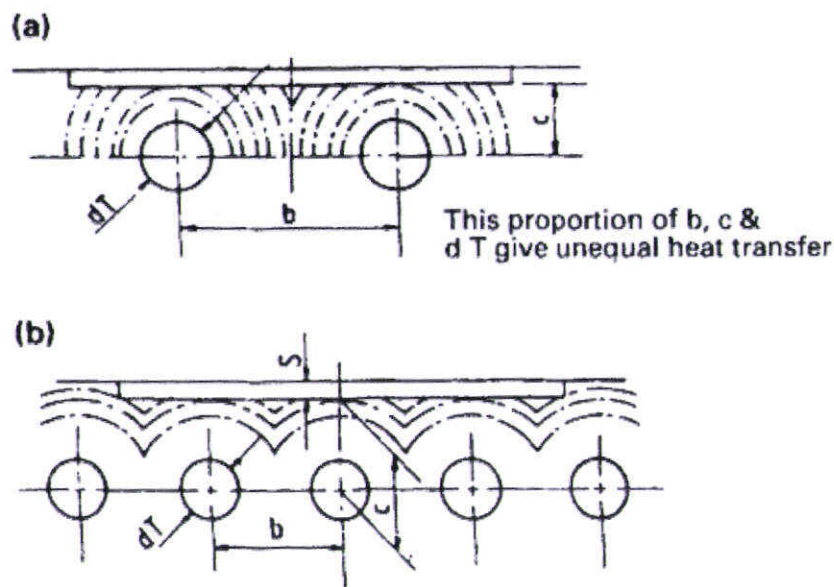
เป้าหมายของการหล่อเย็น คือ เร่งให้ชิ้นงานพลาสติกเย็นตัวเร็วที่สุด เพื่อสามารถปลดออกจากแม่พิมพ์ โดยชิ้นงานอยู่ในสภาพสมบูรณ์มากที่สุด อุณหภูมิใช้งานของแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานแต่ละอย่างจะขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังนี้ ชนิดและเกรดของพลาสติกที่ใช้ ระยะทางที่พลาสติกไหลในโพรงแบบ ความหนาของชิ้นงาน ความยาวของระบบป้อน เป็นต้น และเพื่อรักษาระดับความแตกต่างของอุณหภูมิแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมให้ได้ตามต้องการ น้ำหรือของเหลวอื่นๆ จะถูกส่งเข้าไปไหลเวียนในรูหรือร่องที่ทำขึ้นในแม่พิมพ์ รูหรือร่องที่ทำขึ้นนี้เรียกว่า ทางไหลของระบบหล่อเย็น หรือทางน้ำหล่อเย็น

ปัจจัยที่มีผลกับกระบวนการหล่อเย็น

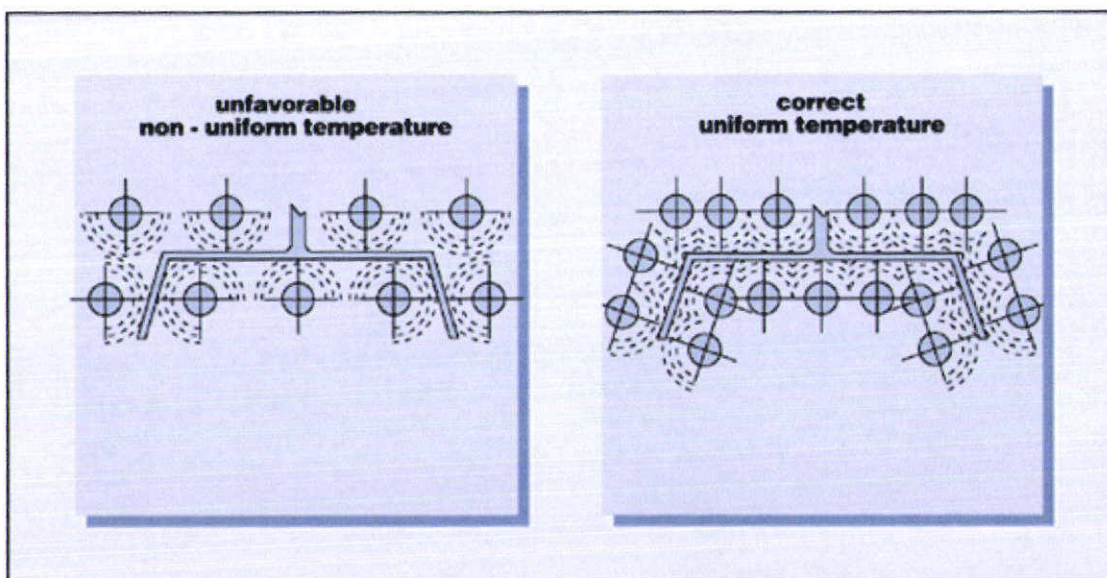
1. อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)
2. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperatures)
3. ความหนาของแม่พิมพ์ (Mold thicknesses)

3.15.6.1 การออกแบบระบบหล่อเย็น [9]

อุณหภูมิของแผ่นแม่พิมพ์แบบชั้นเดียว (Cooling integer-type plates) จะควบคุมโดยใช้น้ำไหลเวียนในรูที่เจาะไว้ในแผ่นแม่พิมพ์ โดยปกติจะเจาะทะลุถึงกันเพื่อต่อเป็นวงจรระบบหล่อเย็น วงจรนี้อาจเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ จำนวนชั้นขึ้นอยู่กับความหนาของแม่พิมพ์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะห่างของทางไหลน้ำหล่อเย็น ในระบบหล่อเย็น [34] ดังแสดงในรูปที่ 3.47 และในรูปที่ 3.48 โดยสามารถออกแบบระบบหล่อเย็นได้ ดังตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.47 รูปการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ โดยรูป (a) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ รูป (b) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอ [9]



รูปที่ 3.48 ลักษณะการออกแบบทางไหลของน้ำหล่อเย็น [1]

ตารางที่ 3.1 การออกแบบทางไหลน้ำหล่อเย็น [12]

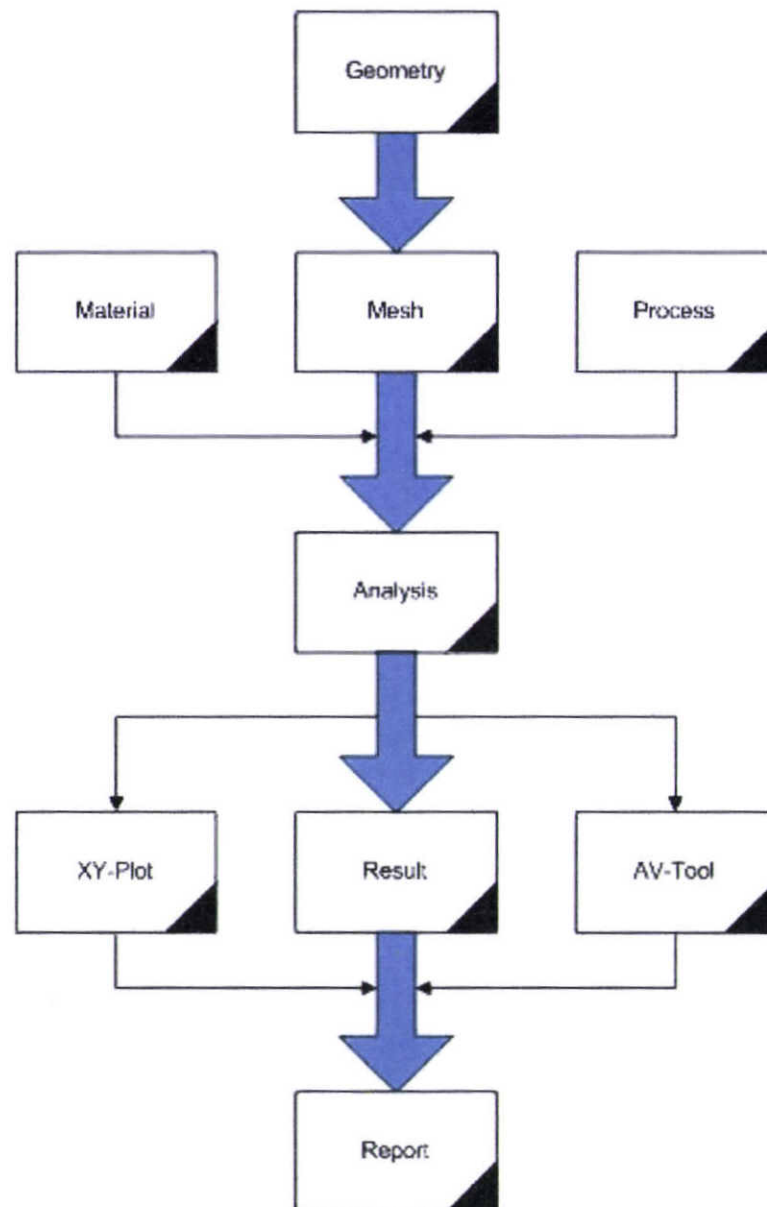
ความหนาของชิ้นงาน ;W (mm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของน้ำหล่อเย็น ; dT (mm)
2	5-10
4	10-12
6	12-15
ระยะห่าง C = 2-3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหล dT	
ระยะห่าง b = 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหล dT	
ในกรณีที่ไม่จำกัดในเรื่องของการออกแบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางไหลควรจะมากกว่า 1/3 ของระยะห่างระหว่างทางไหลแต่ละช่อง	

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D

4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D. R10

CAD/CAE ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการออกแบบและวิเคราะห์การผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก รวมถึงการปรับตั้งตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก (Processing parameter) เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยนำทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์มาใช้ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) ในการออกแบบชิ้นงานพลาสติก จากนั้นจึงทำการจำลองสภาวะการไหลของโพลีเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ (Computer Aided Engineering, CAE) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาเงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้ โดยสามารถจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกที่เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงการฉีด (Filling) การฉีดย้ำ (Packing) และการหล่อเย็น (Cooling) อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปัญหาหลังกระบวนการผลิตได้ เช่น การหดตัว (Shrinkage) เป็นต้น โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังรูปที่ 4.1 ซึ่งช่วยให้สามารถออกแบบการจำลองสภาวะการไหลของโพลีเมอร์ได้อย่างถูกต้อง

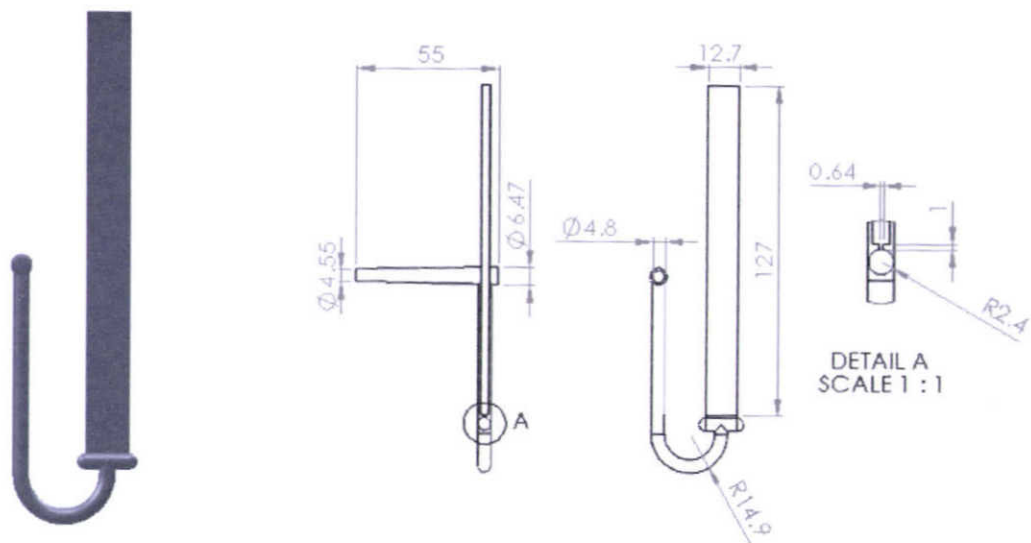
จากรูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D R10. จากรูปขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์โดยการนำชิ้นงานทดสอบที่สร้างจากโปรแกรม CAD (Computer Aided Engineer) ทำการนำข้อมูลเข้า (Insert geometry) เข้าในโปรแกรม Moldex3D/ Designer จากนั้นทำการสร้าง Mesh จากโปรแกรมที่เป็นแบบสามมิติ และทำการส่งออก (Export) ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D/eDesign ที่ทำการกำหนดชนิดวัสดุและเงื่อนไขการฉีด จากนั้นเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการจำลอง โดยผลการจำลองที่ได้อยู่ในรูป XY-Plot และAV-Tool



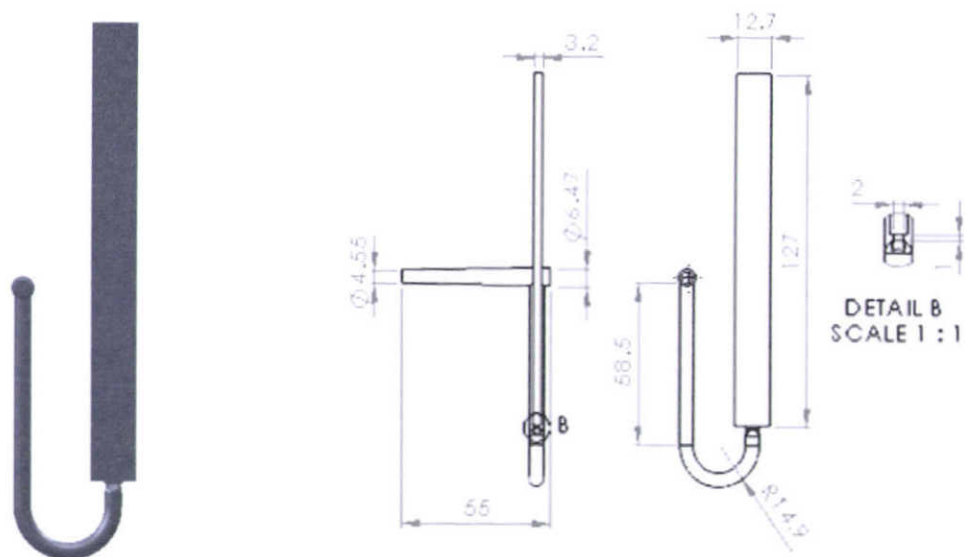
รูปที่ 4.1 ผังการทำงานของโปรแกรม moldex 3D R10.

4.1.1 ขั้นตอนการออกแบบ

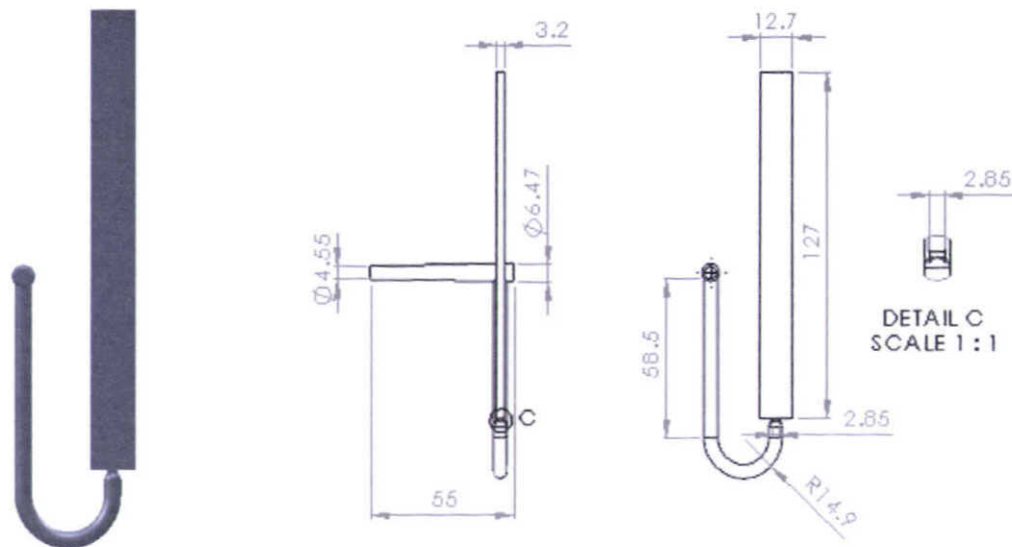
เริ่มจากการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมทางด้าน Computer Aided Engineer (CAD) ยกตัวอย่างเช่น CATIA, Pro/Engineer, Unigraphics, Solid Works เป็นต้น จากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบที่ตามมาตรฐาน ASTM D955-08 โดยมีทางเข้าแบบเข้าด้านข้าง 3 ลักษณะคือ ทางเข้าแบบฟิล์ม ทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม โดยสร้างแบบจำลองชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม Solid Works 2010 แบบจำลองชิ้นงานเป็นแบบสามมิติ (Solid Model) และส่งออกให้อยู่ในรูปของ STL file เพื่อทำการสร้าง Mesh จากโปรแกรม Moldex3D/ Designer ต่อไป



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate)

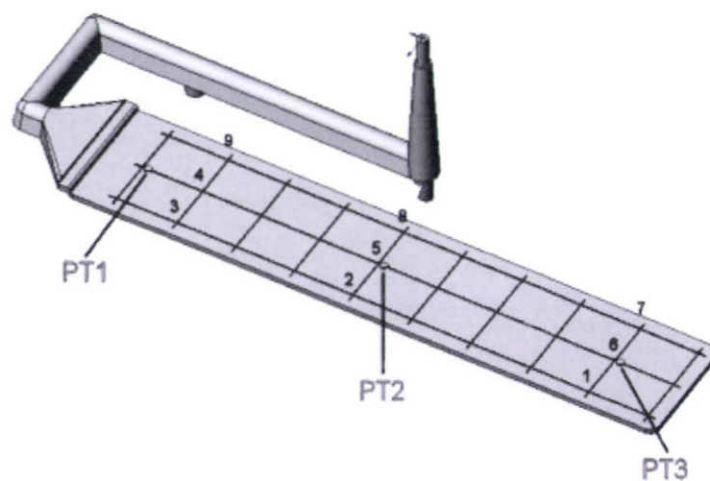


รูปที่ 4.3 ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบพัด (Fan gate)



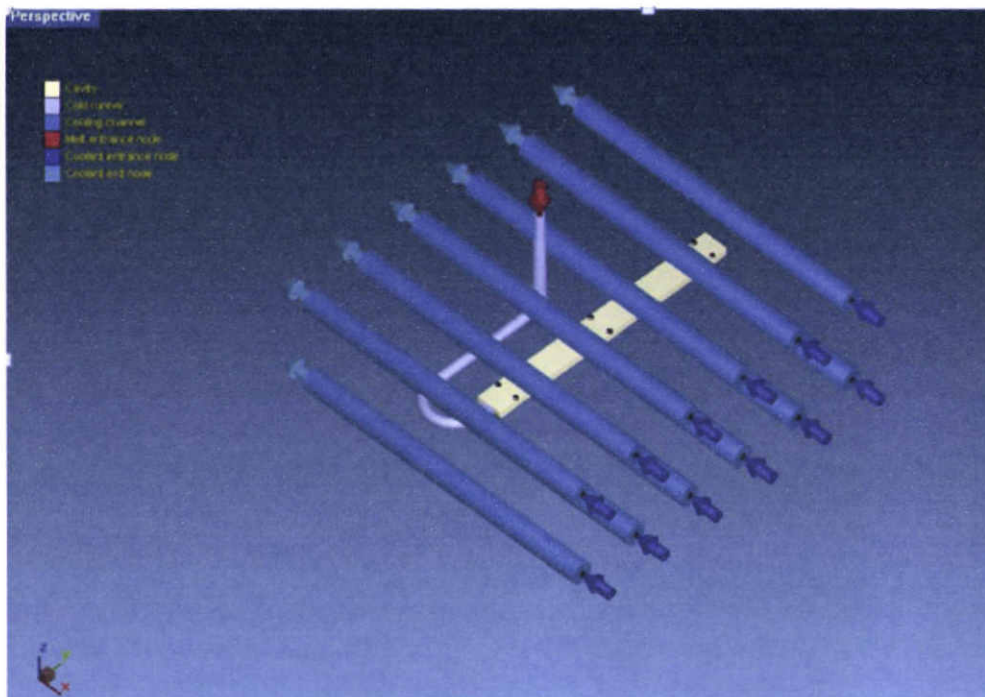
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate)

ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวของพลาสติกทั้งสามแบบ มีรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D955-08 มีขนาด 12.7×127×3.2 มิลลิเมตร [8] ตามรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ชิ้นงานทั้ง 3 แบบมีพื้นที่หน้าตัดของทางเข้ามีขนาดเท่ากัน โดยมีทางเข้าแบบฟิล์ม ทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ชิ้นงานทดสอบแบบทางเข้าแบบฟิล์ม ออกแบบตามคำแนะนำของ Mergen [9] ที่มีขนาดทางเข้าที่เหมาะสมกับขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D955-08 โดยขนาดทางเข้ามีความยาว 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร และความหนา 0.64 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบพัด มีขนาดทางเข้ายาว 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 4.06 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม มีขนาดทางเข้ายาว 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 2.85 มิลลิเมตร และความหนา 2.85 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 [3] โดยทั้งสามแบบในการทดลองนี้ออกแบบรูวิ่ง (Runner) ตามรูปแบบของ Kennedy [3] ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่เป็นการกระจายความดันในแม่พิมพ์



รูปที่ 4.5 แบบทดลองการหดตัวของ P.K. Kennedy [5]

ส่วนการวางท่อน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการหล่อเย็นชิ้นงานทดสอบเพื่อไม่ให้ชิ้นงานบิดงอ หรือเสียรูปทรง [10], [11] โดยทำการจัดวางตามการแนะนำของ Herbert [12] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ที่มีระยะจากชิ้นงานถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นมีระยะ (C) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และระยะห่างของท่อน้ำหล่อเย็นมีระยะ (b) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร ที่ออกแบบดังตามตารางที่ 3.1



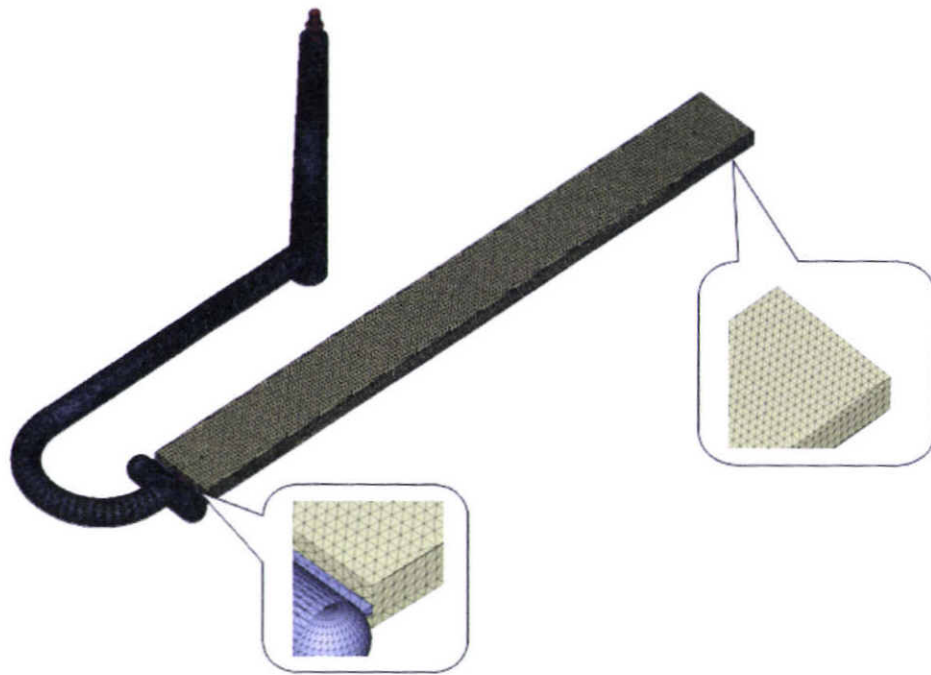
รูปที่ 4.6 การวางท่อน้ำหล่อเย็น

4.1.2 แบบจำลองสำหรับใช้วิเคราะห์ CAE

ชิ้นงานทั้งสามแบบสร้างเป็น Solid Model โดยโปรแกรม Solid Work 2010 โดยแปลง Solid Model ให้อยู่ในรูปแบบของ STL File แล้วส่งเข้า (Import file) มายังโปรแกรม Moldex3D/Designer เพื่อทำการวางท่อน้ำหล่อเย็น และสร้าง Mesh Model ที่มีจำนวน Mesh ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดย Mesh เป็นแบบสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นส่งออก (Export file) ไปยังโปรแกรม Moldex3D/eDesign สำหรับการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก [1]

Item	Value
Cavity mesh node...	119,243
Cavity mesh elem...	106,297
Cavity mesh volume	5.16 (cc)
Meshing level	2
Mesh reliability level	high
Runner mesh nod...	93,021
Runner mesh ele...	107,805
Runner mesh volu ...	3.36 (cc)

รูปที่ 4.7 จำนวน Mesh



รูปที่ 4.8 การสร้าง Mesh Model แบบสามมิติ [1]

4.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีด

เพื่อให้ชิ้นงานที่ทำการฉีดมีคุณภาพที่ดี จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขที่สำคัญในการฉีดโดยจะพิจารณาเงื่อนไขดังต่อไปนี้

4.2.1 อุณหภูมิพลาสติกเหลว

อุณหภูมิพลาสติก เป็นอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดในขณะที่ทำการฉีดอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลาสติกชนิด HDPE (High Density Polyethylene) เกรด MARLAX 50100 ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 232 - 268 °C

4.2.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์

ในการควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิหรือน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์ ซึ่งอุณหภูมิในการปรับตั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก โดยในงานวิจัยนี้ใช้พลาสติกชนิด HDPE และเหล็กทำแม่พิมพ์ เกรด S50C และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 35 °C

4.2.3 เวลาในการฉีด

เวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ ผู้ปฏิบัติการจะไม่สามารถจะปรับตั้งได้โดยตรงที่ตัวเครื่องฉีด เพราะจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรู (ความเร็วฉีด) ความดัน และระยะทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าตัวป้อน

4.2.4 ความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีด เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรู เพื่อดันพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีดจะเกิดควบคู่ไปกับความดันฉีด เพราะต้นกำลังมาจากจุดเดียวกัน ความเร็วในการฉีดจะเป็นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วในการฉีดสูงขึ้นความดันฉีดก็จะมากขึ้นตาม แต่ไม่เกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้กับเครื่องฉีดพลาสติก

4.2.5 ความดันในการฉีด

ในการพิจารณาใช้ความดันฉีด โดยผลกระทบต่อความดันในการฉีดจะเกิดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ

1. ความสามารถในการไหลของพลาสติก เช่น ชนิดของพลาสติก ความหนืดของพลาสติก หลอมเหลวหรือค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI) อุณหภูมิของพลาสติก
2. อุปกรณ์ต่างๆ ในกระบอกฉีดและหัวฉีด เช่น ขนาดของรูฉีด ความยาวของหัวฉีด และอุณหภูมิของหัวฉีด
3. อุปกรณ์ต่างๆ ในแม่พิมพ์ เช่น ขนาดช่องทางการไหลในแม่พิมพ์ในส่วนของ ขนาดของรู วิ่ง ขนาดของทางเข้า ระยะการไหลของพลาสติกเหลว ขนาดของชิ้นงานฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ และคุณภาพความเรียบของผิวหน้าแม่พิมพ์

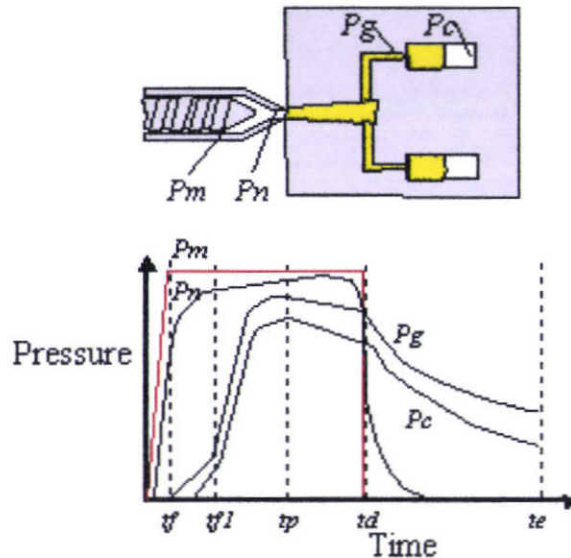
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นได้ในหลายส่วน ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ดังแสดงในรูปที่ 4-9 จากรูปแสดงความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการฉีด ดังนี้

P_m คือความดันเริ่มต้น ซึ่งอยู่บริเวณสกรูฉีด

P_n คือความดันที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าก่อนฉีดเข้าแม่พิมพ์

P_g คือความดันที่เกิดขึ้น บริเวณทางเข้าของพลาสติก

P_c คือความดันที่เกิดขึ้นภายในตัวแม่พิมพ์ ขณะทำการฉีด



รูปที่ 4.9 ความดันที่เกิดขึ้นขณะฉีดพลาสติกที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 แสดงความดันที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นได้ว่าความดันที่จุด p_m เป็นความดันเริ่มต้นในการฉีดที่ส่งความดันไปยังจุด p_n ที่เป็นหัวฉีดจากรูปจะเห็นว่าเป็นส่วนที่แคบที่เป็นอุปสรรคในการไหลของพลาสติกจึงส่งผลให้ความดันลดลงเล็กน้อย จากนั้นน้ำพลาสติกไหลไปที่จุด p_g เป็นบริเวณทางเข้า (Gate) ของชิ้นงานที่เป็นส่วนที่เล็กที่สุดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นอุปสรรคในการไหลผ่านของพลาสติกหลอมเหลว และเกิดการสูญเสียอุณหภูมิที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกหลอมเหลวบริเวณทางเข้า และบริเวณปลอกนำฉีด (Sprue bush) ที่ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นอุปสรรคในการไหลของพลาสติกหลอมเหลว และจุด p_c เป็นความดันในแม่พิมพ์จากรูปจะสังเกตได้ว่าเป็นจุดที่ความดันลดน้อยลงที่สุด ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกหลอมเหลวจากปลอกนำฉีด ทางเข้า ซึ่งส่งผลให้ความหนืดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงต้านในการไหลมากจึงส่งผลให้ความดันลดลงมาก

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เม็ดพลาสติกใช้ในการทดลอง High-density-polyethylene (HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด MARLEX HXM 50100 โดยมีคุณสมบัติแสดง ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกชนิด High-density-polyethylene เกรด MARLEX HXM 50100

Description	
Polymer	HDPE
Grade Name	MARLEX HXM50100
Producer	Chevron Phillips
Comment	MFI(190, 21.6)=10g/10min, MVR(190,2.216)=9, D=0.949
Last modified date	2008/06/30
Process condition	
Melt temperature (minimum)	232 °C
Melt temperature (normal)	250 °C
Melt temperature (maximum)	268 °C
Mold temperature (minimum)	25 °C
Mold temperature (normal)	35 °C
Mold temperature (maximum)	50 °C
Ejection temperature	112 °C
Freeze temperature	132 °C

5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD (Solid work 2010) และ CAE (Moldex 3D R10.) ที่เป็นโปรแกรมออกแบบจำลองและใช้ในการวิเคราะห์การไหลในแม่พิมพ์ตามลำดับ โดยจะวิเคราะห์พฤติกรรมของพลาสติกในระหว่างการขึ้นรูปขึ้นงานฉีดพลาสติกตั้งแต่ช่วงเวลาในการฉีดพลาสติก

(Filling) การฉีดเข้า (Packing) และการเย็นตัว (Cooling) จนถึงอุณหภูมิห้อง (Ambient temperature) เพื่อศึกษาค่าการหดตัวของชิ้นงานทดสอบ ทั้งในทิศทางการไหล (In flow shrinkage) และทิศทางตั้งฉากกับการไหล (Cross flow shrinkage) ที่มีทางเข้าแบบ Film gate Fan gate และ Edge gate

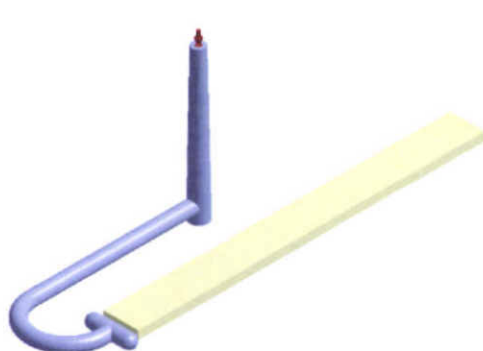
เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) จากประเทศญี่ปุ่น:
Model: TOSHIBA IS 80 EPN มีรายละเอียดดังนี้

1. แรงปิดล็อกแม่พิมพ์	80 Ton
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู	32 mm
3. ปริมาตรการฉีดสูงสุด	142 g
4. ความดันสูงสุดในการฉีด	199 MPa
5. อัตราฉีด	112 cm^3 / sec

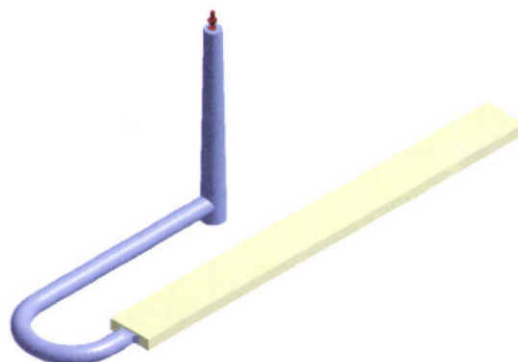
5.2 แบบจำลอง (Model) ของชิ้นงานและแม่พิมพ์

5.2.1 แบบจำลองของชิ้นงาน

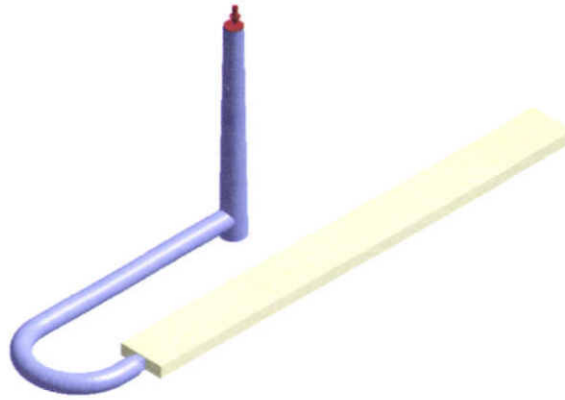
รูปร่างชิ้นงานเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D955-08 ขนาดความยาว 127 มม. กว้าง 12.7 มิลลิเมตร ชิ้นงานจะถูกสร้างเป็น Solid model โดยโปรแกรม Solid work 2010 ให้มีขนาดตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 โดยชิ้นงานที่ 5.1 (Model 1) มีทางเข้าแบบ Film gate ออกแบบตามคำแนะนำของ Menges (Menges G., and Mohren P. 1986) มีทางเข้ายาว 1 มิลลิเมตร ความหนา 0.64 มิลลิเมตร ความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร และมียาวตลอดความกว้างของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานที่ 5.2 (Model 2) มีทางเข้าแบบ Fan gate มีขนาดความยาว 3 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร และความกว้าง 4.06 มิลลิเมตร และชิ้นงานทดสอบที่ 5.3 (Model 3) มีทางเข้าแบบ Edge gate มีขนาดความยาว 1 มิลลิเมตร ความหนา 2.85 มิลลิเมตร และความกว้าง 2.85 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.1 แบบจำลอง Film gate



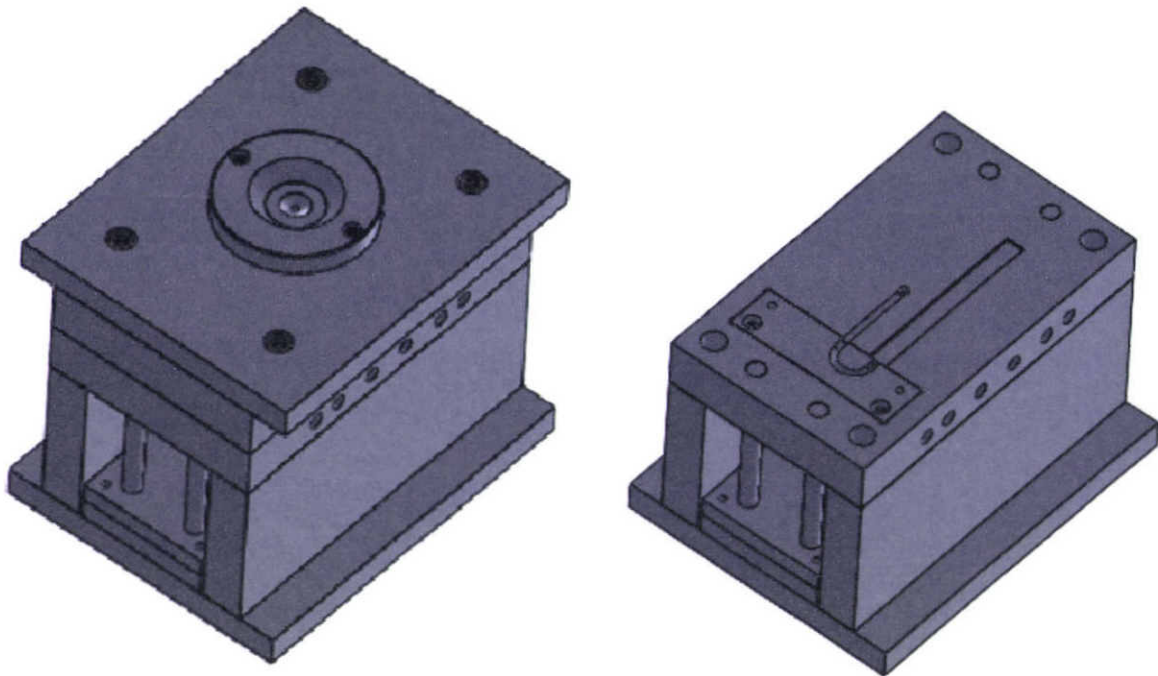
รูปที่ 5.2 แบบจำลอง Fan gate



รูปที่ 5.3 แบบจำลอง Edge gate

5.2.2 ลักษณะของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955-08

1. มี 1 คาวิตี
2. Gate เข้าด้านข้างสามารถเปลี่ยนแบบทางเข้าได้ (Multiple gates)
3. Sprue bushing ยาว 55 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.55 มิลลิเมตร เรียว 1 องศา
4. แม่พิมพ์ชนิด 2 แผ่น ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร สูง 210 มิลลิเมตร
5. มีระบบปลดขึ้นงานใช้เข็มกระทุ้ง
6. มีระบบการหล่อเย็นทั้งตัวผู้และตัวเมีย (Cooling channel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
7. ระบบรูวิ่งแบบ 1 สาขา และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.4 ลักษณะแม่พิมพ์ฉีดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955-08 (ซ้าย) และลักษณะโพรงแบบ (ขวา)

5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบพลาสติก

ในการทดสอบการฉีดชิ้นงานทั้งสามแบบใช้พารามิเตอร์เดียวกัน โดยทำการฉีดให้พลาสติกไหลเต็มแบบด้วยเวลาดั้งแต่ 0.1 วินาที จนถึง 10 วินาที ใช้ Packing pressure 70% ของ Filling pressure สุดท้ายก่อนเต็มแบบ ทำการเปลี่ยนความดันจาก Filling pressure เป็น Packing pressure ที่ 99% ของปริมาตรโพรงแบบ (Cavity) วัสดุที่ใช้เป็น HDPE เกรด MARLEX HXM 50100 ที่มีอัตราการไหล 10g/10 min และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.949 g/cm^3 จากบริษัท Chevron Phillips โดยพื้นที่หน้าตัดและขนาดทางเข้าชิ้นงานแบบที่ 1 2 และ 3 แสดงในตารางที่ 5.2 และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบชิ้นงานทั้งสามแบบแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 พื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและขนาดของชิ้นงานฉีด

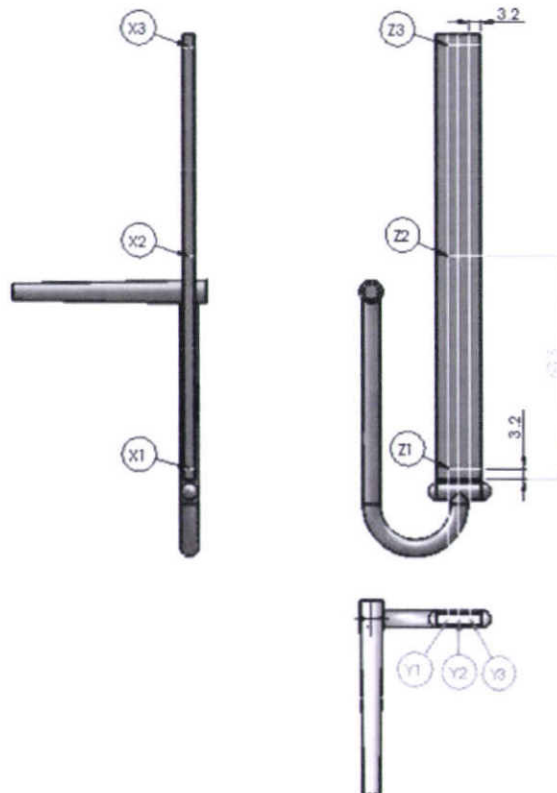
แบบชิ้นงาน	ทางเข้า	พื้นที่หน้าตัด (ตาราง มิลลิเมตร)	อัตราส่วน พื้นที่หน้าตัด ต่อเส้นรอบ รูปทางเข้า	มิติของทางเข้าสู่โพรงแบบ (มิลลิเมตร)		
				กว้าง (มิลลิเมตร)	ยาว (มิลลิเมตร)	สูง (มิลลิเมตร)
ชิ้นงานแบบที่ 1	Film gate	8.12	0.304	12.7	1	0.64
ชิ้นงานแบบที่ 2	Fan gate	8.12	1.000	2.06	1	2
ชิ้นงานแบบที่ 3	Edge gate	8.12	0.712	2.85	1	2.85

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบชิ้นงานฉีด

Material	HDPE						
Filling time (s)	0.14	0.26	0.5	1	2.5	5	10
Packing time (s)	13	13	13	13	13	13	13
Cooling time (s)	30	30	30	30	30	30	30
Melt Temp. ($^{\circ}$)	250	250	250	250	250	250	250
Mould Temp. ($^{\circ}$)	35	35	35	35	35	35	35
No Flow Temp. ($^{\circ}$)	132	132	132	132	132	132	132
Ejection Temp. ($^{\circ}$)	112	112	112 </td <td>112</td> <td>112</td> <td>112</td> <td>112</td>	112	112	112	112
Cooling Circuits Flow Rate (cm/s)	120	120	120	120	120	120	120
Cooling Circuits inlet Temp. ($^{\circ}$)	35	35	35	35	35	35	35

5.4 การวัดชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติก

โดยนำชิ้นงานฉีดที่ได้จากการฉีดตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม Moldex 3D R10. แล้วทำการวัดขนาดชิ้นงาน เพื่อคำนวณค่าการหดตัวของพลาสติก โดยทำการทดลองซ้ำพารามิเตอร์ละ 10 ครั้ง โดยทำการวัด 3 จุดต่อหนึ่งทิศทางตามระยะ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5.5 ชิ้นงานตัวอย่างและตำแหน่งการวัดของชิ้นงานทดสอบ

เมื่อ X เป็นความกว้างของชิ้นงาน หรือแนวตั้งฉากกับการไหล

Y เป็นความยาวของชิ้นงาน หรือตามทิศทางการไหล

Z เป็นความหนาของชิ้นงาน หรือแนวตั้งฉากกับการไหล

สำหรับทิศทางตั้งฉากการไหล ทางทิศทางแกน Y และทิศทางแกน Z

1. จุดที่ Y1, Z1 บริเวณใกล้ทางเข้า Gate เนื่องจากมีค่าการหดตัวน้อยที่สุด
2. จุดที่ Y2, Z2 บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน
3. จุดที่ Y3, Z3 บริเวณปลายชิ้นงาน (End of Flow) เนื่องจากมีค่าการหดตัวมากที่สุด

สำหรับทิศทางขนานการไหล ทางทิศทางแกน X

4. จุดที่ X1 มีระยะห่างจากขอบด้านใน 3.2 มิลลิเมตร
5. จุดที่ X2 มีระยะห่างจากขอบด้านนอก 63.5 มิลลิเมตร
6. จุดที่ X3 มีระยะห่างจากขอบด้านนอก 3.2 มิลลิเมตร

5.5 ผลการทดลอง

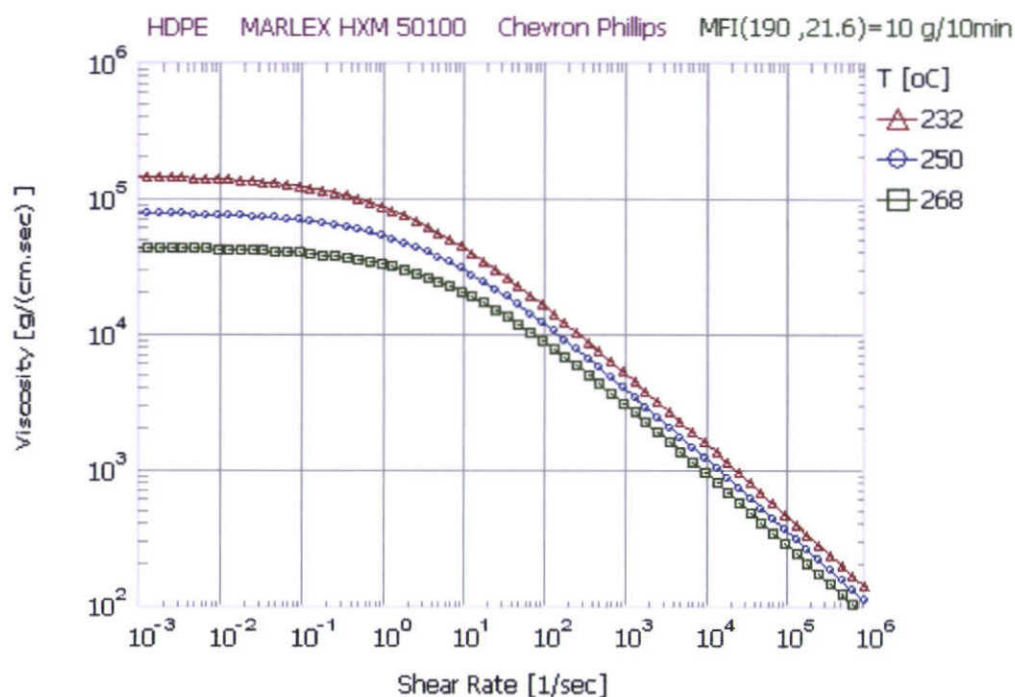
จากการทดลองจำลองการฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex3D R10 โดยมีเงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบ ด้วยเวลา (Filling time) 0.14, 0.27, 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ และเงื่อนไขอื่นๆ ตามตารางที่ 5.3 โดยผลการทดลองแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการหดตัวจากโปรแกรม Moldex 3D R10. โดยทำการทดสอบพฤติกรรมของการหดตัวจากการทำนายผลความหนืด จากสมการ Cross model 2 ดังสมการที่ 3.9 กับ Power law model ดังสมการ 3.5 ผลลัพธ์ที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับกรณีฉีด ชิ้นงานทดสอบจริงจากการสร้างแม่พิมพ์ฉีดเพื่อทดสอบแบบจำลอง ดังรูปที่ 5.4 และทำการวัดค่าการหดตัวดัง รูปที่ 5.5 ที่สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว ดังสมการที่ 2.2

ผลการทดลองการหดตัวระหว่าง Cross model 2 กับ Power law model

จากการทดลองจำลองการฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex3D R10 โดยมีเงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบ ด้วยเวลา (Filling time) 0.144, 0.231, 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนความดัน ฉีดเป็นความดันฉีดย้ำที่ 99% ในการเติมเต็มโพรงแบบ และทำการรักษาความดันฉีดย้ำ 70 % ของความดัน ฉีด ส่วนเงื่อนไขอื่นๆ ตามตารางที่ 5.3 ในชิ้นงานทั้งสามแบบ ได้ผลการหดตัวเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามทิศทางแกน X ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 5.11 ได้ผลการหดตัวเฉลี่ยตามทิศทางการไหลตาม ทิศทางแกน Y ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 5.12 และได้ผลการหดตัวเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากการ ไหลตามทิศทางแกน Z ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 5.13

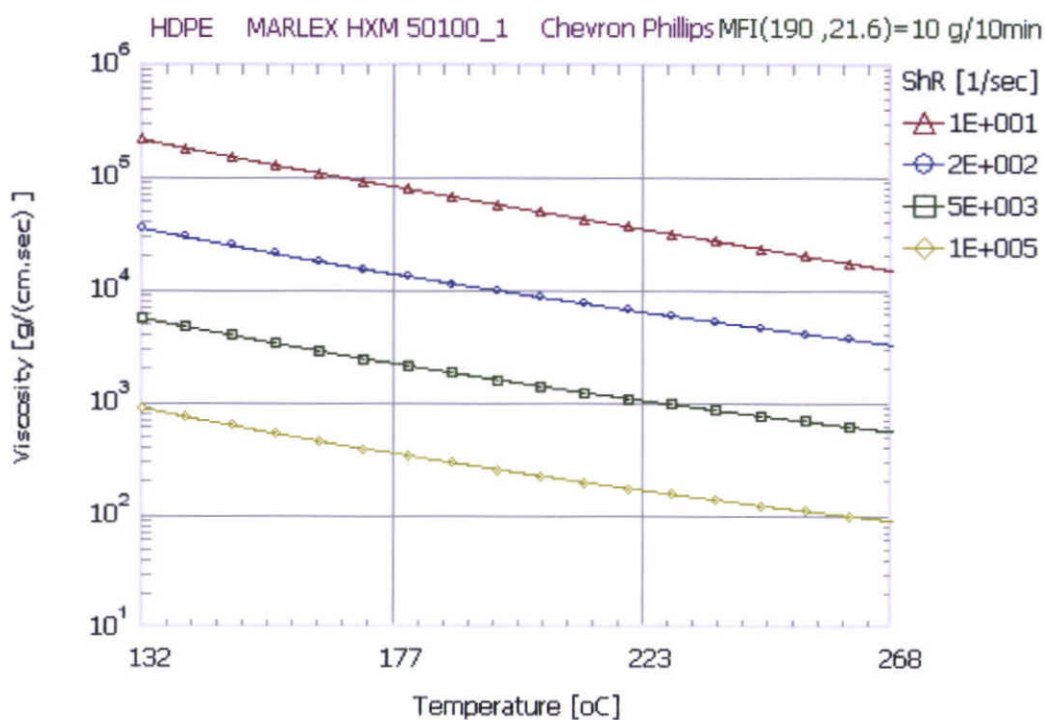
เปรียบเทียบผลอัตราเฉือนและความหนืดระหว่าง Cross model 2 กับ Power law model จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.8 นั้นเป็นผลที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืดที่อัตราการไหลต่างๆ กับอุณหภูมิพลาสติกเหลวที่ 232°C 250°C และ 268°C ของพลาสติกชนิด High-density-polyethylene

(HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด MARLEX HXM 50100 การหาค่าความหนืดเริ่มต้นในรูปแบบของ Cross model 2 และ Power law model ดังตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

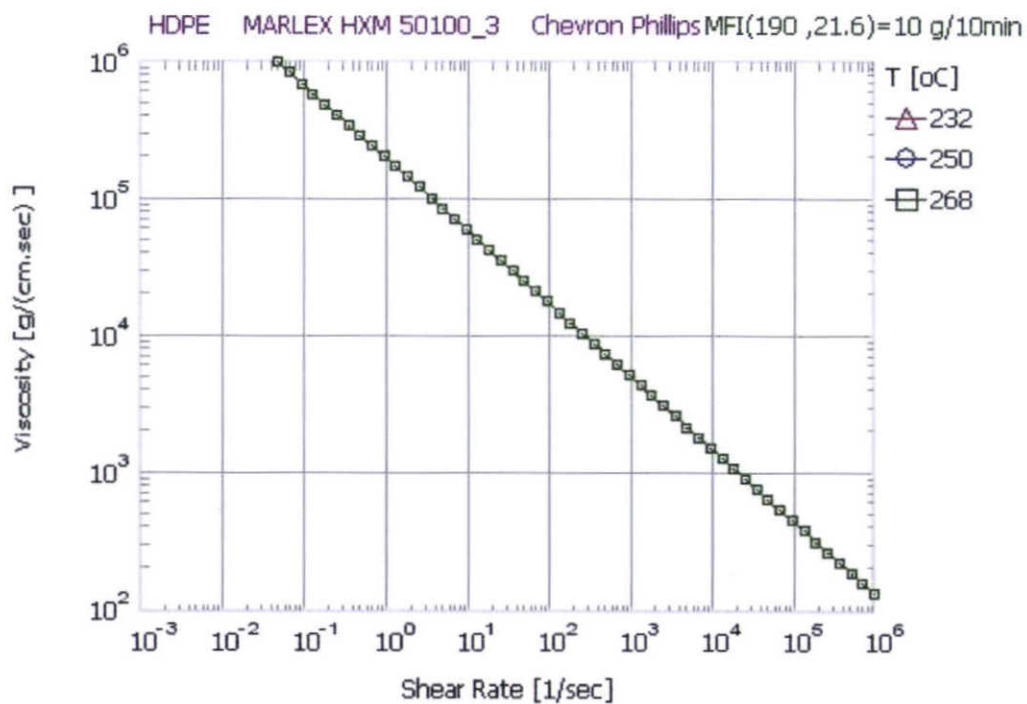


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด Cross-Model 2

จากรูปที่ 5.6 เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิข้อยลงส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมการความหนืดของ Cross model 2 มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ T_b มาก จึงตอบสนองกับอุณหภูมิดีดี และอัตราเฉือนมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดลดลง เนื่องจากการไหลแบบเฉือนที่ส่งผลให้อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือน แสดงดังรูปที่ 5.7 ที่เป็นไปตามสมการที่ 3.9

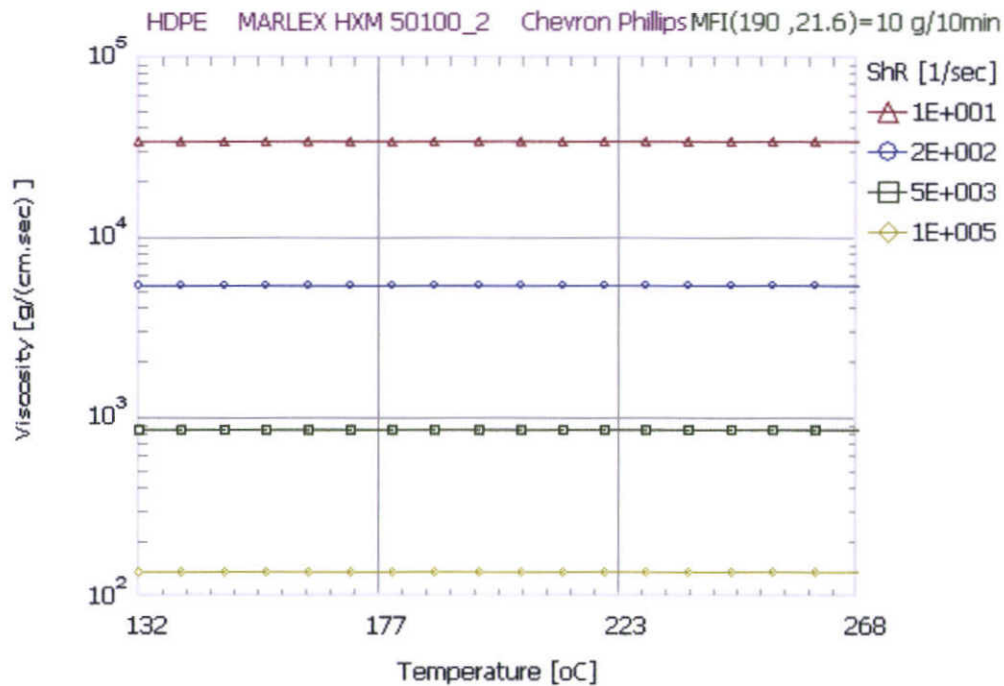


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืด Cross-model 2



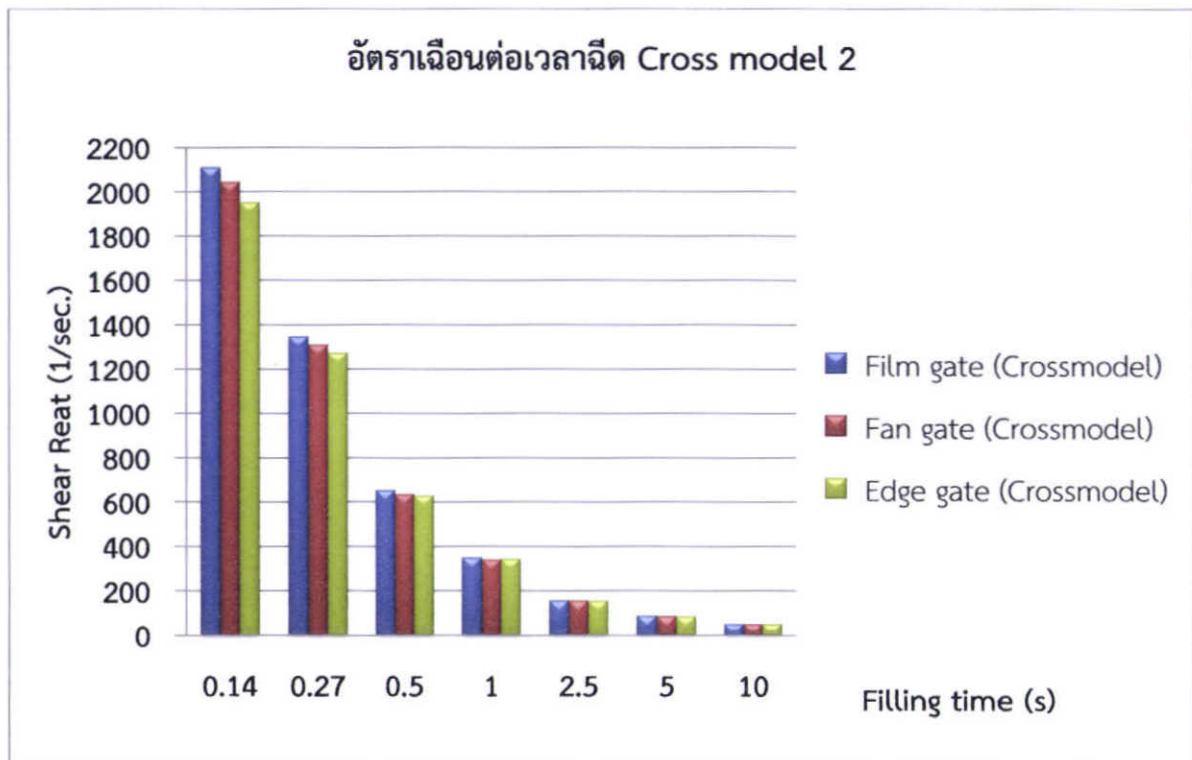
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด Power law model

จากรูปที่ 5.8 เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิห้องส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากสมการความหนืดของ Power law model มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ T_b น้อย จึงตอบสนองกับอุณหภูมิด้านน้อยมาก ที่อุณหภูมิลดลงแต่ความหนืดลดลงน้อยมาก และอัตราเฉือนมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดลดลง เนื่องจากเป็นการไหลแบบเฉือนที่ส่งผลให้อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือน แสดงดังรูปที่ 5.9 ที่เป็นไปตามสมการที่ 3.5

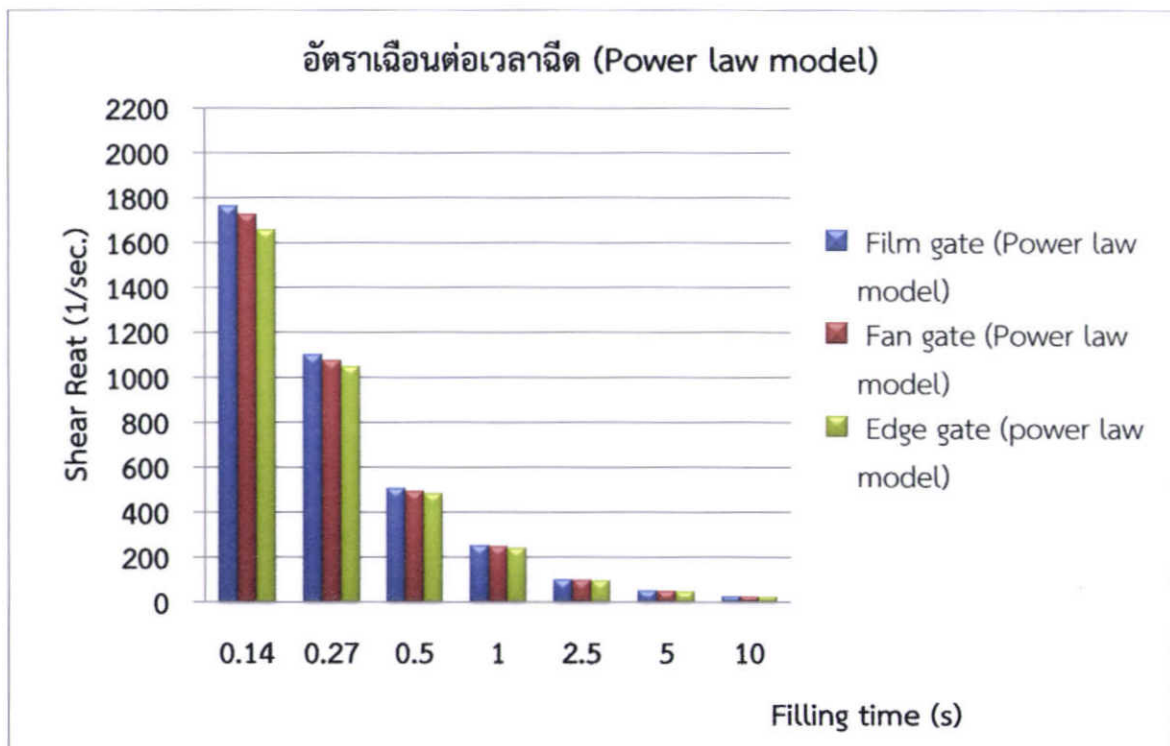


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืด Power law model

จากแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross-model 2 ผลที่ได้ดังรูปที่ 5.10 และผลการทดลองแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11 อัตราเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามความเร็วฉีด โดยที่ เวลาเต็มเต็มแบบ 0.14 0.27 และ 0.5 วินาที ชิ้นงาน Film gate มีอัตราเฉือนมากกว่าชิ้นงานแบบ Fan gate และชิ้นงานแบบ Edge gate และเวลาเต็มเต็มแบบ 1 2.5 5 และ 10 วินาที มีอัตราเฉือนของชิ้นงานทั้งสามแบบใกล้เคียงกัน

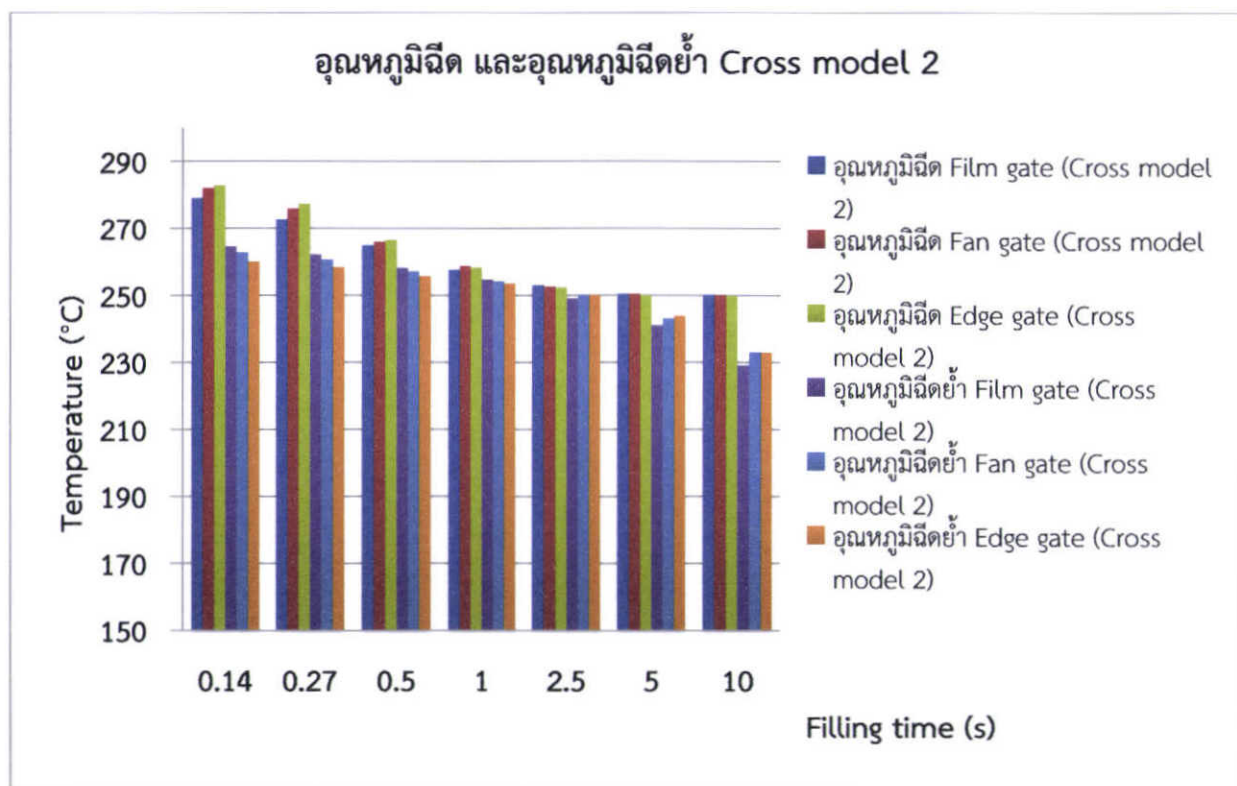


รูปที่ 5.10 อัตราเฉือนต่อเวลาฉีดชนิดฉีด (Cross model 2)



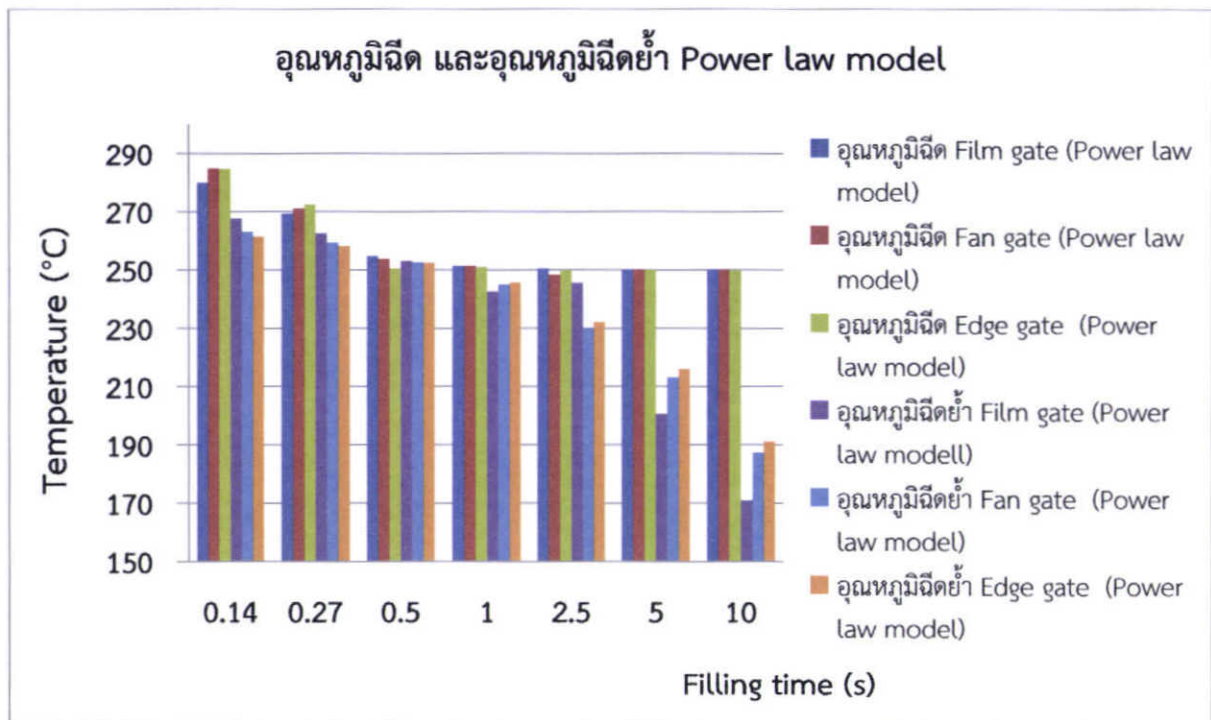
รูปที่ 5.11 อัตราเฉือนต่อเวลาฉีด (Power law model)

โดยที่อัตราเฉือน แบบจำลองรูปแบบสมการ Cross-model 2 มีค่าอัตราเฉือนมากกว่าแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model เนื่องจากแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross-model 2 มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดีกว่ารูปแบบสมการ Power law model ดังสมการที่ 3.10 จึงส่งผลให้แบบจำลองรูปแบบสมการ Cross-model 2 อัตราเฉือนในช่วงอุณหภูมิต่ำมีความหนืดที่มากกว่ารูปแบบสมการ Power law model แสดงดังรูปที่ 5.7 และแสดงดังรูปที่ 5.9 โดยผลของอุณหภูมิ และอุณหภูมิเฉื่อยของแบบจำลอง Cross model 2 แสดงดังรูปที่ 5.12 และผลของอุณหภูมิ และอุณหภูมิเฉื่อยของแบบจำลอง Power law model แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 อุณหภูมิเฉิด และอุณหภูมิเฉื่อยต่อเวลาเฉิด (Cross model 2)

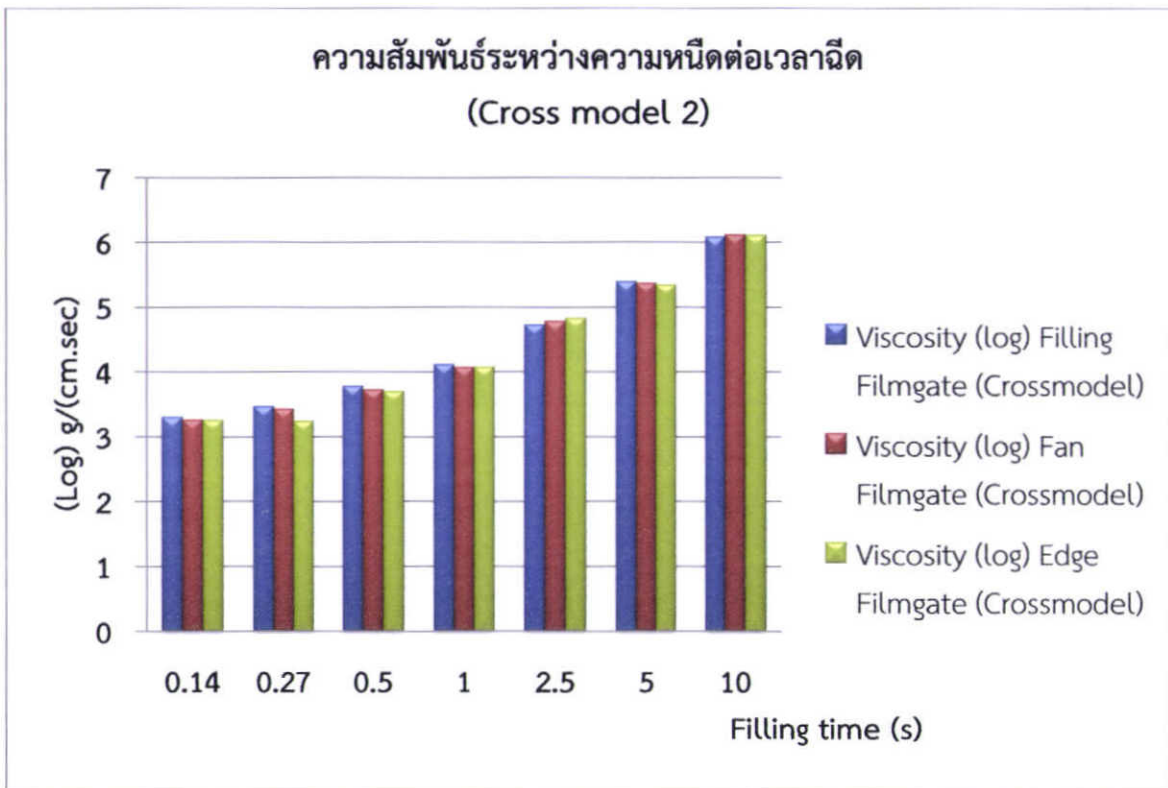
จากรูปที่ 5.12 พบว่าอุณหภูมิเฉิดที่เวลาเติมเต็มแบบ 0.14 0.27 0.5 2.5 และ 1 วินาที มีแนวโน้มลดลงตามความเร็วเฉิดที่ลดลง และที่ 5 และ 10 วินาที อุณหภูมิเฉิดเท่ากันที่ 250°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉิดที่ใช้เริ่มต้นในการเฉิด ส่วนอุณหภูมิเฉื่อยนั้นลดลงตามความเร็วเฉิดที่ลดลง จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิชิ้นงานเฉิดมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้เฉิด เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอัตราเฉือนที่สูงขึ้น



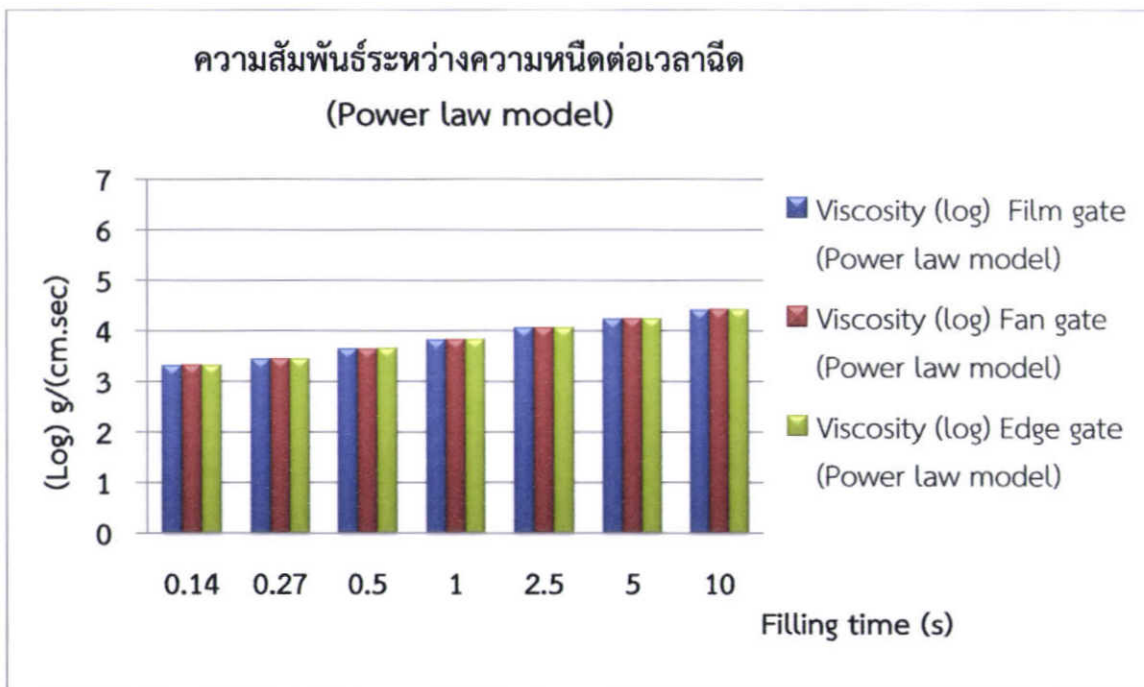
รูปที่ 5.13 อุณหภูมิฉีดยา และอุณหภูมิฉีดยาต่อเวลาฉีดยา (Power law model)

จากรูปที่ 5.13 พบว่าอุณหภูมิฉีดยาที่เวลาเติมเต็มแบบ 0.14 0.27 0.5 2.5 และ 1 วินาที มีแนวโน้มลดลงตามความเร็วฉีดยาที่ลดลงมากกว่า และที่ 5 และ 10 วินาที อุณหภูมิฉีดยาเท่ากันที่ 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิฉีดยาที่ใช้เริ่มต้นในการฉีดยา ส่วนอุณหภูมิฉีดยานั้นลดลงตามความเร็วฉีดยาที่ลดลงและน้อยกว่าแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross-model 2 จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิชิ้นงานฉีดยามีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ฉีดยาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอัตราเฉือนที่สูงขึ้นที่ส่งผลให้ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวน้อย และที่เวลาเติมเต็มแบบ 1 2.5 5 และ 10 อุณหภูมิลดลงเนื่องจากอัตราเฉือนที่ลดลงส่งผลให้ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวมากขึ้น

จากรูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อความเร็วฉีดยาแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross model 2 และรูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อความเร็วฉีดยาแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model พบว่าความหนืดที่ความเร็วฉีดยา 0.14 0.27 0.5 2.5 และ 1 วินาที ชิ้นงานแบบ Film gate มีความหนืดมากกว่าชิ้นงานแบบ Fan gate และชิ้นงานแบบ Edge gate เล็กน้อยเนื่องจากชิ้นงานแบบ Film gate มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานแบบ Fan gate และชิ้นงานแบบ Edge gate เนื่องจากชิ้นงานแบบ Film gate มีขนาดทางเข้าที่มีเส้นรอบวงมากกว่าจึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ดังตารางที่ 5.2 และพบว่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วฉีดยาที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 5.10 ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลให้อุณหภูมิลดลง แสดงดังรูปที่ 5.12



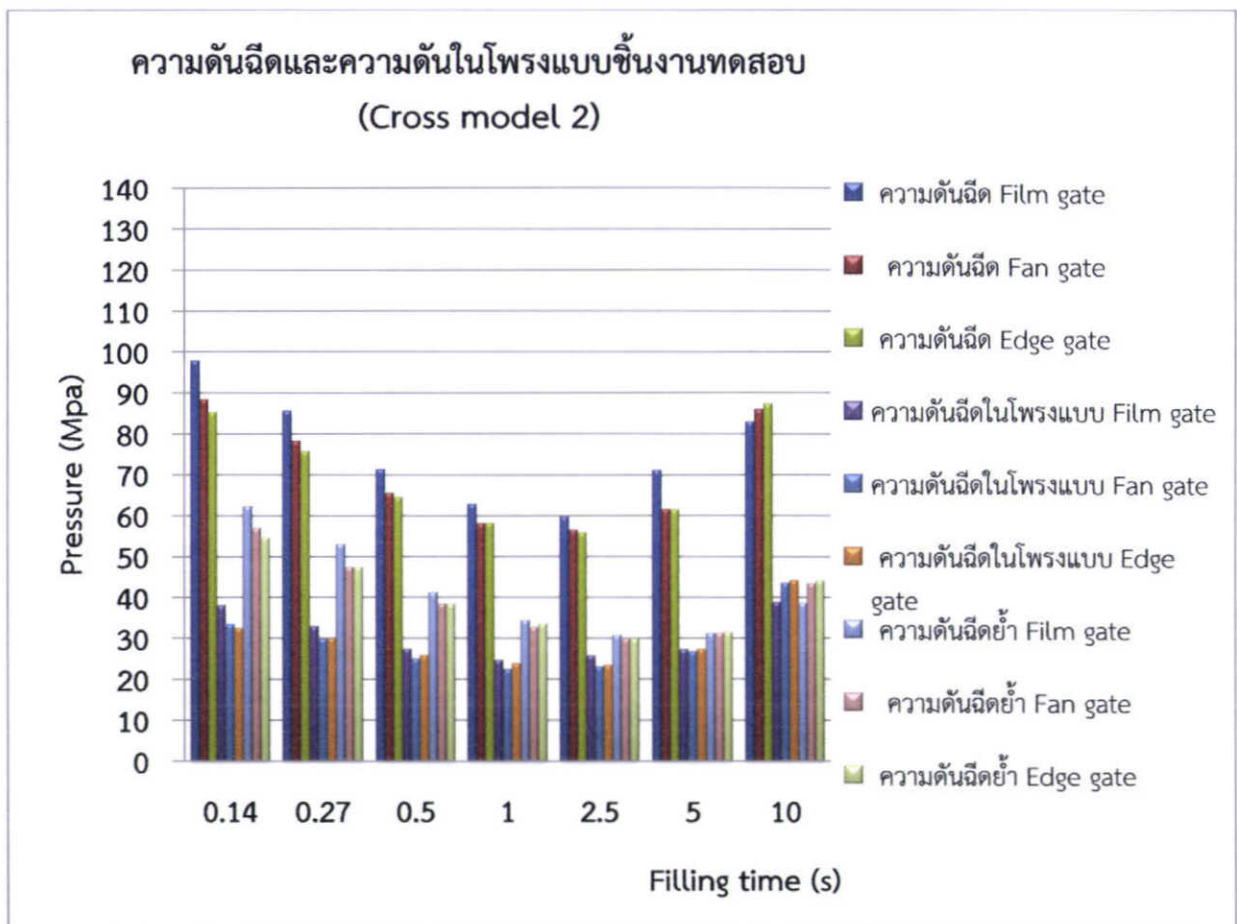
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อเวลาฉีด (Cross model 2)



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อเวลาฉีด (Power law model)

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดต่อความเร็วฉีดแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross model 2 และแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 พบว่าความ

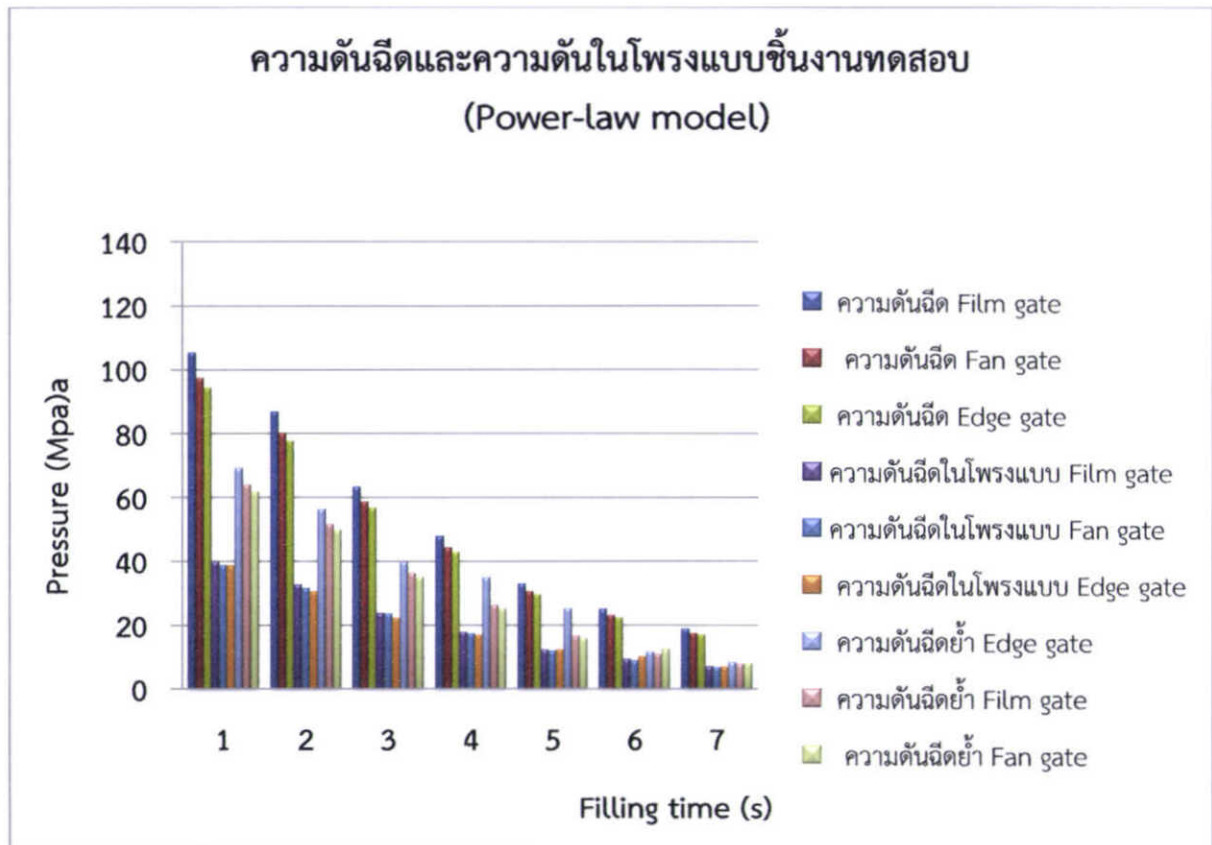
หนืดที่ความเร็วฉีด 0.14 มีค่าความหนืดของแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model มากกว่ารูปแบบสมการ Cross model 2 เล็กน้อย และที่ความเร็วฉีด 0.27 0.5 2.5 1 5 และ 10 มีค่าความหนืดของแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model มีค่าน้อยกว่ารูปแบบสมการ Cross model 2 มาก เนื่องจากสมการ Power law model นั้นมีค่าตอบสนองต่ออุณหภูมิที่น้อย ดังรูปที่ 5.9 จึงส่งผลให้แบบจำลองรูปแบบสมการ Cross model 2 มีค่าความหนืดที่มากกว่าที่ส่งผลโดยตรงต่อความดัน เนื่องจากความหนืดเป็นปัจจัยต่อการไหลของพลาสติกหลอมเหลว โดยผลความดันฉีด และความดันในโพรงแบบจากการทดลองแบบจำลองรูปแบบสมการ Cross model 2 แสดงดังรูปที่ 5.16 และผลความดันฉีด และความดันในโพรงแบบจากการทดลองแบบจำลองรูปแบบสมการ Power law model แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดันฉีดย้ำ ของชิ้นงานฉีด (Cross model 2)

จากรูปที่ 5.16 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดันฉีดย้ำ ของชิ้นงานฉีด Cross model 2 พบว่าที่ความเร็วฉีด 0.14 0.27 0.5 และ 1 วินาที ตามลำดับ ความดันฉีดและความดันในโพรงแบบ มีแนวโน้มลดลงตามความเร็วฉีด โดยที่ชิ้นงานแบบ Film gate มีความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดันฉีดย้ำมากกว่าชิ้นงานแบบ Fan gate และ Edge gate เนื่องจากชิ้นงานแบบ Film gate มีการถ่ายเทความร้อนมากกว่า ดังรูปที่ 5.12 ที่ส่งผลให้ความหนืดมากกว่าชิ้นงานแบบ Fan gate และ Edge gate ดังรูปที่ 5.14 ที่ส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากในกระบวนการฉีดที่กำหนดเวลาในการฉีดไว้ และการฉีดด้วยความเร็วช้า ที่ความเร็วฉีด 2.5 5 และ 10 วินาที มีแนวโน้มความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดัน

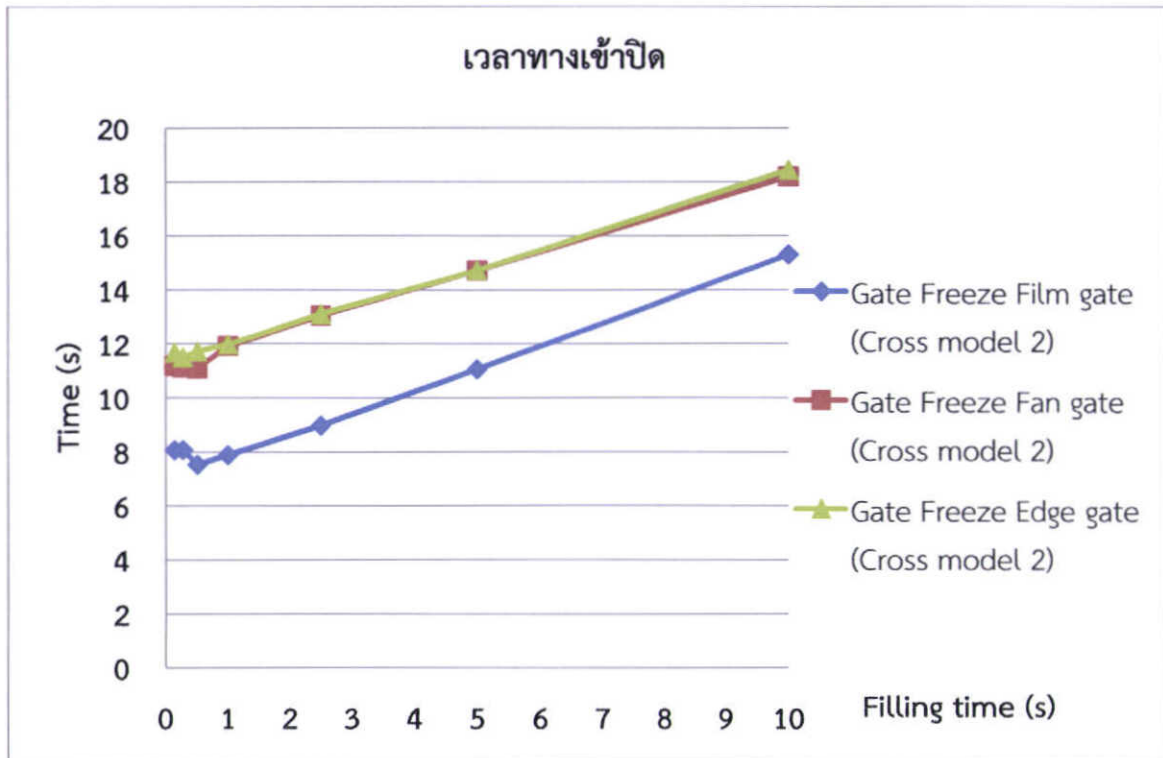
ฉีดน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก เกิดการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกหลอมได้มากขึ้น ดังรูปที่ 5.12 ที่ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมากตามความเร็วฉีดที่น้อยลง ดังรูปที่ 5.14 โดยที่ความเร็วฉีดที่ 10 วินาที ชั้นงานแบบ Film gate มีค่าความดันที่ลดลงเนื่องจากการฉีดที่ช้ามาก ที่ส่งผลให้อุณหภูมิลดลงดังรูปที่ 5.12 และความหนืดน้อย เนื่องจากการฉีดที่ช้าที่ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวที่ผนังมาก (Solid layer) ที่ทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนที่ทำให้ตรงกลางของช่องการไหลมีความหนืดที่น้อย ดังรูปที่ 5.14 ที่ส่งผลให้ความดันในการฉีดลดลง



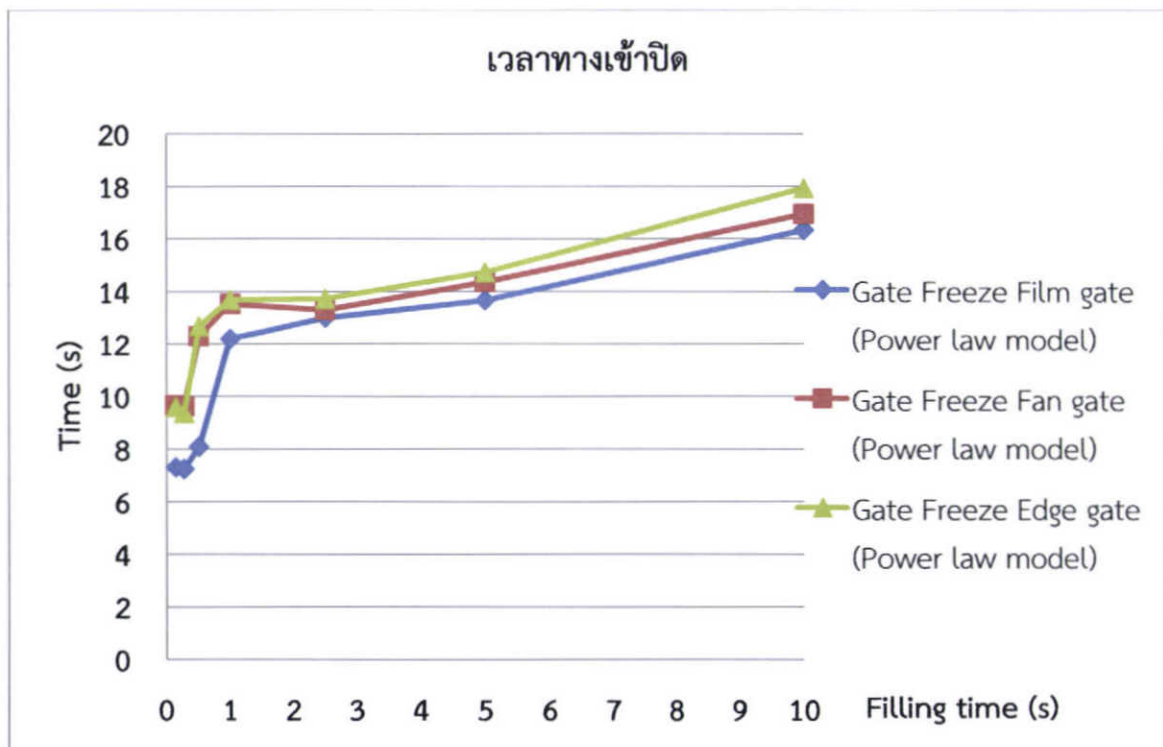
รูปที่ 5.17 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดันฉีดช้า ของชิ้นงานฉีด (Power law model)

จากรูปที่ 5.17 ความดันฉีด ความดันฉีดในโพรงแบบ และความดันฉีดช้า ของชิ้นงานฉีด Power law model พบว่าที่ความเร็วฉีดมีแนวโน้มลดลงตามลำดับตามความเร็วฉีด เนื่องจากรูปสมการความหนืดของ Power law model มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิน้อย จึงตอบสนองกับอุณหภูมิได้น้อยมาก จึงทำให้ช่วงการฉีดที่ช้าที่ความเร็วฉีด 2.5 5 และ 10 วินาที มีแนวโน้มที่ลดลง

จากรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 แสดงเวลาที่ทางเข้าปิด (Gate freeze-off) รูปแบบสมการความหนืด Cross model 2 และรูปแบบสมการความหนืด Power law model ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามความเร็วฉีด เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการฉีดลดลงตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 5.3 ที่ส่งผลให้พลาสติกหลอมเหลวเกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นที่ส่งผลให้อุณหภูมิลดลง ดังรูปที่ 5.12 จึงส่งผลเวลาทางเข้าปิดลดลง



รูปที่ 5.18 เวลาที่ทางเข้าปิด Gate freeze-off (Cross model 2)

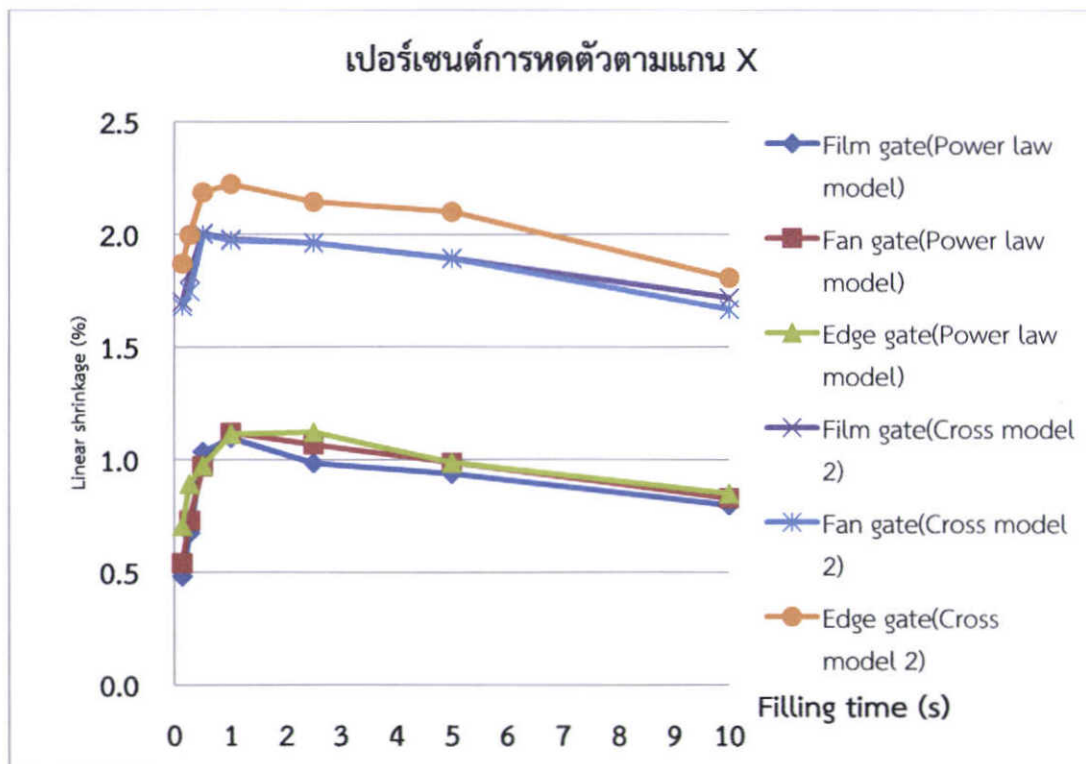


รูปที่ 5.19 เวลาที่ทางเข้าปิด Gate freeze-off (Power law model)

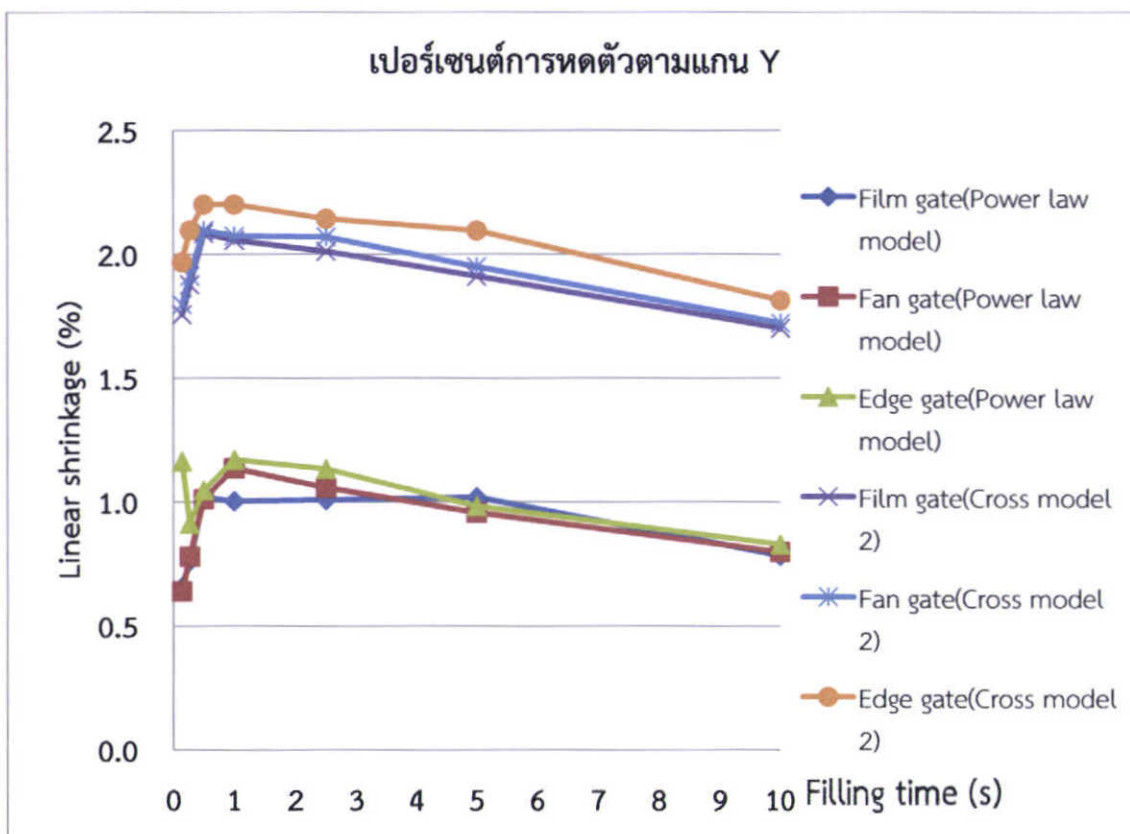
จากรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 จะพบว่าทางเข้าแบบ Film gate เวลาทางเข้าปิดเร็วกว่าชนิดทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ตามลำดับ โดยที่ทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate มีเวลาทางเข้าปิด

ใกล้เคียงกันซึ่งมีผลต่อการหดเซยการหดตัวของชิ้นงานฉีด และจากรูปที่ 5.19 ช่วงความเร็วฉีดที่ลดลง ที่ 0.14 จนถึง 1 วินาที พบว่าเวลาที่ทางเข้าปิดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก รูปแบบสมการ Power law model มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิมีน้อยมาก จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่น้อยที่ทำให้เวลาของทางเข้าปิดช้า

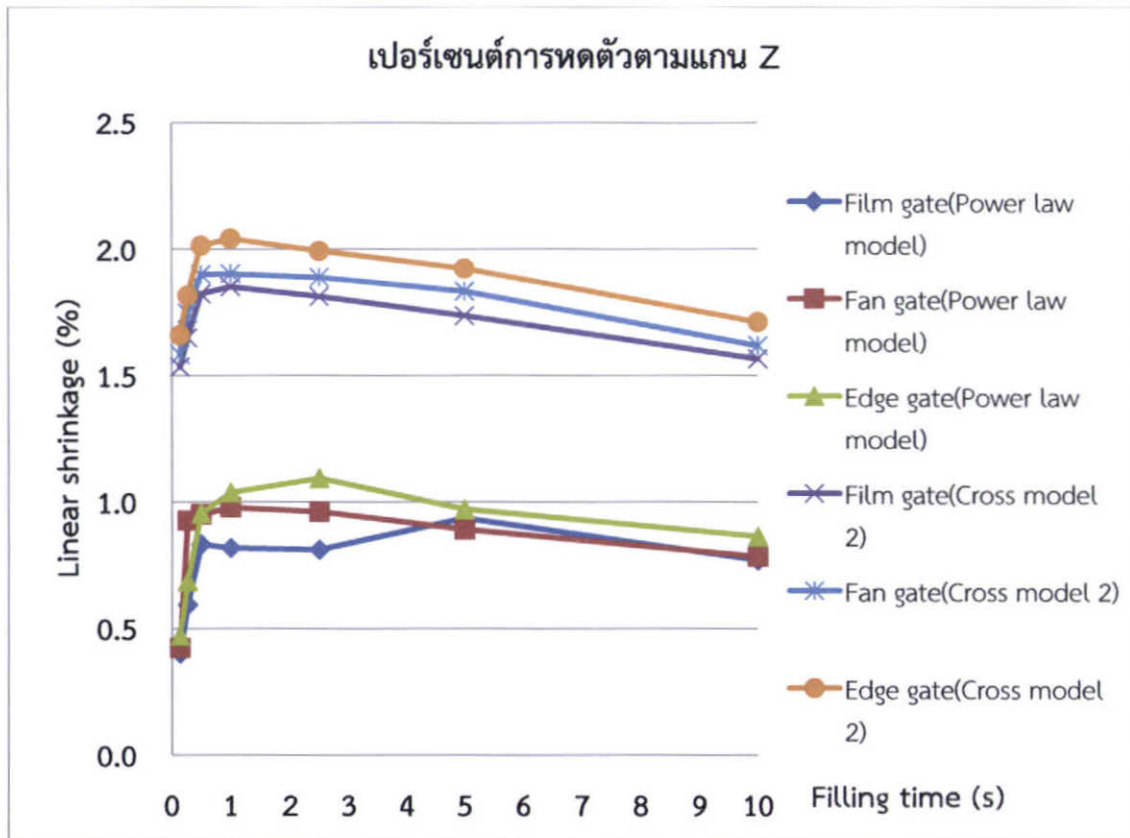
จากรูปที่ 5.20 5.21 และ 5.22 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X Y และ Z ตามลำดับ รูปแบบสมการความหนืด Cross model 2 และรูปแบบสมการความหนืด Power law model พบว่าการหดตัวของทั้งสองสมการมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยรูปแบบสมการความหนืด Cross model 2 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่ารูปแบบสมการความหนืด Power law model ทุกความเร็วฉีด โดยการหดตัวชิ้นงานฉีดที่มีทางเข้าแบบ Edge gate มีค่าเฉลี่ยการหดตัวมากที่สุด โดยทางเข้าแบบ Film gate มีค่าเฉลี่ยการหดตัวน้อยที่สุด



รูปที่ 5.20 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X



รูปที่ 5.21 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y



รูปที่ 5.22 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z

จากผลการทดลองในโปรแกรม Moldex3D R10. และผลจากการทดลองฉีดขึ้นงานจริงโดยเก็บผลการหดตัวจากการวัดขึ้นงานตามทิศทางตั้งฉากการไหล(ทิศทางแกน X และทิศทางแกน Z) และเก็บผลการหดตัวจากการวัดขึ้นงานตามทิศทางการไหล (ทิศทางแกน Y) แสดงดังรูปที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองจริงขึ้นงานทดสอบทางเข้าแบบ Film gate แสดงดังตารางที่ที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองจริงขึ้นงานทดสอบทางเข้าแบบ Fan gate แสดงดังตารางที่ที่ 5.5 และเปอร์เซ็นต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองจริงขึ้นงานทดสอบทางเข้าแบบ Edge gate แสดงดังตารางที่ที่ 5.6

ตารางที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองจริง (Film gate)

ทิศทาง แกน	ความเร็วฉีด (Sec.)	การหดตัว (Film gate)		
		Cross model 2	Power law model	Experiment
X	0.14	1.680	0.706	1.81
	0.27	1.801	0.635	1.98
	0.5	2.000	0.974	2.33
	1	1.974	1.115	2.27
	2.5	1.961	1.123	2.12
	5	1.892	0.987	1.94
	10	1.667	0.850	1.90
Y	0.14	1.798	1.165	3.67
	0.27	1.913	0.822	3.65
	0.5	2.097	1.048	3.68
	1	2.075	1.171	3.67
	2.5	2.070	1.135	3.64
	5	1.950	0.984	3.53
	10	1.723	0.830	3.51
Z	0.14	1.583	0.472	1.66
	0.27	1.747	0.687	1.83
	0.5	1.899	0.955	2.03
	1	1.903	1.038	2.09
	2.5	1.889	1.094	2.08
	5	1.833	0.972	1.88
	10	1.618	0.865	1.69

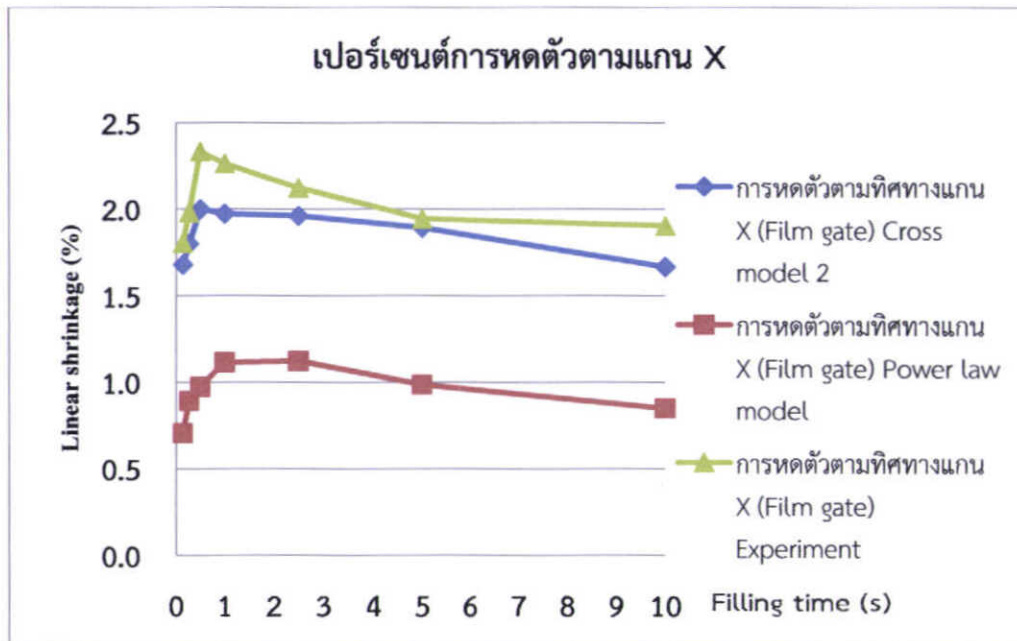
ตารางที่ 5.5 เปอร์เซนต์การหดตัวจากโปรแกรมกับการทดลองจริง (Fan gate)

ทิศทาง แกน	ความเร็วฉีด (Sec.)	การหดตัว (Fan gate)		
		Cross model 2	Power law model	Experiment
X	0.14	1.701	0.541	1.71
	0.27	1.827	0.730	1.86
	0.5	2.005	0.971	2.14
	1	1.979	1.121	2.10
	2.5	1.963	1.068	2.07
	5	1.895	0.987	1.99
	10	1.719	0.829	1.69
Y	0.14	1.758	0.591	2.66
	0.27	1.878	0.780	3.05
	0.5	2.085	1.011	3.26
	1	2.057	1.137	3.57
	2.5	2.013	1.057	3.43
	5	1.912	0.957	3.26
	10	1.703	0.799	3.06
Z	0.14	1.535	0.424	1.60
	0.27	1.649	0.927	1.68
	0.5	1.823	0.951	1.93
	1	1.851	0.979	2.06
	2.5	1.812	0.962	1.94
	5	1.736	0.892	1.83
	10	1.566	0.785	1.66

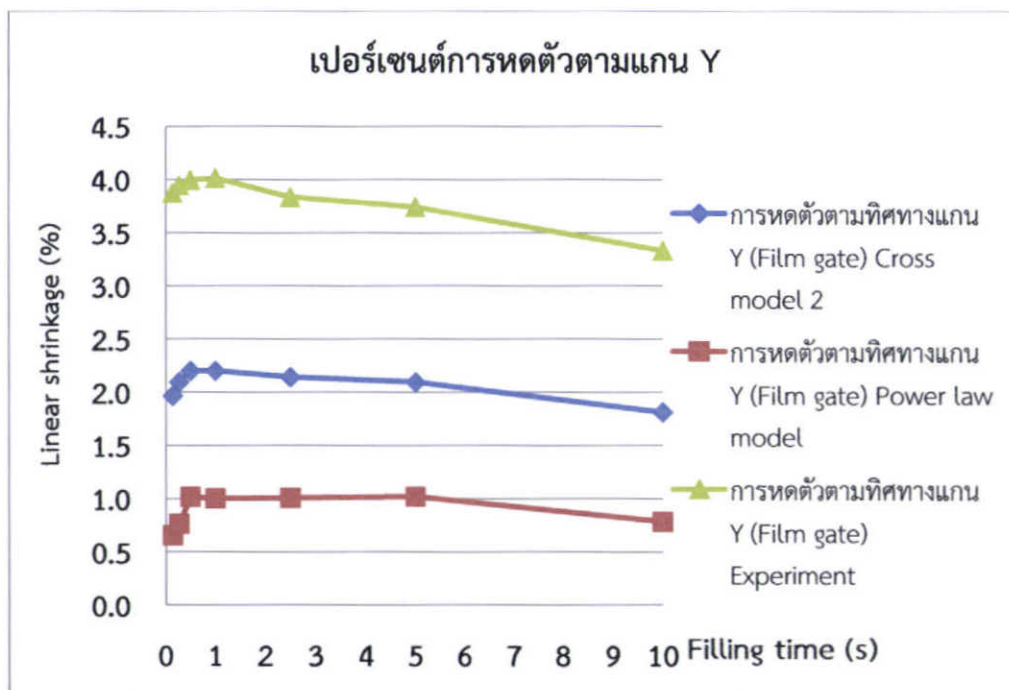
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบการหาค่าการไหลจากโปรแกรมกับการทดลองจริง (Edge gate)

ทิศทาง แกน	ความเร็วฉีด (Sec.)	การหาค่า (Edge gate)		
		Cross model 2	Power law model	Experiment
X	0.14	1.871	0.483	1.90
	0.27	1.997	0.675	2.08
	0.5	2.186	1.037	2.26
	1	2.223	1.097	2.31
	2.5	2.152	0.984	2.27
	5	2.100	0.937	2.15
	10	1.808	0.798	1.87
Y	0.14	1.969	0.572	3.88
	0.27	2.097	0.765	3.95
	0.5	2.202	1.018	4.00
	1	2.202	1.003	4.01
	2.5	2.144	1.009	3.84
	5	2.096	1.019	3.74
	10	1.815	0.784	3.33
Z	0.14	1.660	0.403	1.65
	0.27	1.816	0.594	1.92
	0.5	2.014	0.833	2.05
	1	2.042	0.819	2.05
	2.5	1.993	0.813	2.00
	5	1.924	0.937	1.88
	10	1.712	0.771	1.78
	0.14	1.660	0.403	1.65

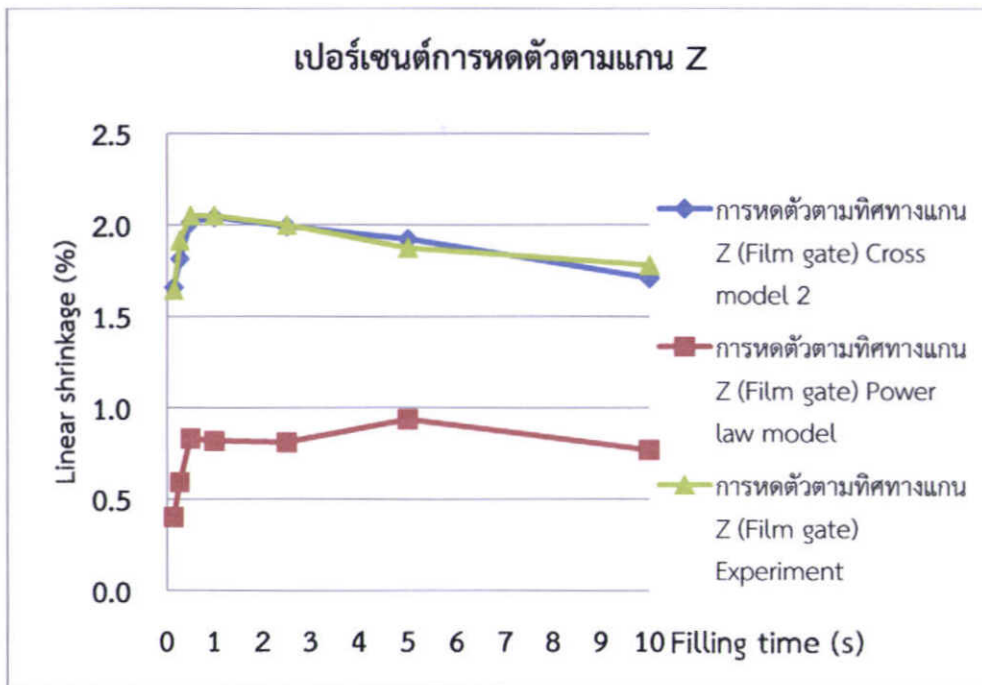
เปรียบเทียบผลการหาค่าการไหลจากการทดลองการจำลองการฉีดของรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 และรูปแบบจำลองความหนืด Power law model กับชิ้นงานฉีดจริง ผลของชิ้นงานที่มีรูปแบบทางเข้าแบบ Film gate พบว่ารูปแบบจำลองความหนืด Power law model มีค่าเปอร์เซ็นต์การหาค่าที่น้อยที่สุดทุกทิศทาง การไหล และรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานฉีดจริงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.23 ที่เป็นค่าการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X แสดงในรูปที่ 5.24 ที่เป็นค่าการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y และแสดงในรูปที่ 5.25 ที่เป็นค่าการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z



รูปที่ 5.23 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Film gate

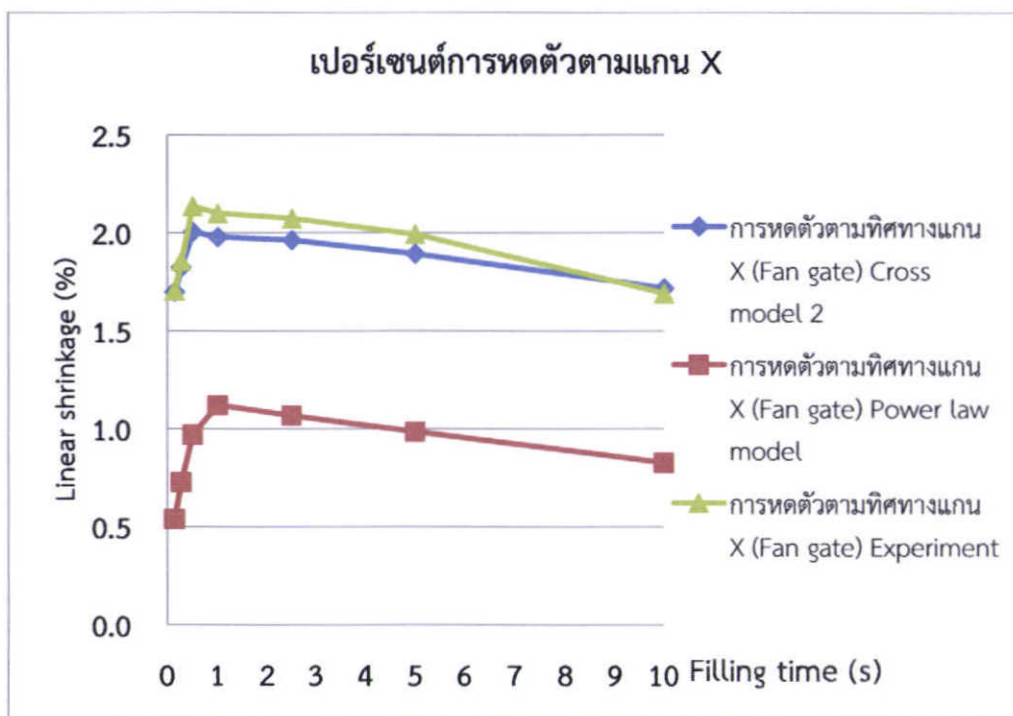


รูปที่ 5.24 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Film gate

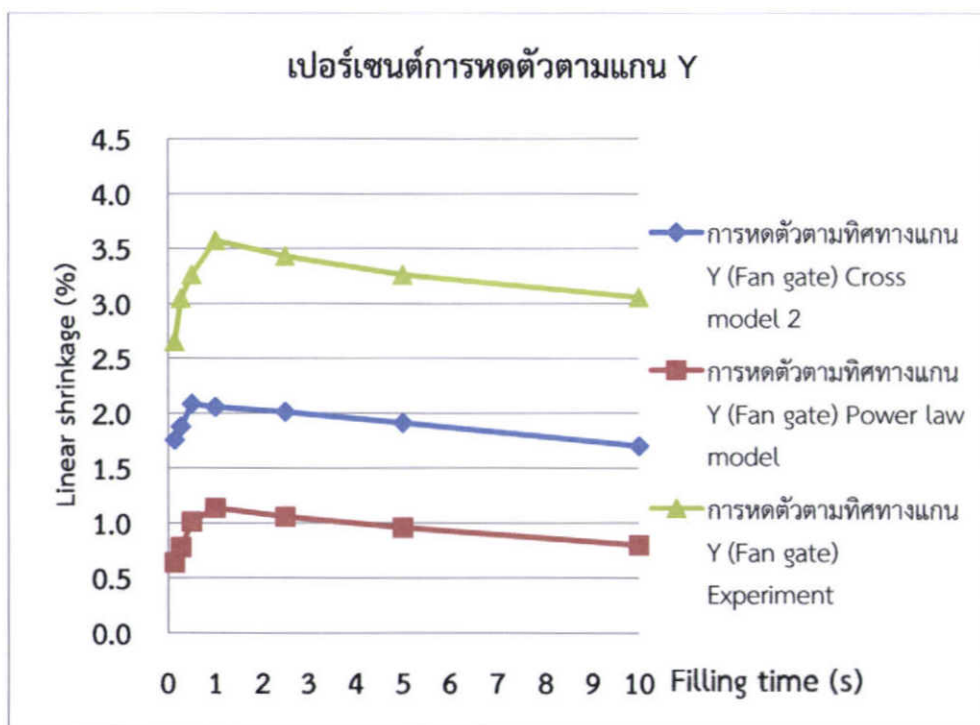


รูปที่ 5.25 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Film gate

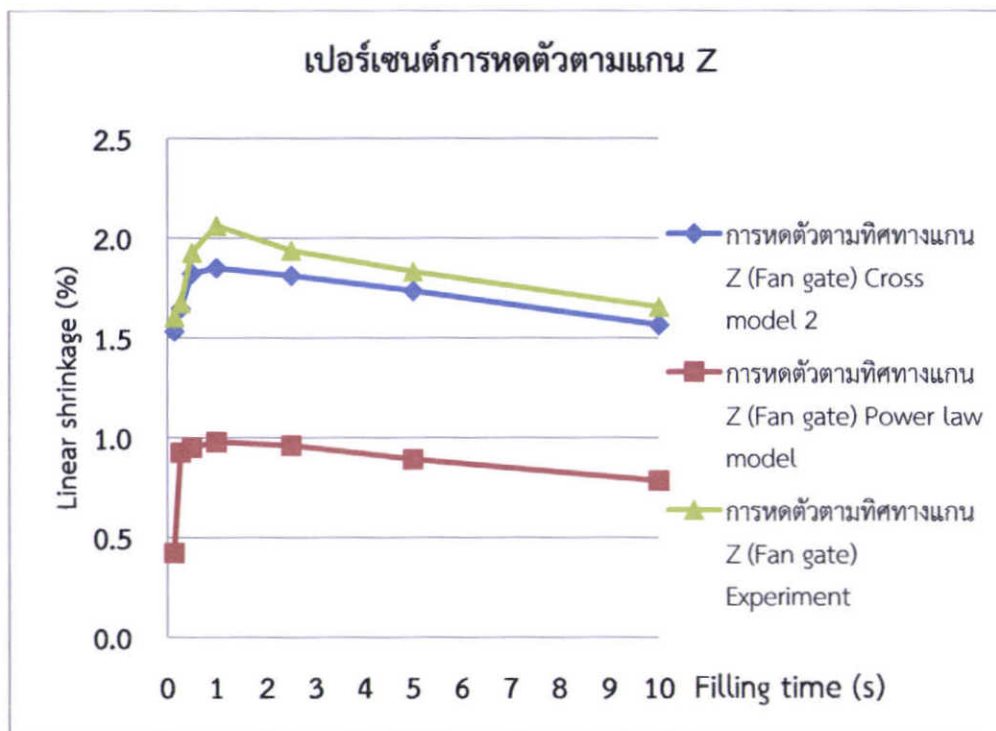
เปรียบเทียบผลการหดตัวจากการทดลองการจำลองการฉีดของรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 และรูปแบบจำลองความหนืด Power law model กับชิ้นงานฉีดจริง ผลของชิ้นงานที่มีรูปแบบทางเข้าแบบ Fan gate พบว่ารูปแบบจำลองความหนืด Power law model มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดทุกทิศทางการไหล และรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานฉีดจริงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.26 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X แสดงในรูปที่ 5.27 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y และแสดงในรูปที่ 5.28 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z



รูปที่ 5.26 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Fan gate

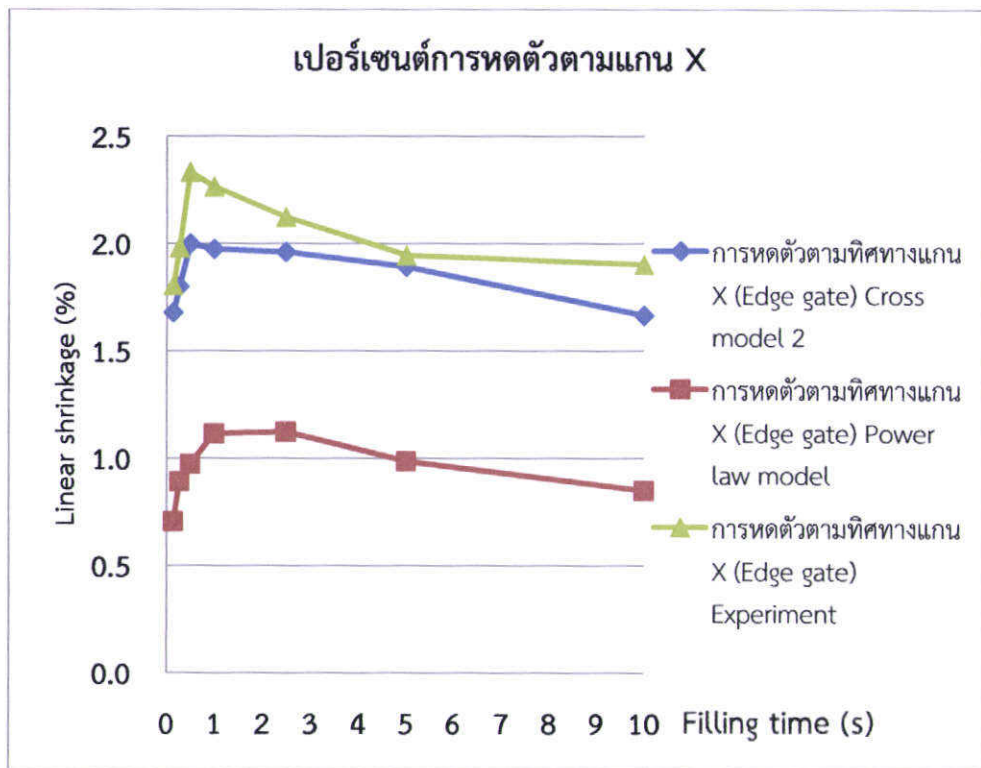


รูปที่ 5.27 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Fan gate

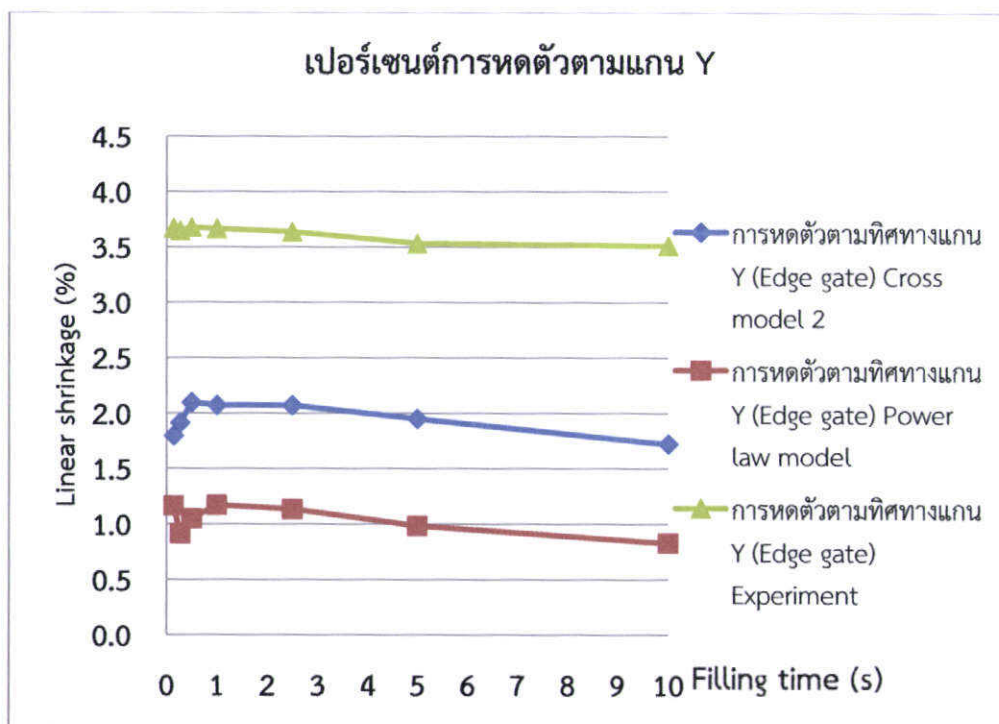


รูปที่ 5.28 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Fan gate

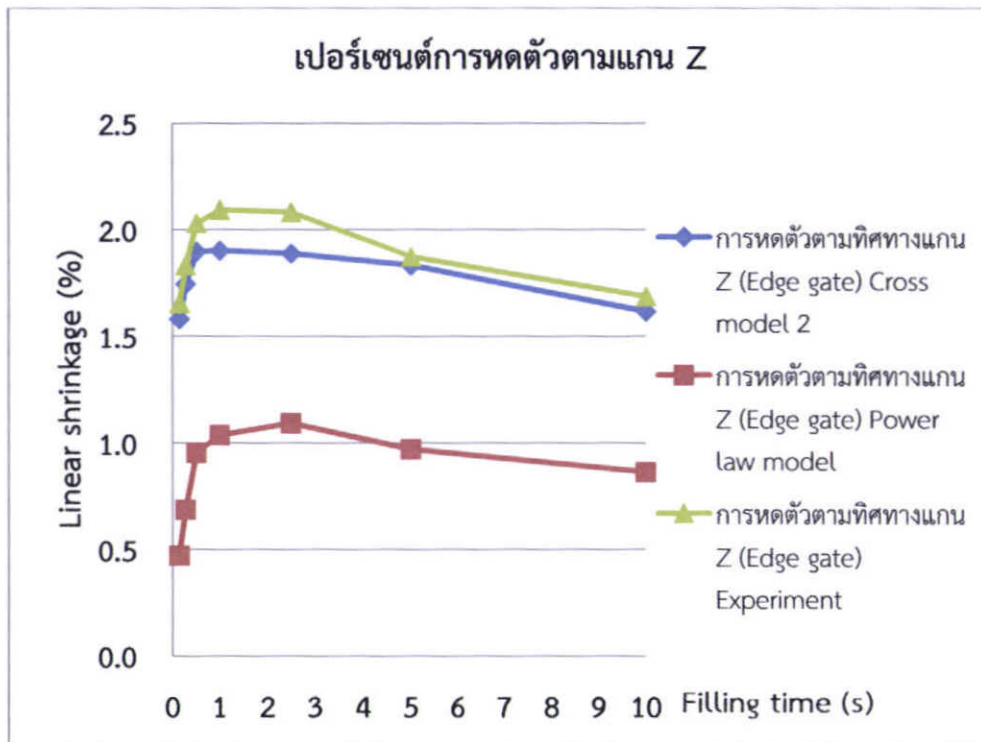
เปรียบเทียบผลการหดตัวจากการทดลองการจำลองการฉีดของรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 และรูปแบบจำลองความหนืด Power law model กับชิ้นงานฉีดจริง ผลของชิ้นงานที่มีรูปแบบทางเข้าแบบ Edge gate พบว่ารูปแบบจำลองความหนืด Power law model มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดทุกทิศทางการไหล และรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานฉีดจริงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.29 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X แสดงในรูปที่ 5.30 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y และแสดงในรูปที่ 5.31 ที่เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z



รูปที่ 5.29 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน X ของชิ้นงาน Edge gate

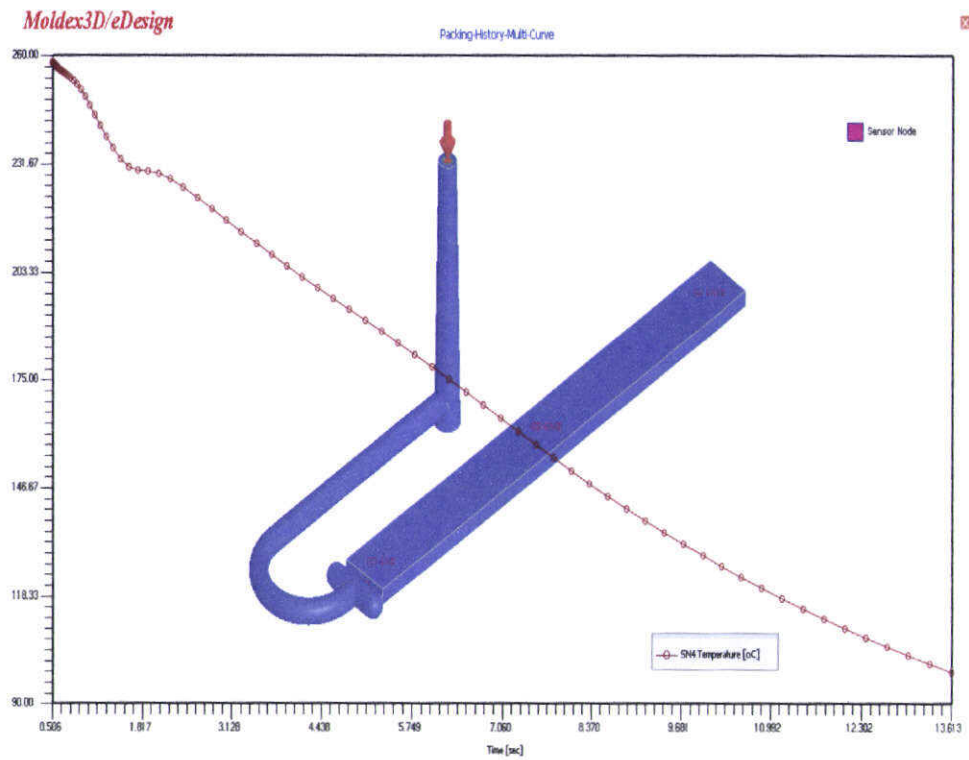


รูปที่ 5.30 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหล ตามแกน Y ของชิ้นงาน Edge gate

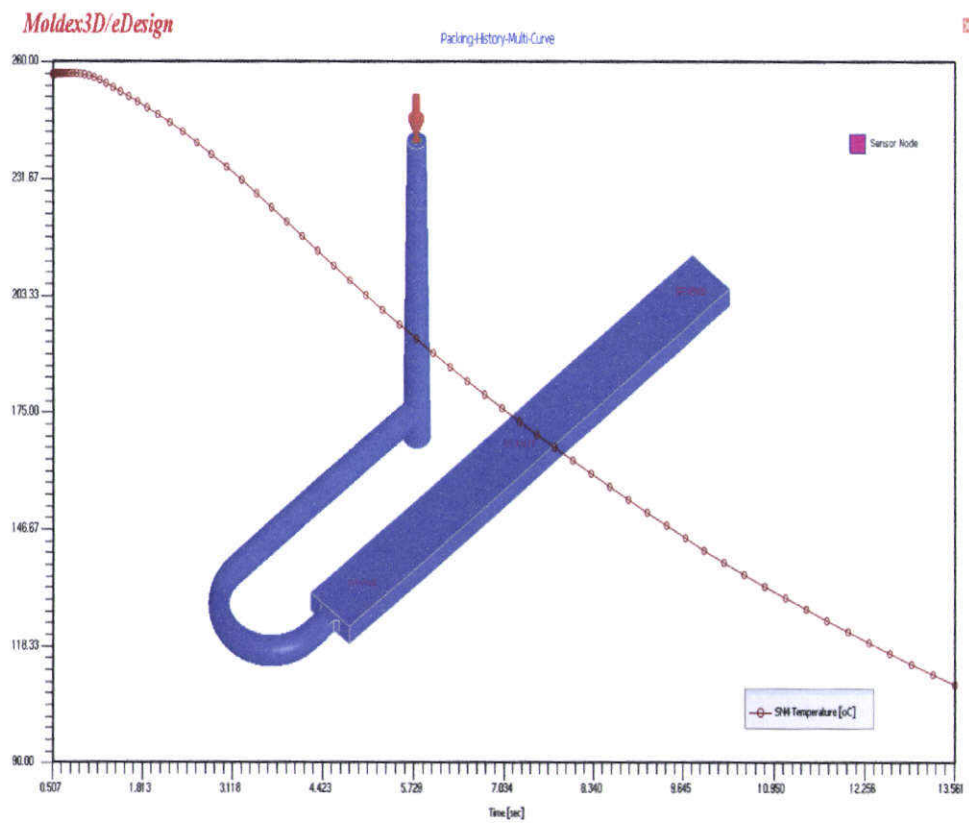


รูปที่ 5.31 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหล ตามแกน Z ของชิ้นงาน Edge gate

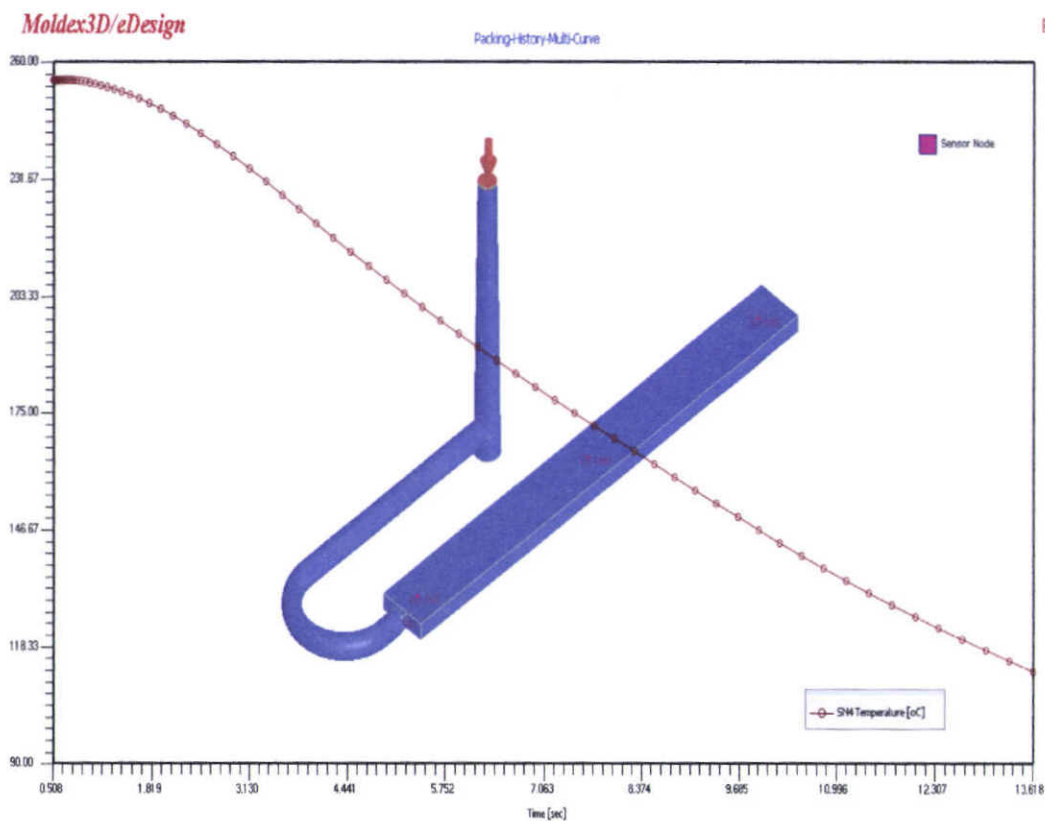
จากรูปที่ 5.23 5.24 และ 5.25 พบว่าอุณหภูมิในการฉีดของชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Film gate อุณหภูมิเริ่มต้นการฉีดย้านั้นมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Fan gate และชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Edge gate เล็กน้อย จากรูปที่ 5.23 พบว่าที่เวลาประมาณ 1.8 วินาที อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Fan gate และชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Edge gate เนื่องจากชิ้นงานทางเข้าแบบ Film gate มีการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Fan gate และชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Edge gate ที่ส่งผลให้เวลาทางเข้าปิดเร็วกว่าชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Fan gate และชิ้นงานที่ทางเข้าแบบ Edge gate แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.32 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Film gate ที่ 0.5 วินาที



รูปที่ 5.33 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Fan gate ที่ 0.5 วินาที



รูปที่ 5.34 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดที่ย่างเข้าของชิ้นงานแบบ Edge gate ที่ 0.5 วินาที

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

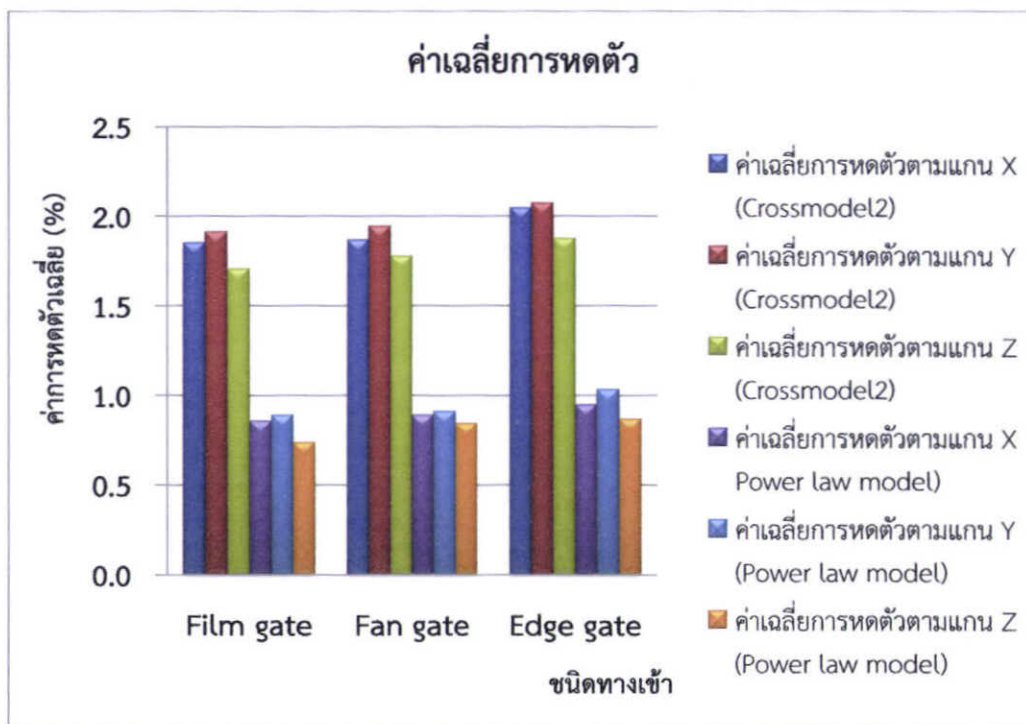
5.6.1 การวิเคราะห์ผลการฉีดพลาสติกจากการทดลอง

การทดลองที่ใช้สภาวะเงื่อนไขในการฉีดพลาสติกตามตารางที่ 5.3 ที่ใช้ในการศึกษาการหดตัวของชิ้นงานฉีดในทิศทางแกน X, Y และ Z ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสมการประมาณค่าความหนืด ระหว่าง Cross model 2 และ Power-law model กับผลทดลองชิ้นงานฉีดจริง

จากผลการทดลองพบว่า การหดตัวของชิ้นงานพลาสติกฉีดนั้นสามารถเกิดขึ้นในทุกทิศทาง จากการทดลองการจำลองการฉีดและประมาณค่าทางทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบคุณสมบัติของชนิดทางเข้าที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดตามแบบจำลองทดสอบการหดตัวตามมาตรฐาน ASTM D955-08 โดยทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองการฉีดและประมาณค่าทางทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบคุณสมบัติของชนิดทางเข้าที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดกับการฉีดจริงที่ทำการทดลองทำชิ้นงานฉีดทดสอบ 10 ชิ้นต่อหนึ่งเงื่อนไขการจำลองทางการฉีดและประมาณค่าทางทางคณิตศาสตร์

5.6.2 วิเคราะห์ผลการทดลองระหว่างชนิดทางเข้า Film gate Fan gate และ Edge gate

ผลการทดลองการฉีดโดยใช้วิธีการจำลองการฉีดและประมาณค่าทางทางคณิตศาสตร์พบว่า การหดตัวของแบบจำลองการฉีด รูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 และ Power law model มีแนวโน้มการหดตัวที่เหมือนกันโดยที่ชนิดทางเข้าแบบ Edge gate มีค่าเฉลี่ยการหดตัวที่มากที่สุด โดยชนิดทางเข้าแบบ Fan gate มีค่าเฉลี่ยการหดตัวปานกลาง และชนิดทางเข้าแบบ Film gate มีค่าเฉลี่ยการหดตัวน้อยที่สุด ดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 ค่าเฉลี่ยการหดตัว

5.6.2.1 รูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2

จากการทดลองการฉีดที่ความเร็วแตกต่างกันมีผลต่อการหดตัวทุกความเร็วฉีด โดยที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 0.14 1.27 0.5 และ 1 วินาที รูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 พบว่าการหดตัวของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบเพิ่มมากขึ้น ตามรูปที่ 5.20 รูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 เนื่องจากเวลาที่ทางเข้าปิดจากรูปที่ 5.18 ของชิ้นงานทั้งสามแบบนี้ลดลงเล็กน้อย แต่จากรูปที่ 5.16 พบว่าความดันในโพรงแบบของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบนี้ลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลให้ความร้อนจากพฤติกรรมไหลแบบเฉือนของพลาสติกลดลง ดังรูปที่ 5.10 ที่ส่งผลให้ความดันในการฉีด และความดันในการฉีดย้าที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการรักษาความดันในโพรงแบบไว้ เป็นการชดเชยเนื้อพลาสติกเนื่องจากการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนลดลง ดังรูปที่ 5.16 จึงส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการหดตัวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น และที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 2.5 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ ตามรูปที่ 5.20 รูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 เนื่องจาก จากรูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ในการฉีดนั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วฉีดที่ช้าลง ที่ส่งผลให้ความหนืดของพลาสติกเหลวเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 5.14 ดังตัวอย่างคำนวณภาคผนวก ข ที่ส่งผลให้ความดันที่ใช้ในการฉีดเต็มเต็มมากขึ้นและความดันในการฉีดย้ามากขึ้นด้วยอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ลดลงอย่างมาก ดังรูปที่ 5.16 จึงส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลง

5.6.2.2 ผลวิเคราะห์รูปแบบจำลองความหนืด Power law model

จากการทดลองพบว่า การหดตัวของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบเพิ่มมากขึ้น ตามรูปที่ 5.20 รูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 0.14 1.27 0.5 และ 1 วินาที พบว่าค่าอัตราเฉือนต่อความเร็วฉีด ดังรูปที่ 5.11 ลดลงตามความเร็วฉีด ที่ส่งผลให้ความดันฉีด และความดันในการฉีดย้าลดลง ที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวที่เพิ่มมากขึ้น และที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 2.5 5 และ 10 วินาที พบว่าเกิดการหดตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก รูปแบบสมการ Power law model มีการ

ตอบสนองต่ออุณหภูมิน้อยมาก ดังรูปที่ 5.9 จึงส่งผลในความดันที่ใช้ในการฉีดลดน้อยลง ดังรูปที่ 5.17

จากตารางที่ 5.2 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อเส้นรอบรูปทางเข้า พบว่าทางเข้าแบบ Film gate มีค่า 0.304 ในขณะที่ทางเข้าแบบ Fan gate มีค่า 1.0 และทางเข้าแบบ Edge gate มีค่า 0.712 ซึ่งมีความแตกต่างกัน จากรูปที่ 5.32 5.33 และ 5.34 พบว่าพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นส่งผลต่อพฤติกรรมการหดตัวที่มีความแตกต่างกันของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันในโพรงแบบของชิ้นงานทั้งสามแบบ แรงดันที่ใช้ในการฉีดมีความแตกต่างกันมากกว่าความดันในโพรงแบบ โดยที่ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบ Film gate จะมีค่าความดันในการฉีดที่สูงกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ที่มีค่าความดันที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 จากรูปที่ 5.32 5.33 และ 5.34 ที่เวลาเริ่มในการฉีด อุณหภูมิของชิ้นงานทั้งสามชิ้นจะมีค่าประมาณที่ 250 °C โดยที่ทางเข้าแบบ Film gate อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วทำให้การเติมเต็ม (Packing) ได้เพียง 7.0 วินาที แต่ขณะที่ทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate มีเวลาในการเติมเต็มที่ 10.6 และ 11.2 วินาที จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวน้อยกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ที่มีพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเท่ากันเนื่องจากชนิดทางเข้าแบบ Film gate นั้นมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าจึงส่งผลให้ความหนืดที่มากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ซึ่งเป็นไปตาม PVT-Diagram ของพลาสติกชนิด HDPE

5.6.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Cross model 2 กับ Power-low model

จากการทดลองเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองความหนืดแบบ Cross model 2 กับ Power-low model ดังรูปที่ 5.23 ถึง 5.31 และจากตารางที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 พบได้ว่า Cross model 2 ได้ผลการหดตัวมากกว่า รูปแบบความหนืดชนิด Power-low model ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราเฉือนและความหนืดระหว่าง Cross model 2 กับ Power-low model รูปที่ 5.14 และ 5.15 พบว่า ความหนืดแบบ Power-low model มีค่าน้อยกว่าความหนืดแบบ Cross model 2 ทำให้ความดันฉีดของ Power-low model น้อยกว่าเนื่องจาก ความหนืดแบบ Power-low model นั้นมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิน้อยมาก ดังตัวอย่างภาคผนวก ข โดยที่ค่าตอบสนองต่ออุณหภูมิ T_b มีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้ความหนืดแบบ Power-low model ที่ส่งผลให้ค่าความหนืดเริ่มต้น η_0 มีค่าคงที่และส่งผลให้ทำนายผลความหนืดได้น้อยกว่าปกติที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ ข.3 และ ข.4 และที่อุณหภูมิมาก ที่ประมาณ 250 °C ขึ้นไป จะส่งผลให้การทำนายค่าความหนืดมากขึ้น และจากรูปที่ 5.10 และ 5.11 พบว่าค่าอัตราเฉือนแบบ Power-low model มีค่าน้อยกว่าทุกความเร็วฉีด ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ ข.5 และ ข.6 พบได้ว่าการทำนายผลของอัตราเฉือนและความหนืดของ แบบ Power-low model มีค่าการทำนายการหดตัวที่น้อยกว่า แบบจำลองความหนืดแบบ Cross model 2 ที่มีค่าการตอบสนองต่ออุณหภูมิ T_b มีค่ามากกว่า ที่ส่งผลให้ค่าความดันที่มากกว่าเมื่อความเร็วฉีดที่น้อย ดังรูปที่ 5.16 ที่ความเร็วฉีดที่น้อยจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกหลอมจึงส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมาก ดังรูปที่ 5.12 ที่มากกว่า แบบจำลองความหนืดแบบ Power-low model ที่ตอบสนองกับอัตราเฉือนเพียงอย่างเดียว พิจารณาความดันโมเดลความหนืดแบบ Power-low model รูปที่ 5.17 พบว่าความดันมีค่าลดลงเนื่องจาก แบบจำลองความหนืดแบบ Power-low model นั้นไม่ตอบสนองกับอุณหภูมิ จึงจะเห็นได้ว่าว่าดันลดลงตามความเร็วที่ใช้ฉีด จึงส่งผลให้แบบจำลองความหนืดแบบ Power-low model ทำนายพฤติกรรมหดตัวได้น้อยกว่าโมเดลความหนืดแบบ Cross model 2 ทุกความเร็วฉีด

5.6.4 การจำลองการฉีดกับผลการทดลองฉีดขึ้นงานจริงโดยการออกแบบแม่พิมพ์

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองฉีดขึ้นงานจริงโดยการออกแบบแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน ASTM D955-08 ดังรูปที่ 5.4 ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองความหนืดแบบ Cross model 2 มากกว่าแบบจำลองความหนืดแบบ Power-law model ดังรูปที่ 5.23 ถึง 5.31 เนื่องจากแบบจำลองความหนืดแบบ Power-law model นั้นมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิ น้อยมาก ตัวอย่าง ภาคผนวก ข โดยที่ค่าตอบสนองต่ออุณหภูมิ T_b มีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้แบบจำลองความหนืดแบบ Power-law model ที่ส่งผลให้ค่าความหนืดเริ่มต้น η_0 มีค่าคงที่ ที่ส่งผลให้ทำนายผลความหนืดได้น้อยกว่าปกติที่อุณหภูมิในการฉีดต่ำ และจากรูปที่ 5.24 5.27 และ 5.30 ที่เป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวตามทิศทางแกน Y (In flow shrinkage) ของชนิดทางเข้าแบบ Film ทางเข้าแบบ Fan gate และทางเข้าแบบ Edge gate พบว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าทิศทางตั้งฉากการไหลตามแกน X และทิศทางตั้งฉากการไหลตามแกน Z (Cross flow shrinkage) อาจเกิดจาก 2 ปัจจัยด้วยกันดังนี้

1. ปัจจัยของเครื่องฉีดพลาสติก เนื่องจากการทดลองทำการเปรียบเทียบกับกรณีจริง โดยที่เครื่องฉีดพลาสติกไม่สามารถสร้างความดันในการฉีดได้ตามที่ปรับตั้งไว้ตามผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากประสิทธิภาพที่ลดลงของเครื่องฉีดตามการใช้งาน

2. ปัจจัยของโมลฉีดพลาสติก อันเนื่องมาจากความหยาบผิวของโพรงแบบ (Cavity) ในการสร้างแม่พิมพ์ที่แตกต่างจากโมเดลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ส่งผลต่อการต้านการไหลของน้ำพลาสติกเหลือจากการเสียดทานจึงส่งผลต่อการสูญเสียความดันในโพรงแบบ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ผลสรุปจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดชนิดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองฉีดจริงโดยการออกแบบและสร้างโมลฉีดพลาสติกเพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบการจำลองด้วยวิธีการประมาณทางคณิตศาสตร์ ด้วยการทำนายผลจากโปรแกรม Moldex 3D R10. ที่มุ่งเน้นศึกษาชนิดทางเข้า แบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ที่ทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานทดสอบ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1.1 การทดลองศึกษาผลกระทบของชนิดทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ที่ทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและเวลาในการฉีดเท่ากัน พบว่าทางเข้าแบบฟิล์ม มีการหดตัวน้อยที่สุด เนื่องจากทางเข้าแบบฟิล์มมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าจึงส่งผลให้อุณหภูมิน้อยและความดันในการฉีดที่มากกว่าจึงส่งผลให้เกิดการหดตัวน้อยกว่าทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ทุกความเร็วฉีด

6.1.2 จากการทดลองศึกษาผลกระทบของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดโดยเปรียบเทียบรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 กับ Power law model ที่เวลาในการฉีดเดียวกันความดันที่เกิดขึ้นในรูปแบบจำลองความหนืด Power law model น้อยกว่าความหนืดที่น้อยกว่าความดันรูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 เนื่องจากรูปแบบความหนืด Power law model เมื่ออุณหภูมิจะส่งผลให้ความหนืดน้อยกว่ารูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 มาก เนื่องจากรูปแบบความหนืด Power law model มีค่าการตอบสนองของวัสดุ Tb น้อยมาก จึงส่งผลให้ความหนืดน้อยกว่า รูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 แต่ รูปแบบความหนืด Power law model จะมีความหนืดมากเมื่อค่าอัตราเฉือนน้อยมาก

6.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว โดยอุณหภูมิพลาสติกเหลว ความดันฉีด อัตราการไหล มีผลต่อการหดตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์ โดยที่อุณหภูมิมีผลต่อความหนืดโดยที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลง และส่งผลกระทบต่อความดันฉีด โดยที่ความดันฉีดมีผลที่ช่วยในการเติมพลาสติกเหลวในโพรงแบบเนื่องจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต

6.2.1 จากการทดลองศึกษาผลกระทบของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีด แนวคิดในการใช้รูปแบบความหนืด Power law model นั้นมีข้อจำกัดในการใช้ได้เพียงในช่วงอัตราเฉือนปานกลางถึงสูงเท่านั้น เนื่องจากในช่วงอัตราเฉือนต่ำๆ หรือไม่อยู่ในช่วง Shear thinning จะได้ผลลัพธ์ของค่าความหนืดที่ผิดพลาดมาก และเนื่องจากรูปแบบความหนืด Power law model มีค่าการตอบสนองของวัสดุ Tb น้อยมากกว่ารูปแบบจำลองความหนืด Cross model 2 จึงส่งผลให้ความหนืดน้อย

6.2.2 ควรมีการนำแนวคิดจากการวิจัยครั้งนี้ไปประยุกต์ปรับเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดแบบอื่นๆ เช่น Pin gate Diaphragm gate และ Submarine gate เป็นต้น และตลอดจนปรับเปลี่ยนความยาวของทางเข้าที่มีความยาวหลากหลาย

บรรณานุกรม

- [1] Moldex3D Reference Manual R10, www.moldex3d.com.
- [2] Jongsoo Lee and Jonghum Kim. (2007), "Micro genetic algorithm based optimal gate positioning in injection molding design", Journal of mechanical science and technology.
- [3] H.A. Khonakdar , และคณะ (2003). Thermal and shrinkage behavior of stretched peroxide-cross linked high-density polyethylene, European Polymer Journal 39 1729–1734.
- [4] R.A. Harris , และคณะ(2003), Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 879–887.
- [5] P.K. Kennedy (2008). Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation, M.S. Thesis, Technische Universities Eindhoven Netherlands, ISBN 978-90-386-1275-1, ISBN 978-90-386-1275-1.
- [6] T.V. Zhil'tsova, M.S.A. Oliveira, J.A.F. Ferreira (2009), Relative influence of injection molding processing conditions on HDPE acetabular cups dimensional stability, journal of materials processing technology 209 3894–3904.
- [7] J.-F.Hetu และคณะ (1998), 3D Finite Element Method for the Simulation of the Filling Stage in Injection Molding. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, FEBRUARY 1998, Vol. 38, No. 2.
- [8] V. LEO และ CH.CUVLLIEZ (1996), The Effect of the Packing Parameters, Gate Geometry, and Mold Elasticity on the Final Dimensions of a Molded Part. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, MID-AUGUST, Vol. 36, No. 15.
- [9] R.PANTANI และคณะ (2004), Analysis of Gate Freeze-Off Time in Injection Molding, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, JANUARY 2004, Vol. 44, No. 1.
- [10] Xi Chen และ Furong Gao (2005), On-Line Detection of the Gate Freezing-Off Time for Injection Molding, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, DOI 10.1002/pen.20227.
- [11] HU Guang-hong และ CUI Zhen-shan (2010), Effect of Packing Parameters and Gate Size on Shrinkage of Aspheric Lens Parts. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 15(1): 84-87.
- [12] Á. Oroszlány และ J.G. Kovács (2012), Gate type influence on thermal characteristics of injection molded biodegradable interference screws for ACL

- reconstruction. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 766–769.
- [13] T.V. Zhil'tsova และคณะ (2009), Relative influence of injection molding processing conditions on HDPE acetabular cups dimensional stability, *journal of materials processing technology* 209 (2009) 3894–3904.
- [14] B. MLEKUSCH (2001), Calculation of Residual Stress Development in Injection Moulding Using a Nonlinear Viscoelastic Model, *Mechanics of Time-Dependent Materials* 5: 101–118, 2001.
- [15] Haihong Wu, Zhenfeng Zhao และ Jie Sha (2009), Experiments and prediction of in-cavity stress for injection molded part, *Mech Time-Depend Mater* 13: 233–244.
- [16] B.A. MLEKUSCH (1998), Residual Stresses in Short-Fibre Reinforced Injection-Moulded Thermoplastic Parts, *Mechanics of Time-Dependent Materials* 2: 129–169.
- [17] M.R. KAMAL และคณะ(2002), Residual Thermal Stresses in Injection Moldings of Thermoplastics: A Theoretical and Experimental Study, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, MAY 2002, Vol. 42, No. 5.
- [18] Ajit R. Nalla (2007). A multi-segment injection line and real-time adaptive, model-based controller for vacuum assisted resin transfer molding.: Part A 38 1058–1069.
- [19] Mengen G., Mohren P., (1986), *How to make injection Molds^{1st}*, Carl Hanser Verlag, New York, pp.106.
- [20] Herbert Rees (1995), *Mold Engineering*, Hanser Publishers Munich Vienna New York pp.103.
- [21] Joel Pomerleau, Bernard Sanschagrín., (2006) *Injection Molding Shrinkage of PP: Experimental Progress*, Applied Polymer Research Center, Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, Quebec H3C 3A7, Canada.
- [22] M. Rezayat and R.O. Stafford.(1991), A thermoviscoelastic model for residual stress in injection moulded thermoplastics. *Polym. Eng. Sci.*, 31:393–398,
- [23] Hieber C.A, P.J. Wang, and K.K. Wang.(1991) Injection molding of a center-gated disk: Modelling and measurements for the filling and post filling stages including gapwise shrinkage. , *SPE Technical Papers*, 37:259–263.
- [24] H.H. Chiang, C.A. Hieber, and K.K. Wang.(1991), A unified simulation of the filling and post filling stages in injection molding. Part I: Formulation and Part II: Experimental verification. *Polym. Eng. Sci.*, 31:116–139.

- [25] N. Santhanam.,(1992).*Analysis of Residual Stresses and Post-Molding Deformation in Injection- Molded Components*. PhD thesis, Cornell University.
- [26] N. Santhanam and K.K.Wang.(1990).,A theoretical and experimental investigation of warpage in injection molding. *SPE Technical Papers*, 36:270–273.
- [27] V. Brucato, V. La Carrubba, S. Piccarolo, and G. Titomanlio. (2000).Solidification under pressure and high cooling rates. *Int. Polym. Processing*, XV:103–110.
- [28] Z. Fan, B. Lin, F. Costa, X. Jin, R. Zheng, and P. Kennedy. (2005) Three dimensional warpage simulation for injection molding. *Proc. Soc. Plastics Eng. Annual Tech- nical Conference (ANTEC)*.
- [29] R. Nakano, (1998).. Apparatus and method for analyzing a process of fluid flow, an apparatus and method for analyzing an injection molding process, an injection molded product, and a production method of the injection molded product. *US Patent No. 5835379*.
- [30] Huamin Zhou และ Dequn Li (2005), Residual stress analysis of the post-filling stage in injection moulding. *Int J Adv Manuf Technol* 25: 700–704.
- [31] D.E. Dimla M. Camilotto และF.Minai.,(2005) , Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools, *Journal of Materials Processing Technology* 164–165 1294–1300 *Journal of Materials Processing Technology* 164–165 1294–1300.
- [31] Y.F.Sun, K.S.Lee และ A.Y.C. Nee (2004)., Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds. *Int J Adv Manuf Technol* 24: 715–726.
- [32] ZHENG Zhong และคณะ (2011)., Finite Element Analysis on the Injection Molding and Productivity of Conformal Cooling Channel. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 16(2): 231-235.
- [33] Robert A. Malloy.,(1994), *Plastic part design for injection molding*, Carl Hanser Verlag, New York, pp.20.
- [34] David O และคณะ (1010), A Comparison of Seven Filling to Packing Switchover Methods for Injection Molding, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*. National Science Foundation; contract grant number: DMI-0428366/0428669.
- [35] Sang Sik Yang, Tai Hun Kwon (2008), Numerical and Experimental Investigation of Shrinkage Behavior of Precision Injection Molded Articles. II. Results and Discussion, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE* 10.1002/pen.21128.
- [36] WIT C. BUSHKO และVIJAY K. STOKES (1996), Solidification of Thermoviscoelastic Melts.Part 3: Effects of Mold Surface Temperature Differences on Warpage and Residual Stresses, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE* Vol. 36, NO. 3.

- [37] Cody D. Greene และ Donald F. Heaney (2007), The PVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components, *Materials and Design* 28 (2007) 95–100.
- [38] V. Speranza, R. Pantani, G.B. Besana, G.(2007) Anisotropic Shrinkage of Injection Molded Poly Vinylidene Fluoride Samples, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE* 10.1002/pen.20878.
- [39] Keehae Kwon, A.I. Isayev, K.H. Kim, and C. van Sweden (2006), Theoretical and Experiment Studies of Anisotropic Shrinkage in Injection Moldings of Semicrystalline Polymers, Institute of Polymer Engineering, The University of Akron, Akron, Ohio 44325-0301.
- [40] Hamdy Hassan และคณะ (2009), A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 1218–1229.
- [41] G. Regnier & J. P. Trotignon (1993), Local Orthotropic Shrinkage Determination in Injected Moulded Polymer Plates, *Polymer Testing* 12 383-392.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



การประชุมวิชาการย้ายงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554
โรงแรมเอนบาสดอร์ชี่ ออมเทียม พัทยา จังหวัดชลบุรี



การวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉีดที่มีต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีด ชนิดโพลีเอททิลชนิดความหนาแน่นสูง

An Analysis of the Effects of Gate Types and Injection Speeds on the Shrinkage of High-Density Polyethylene for Plastic Injection Molding Part

พิชัย เล็กโล่ง* วิชา ศรีสืบสาย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง, เขตลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520

E-mail: Jaja2627@hotmail.com*

บทคัดย่อ

เนื่องจากกรรมวิธีการฉีดพลาสติกเพื่อผลิตชิ้นงานพลาสติกที่นิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งกรรมวิธีการฉีดพลาสติกที่ถูกต้องสมบูรณ์จะส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้า และความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานโพลีเอททิลชนิดความหนาแน่นสูง การจำลองการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โมเดลชนิดทางเข้าในการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ลักษณะทางเข้าคือทางเข้าแบบฟิล์ม ทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน และชิ้นงานทดสอบเวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติกเต็มโปรแกรมมีค่าช่วง 0.144-10.0 วินาที โดยใช้โปรแกรม โมลเด็ก 3ดี อาร์10 ในการวิเคราะห์การหดตัวของชิ้นงานทดสอบ ผลการวิเคราะห์พบว่าเปอร์เซ็นต์ การหดตัว (ในทิศทางยาว) ของชิ้นงานเมื่อใช้ทางเข้าแบบฟิล์ม โดยใช้ความเร็วฉีดสูงสุดและต่ำสุดมีค่าเฉลี่ยที่ 2.048 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ทางเข้าแบบพัดให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยที่ 1.870 เปอร์เซ็นต์ และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยที่ 1.953 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าหดตัว (ในทิศทางตั้งฉากการไหล) ของชิ้นงานเมื่อใช้ทางเข้าแบบฟิล์ม มีค่าเฉลี่ยที่ 1.880 เปอร์เซ็นต์ ที่ทางเข้าแบบพัดให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยที่ 1.710 เปอร์เซ็นต์ และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมให้ค่าเฉลี่ยที่ 1.782 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากทางเข้าแบบฟิล์มมีความเค้นเฉือนที่บริเวณทางเข้ามากกว่าทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมจึงส่งผลให้การหดตัวของแบบฟิล์มมีการหดตัวมากกว่าทุกความเร็วฉีด ผลจากการศึกษาที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่มีคุณภาพสูงได้

คำหลัก การหดตัวของพลาสติก/ โมลเด็ก 3ดี อาร์10

1. บทนำ

การหดตัวของพลาสติกมีความจำเป็นในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นอย่างมาก ซึ่งการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่นความดันในแม่พิมพ์ อุณหภูมิพลาสติกในระหว่างการหดตัว ชนิดของพลาสติก และ

ทิศทางในการไหลของพลาสติก โดยคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบแม่พิมพ์ที่ถูกต้องเป็นอย่างมาก [1], [2], [3], [4] ในปัจจุบันเทคนิคการใช้การจำลองทางไฟในอิลิเมนต์ที่มีความถูกต้องมีความแม่นยำสูงและมีความรวดเร็วมากขึ้น จึงมีการนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมในกระบวนการด้านการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย [5], [6], [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดมุ่งเน้นวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดทางเข้าโดยวิธีไฟในอิลิเมนต์ และความเร็วในการฉีดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกฉีด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ทางเข้าในการทดสอบที่มีความแตกต่างกันโดยมี 3 แบบคือทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate) ที่ทางเข้ามีรูปร่างตามคำแนะนำในการออกแบบและความเร็วในการฉีดที่แตกต่างกันออกไป เพื่อศึกษาผลของทางเข้าแต่ละชนิดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด

2. วิธีการทดลอง

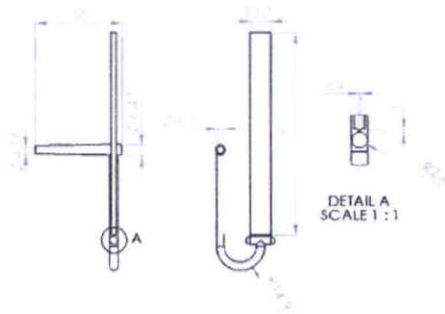
โปรแกรมไฟในอิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น โปรแกรม Moldex3D R10 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์พลาสติกในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของพลาสติกในการขึ้นรูปชิ้นงานฉีดตั้งแต่ช่วงเวลาในการเติมเต็มพลาสติก (Filling) การอัดตัว (Packing) การหล่อเย็น (Cooling) จนถึงอุณหภูมิห้อง (Ambient Temperature) เพื่อศึกษาการหดตัวของชิ้นงานในทิศทางยาว และตั้งฉากการไหล [2], [4], [8]

2.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

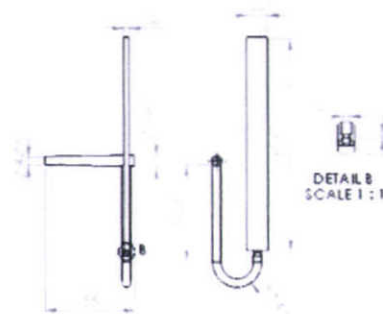
ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวของพลาสติกทั้งสามแบบ มีรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D955 มีขนาด 12.7×127×3.2 มิลลิเมตร [8] ตามรูปที่ 1 ถึง 3 โดยชิ้นงานทั้ง 3 แบบมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน โดยมีทางเข้าแบบฟิล์ม ทางเข้าแบบพัด และทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ชิ้นงานทดสอบแบบทางเข้าแบบฟิล์ม ออกแบบตามคำแนะนำของ Mungen [9] มีขนาดทางเข้ายาว 1 มิลลิเมตร กว้าง 12.7 มิลลิเมตร และหนา 0.64 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบพัด มีขนาดทาง



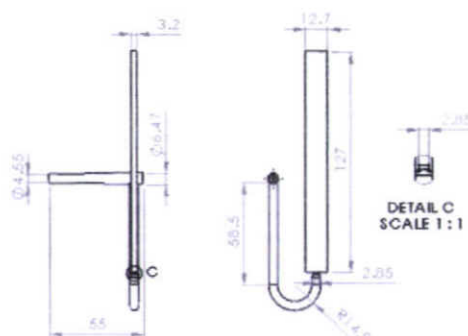
เขี้ยวยาว 1 มิลลิเมตร กว้าง 4.06 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร
 ดังรูปที่ 2 และชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม มีขนาดทางเขี้ยว
 ยาว 1 มิลลิเมตร กว้าง 2.85 มิลลิเมตร และหนา 2.85 มิลลิเมตร
 ดังรูปที่ 3 [3] โดยทั้งสามแบบในการทดลองนี้ออกแบบรูวิ่ง
 (Runner) ตามรูปแบบของ Kennedy [3] ส่วนการวางท่อน้ำหล่อ
 เย็นที่ใช้ในการหล่อเย็นชิ้นงานทดสอบเพื่อไม่ให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว
 หรือเสียรูปทรง [10], [11] โดยทำการจัดวางตามการแนะนำของ
 Herbert [12], ดังรูปที่ 4



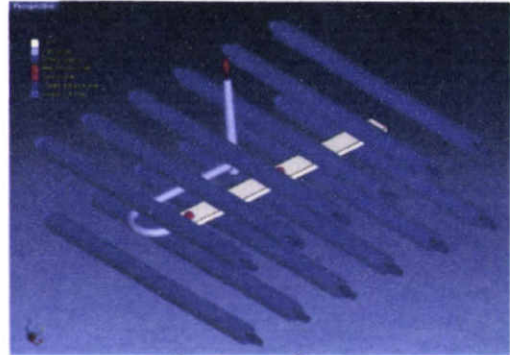
รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบแบบฟิล์ม (Film gate)



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบแบบพัด (Fan gate)



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแบบสี่เหลี่ยม (Edge gate)



รูปที่ 4 การวางท่อน้ำหล่อเย็น

2.2 โมเดลสำหรับใช้วิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์

โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ชิ้นงานทั้ง
 สามแบบสร้างเป็น Solid Model โดยโปรแกรม Solid Work 2011
 โดยแปลง Solid Model ให้อยู่ในรูปของ STL File แล้วส่งเข้า
 (Import file) มายังโปรแกรม Moldex3D R10 Designer เพื่อทำ
 การสร้าง Mesh Model แบบสามมิติ และวางท่อน้ำหล่อเย็น
 จากนั้นส่งออก (Export file) ไปยังโปรแกรม Moldex3D R10
 สำหรับวิเคราะห์ผลการทดลอง [8]

2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบ

ในการทดสอบการฉีดชิ้นงานทั้งสามแบบใช้พารามิเตอร์
 เดียวกัน โดยทำการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา (Filling time)
 0.144, 0.231, 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ ใช้ความ
 ตันในการฉีดย้ำ (Packing pressure) 70% ของความดันฉีดเต็ม
 เต็ม (Filling pressure) สุดท้ายก่อนเต็มแบบ ทำการเปลี่ยนความ
 ตันความดันฉีดเต็มเต็มเป็นความความดันในการฉีดย้ำที่ 99% ของ
 ปริมาตรชิ้นงานทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็น High-Density-
 Polyethylene (HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด
 MARLAX HXM 50100 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบทั้งสาม
 แบบการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 ที่กำหนดเท่ากันทุกความเร็ว
 ฉีดและพื้นที่หน้าตัดและมิติทางเข้า ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Process condition	Value	Unit
Packing time	13	second
Cooling time	30	second
Melt Temperature	250	°C
Mould Temperature	35	°C
Freeze Temperature	132	°C
Ejection Temperature	112	°C
Cooling circuits inlet Temperature	35	°C
Cooling circuits Flow rate	120	(cm ³ /s)

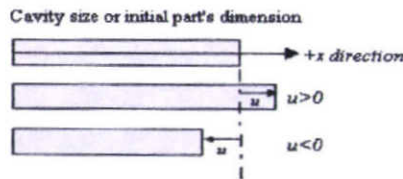


ตารางที่ 2 พื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและมิติทางเข้าชิ้นงาน

มิติของทางเข้าสู่โพรงแบบ	ทางเข้า		
	Film gate	Fan gate	Edge gate
กว้าง	12.7	2.06	2.85
สูง	0.64	2	2.85
ยาว	1	1	1
พื้นที่หน้าตัด	8.12	8.12	8.12
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อเส้นรอบรูปทางเข้า	0.304	1.000	0.712

3. การหดตัวของพลาสติก

การหดตัวของชิ้นงานทดสอบสามารถวัดค่าการหดตัวจากความแตกต่างระหว่างโพรงแบบ (Cavity) ต่อชิ้นงานฉีดทดสอบ เป็นการวัดการหดตัวของชิ้นงานทดสอบที่มีความแตกต่างโดยที่ค่า x เป็นบวกแสดงว่าเป็นชิ้นงานที่มีการขยายออก แต่ถ้า x เป็นลบแสดงว่าชิ้นงานหดตัว [4], [13], ดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวัดการหดตัวของชิ้นงานฉีด

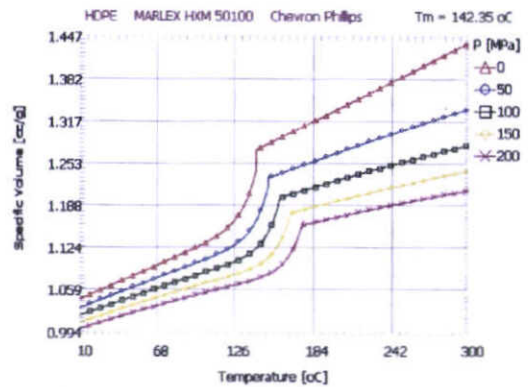
จากรูปที่ 5 สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพรงแบบและชิ้นงานฉีดได้ดังสมการที่ 1

$$L_s = \left(\frac{Lx - \mu}{Lx} \right) \times 100\% \quad (1)$$

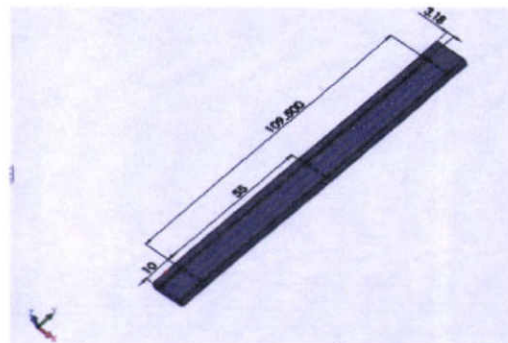
โดยที่ L_s คือ ค่าการหดตัว Lx คือขนาดของโพรงแบบ และ μ คือขนาดของชิ้นงานฉีด [8]

3.1 ข้อมูล PVT-Diagram สำหรับการวิเคราะห์การไหล

ข้อมูล PVT-Diagram จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การฉีดอัด (Packing phase) แต่อาจใช้ในขบวนการเติมเต็ม (Filling phase) ได้ จากรูปที่ 6 แสดง PVT-Diagram ของพลาสติกชนิด HDPE จากกราฟแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจากการหลอมเหลวไปเป็นของแข็งที่เส้นทางด้านซ้ายคือสถานะของแข็งและทางด้านขวาเป็นสถานะของของเหลว ในการวัดค่าการหดตัวนั้นสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของ อุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรจำเพาะ ของแต่ละตำแหน่งในกระบวนการฉีด [14]



รูปที่ 6 PVT-Diagram ของพลาสติกชนิด HDPE Supplier บริษัท Chevron Phillips เกรด MARLAX HXM 50100

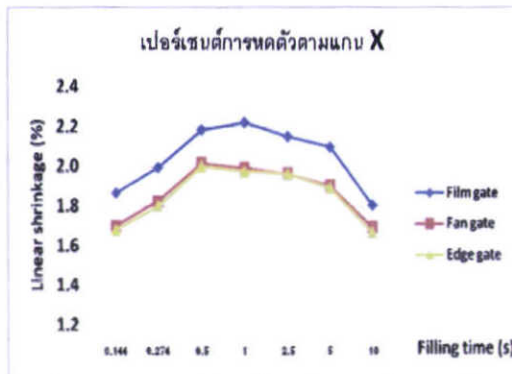


รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดการหดตัวของชิ้นงานทดสอบ [15]

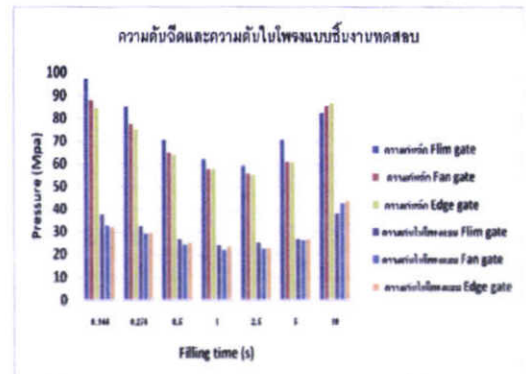
4. ผลการทดลอง

จากการทดลองจำลองการฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex3D R10 ในกาารไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา (Filling time) 0.144, 0.231, 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ และเงื่อนไขอื่น ๆ ตามตารางที่ 1 ในชิ้นงานทั้งสามแบบ ได้ผลการหดตัวของพลาสติก โดยทำการวัดตามรูปที่ 7 ได้ผลการหดตัวเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากการไหลตามทิศทางแกน X ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 8 ได้ผลการหดตัวเฉลี่ยตามทิศทางการไหลตามทิศทางแกน Y ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 9 และได้ผลการหดตัวเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากการไหลตามทิศทางแกน Z ของพลาสติกทั้งสามแบบ แสดงดังรูปที่ 10 ความดันที่ใช้ในการฉีด (Injection pressure) และความดันในโพรงแบบของชิ้นงานทดสอบแสดงในรูปที่ 11

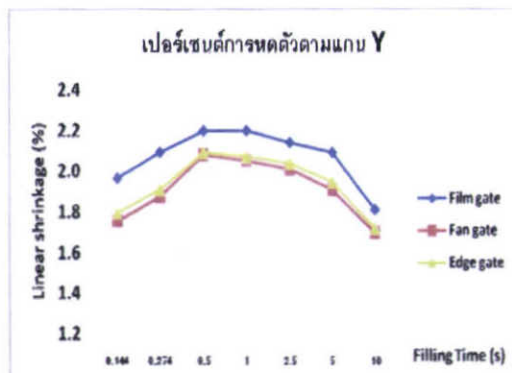
จากรูปที่ 13 14 และ 15 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกหลอมที่สัมพันธ์กับเวลาในการฉีดอัดของชิ้นงานแบบ Film gate Fan gate และ Edge gate ที่ฉีดด้วยความเร็วในการฉีดเต็มแบบที่ 0.5 วินาที และเวลาที่ทางเข้าปิด (Gate freeze) แสดงในรูปที่ 12



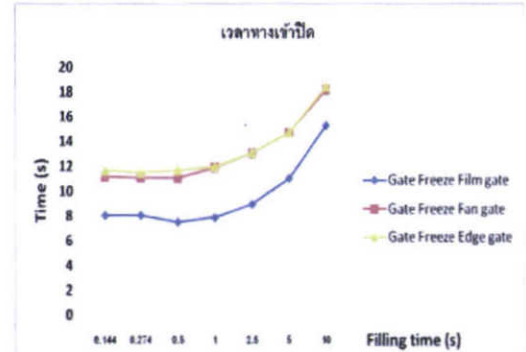
รูปที่ 8 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหลตามแกน X ของชิ้นงานทดสอบ



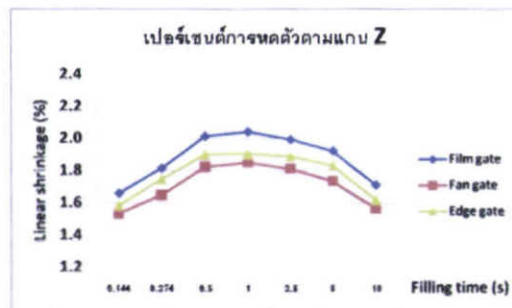
รูปที่ 11 ความดันฉีดและความดันในโพรงแบบของชิ้นงานทดสอบ



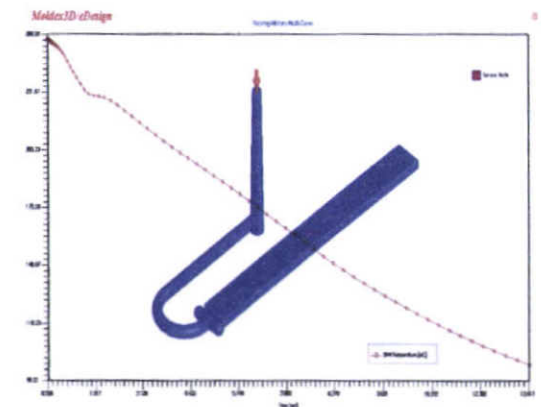
รูปที่ 9 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตามการไหลตามแกน Y ของชิ้นงานทดสอบ



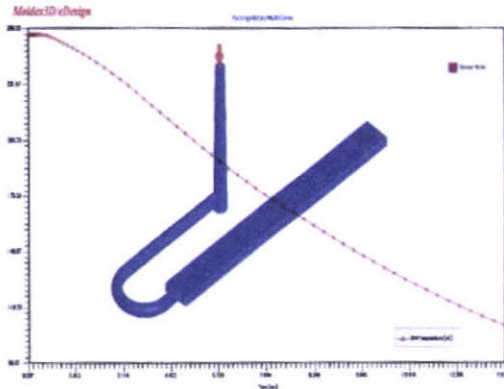
รูปที่ 12 เวลาที่ทางเข้าปิด (Gate freeze-off)



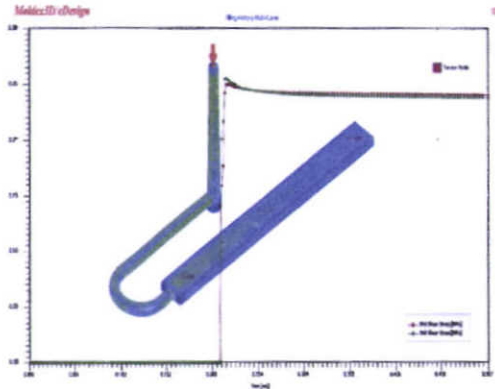
รูปที่ 10 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากการไหลตามแกน Z ของชิ้นงานทดสอบ



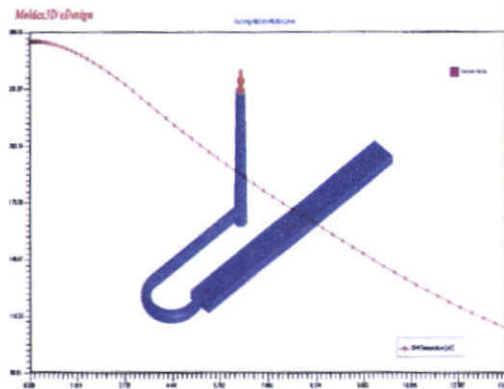
รูปที่ 13 จุดหมุนที่เวลาในการฉีดอยู่ที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Film gate



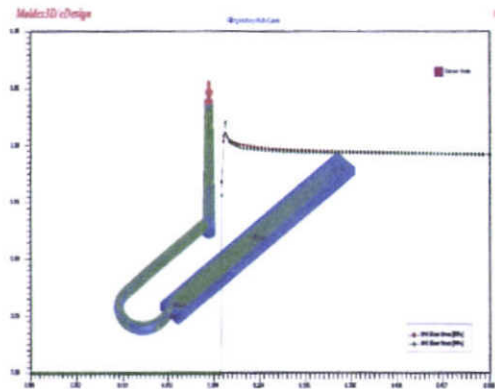
รูปที่ 14 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดเข้าที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Fan gate



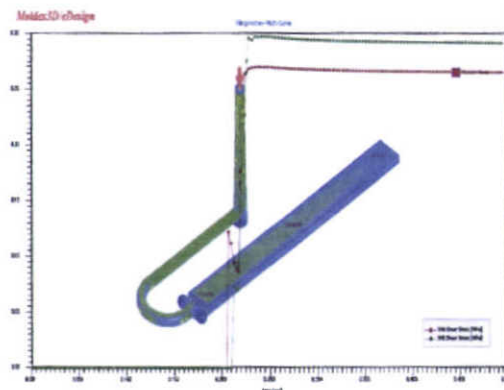
รูปที่ 17 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่หน้าทางเข้าและหลังทางเข้าของชิ้นงานแบบ Fan gate



รูปที่ 15 อุณหภูมิที่เวลาในการฉีดเข้าที่ทางเข้าของชิ้นงานแบบ Edge gate



รูปที่ 18 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่หน้าทางเข้าและหลังทางเข้าของชิ้นงานแบบ Edge gate



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่หน้าทางเข้าและหลังทางเข้าของชิ้นงานแบบ Film gate

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองการฉีดโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พบว่าการหดตัวในทิศทางตั้งฉากการไหลในทิศทางแกน X ทางเข้าแบบ Film gate จะมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 8.7% และมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Edge gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 9.5% การหดตัวในทิศทางการไหลในทิศทางแกน Z ทางเข้าแบบ Film gate จะมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 5.2% และมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Edge gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 9.0% และการหดตัวในทิศทางตามการไหลในทิศทางแกน Y ทางเข้าแบบ Film gate จะมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 7.1% และมีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Edge gate ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 4.2% ในการฉีดที่ความเร็วแตกต่างกันมีผลการหดตัวทุกความเร็วฉีด โดยที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 0.144 2.274 และ 0.231 วินาที พบว่าการหดตัวของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบเพิ่มมากขึ้น ตามรูปที่ 8 รูปที่ 9 และรูปที่ 10



เนื่องจากเวลาที่ทางเข้าปิดจากรูปที่ 12 ของชิ้นงานทั้งสามแบบนี้ลดลงเล็กน้อย แต่จากรูปที่ 11 พบว่าความดันในโพรงแบบของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบนี้ลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการหดตัวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ที่เงื่อนไขในการฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 1 และ 2.5 วินาที ตามลำดับ ตามรูปที่ 8 รูปที่ 9 และรูปที่ 10 เนื่องจาก จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ในการฉีดนั้นลดลง แต่ความดันในโพรงแบบนี้มีค่าที่มากขึ้นเล็กน้อยทำให้สามารถชดเชยการหดตัวของชิ้นงานทดสอบได้ใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 12 พบว่าเวลาที่ทางเข้าปิด ลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้มีค่าการหดตัวลดลงเล็กน้อย และที่เวลาน้อยมากที่เวลาฉีดให้ไหลเต็มแบบด้วยเวลา 5 และ 10 วินาที พบว่าการหดตัวในทิศทางการไหลและการหดตัวในทิศทางตั้งฉากการไหลของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบมีการหดตัวลดลงมาก เนื่องจากอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบลดลงมาก จึงส่งผลให้ในกระบวนการฉีดต้องใช้ความดันที่ใช้ในการฉีดเพิ่มเติมมากขึ้นและความดันในการฉีดอย่างมากขึ้นด้วยจึงส่งผลให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานทดสอบทั้งสามแบบลดลงมาก และที่ทางเข้าแบบ Film gate จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ในการฉีดของชิ้นงานแบบ Film gate นั้นลดลงเนื่องจากความเค้นเฉือนที่ทำให้เกิดความร้อนบริเวณทางเข้าที่มากกว่า จึงส่งผลให้การแข็งตัวที่ผนังแม่พิมพ์บริเวณทางเข้ามีการแข็งตัวน้อยกว่าเนื่องจากความร้อนจากความเค้นเฉือนของทางเข้าแบบ Film gate ที่มากกว่าชิ้นงานทดสอบแบบและ Fan gate และ Edge gate ตามรูปที่ 16 17 และ 18 จึงส่งผลให้ค่าการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ทุกความเร็วฉีด

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อเส้นรอบรูปทางเข้า พบว่าทางเข้าแบบ Film gate มีค่า 0.304 ในขณะที่ทางเข้าแบบ Fan gate มีค่า 1.0 และทางเข้าแบบ Edge gate มีค่า 0.712 ซึ่งมีความแตกต่างกัน พิจารณาจากรูปที่ 11 พบว่าความแตกต่างของความดันในการฉีดของชิ้นงานทั้งสามแบบเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันในโพรงแบบของชิ้นงานทั้งสามแบบ แรงดันที่ใช้ในการฉีดมีความแตกต่างกันมากกว่าความดันในโพรงแบบ โดยที่ชิ้นงานทดสอบทางเข้าแบบ Film gate จะมีค่าความดันในการฉีดที่สูงกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ที่มีค่าความดันที่ใกล้เคียงกัน เปรียบเทียบจากรูปที่ 13 14 และ 15 ที่เวลาเริ่มในการฉีด อุณหภูมิของชิ้นงานทั้งสามชิ้นจะมีค่าประมาณที่ 250 °C โดยที่ทางเข้าแบบ Film gate อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วทำให้การเติมเต็ม (Packing) ได้เพียง 7.0 วินาที แต่ขณะที่ทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate มีเวลาในการเติมเต็มที่ 10.6 และ 11.2 วินาที จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ที่มีพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเท่ากันซึ่งเป็นไปตาม PVT-Diagram ของพลาสติกชนิด HDPE

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการฉีดโดยใช้วิธีไฟในอิลิเมนต์พบว่า การหดตัวในทิศทางการไหล และตั้งฉากการไหล โดยทางเข้าแบบ

Film gate มีการหดตัวมากกว่าทางเข้าแบบ Fan gate และ Edge gate ที่มีหน้าตัดทางเข้าเท่ากัน ในการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติกชนิด HDPE เกรด MARLEX HXM 50100 ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ถูกฉีดอัด (Packing time) ที่เวลาที่ทางเข้าเปิดอยู่ ความดันในการฉีดอัด และอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.A. Khonakdar , J. Morshedian , M. Mehrabzadeh , U. Wagenknecht , S.H. Jafari (2003). Thermal and shrinkage behavior of stretched peroxide-cross linked high-density polyethylene, *European Polymer Journal* 39 1729–1734
- [2] R.A. Harris , H.A. Newlyn, R.J.M. Hague, P.M. Dickens (2003), Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 879–887
- [3] P.K. Kennedy (2008). *Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation*, M.S. Thesis, Technische Universites Eindhoven Netherlands, ISBN 978-90-386-1275-1, ISBN 978-90-386-1275-1
- [4] T.V. Zhil'tsova*, M.S.A. Oliveira, J.A.F. Ferreira, (2009). Relative influence of injection molding processing conditions on HDPE acetabular cups dimensional stability. *Journal of materials processing technology* 209 (2009) 3894–3904
- [5] G. Regnier & J. P. Troignon, (1993). Local Orthotropic Shrinkage Determination in Injected Molded Polymer Plates. *Polymer Testing* 12 383-392
- [6] Du-Soon Choi and Yong-Taek Im, (2000) "Prediction of Shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding" Published by Elsevier Science Ltd. pp. 655-665
- [7] Adam Kramschuster, Ryan Cavitt, Donald Ermer, Zhongbao Chen, Lih-Sheng Turg (2005), Quantitative Study of Shrinkage and Warpage Behavior for Microcellular and Conventional Injection Molding, *Polymer Engineering and Science*; 45,10, pg 1408.
- [8] Moldex3D Reference Manual R10, www.moldex3d.com
- [9] Mengen G., Mohren P., (1986), *How to make injection Molds 1st*, Carl Hanser Verlag, New York, pp.106.
- [10] Dimla D.E., Camilotto M., Miani F., (2005). Design and optimization of conformal cooling channel in injection molding tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, pp.1294–1300.
- [11] Herbert R., (2002), *Mold Engineering 2nd*, Hanser Publishers, Munich, pp.159



- [12] Hamdy Hassan , Nicolas Regnier, Guy Defaye, (2009). A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 1218–1229
- [13] S. Fathi, A.H. Behravesh (2007), Visualization of In-Mold Shrinkage in injection Molding Process. *Polymer Engineering and Science*; 47,5, pg 750.
- [14] Sekhar Chakravorty, (2002). Test Method PVT testing of polymers under industrial processing conditions. *Polymer Testing* 21 (2002) 313–317
- [15] ASTM Standards; Standard Test Method of Measuring Shrinkage from Mold Dimensions of Thermoplastics¹ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

ภาคผนวก ข

สมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของพลาสติกชนิด High-density-polyethylene (HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด MARLEX HXM 50100 ในโปรแกรม Moldex3D R10 (Power law model)

Step 2: Viscosity

Power Law Model

$$\eta = \eta_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right)$$

n	0.40234	-
B	132720	g/(cm.sec)
Tb	0.00018121	K
Note:	Viscosity Unit	g/(cm.sec)

ภาพที่ ข.1 สัมประสิทธิ์ที่เกิดขึ้นจากความหนืด Power law model

$$\eta = \eta_0 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$$

$$\eta_0 = B \exp(Tb / T)$$

เมื่อ n เป็น Power-law index ที่อยู่ในช่วง 0 และ 1 ;

Tb แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุ

T เป็นอุณหภูมิลอมเหลวหน่วยเป็น เคลวิน (K)

η_0 เป็น Zero shear viscosity

B เป็น Consistency index

การหาค่าความหนืดเริ่มต้นที่ได้จากข้อมูลสัมประสิทธิ์ที่ได้จากโปรแกรม Moldex 3D R10 แก่สมการได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนืดเริ่มต้น (Power law model)

ที่อุณหภูมิหลอมเหลวที่ $250\text{ }^{\circ}\text{C} = 523.15\text{ K}$

$$\begin{aligned}\eta_0 &= 132720 \exp\left(\frac{0.0018121}{523.15}\right) \\ &= 132720.45 \text{ g/(cm.sec)}\end{aligned}$$

หาค่าความหนืดเริ่มต้นเช่น อัตราเฉือน 200 1/s

$$\begin{aligned}\eta &= 132720.45(200)^{0.40234-1} \\ &= \underline{5593.76 \text{ g/(cm.sec)}}\end{aligned}$$

ที่อุณหภูมิหลอมเหลวที่ $263\text{ }^{\circ}\text{C} = 536.15\text{ K}$

$$\begin{aligned}\eta_0 &= 132720 \exp\left(\frac{0.0018121}{536.15}\right) \\ &= 132720.45 \text{ g/(cm.sec)}\end{aligned}$$

หาค่าความหนืดเริ่มต้นเช่น อัตราเฉือน 200 1/s

$$\eta = 132720.45(200)^{0.40234-1}$$

$$= \underline{5593.76 \text{ g/(cm.sec)}}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 10 1/s

$$\eta_0 = 132720 \exp\left(\frac{0.0018121}{523.15}\right)$$

$$= 132720.05 \text{ g/(cm.sec)}$$

หาความหนืดเริ่มต้นเช่น อัตราเฉือน 10 1/s

$$\eta = 132720.05(10)^{0.40234-1}$$

$$= \underline{33517.88 \text{ g/(cm.sec)}}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 100 1/s

$$\eta = 132720.05(100)^{0.40234-1}$$

$$= \underline{8464.80 \text{ g/(cm.sec)}}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 300 1/s

$$\eta = 132720.05(300)^{0.40234-1}$$

$$= \underline{4389.96 \text{ g/(cm.sec)}}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 1000 1/s

$$\eta = 132720.05(1000)^{0.40234-1}$$

$$= 2137.74 \text{ g/(cm.sec)}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 5000 1/s

$$\eta = 132720.05(5000)^{0.40234-1}$$

$$= 817.26 \text{ g/(cm.sec)}$$

คุณสมบัติของพลาสติกชนิด High-density-polyethylene (HDPE) ของบริษัท Chevron Phillips เกรด MARLEX HXM 50100 ในโปรแกรม Moldex3D R10 (Cross model 2)

Step 2: Viscosity

Modified Cross Model (2)

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T} + DP\right)$$

n [0.02206, 0.422]	0.40234	-
Taus [132720, 2.7766e+006]	132720	dyne/cm ²
B [0.00129, 831.77]	0.00018121	g/(cm.sec)
Tb [2624.8, 9232.5]	9232.5	K
D [0, 0]	0	cm ² /dyne
Note:	Viscosity Unit	g/(cm.sec)

ภาพที่ ข.2 สัมประสิทธิ์ที่เกิดขึ้นจากความหนืด Cross model 2

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{Tb}{T} + DP\right)$$

เมื่อ τ^* เป็น Relaxation stress

การหาค่าความหนืดเริ่มต้นที่ได้จากข้อมูลสัมประสิทธิ์ที่ได้จากโปรแกรม Moldex 3D R10 แก้ว
สมการได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนืดเริ่มต้น (Power law model)

ที่อุณหภูมิหลอมเหลวที่ $250 \text{ } ^\circ\text{C} = 523.15 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \eta_0 &= 0.00018121 \exp\left(\frac{9232.5}{523.15} + 0\right) \\ &= 8366.98 \text{ g/(cm.sec)} \end{aligned}$$

หาความหนืดเริ่มต้น เช่น อัตราเฉือน 200 1/s

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{8366.98}{1 + \left(\frac{8366.98 \cdot 200}{132720} \right)^{0.5966}} \\ &= \underline{1511.43 \text{ g/(cm.sec)}} \end{aligned}$$

ที่อุณหภูมิหลอมเหลวที่ $263\text{ }^{\circ}\text{C} = 536.15\text{ K}$

$$\begin{aligned}\eta_0 &= 0.00018121 \exp\left(\frac{9232.5}{536.15} + 0\right) \\ &= 5454.20 \text{ g/(cm.sec)}\end{aligned}$$

หาความหนืดเริ่มต้น เช่น อัตราเฉือน 200 1/s

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{5454.20}{1 + \left(\frac{5454.20 \cdot 200}{132720}\right)^{0.5966}} \\ &= \underline{1208.32 \text{ g/(cm.sec)}}\end{aligned}$$

ที่อุณหภูมิหลอมเหลวที่ $232\text{ }^{\circ}\text{C} = 523.15\text{ K}$

$$\begin{aligned}\eta_0 &= 0.00018121 \exp\left(\frac{9232.5}{505.15} + 0\right) \\ &= 156918.305 \text{ g/(cm.sec)}\end{aligned}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 10 1/s

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{156918.305}{1 + \left(\frac{156918.305 \cdot 10}{132720}\right)^{0.5966}} \\ &= 29247.93 \text{ g/(cm.sec)}\end{aligned}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 100 1/s

$$\eta = \frac{156918.305}{1 + \left(\frac{156918.305 \cdot 100}{132720} \right)^{0.5966}}$$

$$= 8601.90 \text{ g/(cm.sec)}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 300 1/s

$$\eta = \frac{156918.305}{1 + \left(\frac{156918.305 \cdot 300}{132720} \right)^{0.5966}}$$

$$= 4725.28 \text{ g/(cm.sec)}$$

ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 1000 1/s

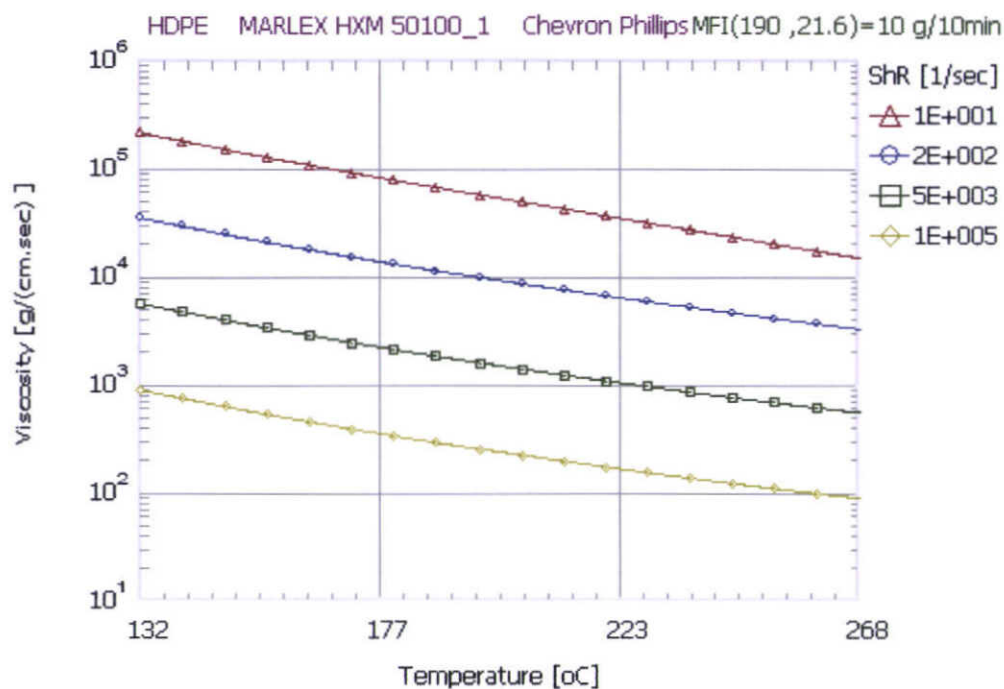
$$\eta = \frac{156918.305}{1 + \left(\frac{156918.305 \cdot 1000}{132720} \right)^{0.5966}}$$

$$= 2270.64 \text{ g/(cm.sec)}$$

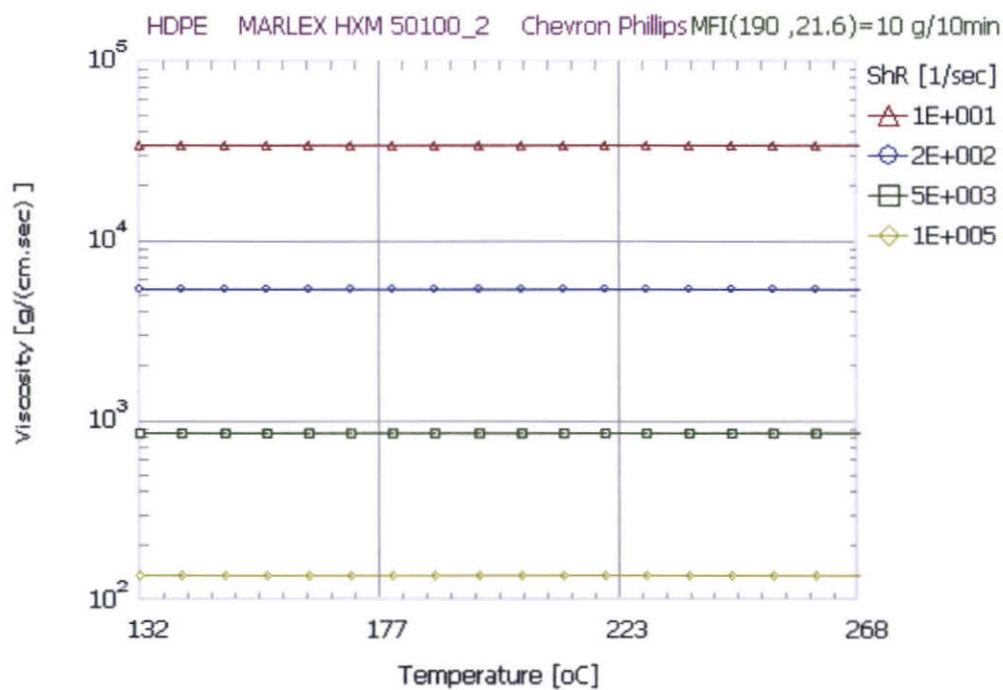
ที่อัตราเฉือน (Shear rat) ที่ 5000 1/s

$$\eta = \frac{156918.305}{1 + \left(\frac{156918.305 \cdot 5000}{132720} \right)^{0.5966}}$$

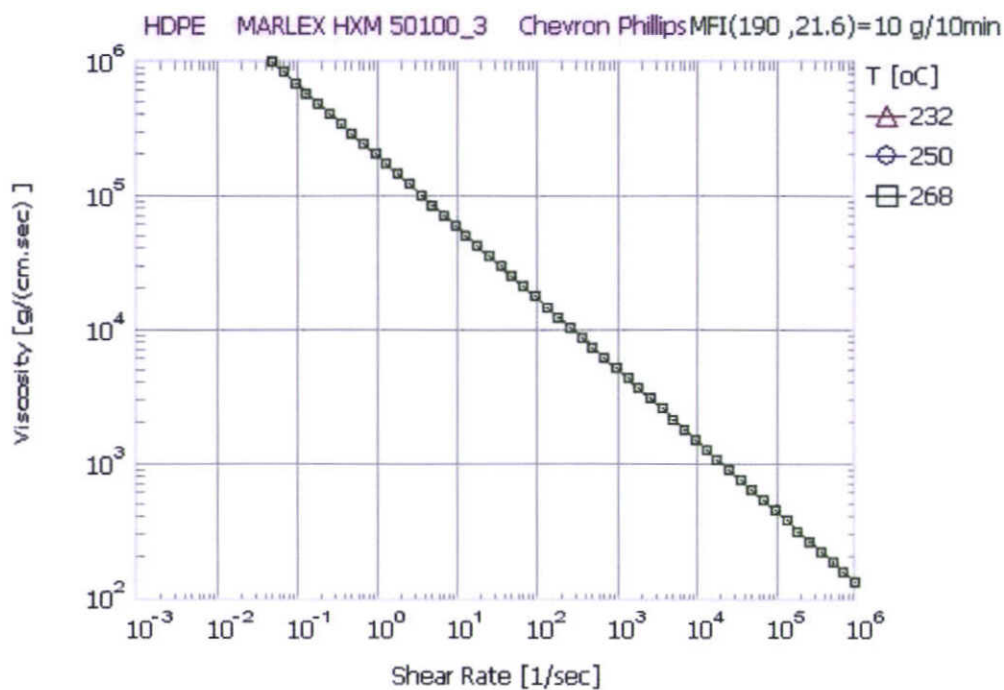
$$= 877.07 \text{ g/(cm.sec)}$$



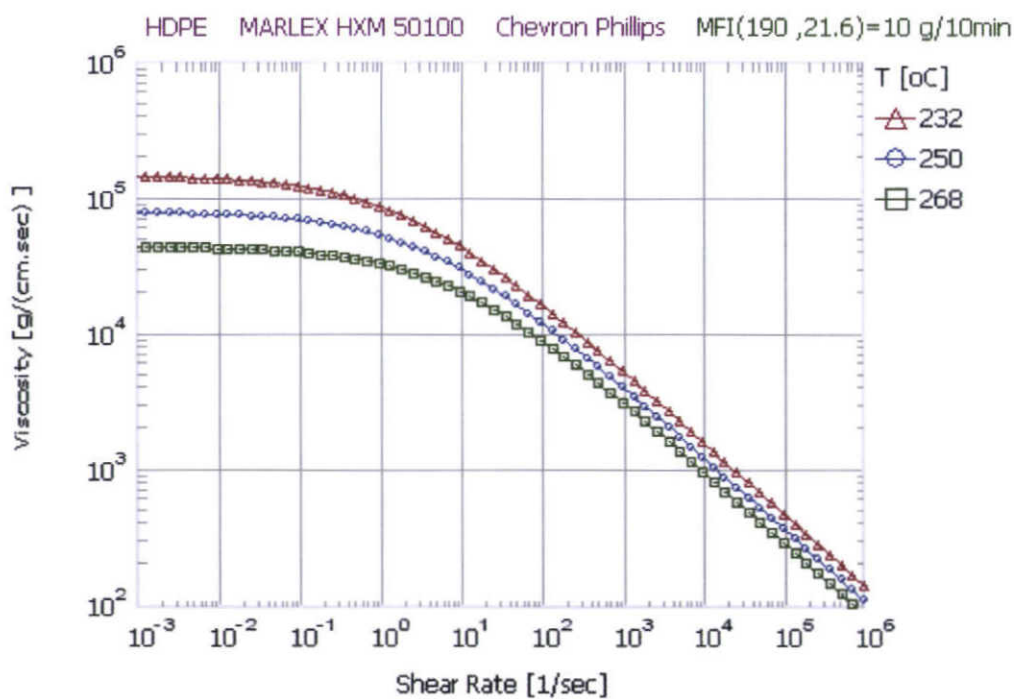
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดพลาสติกชนิด (Cross model 2)



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดพลาสติกชนิด (Power law model)



ภาพที่ ข.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด Power law model



ภาพที่ ข.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืดใน Cross-Model 2

ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรม Moldex 3D R10.

1. ขั้นตอนการออกแบบ

เริ่มจากการออกแบบชิ้นงานโดยโปรแกรม Solid work 2010

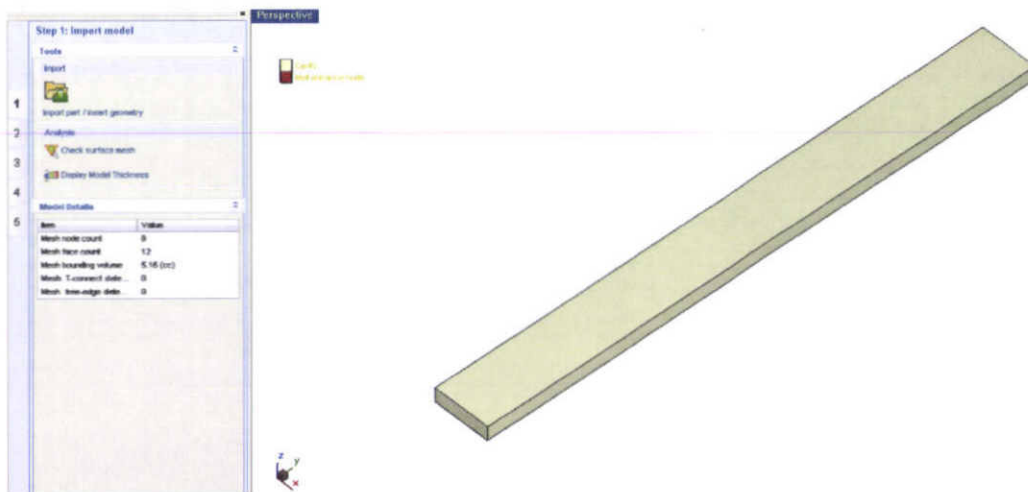


รูปที่ ค.1 ลักษณะชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม CAD

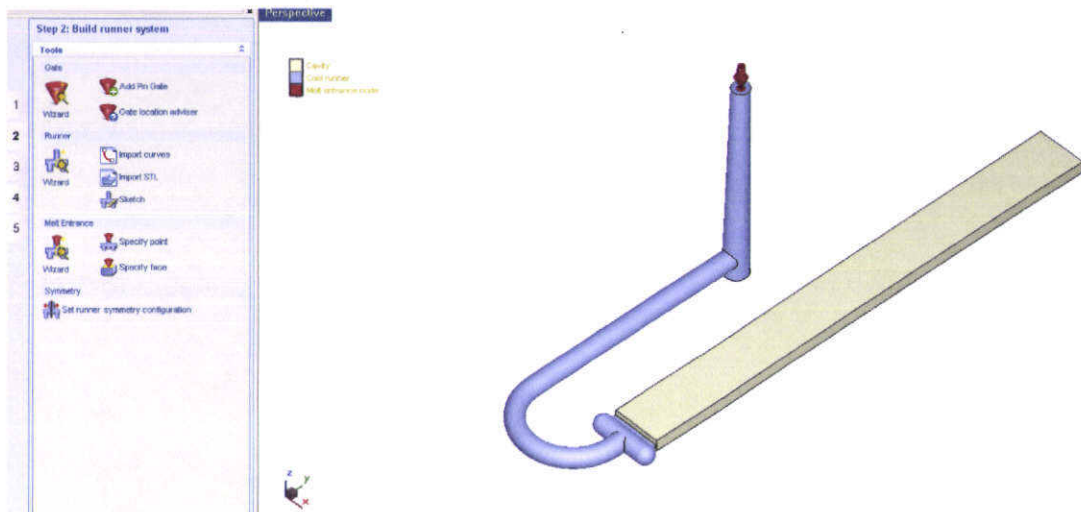
จากนั้น Export ไฟล์ของชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม CAD ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุลกลาง คือ Mobile phone. Stl เพื่อสำหรับนำเข้าไปในโปรแกรม Moldex 3D designer โดยชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม CADที่จะนำเข้าเป็นแบบ Solid model

2. ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแม่พิมพ์

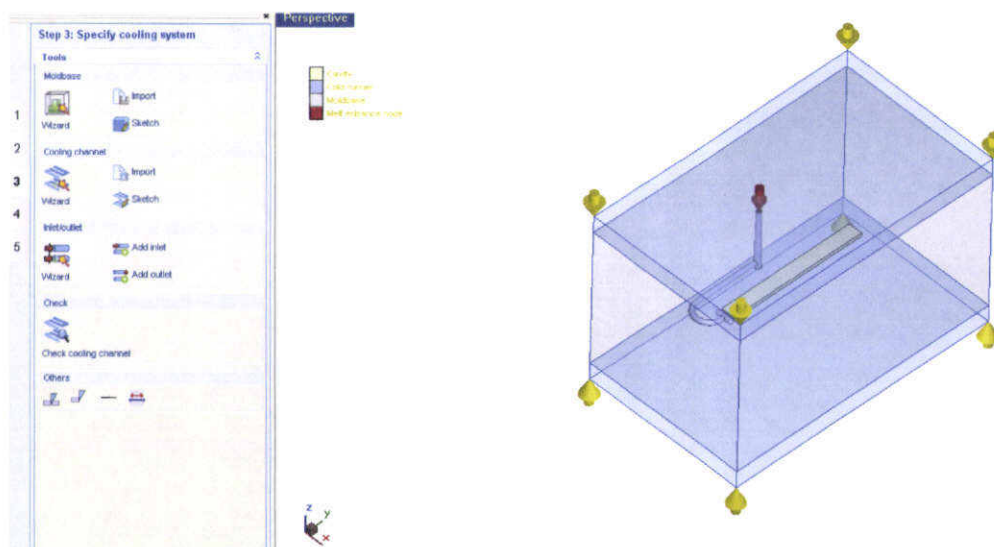
หลังจากสร้างแบบจำลองชิ้นงานฉีดแล้ว โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ของการฉีด โดยเริ่มจากโปรแกรม Moldex 3D designer โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



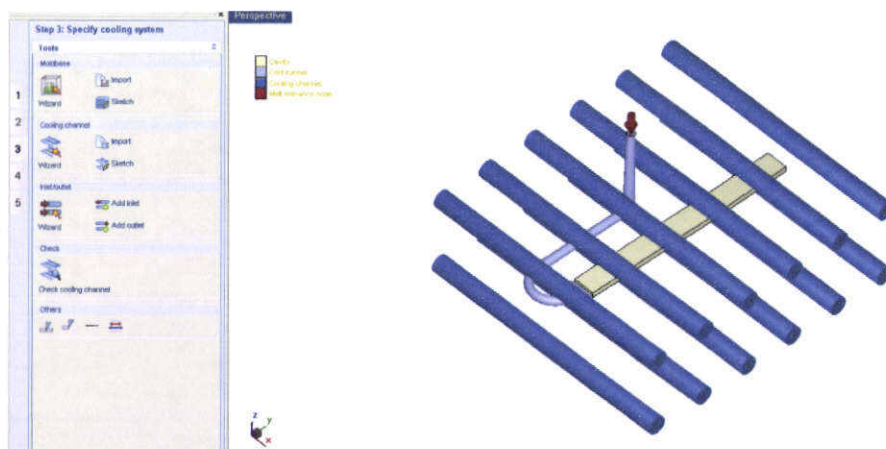
รูปที่ ค.2 Import ชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม CAD ในรูปแบบไฟล์ .Stl



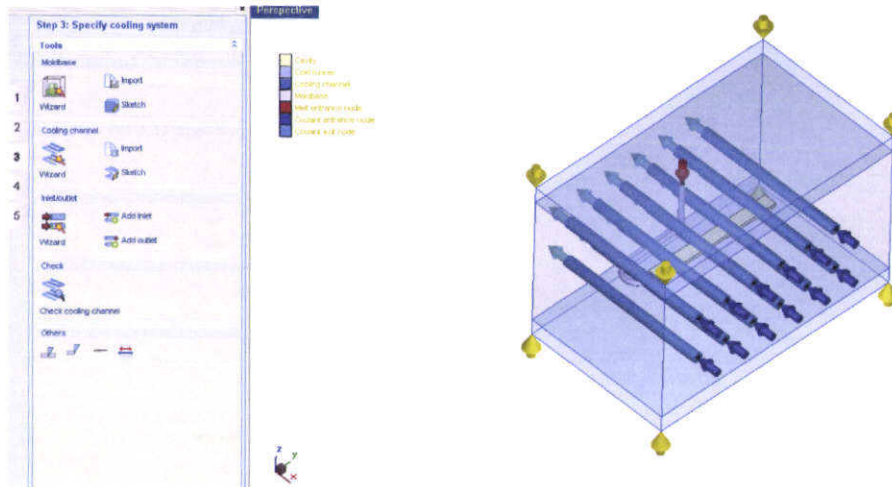
รูปที่ ค.3 Import รูวึ่งที่ออกแบบโดยโปรแกรม CAD ในรูปไฟล์ .Stl และกำหนด จุดพลาสติก หลอมเหลวเข้า (Melt Entrance)



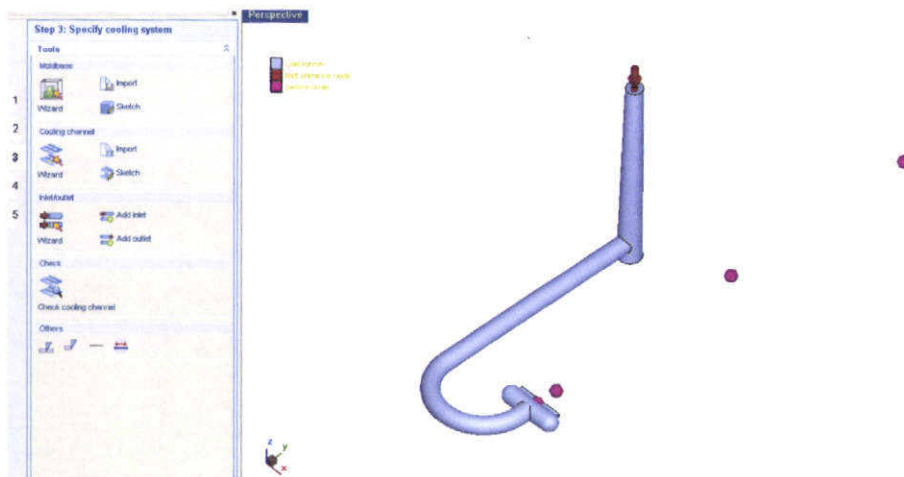
รูปที่ ค.4 กำหนดขนาดแม่พิมพ์ (Mold base)



รูปที่ ค.5 กำหนดขนาดและตำแหน่งช่องหล่อเย็น (Cooling channel)



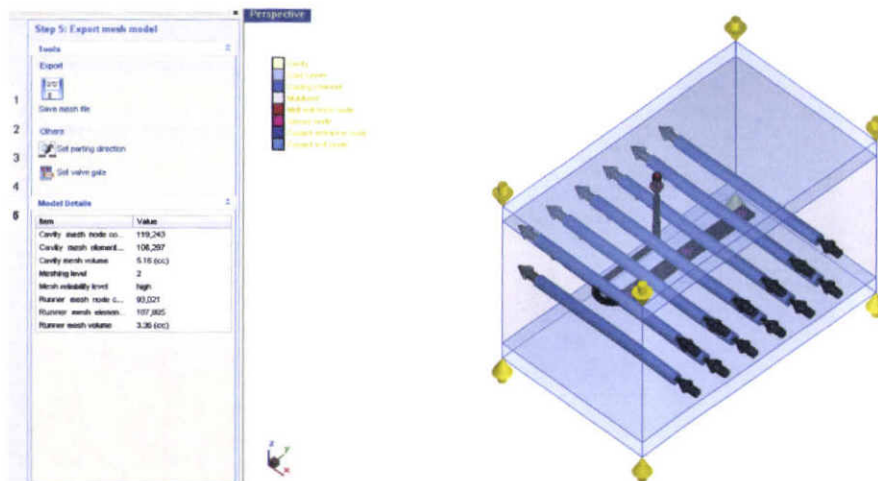
รูปที่ ค.6 กำหนดจุดน้ำหล่อเย็นเข้า และน้ำหล่อเย็นออก



รูปที่ ค.7 ทำการวางตำแหน่ง Node sensor เพื่อเก็บผลในการฉีด

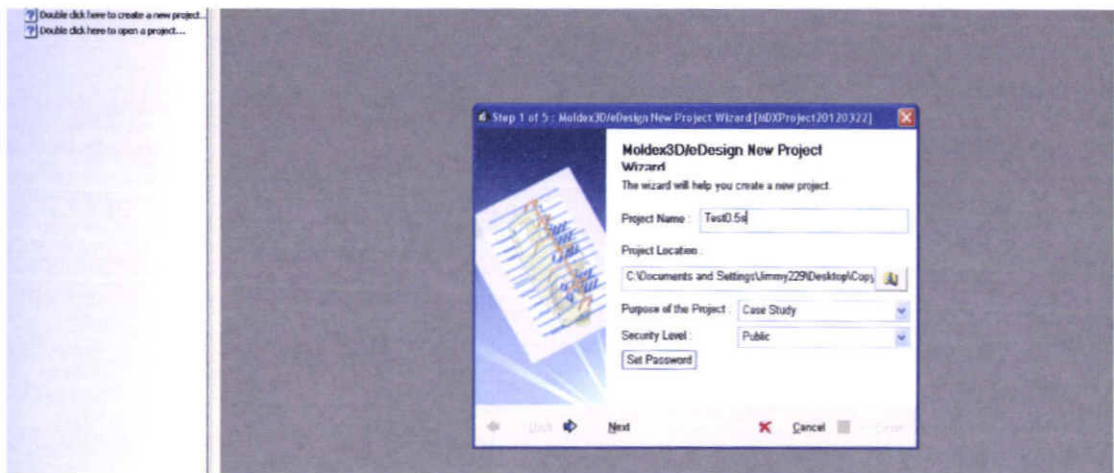


รูปที่ ค.8 กำหนดจำนวนของ Mesh

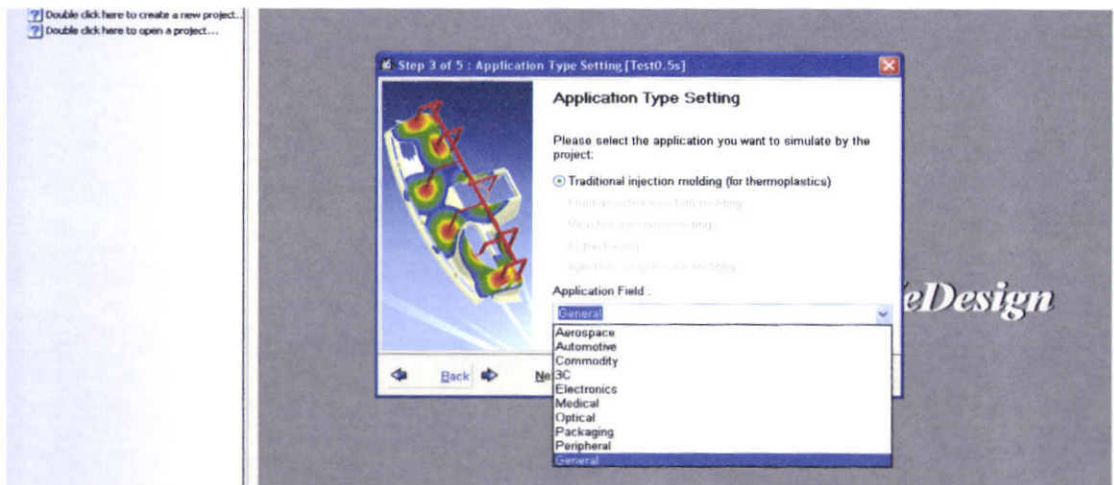


รูปที่ ค.9 ทำการจัดเก็บไฟล์ โดยการ Export ไฟล์ในรูปแบบสกุล .mde

หลังจากที่ทำการ mesh และทำการกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์แล้ว ในโปรแกรม Moldex3D Designer ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการฉีด (Process condition) และชนิดของวัสดุ และระบบสมการต่างๆ ในการจำลองการฉีด โดยใช้โปรแกรม Moldex3D/eDesign ดังขั้นตอนต่อไปนี้



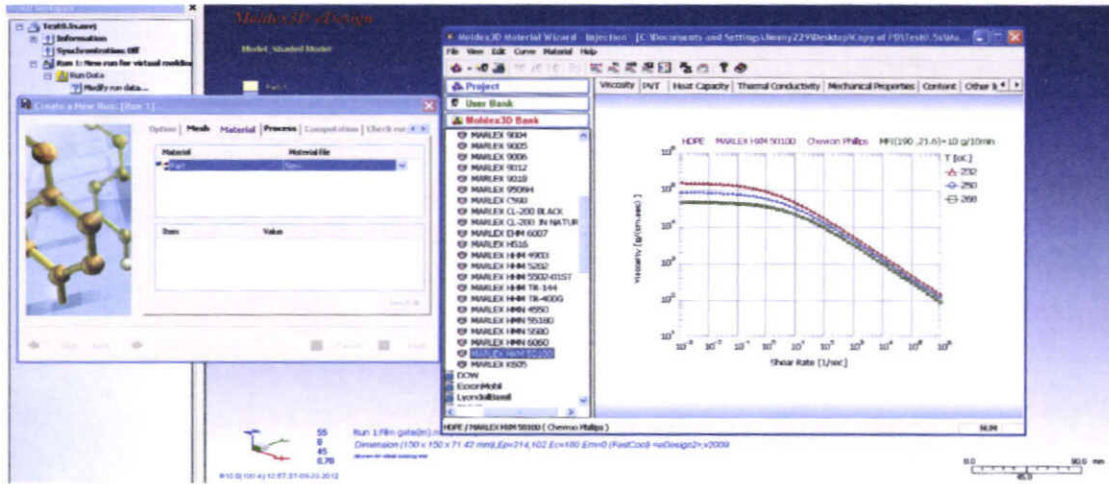
รูปที่ ค.10 ทำการสร้างโครงการวิจัย



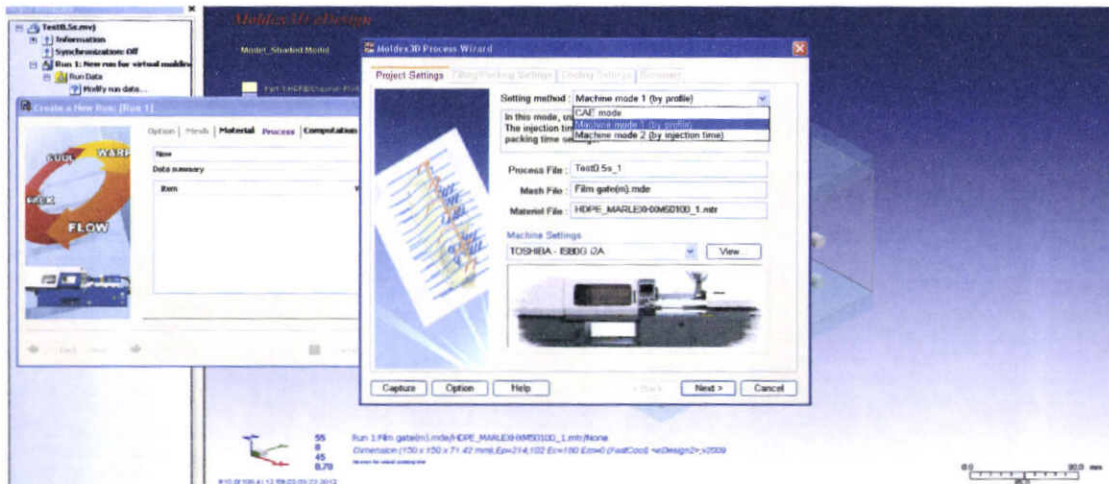
รูปที่ ค.11 ทำการเลือกชนิดรูปแบบการฉีด



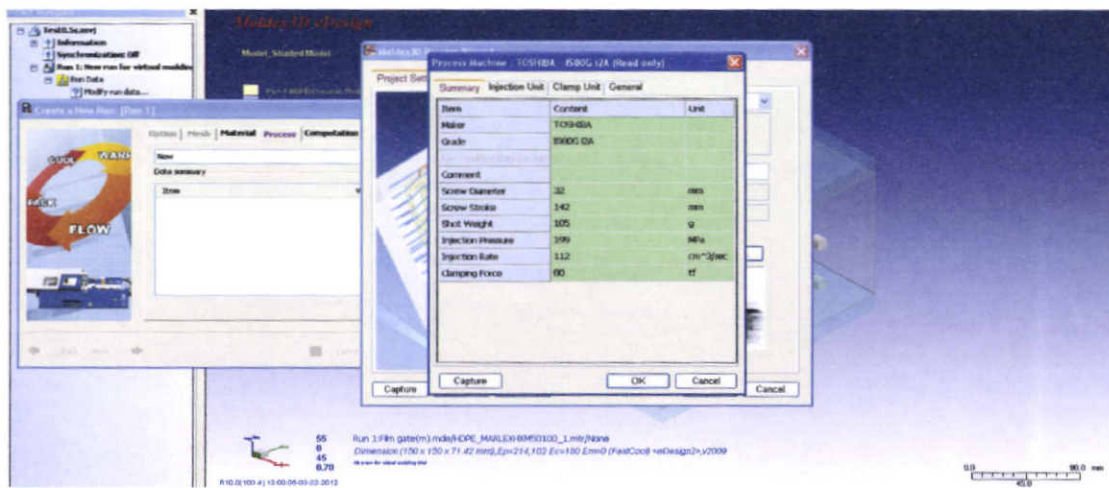
รูปที่ ค.12 Import ชิ้นงานฉีดที่ทำกรกำหนดเงื่อนไขจาก Moldex 3D designer



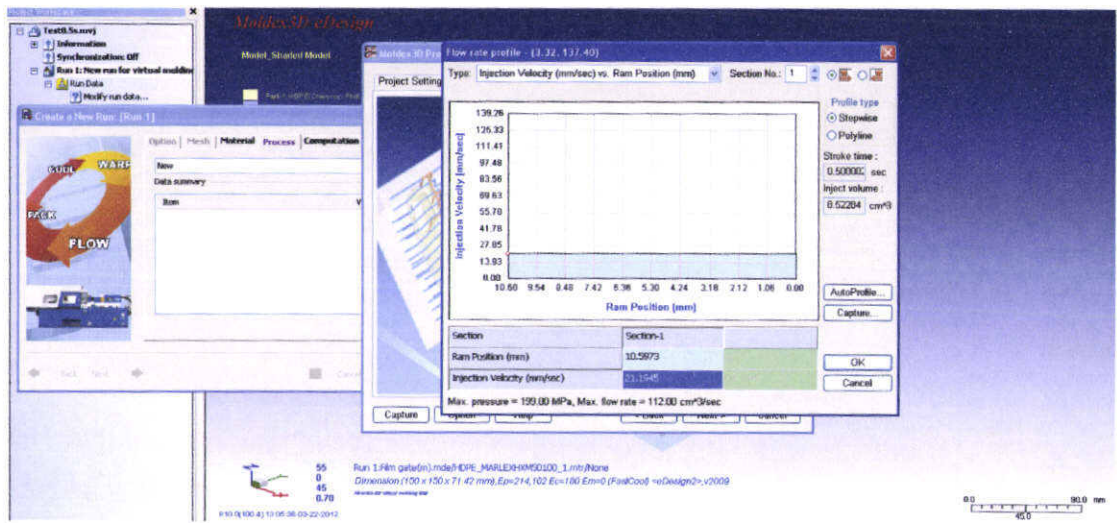
รูปที่ ค.13 ทำการกำหนดวัสดุ



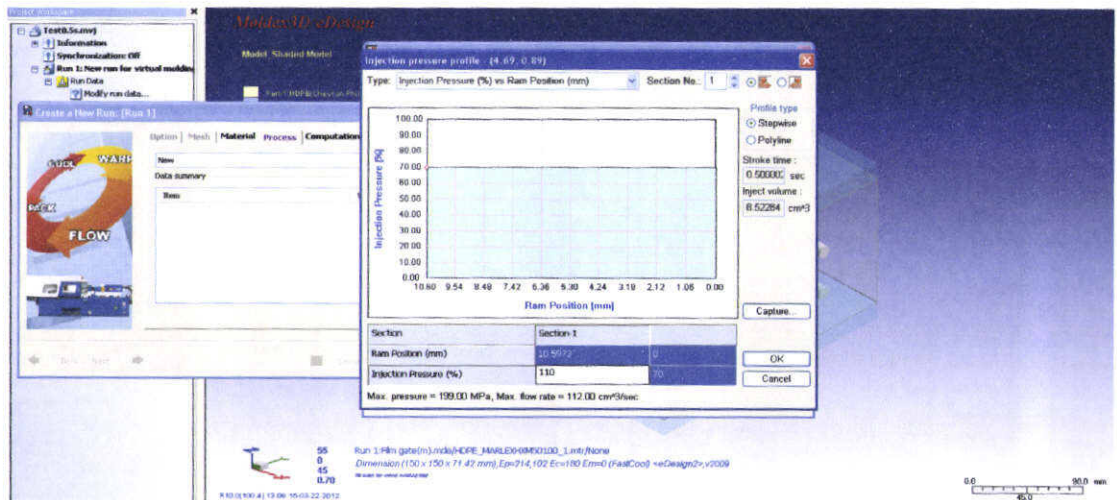
รูปที่ ค.14 กำหนดเงื่อนไขในการฉีด



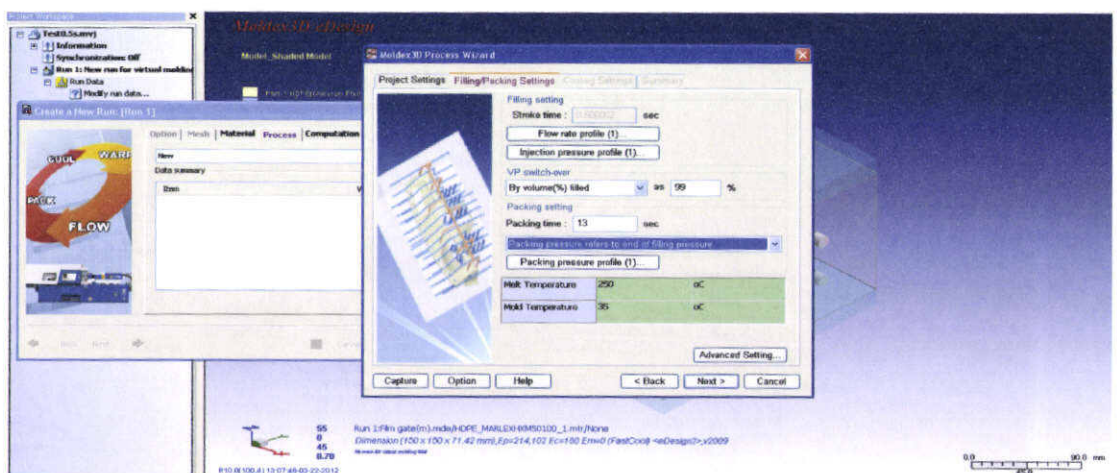
รูปที่ ค.15 เลือกเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการฉีด



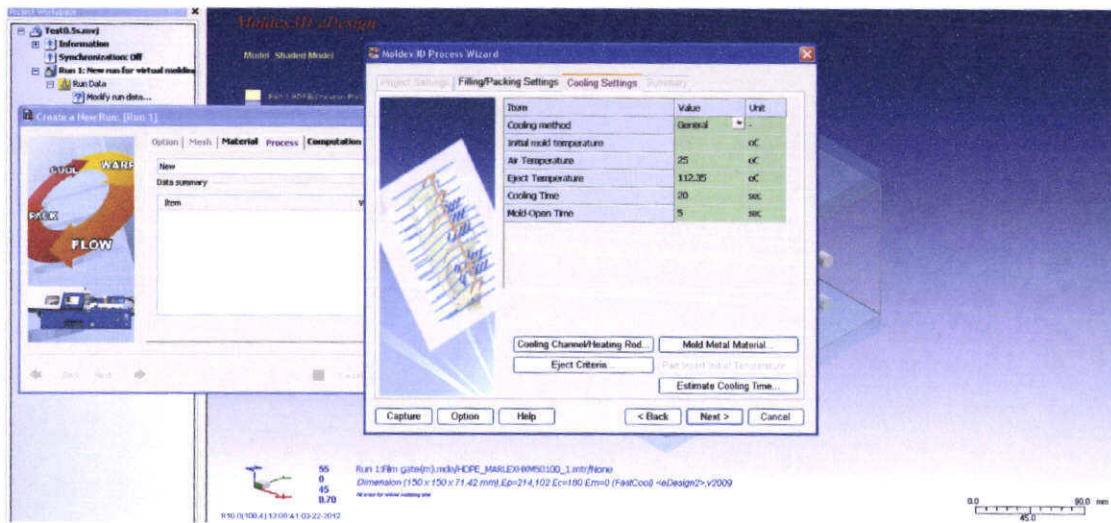
รูปที่ ค.16 กำหนดเวลาในการฉีด (Filling time)



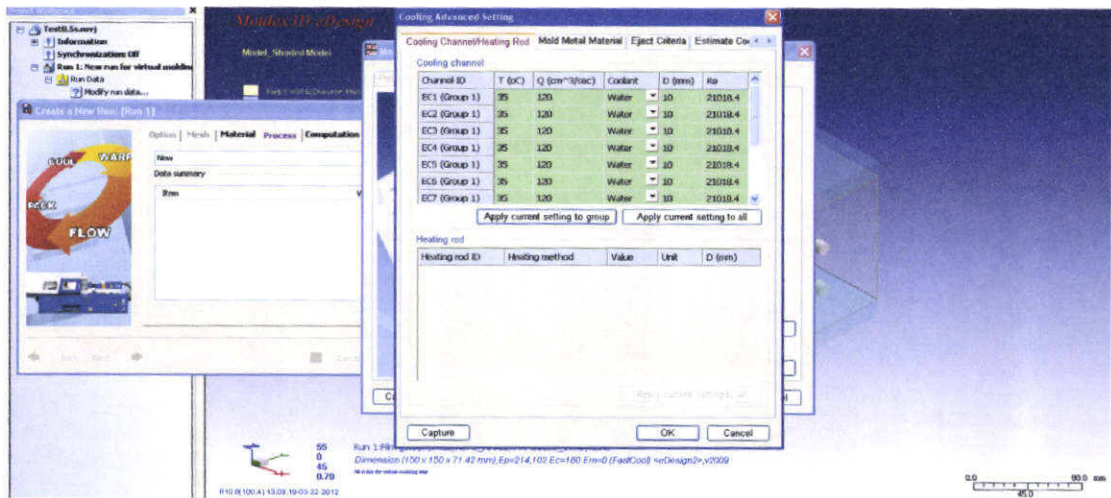
รูปที่ ค.17 กำหนดความดันที่ใช้ในการฉีด



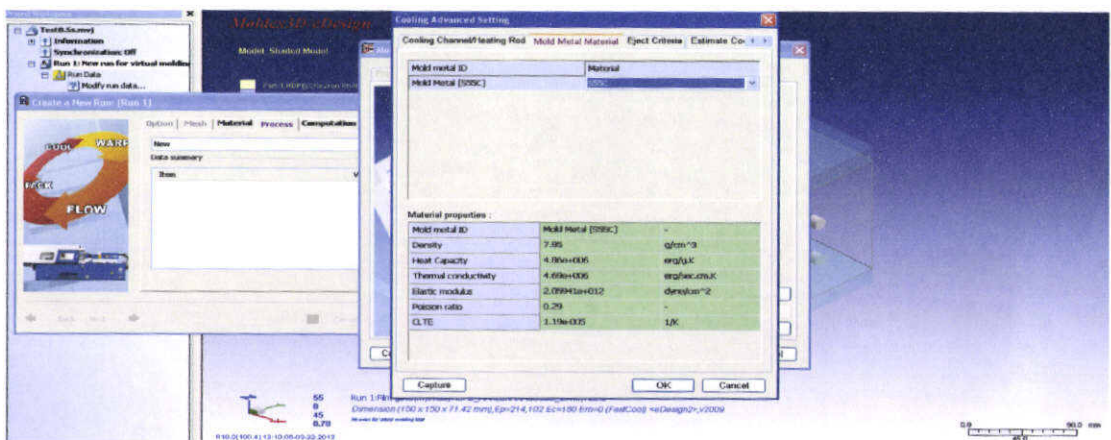
รูปที่ ค.18 กำหนดช่วงในการเปลี่ยนจากการฉีดเป็นฉีดย้ำ และกำหนดเวลาในการฉีดย้ำ



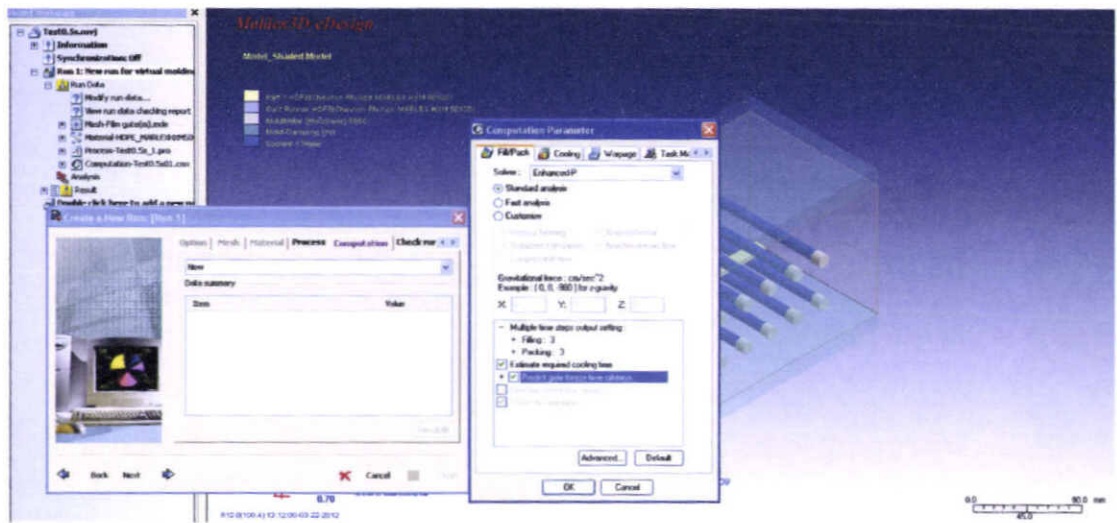
รูปที่ ค.19 กำหนดเงื่อนไขการหล่อเย็น



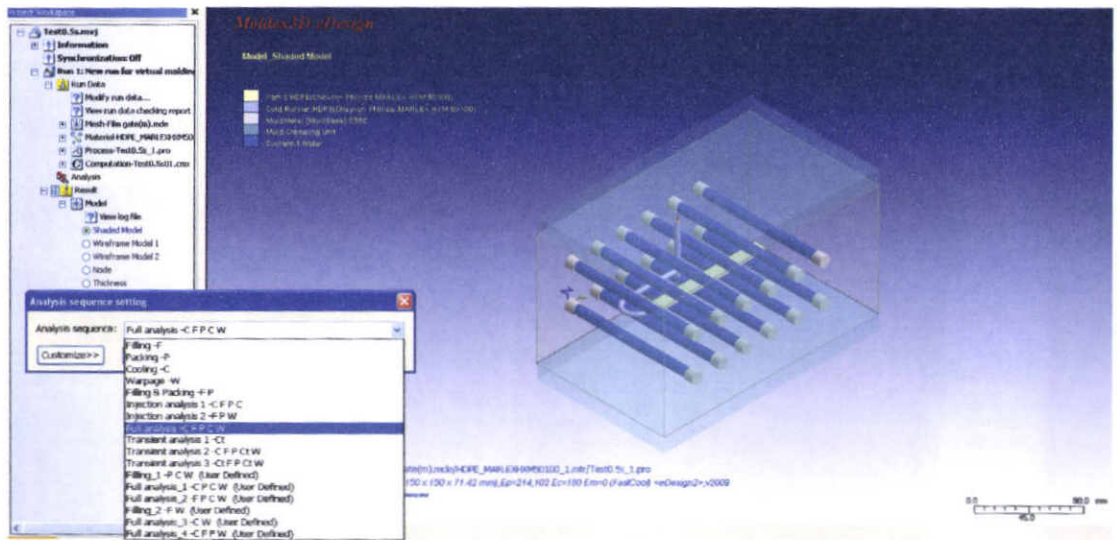
รูปที่ ค.20 เลือกชนิดการหล่อเย็น



รูปที่ ค.21 กำหนดชนิดเหล็กของแม่พิมพ์



รูปที่ ค.22 วิเคราะห์ประมาณเวลาในการหล่อเย็น และทำนายเวลาทางเข้าปัด (Gate-freeze off)



รูปที่ ค.23 เลือกการวิเคราะห์

ภาคผนวก ง

ข้อมูลเม็ดพลาสติก

CHEVRON PHILLIPS SINGAPORE CHEMICALS (PRIVATE) LIMITED
 (INCORPORATED IN SINGAPORE)
 5 TEMASEK BOULEVARD #05-01
 SUNTEC TOWER FIVE, SINGAPORE 038985
 RAFFLES CITY P.O. BOX 3058, SINGAPORE 911799

PHONE:	(65) 65173100
TELEX:	PHILPET RS 23337
FACSIMILE:	(65) 65173271 - PE CUSTOMER SERVICES (65) 65173270 - POLYOLEFIN / MD'S OFFICE (65) 65173274 - HUMAN RESOURCE / ADMINISTRATION (65) 65173276 - CHEMICALS/ DRILLING SPECIALTIES (65) 65173273 - PURCHASING / FINANCE / ACCOUNTS / IT / CREDIT

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Date : 15 April 2011 B010/04/11

Reference R/84141

Sales Order No. : 7097877

LIACK SENG TRADING CO., LTD
 18/1 SOI YANARKAS 3
 CHONGNONTSEE YANNAWA
 BANGKOK 10120 THAILAND

TO WHOM IT MAY CONCERN

This is to certify that Marlex® High Density Polyethylene HXM 50100 shipped to you are manufactured by Chevron Phillips Singapore Chemicals (Private) Limited and they meet all quality standards in our current manufacturing specifications.

TEST RESULT

TEST	HIGH LOAD MELT INDEX (g/10 min)	DENSITY 23° C (g/cm ³)	COLOR VALUE	PELLET COUNT (Pellets/g)	QUANTITY (MT)
METHOD	ASTM D 1238*	ASTM D1505*	PPSC-P11-1	PPSC-P13-1	
<u>Lot Numbers</u>					
BCD 341935	9.8	0.949	215	50	17.000

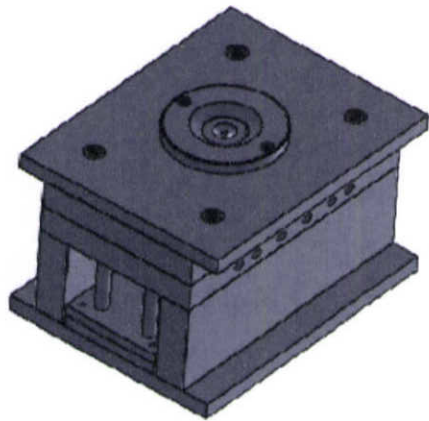
Total Nett Weight : 17.000

Note. * Samples were tested in accordance with ASTM methods, with the exception of sample conditioning

THIS IS A COMPUTER GENERATED FORM.
 NO SIGNATURE IS REQUIRED.

ภาคผนวก จ

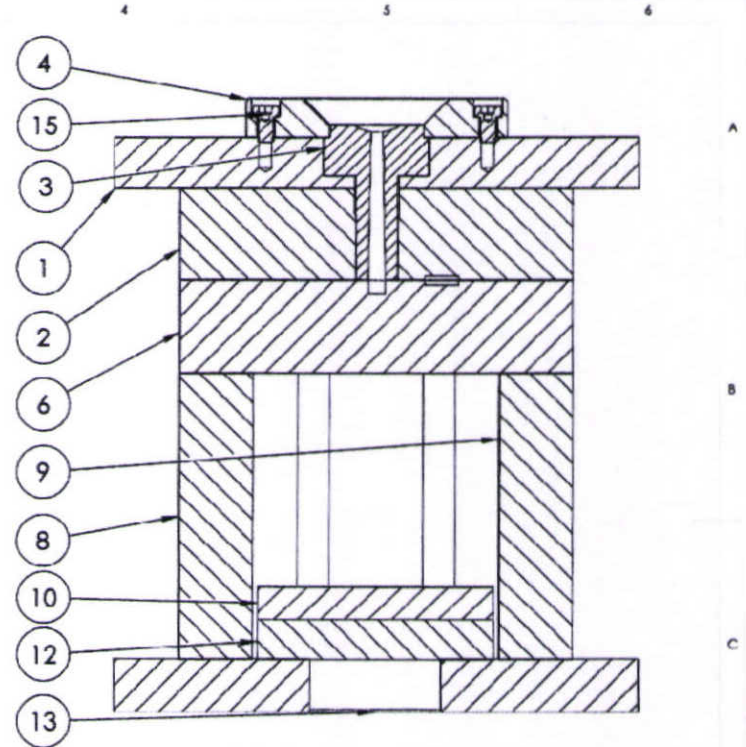
แบบโมลจีตพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D955-08



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	top_clamp_plate-1	1
2	cavity_plate	1
3	spure_bush	1
4	locating_ring	1
5	coin_fan_gate	1
6	core_plate	1
7	coin_fan_gate	1
8	Spacer_blockL.SLDASM	1
9	Spacer_blockR.SLDASM	1
10	Part9	1
11	mold_base.sldasm-Part-9	4
12	mold_base.sldasm-Part-3	1
13	bottom_clamp_plate	1
14	DIN 912 M10 x 16 --- 16N	4
15	DIN 6912 - M6 x 10 --- 10N	2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANG./RAE:

DRAWN: _____
 CHK'D: _____
 APP'D: _____
 MFG: _____
 Q.A: _____



DEBUR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

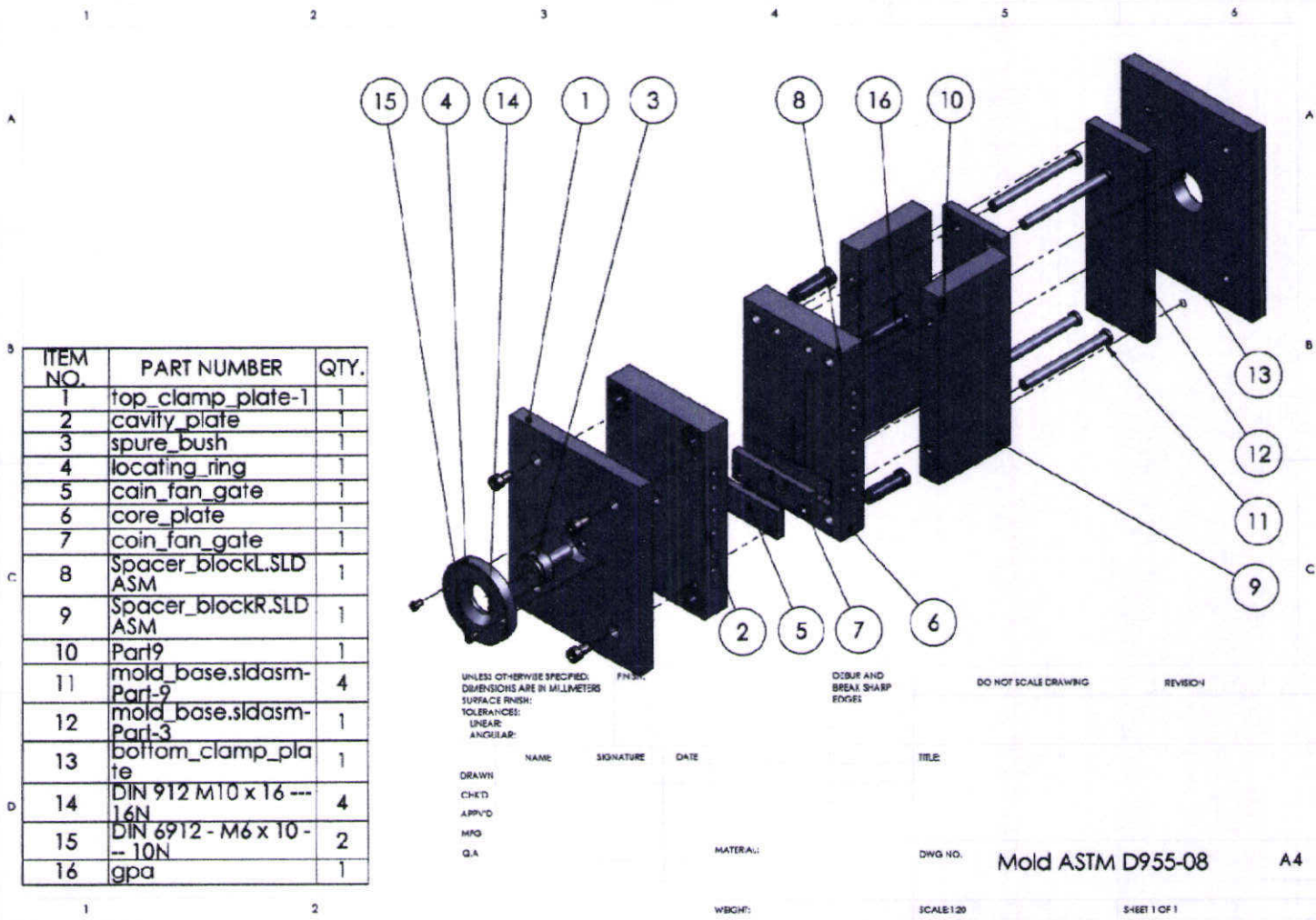
REVISION

SECTION A-A
 SCALE 1 : 2

NAME: _____ SIGNATURE: _____ DATE: _____ TITLE: _____

MATERIAL: _____ DWG NO. **Mold ASTM D955-08** A4

WEIGHT: _____ SCALE: 1:20 SHEET 1 OF 1



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	top_clamp_plate-1	1
2	cavity_plate	1
3	spure_bush	1
4	locating_ring	1
5	cain_fan_gate	1
6	core_plate	1
7	coin_fan_gate	1
8	Spacer_blockL.SLD ASM	1
9	Spacer_blockR.SLD ASM	1
10	Part9	1
11	mold_base.sldasm- Part-9	4
12	mold_base.sldasm- Part-3	1
13	bottom_clamp_pla te	1
14	DIN 912 M10 x 16 --- 16N	4
15	DIN 6912 - M6 x 10 - -- 10N	2
16	gpa	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

NAME: _____
SIGNATURE: _____
DATE: _____

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

DRAWN
CHECKED
APPROVED
MFG
Q.A

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

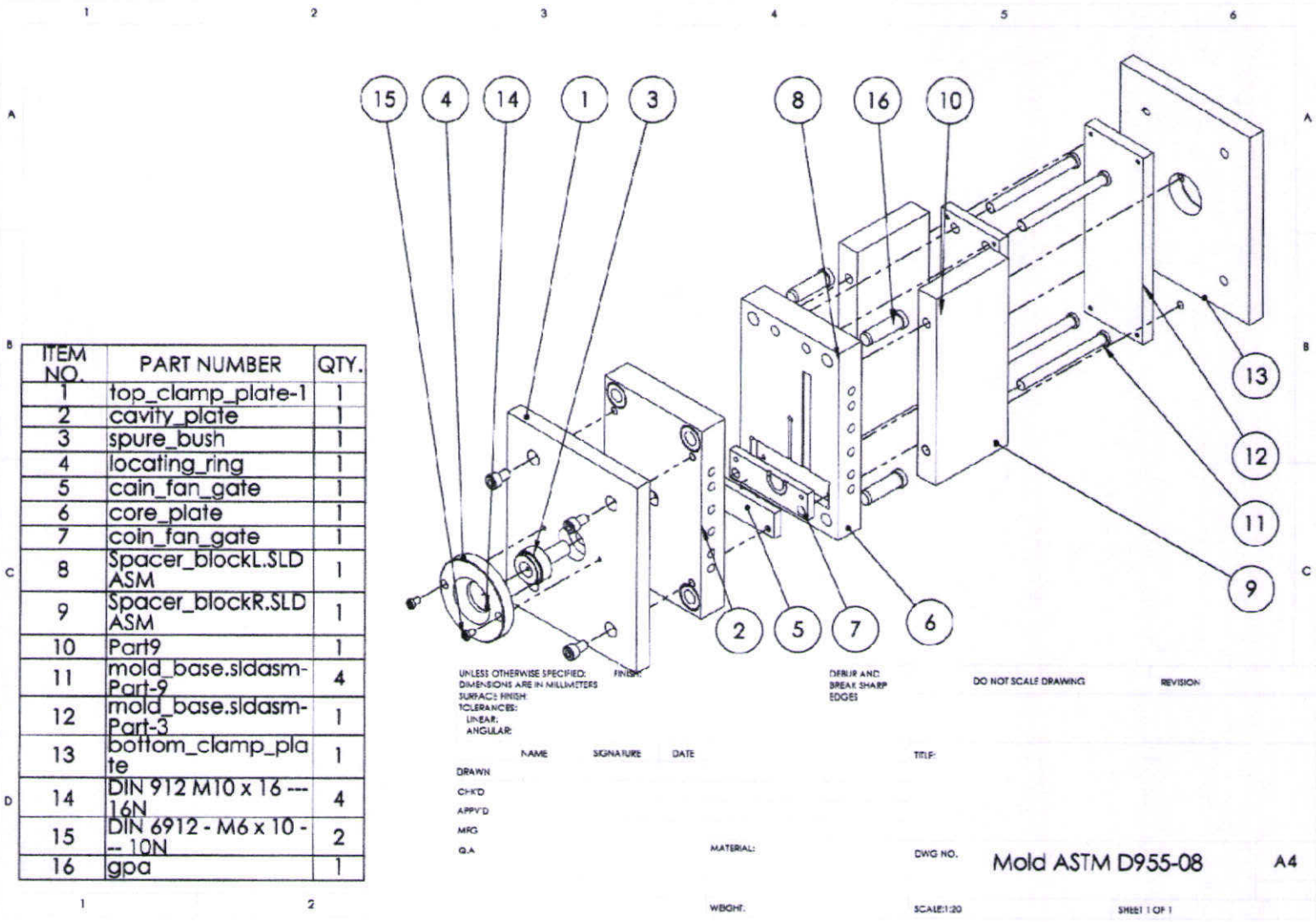
DWG NO.

Mold ASTM D955-08

A4

SCALE: 1:20

SHEET 1 OF 1



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	top_clamp_plate-1	1
2	cavity_plate	1
3	spure_bush	1
4	locating_ring	1
5	coin_fan_gate	1
6	core_plate	1
7	coin_fan_gate	1
8	Spacer_blockL.SLD ASM	1
9	Spacer_blockR.SLD ASM	1
10	Part9	1
11	mold_base.slidasm- Part-9	4
12	mold_base.slidasm- Part-3	1
13	bottom_clamp_pla te	1
14	DIN 912 M10 x 16 --- 16N	4
15	DIN 6912 - M6 x 10 - --- 10N	2
16	gpa	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

NAME SIGNATURE DATE
DRAWN
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A.

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

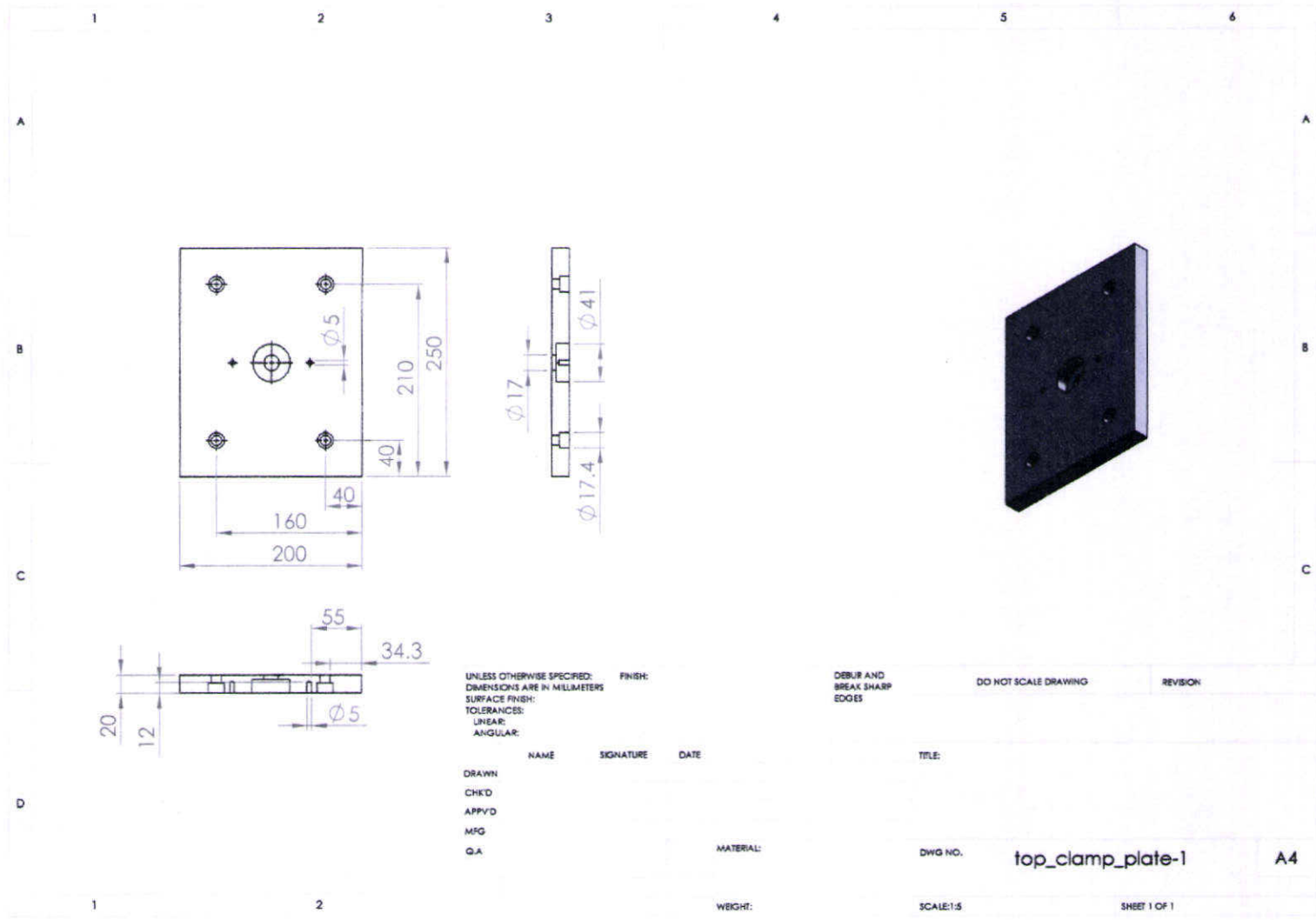
Mold ASTM D955-08

A4

WEIGHT:

SCALE:1:20

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

NAME SIGNATURE DATE

DRAWN
 CHK'D
 APP'VD
 MFG
 Q.A

MATERIAL:

WEIGHT:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

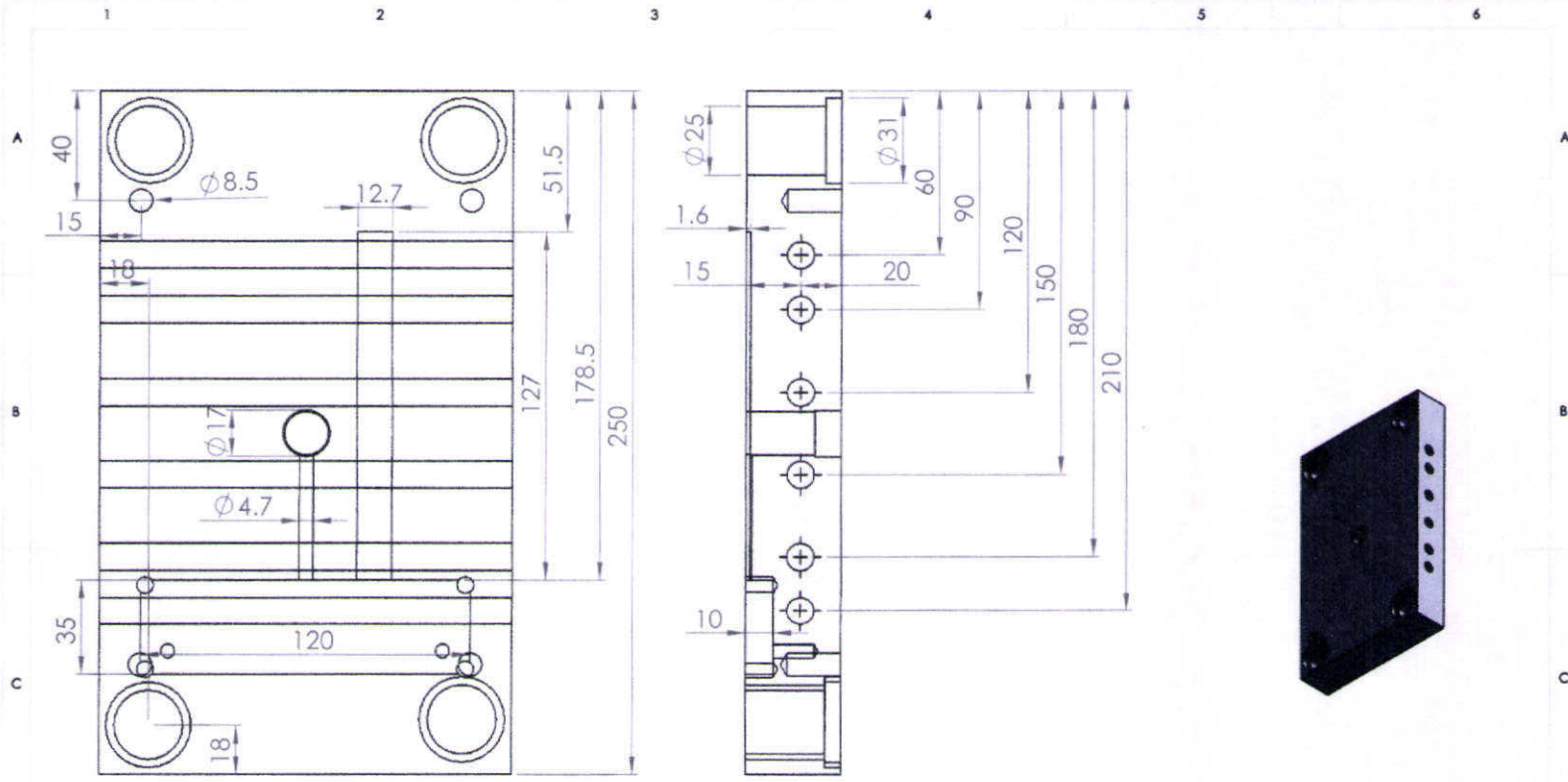
DWG NO.

top_clamp_plate-1

A4

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:
 NAME SIGNATURE DATE

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

DRAWN
 CHK'D
 APP'VD
 MFG
 Q.A

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

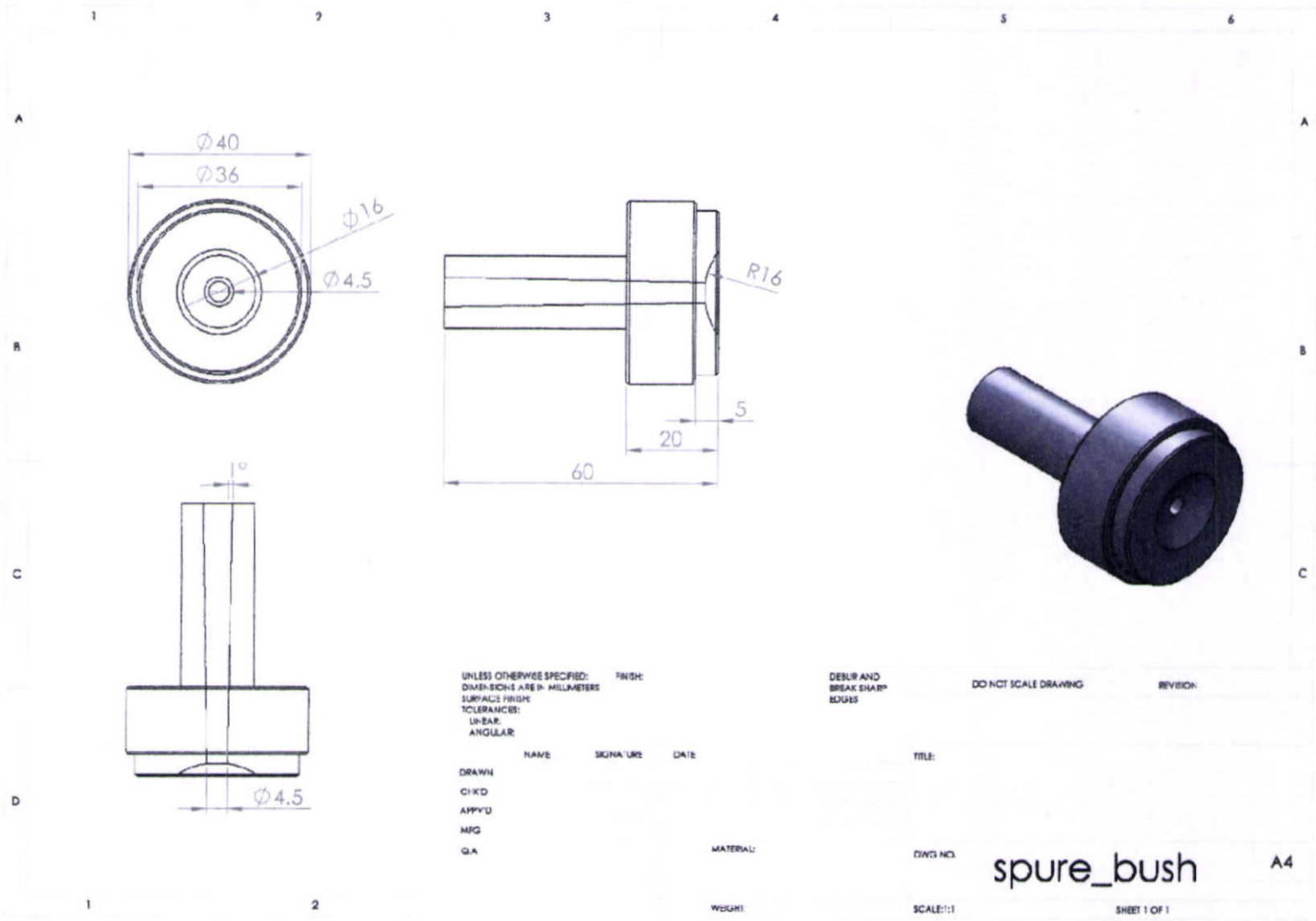
DWG NO.

SCALE:1:5

Cavity_Plate

A4

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH
 TOLERANCES:
 UN-BAU:
 ANGULAR

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHECKED			
APPROVED			
MFG			
QA			

DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
 DO NOT SCALE DRAWING
 REVISION

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

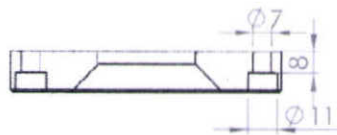
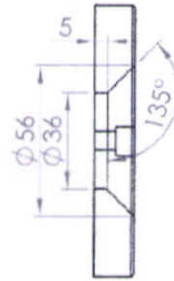
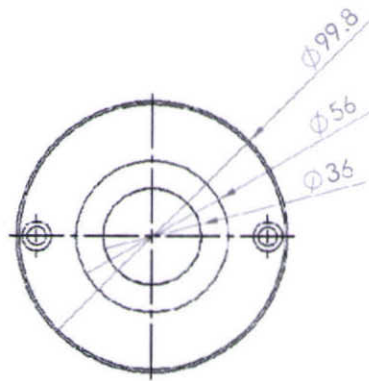
spure_bush

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

NAME	SIGNATURE	DATE
------	-----------	------

DRAWN
 CHKD
 APPVD
 MFG
 QA

MATERIAL:

WEIGHT:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

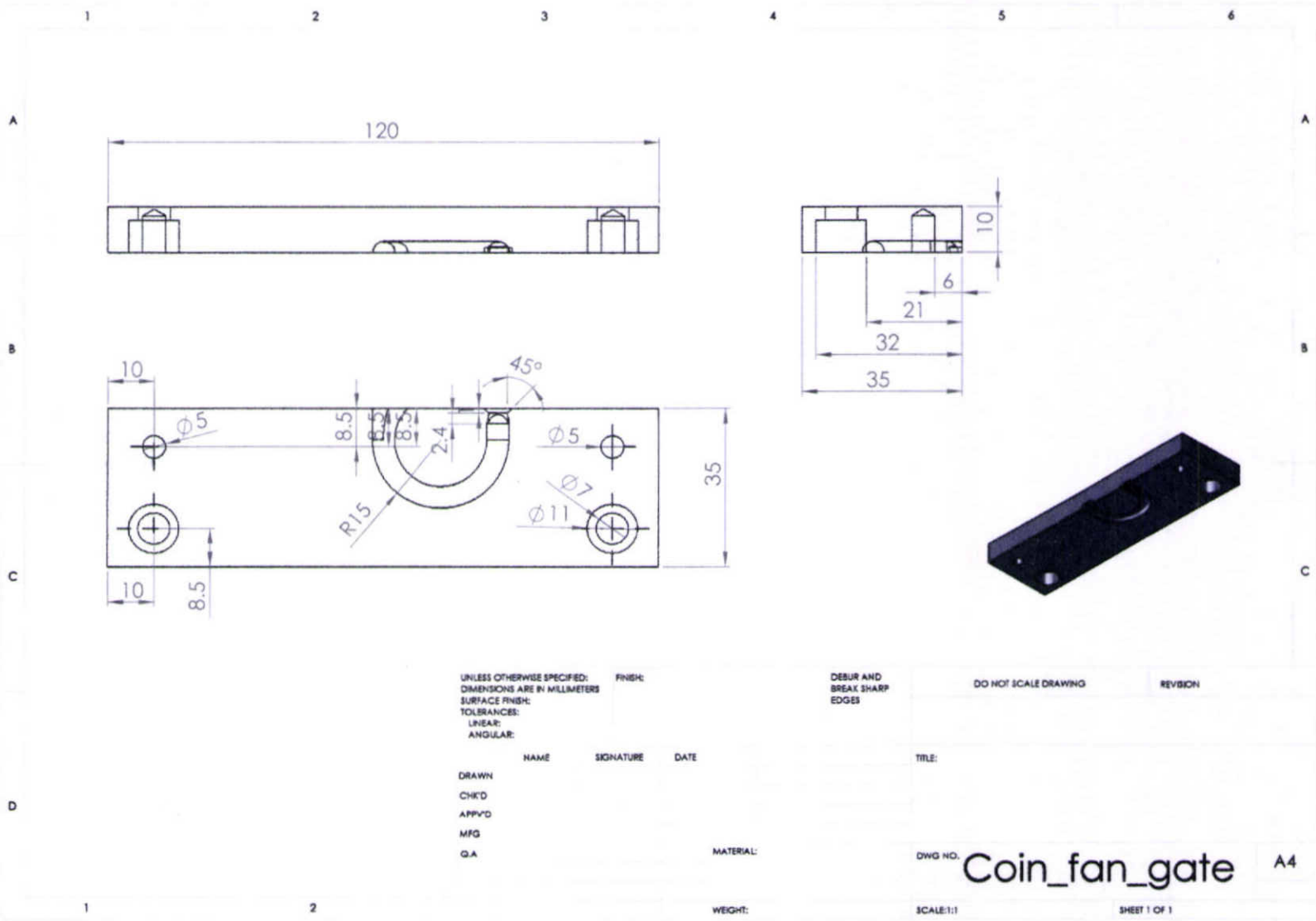
DWG NO

locating_ring1

A4

SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

NAME SIGNATURE DATE

DRAWN
 CHK'D
 APP'VD
 MFG
 Q.A

MATERIAL:

WEIGHT:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

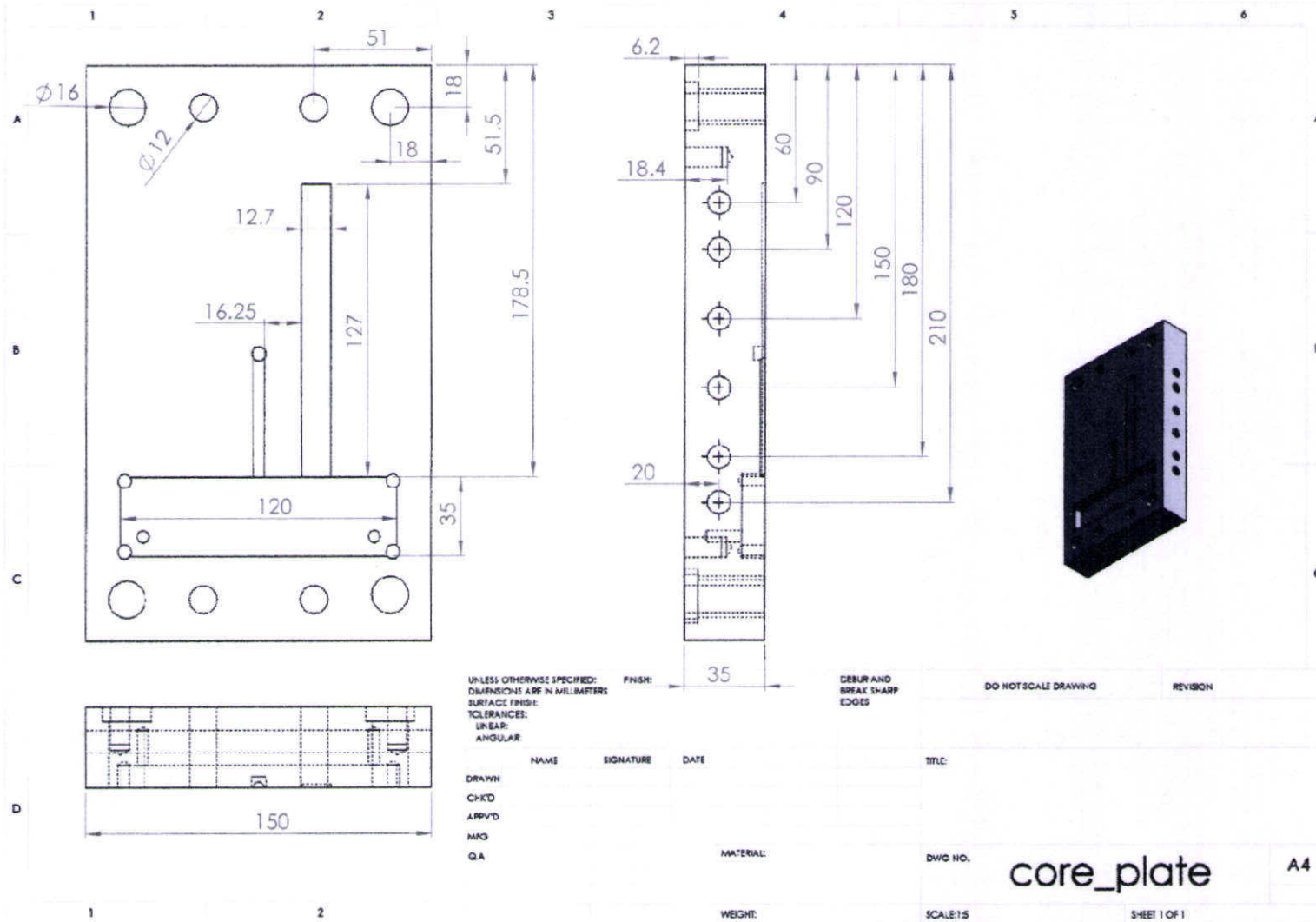
REVISION

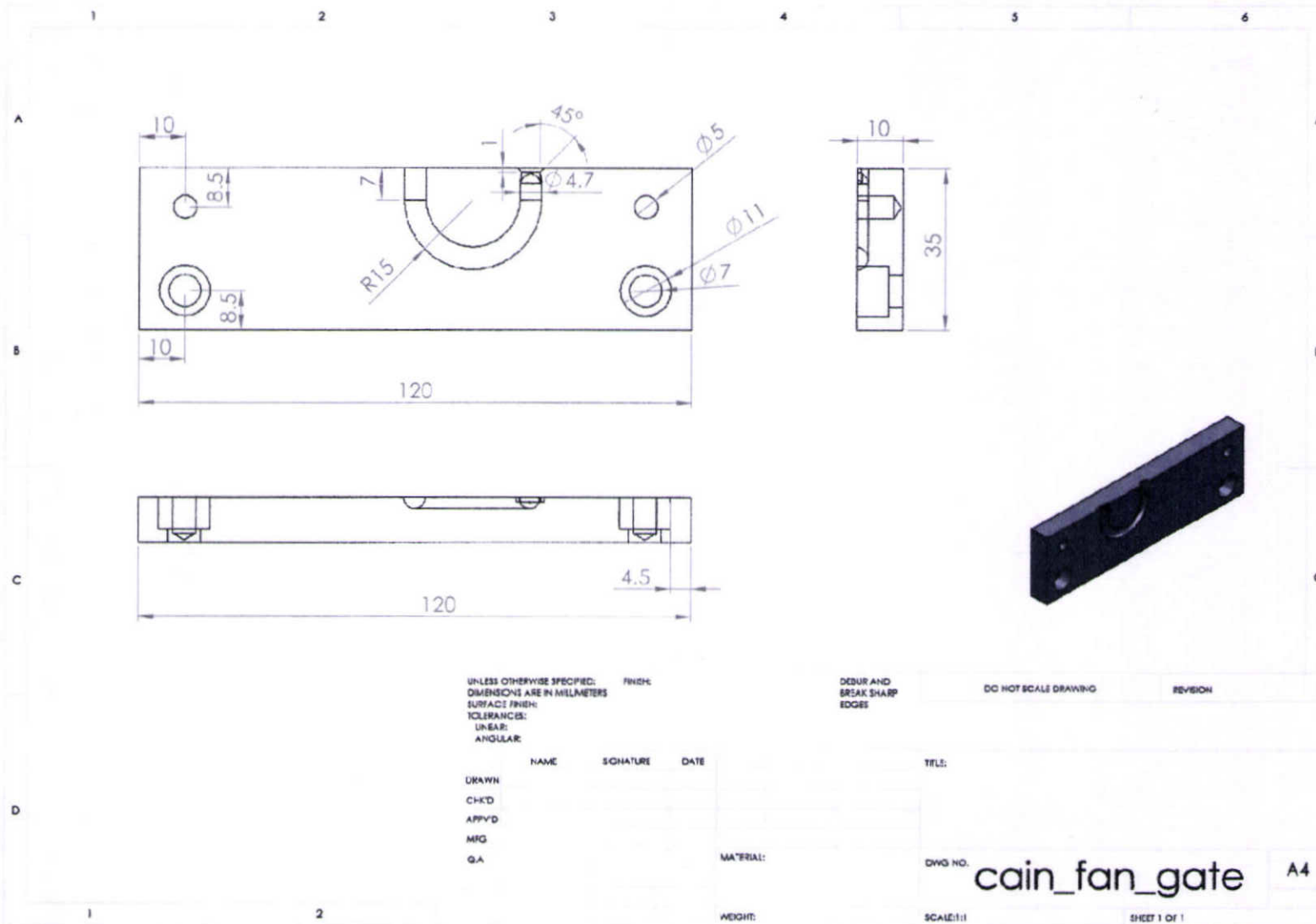
TITLE:

DWG NO. **Coin_fan_gate** A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'VD			
MFG			
Q.A			

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

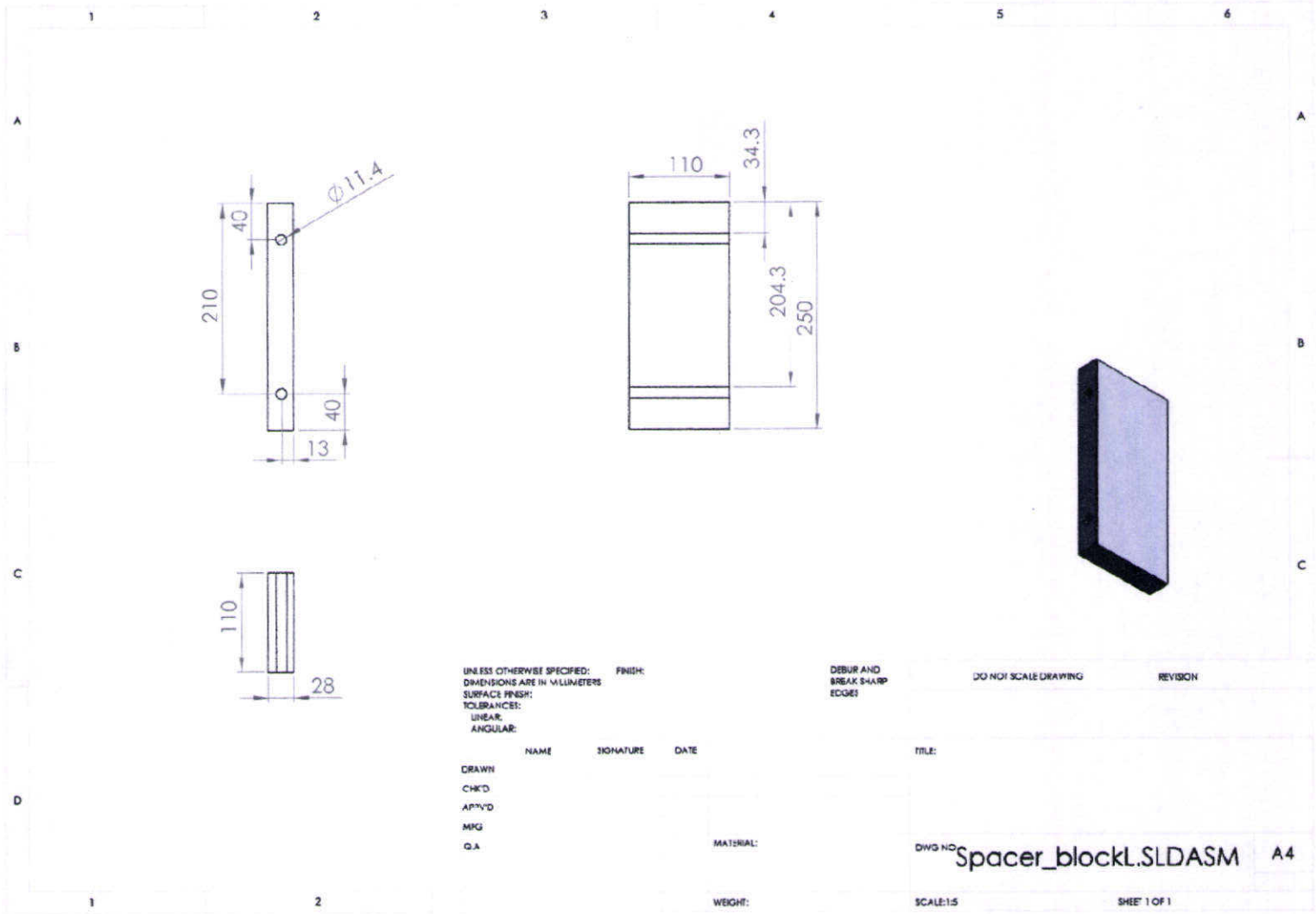
cain_fan_gate

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

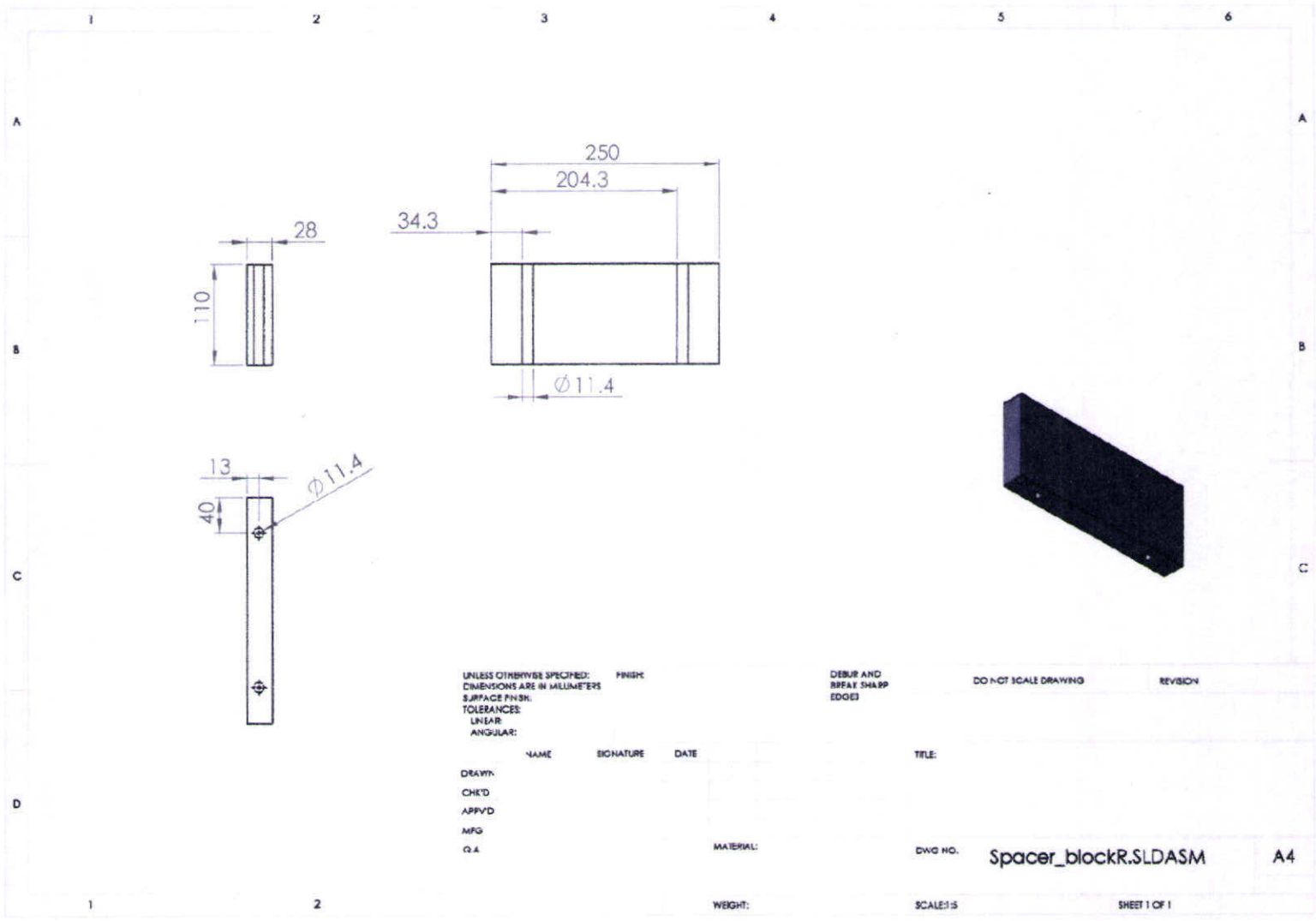
	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'D			
MFG			
Q.A			

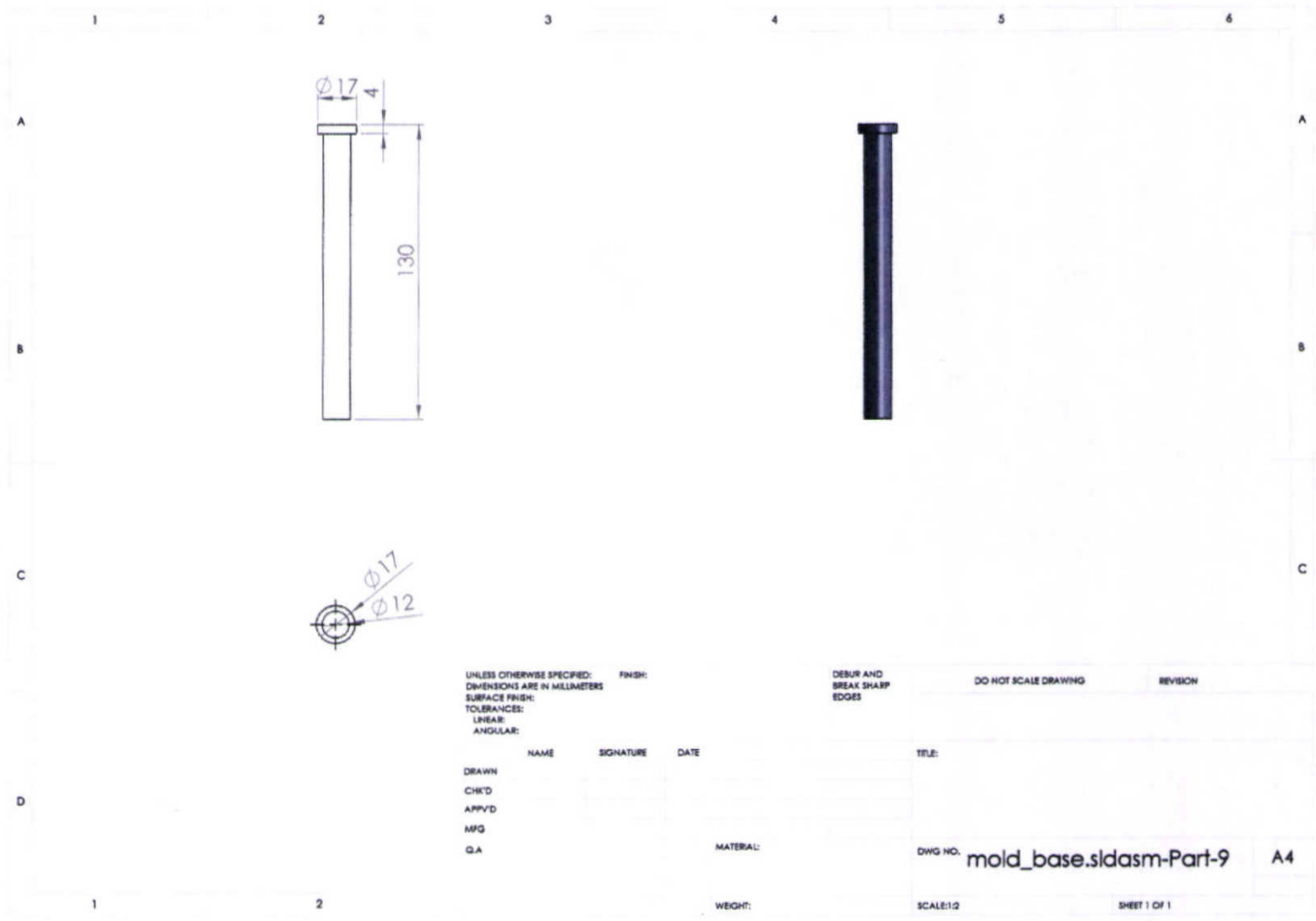
MATERIAL:
 WEIGHT:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES!

DO NOT SCALE DRAWING REVISION

TITLE:
 DWG NO: Spacer_blockL.SLDASM A4
 SCALE:1:5 SHEET 1 OF 1





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES: LINEAR:
 ANGULAR:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'VD			
MFG			
Q.A			

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

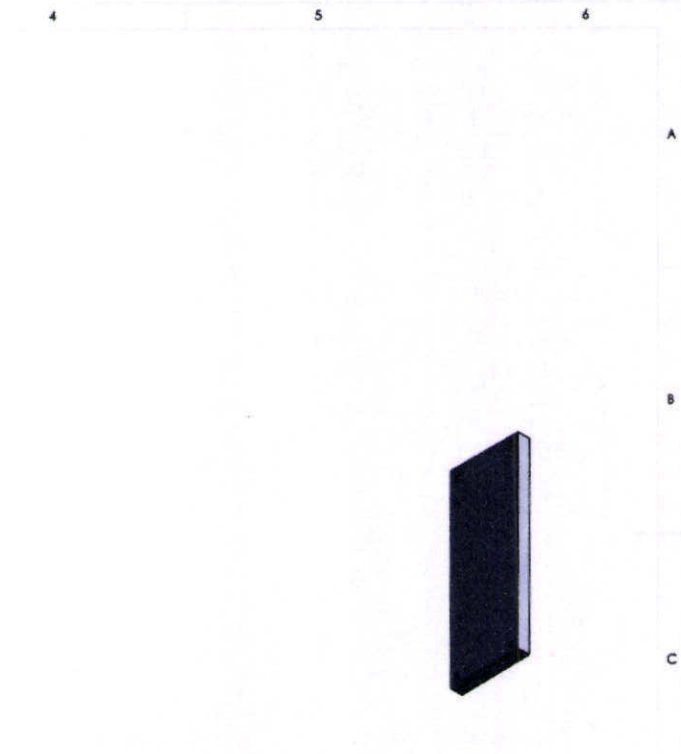
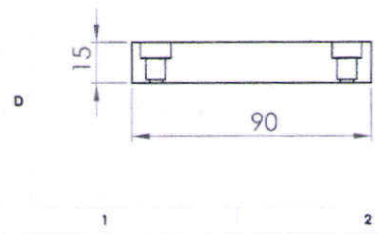
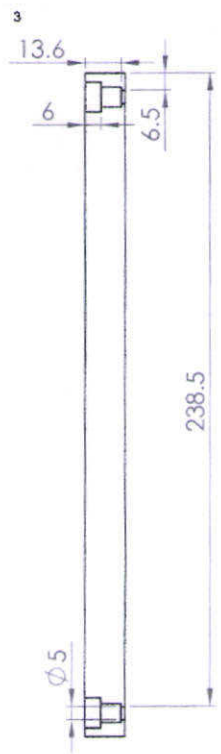
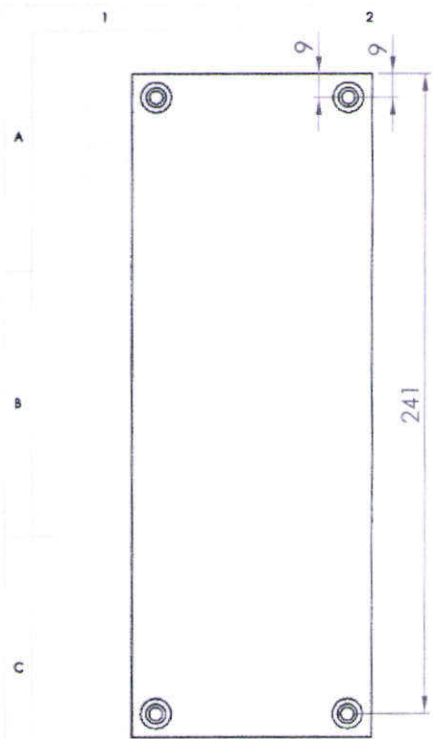
mold_base.sldasm-Part-9

A4

WEIGHT:

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APP'VD			
MFG			
Q.A			

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

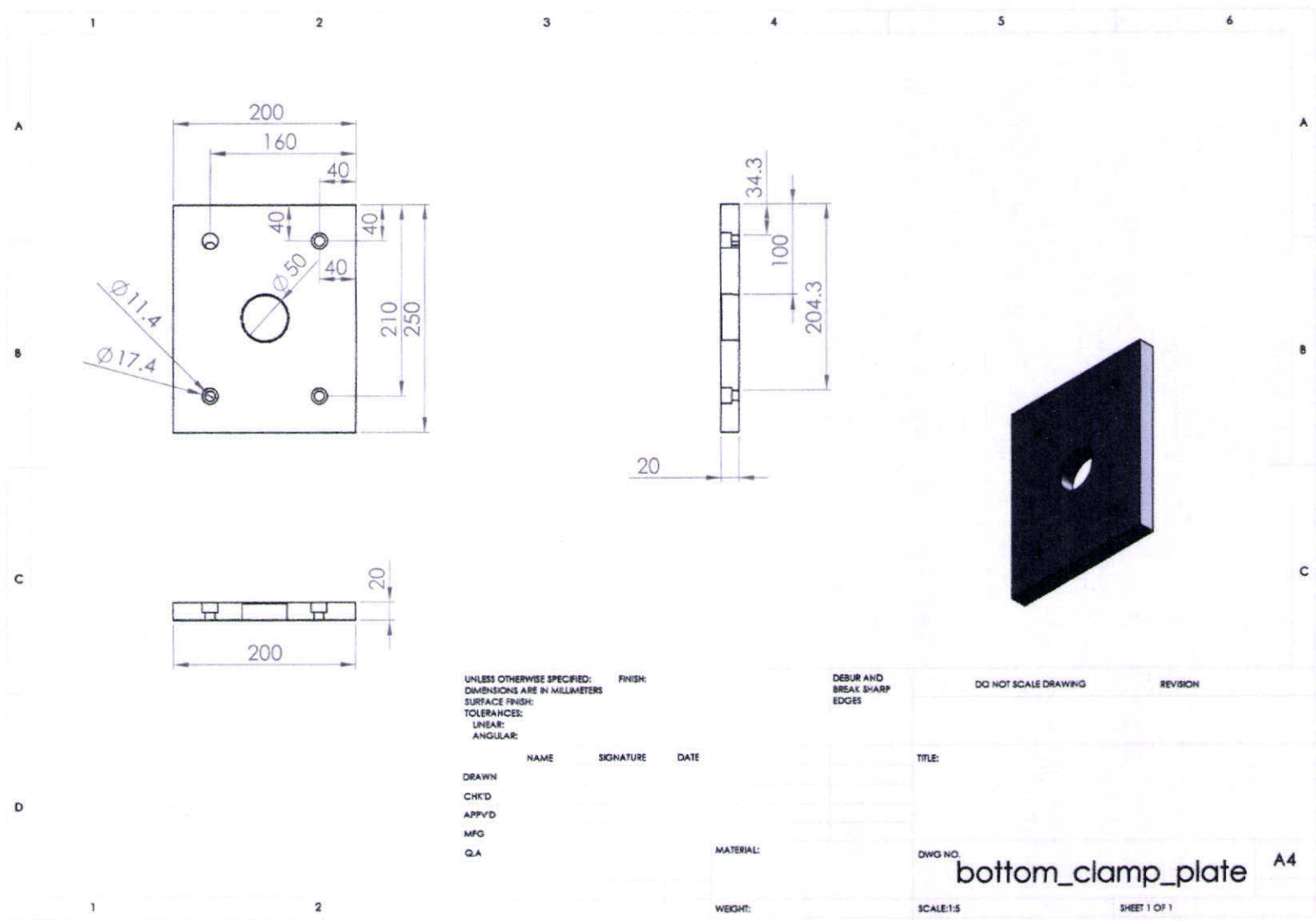
Part2

A4

WEIGHT:

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายพิชัย เล็กโล่ง
วัน เดือน ปีเกิด	26 กันยายน 2527
ที่อยู่	6/4 ถนนทางหลวงแผ่นดินสาย36 ตำบลมาบข่า อําเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง 21180
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผลงานทางวิชาการ พิชัย เล็กโล่ง และ วิภู ศรีสืบสาย. 2554 “การ วิเคราะห์อิทธิพลของชนิดทางเข้าและความเร็วฉัดที่มีผลต่อการหดตัวของ ชิ้นงานฉีดชนิดโพลีเอททีลีนชนิดความหนาแน่นสูง.” หน้า 775-781. ใน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2554 มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี