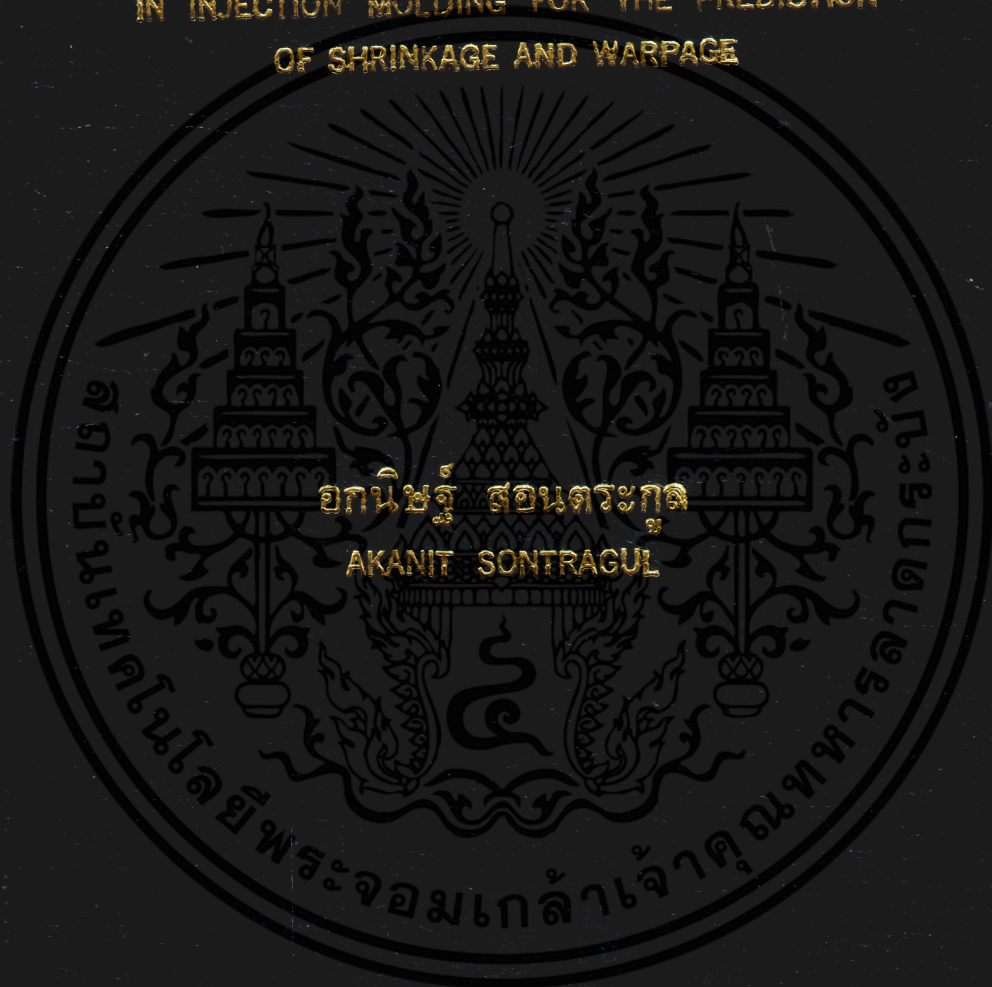


การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนาย
การหดตัวและบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด

INTEGRATED SIMULATION OF FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER
IN INJECTION MOLDING FOR THE PREDICTION
OF SHRINKAGE AND WARPAGE



อภินิษฐ์ สอนตระกุล
AKANIT SONTRAGUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-202-5

การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนาย
การหดตัวและบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด

INTEGRATED SIMULATION OF FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER
IN INJECTION MOLDING FOR THE PREDICTION
OF SHRINKAGE AND WARPAGE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขทะเบียน.....40630
วัน, เดือน, ปี.....8 ต.ค. 2544

พ.ศ. 2544
ISBN 974 - 648 - 202 - 5

.b.....
.i.....

**INTEGRATED SIMULATION OF FLUID FLOW AND HEAT
TRANSFER IN INJECTION MOLDING FOR THE
PREDICTION OF SHRINKAGE AND WARPAGE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

ISBN 974 - 648 - 202 - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้นำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการหดตัวและการบิดงอ
 ของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด

INTEGRATED SIMULATION OF FLUID FLOW AND HEAT
 TRANSFER IN INJECTION MOLDING FOR THE PREDICTION
 OF SHRINKAGE AND WARPAGE

ชื่อนักศึกษา นายอภิสิทธิ์ สอนตระกูล
รหัสประจำตัว 41062007
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
รศ. อัครเดช	สินธุภัก	
ดร. ชินรักษ์	เชียรพงษ์	
ผศ. มิ่ง	โลกิจแสงทอง	
ผศ.ดร. จารุวัตร	เจริญสุข	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 พฤษภาคม 2544 เวลา 10.00 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

 (รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครเดช)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... 24 ...เดือน... พฤษภาคม... พ.ศ. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนาย การหดตัวและการบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด
นักศึกษา	นายอภิสิทธิ์ สอนตระกูล
รหัสประจำตัว	41062007
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการการศึกษาพฤติกรรมของพลาสติกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวและบิดงอในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด โดยวิธีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จากโปรแกรมสำเร็จรูปคือ MOLD FLOW โดยใช้พลาสติกหลอมเหลวเป็นของไหลซึ่งเป็นของเหลวหนืดที่กักอัดตัวได้และอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่คงที่ ทำการศึกษาเพื่อหาค่าตัวแปรของเส้น โครงร่างของช่วงการฉีด (Packing Profile) ที่มีผลกระทบกับการหดตัวหลายกรณีตัวอย่าง จากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มของการทดลองกับการทำนายสอดคล้องกัน ซึ่งเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง กล่าวคือความดันที่ใช้ในช่วงสภาวะการฉีด (Packing Stage) จะมีผลกระทบมากกว่าการหดตัวในทิศทางขนานและตั้งฉากกับการไหล ขณะที่เวลาที่ใช้ในการฉีดจะส่งผลกระทบน้อยกว่าและต้องมีค่าน้อยกว่าเวลาการแข็งตัวของประตูทางเข้า (Gate Freeze off) โดยปกติการหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามแนวการไหลจนกว่าสภาวะการฉีดจะสิ้นสุด ซึ่งการหดตัวที่ไม่เท่ากันในทิศทางขนานและตั้งฉาก รวมถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันตลอดความหนาที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการบิดงอ

Thesis Title	Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection Molding for the Prediction of Shrinkage and Warpage
Student	Mr. Akanit Sontragul
Student ID.	41062007
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Jaruwat Jaroensook

ABSTRACT

This thesis deals with a study, by means of integrated mathematical simulation of fluid flow and heat transfer in injection molding for prediction of shrinkage and warpage, using finite element method from software, MOLD FLOW ANALYSIS. The plastic is assumed viscous, compressible, flowing under non-isothermal conditions. The effect of packing profile that influence both behaviors were studied. The trend of the experiment result is in agreement with the simulation. The Pressure was seen to have large effect on both in parallel and perpendicular shrinkage, while holding time only affected shrinkage for setting smaller than gate freeze-off time. Shrinkage usually increases along the flow path unless back flow set in at the end of holding stage. The difference between parallel and perpendicular shrinkage and asymmetric mold wall temperature distribution across the part thickness cause warpage.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขกับการทำนายพฤติกรรมการไหลของพลาสติกจาก ดร. จารุวัตร เจริญสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างถึงความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณพ่อและภรรยาที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด ให้อดทนต่อสู้ให้สำเร็จ

ขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ศูนย์เทคโนโลยีวิศวกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และ ดร. พีรวัฒน์ สมนึก ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและห้องปฏิบัติการวิจัยสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด

ขอบพระคุณ คุณสิทธิชัย บุญประเสริฐ กรรมการจัดการ บจ. โมลด์แอนด์ไค แมนิวแฟคเจอร์ริง และ คุณ สุรสิทธิ์ ผู้ช่วยผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม บจ. ชันโย ยูนิเวอร์แซล อิเล็กทริก ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและห้องปฏิบัติการวิจัยสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำแนะนำในการวิจัยนี้มาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อกนิษฐ์ สอนตระกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานคุณสมบัติเชิงวัสดุและการหดตัวของพลาสติก	4
2.1 ชนิดของโพลีเมอร์	4
2.2 ความหนืด, แรงเฉือน และ ความเค้นเฉือน	5
2.3 ของไหลแบบ Newtonian และ Non Newtonian	6
2.4 รูปแบบต่างๆ ของความหนืด สำหรับการวิเคราะห์	7
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืด, อุณหภูมิและอัตราเฉือน	10
2.6 การประมาณค่านอกช่วงของความหนืด	10
2.7 คุณสมบัติทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์การไหล	12
2.8 ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ความร้อน	17
2.9 การหดตัวของพลาสติก	21
2.9.1 ทฤษฎีของพลาสติก	21
2.9.2 การประยุกต์ใช้	23
2.10 ทฤษฎีการบีดง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

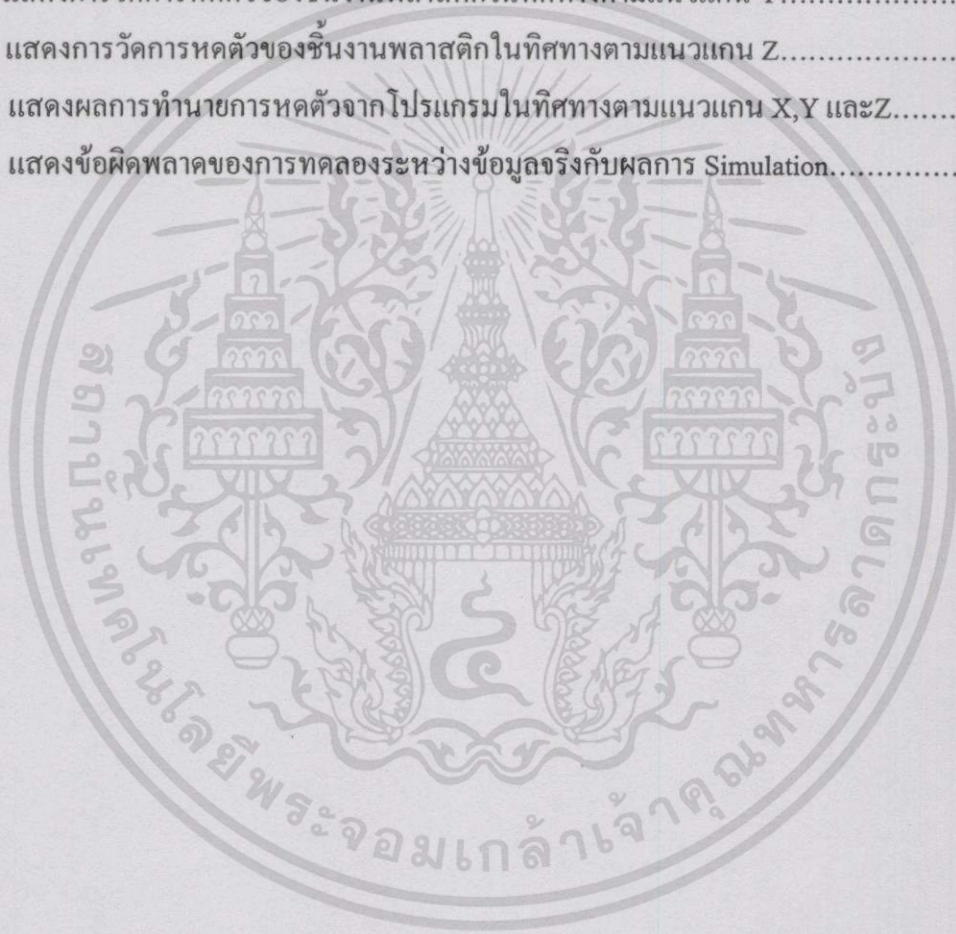
	หน้า
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและบิดงอ	33
บทที่ 3 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การไหล ในสภาวะการฉีดเข้า	34
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ ความเค้นและความเครียด ในของของไหล	34
3.1.1 ความเค้นในของของไหล	34
3.1.2 อัตราของความเครียด	36
3.1.3 ของไหลแบบกดอัดได้ และ กดอัดไม่ได้	37
3.1.4 ของไหลชนิด Newtonian และ Non Newtonian	37
3.1.5 อัตราเฉือนและการเลือกฟังก์ชันความหนืด	39
3.2 สมการพื้นฐานของการไหล	43
3.2.1 สมการคณิตศาสตร์พื้นฐาน	43
3.2.2 กฎทรงมวล	46
3.2.3 กฎทรงโมเมนตัม	47
3.2.4 กฎการอนุรักษ์พลังงาน	48
3.2.5 สภาวะเงื่อนไข	55
3.3 สมการควบคุมในการวิเคราะห์การไหล ในสภาวะการฉีดเข้า.....	58
3.4 วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การไหล ในสภาวะการฉีดเข้า.....	69
3.4.1 วิธีการกำหนดและแก้ปัญหาของกระบวนการ.....	69
3.4.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณหาความดันในโพรงแบบ.....	71
3.4.3 การใช้ข้อมูลของ PVT และการคำนวณหาอุณหภูมิ.....	80
บทที่ 4 แนะนำการใช้โปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นในการนำโปรแกรมไปประยุกต์กับปัญหา	
4.1 ความรู้เบื้องต้นกับการออกแบบและการวิเคราะห์.....	82
4.2 หลักการออกแบบการไหล.....	83
4.3 สภาวะของกระบวนการฉีดพลาสติก.....	88
4.4 การประมาณเส้นทางการไหลหลัก.....	88
4.5 การประมาณเส้นทางการไหลสุดท้ายที่เติมเต็ม.....	89
4.6 การสร้างเส้นทางการไหลแบบ 2 มิติ.....	89

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.7 การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสม.....	90
4.8 การออกแบบที่เหมาะสมของสภาวะ Filling Stage.....	95
4.9 การออกแบบที่เหมาะสมของสภาวะ Packing Stage.....	99
บทที่ 5 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	103
5.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	103
5.2 รูปร่าง (Model) ของชิ้นงานและแม่พิมพ์.....	103
5.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	104
5.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ.....	104
5.5 ผลการทดลอง.....	109
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	121
บทที่ 6 บทสรุป.....	124
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	124
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	125
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของพลาสติกและโลหะ.....	13
2.2 แสดงช่วงของค่าการหดตัวของพลาสติกแต่ละชนิด.....	27
2.3 มาตรฐานค่าพิถีพิถันของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก.....	30
5.1 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน X.....	109
5.2 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน Y.....	110
5.3 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน Z.....	111
5.4 แสดงผลการทำนายการหดตัวจากโปรแกรมในทิศทางตามแนวแกน X,Y และZ.....	112
5.5 แสดงข้อผิดพลาดของการทดลองระหว่างข้อมูลจริงกับผลการ Simulation.....	113



สารบัญรูป

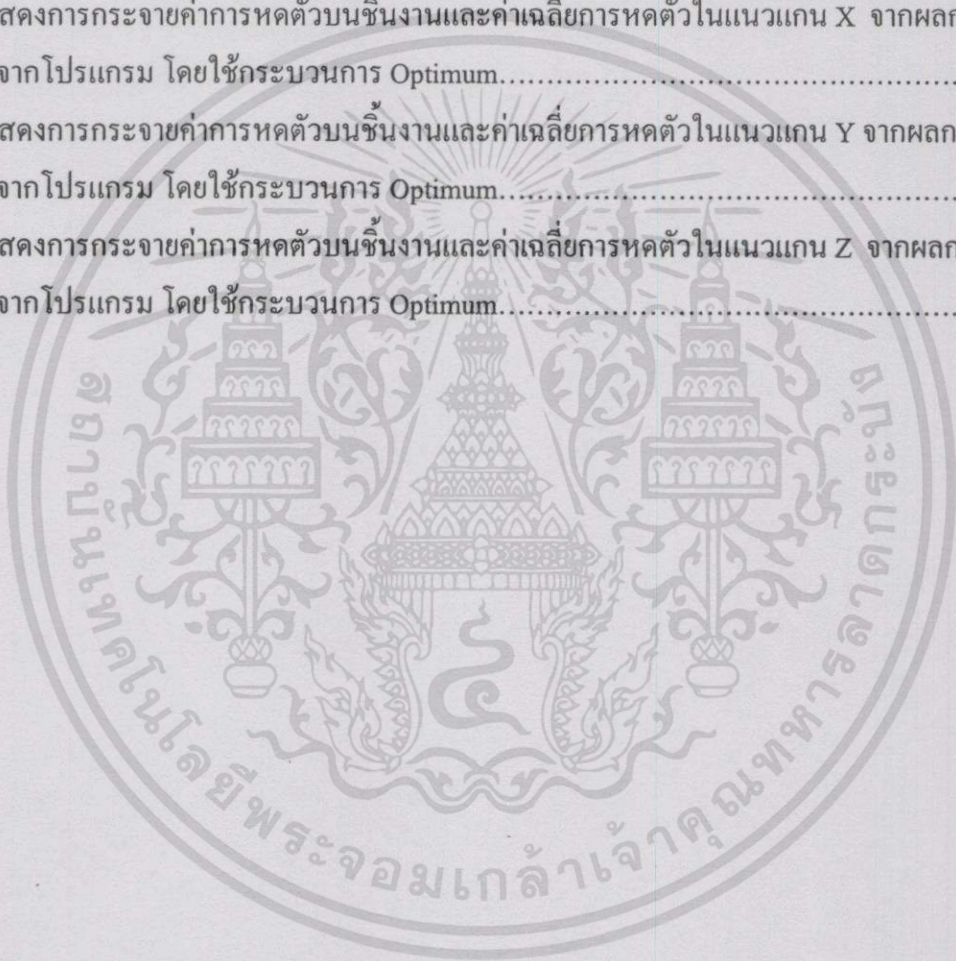
รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแรงเฉือนเนื่องจากการไหลแบบสภาวะคงที่	5
2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	7
2.3 แสดงการประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ	11
2.4 แสดงข้อมูลของความหนืดกับเส้นยุติการไหล	11
2.5 แสดงการกำหนดสภาวะการนำความร้อน	13
2.6 แสดงการกระจายตัวของอัตราเฉือนและอุณหภูมิข้ามหน้าตัดของโพรง	15
2.7 แสดงการกระจายตัวของความหนืดข้ามหน้าตัดของโพรง	15
2.8 ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความหนืดนอกช่วง	16
2.9 PVT ไคอะแกรม	18
2.10 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุ เซมิ คริสตัลไลน์ ชนิด โพลีโพรพิลีน	20
2.11 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุอะมอร์ฟัส ชนิด โพลีสไตรีน	20
2.12 แบบจำลองการหดตัวของพลาสติกภายในภาชนะ	22
2.13 แสดงพื้นที่การหดตัว	32
2.14 แสดงชนิดการบิดตัวของรูปทรงงาน	33
3.1 มิติจำกัดของ Stress Vector	35
3.2 แสดงความเค้นของผิว 3 ด้าน ซึ่งมีแรงกระทำที่จุด O เป็นจุดภายในวัตถุ	35
3.3 แสดงสภาวะเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก	56
4.1 สมดุลการไหล	83
4.2 อัตราส่วนรูวิ่งต่อโพรงแบบ	84
4.3 ทิศทางการไหล	84
4.4 การลดลงของความดัน	85
4.5 ความเค้นเฉือน	85
4.6 เส้นเชื่อม/เส้นการหลอม	86
4.7 ความไม่แน่นอน	86
4.8 การไหลย้อนกลับ	87
4.9 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน	87
4.10 การปิดตัว	88
4.11 Molding Window	88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การหาระยะทางการไหลหลัก	89
4.13 แสดงการหาชิ้นงานที่มีขนาดเท่ากัน	92
4.14 แนวทางการไหล	93
4.15 แสดงตัวอย่างการไหลอย่างไม่สมดุล	96
4.16 แสดงช่วงเวลาในการฉีดขึ้นรูป	80
4.17 แสดงการอัดตัว	80
4.18 Packing Profile ของโพลีเมอร์	101
5.1 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก	103
5.2 แสดง Part Drawing ชิ้นงานตัวอย่างและตำแหน่งที่ทำการวัดขนาด	109
5.3 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน X เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันระหว่าง (45-70 Mpa)	114
5.4 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน X เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (5-19 วินาที)	114
5.5 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน Y เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (45-70Mpa)	115
5.6 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน Y เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (5-19 วินาที)	115
5.7 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน Z เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจาก โปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (45-70Mpa)	116
5.8 แสดงค่าการหดตัวในแนวแกน Z เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจาก โปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (5-19 วินาที)	116
5.9 แสดงค่าผิดพลาดจากข้อมูลการทดลองกับผลการทำนายจาก โปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยน แปลงความดันที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (45-70Mpa)	117
5.10 แสดงค่าผิดพลาดจากข้อมูลการทดลองกับผลการทำนายจาก โปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยน แปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดย่ำระหว่าง (5-19 วินาที)	117
5.11 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน X จากผลการ ทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีดย่ำ 45 Mpa และเวลาการฉีดย่ำ 20 วินาที	118

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Y จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีดย้ำ 45 Mpa และเวลาการฉีดย้ำ 20 วินาที	118
5.13 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Z จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีดย้ำ 45 Mpa และเวลาการฉีดย้ำ 20 วินาที	119
5.14 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน X จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum.....	119
5.15 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Y จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum.....	120
5.16 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Z จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum.....	120



สัญลักษณ์

c_p	ค่าความจุความร้อน
\hat{e}_1, \hat{e}_2	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
\bar{g}	เวกเตอร์แรงโน้มถ่วง
h	ครึ่งความหนาของพลาสติกหลอมเหลวในโพรงแบบ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
m	มวล
\bar{n}	เวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย
p	ความดัน
\tilde{p}	Approximate Flow Rate
q	อัตราการไหล
\bar{q}	เวกเตอร์ความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
r	รัศมีของ Runner
t	เวลา
\bar{t}	Stress Vector
\bar{v}	ความเร็วของอนุภาคของของไหล
\bar{v}_x	ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคของของไหลในทิศทางแกน X
v_x	ความเร็วในทิศทางแกน X
v_y	ความเร็วในทิศทางแกน Y
v_z	ความเร็วในทิศทางแกน Z
\bar{x}	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคของของไหล
A	พื้นที่บริเวณระนาบหรือหน้าตัดกลม
\bar{F}	เวกเตอร์ของแรง
\hat{H}	Specific Enthalpy
\underline{I}	Unit Tensor
L	ความยาวอิทธิเมนต์ของ Runner
$N_i^{(e)}$	Shape Function สำหรับแต่ละอิทธิเมนต์
$R(x)$	Residual เนื่องจากการประมาณค่า
S	เงื่อนไขที่พื้นผิว
\hat{S}	Specific Entropy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลXI้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

S_1	Fluidity สำหรับ Runner
S_2	Fluidity สำหรับคาร์วีตี้
T	อุณหภูมิ
T_g	อุณหภูมิช่วง Glass Transition
\hat{U}	Specific Internal Energy
V	ปริมาตร
$V(t)$	ปริมาตรของวัสดุ
\hat{V}	ปริมาตรจำเพาะ
α	สัมประสิทธิ์การแพร่ของความร้อน
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตร
$\dot{\gamma}$	อัตราเฉือน
$\underline{\dot{\gamma}}$	Rate of Deformation Tensor
$\underline{\dot{\gamma}'}$	Deviatoric Rate of Deformation Tensor
$\dot{\gamma}_{ij}$	Component of Deformation Tensor
η	ฟังก์ชันของความหนืด
θ	องศา
κ	Isothermal Compressibility Coefficient
$\underline{\kappa}$	Average Isothermal Compressibility Coefficient
μ	ค่าความหนืด
ρ	ความหนาแน่น
$\underline{\sigma}$	Stress Tensor
σ_{ij}	Component of Stress Tensor
τ	ความเค้นเฉือน
$\underline{\tau}$	Viscous Stress Tensor
τ_{ij}	Component of Viscous Stress Tensor

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย การฉีดพลาสติกให้ได้ชิ้นงานดีมีคุณภาพนั้น ต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับซึ่งกันและกัน ดังนั้นการฉีดพลาสติกที่ดีจำเป็นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างสูง

เนื่องจากการแก้ปัญหาของการฉีดพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญมากกับหลาย ๆ อุตสาหกรรม พฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์พลาสติกมีหลายปัญหาที่ทำให้ชิ้นงานขาดคุณภาพ ปัญหาการหดตัวและบิดงอเป็นปัญหาที่ยากต่อการพิจารณาและการแก้ไข เมื่อเราสามารถทำนายลักษณะของพฤติกรรมได้ ก็สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและการแก้ไข เมื่อผ่านการวิเคราะห์แล้ว ข้อมูลเหล่านี้จะมีส่วนช่วยในการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์

ในการแก้ปัญหาคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไปนั้น แต่เดิมใช้วิธีอาศัยประสบการณ์ของช่างแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีคำนวณแบบ Analytic เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น และทำการทดลองซ้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดเงื่อนไขการฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีซึ่งเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากการวิเคราะห์แบบ Analytic ไม่สามารถแก้ปัญหาพฤติกรรมต่าง ๆ ได้ทั้งหมด จึงนำเอาซอฟต์แวร์ที่ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) และ การประมาณค่า (Approximation Method) ที่เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อได้ผลเป็นแนวทางที่จะหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้โปรแกรมทางด้าน CAD และ CAE กับการออกแบบผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติก

1.2.2 นำ CAE ประยุกต์ใช้กับขบวนการฉีดพลาสติก เพื่อทำนายการหดตัวและบิดงอของชิ้นงาน

1.2.3 วิเคราะห์และแก้ปัญหารการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานพลาสติก โดยการปรับปรุงเส้นโครงร่างการฉีด (Packing Profiles)

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากการที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยในปัจจุบันและที่ผ่านมา ตลอดจนศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานพลาสติกในภาคอุตสาหกรรม เราจำเป็นที่จะต้องตั้งสมมุติฐาน เพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษา ดังนี้

1.3.1 เส้นโครงร่างการฉีดอัด(Packing Profile) คือค่าตัวแปรระหว่างความดันในการฉีดอัดและเวลาที่ใช้ในการฉีดอัด น่าจะมีอิทธิพลกับการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติก

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเงื่อนไขที่กำหนดรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง

1.3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง มีคุณสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงฐานข้อมูลที่อยู่ในโปรแกรมโดยไม่คิดผลจาก มาตรฐานกระบวนการผลิตจาก Supplier และสิ่งแวดล้อม

1.3.4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง น่าจะส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมากกับผลการทดลองเช่น เครื่องฉีดพลาสติก

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตลอดเวลาที่ผ่านมามีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป เพื่อแก้ปัญหาผลิตภัณฑ์ที่ขาดคุณภาพ และการออกแบบแม่พิมพ์ที่ให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน โดยมีการพัฒนาเริ่มจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะของกระบวนการและคุณภาพของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการและคุณภาพของการฉีดพลาสติกจึงเป็นสิ่งที่ยากในการกำหนดค่าสภาวะ สำหรับการศึกษาด้านกรฉีดพลาสติกด้วยการศึกษาจากการทดสอบในการปฏิบัติการจริงในระหว่างช่วงปี 1960s-1970s [1] ได้ศึกษาหลักการต่าง ๆ ในการฉีดพลาสติกเป็นจำนวนมากกว่า 100 หัวข้อ โดยเพิ่มความรู้พื้นฐานที่สัมพันธ์กับกระบวนการฉีด และคุณภาพของชิ้นงานเข้าไว้ด้วยกัน

แม้ว่ามีความพยายามที่จะกำหนดวิธีการเพื่อทำการปรับปรุงการออกแบบชิ้นงานพลาสติกหลายวิธี ซึ่งขัดกับลักษณะทางธรรมชาติของโพลิเมอร์ที่เป็นอนินวโทเนียนและทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกและเนื่องจากมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ จึงได้มีการเริ่มให้ความสนใจในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีคิด

ในปี1974 บริษัท Moldflow จำกัดได้เสนอโปรแกรมทางการค้าบนระบบคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมดังกล่าวใช้เพื่อศึกษา สภาวะในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (อุณหภูมิของการหลอมเหลว , อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และ เวลาในการฉีด) และทำการสมมูลการไหลในชิ้นงานและระบบรูวู้ง

ถึงแม้ว่าจะเป็นที่ยอมรับแต่โปรแกรมดังกล่าวใช้งานได้ค่อนข้างยากเนื่องจากชิ้นงานต้องออกแบบให้มีรูปร่างแบนมาก[2]

ต่อมาได้มีการพิจารณาถึงความรู้เบื้องต้นของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) พบว่ามีข้อดีและเหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ต่อมาได้มีการใช้โปรแกรมการวิเคราะห์การไหลโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบรูปทรง 3 มิติ เป็นที่ยอมรับและได้พัฒนาต่อมาจนถึงปัจจุบัน

อย่างไรก็ดี การนำโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวมาใช้ในการงานฉีดพลาสติก จำเป็นต้องทดสอบเปรียบเทียบกับทดลองจริงซึ่งเป็นกิจกรรมที่มีในการวิจัยนี้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 เป็นการศึกษาวิจัยโดยใช้กรณีตัวอย่างเพื่อศึกษาความดันและเวลาที่ใช้ในการฉีดย่ำที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเท่านั้น

1.5.2 เป็นการศึกษาวิจัยระหว่างตัวแปรความดันและเวลาที่ส่งผลกระทบต่อขนาดและบิดงอของชิ้นส่วนพลาสติก

1.5.3 เป็นการศึกษาวิจัยชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิด เทอร์โมพลาสติกเท่านั้น

1.5.4 เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการทำนายจากโปรแกรม

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1.6.1 ศึกษาการใช้งาน โปรแกรมทางด้าน CAD

1.6.2 ศึกษาการใช้งาน โปรแกรมทางด้าน CAE

1.6.3 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการฉีดพลาสติก

1.6.4 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์พลาสติก

1.6.5 ศึกษาหลักการ,ทฤษฎีพื้นฐานและสภาวะเงื่อนไข ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติของวัสดุ

การวิเคราะห์การเติมเต็ม (Filling), การฉีดอัด(Packing) และการหล่อเย็น (Cooling) ต้องการข้อมูลในการวิเคราะห์การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฉีดพลาสติก เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ,ทางกล,ทางเคมี ,วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ และอื่นๆ ของพลาสติกในการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทั่ว ๆ ไป ของโพลิเมอร์และข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ และการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน

2.1 ชนิดของโพลิเมอร์

จากการพิจารณาพบว่า โครงสร้าง โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ในการฉีดของพลาสติกมีอิทธิพลกับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุกล่าวคือ โมเลกุลของโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นสายของพันธะโคเวเลนต์กับกลุ่มของพันธะเคมี ตามกิ่งสาขาของสายพันธะหลัก(Primary Chain) โดยทั่วไปเราจะแบ่งชนิดของพลาสติกตามโครงสร้างพื้นฐานออกเป็น 2 ชนิด คือ เทอร์โมเซตติง และ เทอร์โมพลาสติก

สำหรับเทอร์โมเซตติงจะกลายเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อนและสังเกตได้ว่าถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพันธะจะเกิดการพันกันตามสายลูกโซ่ ขบวนการนี้เรียกว่า Cross – Link จากการศึกษา พบว่าการพันกันของโมเลกุลจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ถ้ายัง ได้รับความร้อนต่อไปอีก

พลาสติกจะเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งตัวเมื่อถูกหล่อเย็น วัฏจักรเช่นนี้จะถูกทำซ้ำต่อไปเรื่อยๆ จนกว่ากระบวนการฉีดจะสิ้นสุดลงหลังการหล่อเย็นและปลดชิ้นงาน

ทั้งเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเรานำคุณสมบัตินี้มาใช้ในการฉีดพลาสติกได้ ข้อแตกต่างของวัสดุทั้งสองชนิดนี้คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ สำหรับเทอร์โมพลาสติกแม่พิมพ์มีอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ ส่วนเทอร์โมเซตติงแม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูง ซึ่งเทอร์โมพลาสติกจะเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

2.1.1 วัสดุ Amorphous และ Semi-Crystalline

เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมตามแนวลูกโซ่สามารถบิดงอได้และแต่ละส่วนของพันธะลูกโซ่สามารถบิดหมุนได้ เมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลวซึ่งโมเลกุลจะไม่มีระเบียบและจะลดการพันกันเมื่ออุณหภูมิต่ำลงถ้าไม่มีจากแรงภายนอกกระทำขณะที่โมเลกุลก็ยังคงพันกัน วัสดุที่กล่าวถึงคืออะมอर्फ

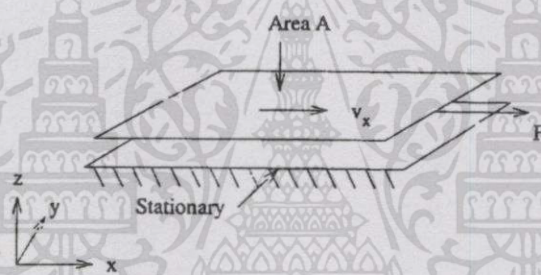
อะมอर्फโพลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลวจะถูกทำให้เย็นลง จนกลายเป็น Rubbery การเย็นตัวลงจะเป็นสาเหตุทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงจาก Rubbery เป็นของแข็ง ซึ่งอุณหภูมิในช่วงการเปลี่ยนแปลง

นี้เรียกว่า Glass Transition Temperature , T_g โดยทั่วไปช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจะมากกว่า 10 องศาเซลเซียส

โมเลกุลของอะมอर्फัสโพลิเมอร์จะพันกันในขณะที่หลอมตัวและเย็นตัว ซึ่งโมเลกุลอาจจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงใน Lattice ตัวอย่าง เช่น คริสตัลไลด์ วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบอะมอर्फัสและ คริสตัลไลด์ ถูกเรียกว่า Semi - Crystalline

2.2 ความหนืด, อัตราเฉือนและความเค้นเฉือน

เราจะพิจารณาของไหลในอุดมคติ กำหนดให้มีการไหลแบบสม่ำเสมอ , ภายใต้อุณหภูมิคงที่ และเป็นการไหลผ่านช่องความหนา H ซึ่งอยู่ระหว่าง 2 แผ่นบาง โดยที่แผ่นล่างไม่เคลื่อนที่และแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในทิศทาง x โดยแรง F กระทำ ดังแสดงในรูปที่ (2.1) การไหลชนิดนี้เรียกว่า Simple Shear Flow



รูปที่ 2.1 แสดงแรงเฉือนเนื่องจากการไหลแบบสถานะคงที่

ความเค้นเฉือน τ สามารถกำหนดได้ดังสมการ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

กำหนดให้ A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่น F คือแรงเฉือน หน่วยของความเค้นเฉือนคือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยสังเกตได้จากความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเร็วของของไหล ใช้สัญลักษณ์แทนคือ dv_x / dz

$$\tau_{zx} = \mu \frac{dv_x}{dz} \quad (2.2)$$

ผลต่างของความเร็ว dv_x / dz เรียกว่า Shear Rate (อัตราเฉือน) ใช้สัญลักษณ์แทนคือ $\dot{\gamma}$ หน่วยคือ ส่วนกลับของวินาที การไหลโดยปกติจะประกอบด้วยจำนวนของชั้นการไหลที่มีความเร็วแตกต่างกัน ดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นการวัดการเคลื่อนที่ของชั้นการไหล

$$\tau_{zx} = \mu \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

ค่าคงที่ μ เรียกว่า ความหนืด (Viscosity) จากสมการข้างบนพบว่าของไหลจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหล สำหรับการไหลแบบหลายมิติเราจะใช้ Stress Tensor และ Strain Tensor ในการกำหนดพฤติกรรมของ Newtonian Fluid ดังสมการ(2.3) จะได้

$$\underline{\tau} = \mu \underline{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\underline{\tau}$ คือ Shear Stress Tensor

$\underline{\dot{\gamma}}$ คือ Rate of Strain Tensor

2.3 ของไหลชนิด Newtonian and Non-Newtonian

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่ออัตราเฉือนแบบเชิงเส้น ดังสมการ (2.3) เรียกว่า Newtonian สังเกตว่าความหนืดจะคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่งโดยที่ความหนืดสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของของไหล สำหรับ(สมการ 2.3) ไม่ถือว่าเป็น Non-Newtonian สำหรับโพลิเมอร์หลอมเหลว มีพฤติกรรม Non-Newtonian และ Viscoelastic ปัจจุบันซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลไม่รวมผลกระทบนี้

แบบจำลองการไหลของโพลิเมอร์ สามารถประยุกต์จากสมการ (2.3) สังเกตได้ว่าความหนืดจะเป็นฟังก์ชันของอัตราเฉือน กำหนดได้โดย

$$\underline{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

$\underline{\tau}$ คือ Shear Stress Tensor

$\eta(\dot{\gamma})$ ถูกเรียกว่าเป็นฟังก์ชันความหนืด

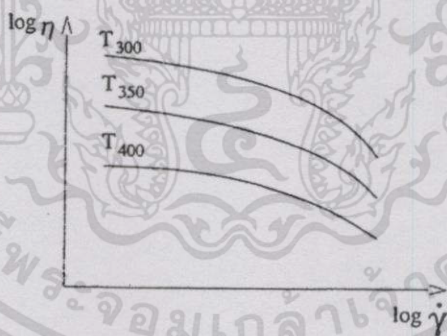
$\underline{\dot{\gamma}}$ คือ Rate of Strain Tensor

2.4 รูปแบบความหนืดสำหรับการวิเคราะห์การไหล

การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกต้องการแบบจำลองความหนืดหรือฟังก์ชันของความหนืด ในการวิเคราะห์ การเลือกแบบจำลองเป็นสิ่งสำคัญซึ่งต้องมีช่วงของข้อมูลครอบคลุมทั้งกระบวนการและใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แบบจำลองที่รู้จักกันดีที่เราจะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ

- Power Law Models (Moldflow First Order Model)
- Moldflow Second Order Model
- Moldflow Matrix Data
- Eills Models
- Carreau Model
- Cross Model

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ แสดงดังรูปที่ (2.2) ซึ่งเป็นรูปแบบสำหรับวัสดุต่างๆไปที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก สังเกตว่าจะแสดงค่าที่หลายอุณหภูมิ จุดประสงค์ของแบบจำลองคือสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้แม่นยำใกล้เคียงความเป็นจริงและเป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนที่สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ

2.4.1 Power Law Model

รูปแบบคือ

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.6)$$

m และ n คือค่าคงที่เมื่อ $m = \mu$ และ $\eta = 1$ เราจะหาความสัมพันธ์สำหรับ Newtonian Fluid จากสมการ (2.4) สำหรับโพลิเมอร์หลอมเหลวควรมีค่าคงที่ η มีค่าระหว่าง 0 และ 1 นำลอกอริธึมใส่ทั้งสองข้าง เราจะได้

$$\ln(\eta) = (\eta - 1)\ln(\dot{\gamma}) + \ln(m) \quad (2.7)$$

ถ้าเรานำสมการข้างบนมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \eta$ กับ $\ln \dot{\gamma}$ จะพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่า m , n ได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลการทดลองและจากการทดลองจะสังเกตได้ว่าแบบจำลองของ Power Law สามารถอธิบายพฤติกรรมของโพลิเมอร์ในช่วงอัตราเฉือนที่มีค่าสูงได้ดี

ข้อสำคัญของการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกคือแบบจำลองต้องแสดงความหนืดในช่วงของอัตราเฉือนมีค่าต่ำได้เพราะว่าเราไม่สามารถทำนาย Newtonian Viscosity η_0 ซึ่งถูกกำหนดความหนืดที่สถานะอัตราเฉือนเป็นศูนย์ได้

ตัวแปรของอุณหภูมิจะรวมกับสมการ (2.6) โดยพจน์เอ็กโปเนนเชียล คือ

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \exp(cT) \quad (2.8)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่, T คืออุณหภูมิ สมการ (2.8) คือรูปแบบความหนืดแรกใน Mold Flow

2.4.2 Moldflow Second order Model

เพื่อปรับปรุงแบบจำลองของความหนืดในบริเวณที่ค่าความหนืดต่ำ สำหรับรูปแบบที่ถูกใช้ใน Mold Flow คือ

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_3 (\ln \dot{\gamma})^2 + A_4 T \ln \dot{\gamma} + A_5 T^2 \quad (2.9)$$

A_i คือค่าคงที่ ใดๆ

แบบจำลองดังกล่าวสามารถหาได้จากผลการสังเกตการทดลองและต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดังนี้

- ก อัตราระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- ข ความชันของกราฟจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มมากขึ้น
- ค ความชันจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนืดลดลงและอัตราเฉือนเพิ่มขึ้น
- ง ความชันจะลดลงเมื่อความหนืดลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเสียบางอย่างสำหรับแบบจำลองนี้ เช่น ข้อมูลไม่ครอบคลุมพฤติกรรมของพลาสติกที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด และการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการตัดออกของข้อมูลที่ใช้ในช่วงอัตราเฉือนต่ำเกินไป

2.4.3 Moldflow Matrix Data Model

แบบจำลองนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืด , อุณหภูมิ และอัตราเฉือน เนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่มีฟังก์ชันจะขึ้นกราฟที่สร้างขึ้นจึงได้จากข้อมูลการทดลองและการประมาณค่าภายในช่วงของข้อมูล

The Matrix Data Model จึงเหมาะสำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติความหนืดไม่คงที่ เช่น Liquid Crystal Polymer ดังนั้นแบบของ First และรูปแบบ Second Order ก็สามารถอธิบายพฤติกรรมความหนืดของพลาสติกได้ดี

สำหรับการใช้แบบจำลอง Matrix Data ต้องวัดข้อมูลในช่วงกว้าง ขณะที่แบบจำลองอื่นๆ กำหนดฟังก์ชันของความสัมพันธ์ในการประมาณค่าในช่วงของข้อมูล

2.4.4 The Eills Model

รูปแบบคือ

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \frac{(\dot{\tau})^{\alpha-1}}{\tau_{1/2}} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\tau_{1/2}$ คือค่าความเค้นเฉือนซึ่ง $\eta = \eta_0/2$ และ $\alpha-1$ คือค่าความชันของกราฟ เมื่อกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[(\eta_0/\eta)-1]$ กับ $\ln(\dot{\tau}/\tau_{1/2})$

2.4.5 The Carreau Model

รูปแบบคือ

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (2.11)$$

ซึ่ง η_∞ คือค่าความหนืดที่อัตราเฉือนอนันต์, η_0 คือค่าความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์, η คือค่าคงที่กับตัวแปรที่เหมือนกันในสมการ (2.6), λ คือค่าคงที่

2.4.6 Cross Model

รูปแบบคือ

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (2.12)$$

คือความเค้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Newtonian และพฤติกรรม power law

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืด , อุณหภูมิและอัตราเฉือน

ความสำคัญของแบบจำลองความหนืดคือสามารถสังเกตพฤติกรรมของ โพลีเมอร์หลอมเหลวโดย เฉพาะความสัมพันธ์ของแบบจำลองความหนืดต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ระหว่าง ความหนืด/อุณหภูมิ

- ความหนืดควรลดลงกับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- เส้นโค้งของ iso-shear rate ควรจะเป็นอัตราเฉือนลดลงกับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- เส้นโค้ง iso-shear rate อัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ควรสูงเกินไป

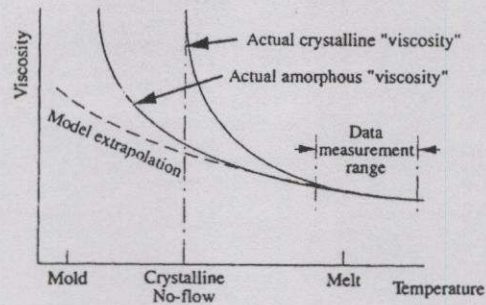
ระหว่าง ความหนืด/อัตราเฉือน

- ความหนืดลดลงกับการเพิ่มขึ้นอัตราเฉือน
- เส้นโค้งของ isotherms ควรจะเป็นความหนืดลดลงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน
- เส้นโค้ง isotherms ควรตัดกับแกนใด ๆ

2.6 การประมาณค่านอกช่วงของข้อมูลความหนืด

การเลือกแบบจำลองอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การไหล เพราะช่วงของ อุณหภูมิและอัตราเฉือนเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการวัดความหนืดในการทดลองซึ่งอาจจะไม่ครอบคลุม ช่วงการจำลองทั้งหมด โดยเฉพาะการจำลองจะต้องรวมผลกระทบของ Solidification ตลอดขบวนการ เติบโตเต็ม (Filling Phase) และขบวนการอัดแน่น (Packing Phase) หรืออาจกล่าวได้ว่าจำเป็นต้องมีข้อมูล ความหนืดที่อุณหภูมิวัสดุแข็งตัว เนื่องจากเราไม่สามารถวัดค่าความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำ การประมาณ ค่านอกช่วงจากการประมาณค่านอกช่วงจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล

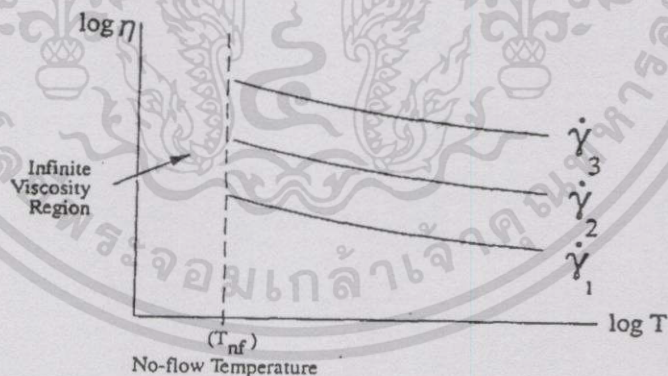
การขาดข้อมูลของความหนืดที่อุณหภูมิต่ำเป็นปัญหาสำคัญ โดยเฉพาะ Semi-Crystalline วัสดุมีการ เปลี่ยนความหนืดอย่างรวดเร็วในระหว่างช่วงหลอมเหลวจนเป็นของแข็ง การเปลี่ยนแปลงของความ หนืดที่รวดเร็วทำให้การ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดจึงต้องอาศัยข้อมูลจาก การทดลองและการประมาณค่านอกช่วง ณ อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.3 แสดงการประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

จากรูปจะสังเกตเห็นว่าการประมาณค่านอกช่วงจะแสดงความสัมพันธ์ของความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำ การประมาณค่านอกช่วงของรูปแบบความหนืดต่างๆไป ไม่สามารถทำนายความหนืดที่อุณหภูมิต่ำได้ การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์จะใช้การประมาณค่านอกช่วงทำนายความดัน เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมทั้งหมด

ข้อสรุปของ No-Flow Temperature คือเป็นวิธีการกำหนดค่าความหนืดภายใต้อัตราเฉือนและอุณหภูมิต่ำเพื่อนำไปวิเคราะห์การจำลองการไหล จากรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของ Mold Flow Second Order กับ No-Flow Temperature เราจะสังเกตเห็นที่อุณหภูมิภายใต้ No-Flow Temperature ความหนืดถูกสมมติให้มีค่าอนันต์



รูปที่ 2.4 แสดงข้อมูลของความหนืดกับเส้นยูติการไหล

2.7 คุณสมบัติทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์การไหล

ขบวนการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์พลาสติก ต้องการ 3 พฤติกรรมพื้นฐาน

- การพาความร้อนในการหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การนำความร้อนผ่านแม่พิมพ์ขณะหล่อเย็น
- ความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน สาเหตุเกิดจากการเสียดรูปของการไหลเมื่อไหลในช่วง

Cavity

ข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล เช่น

- ความร้อนจำเพาะ
- ค่าการนำความร้อน
- No-Flow temperature

2.7.1 ความจุความร้อนจำเพาะ

สมมติว่ามวลของวัสดุถูกทำให้เกิดความร้อน ΔQ และทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT ความจุความร้อนกำหนดเป็น \bar{C} เราจะกำหนดอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความร้อนในพจน์ของอุณหภูมิได้ดังนี้

$$\bar{C} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.13)$$

ความจุความร้อนจำเพาะคือความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวล หน่วยคือ จูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส ความจุความร้อนจำเพาะสามารถวัดภายใต้สภาวะปริมาตรคงที่ หรือความดันคงที่ที่กำหนดโดย C_v หรือ C_p ตามลำดับ

ความจุร้อนจำเพาะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ต้องการให้วัสดุหลอมเหลวและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการถูกถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ภายหลังการฉีด ซึ่งจะถูกใช้คำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนจากโพลีเมอร์เหลวตลอดกระบวนการเติมเต็มและฉีดเข้าและการหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของโพลีเมอร์ในแม่พิมพ์

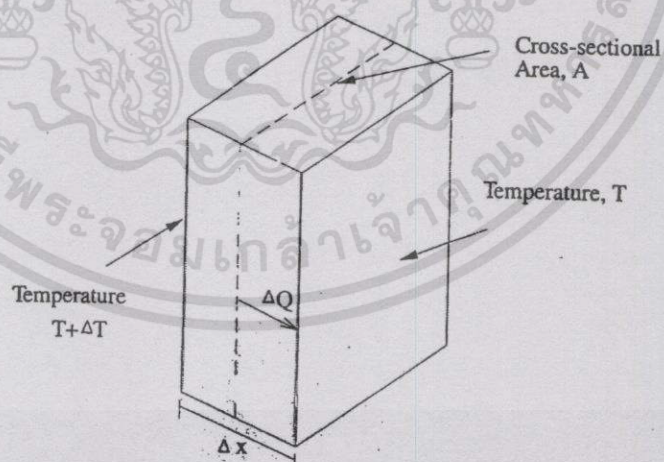
โดยทั่วไป ความจุความร้อนของโพลีเมอร์มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ โลหะ ตารางที่ (2.1) แสดงค่าของโพลีเมอร์ [3] และ โลหะ [4] ที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก

ตารางที่ 2.1 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของพลาสติกและโลหะ

ชนิดของวัสดุ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)
ABS	1250-1700
Acetal	1500
PA66	1700
Polycarbonate	1300
Polyethylene	2300
Polypropylene	1900
Polystyrene	1300
PVC (rigid)	800-1200
PVC (plasticized)	1300-2100
Steel (AISI 1020)	460
Steel (AISI P20)	460

2.7.2 ค่าการนำความร้อน

สมมติหน้าตัดของวัสดุมีความหนา Δx ข้างหนึ่งมีอุณหภูมิ $T + \Delta T$ และอีกข้างหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำ T แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการกำหนดสภาวะการนำความร้อน

ΔQ คือความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่ A เมื่อใช้เวลา Δt อัตราการไหลเฉลี่ยของความร้อน คือ $\Delta Q/\Delta t$ อัตราเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดและผลต่างของอุณหภูมิ ΔT แต่จะแปรผกผันกับระยะทาง Δx

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.15)$$

เมื่อค่าคงที่การนำความร้อนเป็นบวก จะได้

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.16)$$

เมื่อกำหนดให้ Δx เข้าใกล้ศูนย์และ ΔT เข้าใกล้ศูนย์

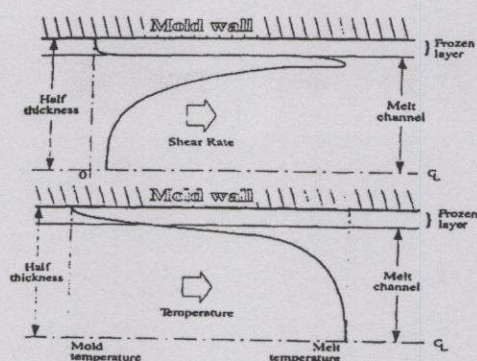
$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

เมื่อ ค่าการนำความร้อน K , อุณหภูมิของวัสดุ T กำหนดโดยสมการ 2.17 ดังข้างบน สำหรับ โพลีเมอร์ ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, ทิศทางของการจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุลและชั้นของของไหล

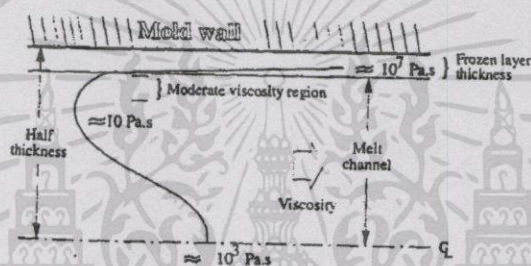
2.7.3 No-Flow Temperature

No-Flow Temperature คือการกำหนดอุณหภูมิของพลาสติกมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหล ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุตัวอย่าง เช่น การนำความร้อน แต่ No-Flow Temperature ก็จะถูกใช้เป็นแบบจำลองเพื่อพิจารณาผลกระทบของชั้นการแข็งตัวซึ่งจะเริ่มพิจารณาจากผนังของแม่พิมพ์จนถึงตรงกลาง Cavity ตลอดกระบวนการฉีดพลาสติก

รูปที่ (2.7) แสดงรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราการเลื่อนผ่านช่องความหนา ส่วนการกระจายความหนืดแสดงในรูปที่ (2.8)



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอัตราเฉือนและอุณหภูมิข้ามหน้าตัดของโพรง



รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายตัวของความหนืดข้ามหน้าตัดของโพรง

สังเกตว่ารูปร่างของการกระจายความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนและอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยชั้นการแข็งตัวบาง ๆ เราสามารถอธิบายได้ว่าถ้าไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ ความหนืดจะลดลงในขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและในทางตรงกันข้ามถ้าเราไม่พิจารณาอัตราเฉือน ความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งสองตัวแปรส่งผลกับรูปร่างของการกระจายความหนืดในรูปที่ (2.7) นอกจากนี้อัตราเฉือนของโพลิเมอร์หลอมเหลวที่มีค่าน้อยจะแสดงพฤติกรรมแบบ Newtonian Flow และไม่มีข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วงความหนืดต่ำ

การไหลทำให้เกิดแรงกระทำผ่านช่องความหนา ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้ปริมาณที่เรียกว่า Fluidity หรือ Flow Conductance สำหรับหัวข้อนี้กำหนดได้ดังนี้

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (2.18)$$

ซึ่ง h คือความหนาครึ่งหนึ่งของช่องความหนา, η คือความหนืด และ z คือพิกัดในทิศทางความหนาวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง

ค่า Fluidity ที่สูงหมายความว่าของไหลสามารถไหลได้ง่ายและโพลิเมอร์ที่ดีควรมีค่าต้านทานการไหลต่ำค่าที่ต่ำ

จากสมการ (2.18) จะสังเกตได้ว่าค่า S ที่ดีจะเกิดจากบริเวณซึ่งความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะบริเวณที่มีความหนาแคบและค่า S จะน้อยอีกครั้งหนึ่งเมื่อความหนามากขึ้น ดังนั้นการคำนวณของ fluidity และชั้นของการแข็งตัวจึงมีความสัมพันธ์กัน

ในจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก Fluidity จะถูกใช้ในการคำนวณกระจายของความดันในช่องความหนา เมื่อทราบกระจายตัวของความดันก็สามารถหาความเร็วการไหลได้ การคำนวณของ fluidity จำจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การไหล

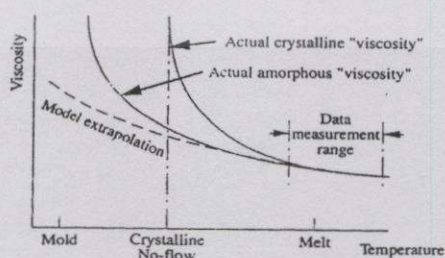
หลักเกณฑ์พื้นฐาน 2 ประการของการคำนวณ Fluidity คือ

- การประมาณค่าข้อมูลความหนืดนอกช่วง ซึ่งความหนืดจะเป็นตัวถูกกำหนดวัสดุในสถานะของแข็งจากชั้นการแข็งตัว การคำนวณ Fluidity จึงเป็นพื้นฐานของการกระจายของความหนืด ตลอดช่องความหนา
- การใช้แนวทางของ No-Flow Temperature ซึ่งให้เห็นบริเวณที่ของไหลมีความเร็วมีค่าเป็นศูนย์และความหนืดมีค่าอินฟินิตี้

2.7.4 ข้อผิดพลาดของประมาณค่านอกช่วงของความหนืด

เพื่อที่จะคำนวณค่า Fluidity เราจะต้องใช้ข้อมูลต่าง ๆ เช่นการกระจายตัวของความหนืดตลอดความหนา, การประมาณค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ,การเปลี่ยนแปลงความร้อนในช่วง glass,ช่วงการแข็งตัวและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เราจะสังเกตได้ว่าการวัดอุณหภูมิทุกค่าทำได้ยากมาก โดยเฉพาะวัสดุ Semi-Crystalline ที่มีมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่รวดเร็วและเป็นไปได้อย่างที่การไหลจะสม่ำเสมอ

รูปที่ (2.9) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของ Semi-Crystalline และ Amorphus



รูปที่ 2.8 ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความหนืดนอกช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของ Semi-Crystalline จะเกิดขึ้นเร็วกว่าวัสดุอะมอร์ฟิโคส แกรมแสดงช่วงการวัดค่าของความหนืดต่างๆไป ซึ่งข้อมูลจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันของคณิตศาสตร์โดยการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ เราจะพิจารณาความสามารถของฟังก์ชันในการพล็อตข้อมูลที่วัดได้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันอาจเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมจริงของวัสดุเมื่อมีการประมาณค่านอกช่วง ดังแสดงในรูป ปัญหาจะเน้นที่วัสดุ Semi-Crystalline เพื่อศึกษาขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของความหนืด

2.7.5 การใช้ No-Flow temperature

จากแนวทาง No-flow temperature เราจะสังเกตว่าเราพยายามขจัดปัญหาการประมาณค่านอกช่วงในการกำหนดค่าความหนืด ถึงแม้ว่า No-Flow Temperature ไม่ใช่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ แต่ในวิเคราะห์การไหลเราจำเป็นต้องใช้ No-Flow Temperature ในการวิเคราะห์

การใช้ No-Flow Temperature คือการแสดงค่าความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นการแข็งตัวของ การวัด No-Flow Temperature จะเป็นการวัดภายใต้ผลกระทบของการหล่อเย็นที่ถูกกำหนด ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก

สำหรับชิ้นงานที่มีผนังบางซึ่งการหล่อเย็นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคือความสำคัญของสัดส่วนของความหนาของคาร์วี้ดกับอุณหภูมิภายใต้ No-Flow Temperature การประมาณค่านอกช่วงของความหนืดและบริเวณทั้งหมด จะได้รับผลการทำนายความดันที่ถูกดัดและใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง

ข้อสรุปแนวทางการใช้ No-Flow Temperature ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่ใช่คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ แต่ก็มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของวัสดุจริง การสร้างรูปแบบการจำลองที่ปลอดภัยและไม่แน่นอนโดยการประมาณค่านอกช่วงของฟังก์ชัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ Fluidity ของ Semi-Crystalline จะถูกสร้างขึ้น การวัด No-Flow Temperature อย่างเหมาะสมจะเป็นประโยชน์มากกว่าการประมาณค่านอกช่วงของความหนืด จึงต้องพิจารณาอย่างเหมาะสมในการใช้

2.8 ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ความร้อน

การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกต้องการคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกในการวิเคราะห์ ซึ่งอาจหาได้จากข้อมูล PVT ของวัสดุ ซึ่งเราจะกล่าวถึงค่าการขยายตัวและค่าการหดตัวของวัสดุ

2.8.1 ค่าการขยายตัวและการหดตัว

สมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ความดัน P , ปริมาตรจำเพาะ \hat{V} , อุณหภูมิ T สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

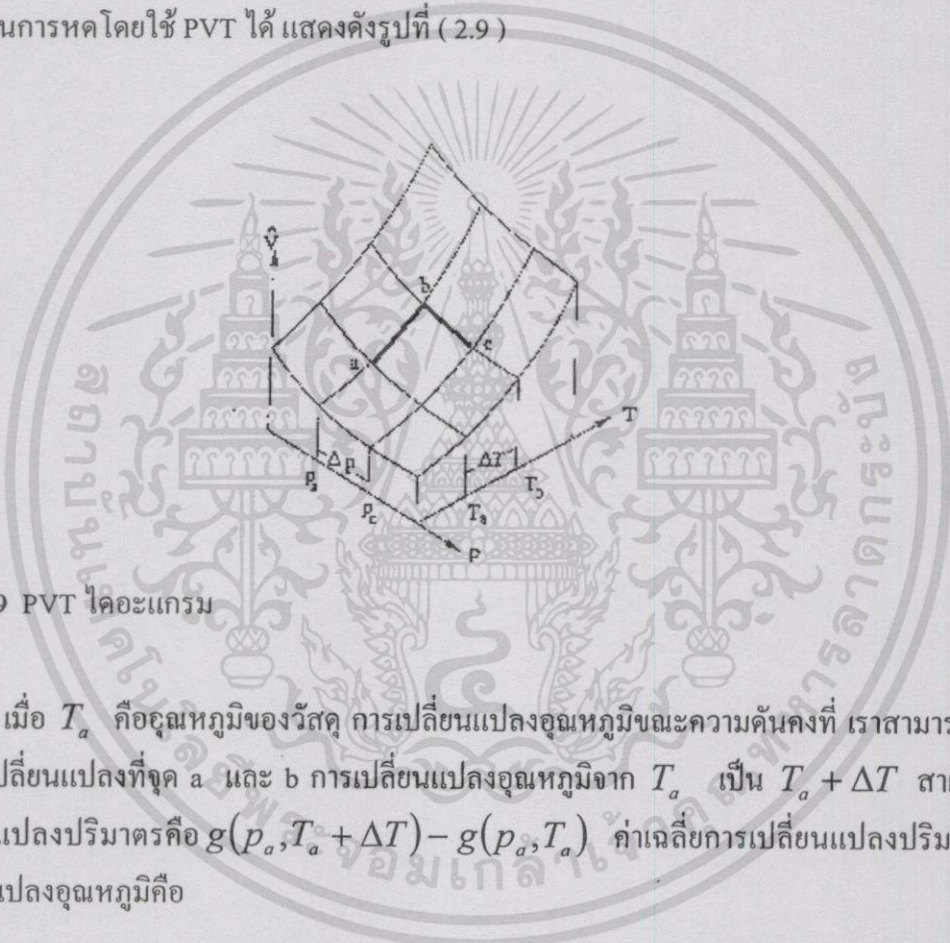
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(p, \hat{V}, T) = 0 \tag{2.19}$$

กรณีใช้สองตัวแปร สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{V} = g(p, T) \tag{2.20}$$

g คือฟังก์ชันระหว่างความดันกับอุณหภูมิ ถ้าเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูล เราสามารถพิจารณากระบวนการหดโดยใช้ PVT ได้ แสดงดังรูปที่ (2.9)



รูปที่ 2.9 PVT ไดอะแกรม

เมื่อ T_a คืออุณหภูมิของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะความดันคงที่ เราสามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่จุด a และ b การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก T_a เป็น $T_a + \Delta T$ สาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรคือ $g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)$ ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \hat{V}}{\Delta T} &= \frac{g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)}{\Delta T} \\ &= \frac{\hat{V}g(p_a, T_a + \Delta T) - \hat{V}(p_a, T_a)}{\Delta T} \end{aligned} \tag{2.21}$$

ΔT เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรชั่วขณะ ใช้แทนได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T}\right)_p \quad (2.22)$$

ตัวห้อยชี้ให้เห็นถึงความดันคงที่

$$\beta = \frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T}\right)_p \quad (2.23)$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของวัสดุ เรียกว่า ค่าการขยายตัวของวัสดุมีหน่วยเป็น (K^{-1}) ตอนนี้เราจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันขณะอุณหภูมิคงที่ จาก b ถึง c ดังรูปที่ 2.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ยเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันกำหนดได้โดย

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \hat{V}}{\Delta p} &= \frac{g(p_a, +\Delta p, T_b) - g(p_a, T_b)}{\Delta p} \\ &= \frac{\hat{V}(p_a, +\Delta p, T_b) - \hat{V}(p_a, T_b)}{\Delta p} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Δp เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ย ใช้แทนได้โดย

$$\left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial p}\right)_T \quad (2.25)$$

เมื่อ Isothermal compressibility (K) คือ

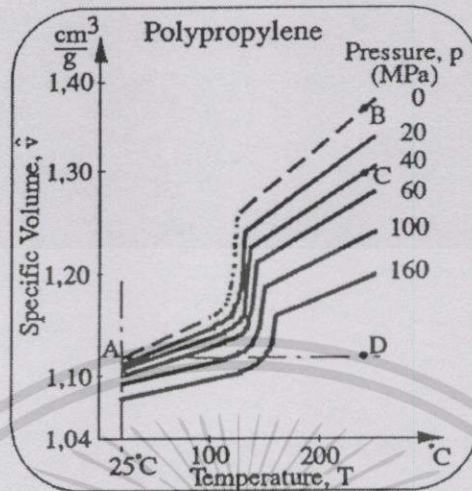
$$K = -\frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial p}\right)_T \quad (2.26)$$

ถ้าเครื่องหมายมีค่าเป็นลบชี้ให้เห็นว่าปริมาตรจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น มีหน่วยเป็น ($m^2 N^{-1}$)

2.8.2 ข้อมูล PVT สำหรับการวิเคราะห์การไหล

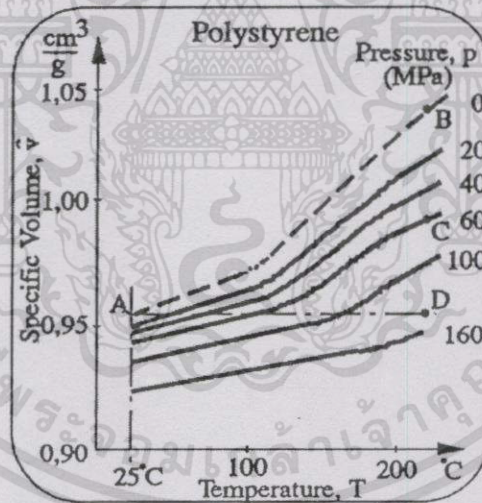
ข้อมูล PVT จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอัดตัว (Packing phase) แต่อาจจะใช้ในขบวนการเติมเต็ม Filling phase ก็ได้ ข้อมูลสามารถหาได้จากการทดลองและกราฟที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์การหดตัวและบิดงอ สำหรับวัสดุ semi-crystalline ซึ่งข้อมูล PVT จะเปลี่ยนแปลงและมีอุณหภูมิสูง รูปที่

2.10 แสดงกราฟ PVT สำหรับโพลีโพรไพรีน เส้นประชี้ให้เห็นถึงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงจากการหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง เส้นโค้งทางด้านซ้ายคือของแข็งและทางด้านขวาคือช่วงการหลอมเหลว



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุ เซมิ คริสตัลไลน์ ชนิด โพลีโพรไพรีน
สำหรับวัสดุอะมอर्फัลจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว สำหรับโพลีสไตรีนแสดงในรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุอะมอर्फัล ชนิด โพลีสไตรีน

จากกราฟการทดลองจากรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะถูกนำมาร่างสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้
ช่วงอุณหภูมิต่ำ

$$\hat{V} = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} + a_5 e^{a_6 T - a_7 p} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงอุณหภูมิสูง

$$\hat{V} = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} \quad (2.28)$$

ช่วงการเปลี่ยนแปลง

$$p = b_1 + b_2 T \quad (2.29)$$

ทั้ง a_i และ b_i คือค่าคงที่ หาได้จากการวิเคราะห์

2.9 การหดตัวของพลาสติก (Plastic Shrinkage)

ผู้ออกแบบต้องเข้าใจดีว่าการหดตัวคืออะไรและอะไรบ้างที่มีผลกระทบกับการหดตัว เราจะมองออกเป็น 2 มุม คือ ทฤษฎีของพลาสติกและการประยุกต์ใช้กับงานฉีด ซึ่งเราจะได้กล่าวต่อไป

2.9.1 ทฤษฎีของพลาสติก

การหดตัวคือผลต่างของขนาดระหว่างขนาดของชิ้นงานพลาสติกและขนาดของโพรงแม่พิมพ์ ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่จะมีหน่วยคือ mm/mm , in/in หรือ เปอร์เซ็นต์

กฎข้อที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน , ปริมาตร และอุณหภูมิ จะเปลี่ยนไปตามสภาวะเงื่อนไข ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีผลกระทบกับการหดตัว

กฎข้อที่ 2 เมื่อปริมาตรพลาสติกถูกทำให้ร้อนขึ้นและขยายตัว เมื่อเย็นตัวจะกลับสู่อุณหภูมิปกติและปริมาตรเดิม

กฎข้อที่ 3 เมื่อพลาสติกถูกอัดตัว ปริมาตรจะลดลง และเมื่อความดันลดลงสู่ความดันบรรยากาศ พลาสติกจะกลับสู่สภาวะเดิม

PVT ไดอะแกรมเป็นเครื่องมือ ที่ช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมของพลาสติกแต่ละชนิดได้เป็นอย่างดี PVT ไดอะแกรมแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตร อุณหภูมิ โดยแกนนอนเป็นอุณหภูมิของพลาสติก แกนตั้งเป็นปริมาตรต่อน้ำหนัก 1 กรัมหรือปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) เส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรจำเพาะที่ความดันค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11

สาเหตุที่ชิ้นงานพลาสติกหดตัวเนื่องจากปริมาตรที่เข้าไปในโพรงนั้นขาดหายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน การชดเชยการหดตัวของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถทำได้ 2 วิธี

สาเหตุที่ชิ้นงานพลาสติกหดตัวเนื่องจากปริมาตรที่เข้าไปในโพรงนั้นขาดหายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน การชดเชยการหดตัวของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถทำได้ 2 วิธี

กรณีที่ 1 ชดเชยการหดตัวของพลาสติก ด้วยการอัดพลาสติกเหลวเข้าโพรงด้วยความดันสูง ในช่วงเวลาสั้น ๆ เพื่อให้พลาสติกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

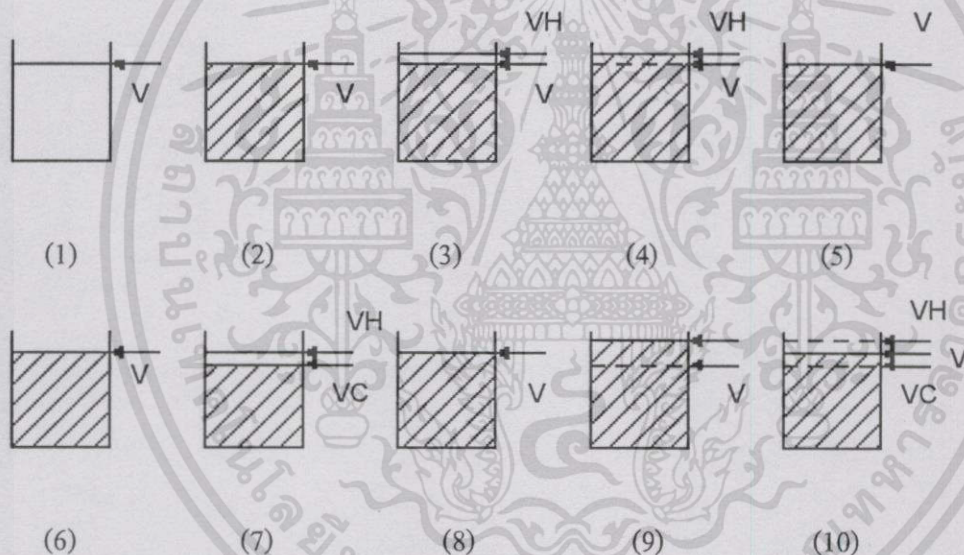
ข้อดีของวิธีนี้ เหมาะสำหรับงานที่บาง , มีความเค้นตกค้างน้อย

ข้อเสีย ต้องการแรงการเปิดแม่พิมพ์สูง

กรณีที่ 2 อัดเนื้อเข้าโพรงแบบด้วยแรงดันปานกลาง อย่างต่อเนื่อง โดยการรักษาระดับความดันฉีดไว้ในแม่พิมพ์ให้คงที่

ข้อดีวิธีนี้ เหมาะสำหรับงานที่หนา , ใช้แรงเปิดแม่พิมพ์น้อย

ข้อเสีย มีความเค้นตกค้างสูง โดยเฉพาะบริเวณใกล้ Gate



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการหดตัวของพลาสติกภายในภาชนะ

- 1 ภาชนะมีปริมาตร V
 - 2 พลาสติกในสถานะของแข็งอยู่ในภาชนะ ปริมาตร V
 - 3 พลาสติกถูกทำให้ร้อนขึ้น และทำให้ขยายตัวจนได้ปริมาตร VH อุณหภูมิควรแตกต่างกันระหว่าง สภาวะเริ่มต้น , การเย็นตัว และสิ้นสุดการให้ความร้อน
- สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว (Coefficient of Heat Expansion) คือ

$$\left(\frac{VH - V}{V} \right) \times 100\% \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 พลาสติกหลอมเหลวถูกทำให้เย็นลงในภาชนะ

5 พลาสติกหลอมเหลวจะหดตัว การหดตัวจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิห้อง ถ้าพลาสติกที่กำลังเย็นตัวถูกปลดออกจากภาชนะก่อนการแข็งตัว จะทำให้การหดตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายนอกภาชนะจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

6 ปริมาตรของพลาสติกจะเท่ากับข้อที่ 1

7 พลาสติกมีความสามารถหดตัวได้ เมื่อถูกกดด้วยแรง จะหดตัวให้ปริมาตร VC

8 เมื่อแรงกดถูกยกออก มันจะกลับสู่ปริมาตรเดิม V

9 เมื่อถูกทำให้ร้อนและขยายตัวภายใต้แรงกด

10 เมื่อพลาสติกเย็นตัวลงภายใต้ความดัน ซึ่งอาจเป็นความดันที่ใช้ในกระบวนการเดิมเต็มหรือการฉีดอัด พลาสติกจะหดตัวมากกว่าหรือน้อยกว่า VF ก็ได้ เปรียบเทียบได้กับพลาสติกหลอมเหลวที่กดอัดในโพรงภายใต้ความดัน

บทสรุป

1 อุณหภูมิ ควรมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิปลดชิ้นงานและอุณหภูมิห้อง จะทำให้การหดตัวน้อยลง

2 ความดัน ถ้าความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีดอัดมีค่าสูงการหดตัวจะน้อย กลับกันถ้าความดันต่ำจะทำให้การหดตัวสูง

3 เวลา เวลาที่ใช้ในการฉีดที่นาน ทำให้การหดตัวน้อยลง

4 คุณสมบัติของพลาสติก พลาสติกแต่ละชนิดมีค่าการขยายตัวไม่เท่ากัน

จากที่ได้กล่าวไปแล้ว เราสามารถทำนายการหดตัวของพลาสติก ซึ่งเราพบว่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

2.9.2 การประยุกต์ใช้

การหดตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1 ชนิดของวัสดุ (พลาสติก) วัสดุที่ต่างชนิดกันยอมให้ค่าการขยายตัวต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะทางเคมีและกายภาพเหมือนกันก็ตาม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัว

2 รูปร่างของชิ้นงาน เช่น ความหนา , รูปทรงของพื้นผิว , ครีบริมเสริมแข็ง และอื่น ๆ

3 การออกแบบแม่พิมพ์ ผู้ออกแบบต้องรู้ค่าเมื่อหดตัวของพลาสติกที่ใช้ , ระบบการหล่อเย็น , ระบบรูว้างและประตูทางเข้า และการกระจายตัวของความร้อนในแม่พิมพ์

4 สภาวะเงื่อนไขของแม่พิมพ์ รวมถึงการตั้งงาน , อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น , ความชื้นของพลาสติก , เวลาในการฉีด , ความดันที่ใช้

5 ชนิดของการฉีด เช่น ความเร็วในการฉีด , ความดัน , เวลา , อุณหภูมิ และอื่น ๆ

สภาพของเครื่องฉีดและแม่พิมพ์

2.9.2.1.1 ตัวแปรและการหดตัว

พลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบจนเต็ม โดยจะค่อย ๆ เพิ่มความดันที่ใช้จนกระทั่งและเป็นศูนย์ในที่สุด ขณะที่การหล่อเย็นเริ่มขึ้น พลาสติกจะสัมผัสกับผนังที่เย็นและปริมาตรจะลดลงพร้อมกับอุณหภูมิ

ภายหลังที่พลาสติกถูกฉีดเข้าไปในโพรงแบบ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับการอัดตัวของความดันในโพรงแบบ นั่นคือผลกระทบหลักของการหดตัว ปกติความดันจะคงที่จนกระทั่ง ทางเข้า (Gate) แข็งตัวหรือปิด หลังจากความดันลดลงพลาสติกจะเย็นตัวและหดตัว ดังนั้น อุณหภูมิหลอมเหลว , อุณหภูมิแม่พิมพ์ , ความดันในการฉีด และเวลาที่ทำให้ Gate แข็งตัว เป็นปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับการหดตัวและขนาดสุดท้ายของชิ้นงาน

2.9.2.1.1 Heavy Walled Product

พลาสติกจะแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์และจะหดตัว ความดันจะถูกรักษาไว้เมื่อ Gate เปิดและพลาสติกถูกอัดไว้ในโพรงแบบ อุณหภูมิที่สูงจะทำให้การหดตัวมาก ที่ความดันการฉีดต่ำเท่ากัน

2.9.2.1.2 การปลดชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ถูกปลดออกโดย ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอจะทำให้เกิดการเสียรูปและเสียหายได้ แต่การปลดชิ้นงานไม่จำเป็นต้องรอนถึงอุณหภูมิห้องก็ได้ เพื่อเป็นการลดเวลาในการฉีด

อย่างไรก็ตามความเย็นในชิ้นงานจะยังคงเก็บรักษาไว้ก่อนการปลดชิ้นงานออก และจะเย็นลงถึงอุณหภูมิของสารหล่อเย็นและอุณหภูมิห้อง ไม่เพียงแต่จะทำให้วงจรในการฉีดนานแล้ว ยังทำให้เกิดความเค้นในชิ้นงานอีกด้วยซึ่งทำให้ชิ้นงานเสียหาย เช่น กระทุ้งแล้วแตกหรือเกิดความเค้นที่มุม

2.9.2.1.3 เวลาในการหดตัว

วัสดุส่วนมาก กว่า 90% ของการหดตัวจะใช้เวลาหลายชั่วโมง และอีก 10% ภายในเวลา 10 วัน บางชนิดอาจใช้เวลาหลายเดือน

2.9.2.1.4 การอ่อนตัวของชิ้นงาน

การอ่อนตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่าห้องจะทำให้ลดการคลายความเค้นในชิ้นงานได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2.1.5 ความหนาของชิ้นงาน

ความหนาจะมีผลกระทบกับการหดตัวมาก โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เช่น PP , PE ชิ้นการแข็งตัวจะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายใน บ่อยครั้งที่ชิ้นงานถูกปลดออกโดยขาดความแข็งแรง

ชิ้นงานที่เย็นตัวลงเมื่อสัมผัสกับอากาศภายนอก ขณะที่ภายในร้อนกว่าซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการลดความเค้นในชิ้นงาน

ชิ้นงานที่มีผนังหนาจะหดตัวมากกว่าชิ้นงานที่มีผนังบาง ข้อมูลส่วนใหญ่ของการหดตัวทำให้เราทราบค่าการหดตัวโดยประมาณเป็นช่วง

สาเหตุของความแตกต่างของการหดตัวที่เกิดขึ้น เช่น ความหนาที่มากเกินไปของกล่องที่มีความหนาที่ขอบหรือที่ตัวชิ้นงาน บริเวณขอบและตัวชิ้นงานจะเย็นตัวลงเมื่อถูกปลดออก นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเค้นในชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวและการบิดงอ

การฉีดพลาสติกอาจจะได้ชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ เมื่อฉีดไปหลาย ๆ ชิ้น ดังนั้นเราต้องมั่นใจว่าการออกแบบจะต้องรับประกันคุณภาพได้ เมื่อชิ้นงานมีความหนา การใช้มุมปลดชิ้นงานและการลดความหนาลงจะถูกพิจารณามาใช้

หลักการคือเราควรออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนาเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการออกแบบจะนำมาซึ่ง ลดเวลาการหล่อเย็น , ลดน้ำหนักของชิ้นงาน, เพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิต

นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีผนังหนายังทำให้เกิดความเค้นสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการหดตัวและการยุบตัวมาก

2.9.2.2 สูตรพื้นฐานของการหดตัว

สมการคือ

$$D_c = D_p + (D_p \times S) + (D_p \times S^2) \quad \text{หรือ} \quad D_c = D_p(1+S+S^2) \quad (2.31)$$

เมื่อ D_c คือ ขนาดของแม่พิมพ์

D_p คือ ขนาดของชิ้นงานพลาสติก

S คือ ค่าการหดตัว

เนื่องจาก S มีค่าน้อยมาก เราจึงไม่คิดเทอมของโพสิโนเมียลอันดับสูง จะได้

$$D_c = D_p + (D_p \times S) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหดตัวจะเกิดขึ้นในทิศทางขนานกับการไหล(Axial Shrinkage) และทิศทางตั้งฉากกับการไหล(Radial Shrinkage) ซึ่งมีความสำคัญกับค่าผิดพลาด(Tolerance) จึงจำเป็นที่เราจะต้องพิจารณาการหดตัวทั้งสองทิศทาง ความแตกต่างของทั้งสองทิศทางเนื่องมาจาก การจัดเรียงตัวของโมเลกุล , สายของพันธะระหว่างโมเลกุลที่จับยึดกัน

ตามตัวอย่างชนิดของการหดตัว จะแนะนำผู้ออกแบบให้ทราบถึงปัญหาการหดตัว ถ้าพลาสติกมีค่าการหดตัวที่มาก การใช้ต้องพิจารณาให้ถูกต้อง หากใช้ไม่ถูกต้องจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและคุณภาพของชิ้นงาน

2..9.2.3 ผลกระทบของการหดตัว

ปกติผู้ผลิตแม่พิมพ์จะไม่ทราบถึงผลกระทบของการเลือกค่าการหดตัว ผู้ออกแบบจึงต้องกำหนดให้ชัดเจนและสอบถามจากผู้ผลิตเม็ดพลาสติก เพราะการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อแม่พิมพ์ เช่น ขนาด , ราคาต้นทุน และอื่น ๆ

- ขนาดของเหล็ก
- วัสดุของแม่พิมพ์
- อุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ เช่น Insert , Slide
- อื่น ๆ

2.9.2.4 ผลกระทบเมื่อเปิดแม่พิมพ์

เมื่อแม่พิมพ์เปิด ด้านตัวเมีย(Cavity)จะขยายตัวและด้านตัวผู้(Core)จะถูกกด ซึ่งเกิดจากความดันที่สูง ถูกเรียกว่า Elastic Deformation

ความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีดจะถูกสะสมไว้ในชิ้นงานขณะที่พลาสติกเย็นตัวลง เมื่อความดันลดลงเป็นศูนย์ การโก่งงอก็จะเกิดขึ้น ฉะนั้นค่าการหดตัวต้องสามารถชดเชยผลรวมของการโก่งงอได้ทั้งด้านตัวเมียและตัวผู้

ผนังด้านข้างที่บางกับมุมปัดชิ้นงานที่น้อยต้องใช้แรงในการเปิดแม่พิมพ์มากเพราะแรงที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์คือแรงที่สามารถชนะสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพลาสติกและเหล็กได้ และการออกแบบที่ดีควรกระจายแรงดันในแม่พิมพ์แบบสม่ำเสมอ

2.9.2.5 การประมาณค่าการหดตัว

ตารางที่ 2.2 แสดงช่วงของค่าการหดตัวของพลาสติกแต่ละชนิด

ชนิดของวัสดุ	ค่าการหดตัว
ABS	0.005-0.007
Acetal , Axially	0.021-0.026
Acetal , Radially	0.018-0.020
Acrylic	0.004-0.007
EVA	0.007-0.020
Nylon 6	0.006-0.014
Nylon 66 , Axially	0.012-0.033
Nylon 66 , Radially	0.020-0.028
Polycarbonate	0.006-0.008
ชนิดของวัสดุ	ค่าการหดตัว
PE	0.015-0.050
PE,30% GF	0.004-0.0045
PET (Bottle Grade)	0.005-0.012
PP	0.012-0.022
PP ,30% GF	0.004-0.0045
PS	0.002-0.006
PS ,30% GF	0.0005-0.0001
PVC	0.003-0.008
PVC ,30% GF	0.001-0.002

ซึ่งแปรผันตาม ความหนาของชิ้นงาน ,การจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุล , ส่วนผสมทางเคมี ต่าง ๆ และอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

2.9.2.6 ผลกระทบอื่น ๆ

2.9.2.6.1 ความหนาของชิ้นงาน

อัตราส่วน $L/t < 100$ แสดงถึงการสูญเสียความดันของการฉีดพลาสติก ตั้งแต่ทางเข้าจนถึงบริเวณสิ้นสุดการไหล พลาสติกจะต้องสามารถรักษาความดันไว้ในชิ้นงานและเพื่อป้องกันไม่ให้

ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวเกิดขึ้นก่อนการไหลจะเต็มชิ้นงาน การหดตัวจะแปรผัน โดยตรงกับความดันที่ใช้ในช่วงการฉีดอัดและที่บริเวณใกล้ Gate จะมีค่าน้อยส่วนบริเวณปลายการไหลจะมีค่ามาก

2.9.2.6.2 รูปร่างของชิ้นงาน

สำหรับชิ้นงานที่ต้องควบคุมเรื่องการหดตัวหรือชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง จำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องรูปร่างของชิ้นงานเป็นพิเศษ เช่น มุม เพราะเป็นสาเหตุเกิดของความเค้นซึ่งจะส่งผลเสียกับชิ้นงาน สามารถแตก , หักได้

ฉะนั้นผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ มุมปัดชิ้นงาน และการกำหนดให้มุมเป็นรัศมี เพื่อเป็นการลดความเค้นที่จะเกิดขึ้น และลดแรงในการเปิดแม่พิมพ์

ความโค้งของชิ้นงานอาจจะทำให้ลูกค้าไม่พึงพอใจ แต่มีความสำคัญมากกับการปัดชิ้นงานและลดการหดตัว

หลักการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับชิ้นงานที่มีความยาวหรือกว้างมาก เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการหดตัว เช่น การทำเป็นลูกคลื่น , เป็นชั้น และอื่น ๆ

2.9.2.6.3 ประตูทางเข้า (Gate)

เมื่อGate ปิดจะทำให้ความสามารถในการอัดเนื้อพลาสติกในโพรงแบบลดลง ทั้งเวลาที่ใช้ในการฉีดอัดจึงต้องสัมพันธ์กับการปิดของ Gate เป็นการชดเชยการหดตัวของชิ้นงานเมื่อเกิดการเย็นตัว

Gate ที่มีขนาดเล็กจะปิดเร็ว แต่ต้องเพียงพอกับการชดเชยการหดตัว

Gate ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การแข็งตัวช้า ส่วนใหญ่ใช้แก้ปัญหาการหดตัวได้ดี เพราะเป็นการเพิ่มความดันในช่วงการฉีดอัดได้มากขึ้น จำนวนของ Gate มีผลกระทบต่อกับการหดตัว เราจึงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องจำนวนของ Gate เพราะทำให้ชิ้นงานเต็มเต็มได้เร็วขึ้นและเกิดความดันในชิ้นงานน้อย

ตำแหน่งของ Gate ก็มีผลกระทบต่อกับการหดตัว Gate ที่ดีควรเข้าบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเพื่อสมดุลการไหลและเพื่อเป็นการลดความยาวในการไหล เพราะการหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามความยาวการไหล

2.9.2.6.4 การหล่อเย็น

ชิ้นงานจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งด้านตัวผู้และตัวเมีย ถ้าอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดความเค้นในชิ้นงานและเกิดการหดตัวและบิดงอ สำหรับชิ้นงานที่มีความยาว , ความกว้าง และ มีครีบลึก จึงต้องพิจารณาเป็นพิเศษ

2.9.2.6.5 การจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุล (Molecular Orientation)

เมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจากกระบวนการฉีดและแรงเสียดสีจากการหมุนของสกรู พลาสติกจะหลอมละลายและทำให้โมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

พลาสติกเหล่านี้ถูกฉีดเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์ โซโมเลกุลบริเวณใกล้ผิวของโพรงแบบจะไหลและถูกดึงให้ตั้งด้วยแรงที่เกิดจากความเร็วเฉือน และจะเรียงตัวในทิศทางการไหล ส่วนโซโมเลกุลพลาสติกบริเวณตรงกลางได้รับอิทธิพลจากความเร็วน้อย ทำให้โซโมเลกุลไม่มีการเรียงตัวกันตามแนวฉีด

การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพลาสติก(Molecular Orientation) ในแนวฉีด จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วฉีด ถ้าความเร็วฉีดมากจำนวนโซโมเลกุลที่เรียงตัวจะน้อยเนื่องมาจากมีชั้นการแข็งตัวที่น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าความเร็วฉีดช้าจำนวนโซโมเลกุลที่เรียงตัวในแนวฉีดจะมาก เนื่องจากชั้นการแข็งตัวที่มาก

ดังนั้นบริเวณผิวของชิ้นงานจะมีความเค้นเฉือนมาก เนื่องจากการเรียงตัวของโซโมเลกุลที่ถูกดึงในแนวทิศการไหลและบริเวณตรงกลางจะเกิดความเค้นเฉือนน้อยที่สุด

ในขณะที่พลาสติกเหลวในโพรงแบบถูกหล่อเย็น และเมื่อการฉีดช้าที่สุด การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเริ่มคลายตัว(Relaxation) โซโมเลกุลที่ถูกดึงเริ่มหดตัวกลับ

ที่บริเวณใกล้กับผนังแม่พิมพ์การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล (Residual Orientation) มีมาก เนื่องจากการแข็งตัวที่เร็วมาก ดังนั้นโซโมเลกุลจึงมีเวลาในการผ่อนคลายน้อย การแข็งตัวที่ถูกดึงยืดค้างเอาไว้ ทำให้มีความเค้นตกค้างสูง บริเวณที่อยู่ห่างจากผนังแม่พิมพ์มีการถ่ายเทความร้อนที่ช้า การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตกค้างบริเวณนั้นจึงน้อย

ความเค้นตกค้างจะมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานพลาสติก อาจจะทำให้ชิ้นงานโก่งงอได้หากมีความเค้นสูงพอ

โดยทั่วไปแล้วพลาสติกจะมีการหดตัวในทิศทางขนานกับการไหลมากกว่าทิศทางตั้งฉากกับการไหล ซึ่งในตอนนี้เราจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดมาก ผู้สนใจสามารถศึกษาได้ในรายวิชา Rheology

3.9.2.6.6 สภาพะเงื่อนไขในการฉีด

- เวลาในการหล่อเย็น
- ความดันในการฉีดเต็มเต็ม
- ความดันในการฉีดช้า
- เวลาในการฉีดช้า
- อุณหภูมิหลอมเหลว
- อุณหภูมิแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการไหล
- อื่น ๆ

2.9.2.6.7 มาตรฐานค่าพิถีพิถันของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของ SPI

เนื่องจากปัจจุบันมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับการหดตัว Society of Plastic Industry (SPI) จึงได้กำหนดมาตรฐานค่าพิถีพิถันของชิ้นส่วนพลาสติกดังนี้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานค่าพิถีพิถันของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

Print Dimension Product	Print Tolerance (+/-)	Percent of Tolerance Allowed to mold maker	Suggested mold tolerance (+/-)
0 to 1	0.002	20	0.0004
	0.005	25	0.0013
	0.010	25	0.0025
	0.020	30	0.006
1 to 2	0.005	20	0.001
	0.010	30	0.003
	0.020	30	0.006
2 to 3	0.005	20	0.001
	0.010	30	0.003
	0.020	30	0.006
3 to 5	0.005	20	0.001
	0.010	20	0.002
	0.020	25	0.005
	0.030	30	0.009
5 to 8	0.010	20	0.002
	0.020	20	0.004
	0.030	30	0.009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

8 to 12	0.010	20	0.002
	0.020	20	0.004
	0.030	25	0.0075
	0.040	30	0.012
12 to 16	0.020	20	0.004
	0.030	30	0.009
	0.040	30	0.012
16 to 20	0.020	20	0.004
	0.030	25	0.0075
	0.040	30	0.012

2.10 ทฤษฎีการบิดงอ

การบิดงอเป็นพฤติกรรมที่เป็นสลับเนื่องจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันภายในชิ้นงาน การหดตัวที่ไม่เท่ากันนี้จะเกิดทุกจุดบนชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นในทิศทางขนานและตั้งฉากกับการไหล เราจะพิจารณาสาเหตุของการบิดตัวที่เป็นผลทำให้บิดงอได้ดังนี้ คือ

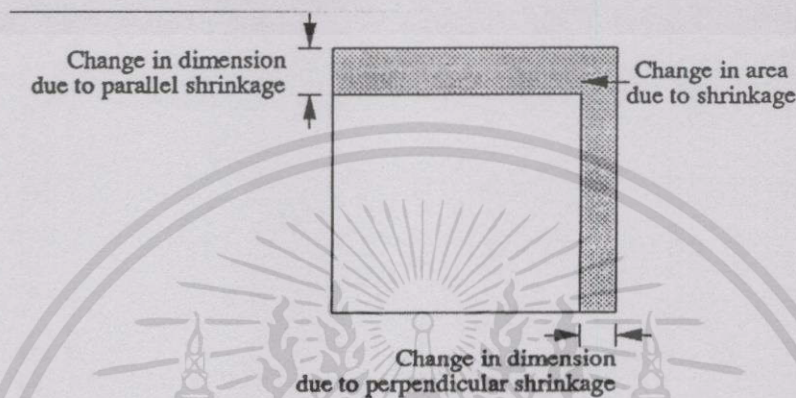
1 ผลกระทบของ Orientation

ผลกระทบนี้ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.9.2.6.5 ซึ่งเราสามารถสรุปได้ว่าการหดตัวที่ไม่เท่ากันทั้งในแนวนอนและตั้งฉากกับการไหล จะทำให้ทิศทางหนึ่งรักษารูปร่างและปริมาตรไว้ได้ ในขณะที่อีกทิศทางหนึ่งไม่สามารถคงขนาดและปริมาตรเอาไว้ได้จึงทำให้ชิ้นงานขาดเสถียรภาพหรือเสียรูปทรงไปในที่สุด ส่วนผลกระทบที่สำคัญของ Orientation เราสามารถสรุปได้ดังนี้

- ความเร็วในการฉีดในช่วงการฉีดเต็มเต็ม
- เวลาที่ใช้ในกระบวนการหล่อเย็น
- ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากระบบหล่อเย็น
- ค่าของความหนืดตามทิศทางการไหล
- อื่น ๆ

2 ผลกระทบของพื้นที่การหดตัว (Area Shrinkage)

เนื่องจากค่าการหดตัวที่ไม่เท่ากันทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกับการไหล ดังนั้นพื้นที่ที่มีการหดตัวมากและน้อยที่สุดจึงจำเป็นต้องพิจารณา ซึ่งเราจะเปรียบเทียบผลการหดตัวที่ไม่เท่ากันของ Cavity ที่แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงพื้นที่การหดตัว

เราสามารถสรุปได้ว่าถ้าชิ้นงานมีความหนาไม่เท่ากัน บริเวณที่มูหรือรอยเชื่อมของความหนาจะทำให้ชิ้นงานบริเวณนั้นเกิดการหดตัว ดังนั้นเราควรหลีกเลี่ยงและออกแบบให้ถูกต้องตามมาตรฐาน

3 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังแม่พิมพ์

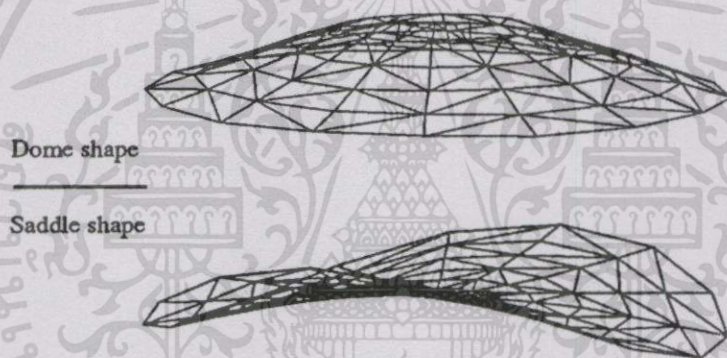
สาเหตุที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคืออุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างช่องความหนาของชิ้นงานพลาสติก โดยปกติจะเป็นไปได้ยากที่ผู้ออกแบบจะออกแบบแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งกระบวนการตั้งแต่กระบวนการเติมเต็มถึงการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งความแตกต่างกันของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความเค้นภายในชิ้นงาน (Internal Stress) และเมื่อค่าความเค้นไม่เท่ากันที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของผนังแม่พิมพ์จะทำให้เกิดโมเมนต์คด (Bending Moment) ผลลัพธ์ก็คือชิ้นงานจะเกิดการบิดงอหรือโก่งตัวในที่สุด ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผนังแม่พิมพ์คือ

- ระบบการหล่อเย็น (Cooling System) เช่น Circuit Line and Layout, ชนิดของสารหล่อเย็น, อัตราการไหลของสารหล่อเย็น และอุณหภูมิของสารหล่อเย็น ข้อสำคัญคือระบบจะต้องนำความร้อนออกจาก Cavity หรือชิ้นงานได้ดีทั้งสองด้าน เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุดขณะที่เย็นตัวลง

- ระบบแม่พิมพ์(Mold System) เช่น ค่าการนำความร้อนหรือชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ , แนวการไหล , รูปร่างของชิ้นงาน , ตำแหน่งของประตูทางเข้า (Position of Gate) , อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและบิดงอ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการหดตัวเป็นปัจจัยสำคัญต่อการบิดงอ ความต้านการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน (Part Stiffness) และการหดตัวจะถูกพิจารณา เช่น ถ้า Part Stiffnessกับการหดตัวที่มีค่ามากอาจไม่ทำให้ชิ้นงานบิดตัวแต่อาจทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานมาก และถ้า Part Stiffness ตกลงและการหดตัวยังเกิดขึ้น อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอและเกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานน้อย เราจะเสนอตัวอย่างผลกระทบของ Orientation และ Area Shrinkage ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงชนิดการบิดตัวของรูปทรงงาน

เราจะพิจารณารูปที่ 2.14 ได้ดังนี้ สำหรับรูปทรงโดมเกิดจากการหดตัวบริเวณด้านนอกของงานมากกว่าด้านในหมายความว่าขนาดในแนวรัศมีไม่เปลี่ยนแปลงขณะที่ในแนวเส้นรอบวงเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลเนื่องจาก Orientation หรือการหดตัวที่ไม่เท่ากันในแนวขนานและตั้งฉากกับการไหล กำหนดให้ในแนวการฉีดคือแนวรัศมี ถ้าการหดตัวในแนวตั้งฉากมากกว่าแนวขนานก็จะรูปทรงโดม

รูปทรงหลังเต่า (Saddle)เกิดจากการหดตัวบริเวณด้านในมากกว่าด้านนอกหรือการหดตัวในแนว ในแนวตั้งฉากน้อยกว่าแนวขนาน

โดยทั่วไปชิ้นงานจะมีรูปร่างซับซ้อนและยากต่อการพิจารณาการบิดตัว แต่เราก็สามารถพิจารณาการบิดตัวได้จากค่าการหดตัวในแนวขนานและตั้งฉากกับการไหล ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อลดปัญหาการบิดตัวที่อาจจะเกิดขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานของการไหล

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงคุณสมบัติของของไหลที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะความเค้น, อัตราเฉือนและชนิดของของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

3.1 ความเค้นและความเครียดในของของไหล

3.1.1 ความเค้นในของของไหล

การไหลของพลาสติกไหลในแม่พิมพ์ฉีดจะทำให้เกิดแรงที่กระทำกับเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ เราจะพบว่ามีความหลายทฤษฎีที่อธิบายการถ่ายเทของแรงขณะเกิดการไหลและความเค้นจะเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกใช้ในการพิจารณาผลกระทบของแรงบนชิ้นงานภายในวัสดุ

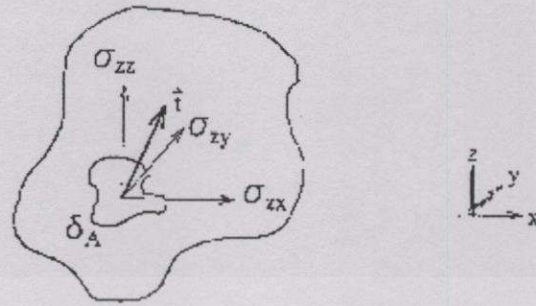
ความเค้นเป็นพารามิเตอร์ที่วัดการถ่ายของแรงเมื่อแรงกระทำกับวัตถุ ซึ่งวัสดุจะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยทั่วไปแรงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงที่กระทำกับวัตถุทั้งก้อนและกระทำที่พื้นผิวของวัตถุ (Body Forced) คือแรงที่กระทำกับมวลภายในวัตถุและมีหน่วยคือแรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือแรงต่อหนึ่งหน่วยมวล ตัวอย่างทั่วไปคือความโน้มถ่วง (Gravity) Surface Traction คือแรงที่กระทำกับผิวของวัตถุมีหน่วยคือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

3.1.1.1 ความเค้นบนพื้นผิวสมมุติ

เราจะกำหนดนิยามของความเค้นซึ่งจะพิจารณาจากแรงที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกของวัตถุ สมมติว่าแรง δF กระทำกับพื้นที่เล็ก ๆ δA ของผิว ดังนั้น Stress Tensor \vec{T} คือแรงที่กระทำกับจุดภายนอกของวัตถุซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงต่อพื้นที่ เมื่อกำหนดให้พื้นที่มีค่าน้อยมากหรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์คือ

$$\vec{T} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A} \quad (3.1)$$

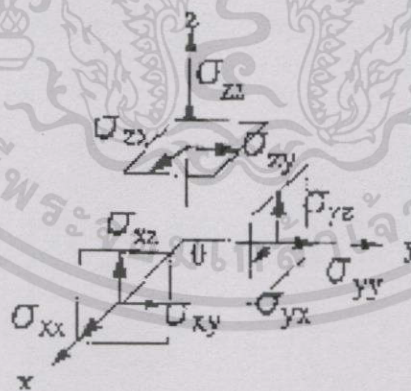
จากสมการจะพบว่า Stress Tensor \vec{T} จะอธิบายแรงที่กระทำ ณ จุดใดๆบนผิวนอกของวัตถุ ซึ่งอ้างอิงจากพิกัด x, y และ z สมมติว่า Stress Tensor มีทิศทางตั้งฉากกับผิวสมมุติ ณ จุดหนึ่งบนวัตถุ ซึ่งเราสามารถแตก Stress Tensor ให้อยู่ในทิศทางตามระบบพิกัดฉากได้ดังนี้คือในทิศทางแกน z จะได้ t_z , ทิศทาง x และ y, t_x และ t_y , ตามลำดับ (ดูจากรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 มิติจำลองของ Stress Vector

3.1.1.2 ความเค้นที่จุดภายในวัตถุ

เนื่องจากการหาค่าความเค้นของ Stress Tensor ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นได้ทั้งหมด เราจึงต้องใช้แบบจำลองลูกบาศก์หนึ่งหน่วยในการแสดงค่าความเค้นชนิดต่างๆ ดังนั้นเราสามารถหาค่าความเค้นของแต่ละด้านได้ แต่ละด้านจะต้องการความเค้น 3 ค่า ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 1 ค่าและความเค้นเฉือน 2 ค่า รวมทั้งหมด 9 เช่นในทิศทาง z σ_{zz} เรียกว่า Normal Stress ขณะที่ σ_{zx} และ σ_{zy} เรียกว่า Shear Stress (ความเค้นเฉือน) ค่าแสดงดังรูปที่ (3.2) [5]



รูปที่ 3.2 แสดงความเค้นของผิว 3 ด้าน ซึ่งมีแรงกระทำที่จุด O เป็นจุดภายในวัตถุ

เราจะใช้เทคนิคของเมตริกในการแสดงความเค้น 9 ค่า ที่เกิดจากแรงกระทำที่จุด O ในรูปแบบ Second Order Tensor เรียกว่า Stress Tensor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ $\underline{\sigma}$

$$\underline{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

สังเกตว่าเมตริกของความเค้นจะสมมาตร นั่นคือ $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$

เมื่อเราทราบค่า Stress Tensor, Stress Vector และ \vec{n} เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับด้านที่พิจารณา เรากำหนด Stress Tensor ในรูปแบบทั่วไปได้คือ

$$\vec{i} = [\underline{\sigma} \cdot \vec{n}] \quad (3.3)$$

ซึ่ง Dot นี้ให้เห็น Vector Tensor Product

เราสามารถกำหนดเครื่องหมายสำหรับทิศทางของค่าความเค้น ได้ดังนี้คือ ความเค้นที่มีเครื่องหมายเป็นบวกคือความเค้นดึง ค่าลบคือความเค้นกด

3.1.1.3 ความดันสถิตย

ความเค้นในของเหลวเรียกว่าความดันสถิตย (Hydrostatic Pressure) คือแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ภายในของของเหลว โดยทั่วไปของเหลวทุกชนิดจะมีความสัมพันธ์ของความเค้นตามสมการดังนี้

$$\underline{\sigma} = -p\underline{I} + \underline{\tau} \quad (3.4)$$

เมื่อ \underline{I} คือ Unit Tensor และ $\underline{\tau}$ คือ ความเค้นหนืด (Viscous stress tensor) P คือความดันสำหรับการไหลแบบมีความหนืด ความเค้นจะมีความสัมพันธ์กับ Thermodynamics Pressure ดังนั้นความดันจะถูกกำหนดโดยสมการของสภาวะความสัมพันธ์ระหว่างความดัน , ปริมาตร และอุณหภูมิ รายละเอียดจะกล่าวถึงใน [6]

3.1.2 Rate of Strain Tensor

โดยทั่วไปการไหลของของไหลจะรวมถึงการเคลื่อนที่ , การเสียรูปและการหมุน ส่วนการเคลื่อนที่ของจุดในของของไหลจะถูกกำหนดโดยเวกเตอร์ความเร็ว \vec{v} การเสียรูปและการหมุนของของไหลจะขึ้นอยู่กับผลต่างของความเร็ว $\nabla \vec{v}$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็ว (Rate of Strain) หรือการเสียรูปของของไหลใช้สัญลักษณ์แทนคือ $\underline{\dot{\gamma}}$

$$\underline{\dot{\gamma}} = \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \quad (3.5)$$

Dagger ซึ่งให้เห็นถึง Transposed Matrix [7]

สำหรับระบบพิกัดฉาก, $\underline{\dot{\gamma}}$ อาจถูกเขียนในรูปของเมตริก ดังนี้

$$\underline{\dot{\gamma}} = \begin{bmatrix} 2(\partial v_x / \partial x) & (\partial v_y / \partial x + \partial v_x / \partial y) & (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x) \\ (\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x) & 2(\partial v_y / \partial y) & (\partial v_y / \partial z + \partial v_z / \partial y) \\ (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x) & (\partial v_y / \partial z + \partial v_z / \partial y) & 2(\partial v_z / \partial z) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Tensor นี้จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งคล้ายกับ stress tensor

3.1.3 ของไหลกักตัวได้และกักตัวไม่ได้

จากกฎทรงมวล จะได้สมการ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \vec{v}) \quad (3.7)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของเหลว, \vec{v} คือความเร็วของของไหล สมการนี้ถูกเรียกว่าสมการ Continuity สำหรับของไหลชนิดกักตัวไม่ได้ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ สมการ Continuity จะกลายเป็น

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.8)$$

3.1.4 ของไหลชนิด Newtonian and Non-Newtonian

ของไหลทุกชนิดจำเป็นต้องมีความสัมพันธ์ระหว่าง Viscous Stress Tensor $\underline{\tau}$ กับ Rate of Strain Tensor $\underline{\dot{\gamma}}$ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกเรียกว่า Constitutive Equation

สมการ Constitutive ที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับ Newtonian Fluids [8] คือ

$$\underline{\tau} = \mu \underline{\dot{\gamma}} - \left(\frac{2}{3} \mu - \mu_d \right) (\nabla \cdot \vec{v}) \underline{I} \quad (3.9)$$

ซึ่ง μ คือความหนืด และ μ_d คือ Dilatational Viscosity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ Dilatational Viscosity จะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับก๊าซในอุดมคติและของไหลที่กักอัดตัว
ได้

สมการ Constitutive สำหรับ Newtonian Fluids จะกลายมาเป็น

$$\begin{aligned}\underline{\tau} &= \mu \underline{\dot{\gamma}} - \frac{3}{2} \mu (\nabla \cdot \underline{v}) \underline{I} \\ &= \mu \left(\underline{\dot{\gamma}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \underline{v}) \underline{I} \right) \\ &= \mu \underline{\dot{\gamma}'}\end{aligned}\quad (3.10)$$

เมื่อ $\underline{\dot{\gamma}'}$ เรียกว่า Deviatoric Rate of Strain Tensor และกำหนดได้ ดังสมการ

$$\underline{\dot{\gamma}'} = \underline{\dot{\gamma}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \underline{v}) \underline{I} \quad (3.11)$$

สำหรับของไหลที่กักอัดตัวไม่ได้ สมการ Deviatoric Rate of Strain คือสมการ Rate of Strain
Tensor ในกรณีนี้จากสมการ (3.10) จะได้

$$\underline{\tau} = \mu \underline{\dot{\gamma}} \quad (3.12)$$

พิจารณาสมการ (3.12) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Viscous Stress Tensor กับ Rate of
Strain Tensor สำหรับ Incompressible Newtonian Fluid ซึ่ง Viscous Stress Tensor มีความสัมพันธ์เชิง
เส้นกับ Rate of Strain Tensor สังเกตว่าความหนืดของของไหลจะคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งหรือแปรผันตาม
อุณหภูมิของของไหล สำหรับสมการ (3.12) จะไม่เรียกว่า Non-Newtonian แต่เนื่องจากโพลิเมอร์มี
พฤติกรรมแบบ Non-Newtonian และ Viscoelastic สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมก็ไม่รวมผล
กระทบของ Viscoelastic

การทำนายพฤติกรรมการไหลของโพลิเมอร์เหลว เราจึงต้องปรับปรุงสมการ(3.10) โดยการทำ
การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราความเร็วแล้วนำมาสร้างกราฟและใช้
เทคนิคการประมาณค่าเพื่อสร้างสมการหาค่าความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\underline{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \underline{\dot{\gamma}'} \quad (3.13)$$

ซึ่ง $\eta(\dot{\gamma})$ คือฟังก์ชันความหนืด เราเรียกง่าย ๆ ว่า ความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.13) จะถูกใช้เป็นแบบจำลองการไหลของโพลิเมอร์เหลวโดยที่ความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน

แทนสมการ Newtonian Fluids (3.13) ใน สมการ(3.4) เราจะได้ Stress Tensor ที่มีผลกระทบของ Viscous Shear Stress ดังนี้

$$\begin{aligned}\underline{\sigma} &= -p\underline{I} + \underline{\tau} \\ &= -p\underline{I} + \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}'\end{aligned}\quad (3.14)$$

สำหรับกรณีของไหลที่อัดไม่ได้ เราจะใช้หลักการของ Newtonian Fluids แทนค่า Deviatoric Rate ของ Strain Tensor กับ Rate of Strain Tensor เราจะได้

$$\begin{aligned}\underline{\sigma} &= -p\underline{I} + \underline{\tau} \\ &= -p\underline{I} + \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}'\end{aligned}\quad (3.15)$$

3.1.5 อัตราเฉือนและการเลือกฟังก์ชันความหนืด

ในหัวข้อก่อนหน้านี เราได้กล่าวถึงฟังก์ชันของความหนืด $\eta(\dot{\gamma})$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสียรูปของของไหล ดังนั้นเราสามารถกำหนดความหนืดให้ขึ้นอยู่กับ Deviatoric Rate ของ Strain Tensor $\dot{\gamma}'$ แต่ $\dot{\gamma}'$ จะขึ้นอยู่กับระบบพิกัดฉากที่ใช้ สำหรับ Deviatoric Rate of Strain Tensor เราจะใช้เทคนิคของ Tensor โดยใช้ Invariants กำหนดความสัมพันธ์ได้ดังนี้อันดับที่หนึ่ง,สองและสามของ Invariants ใช้สัญลักษณ์แทนโดย I, II และ III ตามลำดับ [7]

$$\begin{aligned}I_{\dot{\gamma}'} &= \sum_i \dot{\gamma}'_{ii} \\ II_{\dot{\gamma}'} &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{ji} \\ III_{\dot{\gamma}'} &= \sum_i \sum_j \sum_k \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{jk} \dot{\gamma}'_{ki}\end{aligned}\quad (3.16)$$

จากสมการ (3.6) และ (3.11) เราพบว่า First Invariant เท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned}I_{\dot{\gamma}'} &= 2\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) - 2(\nabla \cdot \vec{v}) \\ &= 0\end{aligned}\quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เราสามารถแสดงว่า Third Invariant เท่ากับศูนย์ [8] สำหรับชนิดการไหลแบบมีแรงเฉือนและจะถูกใช้ในการจำลองการฉีดพลาสติก เราจะกำหนดให้ความหนืดขึ้นอยู่กับ $II_{\dot{\gamma}}$ สำหรับ Tensor ที่สมมาตร Second Invariant จะสัมพันธ์กับขนาดของ Tensor Double Dot (หรือ Scalar Product) [7] ของสอง Tensor \underline{a} และ \underline{b} ถูกกำหนดดังนี้

$$\underline{a} : \underline{b} = \sum_i \sum_j a_{ij} b_{ji} \quad (3.18)$$

ขนาดของ Tensor $\underline{\dot{\gamma}'}$ ใช้สัญลักษณ์แทนโดย $\dot{\gamma}'$ กำหนดได้คือ

$$\dot{\gamma}' = \sqrt{\frac{1}{2} \underline{\dot{\gamma}'} : \underline{\dot{\gamma}'}} \quad (3.19)$$

ทั้ง Deviatoric และ Strain Rate Tensors จะสมมาตร ดังนั้น $\dot{\gamma}'_{ij} = \dot{\gamma}'_{ji}$ จากเหตุผลนี้เราจะกำหนด Second Invariant และ Double Dot Product ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} II_{\dot{\gamma}'} &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{ji} \\ &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{ij} \\ &= \underline{\dot{\gamma}'} : \underline{\dot{\gamma}'} \\ &= 2\dot{\gamma}'^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

ปริมาณ $\dot{\gamma}'^2$ ถูกกำหนดให้เป็นขนาดของ Deviatoric Rate of Strain Tensor โดยทั่วไป $\dot{\gamma}'^2$ คืออัตราเฉือน (Shear Rate) จัดสมการใหม่ เราจะได้

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}' &= \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}'}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} \underline{\dot{\gamma}'} : \underline{\dot{\gamma}'}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

เราจะกำหนดอัตราเฉือนในพจน์ของขนาดของ Deviatoric Rate of Strain Tensor และความสัมพันธ์ที่คล้ายกันสำหรับ Rate of Strain Tensor อาจถูกใช้ในกรณีของของไหลกืดอัดตัวไม่ได้

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\underline{\gamma}} : \dot{\underline{\gamma}}}\end{aligned}\quad (3.22)$$

ฟังก์ชันของความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนถูกกำหนดข้างบน หัวข้อนี้เราจะพิจารณาจากอัตราเฉือนในระบบพิกัดฉากสำหรับ Simple Shear Flow ซึ่งจะใช้อธิบายการไหลของโพลิเมอร์เหลวในช่องของแม่พิมพ์

เราจะใช้ระบบพิกัดฉากในการกำหนดการไหลแบบสภาวะคงตัวในระนาบ $x - y$ จากสมการ (3.6) พบว่ามีรูปแบบเมตริกของ Rate of strain tensor คือ

$$\dot{\underline{\gamma}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \partial v_x / \partial z \\ 0 & 0 & \partial v_y / \partial z \\ \partial v_x / \partial z & \partial v_y / \partial z & 0 \end{bmatrix}\quad (3.23)$$

เมื่อเราสมมติการไหลเป็นแบบสภาวะคงตัว $\nabla \cdot \underline{\mathbf{v}} = 0$ และ Deviatoric Rate of strain และ Rate of Strain คือ

$$\dot{\underline{\gamma}}' = \dot{\underline{\gamma}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \partial v_x / \partial z \\ 0 & 0 & \partial v_y / \partial z \\ \partial v_x / \partial z & \partial v_y / \partial z & 0 \end{bmatrix}\quad (3.24)$$

Second Invariant คือ

$$\begin{aligned}II_{\dot{\gamma}} &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ji} \\ &= 2\dot{\gamma}_{xz} \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{zx} + 2\dot{\gamma}_{zy} \dot{\gamma}_{yz} \\ &= 2\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)^2\end{aligned}\quad (3.25)$$

ดังนั้นอัตราเฉือนจะมีความสัมพันธ์กับ Second Invariant ตาม

$$\dot{\gamma}' = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}}\quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบสภาวะคงตัวในระนาบ $x - y$ อัตราเฉือนคือ

$$\begin{aligned}\dot{\gamma}' &= \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)^2}\end{aligned}\quad (3.27)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สมการควบคุมการไหล

เราจะกล่าวถึงสมการควบคุมการไหลของของไหลชนิดกอัดตัวได้ ซึ่งจะอธิบายของไหลแบบมีความหนืด สมการนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับการไหลของโพลิเมอร์เหลวโดยใช้หลักการของกฎทรงมวล, โมเมนตัม และพลังงาน

3.2.1 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์

ในการอธิบายสมการควบคุมของของไหล (ของโพลิเมอร์เหลว) เราสมมติว่าของเหลวคือ Continuum หมายความว่าเราจะไม่คิดผลกระทบของโครงสร้างโมเลกุลแต่เราสามารถกำหนดลักษณะทางกายภาพของวัสดุได้ เช่น ความเร็วและความหนาแน่น นอกจากนี้เรายังสมมติให้ค่าของตัวแปรเปลี่ยนแปลงแบบคงที่และการใช้เทคนิคการดิฟเฟอเรนเชียลจึงสามารถนำมาใช้ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเราจึงอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลโดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะถูกใช้ในการอธิบายพฤติกรรมต่างๆ บทถัดไปและเป็นการอธิบายคุณสมบัติและการเคลื่อนที่ของวัสดุ เช่น ทฤษฎีของ Reynold ' s Transport และ the Divergence Theorem of Gauss

3.2.1.1 อนุพันธ์ของวัสดุ

คุณสมบัติบางชนิดของของไหลจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหลเราจึงต้องเทียบคุณสมบัติของวัสดุกับเวลา เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง สำหรับความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง และเวลา ในระบบพิกัดฉากเราสามารถเขียนได้ว่า

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (3.28)$$

ซึ่ง x, y และ z คือพิกัดของของไหล

เราจะใช้กฎลูกโซ่สำหรับการ Differentiation เราจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของความหนาแน่นเมื่อเทียบกับเวลา กำหนดได้โดย

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} &= \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ &= \frac{\partial \rho}{\partial x} \dot{x}(t) + \frac{\partial \rho}{\partial y} \dot{y}(t) + \frac{\partial \rho}{\partial z} \dot{z}(t) + \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ &= \vec{v} \cdot \nabla \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.29)$$

เมื่อ $\vec{v} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$

กำหนดให้ฟังก์ชันทั่วไปเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา $f(x, y, z, t)$ เราจะพบว่า

$$\frac{df}{dt} \vec{v} = (\vec{v} \cdot \nabla f) + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (3.30)$$

เขียนในรูปของ Notation

$$\frac{D}{Dt} = \vec{v} \cdot \nabla + \frac{\partial}{\partial t} \quad (3.31)$$

เราจะกำหนดให้ Df/Dt เป็นอนุพันธ์ของวัสดุของฟังก์ชัน f โดยทั่วไป Df/Dt จะรวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคของของไหลเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นเราสามารถใส่สมการอนุพันธ์ของวัสดุในปริมาณที่เป็นสเกลลาร์, เวกเตอร์ หรือ Tensor ซึ่งเปลี่ยนแปลงทั้งตำแหน่งและเวลา ตัวอย่างเช่น ความเร็ว \vec{v} กำหนดในรูปของ Tensor คือ

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = [\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}] + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (3.32)$$

อนุพันธ์เชิงวัสดุของคุณสมบัติ B เขียนในรูปของ Tensor คือ

$$\frac{DB}{Dt} = [\vec{v} \cdot \nabla B] + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.33)$$

3.2.1.2 ทฤษฎี Gauss's Divergence

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับพื้นผิวรวมทั้งหมด กำหนดโดย

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{f}) dV = \int_S (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \quad (3.34)$$

เมื่อ V คือพื้นที่ที่ถูกกำหนด, S คือขอบเขตของ V , \vec{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตั้งฉากกับ S และ \vec{f} คือเวกเตอร์ฟังก์ชัน [9]

เราจะใช้มิติที่ต่ำกว่าโดยจะใช้ dA แทน dV ดังนั้น Divergence Theorem ในระนาบ จักรูปใหม่ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_V (\nabla \cdot f) dA = \int_S (\vec{f} \cdot \vec{n}) dS \quad (3.35)$$

เมื่อ V คือพื้นที่ในระนาบ, S คือเงื่อนไขที่ขอบของ A , \vec{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยมีทิศทางตั้งฉากกับ S และ \vec{f} คือฟังก์ชันเวกเตอร์

3.2.1.3 ทฤษฎี Reynolds's Transport

เราจะกล่าวถึงที่มาของสมการควบคุม โดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตฟังก์ชันเมื่อเทียบกับตำแหน่งและเวลา $f(\vec{x}, t)$. ซึ่งจะครอบคลุมปริมาตรของของไหลทั้งหมด กำหนดปริมาตรของวัสดุ คือ $V(t)$ ดังนั้นเราจะได้

$$F(t) = \int_{V(t)} f(\vec{x}, t) dV \quad (3.36)$$

กำหนดให้ F เป็นฟังก์ชันของเวลา ทฤษฎีของ Reynold's Transport [10] สามารถจะคำนวณ $F(t)$ เทียบกับเวลาได้และสังเกตว่า $V(t)$ จะแปรผันตามเวลาและการเคลื่อนที่ของของไหล เราจะเขียนสมการใหม่ได้คือ

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} f(\vec{x}, t) dV = \int_{V(t)} \left\{ \frac{\partial f}{\partial t} + (\nabla \cdot f\vec{v}) \right\} dV \quad (3.37)$$

เมื่อ \vec{v} คือความเร็วของอนุภาค

เราจะประยุกต์ทฤษฎี Divergence ทางด้านขวาของสมการ (3.37) ดังนั้นสมการสมดุจากทฤษฎี Transport คือ

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} f(\vec{x}, t) dV = \int_{V(t)} \frac{\partial f}{\partial t} dV + \int_{S(t)} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (3.38)$$

เมื่อ $S(t)$ คือพื้นผิวของ $V(t)$ และ \vec{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตั้งฉากกับ $S(t)$

สมการ (3.38) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของ $f(\vec{x}, t)$. เท่ากับอินทิเกรตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $f(\vec{x}, t)$. ภายใต้ออบเขตที่กำหนดบวกกับผลกระทบของการไหลของ $f(\vec{x}, t)$. ทั้งหมด $S(t)$

3.2.2 กฎการอนุรักษ์มวล

กำหนดให้ $V(t)$ คือปริมาตรของของไหลซึ่งไม่มีแหล่งพลังงานภายใน ดังนั้นการอนุรักษ์มวลหมายความว่า มวลที่บรรจุในภาชนะปิดปริมาตร $V(t)$ จะไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาไม่คงที่ มวล m ภายในปริมาตร $V(t)$ กำหนดให้โดย

$$m = \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV \quad (3.39)$$

เมื่อ $\rho(\vec{x}, t)$ คือความหนาแน่นของของไหล ณ ตำแหน่ง \vec{x} และ เวลา t

กฎทรงมวลจะชี้ให้เห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลเทียบกับกับเวลา จะเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{dm}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV \end{aligned} \quad (3.40)$$

สังเกตว่าเราจะประยุกต์ทฤษฎีอนุพันธ์ของวัสดุกับสมการ เพราะปริมาตร $V(t)$ เคลื่อนที่จะเปลี่ยนแปลงตามการไหลของของไหล

เราจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ Reynolds's Transport เข้าทางด้านขวามือของสมการ เราจะได้

$$0 = \int_{V(t)} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) \right\} dV \quad (3.41)$$

เมื่อ $V(t)$ คือตัวแปรอิสระ (อินทิเกรต แล้วเท่ากับศูนย์)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad (3.42)$$

สมการนี้เรียกว่าสมการ Continuity สำหรับของไหลที่ก่อดัดตัวได้

สำหรับของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ จะมีความหนาแน่นคงที่ดังนั้นสมการ (3.42) กลายเป็น

$$(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (3.43)$$

เราสามารถจะแสดงสมการ Continuity ในพจน์ของอนุพันธ์เชิงวัสดุ ได้จากการขยายสมการ (3.42) จะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) + (\vec{v} \cdot \nabla \rho) = 0 \quad (3.43)$$

จัดรูปสมการใหม่เราอาจเขียนได้ว่า

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{v}) \quad (3.44)$$

3.2.3 การอนุรักษ์โมเมนตัม

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมกล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคของของไหลในปริมาตรของวัสดุ $V(t)$ เท่ากับผลรวมของแรงภายนอกกระทำกับ $V(t)$

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{v} dV = \sum \vec{F}_{ext} \quad (3.45)$$

แรงภายนอกที่กระทำกับปริมาตร V รวมทั้งแรงภายในวัตถุ (แรงโน้มถ่วง) และแรงที่กระทำกับผิวภายนอกของวัสดุ $F\vec{b}$ กำหนดโดย

$$F\vec{b} = \int_{V(t)} \rho \vec{g} dV \quad (3.46)$$

เมื่อ \vec{g} คือแรงรวมภายในวัตถุต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งปกติ \vec{g} กล่าวถึงผลกระทบของแรงโน้มถ่วง ส่วนแรงที่กระทำกับพื้นผิวของวัสดุ dS โดยขอบเขตของพื้นผิว $V(t)$ กำหนดโดย $\vec{T} dS$ เมื่อ \vec{T} คือ Stress Tensor ดังนั้นผลรวมของแรงคือ

$$\begin{aligned} \vec{F}_t &= \int_{S(t)} \vec{T} dS \\ &= \int_{S(t)} \underline{\sigma} \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (3.47)$$

เมื่อ $S(t)$ คือเงื่อนไขที่ขอบของ $V(t)$, $\underline{\sigma}$ คือ Stress Tensor และ \vec{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตั้งฉากกับ $S(t)$ จากการประยุกต์ทฤษฎี Divergence เราจะได้

$$\vec{F}_t = \int_{V(t)} [\nabla \cdot \underline{\sigma}] dV \quad (3.48)$$

จากสมการ (3.46) และ (3.48) เราจะได้ผลรวมของแรงภายนอกคือ

$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_{ext} &= \vec{F}_b + \vec{F}_t \\ &= \int_{V(t)} \rho \vec{g} dV + \int_{V(t)} [\nabla \cdot \underline{\sigma}] dV \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV &= \int_V \rho \vec{g} dV + \int_V [\nabla \cdot \underline{\sigma}] dV \end{aligned} \quad (3.49)$$

ประยุกต์ทฤษฎี Transport ทางค้ำซ้ายของสมการ เราจะได้

$$\int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + [\nabla \cdot \{\rho \vec{v} \vec{v}\}] \right\} dV = \int_V \rho \vec{g} dV + \int_V [\nabla \cdot \underline{\sigma}] dV \quad (3.50)$$

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = \rho \vec{g} + [\nabla \cdot \underline{\sigma}] - [\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})] \quad (3.51)$$

3.2.4 กฎการอนุรักษ์พลังงาน

ผลรวมของพลังงานรวมภายในของของไหลในปริมาตรของวัสดุ $V(t)$ คือผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานภายใน ถ้า \hat{U} คือพลังงานภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นผลรวมของพลังงานรวมกำหนดโดย

$$\int_{V(t)} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + \hat{U} \right) dV = \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho v^2 dV + \int_{V(t)} \rho \hat{U} dV \quad (3.52)$$

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในปริมาตร $V(t)$ ภายใต้เงื่อนไขที่ขอบ $S(t)$ จะเท่ากับงานที่ทำลกับปริมาตรความร้อนที่ผ่าน $S(t)$

อัตราการเพิ่มขึ้นของงานที่กระทำโดยแรงที่กระทำกับพื้นผิวภายนอก กำหนดได้ดังนี้

$$\int_{S(t)} (\vec{v} \cdot \vec{t}) dS = \int_{S(t)} (\vec{v} \cdot [\underline{\sigma} \cdot \vec{n}]) dS \quad (3.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะใช้ Stress Tensor $\vec{\tau}$ และประยุกต์ทฤษฎี Divergence ที่ด้านขวามือของสมการ เราจะได้

$$\begin{aligned} \int_{S(t)} (\vec{v} \cdot \vec{\tau}) dS &= \int_{S(t)} (\vec{v} \cdot [\underline{\sigma} \cdot \vec{n}]) dS \\ &= \int_{V(t)} (\nabla \cdot [\vec{v} \cdot \underline{\sigma}]) dV \end{aligned} \quad (3.54)$$

ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงกำหนดเป็น \vec{g} . งานที่ได้โดยแรงโน้มถ่วงกำหนดเป็น

$$\int_{V(t)} \rho(\vec{g} \cdot \vec{v}) dV \quad (3.55)$$

ผลรวมของงานที่ได้เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกของวัตถุคือผลรวมของสมการ (3.54) และ (3.55) เราจะพิจารณาปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นผิว $S(t)$ กำหนดให้ \vec{q} คือปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ อัตราการสูญเสียความร้อนจากพื้นผิว $S(t)$ คือ

$$- \int_{S(t)} (\vec{q} \cdot \vec{n}) dS = - \int_{V(t)} (\nabla \cdot \vec{q}) dV \quad (3.56)$$

เราจะใช้ทฤษฎี Divergence เปลี่ยนพื้นผิวเป็นปริมาตรและรวมสมการ (3.54), (3.55), (3.56) และการเพิ่มขึ้นของพลังงาน ใช้สมการ (3.52)

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} \rho v^2 dV}_{(i)} + \underbrace{\frac{d}{dt} \int_V \rho \hat{U} dV}_{(ii)} = \underbrace{\int_V (\nabla \cdot [\vec{v} \cdot \underline{\sigma}]) dV}_{(iii)} + \underbrace{\int_V \rho(\vec{g} \cdot \vec{v}) dV}_{(iv)} - \underbrace{\int_V (\nabla \cdot \vec{q}) dV}_{(v)} \quad (3.57)$$

เราจะพิจารณาความหมายของสมการ (3.57) สำหรับแต่ละพจน์ของสมการดังนี้

- (i) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์
- (ii) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน
- (iii) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของงานภายในวัสดุโดยแรงหนืด
- (iv) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของงานภายในวัสดุโดยแรงโน้มถ่วง
- (v) คือการสูญเสียความร้อนภายในวัสดุเนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิว

เราสามารถแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์ คือ

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho v^2 dV = \int_{V(t)} \rho (\underline{g} \cdot \underline{v}) dV - \int_{V(t)} (\underline{\sigma} : \{\nabla \underline{v}\}) dV + \int_{V(t)} (\nabla \cdot [\underline{v} \cdot \underline{\sigma}]) dV \quad (3.58)$$

แทนผลลัพธ์ลงในสมการ (4.32) จะได้

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho v^2 dV = \int_{V(t)} (\underline{\sigma} : \{\nabla \underline{v}\}) dV - \int_{V(t)} (\nabla \cdot \underline{q}) dV \quad (3.59)$$

ประยุกต์กับทฤษฎี Transport เข้ากับทางด้านซ้ายมือของสมการ เราจะได้

$$\int_{V(t)} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + (\nabla \cdot \rho \hat{U} \underline{v}) \right) dV = \int_{V(t)} (\underline{\sigma} : \{\nabla \underline{v}\}) dV - \int_{V(t)} (\nabla \cdot \underline{q}) dV \quad (3.60)$$

กำหนดให้ $V(t)$ คือตัวแปรอิสระ เราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + (\nabla \cdot \rho \hat{U} \underline{v}) = (\underline{\sigma} : \{\nabla \underline{v}\}) - (\nabla \cdot \underline{q}) \quad (3.61)$$

ขยายสมการด้านซ้ายมือ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + (\nabla \cdot \rho \hat{U} \underline{v}) &= \frac{\partial}{\partial t} [\rho \hat{U}] + \rho \hat{U} (\nabla \cdot \underline{v}) + (\underline{v} \cdot \nabla \rho \hat{U}) \\ &= \frac{D}{Dt} (\rho \hat{U}) + \rho \hat{U} (\nabla \cdot \underline{v}) \\ &= \rho \frac{D\hat{U}}{Dt} + \hat{U} \frac{D\rho}{Dt} + \rho \hat{U} (\nabla \cdot \underline{v}) \\ &= \rho \frac{D\hat{U}}{Dt} \end{aligned} \quad (3.62)$$

ให้สมการ (3.62) เท่ากับสมการ (3.61) จัดรูปใหม่ เราจะได้

$$= \rho \frac{D\hat{U}}{Dt} = (\underline{\sigma} : \{\nabla \underline{v}\}) - (\nabla \cdot \underline{q}) \quad (3.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.1 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับอุณหภูมิ

โดยทั่วไปเราจะเขียนสมการ (3.63) ในรูปของอุณหภูมิ, T มากกว่าในรูปของพลังงานภายใน U . ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงพื้นฐานความสัมพันธ์ของลักษณะทางเทอร์โมไดนามิกส์ แต่จะไม่ลงรายละเอียดมากนัก

$$\hat{H} = \hat{U} + p\hat{V} \quad (3.64)$$

เมื่อ p คือความดัน และ \hat{V} คือปริมาตรจำเพาะ \hat{H} คือเอนทาลปี การรวมกันของกฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ของพลศาสตร์ความร้อน เขียนได้ตาม[SS]

$$d\hat{S} = \frac{1}{T}(d\hat{H} - \hat{V}dp) \quad (3.65)$$

เมื่อ \hat{S} คือเอนโทรปีจำเพาะ เราจะสมมติว่า \hat{H} คือฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิ, นั่นคือ $\hat{H} = \hat{H}(p, T)$ ดังนั้น

$$d\hat{H} = \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T}\right)_p dT \quad (3.66)$$

แทนผลลัพธ์ของสมการ(3.66)ในสมการ (3.65) เราจะได้

$$d\hat{S} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p}\right)_T - \hat{V} \right] dp + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T}\right)_p dT \quad (3.67)$$

กำหนดให้ \hat{S} เป็นฟังก์ชันของ p และ T จะได้

$$d\hat{S} = \left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial T}\right)_p dT \quad (3.68)$$

กำหนดให้สมการ (3.67) และ (3.68) เท่ากัน เราจะได้

$$\left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p}\right)_T - \hat{V} \right] \quad (3.69)$$

และ

$$\left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p}\right)_p \quad (3.70)$$

เราจะจัดสมการ (3.68) ให้เทียบกับ T ในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียล จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \hat{S}}{\partial T \partial p} &= \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial p} \right)_T \right]_p \\ &= -\frac{1}{T^2} \left[\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p} \right)_T - \hat{V} \right] + \frac{1}{T} \left[\left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p} \right)_T \right]_p - \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \right] \\ &= -\frac{1}{T^2} \left[\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p} \right)_T - \hat{V} \right] + \frac{1}{T} \left[\frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial T \partial p} - \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \right] \end{aligned} \quad (3.71)$$

เราจะจัดสมการ (3.70) ให้เทียบกับ P ในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียล จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{S}}{\partial p \partial T} &= \left[\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial \hat{S}}{\partial T} \right)_p \right]_T \\ &= \frac{1}{T^2} \left[\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_p \right]_T \\ &= \frac{1}{T} \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial T \partial p} \end{aligned} \quad (3.72)$$

เพราะ

$$= \frac{\partial^2 \hat{S}}{\partial T \partial p} = \frac{\partial^2 \hat{S}}{\partial p \partial T} \quad (3.73)$$

ให้สมการ (3.71) เท่ากับ (3.72) ดังนั้นจะได้

$$\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial p} \right)_T = \hat{V} - T \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \quad (3.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนผลลัพธ์ที่ได้ในสมการ (3.65) เราจะได้

$$d\hat{H} = \left(\hat{V} - T \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \right) dp + \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_p dT \quad (3.75)$$

เราจะจัดสมการ(3.75)ในรูปแบบของ Simpler Form โดยจะแสดงความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุภายใต้ความดันคงที่ C_p และสัมประสิทธิ์ของการขยายตัว β ในรูปแบบอนุพันธ์ส่วนย่อย

$$C_p = \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_p \quad \beta = \frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \quad (3.76)$$

ดังนั้นสมการ (3.75) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$d\hat{H} = (1 - \beta T) \hat{V} dp + c_p dT \quad (3.77)$$

จากสมการ (3.63) เราจะพบว่า

$$d\hat{H} = d\hat{U} + \hat{V} dp + p d\hat{V} \quad (3.78)$$

แทนค่า $d\hat{H}$, และจัดรูปสมการใหม่สำหรับ $d\hat{V}$ เราจะได้

$$\begin{aligned} d\hat{U} &= (1 - \beta T) \hat{V} dp + c_p dT - p d\hat{V} - \hat{V} dp \\ &= c_p dT - \beta T \hat{V} dp - p d\hat{V} \end{aligned} \quad (3.79)$$

อนุพันธ์ของพลังงานกับเวลา กำหนดโดย

$$\frac{d\hat{U}}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \beta T \hat{V} \frac{dp}{dt} - p \frac{d\hat{V}}{dt} \quad (3.80)$$

เราจัดรูปใหม่ในเทอมของอนุพันธ์เชิงวัสดุ เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{D\hat{U}}{Dt} = c_p \frac{DT}{Dt} - \beta T \hat{V} \frac{Dp}{Dt} - p \frac{D\hat{V}}{Dt} \quad (3.81)$$

พิจารณาพจน์ $D\hat{V}/Dt$ เพราะ $V = 1/\rho$ เราจะได้

$$\begin{aligned} \frac{D\hat{V}}{Dt} &= \frac{\partial \hat{V}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \hat{V} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \vec{v} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \right) \nabla \rho \right] \\ &= -\frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho \right) \\ &= -\frac{1}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} \\ &= -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{v} \end{aligned} \quad (3.82)$$

แทนค่าสมการ(3.82)ในสมการ (3.81) และคูณความหนาแน่นในทุกพจน์ของสมการ จะได้

$$\rho \frac{D\hat{U}}{Dt} = \rho c_p \frac{DT}{Dt} - \beta T \frac{Dp}{Dt} - p \nabla \cdot \vec{v} \quad (3.83)$$

สมการ(3.83)ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจำเพาะกับอัตราเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

3.2.4.2 สมการพลังงานในพจน์ของอุณหภูมิ

เราสามารถแสดงสมการพลังงาน คือ

$$\rho \frac{D\hat{U}}{Dt} = \rho c_p \frac{DT}{Dt} - \beta T \frac{Dp}{Dt} - p \nabla \cdot \vec{v} \quad (3.84)$$

ผลลัพธ์ของสมการจะถูกแสดงในพจน์ของอุณหภูมิ ซึ่งจะเหมือนกับสมการ(3.53) จากสมการพลังงานจากสมการ(3.62) คือ

$$\rho \frac{D\hat{U}}{Dt} = (\underline{\sigma} : \{\nabla \vec{v}\}) - (\nabla \cdot \vec{q}) \quad (3.85)$$

แทนสมการ(3.84)ในสมการ (3.85) เราจะได้

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \beta T \frac{Dp}{Dt} + p \nabla \cdot \vec{v} + (\underline{\sigma} : \{\nabla \vec{v}\}) - (\nabla \cdot \vec{q}) \quad (3.86)$$

จากสมการอนุพันธ์เชิงวัสดุ เราจะได้

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + (\underline{\sigma} : \{\nabla \vec{v}\}) - (\nabla \cdot \vec{q}) \quad (3.87)$$

สุดท้ายเราจะพิจารณาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความร้อน \vec{q} กับอุณหภูมิซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier's Law [11] เราจะได้ว่า

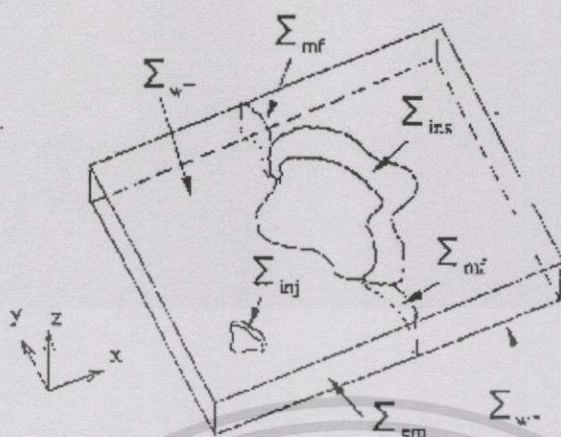
$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (3.88)$$

เมื่อ k คือค่าการนำความร้อน แทนสมการ(3.88)ลงในสมการ (3.86) สมการพลังงาน คือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + (\underline{\sigma} : \{\nabla \vec{v}\}) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.89)$$

3.2.5 สภาวะเงื่อนไขที่ขอบ

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาของการฉีดพลาสติก ซึ่งจะเหมือนกับสมการควบคุมและเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาทั่วไป การกำหนดสภาวะเงื่อนไขที่ขอบจึงถือว่าเป็นหลักเกณฑ์พื้นฐานในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.3 แสดงสถานะเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก

เราจะอธิบายเงื่อนไขที่ขอบ ณ บริเวณพื้นผิวต่าง ๆ ดังนี้

- Σ_{inj} คือพื้นผิวซึ่งพลาสติกเหลวถูกฉีดในช่องของแม่พิมพ์
- Σ_{em} คือพื้นผิวที่กำหนดขอบของแม่พิมพ์
- Σ_{w+} คือพื้นผิวด้านบนของแม่พิมพ์
- Σ_{w-} คือพื้นผิวด้านล่างของแม่พิมพ์
- Σ_{ins} คือพื้นผิวที่กำหนดขอบเขตของ Insert
- Σ_{mf} คือพื้นผิวซึ่งพลาสติกเหลวถูกฉีดในช่องของแม่พิมพ์

สำหรับปัญหาแม่ฉีดพลาสติก เงื่อนไขที่ขอบจะสัมพันธ์กับปัญหาของความดันและการกระจายอุณหภูมิภายในช่องของแม่พิมพ์ ซึ่งเราสามารถจะรวมสมการคอนติเนอิตีและโมเมนตัมลงในสมการความดัน เนื่องจากสมการความดันจะสัมพันธ์กับสมการพลังงาน เพราะค่าความหนืดของวัสดุ ผลกระทบของความดันถูกหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราเฉือน ปัญหาของการฉีดพลาสติกจึงต้องการสมการความดันและสมการพลังงาน เพื่อใช้เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์

การกำหนดสถานะเงื่อนไขของความดัน

เงื่อนไขที่ขอบจะมีความสัมพันธ์กับความหนืด ดังนี้

- ผลต่างความดันในทิศทางตั้งฉากกับผนังแม่พิมพ์จะมีค่าเป็นศูนย์ เงื่อนไขที่ขอบรวมถึงขอบของแม่พิมพ์, ผนังแม่พิมพ์ และ insert กำหนดโดย

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ on } \sum_{em}, \sum_{w^+}, \sum_{w^-}, \sum_{ins} \quad (3.90)$$

ข้อกำหนดวัสดุไม่สามารถไหลผ่านผนังและขอบแม่พิมพ์ได้

- อัตราการไหล q , หรือความดัน p , คือค่าเฉพาะที่พื้นผิวเมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าช่องแม่พิมพ์

$$q = q_{inj} \quad \text{หรือ} \quad p = p_{inj} \text{ on } \sum_{inj} \quad (3.91)$$

ปกติการวิเคราะห์การไหลจะใช้วิธีการกำหนดอัตราการไหลในช่วงการฉีดเต็มเต็ม ซึ่งสามารถหาได้โดยการประมาณปริมาตรของชิ้นงานและระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดเต็มเต็ม

- การสมมติ ความดันที่จุดฉีดเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นเราจะกำหนดให้ความดันเท่ากับศูนย์ ที่จุด Melt Front คือ

$$p = 0 \quad \text{ที่จุด} \quad \sum_{mf} \quad (3.92)$$

สถานะเงื่อนไขของอุณหภูมิ

เงื่อนไขที่ขอบจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนี้

เส้น Profile แสดงการกระจายของอุณหภูมิผ่านความหนาของแม่พิมพ์คือ $T(z)$ ถูกกำหนดสำหรับผิวซึ่งพลาสติกหลอมถูกฉีดผ่าน คือ

$$T(z) = T_{inj}(z) \quad (3.93)$$

การวิเคราะห์การไหล สมมติว่าอุณหภูมิหลอมเหลวคงที่ ณจุดเริ่มต้นของการฉีด ในทางปฏิบัตินี้จะไม่เกิดขึ้นแต่การหลอมเหลวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การนำความร้อนเกิดในช่องว่างหรือระบบ runner ซึ่งผลกระทบของความร้อนขึ้นอยู่กับ shear heating และการนำความร้อนผ่านความหนาอย่างรวดเร็ว

- อุณหภูมิ, T จะถูกกำหนดบนเงื่อนไขที่ขอบของแม่พิมพ์ ความแตกต่างของอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละชนิด อธิบายดังนี้

$$T = T_{em} \text{ on } \sum_{em} \quad (3.94)$$

$$T = T_{w^+} \text{ on } \sum_{w^+}$$

$$T = T_{w^-} \text{ on } \sum_{w^-}$$

$$T = T_{ins} \text{ on } \sum_{ins}$$

3.3 สมการควบคุมในการวิเคราะห์การไหล ในสภาวะการบีบอัด

3.3.1 สมมุติฐานของสมการโรเมนตัม

สมการ Generalized Newtonian Fluid ในระบบพิกัดฉากภายใต้สมมุติฐานจาก [7] เราจะได้

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= 0\end{aligned}\quad (3.95)$$

เราจะอินทิเกรตสมการข้างบน ยกเว้นความเร็วในแนวความหนา จะได้

$$v_x(z) = \frac{\partial p}{\partial x} \left[\int_{h^-}^z \int_{h^-}^{z'} dz' - C(x, y) \int_{h^-}^z \frac{dz'}{\eta} \right] \quad (3.96)$$

$$v_y(z) = \frac{\partial p}{\partial y} \left[\int_{h^-}^z \int_{h^-}^{z'} dz' - C(x, y) \int_{h^-}^z \frac{dz'}{\eta} \right] \quad (3.97)$$

ความเร็วเฉลี่ย \bar{v}_x และ \bar{v}_y ถูกกำหนดได้คือ

$$\bar{v}_x = \frac{-2S_2}{h^+ - h^-} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.98)$$

$$\bar{v}_y = \frac{-2S_2}{h^+ - h^-} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.99)$$

เมื่อ

$$S_2 = \frac{1}{2} \left\{ \int_{h^-}^{h^+} \frac{z'^2}{\eta} dz' - \frac{\left(\int_{h^-}^{h^+} \frac{z'}{\eta} dz' \right)^2}{\int_{h^-}^{h^+} \frac{dz'}{\eta}} \right\} \quad (3.100)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมติฐานของความสมมาตรเกี่ยวกับคาร์วิตี [7] เราจะได้

$$S_2 = \int_0^h \frac{z'^2}{\eta} dz' \quad (3.101)$$

3.3.2 สมการความต่อเนื่องสำหรับคาร์วิตี

จากสมการความต่อเนื่อง สมการคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{v} \cdot \rho = 0 \quad (3.102)$$

สำหรับระบบพิกัดฉาก สมการนี้กลายเป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left(v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (3.103)$$

เมื่อความหนาแน่น ρ คือตัวแปรและขึ้นอยู่กับความดัน p และอุณหภูมิ T ใ้กฎของลูกโซ่กระจายแต่ละพจน์ เราจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho}{\partial y} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.104)$$

แทนค่าสมการ(3.104)ในสมการ (3.103) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.105)$$

ความหนาแน่นเรียกอีกอย่าง คือส่วนกลับของปริมาตรจำเพาะ \hat{V} เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\hat{V}} \right) \\ &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \hat{V}} \left(\frac{1}{\hat{V}} \right) \frac{\partial \hat{V}}{\partial p} \\ &= \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{\hat{V}^2} \right) \frac{\partial \hat{V}}{\partial p} \\ &= -\frac{1}{\hat{V}} \frac{\partial \hat{V}}{\partial p}\end{aligned}\tag{3.106}$$

$= \kappa$

เมื่อ κ คือ Isothermal Compressibility Coefficient ของวัสดุ

$$\begin{aligned}\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{\hat{V}} \right) \\ &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \hat{V}} \left(\frac{1}{\hat{V}} \right) \frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \\ &= \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{\hat{V}^2} \right) \frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \\ &= -\frac{1}{\hat{V}} \frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \\ &= -\beta\end{aligned}\tag{3.107}$$

ซึ่ง β คือ Expansivity ของวัสดุ ทั้ง β [12] และ κ สมการ (3.105) กลายเป็น

$$\begin{aligned}0 &= \kappa \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ &\quad - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)\end{aligned}\tag{3.108}$$

เพราะในช่วงการฉีดอัดปริมาตรในโพรงแบบจะเต็มหมดแล้ว ความดันที่ใช้ในช่วงนี้จึงเป็นการเพิ่มความดันสถิตย (Hydrostatic) ให้กับพลาสติกหลอมเหลวเท่านั้น ผลต่างของความดันในแนวระนาบคือ $\partial p / \partial x$ และ $\partial p / \partial y$ จะมีค่าน้อยกว่าช่วงการเติมเต็มมากและเราจะทราบว่

$\partial p / \partial z = 0$ เพราะมีค่าผลต่างของความดันน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน พจน์ของการพาความร้อนจะถูกตัดทิ้งในการคำนวณของช่วงการฉีดยาสมการ (3.107) กลายเป็น

$$0 = \kappa \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) + \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (3.109)$$

3.3.3 สมการพลังงานสำหรับคาร์วิตี

จากสมการพลังงานในบทที่ 2 เราจะได้

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + (\sigma : \{\nabla \vec{v}\}) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.110)$$

สมมติฐานสำหรับพฤติกรรมเชิงวิสคูลคือ ของไหลเป็นของไหลกดยัดได้และค่าการนำความร้อนคงที่ ดังนั้นสมการพลังงานจะกลายเป็น

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + (\sigma : \{\nabla \vec{v}\}) + k \nabla^2 T \quad (3.111)$$

สุดท้ายสมการพลังงานสำหรับช่วงการฉีดยาคือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma}'^2 + k \nabla^2 T \quad (3.112)$$

ในระบบพิกัดฉาก รูปแบบของสมการพลังงานคือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}'^2 + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.113)$$

จากการวิเคราะห์ในการฉีดยา เราจะตัดพจน์การพาความร้อนในทุกทิศทางและการนำความร้อนในทิศทาง x และ y แต่ยังคงรวมพจน์ $\partial p / \partial t$ เพราะว่าพจน์ของผลต่างความดัน $\partial p / \partial x, \partial p / \partial y$ มีความสัมพันธ์น้อยในช่วงการฉีดยา แต่ $\partial p / \partial t$ มีผลกระทบค่อนข้างมาก ความดัน

ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในคาร์วิต์ในช่วงการฉีดน้ำ จึงเป็นผลกระทบของโพลิเมอร์ภายใต้ความดันสถิตย (Hydrostatic Pressure) สมการพลังงานจึงกลายเป็น

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}'^2 k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.114)$$

สุดท้ายถ้าเราไม่คิดการพาความร้อนในทิศทางแกน z สมการพลังงานที่ใช้ จะกลายเป็น

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}'^2 k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.115)$$

เราจะพิจารณาพจน์ของ $\dot{\gamma}'^2$ ซึ่งถูกแสดงในระบบพิกัดฉากของการไหลในคาร์วิต์

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}'^2 &= \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2} \\ &= \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (3.116)$$

3.3.4 การรวมเข้ากับสมการความต่อเนื่อง

เราจะจัดสมการพลังงาน (3.115) ในรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.117)$$

แทนสมการข้างบนในสมการความต่อเนื่อง (3.106) จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= K \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} - \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ &\quad + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.118)$$

สมการ (3.118) ถูกอินทิเกรตเทียบกับค่า z (ความหนาของคาร์วิตี้) จะได้

$$\begin{aligned}
 0 &= \int_{H^-}^{H^*} K \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^*} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \\
 &+ \int_{H^-}^{H^*} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dz \\
 &= + \int_{H^-}^{H^*} \left(K - \frac{\beta^2 T}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^*} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \\
 &+ \int_{H^-}^{H^*} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dz
 \end{aligned} \tag{3.119}$$

จากเทคนิคการอินทิเกรต [7] เราจะได้

$$\begin{aligned}
 0 &= + \int_{H^-}^{H^*} \left(K - \frac{\beta^2 T}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^*} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \\
 &- 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \tag{3.120}$$

เมื่อ

$$S_2 = \frac{1}{2} \left\{ \int_{H^-}^{H^*} \frac{z^2}{\eta} dz - \frac{\left(\int_{H^-}^{H^*} \frac{z}{\eta} dz \right)^2}{\int_{H^-}^{H^*} \frac{dz}{\eta}} \right\} \tag{3.121}$$

เราจะกล่าวถึงสมมุติที่ใช้คือ การไหลจะถูกสมมติให้สมมาตรตลอดความหนาของคาร์วิตี้จากสมมติฐานนี้ สมการ (3.120) จะถูกกำหนดขอบเขตของการอินทิเกรต เราจะได้

$$\begin{aligned}
 0 &= \int_0^H \left(K - \frac{B^2 T}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_0^H \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \\
 &- \frac{\partial p}{\partial t} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \tag{3.122}$$

ซึ่ง

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \tag{3.123}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าของ κ, β, ρ และ c_p ในพจน์ของ $\beta^2 T / \rho c_p$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ κ จึงไม่น่ามาคิด

เราจะกำหนดค่าเฉลี่ยของ Compressibility coefficient, $\bar{\kappa}$

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{H} \int_0^H \kappa dz \quad (3.124)$$

สังเกตว่า $\partial p / \partial t$ จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า z สมการ (3.122) กลายเป็น

$$0 = \bar{\kappa} H \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^H \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz - \frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3.125)$$

3.3.5 สมการควบคุมการไหลของ Runners

สำหรับสมมติฐานเชิงวัสดุของ Runner กับ Cavity จะเหมือนกันทั้งสมการคอนทิวนิตี้, สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน แต่จะไม่เหมือนกันในระบบพิกัดฉาก เราสามารถอธิบายได้ว่าในระบบของคาร์ทีเซียนจะใช้ระบบพิกัดฉาก(Cartesian Coordinate)แต่ในระบบของ Runner จะใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก(Cylindrical Coordinate)

3.3.5.1 สมการความต่อเนื่อง(Continuity)

เราจะแสดงระบบพิกัดของทรงกระบอก ใช้ความสัมพันธ์ใน [7] ได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (3.126)$$

เราจะกำหนดให้ Runner สมมาตร, พจน์ที่เป็นอนุพันธ์กับ θ จะมีค่าเป็นศูนย์และสมการความต่อเนื่อง 0 กลายเป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (3.127)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่น ρ ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ดังนั้นเราจะใช้กฎลูกโซ่สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ ,กำหนดค่าการขยายตัว β และความสามารถในการกักอัด κ เราจะได้

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \frac{\partial T}{\partial t} \\ &= p\kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \rho\beta \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial \rho}{\partial r} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \frac{\partial T}{\partial r} \\ &= p\kappa \frac{\partial p}{\partial r} - \rho\beta \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \frac{\partial T}{\partial x} \\ &= p\kappa \frac{\partial p}{\partial x} - \rho\beta \frac{\partial T}{\partial x}\end{aligned}\tag{3.128}$$

แทนสมการ(3.128)ใน (3.127) จัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned}\kappa \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_r \frac{\partial p}{\partial r} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0\end{aligned}\tag{3.129}$$

เราสมมติว่าพจน์ของ Pressure Convection ถูกตัดทิ้ง สุดท้ายจะได้

$$\kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0\tag{3.130}$$

3.3.5.2 สมการโมเมนตัมสำหรับ Runner

ดังนั้นสมการ โมเมนตัมในช่วงการฉีดจะ

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta \frac{\partial v_x}{\partial r} \right)\end{aligned}\tag{3.131}$$

3.3.5.3. สมการพลังงานสำหรับ Runner

สมการพลังงานในระบบพิกัดของทรงกระบอกคือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_r \frac{\partial p}{\partial r} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (3.132)$$

ตัดพจน์ที่มีผลกระทบน้อยคือ Pressure Convection ในทิศทางรัศมีและแกน X และอนุพันธ์อันดับสูง จัดใหม่จะได้สมการคือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.133)$$

ซึ่ง

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial r} \quad (3.134)$$

สุดท้ายตัดการพาความร้อนในแนวรัศมีทิ้ง เราจะได้สมการพลังงานถูกใช้ในการคำนวณอุณหภูมิในการฉีดยาคือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.135)$$

3.3.5.4 Integration of the Continuity Equation of Runners

สมการพลังงานจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_p} \left\{ \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \quad (3.136)$$

แทนค่าสมการข้างบนในสมการความต่อเนื่อง (6.52) เราจะได้

$$\begin{aligned} 0 &= K \frac{\partial p}{\partial t} - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ &\quad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ &= K \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (3.137)$$

ปริมาณ $\beta^2 T / \rho c_p$ มีค่าน้อยกว่า κ และถูกตัดทิ้ง สมการ (3.137) กลายมาเป็น

$$0 = \kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (3.138)$$

เราจะนำ A_c , พื้นที่หน้าตัดของ Runner มาใช้กำหนดค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การกอดตัว, $\bar{\kappa}_c$

$$\begin{aligned} \bar{\kappa}_c &= \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \kappa dA \\ &= \frac{2}{R^2} \int_0^R \kappa r dr \end{aligned} \quad (3.139)$$

สังเกตว่า dp/dt จะไม่ขึ้นอยู่กับ z และการใช้เฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การกอดตัว สมการ (3.138) ถูกอินทิเกรตภายใต้พื้นที่หน้าตัดของ Runner จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= 2\pi \int_0^R \left[\kappa \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] r dr \\ &= 2\pi \left[\frac{\partial p}{\partial t} \int_0^R \kappa r dr - \int_0^R \frac{\beta}{\rho c_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} r dr + \int_0^R \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right\} r dr \right] \quad (3.140) \\ &= 2\pi \left[\frac{1}{2} \bar{\kappa}_c R^2 \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^R \frac{\beta}{\rho c_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} r dr + \int_0^R \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right\} r dr \right] \end{aligned}$$

สุดท้ายเราจะได้ว่า

$$= 2\pi \int_0^{r^*} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right\} r dr = -\pi \frac{\partial}{\partial x} \left(r^* S_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.141)$$

ซึ่ง

$$S_1 = \frac{1}{2r^+} \int_0^{r^+} \frac{r^3}{\eta} dr \quad (3.142)$$

สมการ (3.140) กลายเป็น

$$0 = \bar{K}_c R^2 \frac{\partial p}{\partial t} - 2 \int_0^R \frac{\beta}{\rho c_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} r dr \quad (3.143)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลเฉลยเชิงตัวเลขของกระบวนการฉีดอัด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ผลเฉลยเชิงตัวเลขของกระบวนการฉีดอัด(Packing Phase) โดยจะต่างจากกระบวนการเติมเต็ม(Filling Phase) คือเป็นผลเฉลยของการอัดตัวและการขยายตัว จะถูกนำมารวมด้วยที่ทุก Node ภายในคาร์วิต์ โดยเงื่อนไขที่ขอบสำหรับกระบวนการฉีดอัดจะแตกต่างจากที่ใช้ในกระบวนการเติมเต็ม

3.4.1 วิธีการกำหนดและแก้ปัญหาของกระบวนการ

สมการควบคุมสำหรับกระบวนการฉีดอัด(Packing Phase) สำหรับคาร์วิต์เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \kappa H \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^H \frac{\beta}{pc_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \quad (3.144)$$

โดยที่

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (3.145)$$

และ

$$pc_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.146)$$

โดย

$$\dot{\gamma}^2 = \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2} \quad (3.147)$$

สมการ (3.95) และ (3.97) จะถูกแก้ปัญหาโดยใช้เงื่อนไขที่ขอบต่อไปนี้

i. ความดันจะถูกกำหนดที่จุดฉีดคือ

$$P = P_{in} \text{ ที่จุดฉีด} \quad (3.148)$$

ii. ความแตกต่างของความดัน จะเป็นศูนย์ที่ขอบกรณีที่ไม่มีการซึม จะได้เงื่อนไขขอบเป็น

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (3.149)$$

iii. อุณหภูมิที่ผนังหรือที่จุดอื่นภายในผนังแม่พิมพ์จะถูกกำหนดไว้

$$T = T_w \text{ at } z = h \text{ or } z = h + \delta \quad (3.150)$$

iv. ผลต่างของอุณหภูมิในทิศทาง z จะเป็นศูนย์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องความหนา คือ

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ at } z = 0 \quad (3.151)$$

v. อุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งจะถูกกำหนดไว้

$$T = T_{in} \text{ ที่จุดเริ่มฉีด} \quad (3.152)$$

สมการ (3.144) จะต่างจากสมการที่ใช้ในกระบวนการเติมเต็มตรงที่เทอมที่เพิ่มเข้ามาทางด้านขวามือซึ่งจะใช้อธิบายผลกระทบของการอัดตัวและการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิตามลำดับ เทอมหลังสุดจะใช้อธิบายความร้อนที่เกิดจากการอัดตัว สมการ (3.144) สามารถเขียนให้กระชับขึ้นได้เป็น

$$\bar{\kappa} H \frac{\partial p}{\partial t} - (\nabla \cdot S \nabla \bar{p}) = b \quad (3.153)$$

โดย ∇ เป็น Gradient Operator ในสองมิติและ

$$b = \int_0^H \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \quad (3.154)$$

ค่า b หรือค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion Term) สามารถหาได้โดยตรงจากค่า อุณหภูมิและ การกระจายตัวของความดันของชั้นเวลาที่แล้ว ต่อไปให้ทำการหาความดันที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นเวลาใหม่โดยใช้สมการ (3.153) โดยใช้ค่า b จากชั้นเวลาที่แล้ว dp/dt คือการเปลี่ยนแปลงของความดันต่อเวลาซึ่งจะมีค่ามาก โดยเราจำเป็นต้องใช้ช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งจะเกิดเมื่อมีการเติมเต็มอย่างรวดเร็ว หรือมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกระบวนการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อจำลองรูปร่างโดยอัตโนมัติ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการฉีดจะน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความดันมาก แต่ในทางปฏิบัติทั้งผลเฉลยของอุณหภูมิและความดันที่แต่ละชั้นเวลาจะทำการคำนวณหลายครั้ง และพบว่าโปรแกรม จะมีช่วงที่อุณหภูมิคงที่ที่เราจะสมมุติว่าอุณหภูมิคงที่ โดยช่วงนี้จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้ ซึ่งปกติจะอยู่ที่ 0.05 วินาที เป็นผลให้จำนวนครั้งการคำนวณเกิดขึ้นจำนวนมาก สามารถทำให้เสร็จได้โดยใช้ช่วงเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งวิธีนี้ใช้ลดภาระในการคำนวณ

ขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในผลเฉลยในช่วง กระบวนการฉีด

- 1 หาสนามความดันที่ตำแหน่งเวลาใหม่, $t_n + I$
- 2 หา อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุ
- 3 หาความหนาแน่น และอนุพันธ์ของมันเทียบกับความดันและอุณหภูมิ โดยใช้ข้อมูลวัสดุ PVT และผลจากข้อ 1 และ 2
- 4 ปรับปรุงค่าความหนืดและค่าค่าความต้านทานการไหล (Fluidity)
- 5 เพิ่มเวลาไปอีกขั้น
- 6 ถ้ายังอยู่ในช่วงอุณหภูมิคงที่ ให้เริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอน 1 ใหม่จนกว่าจะหมดช่วง
- 7 หาอุณหภูมิที่เปลี่ยนเนื่องจากการอัดตัว, การพาความร้อน, การแผ่ และการทำความร้อน
- 8 ปรับปรุงค่าความหนืด
- 9 หาความดันที่เปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยน
- 10 หาความหนาแน่น โดยใช้ข้อมูล PVT
- 11 เพิ่มชั้นเวลา

ถ้า Packing Time ครบ ให้หยุด แต่ยังไม่ให้กลับไปทำข้อ 1 ใหม่

3.4.2 สมการความดันในช่องคาร์วิตี

จากที่เราได้กำหนดรูปร่างของคาร์วิตีด้วยอติเมนตร์รูปสามเหลี่ยมแล้ว เราจะใช้การประมาณค่าเชิงเส้น สำหรับประมาณค่าความดันภายในอติเมนตร์โดยความดันภายในแต่ละอติเมนตร์จะถูกกำหนดเป็น $\tilde{p}^{(e)}$ หาได้จาก

$$\tilde{p}^{(e)}(x, y) = N_1 p_1 + N_2 p_2 + N_3 p_3 \quad (3.155)$$

โดยที่ N_i เป็น Element Shape Function ซึ่งเมื่อเขียนในพจน์ของระบบพิกัดฉาก จะเป็น

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \xi_1 \\
 N_2 &= \xi_2 \\
 N_3 &= \xi_3 \\
 \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 &= 1
 \end{aligned}
 \tag{3.156}$$

จัดสมการ (3.155) ใหม่กลายเป็น

$$\tilde{p}^{(e)}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \xi_3 p_3
 \tag{3.157}$$

ใช้วิธี Galerkin กับสมการ (3.153) เราจะได้ 3 สมการต่อไปนี้สำหรับที่ $i=1, 2, 3$

$$\begin{aligned}
 \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dA - \int_A (\nabla \cdot S \nabla \tilde{p}) N_1 dA - \int_A b N_1 dA &= 0 \\
 \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_2 dA - \int_A (\nabla \cdot S \nabla \tilde{p}) N_2 dA - \int_A b N_2 dA &= 0 \\
 \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_3 dA - \int_A (\nabla \cdot S \nabla \tilde{p}) N_3 dA - \int_A b N_3 dA &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.158}$$

พิจารณาเทอมแรกของแต่ละสมการใน (3.158)

$$\int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_i dA \quad i = 1, 2, 3
 \tag{3.159}$$

สมมติให้ค่า K และ H คงที่ทั่วทั้งพื้นที่ของ element จะได้

$$\int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_i dA = \bar{\kappa} H \int_A \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_i dA
 \tag{3.160}$$

แทน N_i และ P จากสมการ (3.157) และ (3.158) ลงในสมการ (3.111) เราจะได้

$$\begin{aligned} \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_i dA &= \bar{\kappa} H \int_A \frac{\partial}{\partial t} (\xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \xi_3 p_3) \xi_i dA \\ &= \bar{\kappa} H \int_A \left(\xi_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \xi_i + \xi_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \xi_i + \xi_3 \frac{\partial p_3}{\partial t} \xi_i \right) dA \end{aligned} \quad (3.161)$$

สำหรับที่ $i=1,2$ และ 3 จะได้

$$\begin{aligned} \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_1 dA &= \bar{\kappa} H \left\{ \frac{\partial p_1}{\partial t} \int_A \xi_1 \xi_1 dA + \frac{\partial p_2}{\partial t} \int_A \xi_2 \xi_1 dA + \frac{\partial p_3}{\partial t} \int_A \xi_3 \xi_1 dA \right\} \\ \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_2 dA &= \bar{\kappa} H \left\{ \frac{\partial p_1}{\partial t} \int_A \xi_1 \xi_2 dA + \frac{\partial p_2}{\partial t} \int_A \xi_2 \xi_2 dA + \frac{\partial p_3}{\partial t} \int_A \xi_3 \xi_2 dA \right\} \\ \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_3 dA &= \bar{\kappa} H \left\{ \frac{\partial p_1}{\partial t} \int_A \xi_1 \xi_3 dA + \frac{\partial p_2}{\partial t} \int_A \xi_2 \xi_3 dA + \frac{\partial p_3}{\partial t} \int_A \xi_3 \xi_3 dA \right\} \end{aligned} \quad (3.162)$$

โดยจะใช้สูตรด้านล่างหาค่า Integral ในสมการ (3.162)

$$\int_A \xi_1^k \xi_2^l \xi_3^m dA = 2A \frac{k!l!m!}{(2+k+l+m)!} \quad (3.163)$$

ทำให้สมการ (3.162) กลายเป็น

$$\begin{aligned} \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_1 dA &= \frac{\bar{\kappa} A H}{12} \left\{ 2 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{\partial p_3}{\partial t} \right\} \\ \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_2 dA &= \frac{\bar{\kappa} A H}{12} \left\{ 2 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{\partial p_3}{\partial t} \right\} \\ \int_A \bar{\kappa} H \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} N_3 dA &= \frac{\bar{\kappa} A H}{12} \left\{ 2 \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{\partial p_3}{\partial t} \right\} \end{aligned} \quad (3.164)$$

และสามารถเขียนในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \bar{\kappa} H \int_A (\partial \bar{p} / \partial t) N_1 dA \\ \bar{\kappa} H \int_A (\partial \bar{p} / \partial t) N_2 dA \\ \bar{\kappa} H \int_A (\partial \bar{p} / \partial t) N_3 dA \end{Bmatrix} = \frac{\bar{\kappa} A H}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.165)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $p_i = \partial \bar{p} / \partial t$

และสามารถเขียนย่อๆ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \int_A \bar{\kappa} H (\partial \bar{p} / \partial t) N_1 dA \\ \int_A \bar{\kappa} H (\partial \bar{p} / \partial t) N_2 dA \\ \int_A \bar{\kappa} H (\partial \bar{p} / \partial t) N_3 dA \end{Bmatrix} = [C^{(e)}] \{ \dot{p} \} \quad (3.166)$$

ต่อไปเราจะพิจารณาเทอมที่ 2 ของแต่ละสมการใน (3.158) ซึ่งจะคล้ายๆ กับพจน์ในกระบวนการเติมเต็ม จากสมการ Formular Element และ Divergence Theorem จะได้

$$\begin{aligned} \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) dA &= \int_A (\nabla \cdot N_i S_2 \nabla \bar{p}) dA - \int_A S_2 (\nabla \bar{p} \cdot \nabla N_i) dA \\ &= \int_{\Sigma} N_i S_2 \nabla \bar{p} \cdot \vec{n} d\Sigma - \int_A S_2 (\nabla \bar{p} \cdot \nabla N_i) dA \end{aligned} \quad (3.167)$$

โดยทั้ง 2 เทอมทางด้านขวามือได้หาไว้แล้ว ซึ่งทั้ง 3 สมการจาก $i=1, 2, 3$ สามารถเขียนในรูปเมตริก ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_1 dA \\ \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_2 dA \\ \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_3 dA \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{11} & k_{11} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} \quad (3.168)$$

เขียนให้กระชับขึ้นได้

$$\begin{Bmatrix} \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_1 dA \\ \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_2 dA \\ \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \bar{p}) N_3 dA \end{Bmatrix} = \{Q\} - [K^{(e)}] \{p\} \quad (3.169)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (3.169) และ (3.166) ลงใน (3.158) จะได้

$$[C^{(e)}]\{\dot{p}\} + [K^{(e)}]\{p\} - \{Q\} + \{B\} = 0 \quad (3.170)$$

โดยที่

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} \int_A bN_1 dA \\ \int_A bN_2 dA \\ \int_A bN_3 dA \end{Bmatrix} \quad (3.171)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$[C^{(e)}]\{\dot{p}\} + [K^{(e)}]\{p\} = \{Q\} - \{B\} \quad (3.172)$$

ซึ่งจะเป็น สมการของอีลิเมนต์ สำหรับกระบวนการฉีด

3.4.2.1 การรวมเมตริกของสมการอีลิเมนต์

เราจะกล่าวถึงการรวมสมการอีลิเมนต์ (3.172) และจะสังเกตเห็นได้ว่า สมการระบบจะใช้สัญลักษณ์คล้ายกับที่ใช้ด้านบน เพียงแต่จะไม่มีตัวยก คือ

$$[C]\{\dot{p}\} + [K]\{p\} = \{Q\} - \{B\} \quad (3.173)$$

ใช้การประมาณแบบ 1st Order Forward Difference สำหรับการหาอนุพันธ์ของความดัน เพื่อหาความดันที่ตำแหน่งขึ้นเวลาปัจจุบัน โดยสมการ (3.173) สามารถเขียนได้เป็น

$$[C] \left(\frac{\{p\}^{n+1} - \{p\}^n}{\Delta t} \right) + [K]\{p\}^{n+1} = \{Q\} - \{B\} \quad (3.174)$$

จัดรูปใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$([C] + \Delta t[K])\{p\}^{n+1} = [C]\{p\}^n + \Delta t(\{Q\} - \{B\}) \quad (3.175)$$

เราจะประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่า $\{p\}^{n+1}$ ได้ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับ $\{p\}^{n+1}$ และ $\{Q\}$

3.4.2.2 สมการความดันของรูวิ่ง

สมการความดัน สำหรับรูวิ่ง (Runners) ในกระบวนการอัดแน่น (Packing Phase) คือ

$$0 = \bar{\kappa}_c R^2 \frac{\partial p}{\partial t} - 2 \int_0^R \frac{\beta}{pc_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} r dr - \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.176)$$

กำหนดให้

$$b = -2 \int_0^R \frac{\beta}{pc_p} \left\{ \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} r dr \quad (3.177)$$

สามารถเขียนให้กระชับได้เป็น

$$0 = \bar{\kappa}_c R^2 \frac{\partial p}{\partial t} + b - \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.178)$$

เราจะใช้การประมาณแบบเชิงเส้น ประมาณค่าความดันระหว่าง 2 Node ที่กำหนดอิทธิพันธ์ของรูวิ่ง (Runner Element) คือ \tilde{p} โดยจะอยู่ในรูป

$$\begin{aligned} \tilde{p} &= \begin{pmatrix} x_2 - x \\ x_2 - x_1 \end{pmatrix} p_1 + \begin{pmatrix} x - x_1 \\ x_2 - x_1 \end{pmatrix} p_2 \\ &= N_1 p_1 + N_2 p_2 \end{aligned} \quad (3.179)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} = \frac{1}{L}(x_2 - x)$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{1}{L}(x - x_1)$$
(3.180)

และ L จะเป็นความยาวของอิติเม้นต์

ค่าเศษตกค้าง $R(x)$ จะหาได้โดยการแทน (3.179) ลงใน (3.178) จะได้

$$R(x) = \bar{\kappa}_c R^2 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + b - \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right)$$
(3.181)

ใช้ Galerkin's Method ได้

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x) N_i dx = 0 \quad i = 1, 2$$
(3.182)

แทน (3.132) ลงใน (3.133) จะได้ 2 สมการที่ $j = 1, 2$ เป็น

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x) N_1 dx = \bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dx + \int_{x_1}^{x_2} b N_1 dx - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_1 dx$$
(3.183)

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x) N_2 dx = \bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_2 dx + \int_{x_1}^{x_2} b N_2 dx - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_2 dx$$
(3.184)

พิจารณา Integral เทอมแรกทางด้านขวามือของสมการ (3.183) และให้ $\partial p / \partial t = \dot{p}$ จะได้

$$\bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dx = \bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} (N_1 \dot{p}_1 + N_2 \dot{p}_2) N_1 dx$$

$$= \bar{\kappa}_c R^2 \left\{ \dot{p}_1 \int_{x_1}^{x_2} N_1^2 dx + \dot{p}_2 \int_{x_1}^{x_2} N_2 N_1 dx \right\}$$
(3.185)

ใช้สมการ (3.180) หาค่า Integral ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \int_{x_1}^{x_2} N_1^2 dx &= \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{x_2} (x_2 - x)^2 dx \\
 &= \frac{1}{L^2} \left[-\frac{1}{3} (x_2 - x)^3 \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \\
 &= \frac{1}{3L^2} (x_2 - x_1)^3 \\
 &= \frac{l}{3}
 \end{aligned} \tag{3.186}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{x_1}^{x_2} N_1 N_2 dx &= \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{x_2} (x_2 - x)(x - x_1) dx \\
 &= \frac{1}{L^2} \left[\frac{1}{2} x_2 x^2 - x_2 x_1 x - \frac{1}{3} x^3 + \frac{1}{2} x^2 x_1 \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \\
 &= \frac{1}{6L^2} (x_2 - x_1)^3 \\
 &= \frac{L}{6}
 \end{aligned} \tag{3.187}$$

ใช้ค่าเหล่านี้แทนใน (3.185) จะได้

$$\bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dx = \frac{\bar{\kappa}_c L R^2}{6} (2\dot{p}_1 + \dot{p}_2) \tag{3.188}$$

ใช้วิธีเดียวกันกับ Integral เทอมแรกทางด้านขวามือของสมการ (3.184) จะได้

$$\bar{\kappa}_c R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_2 dx = \frac{\bar{\kappa}_c L R^2}{6} (\dot{p}_1 + 2\dot{p}_2) \tag{3.189}$$

ต่อไปเราจะพิจารณา Integral เทอมสุดท้ายทางด้านขวามือของสมการ (3.183) และ (3.184)

ใช้วิธี Integral by Part จะได้

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_i dx = \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} N_i \right) \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} - \int_{x_1}^{x_2} r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dx = 1, 2 \tag{3.190}$$

โดยเทอมที่ได้ทางด้านขวามือจะเหมือนกับในกระบวนการฉีดเติมเต็ม จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_1 dx = q_1 - \frac{r^+ S_1}{L} (p_1 - p_2) \quad (3.191)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_2 dx = q_2 - \frac{r^+ S_1}{L} (p_1 - p_2) \quad (3.192)$$

แทนสมการ (3.188) และ (3.190) ลงใน (3.183) จะได้

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x) N_1 dx = \frac{\bar{\kappa} L R^2}{6} (2\dot{p}_1 + \dot{p}_2) + \int_{x_1}^{x_2} b N_1 dx - q_1 + \frac{r^+ S_1}{L} (p_1 - p_2) \quad (3.193)$$

แทนสมการ (3.189) และ (3.192) ลงใน (3.184) จะได้

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x) N_2 dx = \frac{\bar{\kappa} L R^2}{6} (\dot{p}_1 + 2\dot{p}_2) + \int_{x_1}^{x_2} b N_2 dx - q_2 + \frac{r^+ S_1}{L} (p_1 - p_2) \quad (3.194)$$

สมการ (3.193) และ (3.194) สามารถนำมาเขียนรวมกันในรูปสมการเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{cases} \int_{x_1}^{x_2} R(x) N_1 dx \\ \int_{x_1}^{x_2} R(x) N_2 dx \end{cases} = \frac{\bar{\kappa} L R^2}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} + \frac{r^+ S_1}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} \quad (3.195)$$

โดยที่

$$b_1 = \int_{x_1}^{x_2} b N_1 dx \quad b_2 = \int_{x_1}^{x_2} b N_2 dx \quad (3.196)$$

จากสมการ (3.182) เทอมทางด้านซ้ายมือของสมการ (3.195) มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ (3.195) เขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\bar{\kappa}LR^2}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{Bmatrix} + \frac{r^+S_1}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} \quad (3.196)$$

และเขียนให้กระชับได้เป็น

$$[C^{(e)}]\{\dot{p}\} + [K^{(e)}]\{p\} = \{Q\} - \{B\} \quad (3.197)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการจะมีลักษณะคล้ายๆ กับสมการของอิเลเมนต์ที่ใช้สำหรับ คาร์วิตี

3.4.3 การใช้ข้อมูล PVT และการคำนวณหาอุณหภูมิ

ในกระบวนการฉีดน้ำมัน เราจะใช้ PVT Data เพื่อหาความหนาแน่นของวัสดุ, สัมประสิทธิ์การกดอัดตัว (Isothermal Compressibility Coefficient) K และ สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Volume Expansion) β

ถ้าเราทราบค่าด้านบนทั้งหมด เราจะสามารถหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ เมื่อเทียบกับการอัดตัวของวัสดุ ซึ่งแสดงได้โดยสมการนี้

$$\begin{aligned} \Delta T_{comp}^{n+1} &= \Delta t \left(\frac{\beta \Gamma^n}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \Delta t \left(\frac{\beta \Gamma^n}{\rho c_p} \right) \frac{p^{n+1} - p^n}{\Delta t} \\ &= \frac{\beta \Gamma^n}{\rho c_p} (p^{n+1} - p^n) \end{aligned} \quad (3.198)$$

เมื่อเราทราบค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เราจะสามารถหาค่าความหนาแน่น, สัมประสิทธิ์การกดอัดตัว, K และสัมประสิทธิ์การขยายตัว, β ที่เป็นค่าใหม่ได้ สำหรับค่า $\partial p / \partial p$ และ $\partial p / \partial t$ จะหาได้จาก PVT data สุดท้ายก็สามารถหา $\partial p / \partial t$ ได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกดอัดตัว ค่าใหม่ก็จะใช้วิธีการปรับปรุงเมตริก, $[C^{(e)}]$ ในสมการ (3.171) และ (3.198)

สำหรับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากสมการ (3.198) จะใช้วิธีการปรับปรุงค่าความหนืดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราเฉือนที่สอดคล้องกับค่าความดันค่าใหม่ $\{p\}^{n+1}$ เมื่อทราบค่าความหนืดได้ ก็สามารถหาค่าความต้านทานการไหล (Fluidity), S ได้ ซึ่งจะทำให้เมตริก $[K^{(e)}]$ ในสมการ (3.171) และ (3.198) ถูกปรับปรุง

ในช่วงที่เริ่มต้นของ Isothermal Period สมการพลังงานจะถูกใช้เพื่อหาสนามของอุณหภูมิ (Temperature Field) โดยจะใช้วิธีเดียวกันทั้งในกระบวนการเติมเต็มและฉีดอัด โดยจะต่างกันตรงที่ Source Term ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากผลของการอัดตัวได้

หลังจากที่หาสนามของอุณหภูมิได้แล้วจะต้องคำนวณค่าความหนืดและค่าความต้านทานการไหลใหม่ โดยใช้ค่าความหนาแน่นค่าใหม่, ค่าสัมประสิทธิ์การกวดอัดตัว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวค่าใหม่ ส่วน $\partial p / \partial p$ และ $\partial p / \partial t$ ก็จะหาได้จาก PVT Data และค่าสัมประสิทธิ์การกวดอัดตัว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวใหม่ก็จะถูกปรับปรุงในเมตริก $[C^{(e)}]$ และ $[K^{(e)}]$ ทุกครั้งเมื่อเห็นเวลาเพิ่มขึ้น การคำนวณความดันจะถูกคำนวณอีกครั้งหนึ่งเสมอ

ผู้ใช้สามารถป้อนค่าได้ทั้ง เวลาที่ใช้ในการฉีดอัด (Packing Time) และ เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) การคำนวณเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิจะกระทำในช่วงการฉีดอัดและตอนท้ายของช่วงการฉีดอัด ก็จะเริ่มหล่อเย็น ซึ่งจะมีการคำนวณเฉพาะอุณหภูมิเท่านั้น

แนะนำการใช้โปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นในการนำโปรแกรม ไปประยุกต์กับปัญหา

การออกแบบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow เป็นการวิเคราะห์โพรงแบบ (Cavity) และองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแม่พิมพ์ (Mold) การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection-molding) สามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมด้าน CAE (Computer Aided Engineer) ในงานวิจัยได้ใช้โปรแกรม Moldflow ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการทำนายการไหลของโพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกภายในแม่พิมพ์ (Mold) โดยมีลักษณะดังนี้

1. การออกแบบ (Molding) การถ่ายโอน (Translation) การแก้ไข (Editing) และการเมชซิ่ง (Meshing) เป็นแบบสามมิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเติม (Filling Analysis)
2. จัดเป็นสถานะของการขึ้นรูป สำหรับวัตถุแต่ละชนิด (Molding Condition for Specified Material)
3. สามารถทำนายการวิเคราะห์การเติม (Filling Analysis)
4. สามารถทำนายการวิเคราะห์การอัดตัว (Packing Analysis)
5. สามารถทำรูปร่างให้สมดุล (Runner) ได้โดยอัตโนมัติ
6. สามารถทำนายการหดตัว (Shrinkage Analysis)
7. สามารถทำนายการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น Cooling Analysis , Stress Analysis , Warpage Analysis

4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบและการวิเคราะห์

4.1.1 การสร้างแบบ 3 มิติ เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลเป็นการวิเคราะห์ชนิด Surface Mesh แบบ 3 มิติ สามารถถูกถ่ายโอนจาก โปรแกรมด้าน CAD (Computer Aided Design) หรือจากการออกแบบโดยใช้ MFVIEW ที่เป็น Module อยู่ในโปรแกรม Moldflow

4.1.2 การหาค่าสถานะเริ่มต้นเพื่อใช้ในการทำนายการวิเคราะห์ในเบื้องต้น ของสถานะการขึ้นรูป (อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของการหลอมเหลว และเวลาในการฉีดหรืออัตราการไหล) ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ รูปร่าง (Runner)

4.1.3 การไหลที่สมดุลของโพรงแบบ: โพรงแบบมีการไหลที่สมดุลเมื่อเส้นทางการไหลที่เวลาเดียวกันมีค่าความดันที่เท่ากัน (ความดันสูงสุดที่ใช้และการสมดุลของรูปร่างที่เป็นไปได้)

4.1.4 ระบบการไหลที่สมดุลของรูว้าง การทำให้โพรงแบบเหมือนกันทั้งหมดด้วยการทำสมดุลความดันเฉพา (ความดันที่สมดุลโดยทั่วไปกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความดันสูงสุดของโพรงแบบ ดังนั้นปริมาณของรูว้างควรจะลดเพื่อให้เสียวัสดุน้อยที่สุด)

4.1.5 การพิจารณารูว้างโดยรวม การสมดุลรูว้างโดยอัตโนมัติพิจารณาจากความหนาของรูว้าง นิยมที่จะเปลี่ยนแปลงค่าทศนิยม

4.1.6 ตรวจสอบสมดุลการไหลซ้ำหลังจากการพิจารณารูว้างโดยรวมการวิเคราะห์การเติม จะทำการตรวจสอบการวางรูว้างซึ่งจะไม่มีผลต่อสมดุลการไหล

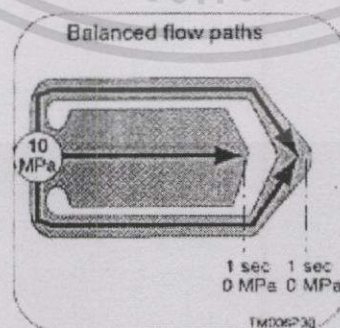
4.1.7 การจำลองการไหล (Flow Simulation) การวิเคราะห์การไหลต้องการผิวของแบบที่ถูกทำให้กลายเป็นเมช (Mesh) โดยที่เมชประกอบด้วย Element ที่เป็น 3 เหลี่ยม แต่ละ Element มี 3 Node การจำลองการไหลอาศัยการคำนวณจากแต่ละ Node และการมีจำนวน Element เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูงแต่ต้องใช้เวลาในการคิดคำนวณนาน

4.1.8 ปริมาตรควบคุม (Control Volume) ปริมาตรควบคุมคือผลรวมของปริมาตรที่จุดกึ่งกลางของ Element ที่ติดกัน โดยผลรวมของปริมาตรควบคุมคือปริมาตรของแบบจำลอง (Model) และเวลาในการเติมปริมาตรควบคุมขึ้นอยู่กับค่าการต้านทานการไหล (ความหนาของ Element และ อัตราการไหล)

4.2 หลักของการออกแบบการไหล

จุดมุ่งหมายของการออกแบบการไหลคือเพื่อให้การไหลไหลง่ายที่สุด ซึ่งมีหัวข้อที่พิจารณาดังนี้ คือ

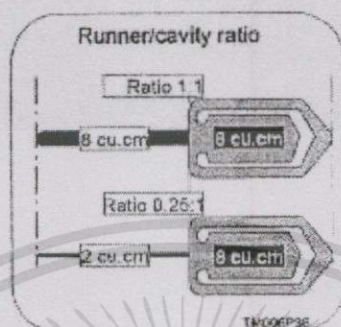
4.2.1 สมดุลการไหล (Flow Balance) และทิศทางการไหลทั้งหมดควรอยู่ในสมดุลนั้นคือเกิดการเติมที่เวลาเดียวกันด้วยความดันที่เท่ากันสามารถทำการแก้ไขโดยเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า (Gate) ความหนาของทิศทางการไหล และหรือทั้งสองอย่างดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สมดุลการไหล

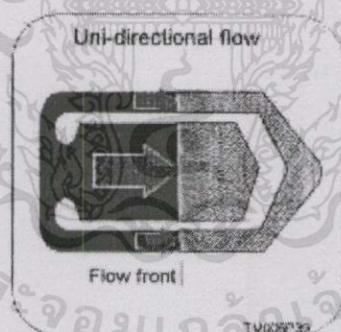
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อัตราส่วนรูปร่างต่อโพรงแบบ (Runner/Cavity Ratio) การออกแบบเพื่อให้เกิดการลดความดันมาก ๆ ควรจะมีปริมาตรวัสดุของรูปร่างต่ำที่สุดซึ่งทำได้โดยให้มีปริมาตรและอัตราส่วนของปริมาตรรูปร่างต่อชิ้นงานต่ำลงด้วยดังรูปที่ 4.2



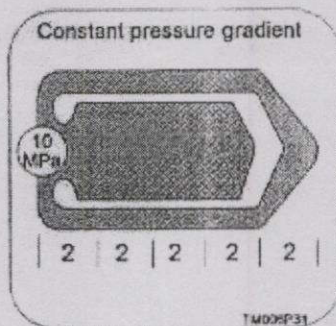
รูปที่ 4.2 อัตราส่วนรูปร่างต่อโพรงแบบ

4.2.3 ทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกัน : Uni-Directional Flow พลาสติกที่หลอมเหลวควรไหลไปในทิศทางเดียวกันด้วยหน้าตัดการไหลที่ตรง สามารถปรับปรุงโดยการปรับตำแหน่งทางเข้า ซึ่งอาจจะมีผลต่อสมดุลต่อเส้นทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ทิศทางการไหล

4.2.4 การลดลงของความดัน (Pressure Gradient) รูปแบบการเติมส่วนมากเมื่อเกิดการกระจายตัว (ความดันลดต่อความยาว) คงที่ตลอดเส้นทางการไหล จึงควรให้มีปริมาตรที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ความดันลดลง การลดลงของความดันที่คงที่จะเกิดเฉพาะในกรณีที่มีเส้นทางการไหลมีความยาวและความหนาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.4



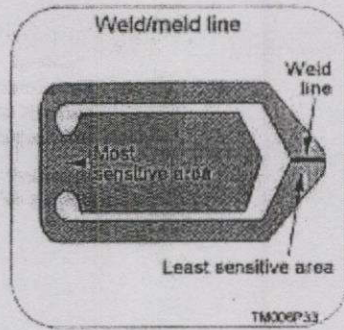
รูปที่ 4.4 การลดลงของความดัน

4.2.5 ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ความเค้นเฉือนระหว่างการเติมควรร้อยกว่าค่าวิกฤต เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในบริเวณวิกฤตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงสุดเมื่อนำไปใช้งาน ความเค้นอาจลดลงโดยใช้อุณหภูมิที่สูง หรือความดันต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.5



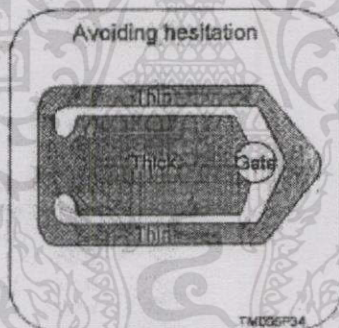
รูปที่ 4.5 ความเค้นเฉือน

4.2.6 เส้นเชื่อม/เส้นการหลอม (Weld/Meld Line) เกิดขึ้นเมื่อการไหล 2 ทิศทางมาชนกัน เกิดในผลิตภัณฑ์ที่มีหลายทางเข้าซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ตำแหน่งของเส้นเชื่อมและเส้นการหลอมควรอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ว่องไวและในตำแหน่งที่ยอมรับได้สามารถย้าย ตำแหน่งได้โดย เปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้า หรือ โดยสมดุลการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.6



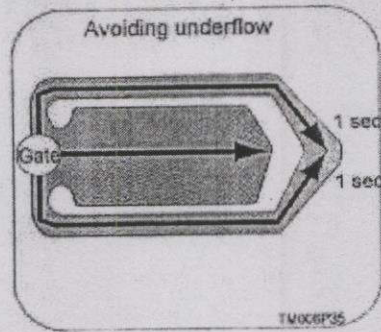
รูปที่ 4.6 เส้นเชื่อม/เส้นการหลอม

4.2.7 ความไม่แน่นอน (Hesitation) ของตำแหน่งของทางเข้าห่างจากจุดที่การไหลแยกเข้าสู่บริเวณการเคลื่อนที่หนาและบาง สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการไหลหยุดชั่วคราวในบริเวณที่บางทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในขณะที่ส่วนที่หนากว่าต้องการเพียงความดันในการเติมเท่านั้น ความไม่แน่นอนของพลาสติก อาจจะไม่แข็งตัวโดยยังไม่เกิดการเติมเต็มในบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.7



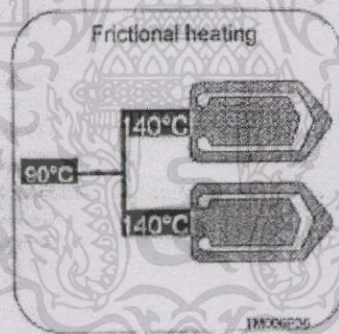
รูปที่ 4.7 ความไม่แน่นอน

4.2.8 การไหลย้อนกลับ (Under Flow) เกิดขึ้นก่อนจบการเติมเต็มเมื่อการไหลพบกันและการไหลย้อนกลับด้วยตัวของมันเอง ก่อนการไหลย้อนกลับการไหลจะหยุดและสูญเสียความร้อน การไหลย้อนกลับทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพไม่ดีโดยจะเกิดรอยที่ผิวและมีโครงสร้างไม่แข็งแรง การหลีกเลี่ยงการเกิดการไหลย้อนกลับ (Under flow) ทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าให้ภาคตัดการไหลพบกันที่เวลาเดียวกันที่จุดสิ้นสุดการเติมดังแสดงในรูปที่ 4.8



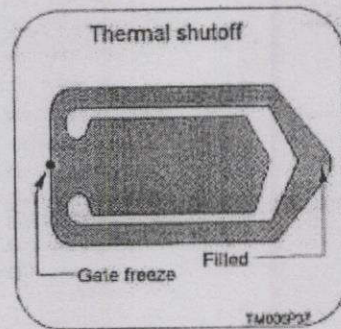
รูปที่ 4.8 การไหลย้อนกลับ

4.2.9 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน (Frictional Heating) การออกแบบรูปร่างเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ทางเข้าโดยทำการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน ส่งผลต่อการลดลงของความเค้นในผลิตภัณฑ์โดยปราศจากการเสียสภาพ เนื่องจากเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นและปริมาณลดลงเมื่ออยู่ในรูปร่างที่บางดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน

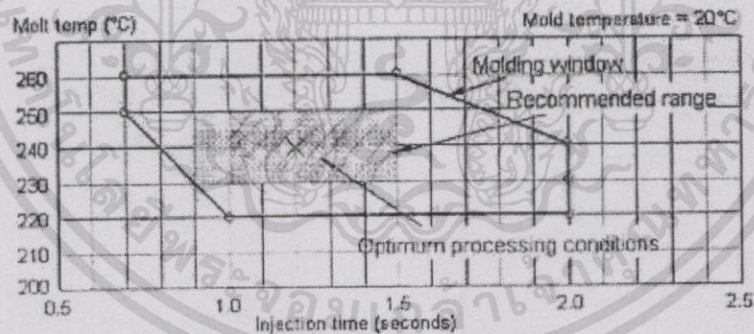
4.2.10 การปิดตัว (Thermal Shutoff) การออกแบบรูปร่างสำหรับการแข็งตัว (Thermal Shutoff) เมื่อชิ้นงานถูกเติมและอัดตัวพอดี เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด การอัดตัวมากเกินไป (Over Pack) ซึ่งเป็นสาเหตุของการบิดงอหรือการไหลย้อนกลับหลังจากชิ้นงานถูกเติมเต็ม ซึ่งสาเหตุทั้งสองอย่างทำให้เกิดความเค้นในผลิตภัณฑ์ การออกแบบรูปร่างเพื่อใช้ควบคุมการไหลเนื่องจากมีผลมากกว่าทางเข้าและ มีความว่องไวน้อยในการเกิด ความไม่แน่นอนและผลของความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การปิดตัว

4.3 สถานะของกระบวนการ (Processing condition)

สถานะของกระบวนการคือช่วง (Window) ของเวลาและอุณหภูมิในการฉีด โดยที่ใน Window ผลิตรถยนต์ที่ยอมรับได้ควรทำในช่วงของการเปลี่ยนแปลง รวมถึงวัสดุและการกำหนดเครื่องจักร Molding window เป็นเวลาในการฉีด 2 ช่วงหรือมากกว่าสำหรับอุณหภูมิของแบบพิมพ์ และ อุณหภูมิในการหลอมเหลวซึ่งเป็นผลในช่วงสถานะที่ยอมรับได้ สถานะนี้รวมถึง อุณหภูมิ ความดัน และความดันโดยสถานะของกระบวนการที่เหมาะสมจะอยู่ในค่าประมาณกลางของ Window ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 Molding Window

4.4 การประมาณเส้นทางการไหลหลัก (Estimate Dominant Flow Path)

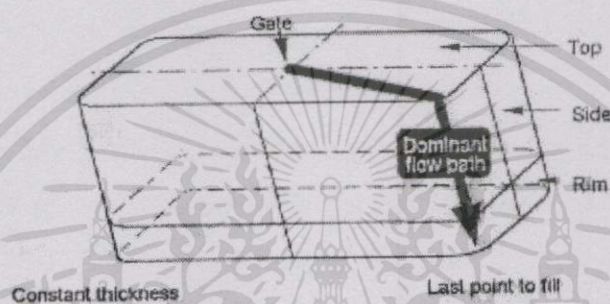
ระยะการไหลหลักคือเส้นทางการไหลระหว่าง ทางเข้า (Gate) และจุดสุดท้ายที่เกิดการเติม (Last Point to Fill) โดยเส้นทางการไหลนี้เป็นค่าหลักของสถานะของกระบวนการและสามารถกำหนดได้ จากการวิเคราะห์การไหลที่ใช้ความดันต่ำที่สุด ส่วนค่าของความดันที่ต้องการของเส้นทางการไหลหลักหาได้จากความดันสูงสุดซึ่งสามารถใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักร โดยมีเส้นทางการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลเป็นพื้นฐานของการหาสถานะของกระบวนการซึ่งทิศทางการไหลหลักคือ การไหลที่ง่ายที่สุด (มีค่าการต้านทานต่ำที่สุด) สำหรับการไหลจากทางเข้าไปยังจุดสุดท้ายที่เกิดการเติม

4.5 การประมาณหาจุดสุดท้ายที่เกิดการเติม (Estimate last point to fill)

ถ้าพื้นผิวทั้งหมดที่พบมีความหนาเท่ากัน จุดสุดท้ายที่เกิดการเติมคือจุดที่ห่างที่สุดจากทางเข้า และถ้าความหนาของผิวแตกต่างกันจุดสุดท้ายที่เกิดการเติมจากทางเข้าอาจเป็นจุดที่แสดงระยะทางที่มีความต้านทานสูงสุด(มีผนังบางและระยะทางมาก)ในการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การหาระยะทางการไหลหลัก

4.6 การสร้างเส้นทางการไหลหลักแบบ 2 มิติ

การวิเคราะห์แบบ 2 มิติเพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบควรกำหนดให้มีเส้นทางการไหลหลักน้อยที่สุด โดยให้สถานะของกระบวนการที่ใช้ในการเติมควรเติมก่อนระยะทางอื่น ๆ การวิเคราะห์แบบ 2 มิติคือจัดเป็นอนุกรมของจุดที่ต่อเนื่องโดยทำให้ผิวเกิดเป็นรูปทรงของผิวหน้าตัดโดยที่ผลของการวิเคราะห์ที่แน่นอนหาได้จากจำนวนผิวตลอดความยาวของการไหล และพื้นที่หน้าตัดที่แน่นอนโดยไม่มีผลเนื่องจากความกว้างของเส้นทางการไหลและทิศทางการเข้ามาเกี่ยวข้องแบบจำลองสองมิติที่ได้สามารถอธิบายได้ทั้งเส้นทางการไหลในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือระยะทางการไหลเพียงทางเดียวซึ่งแสดงทิศทางการไหลหลัก ขั้นตอนการสร้างแบบ 2 มิติสำหรับเส้นทางการไหลหลักมีดังนี้

1. พิจารณาเส้นทางการไหลหลักใน 2 มิติ
2. สร้างจุดคงที่ซึ่งเชื่อมโยงเป็นเส้นทางการไหลหลัก
3. สร้างพื้นผิวระหว่างแต่ละคู่ของจุด
4. ออกแบบรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของแต่ละผิว

4.6.1 ข้อบังคับของการสร้างแบบจำลองเส้นทางการไหลหลัก

4.6.1.1 ควรมีพื้นผิวอย่างน้อย 6 พื้นผิวตลอดเส้นทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.2 ความยาวสูงสุดของพื้นผิวควรเป็น 20 mm (วัสดุที่ว่องไวต่อความร้อนมากควรมีความยาวน้อย)

4.6.1.3 พื้นผิวทั้งหมดควรมีความยาวเท่ากัน (โดยทั่วไปจะเป็น 10 mm)

4.6.1.4 รูปทรงของพื้นที่หน้าตัดที่ได้สำหรับรายละเอียดของโปรแกรมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมและแนวรัศมี

4.6.1.5 กำหนดให้รูปทรงกลมและรูปวงแหวนเป็นระบบของรูวิ้ง

4.6.2 การตรวจสอบฐานข้อมูลของวัสดุ

ข้อมูลพื้นฐานของ Mold flow สามารถเข้าไปยัง โปรแกรมคำสั่งการค้นหาที่เรียกว่า MADRAS หรือ จากการตรวจสอบค้นหาวัสดุ (MATSEL:Material Selection) MADRAS คือการตรวจสอบวัสดุในฐานข้อมูล โดยสามารถช่วยดังนี้

4.6.2.1 ให้ข้อมูลของวัสดุใน ASC II (แอสกีรหัสของคอมพิวเตอร์)

4.6.2.2 อ่าน ASC II ไปยังฐานข้อมูลส่วนบุคคล

4.6.2.3 แก้ไขข้อมูลของวัสดุ

4.7 การออกแบบรูวิ้งที่เหมาะสม

ผลลัพธ์ที่ต้องการออกแบบรูวิ้งที่เหมาะสมควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1 ระบบรูวิ้งควรทำให้การไหลสมดุลและทำให้ได้สถานะของกระบวนการที่เหมาะสมภายในแต่ละชิ้นงาน

2 การรวมกันของตำแหน่งทางเข้าและขนาดของรูวิ้งใช้ในการควบคุมการเติมให้เต็มในแต่ละชิ้นงานและเหตุผลที่ต้องการการออกแบบรูวิ้งที่เหมาะสม คือ

1 โพรงแบบที่อยู่ใกล้รูฉีด (Spure) อาจจะเต็มเต็มก่อน

2 น้ำหนักของการขึ้นรูปที่ไม่สมดุลซึ่งแสดงได้จากโพรงแบบที่อยู่ภายในจะมีน้ำหนักมากกว่าโพรงแบบที่อยู่ภายนอก

3 เนื้อวัสดุจะถูกบังคับให้ออกจากแม่พิมพ์ตรงส่วนที่ถูกกำหนดโดยส่วนที่มีความดันมากเกินไป

4 การนำชิ้นงานออกจากแบบอาจเกิดปัญหาเนื่องจากเกิดอัดตัวมากเกินไป (Over Pack) ของวัสดุที่จะนำไปสู่การยึดตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์

5 ชิ้นงานภายในจะถูกทำให้มีขนาดใหญ่มากเกินไปโดยการขยายตัวของวัสดุภายหลังจากนำชิ้นงานออกจากแบบ

6 จำนวนชิ้นที่แข็งตัว องศาการจัดเรียงตัว ปริมาตรของการหดตัว และสมบัติทางกาย

ภาพของผลิตภัณฑ์สำหรับในแต่ละชนิดจะต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7 การสมดุลรูปร่างต้องเหมาะสมกับความเป็นไปได้ที่มากที่สุดของหน้าต่าง (Window) ในการนำไปใช้งาน

ในกรณีที่โครงแบบมีหลายรูปร่างควรมีระบบดังนี้

- 1 ลดความดันที่ต้องการสำหรับการเติมที่ต้องใช้ความดันสูง
- 2 กำหนดให้ตำแหน่งของรอยเชื่อมอยู่ในบริเวณที่รับได้
- 3 ควบคุมรูปแบบการเติมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการอัดตัวมากเกินไป (Over Pack) และการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นได้

4.7.1 ระบบรูปร่าง

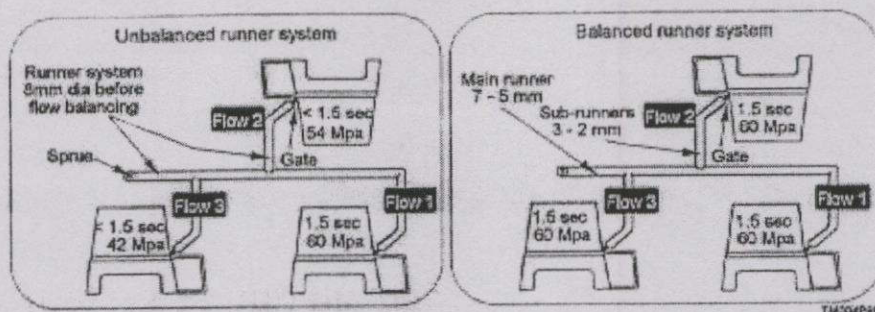
ระบบรูปร่างประกอบด้วยรูฉีก รูปร่างและทางเข้าในส่วนของระบบรูปร่างควรทำการสมดุลและออกแบบให้เกิดการไหลอย่างสมดุล โดยการเปลี่ยนขนาดภาคตัดขวางรูปร่าง ตลอดเส้นทางการไหล และสำหรับการวิเคราะห์ระบบ โครงแบบไม่ควรเติม โครงแบบจนเต็มแบบจำลองที่สร้าง ควรทำการวิเคราะห์แบบที่สร้างและทำการวิเคราะห์เวลา ในแต่ละชั้นงานซึ่งสามารถกำหนดโดยรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เท่ากัน และมีปริมาตรเท่ากับชั้นงาน

4.7.2 การทำสมดุล

จุดมุ่งหมายของการทำสมดุลคือเติมเต็ม โครงแบบทุก โครงแบบที่ความดันและเวลาเดียวกันด้วยการใช้ระบบรูปร่างที่ทำการควบคุมการไหลเนื่องจากระบบรูปร่างอาจทำการเปลี่ยนสถานะของกระบวนการที่แท้จริงในขณะที่วัสดุเข้าไปใน โครงแบบได้นอกจากนี้ความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานอาจมีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลวที่เหมาะสมและความยาวของระบบรูปร่างก็มีผลเช่นเดียวกับเวลาที่ใช้ในการฉีด

4.7.3 การวิเคราะห์โครงแบบใน 3 มิติ

การสมดุลรูปร่างที่ไปสู่โครงแบบควรให้เป็นรูปแบบเส้นทางการไหลของช่องรูฉีก รูปร่าง ทางเข้าของโครงแบบเป็นไปอย่างเหมาะสมรวมทั้งรูปร่างอื่น ๆ ควรปรับแต่งให้มีสถานะเดียวกับโครงแบบที่ต้องการ



รูปที่ 4.13 แสดงการหาชิ้นงานที่มีขนาดเท่ากัน

การคำนวณ โพรงแบบที่มีขนาดเท่ากัน ต้องการค่าดังต่อไปนี้

1. สภาวะของกระบวนการที่เหมาะสม (อุณหภูมิของแบบ อุณหภูมิของการหลอมเหลว และเวลาในการฉีด) ถูกกำหนดด้วยแบบ 2 มิติ
2. ปริมาตรรวมของแบบชิ้นงาน 3 มิติ ถูกทำการเมช หรือทำการคำนวณอื่น ๆ
3. ฐานข้อมูลของวัสดุ (ผู้ผลิตและรหัสสินค้า) ใช้ในการหาสภาวะของกระบวนการที่เหมาะสม
4. จุดที่ทำการฉีด (Injection Point)
5. สภาวะของกระบวนการที่ใช้สำหรับ โพรงแบบและ โพรงแบบที่มีขนาดเท่ากัน มีค่าเท่ากัน
6. โพรงแบบที่มีขนาดเท่ากันควรมีปริมาตรเท่ากันและความดันลดเท่ากัน
7. ถ้าสภาวะของกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง โพรงแบบที่มีขนาดเท่ากันจะมีค่าไม่เท่ากัน

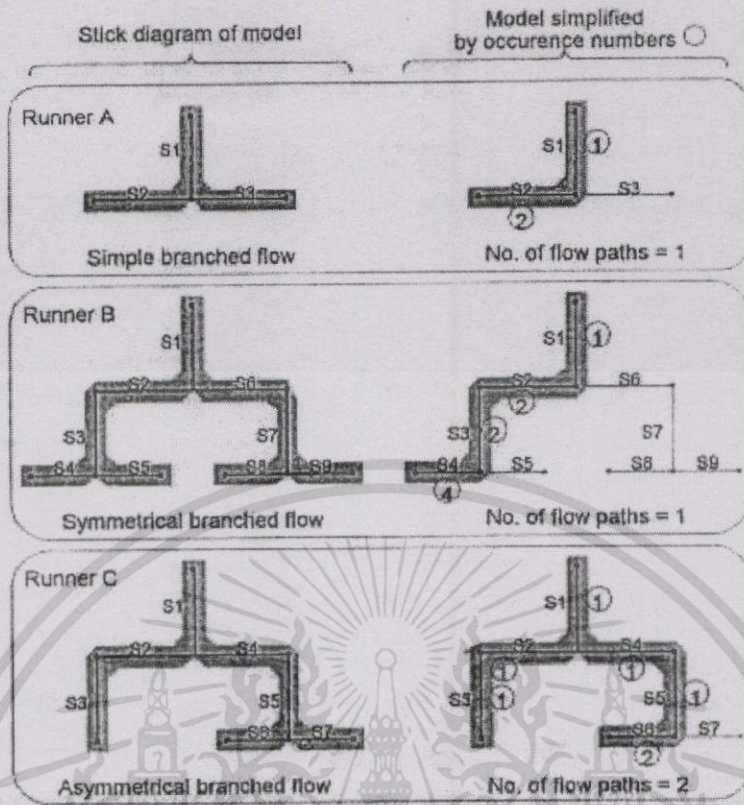
4.7.4 การสร้างแบบ 2 มิติสำหรับระบบรูวึ่งที่มีชิ้นงาน

ธรรมชาติรูปแบบการไหล (Flow Type) ของระบบรูวึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 รูปแบบคือ

- Round อธิบายด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง ใช้ในภาคตัดขวางของวงกลมของรูวึ่งร้อน และเย็น
- Annular อธิบายด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของภาคตัดขวางของวงแหวนที่ทำให้ร้อนทั้งภายนอกหรือภายใน
- Rectangular (สำหรับอธิบายโพรงแบบที่มีขนาดเท่ากัน) ใช้อธิบายโดยความหนาและความกว้าง

ตัวแปรของจำนวนที่ปรากฏหมายถึง จำนวนที่กำหนด (รูปทรงและปริมาตร) ในเส้นทางการไหลส่วนจำนวนที่ปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ยของการลดเวลาเพื่อสร้างแบบที่มีสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แนวทางการไหล

4.7.5 การสมดุลรูว้างไปสู่ชิ้นงาน

จุดมุ่งหมายของการสมดุลรูว้างไปสู่ชิ้นงานเพื่อลดปริมาตรและนำ โพลีเมอร์ที่ต้องการรักษา อัตราการไหลและอุณหภูมิของกระบวนการไปสู่โพรงแบบเนื่องจากสภาวะของกระบวนการที่เหมาะสมอาจเปลี่ยนเมื่อพอลิเมอร์ถูกส่งผ่านระบบรูว้าง

การออกแบบระบบรูว้างสามารถทำการสมดุลใน 2 มิติ และ 3 มิติ

ในกรณีของการสมดุลรูว้างใน 2 มิติอาจให้ผลสำเร็จออกมาได้โดยไม่ต้องการแบบ 3 มิติ เมื่อมีเส้นทางการไหลหลักแต่อาจต้องมีการออกแบบวิเคราะห์ที่มีรูเข้าหลายทาง เมื่อมีความยาวของทางไหล (Flow Length) ที่ต่างกัน ทั้งนี้มีวิธีคิดโดยใช้ประสบการณ์ส่วนในกรณีของการสมดุลรูว้างใน 3 มิติต้องการแบบ 3 มิติที่ถูกเมฆและมีการออกแบบการสมดุลรูว้างที่สามารถใช้ขนาดที่ออกแบบและนำเข้าไปสู่การเชื่อมโยงของผลของความไม่แน่นอน (Hesitation) สามารถรวมรูปแบบการฉีดและการเติมแบบอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อสามารถทำสมดุลได้ งานที่มีหลายรูเข้า ถ้าความยาวของการไหลแต่ละทางเข้าเท่ากันการเติมโพรงแบบทั้งหมด ณ เวลาเดียวกันและสามารถควบคุมการเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและให้มีความเค้นต่ำที่สุด โดยปราศจากการใช้อุณหภูมิในการหลอม

เหลวที่สูงและจำกัดปริมาตรเนื้อของรูวึ่งต่ำสุดให้สัมพันธ์กับปริมาตรของโพรงแบบเพราะสามารถเกิดการสูญเสียความดันในระบบรูวึ่ง

รูวึ่งที่มีความเหมาะสมเมื่ออัตราการไหลสำหรับโพรงแบบเหมาะสมอุณหภูมิกับการไหลของเหลวเหมาะสมสำหรับโพรงแบบและความเค้นเฉือนมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุด สำหรับวัสดุแต่ละชนิด

4.7.6 เวลาในการฉีด/อัตราการไหล

เมื่อของไหลไหลผ่านรูวึ่ง เวลาที่ใช้ในการฉีดแต่ละโพรงแบบ ควรเพิ่มขึ้น เมื่อมีผลของความยาวของรูวึ่ง และการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยการหาเวลาที่ถูกต้อง และอัตราการไหล สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{อัตราการไหลเข้าสู่โพรงแบบ} = \frac{\text{ปริมาตรของโพรงแบบ} \times \text{จำนวนโพรงแบบ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการฉีด โพรงแบบ}}$$

การลดความเค้นเฉือน ได้ด้วยการเพิ่มขนาดรูเข้าและการทดแทนความร้อนเนื่องจากความเค้นทำได้โดยการลดอุณหภูมิการไหลของเหลวที่รูฉีด

4.7.7 การสมดุลการไหลโดยรวม

มีหลักการดังนี้

4.7.1 ไม่ทำการปรับขนาดของรูฉีด ทางเข้า และโพรงแบบ ขณะทำการสมดุลควรกำหนดให้มีค่าคงที่

4.7.2 การวิเคราะห์สมดุลการไหล ควรคำนึงถึง ขนาดของรูวึ่งสำหรับการไหล บนค่าเฉพาะของความดันที่สมดุล (ความดันสูงสุดของเส้นทางการไหลหลัก)

4.7.3 ความดันสุดท้ายสำหรับการทำสมดุลหาได้โดยการทดสอบหลาย ๆ ค่าของการสมดุลและการวิเคราะห์ทั้งหมด

ในกรณีการทำสมดุลที่ความดันสูงขึ้นแล้วสำหรับรูวึ่งที่บางครั้งเพิ่มความดันครั้งละน้อย ๆ ความดันที่สูงขึ้นควรใช้เฉพาะเวลาเริ่มต้นตัวของส่วนรูวึ่งที่บางที่สุดควรลดเป็น 80 % ของเวลาเริ่มต้นตัวของโพรงแบบ ส่วนเวลาในการเริ่มต้นตัวอาจลดลงมากกว่านี้ได้โดยลดขนาดของรูฉีด

ซึ่งขนาดของรูฉีดที่ส่วนบนควรเหมาะสมกับขนาดของหัวฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก

4.7.8 การสมดุลรูวึ่งใน 3 มิติ

การวิเคราะห์การเติมเต็มอย่างรวดเร็ว ควรทำในระบบของรูวึ่งก่อนทำการสมดุล ถ้าออกแบบแล้วมีการเปลี่ยนแปลงความหนาอย่างมาก หรือวัตถุดิบมีความว่องไว สมดุลรูวึ่งแบบหลายโพรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบควรรนำมาใช้แทนการทำสมมูลรูปร่างอย่างรวดเร็ว การคำนวณอัตราการไหลและอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวควรใช้การวิเคราะห์อย่างรวดเร็วสำหรับการทำสมมูลรูปร่างที่ต้องการสมมูลของความดันควรมีค่าสูงกว่าความดันในการเดิมสูงสุด ในการวิเคราะห์การเดิมเต็มอัตราการไหลควรมีค่าเท่ากับการวิเคราะห์การเดิมอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิในการหลอมเหลวควรเปลี่ยนแปลงโดยให้รวมกับความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน

4.7.9 การเบี่ยงเบน

เวลาที่ไม่สมมูลระหว่างชิ้นงานแรกเต็มและชิ้นงานสุดท้ายควรมีค่าต่างกัน 5 % ส่วนความดันรวมควรรอยู่ในช่วง 2 MPa จากความดันที่ทำให้การสมมูลและถ้าความแตกต่างสูงสุดระหว่างความดันที่ต้องการให้ลด และความดันที่ต้องการให้เกิดขึ้นจริงลดลง ทารด้วยความดันที่ต้องการให้ลดควรมีค่าเท่ากับ 0.7 หากเป็นในอุดมคติจะให้ค่าเท่ากับศูนย์

4.7.10 การตรวจสอบผลของการสมมูลรูปร่าง

ควรมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- 1 รูปแบบของความดันควรมีค่าเสมอ
- 2 เวลาที่ใช้ในการเดิมเต็มควรมีค่าเสมอ
- 3 อุณหภูมิของรูเข้าไม่ควรสูงเกินกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวที่เหมาะสม
- 4 เวลาในการเย็นตัวสูงสุด รูปร่างทั้งหมดควรแข็งตัวพร้อมกันหรือแข็งตัวช้ากว่าโพรงแบบเพื่อไม่ให้ผลของความดันในการอัดตัวเป็นปัญหา
- 5 ปริมาตรของรูปร่าง รูปร่างที่บางกว่าหมายถึงการประหยัดวัสดุเวลาในการเย็นตัวและรอบการทำงาน
- 6 ความเค้นสูงสุดในโพรงแบบควรมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดของวัสดุ
- 7 ความเค้นสูงสุดของทางเข้า ควรมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของวัสดุ

4.8 การออกแบบที่เหมาะสม

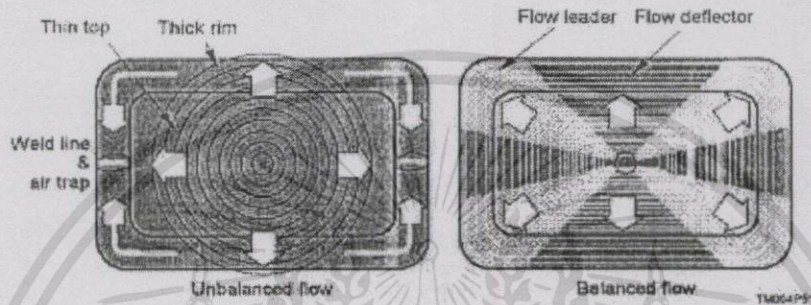
สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ

- 1 รูปแบบการไหลที่ได้มีค่าเท่ากันที่เวลาเดียวกัน
- 2 สมดุลการไหลทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดี และอาจลดเวลาในการผลิตทางการค้าได้

ด้วยเหตุผลจึงต้องมีการออกแบบโพรงแบบให้เหมาะสมโดยอาศัยสภาวะของกระบวนการที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์แบบ 2 มิติก่อน โดยมีข้อที่ต้องพิจารณาดังนี้

- 1 อุณหภูมิหลอมเหลว $-20 \leq$ อุณหภูมิ ณ จุดเติมเต็ม = อุณหภูมิหลอมเหลว
- 2 ความเค้นเฉือน \leq ค่าวิกฤตของวัสดุ
- 3 $70 \text{ MPa} \leq$ ความดันที่โพรงแบบ
- 4 $100 \text{ MPa} \leq$ ความดันที่โพรงแบบและที่รูรั่ว

เมื่อจำนวนของความแตกต่างของเส้นทางการไหลมีขึ้น ส่วนที่หนาที่สุดของสมดุผลการไหลสามารถหาได้เฉพาะจากการวิเคราะห์ 2 มิติ



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการไหลอย่างไม่สมดุล

รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการไหลอย่างไม่สมดุล การขยายของภาคตัดขวางของหน้าการไหล จะทำให้การไหลใช้เวลาที่สั้นลง ซึ่งอาจเกิดการเติมเต็มอย่างต่อเนื่อง (Overpack) ขณะที่วัสดุวิ่ง (Racetrack Effect) รอบด้านที่มีความหนาของขอบ

- การเกิดการอัดตัวมากเกินไป Overpack จะนำไปสู่การบดขยี้ของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากที่ออกจากแบบเมื่อวัสดุที่เป็น racetrack พบกับวัสดุที่วิ่งจากเส้นทางอื่น เกิดเป็นเส้นเชื่อมและอาจเกิดอากาศแทรกอยู่
- ส่วนที่เก็ครอบที่ไม่ต้องการเช่น เส้นเชื่อม อากาศแทรกอยู่ จะทำให้เกิดบริเวณที่เปราะบางของผลิตภัณฑ์
- การเปลี่ยนแปลงความหนา ทำให้การไหลทั้งหมดไปยังขอบของแบบได้ในเวลาเดียวกันและความดันเดียวกัน
- ส่วนที่ไหลนำ (Flow Leader) คือบริเวณหนาในผนังแบบที่ทำให้การไหลไปไม่ถึงขอบของผนังชิ้นงานก่อน
- ส่วนที่ไหลตาม (Flow Deflector) คือบริเวณบางในผนังแบบที่ทำให้การไหลไปไม่ถึงขอบของผนังชิ้นงานที่หลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 การวิเคราะห์โพรงแบบในแบบ 3 มิติ

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์ชิ้นงานในระบบ 3 มิติเพื่อให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเช่น เส้นเชื่อมและการอัดตัวมากเกินไป (Overpack) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสมมูลของเส้นทางการไหลด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการวิเคราะห์ โพรงแบบในแบบ 3 มิติดังนี้

1 สมมูลการไหลของโพรงแบบ 3 มิติต้องการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการออกแบบโดยเปลี่ยนความหนาของเส้นทางการไหล

2 การเปลี่ยนแปลงค่าอาจต้องการการตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการซึ่งต้องการแบบ 2 มิติ

3 การสมมูลโพรงแบบ 3 มิติเป็นการรวมทั้งการวิเคราะห์ 2 มิติและ 3 มิติไว้ด้วยกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โพรงแบบในแบบ 3 มิติจะทำให้ทราบถึง

1 เวลาที่ใช้ในการเติม ปลายของโพรงแบบทุกจุดควรเติมที่เวลาเดียวกัน
2 ความดันที่ใช้ในการเติมเต็มที่ปลายของโพรงแบบทุกจุดควรเติมด้วยความดันเดียวกัน

3 ระดับความเค้นไม่ควรมากเกินไปกว่าค่าสูงสุดของวัสดุชนิดที่ใช้ ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่ให้กับผลิตภัณฑ์ ขณะที่อัตราการเค้น (Shear Rate) จะให้สังเกตที่ทางเข้า (Gate)

4 อุณหภูมิภาคหน้าการไหล (Flow Front) ไม่ควรลดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเกิน 20°C อุณหภูมิส่วนหน้าของการไหล คืออุณหภูมิของพลาสติกขณะที่ทำการฉีด

5 อุณหภูมิที่สิ้นสุดการเติมกำหนดให้เป็น Instant Temperature ควรมีการกระจายค่าใกล้เคียงกัน

6 ควรไม่มีการแทรกตัวของอากาศ (Air Trap) หรือทำการกำหนดพื้นที่ที่จะทำการระบายออกไปได้ง่ายโดยทั่วไปไม่นิยมให้เป็นบริเวณของปลายของแม่พิมพ์ รอยเชื่อมควรจะไม่เห็นหรือให้มีในบริเวณที่มองไม่เห็น

7 เวลาในการเย็นตัวควรมีค่าสม่ำเสมอและต่ำที่สุดเพื่อเป็นการลดรอบการทำงาน (Cycle Time) เวลาในการเย็นตัวถูกกำหนดจากอุณหภูมิที่เติมเสร็จไปยังอุณหภูมิที่ทำการนำชิ้นงานออกสำหรับวัสดุแต่ละชนิดมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

7.1 เวลาการเติมเต็มที่เป็นจริงของบริเวณต่างๆในชิ้นงานสามารถหาได้โดยการใช้คำสั่ง FNR (Find Nodal Result) หรือการใช้เมนูหลักแสดงผลสำหรับ Node ที่ถูกเลือก

7.2 เส้นทิศทางการไหลควรตั้งฉากกับเส้น โครงร่างและควรแสดงการสมมูลการไหลของแรงที่ใช้ในการยึดแบบ (Clamp Tonnage)

7.3 เป็นการแสดงแรงที่ต้องการยึดแบบที่ปิดเมื่อใช้ความดันสูงสุดในการฉีด

7.4 กำหนดระนาบ X,Y เป็นระนาบของแม่พิมพ์ขณะทำการวิเคราะห์

7.5 เป็นการแสดงปริมาตรทั้งหมดของพื้นที่ที่ถูกทำการเมช (Mesh) กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

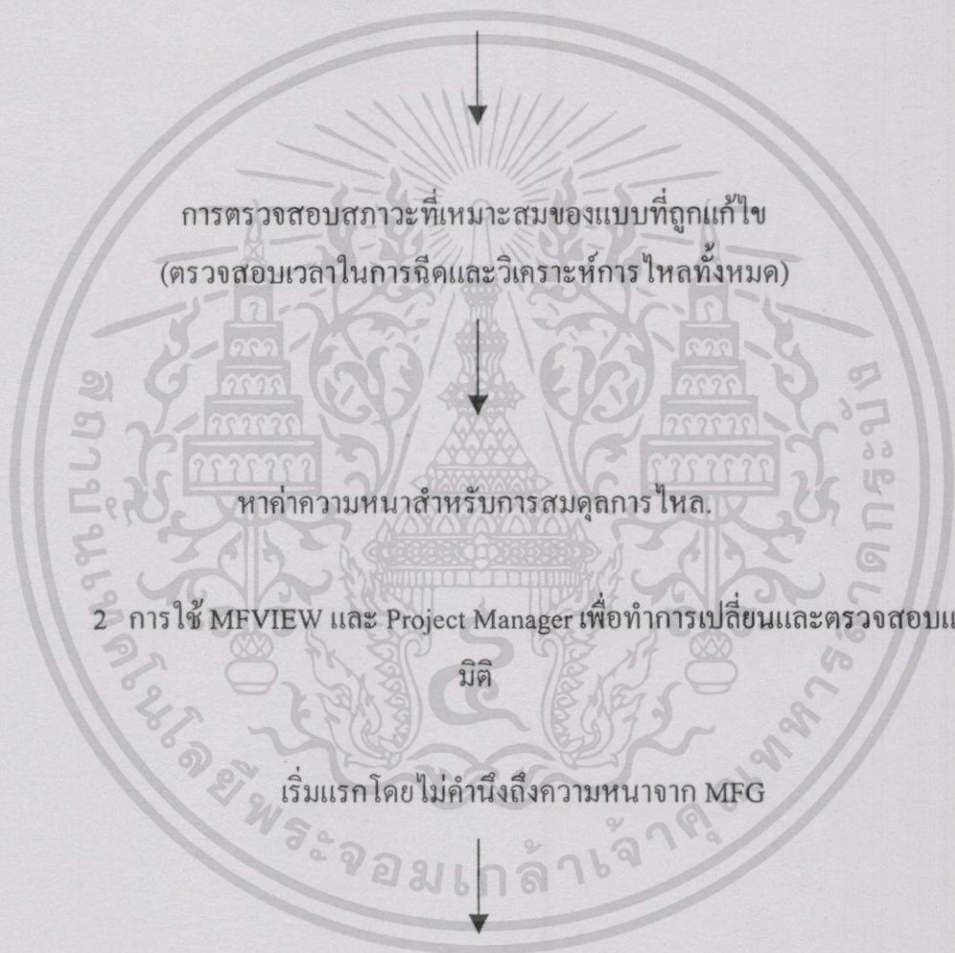
4.8.2 การสมดุลการไหลในแบบ 2 มิติ

จุดมุ่งหมายของการสมดุลการไหลในแบบ 2 มิติเพื่อสามารถหาสาเหตุของแบบจำลองและคุณภาพที่กำหนดไว้ทำให้สามารถลดน้ำหนักผลิตภัณฑ์และเวลาของรอบการทำงานสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนความหนาของผิวงานหรืออาจมีการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการ

3.8.3 การสมดุลการไหลทั้งหมดมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1 การใช้ MFG เปลี่ยนแปลงและตรวจสอบแบบเริ่มแรกใน 2 มิติ

การเปลี่ยนความหนาของเส้นทางการไหล



ทำการวิเคราะห์การออกแบบซ้ำ

เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบ 3 มิติด้วยผลของการออกแบบเริ่มแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.4 การสมดุลงานตัน

เริ่มต้นด้วยความดันที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการเพื่อเติมเต็มในเส้นทางกรไหลหลัก ถ้าความหนาที่ได้มีค่าน้อยสามารถทำการลดความดันหรือนำพื้นที่บางเกินไปไปทำการสมดุลการไหลภายหลังการสมดุลงานตันนิยมทำเป็นแบบ 3 มิติ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการเปลี่ยนความหนาของแบบ 3 มิติและทำการตรวจสอบสมดุลการไหลทั้งนี้เนื่องมาจากการไหลในแบบ 3 มิติสามารถทำการสมดุลได้โดยการใช้ flow leader หรือใช้ Flow Detector (Flow Leader) คือการเพิ่มความหนาขณะที่ Flow Detector คือการลดความหนา) โดยมีขั้นตอนการสมดุลการไหลในแบบ 3 มิติดังนี้

- 1 เปลี่ยนความหนาของเส้นทางกรไหลโดยทำตามคำแนะนำของ MFG
- 2 ทดลองการวิเคราะห์การเติมอย่างรวดเร็วบนแบบ 3 มิติที่ทำการแก้ไขแล้ว
- 3 ตรวจสอบการไหลที่ทำการสมดุล
- 4 เปรียบเทียบผลที่ได้ด้วยผลของแบบเริ่มแรก

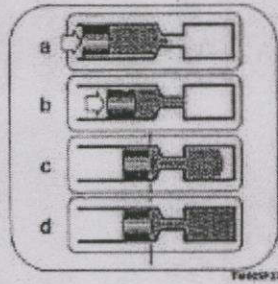
4.9 รูปแบบการเติมเต็มที่เหมาะสม (Optimum Packing Profile)

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์รูปแบบการฉีดอัดเพื่อทำการประมาณค่าการกระจายตัวของปริมาตรที่หดตัว เมื่อชิ้นงานจำลองจะกำหนดการวิเคราะห์รูปแบบการฉีดอัดและการฉีดอัดที่เหมาะสมควรมีการหดตัวและการบดอัดที่น้อยที่สุด โดยทำการทดแทนปริมาตรที่หดตัวของโพลิเมอร์ ในขณะที่เย็นตัว

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์การฉีดอัดมีดังต่อไปนี้

- 1 ระดับของความดันในการฉีดอัด เมื่อโพลิเมอร์แข็งตัวสามารถหาค่าปริมาตรการหดตัวได้
- 2 การลดความดันเป็นการเพิ่มปริมาณการหดตัว ขณะที่การเพิ่มความดันเป็นการลดปริมาตรแต่อาจจะมีผลทำให้เกิดรอยบวมตัว และล้นออกมานอกแบบ
- 3 ความดันเป็นผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้โพลิเมอร์เกิดการแข็งตัวแข็งตัว
- 4 ตัวแปรที่สำคัญต่อการเติมเต็มมี 2 อย่างคือ ความดันและเวลา
- 5 การฉีดอัดจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการอัดตัวของวัสดุและปริมาณการหดตัว

พลาสติกที่หลอมเหลวที่ความดันในการฉีดขึ้นรูป สามารถเกิดการอัดตัวได้ 15 % ของปริมาตรของโพรแกรมเนื่องจากความสามารถในการอัดตัวของวัสดุขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการฉีดจริงซึ่งอาจจะนานเกินกว่าเวลาที่กำหนดในการฉีด

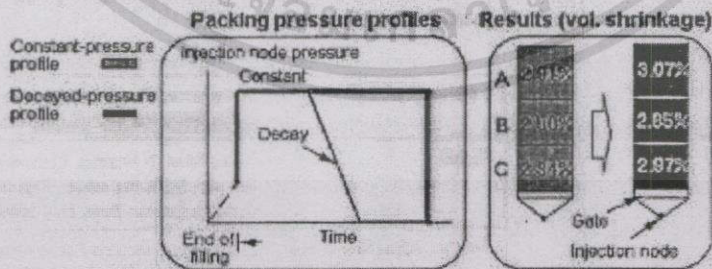


รูปที่ 4.16 แสดงช่วงเวลาในการฉีดขึ้นรูป

ส่วนปริมาตรที่เกิดการหดตัวมีผลทำให้รูปทรงขนาดของชิ้นงานลดลงพลาสติกเย็นตัวจากของหลอมเหลวไปเป็นของแข็งจะมีปริมาตรเมื่อการหดตัวประมาณ 25 % ถ้าการหดตัวสม่ำเสมอ ชิ้นงานจะไม่เสียรูปและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูป ส่วนมากจะมีการหดตัวน้อยในกรณีนี้การบิดงอเกิดขึ้นเมื่อมีการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอและถ้าบริเวณที่ชิ้นงานหดตัวไม่เท่ากัน ความเค้นจะเกิดขึ้นในชิ้นงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของชิ้นงานเสียสภาพ หรือแตกได้ง่ายภายหลังการกระจายตัวของคาร์บอน ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงเวลาความดันเดิมเดิม(ในทางอุตสาหกรรม เวลาที่ใช้ในการฉีดในบางครั้ง หมายถึงเวลาที่คงไป ซึ่งเวลาที่คงไว้รวมทั้งเวลาในการเดิมเดิม และเวลาในการเย็นตัว)การเปลี่ยนแปลงความดันเป็นผลให้เกิดปริมาตรการหดตัวตั้งแต่ทางเข้าแข็งตัว โดยทั่วไปแบ่งได้เป็นความดันในการเดิมเดิมคือความดันที่ให้กับชิ้นงานภายหลังจากทำการเดิมทดแทน พลาสติกที่จะหดตัวเมื่อเกิดการเย็นตัว

รูปแบบการอัดตัว

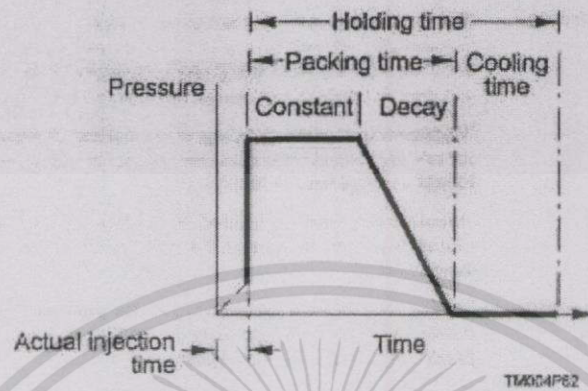
ความดันในการเดิมเดิมคงที่ส่งผลในปริมาตรหดตัวซึ่งมีช่วงจากมากที่สุดไปน้อยในบริเวณปลาย (บริเวณ A) ไปยังต่ำสุดในบริเวณทางเข้า(บริเวณ C)



รูปที่ 4.17 แสดงการอัดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายของความดันทำให้เกิดการหดตัวของตัวของปริมาตรที่เหมาะสมโดยเป็นสาเหตุเนื่องจากบริเวณที่พลาสติกเย็นตัวโดยอาศัยความดันเดียวกัน ไปยังทางเข้า



รูปที่ 4.18 Packing Profile ของโพลีเมอร์

เวลาอยู่ในหน่วยวินาที จากเวลาที่ฉีดจนกระทั่งเวลาที่นำชิ้นงานไปปลดออกจากแม่พิมพ์ เวลานี้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเวลาในการฉีด, ช่วงเวลาที่คงไว้

- 1 เวลาในการฉีด คือเวลาในช่วงระหว่างการวิเคราะห์การเติมเต็ม
- 2 เวลาในการฉีดซ้ำ คือช่วงที่ให้ความดันในการเติมเต็มแก่แม่พิมพ์ ควรมีค่าเพียงพอให้แก่ทางเข้าเกิดการแข็งตัวก่อนนำความดันออก
- 3 เวลาในการเย็นตัว คือช่วงเวลาระหว่างการสิ้นสุดการเติมเต็มไปยัง เวลาที่ แม่พิมพ์เปิด และเวลาที่คงอยู่ คือเวลาจากจุดสิ้นสุดการเติมของวัสดุจนเย็นตัว ไปถึงอุณหภูมิที่นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เมื่อสร้างรูปแบบของการฉีดซ้ำ เวลาที่คงอยู่คือส่วนที่สำคัญที่สุดเช่นเดียวกับการหาค่าร่วมระหว่างการวิเคราะห์การเติมเต็ม

*เวลาในการฉีดซ้ำ และเวลาในการเย็นตัว สามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้แต่ผลรวมต้องมีค่าเท่าเดิม

ปริมาตรการหดตัวเริ่มต้นขึ้นอยู่กับค่าความดันสูงสุดในการเติมและเวลาในการคงอยู่ดังนี้

- 1 ความดันสูงสุดในการฉีดซ้ำ

$$P_{max} = \left[\text{Clamp force (tonnes)} \times 100 \times 0.5 \text{ MPa} \right] / \left[\text{Total projected area of model (sq.cm)} \right]$$

สำหรับชิ้นงานที่ใหญ่ความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นอยู่กัค่าจำกัดของเครื่องฉีด(เช่น 80%)ของพลาสติกเป็นสำคัญ การมีความดันเต็มเต็มที่สูงเกินไปอาจทำให้พลาสติกไหลสวนทางออกจากแม่พิมพ์และเป็นสาเหตุของการล้น (Flash)ถ้าแรงที่ใช้ในการฉีดแม่พิมพ์ต่ำกว่า

2 เวลาในการฉีด

เวลานี้หาได้จากตารางหาเวลาในการเย็นตัวจากการวิเคราะห์ในการเติมเต็มกับการทำสมดุลของปริมาณที่หดตัว ขึ้นอยู่กับ

-อุณหภูมิที่ใช้ปลดวัสดุออกจากแม่พิมพ์ , อุณหภูมิที่ไม่เกิดการไหล และเวลาที่ใช้ในการฉีด นอกจากนี้การลดลงของความดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดควรให้สัมพันธ์กัน แต่โดยทั่วไปปริมาตรการหดตัวจะมากกว่าที่ความดันคงที่ โดยที่ Holding Time เท่ากับผลรวมของความดันคงที่ , ความดันที่ลดลง และเวลาในการเย็นตัว

เวลาที่ความดันคงที่คือเวลาที่ต้องการสำหรับ การสิ้นสุดการเติม ไปยังอุณหภูมิที่ไม่มี การไหล เพิ่มอีก 20°C

เวลาในการลดลงของความดันคือเวลาที่ใช้ในการลดลงของความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการหดตัวในบริเวณที่ใกล้กับทางเข้า(Gate)

3 เวลาในการเย็นตัวคือเวลาระหว่างการสิ้นสุดการฉีด(รูวิ่งแข็งตัว)จนถึงชิ้นงานถูกนำออกจากแม่พิมพ์

หลักของปริมาตรการหดตัวปรับแต่งโดยรูปแบบความดันในการเติมเต็ม

1 การปรับแต่งบริเวณที่สิ้นสุด

ปรับแต่งระหว่างที่ความดันคงที่

-ลดลงเป็นการเติมปริมาณการหดตัว

-ขาวขึ้นเป็นการลดปริมาณการหดตัว

2 การปรับแต่งบริเวณบริเวณทางเข้า

เปลี่ยนค่าอัตราการสลายของความดัน

-ช้าลงเป็นปริมาณการหดตัว

-เร็วขึ้นเป็นการเติมปริมาณการหดตัว

-การปรับแต่งบริเวณกึ่งกลาง

3 ขั้นตอนการสลายของอัตราความดัน

-เพิ่มขึ้นเป็นการลดปริมาณการหดตัว

-ลดลง เป็นการเพิ่มปริมาณการหดตัว

การปรับแต่งควรเรียงตามลำดับ โดยทำการปรับบริเวณที่สิ้นสุด ตามด้วยบริเวณทางเข้า และท้ายสุด ตรงบริเวณกึ่งกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิจัยและการดำเนินงาน

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- เม็ดพลาสติก Acrolonitrile-butadiene-styrene (ABS) Supplier คือ ของบริษัท TPI

5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

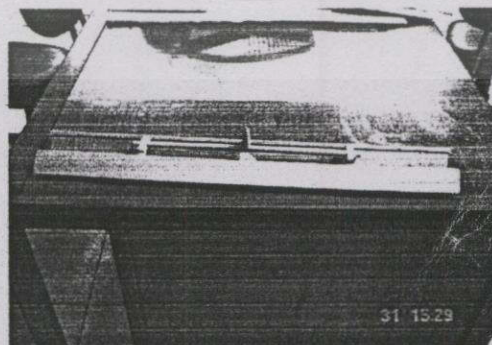
- เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบ Unix Model O2 ของบริษัท Silicon graphic (ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ)
- โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD และ CAE (Pro Engineer และ Mold Flow)
- เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) จากประเทศญี่ปุ่น : Model JSW 350 ขนาด 280 ตัน มีรายละเอียดดังนี้

- 1 แรงมากที่สุดในกรจับยึด 280 ตัน
- 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 63 มิลลิเมตร
- 3 ปริมาตรการฉีดสูงสุด 748 ลบ.ซม.
- 4 ความดันสูงสุดในการฉีด 1600 ก.ก/ตร.ซม.

- เครื่องมือวัด เช่น เวอร์เนียรชนิคอ่านค่าด้วยระบบปดิจิตอล ขนาด 30 mm และ 1000 mm

5.2 รูปร่าง (Model) ของชิ้นงานและแม่พิมพ์

ชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนพลาสติกของตู้แช่แข็ง ขนาด 34 ม.ม. x 603 ม.ม. หนา 2 ม.ม. มีดริบเสริมแข็ง หนา 1.2 ม.ม. ลึก 35 ม.ม.



รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของแม่พิมพ์

- 1 มี 2 คาวิตี
- 2 Gate เข้าด้านข้าง รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร และลึก 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 Gate
- 3 Sprue bush ยาว 40 มิลลิเมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เรียว 2 องศา
- 4 เป็นแม่พิมพ์ชนิด 2 แผ่น ขนาด 700 mm x 350 mm x 350 mm
- 5 ระบบการปลดชิ้นงานใช้เข็มกระทุ้ง
- 6 มีระบบการหล่อเย็นทั้งตัวผู้และตัวเมีย Cooling Channel มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- 7 มีระบบรูวิ่งแบบ 2 สาขา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

5.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 5.3.1 คัดเลือกชิ้นงานเพื่อศึกษาเป็นกรณีตัวอย่างและบันทึกปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีด
- 5.3.2 ศึกษาปัญหา, ตั้งสมมุติฐานจากทฤษฎี พร้อมทั้งกำหนดวิธีการแก้ปัญหาและกำหนดค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่จะใช้ในการทดลอง
- 5.3.3 ออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรม Pro Engineer และทำ Meshing
- 5.3.4 ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการทำนายผลด้วยโปรแกรม Mold Flow
- 5.3.5 ทำการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อเปรียบเทียบผล ด้วยการทดลองการฉีดโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก
- 5.3.6 ทำการวัดชิ้นงานพลาสติกด้วยเครื่องมือวัดที่แม่นยำ เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการฉีดจริงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์
- 5.3.7 สรุปผลการทดลองพร้อมหาเหตุผลประกอบ

5.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ

5.4.1 การออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design)

ทำการออกแบบชิ้นงานที่ต้องการด้วยโปรแกรม Pro Engineer โดยทำการออกแบบในลักษณะพื้นผิว (Solid Modeling) ก่อน แล้วทำการคัดลอกเป็นผิว (Surface) โดยจะใช้ผิวที่ตัวเมีย (Cavity) โดยไม่ต้องคำนึงถึงความหนาของชิ้นงาน อาจทำการ Mesh โดยใช้ Module Finite Element Analysis (FEA) ของโปรแกรม Pro Engineer เพื่อเป็นการกำหนดความหนาของชิ้นงานและเป็นการทำ Pre – Processing ก่อนการทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 การส่งผ่านข้อมูลเพื่อเข้าสู่โปรแกรม CAE (Computer Aided Engineer)

หลังจากได้ทำการ Mesh จากโปรแกรม Pro Engineer แล้วให้ทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบ Nastran หรือ Patran ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถส่งข้อมูลที่สร้างไว้เข้าไปยังโปรแกรม Moldflow ซึ่งเป็นการถ่ายข้อมูลจาก CAD ไปสู่ CAE เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

5.4.3 ทำการวิเคราะห์ในส่วนโพรงแบบในส่วนของการเติมเต็ม (Filling Analysis)

5.4.3.1 ทำการเมช (Mesh) โพรงแบบ (Cavity) แล้วทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเมช เช่น จำนวนของ Node , Element และการทับกันของ Element (Collapse)

5.4.3.2 ทำการสร้าง Node , Surface , เปลี่ยนคุณสมบัติให้เป็นรูปแบบ Cylindrical และทำการ Mesh อีกครั้งหนึ่ง เพื่อกำหนดเป็น Runner System

5.4.3.3 ทำการกำหนด Node ในการฉีด โดยสมมติให้เป็นตำแหน่งของทางเข้าโพรงแบบ

5.4.3.4 ทำการเลือกชนิดของวัสดุ โดยเลือกจาก Material Database โดยในที่นี้ใช้การวิเคราะห์ด้วย ABS

5.4.3.4 ทำการสมดุลการไหลภายในโพรงแบบและระบบรูว้าง (Balance Runner) หากมีการฉีดชิ้นงานจำนวนมากหรือมีลักษณะแตกต่างกัน ก็ต้องทำสมดุล แต่เนื่องจากการทดลองนี้มีความสมมาตรกัน จึงไม่ได้ทำสมดุลการไหลในระบบรูว้าง

สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาให้ได้ตามข้อกำหนดดังนี้

ก ให้มีการไหลที่สมดุล (Flow Balance) คือ มีการเติมเต็มที่ปลายของแต่ละโพรงแบบที่เวลาเดียวกัน

ข ให้มีการลดลงของความดัน (Pressure Gradient) ที่แต่ละโพรงแบบมีค่าความดันเท่ากับศูนย์

ค ให้มีค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และ ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) ในระหว่างการเติมมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตของวัสดุที่กำหนดใน Material Database

ง ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction Heating) ควรกำหนดให้ต่ำกว่าค่าสูงสุดของวัสดุใน Material Database

จ ให้เกิดการปิดตัวของทางเข้า (Gate) พอดีเมื่อทำการเติมเต็ม (Thermal Shutoff)

ฉ ตรวจสอบพฤติกรรมที่จะทำให้ชิ้นงานขาดความแข็งแรง เช่น Weld Line , Air Trap , Orientation และอื่น ๆ

พิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การเติม (Filling Analysis) ของแม่พิมพ์และรูว้าง ที่ทำการสมดุลแล้วเพื่อทำการพิจารณาหาค่าของตัวแปรดังนี้

ก อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการหลอมเหลวของพลาสติก

ข อุณหภูมิของแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค อัตราการไหล

ง เวลาที่ใช้ในการฉีดของขั้นตอนการเติมเต็ม

จ ความเค้นที่ใช้ในการเติมเต็ม

ฉ ความดันสูงสุดที่ใช้ในการเติมเต็ม

ช ความดันที่ใช้ในการจับยึดแม่พิมพ์ขณะทำการฉีด

5.4.5 ทำการวิเคราะห์โพรงแบบในส่วนของการอัดตัว (Packing Analysis)

5.4.5.1 ทำการหาค่าความดันที่ใช้ในการฉีด โดยใช้ค่าแรงที่ใช้ในการจับยึด (Clamping Force) และ พื้นที่หน้าตัด (Total Project Area) จากผลการทำนายจาก Filling Analysis จากสูตร

$$P_{\max} = \frac{F}{A} \times 100 \times 0.5 \text{ Mpa} \quad (5.1)$$

เมื่อ F คือ Clamp Force (tones)

A คือ Total Project Area of Model (cm²)

5.4.5.2 อ่านค่า Holding Time จากผลการทำนายจาก Filling Analysis

5.4.5.3 เติมข้อมูลที่ได้จากข้อด้านบนลงใน Packing Profile โดยใช้ฐานข้อมูลจากการวิเคราะห์จาก Filling Analysis เป็นการวิเคราะห์การฉีดแบบความดันคงที่

5.4.5.4 ทำการอ่านผลการทำนายการฉีด

ก ความดันที่ใช้ในการอัดตัว

ข เวลาที่ใช้ในการอัดตัว

ค การหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage) ควรแตกต่างกันไม่เกิน 4% ทั้ง

ทั้งชิ้นงาน

ง อื่น ๆ

หากค่าการหดตัวเชิงปริมาตรให้วิเคราะห์การฉีดแบบ Decayed Pressure Profile ต่อไป เพื่อหาค่าการหดตัวที่เหมาะสม

5.4.5.6 เริ่มต้นด้วยการหาเวลาที่ ทำให้ Gate Freeze off โดยการ ใช้ Temperature Profile ซึ่งเราจะใช้ No Flow Temperature จากข้อมูลของวัสดุ เป็นตัวกำหนดเวลาการแข็งตัว ณ Node ที่ปลายการไหล

5.4.5.7 หาเวลาการปลดของชิ้นงาน โดยการ ใช้ Temperature Profile ซึ่งเราจะใช้ Ejection Temperature จากข้อมูลของวัสดุ เป็นตัวกำหนดเวลาการปลดชิ้นงาน ณ Node ที่ใกล้ Gate

5.4.5.8 นำค่า Packing Pressure และ การหาค่าเวลา ณ จุดต่าง ๆ ใส่ค่าใน Packing Profile

5.4.5.9 สังเกตผลการทำนายและตรวจค่าการหดตัวเชิงปริมาตร, ความเค้น และค่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ หากไม่ให้ใช้หลักการการปรับค่าการหดตัวโดยใช้ Packing Profile สำหรับการทดลองได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ Packing Profile โดยจะนำข้อมูลจากการทดลองที่ตั้งสมมติฐานไว้มาทำการทดลอง

5.4.6 ทำการวิเคราะห์โพรงแบบในส่วนของการหดตัว (Shrinkage Analysis)

เนื่องจากการวิเคราะห์การหดตัวเป็นการวิเคราะห์ที่ต้องอาศัยผลการทำนายของ Packing Analysis กล่าวคือจะต้องใช้ข้อมูล PVT และการหดตัวเชิงปริมาตร ฉะนั้นเราจึงต้องทำการวิเคราะห์ Packing Analysis ก่อนเสมอ

5.4.6.1 เราสามารถวิเคราะห์หดตัวได้ โดยการใส่ข้อมูลคือ เพิ่มผลลัพธ์ของการทำ Packing Analysis

พิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การหดตัว (Shrinkage Analysis) ของแม่พิมพ์และรูว้าง เพื่อทำการพิจารณาหาค่าของตัวแปรดังนี้

- ก ค่าการหดตัวในแนวระนาบ
- ข ค่าการหดตัวในแนวความหนา
- ค อื่น ๆ

5.4.7 การวัดชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติก

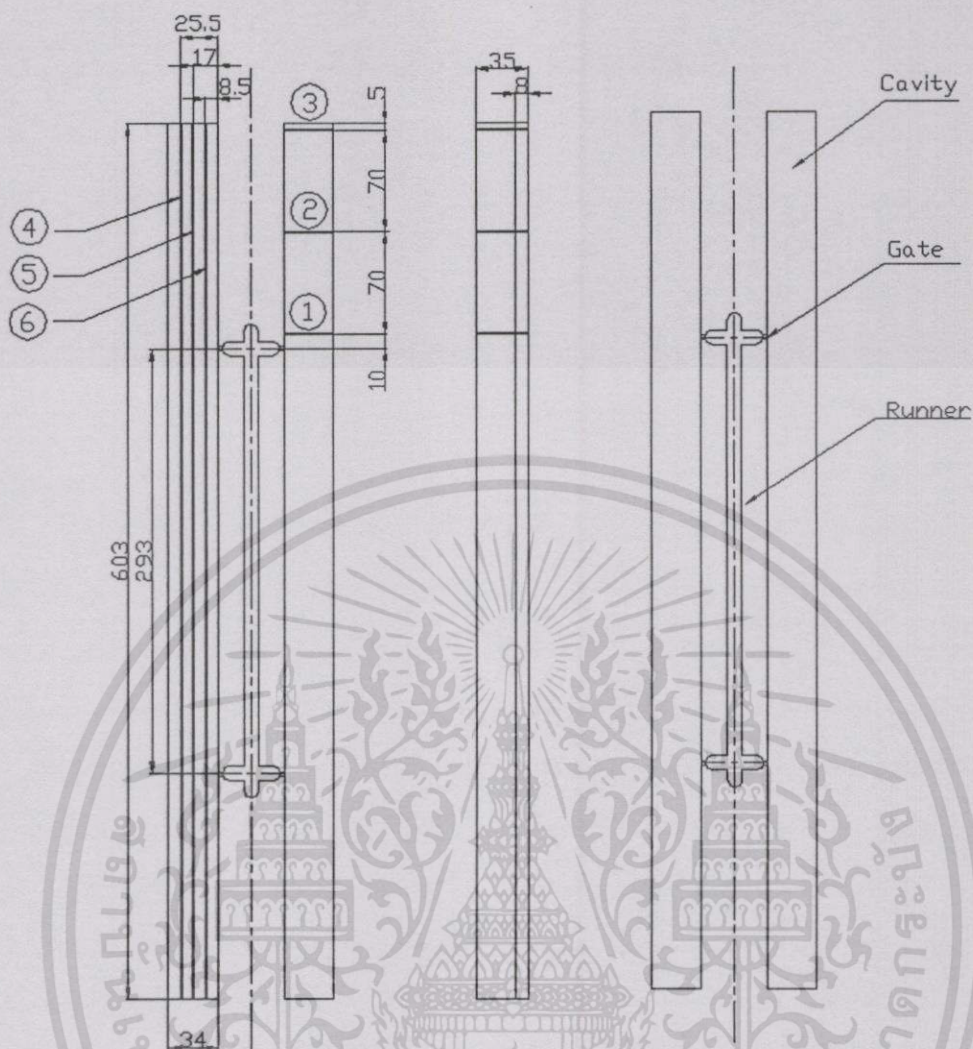
โดยเราจะนำชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติกตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้มาทำการวัดขนาดของชิ้นงาน เพื่อคำนวณหาค่าการหดตัวของพลาสติก โดยการสุ่มการวัด 3 ครั้งต่อหนึ่งทิศทางตามระยะตามรูปที่ 5.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับทิศทางตั้งฉากกับการไหลและทิศทางความหนาจะใช้จุดเดียวกัน

- 1 จุดที่ 1 บริเวณใกล้ Gate เนื่องจากมีค่าการหดตัวน้อยที่สุด
- 2 จุดที่ 2 บริเวณปลายการไหล (End of Flow) เนื่องจากมีค่าการหดตัวมากที่สุด
- 3 จุดที่ 3 บริเวณระหว่างจุดที่ 1 และ 2

สำหรับทิศทางขนานการไหลตามขนาดที่กำหนดไว้ในรูปที่ 5.2

- 4 จุดที่ 4 มีระยะห่างจากขอบด้านใน 8.5 มิลลิเมตร
- 5 จุดที่ 5 มีระยะห่างจากขอบด้านใน 17.0 มิลลิเมตร
- 6 จุดที่ 6 มีระยะห่างจากขอบด้านใน 25.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.2 แสดง Part Drawing ชิ้นงานตัวอย่างและตำแหน่งที่ทำการวัดขนาด

5.5 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน X

ความดันในการฉีด (Mpa)	เวลาในการฉีด (วินาที)	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	ค่าเฉลี่ยของ X (mm)	ค่าการหดตัว (%)
45	20	605.28	605.67	605.26	605.40	0.27
50	20	605.31	605.25	605.82	605.46	0.26
55	20	606.04	606.27	605.95	606.09	0.15
60	20	606.04	605.90	605.46	605.80	0.20
65	20	606.04	606.15	605.91	606.03	0.16
70	20	606.00	605.95	605.90	605.95	0.18
55	5	605.43	605.37	605.33	605.38	0.27
55	7	605.40	605.78	605.14	605.44	0.26
55	9	605.79	605.93	605.65	605.79	0.20
55	11	606.00	605.80	605.86	605.89	0.19
55	13	605.37	605.87	605.37	605.54	0.24
55	15	605.88	605.50	605.41	605.60	0.23
55	17	605.96	605.49	605.41	605.62	0.23
55	19	606.06	605.97	605.78	605.94	0.18
60(Optimum)	3	606.04	605.75	605.45	605.75	0.21

ตารางที่ 5.2 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน Y

ความดันในการฉีด (Mpa)	เวลาในการฉีด (วินาที)	Y1 (mm)	Y2 (mm)	Y3 (mm)	ค่าเฉลี่ยของ Y (mm)	ค่าการหดตัว (%)
45	20	38.88	38.94	38.88	38.90	0.75
50	20	38.92	38.94	38.91	38.92	0.69
55	20	38.96	38.98	38.94	38.96	0.60
60	20	38.96	38.99	38.96	38.97	0.57
65	20	38.97	38.99	38.98	38.98	0.55
70	20	38.99	39.00	39.00	39.00	0.51
55	5	38.92	38.96	38.92	38.93	0.67
55	7	38.92	38.95	38.93	38.93	0.67
55	9	38.93	38.95	38.92	38.93	0.67
55	11	38.93	38.94	38.96	38.94	0.64
55	13	38.94	38.96	38.94	38.95	0.63
55	15	38.96	38.98	38.94	38.96	0.60
55	17	38.95	38.98	38.96	38.96	0.59
55	19	38.96	38.99	38.96	38.97	0.57
60(Optimum)	3	38.96	38.99	38.94	38.96	0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงการวัดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกในทิศทางตามแนวแกน Z

ความดันในการฉีด (Mpa)	เวลาในการฉีด (วินาที)	Z1 (mm)	Z2 (mm)	Z3 (mm)	ค่าเฉลี่ยของ Z (mm)	ค่าการหดตัว (%)
45	20	8.020	8.020	7.930	7.990	0.622
50	20	7.960	8.010	8.010	7.993	0.580
55	20	7.970	8.010	8.000	7.993	0.580
60	20	7.990	8.020	7.980	7.997	0.539
65	20	8.000	8.010	7.990	8.000	0.498
70	20	7.990	8.010	8.000	8.000	0.498
55	5	8.010	8.000	7.960	7.990	0.622
55	7	7.980	8.030	7.960	7.990	0.622
55	9	8.040	7.990	7.950	7.993	0.580
55	11	8.000	7.970	8.020	7.997	0.539
55	13	8.010	8.010	7.970	7.997	0.539
55	15	8.000	7.980	8.020	8.000	0.498
55	17	7.990	8.020	7.990	8.000	0.498
55	19	8.000	8.020	7.990	8.003	0.456
60(Optimum)	3	7.99	8.02	9.98	7.997	0.539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

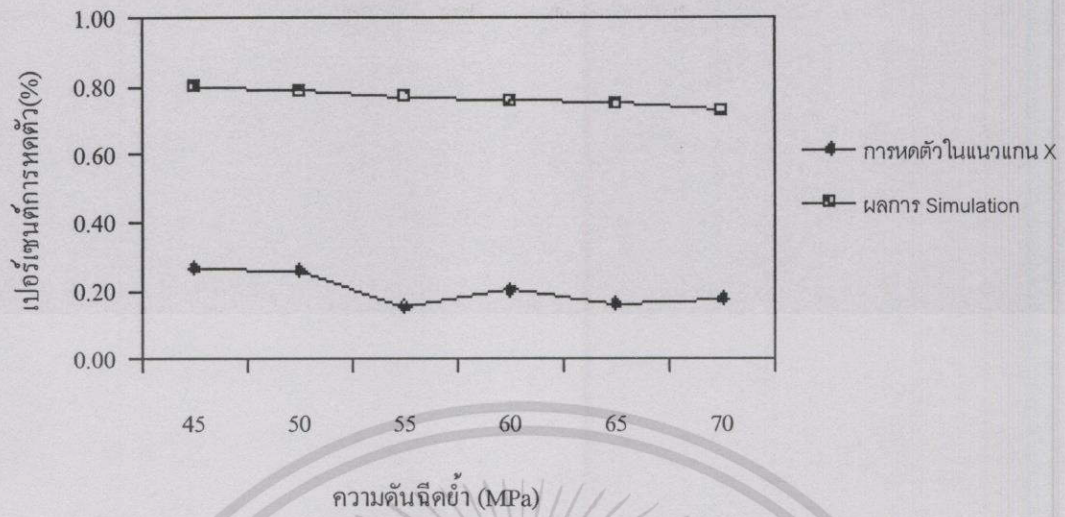
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทำนายการหดตัวจากโปรแกรมในทิศทางตามแนวแกน X,Y และZ

ความดันในการ ฉีด (Mpa)	เวลาในการฉีด (วินาที)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
45	20	0.8	0.83	0.79
50	20	0.79	0.82	0.77
55	20	0.77	0.8	0.75
60	20	0.76	0.79	0.74
65	20	0.75	0.77	0.73
70	20	0.73	0.76	0.71
55	5	0.78	0.80	0.76
55	7	0.77	0.80	0.75
55	9	0.77	0.80	0.75
55	11	0.77	0.80	0.75
55	13	0.77	0.80	0.75
55	15	0.77	0.80	0.75
55	17	0.77	0.80	0.75
55	19	0.77	0.80	0.75
60(Optimum)	3	0.76	0.79	0.75

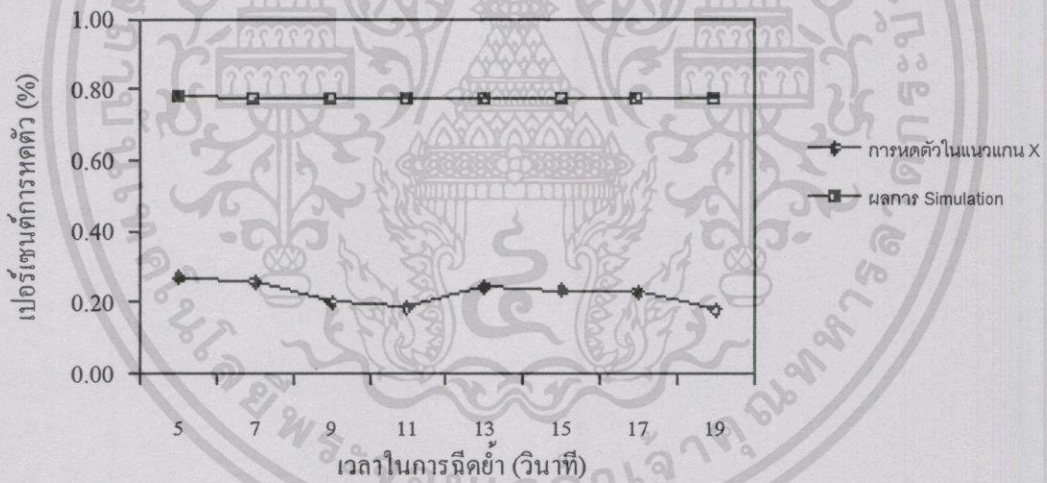
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงข้อผิดพลาดของการทดลองระหว่างข้อมูลจริงกับผลการ Simulation

ความดันในการ ฉีด (Mpa)	เวลาในการฉีด (วินาที)	ทิศทางแนวแกน X (%)	ทิศทางแนวแกน Y (%)	ทิศทางแนวแกน Z (%)
45	20	2.004	0.103	0.270
50	20	2.074	0.183	0.327
55	20	4.008	0.334	0.292
60	20	2.781	0.376	0.373
65	20	3.614	0.404	0.467
70	20	3.141	0.502	0.427
55	5	1.881	0.198	0.222
55	7	1.958	0.198	0.206
55	9	2.800	0.198	0.292
55	11	3.124	0.246	0.392
55	13	2.151	0.263	0.392
55	15	2.284	0.334	0.508
55	17	2.339	0.353	0.508
55	19	3.315	0.394	0.645



รูปที่ 5.3 แสดงค่าการหัดตัวในแนวแกน X เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันระหว่าง (45-70 Mpa)



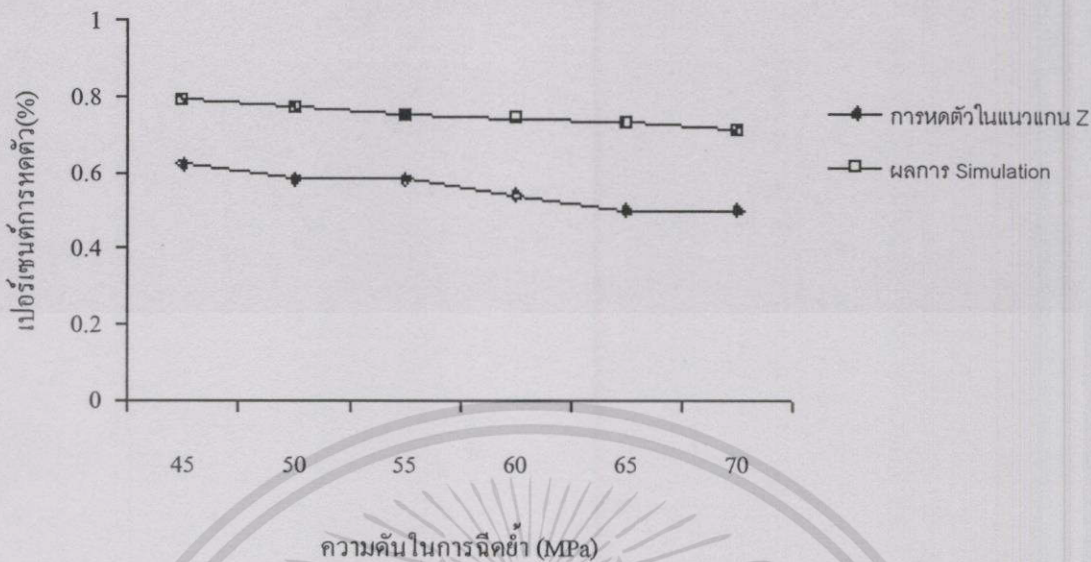
รูปที่ 5.4 แสดงค่าการหัดตัวในแนวแกน X เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการหัดตัวระหว่าง (5-19 วินาที)



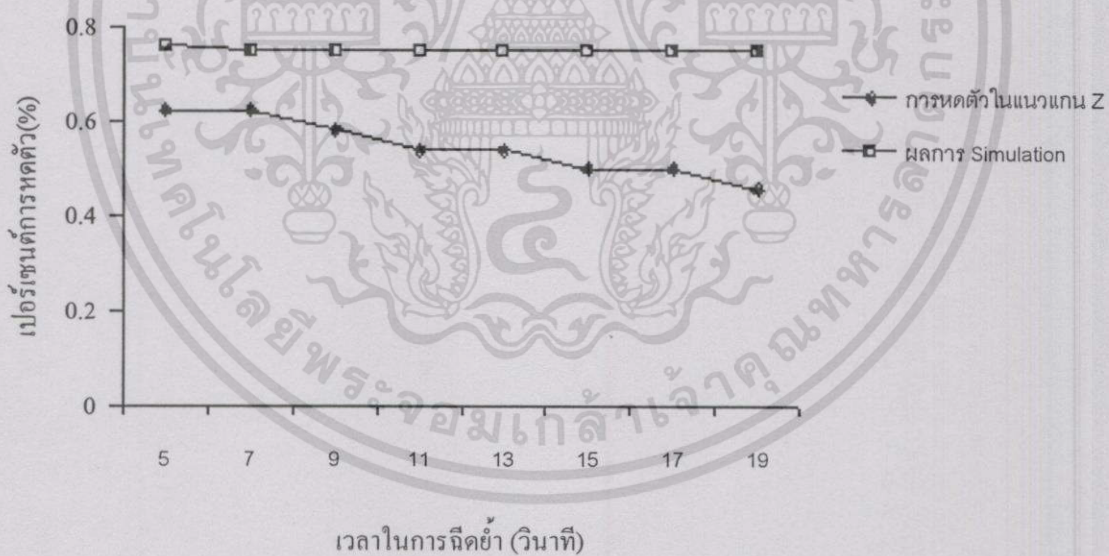
รูปที่ 5.5 แสดงค่าการหัดตัวในแนวแกน Y เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการฉีดน้ำระหว่าง (45-70 MPa)



รูปที่ 5.6 แสดงค่าการหัดตัวในแนวแกน Y เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดน้ำระหว่าง (5-19 วินาที)

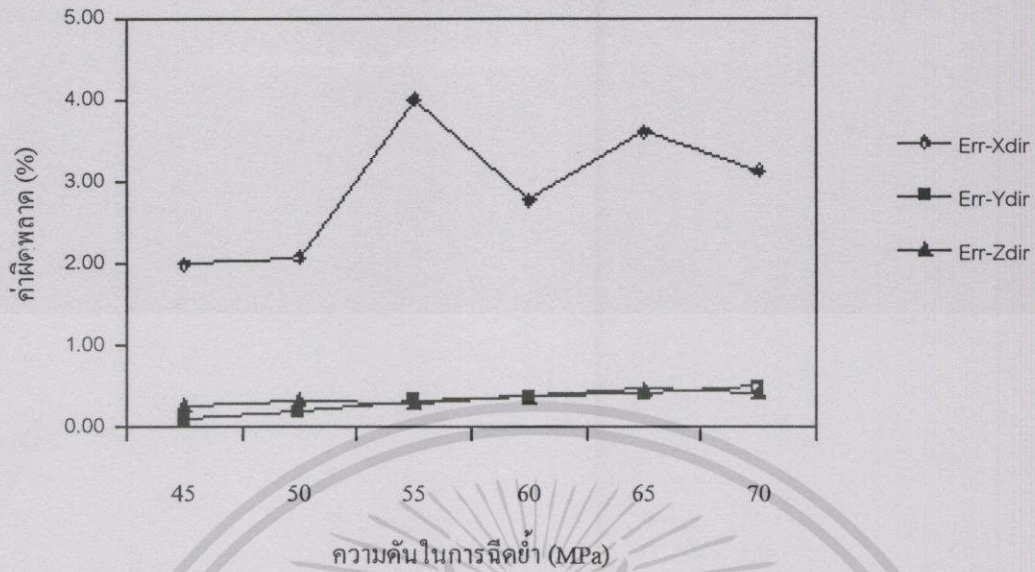


รูปที่ 5.7 แสดงค่าการหักตัวในแนวแกน Z เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการจี้ดย้ำระหว่าง (45-70MPa)

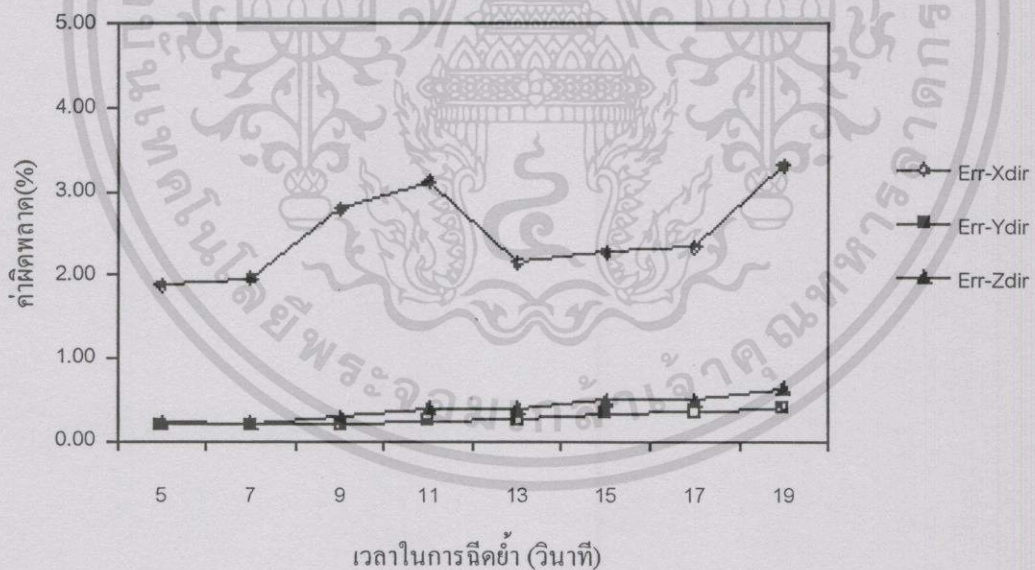


รูปที่ 5.8 แสดงค่าการหักตัวในแนวแกน Z เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการจี้ดย้ำระหว่าง (5-19 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

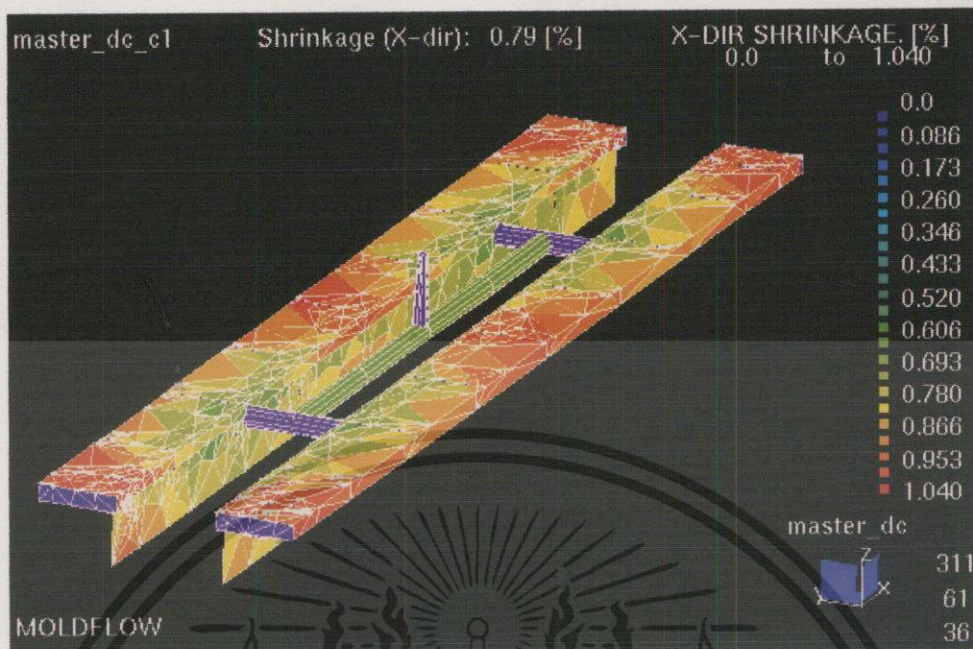


รูปที่ 5.9 แสดงค่าผิดพลาดจากข้อมูลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการฉีดน้ำระหว่าง (45-70MPa)

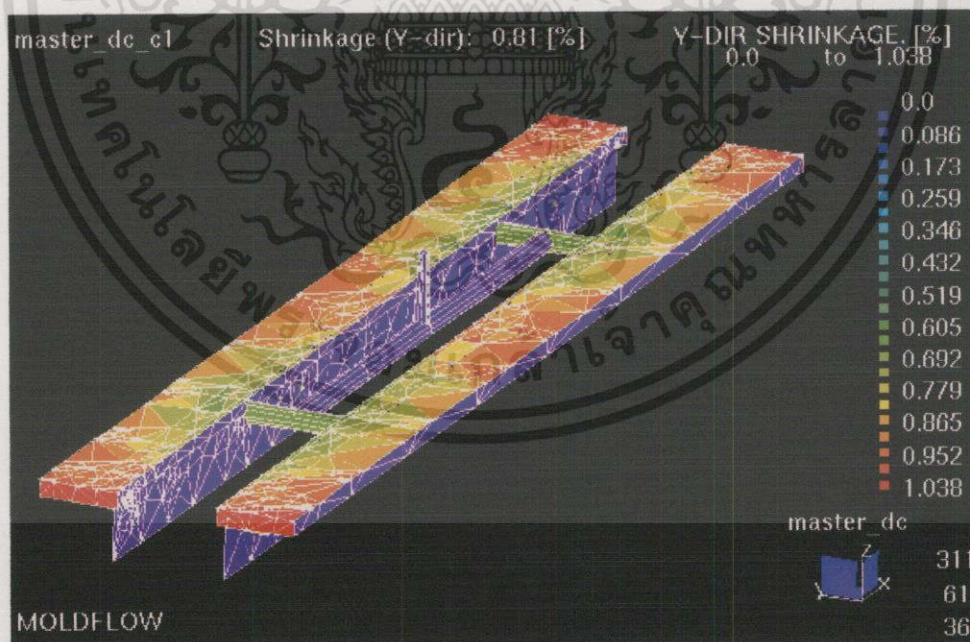


รูปที่ 5.10 แสดงค่าผิดพลาดจากข้อมูลการทดลองกับผลการทำนายจากโปรแกรม กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการฉีดน้ำระหว่าง (5-19 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

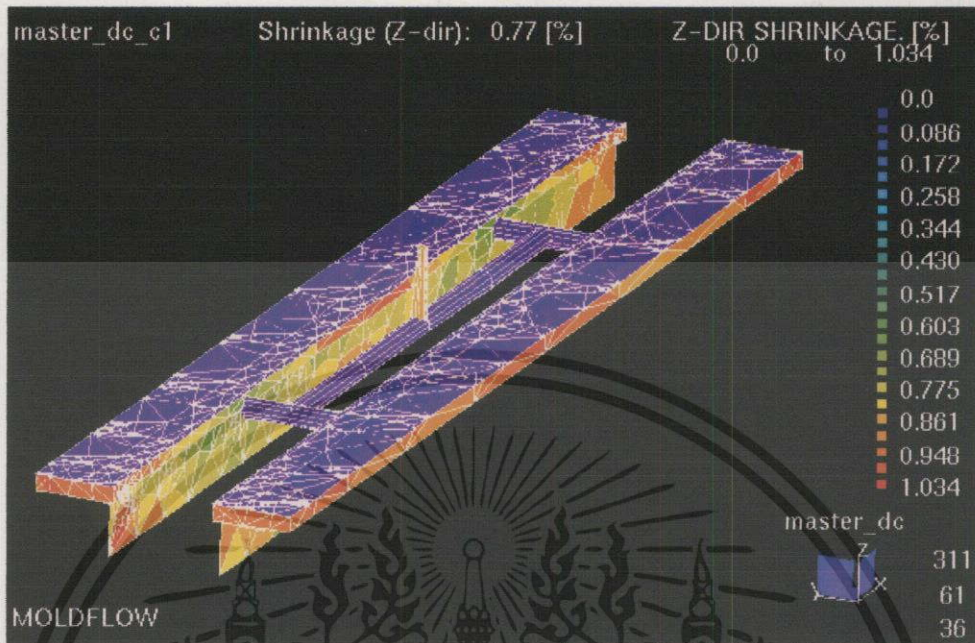


รูปที่ 5.11 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน X จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีด 45 MPa และเวลาการฉีด 20 วินาที



รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Y จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีด 45 MPa และเวลาการฉีด 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

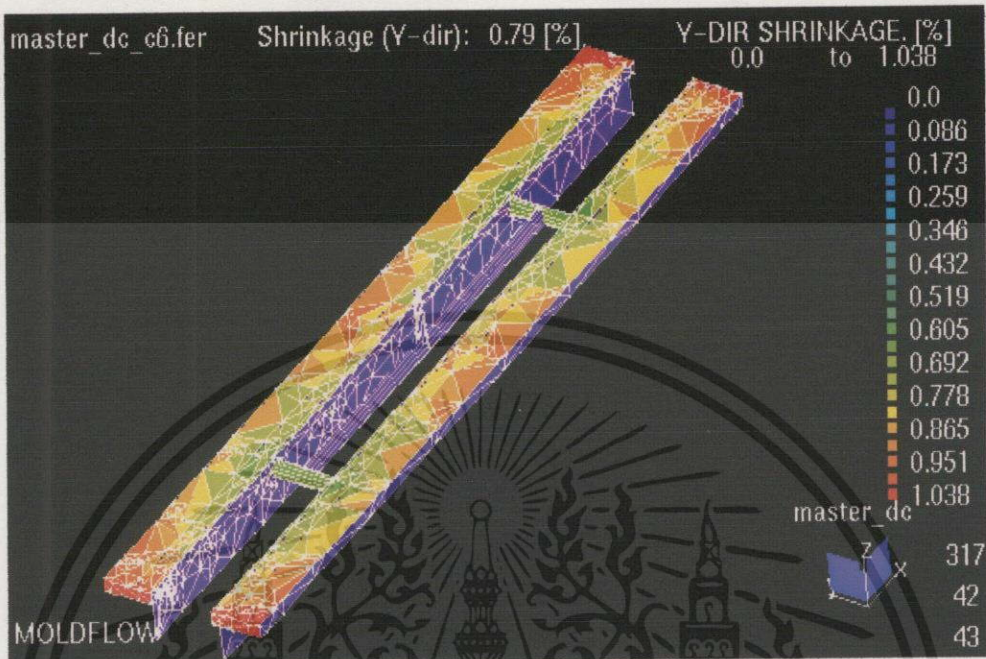


รูปที่ 5.13 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Z จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้ความดันการฉีด 45 MPa และเวลาการฉีด 20 วินาที

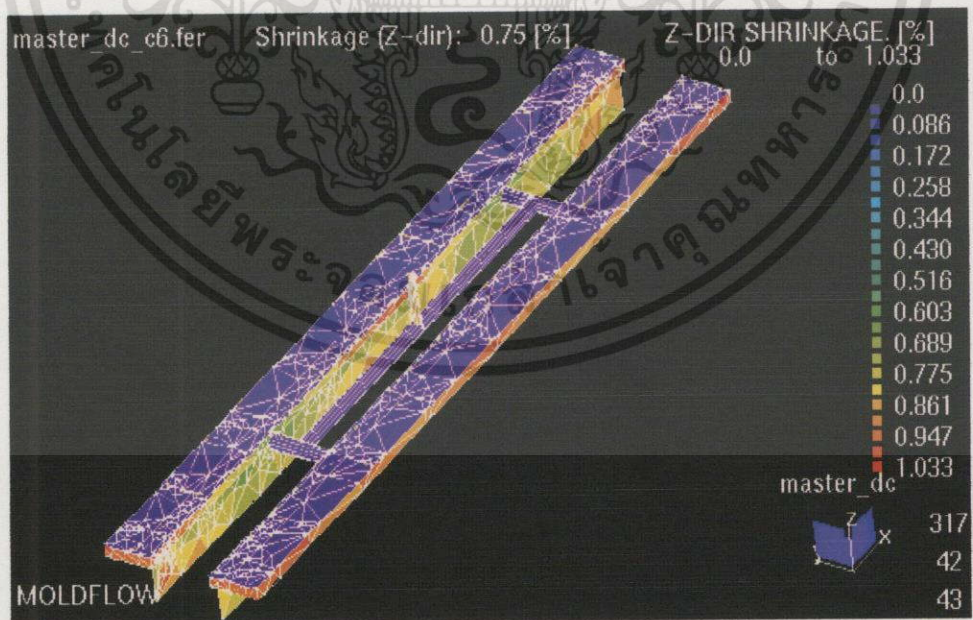


รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน X จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Y จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum



รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายค่าการหดตัวบนชิ้นงานและค่าเฉลี่ยการหดตัวในแนวแกน Z จากผลการทำนายจากโปรแกรม โดยใช้กระบวนการ Optimum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.6.1 การวิเคราะห์ผลการฉีดพลาสติกจากการทดลอง

การทดลองจะใช้สภาวะเงื่อนไขในการฉีดพลาสติกตามตารางที่ 5.2, 5.3, 5.4 ซึ่งจะศึกษาการหดตัวของชิ้นงานในทิศทางตามแกน X, Y และ Z ตามลำดับ การทดลองจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณีคือ

1. การศึกษาผลกระทบของความดันในการฉีด (45-70 Mpa)
2. เวลาในการฉีด (5-19 วินาที)
3. การแสดงค่าสภาวะที่เหมาะสมของโปรแกรม

เมื่อ

X คือด้านยาวของชิ้นงานหรือแนวตั้งฉากกับการไหล

Y คือด้านกว้างของชิ้นงานหรือแนวขนานกับการไหล

Z คือ ความหนาของชิ้นงาน

เราจะพบว่า การหดตัวสามารถเกิดในทุกทิศทางทั้ง ความกว้าง , ความยาวและความหนาของชิ้นงาน โดยได้ทำการสุ่มการวัดขนาด 3 ค่าแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าการหดตัวตามสูตรที่กำหนด จากผลการทดลองการฉีดชิ้นงานตัวอย่างพบว่า ความดันในการฉีดจะส่งผลกระทบต่อตรงกับการหดตัวในทุกทิศทาง สำหรับแนวตั้งฉากกับการไหลกรณีแรก พบค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง (0.27% - 0.18%) กรณีที่สองค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง(0.26% - 0.18%) สำหรับแนวขนานกับการไหลพบค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง(0.75% - 0.51%) กรณีที่สองค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง(0.67% - 0.57%) สำหรับแนวความหนาพบค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง(0.62% - 0.5%) กรณีที่สองค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง(0.62% - 0.46%)

เราจะสังเกตได้ว่าในกรณีแรกเมื่อเรากำหนดเวลาในการฉีดให้คงที่ และเพิ่มความดันในการฉีด ผลคือจะทำให้ความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เพราะการเพิ่มความดันในการฉีดมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการรักษาความดันในโพรงแบบไว้ , เป็นการชดเชยเนื้อพลาสติกเนื่องจากการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และป้องกันกาไหลย้อนกลับของเนื้อพลาสติก ซึ่งส่วนใหญ่เราจะความดันในการฉีดจากสูตรการคำนวณความดันในการฉีดหรือประมาณครึ่งหนึ่งของความดันที่ใช้ในช่วงเดิมเต็ม หลังจากที่เราได้ฉีดเนื้อพลาสติกได้ 95% แล้วเราถึงจะอัดเนื้อพลาสติก ดังนั้นความดันที่สูงขึ้นจึงทำให้ค่าการหดตัวมีค่าลดลง ดูจากรูปที่ 5.3, 5.4, 5.5 เส้นโค้งของกราฟจะมีค่าความชัน ค่าหนึ่งซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลง

กรณีที่สอง เมื่อเรากำหนดให้ความดันในการฉีดคงที่ และเพิ่มเวลาในการฉีด เราจะพบว่าทั้งสามทิศทางจะมีค่าการหดตัวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเปลี่ยนแปลงความดันในการฉีด เนื่องจากเวลาในการฉีดต้องสัมพันธ์กับเวลาการปิดตัวของ Gate เพราะ

เมื่อ Gate ปิดลงความดันที่ใช้ในการอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปในโพรงแบบก็จะไม่สามารถกระทำได้อีก จากตารางที่ 5.5 เราสามารถหาค่าเวลาที่ในการปิดตัวของ Gate เท่ากับ 3 วินาทีหลังจากนั้นได้ ทำการวิเคราะห์การหดตัวพบว่าอยู่ในช่วงที่ศึกษา ซึ่งเราสามารถอธิบายการปิดตัวของ Gate เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิและความดันได้ดังนี้

พลาสติกที่ไหลในช่องความหนาจะมีการสูญเสียความร้อนและความดันในระหว่างระยะทางการไหล(Flow Length) เนื่องจาก Pressure Drop และการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการหล่อเย็น ฉะนั้นเมื่อของไหลมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิผนังของแม่พิมพ์(Mold Surface) จะทำให้เกิดการยุติการไหล และเมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะทำให้ชั้นการแข็งตัวปิดเต็มช่องความหนาในที่สุด ซึ่งเราจะใช้ตัวแปรที่แสดงถึงผลกระทบอธิบายได้ดังนี้

1. อัตราเฉือน(Shear Rate)เมื่อพลาสติกไหลผ่านช่องความหนาที่สภาวะเวลาไม่คงที่ ทำให้อัตราเฉือนมีค่าลดลงจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่ศูนย์กลางช่องความหนา เนื่องจากการขยายตัวของชั้นความหนาซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากช่อง Cooling ถึงช่องคาร์วิตี ฉะนั้นเมื่ออุณหภูมิของพลาสติกมีค่าต่ำกว่า No Flow Temp ก็จะทำให้พลาสติกหยุดการไหลและเริ่มแข็งตัวหรือเปลี่ยนสถานะจากของเหลวสู่ช่วง Transition และเป็นของแข็งในที่สุด

2. อุณหภูมิ(Temperature) ในช่องความหนาจะมีค่าลดลงจากเส้นผ่านศูนย์กลางช่องความหนาจนถึงผนังของแม่พิมพ์เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการหล่อเย็น และเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดการหยุดการไหลและการแข็งตัวของพลาสติก และสำหรับชิ้นงานพลาสติก อุณหภูมิจะมีค่าต่ำที่บริเวณปลายการไหลและจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณใกล้ Gate ฉะนั้นอุณหภูมิที่ Gate จึงเป็นตัวกำหนดเวลาในการฉีดอัด เนื่องจากเป็นจะแข็งตัวเป็นบริเวณสุดท้ายและสามารถอัดความดันในการฉีดอัดได้ ดังนั้นหากเราทราบเวลาในการแข็งตัวของ Gate โดยใช้ No Flow Temperature เราก็สามารถนำมาใช้เป็นเวลาในการฉีดอัดได้

3. ความหนืด(Viscosity) สำหรับโพลีเมอร์ซึ่งมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโทเนียน ซึ่งเราจะกำหนดให้ความหนืดเป็นฟังก์ชันของอัตราเฉือนและอุณหภูมิ จากรูปที่ 2.4 สังเกตได้จากบริเวณที่ความหนืดจะมีค่านันต์โดยถูกกำหนดโดย No Flow Temperature

5.6.2 การวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างข้อมูลจากการทดลองและผลการทำนายจากโปรแกรม

5.6.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันในการฉีดอัด

จากรูปที่ 5.9 จะพบว่าค่าผิดพลาดในทิศทางความหนาและขนานกับการไหล จะมีค่าอยู่ระหว่าง(0.1%-0.5%)และ(0.2%-0.46%) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ผลการทดลองใกล้เคียงกับผลการทำนาย ส่วนในทิศทางตั้งฉากกับการไหลจะมีค่าอยู่ระหว่าง(2%-3%) เป็นผลเนื่องมาจากการหดตัวในทิศทางตั้งฉากหรือด้านยาวของชิ้นงานมีการหดตัวเกิดขึ้น 3 บริเวณคือที่ด้านปลายทั้งสองข้างของชิ้นงานและบริเวณกลางชิ้นงานเนื่องจากการบรจบกั้นของการไหลและเย็นตัวก่อนบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่น จากรูปที่ 5.11 ซึ่งการวัดการหดตัวจากการทดลองเป็นการวัดการหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานที่แตกต่างจากขนาดของโพรงแม่พิมพ์ ซึ่งมีความยาวมากกว่าด้านกว้างมาก จึงอาจทำให้การวัดจากเครื่องมือวัดเกิดค่าผิดพลาดได้ เราจะแบ่งข้อผิดพลาดเนื่องจากการวัด เช่น จำนวนการสุ่มการตรวจสอบขนาด , เครื่องมือวัดและสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิห้อง ฯ

เราจะพบว่าผลการทดลองน้อยกว่าผลการทำนายจากโปรแกรม เพราะว่าการทดลองการฉีดพลาสติกจากเครื่องฉีดพลาสติกจะต้องควบคุมระบบการหล่อเย็น เช่น ระบบของรูน้ำ , อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น , อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น , ชนิดของน้ำหล่อเย็นและวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ เพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ ได้ดีและเพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิมีการกระจายตัวแบบลดลงที่สม่ำเสมอจนตลอดชิ้นงาน และทำให้การหดตัวของชิ้นงานอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่การทำนายผลจากโปรแกรมจะใช้ผลจากการคำนวณในช่วงการฉีดเข้าไปคำนวณการหดตัว ซึ่งจะใช้อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ในการวิเคราะห์ โดยไม่คำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งการวิเคราะห์ระบบการหล่อเย็นจะไม่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้

5.6.2.2 การศึกษาเวลาในการฉีด

จากรูปที่ 5.10 จะพบว่าค่าผิดพลาดในทิศทางความหนาและขนานกับการไหล จะมีค่าอยู่ระหว่าง(0.2%-0.4%)และ(0.22%-0.64%) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ผลการทดลองใกล้เคียงกับผลการทำนาย ส่วนในทิศทางตั้งฉากกับการไหลจะมีค่าอยู่ระหว่าง(1.8%-3.5%) ซึ่งข้อสรุปจะเหมือนกับกรณีศึกษาความดันในการฉีด แต่การเปลี่ยนแปลงการหดตัวในกรณีนี้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีศึกษาความดันในการฉีด

5.6.3 การวิเคราะห์การบิดตัวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 5.11-5.16 แสดงการหดตัวในทิศทางในแนวแกน X , Y และ Z เราจะพบว่า การหดตัวจะมีค่ามากในบริเวณปลายการไหล(End of Flow) และน้อยในบริเวณใกล้ Gate เพราะว่าเป็นพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงความดันได้ดีกว่าและมีการถ่ายเทความร้อนจาก Runner ได้ดีกว่า การหดตัวที่ไม่เท่ากันนี้จะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอ นอกจากจะเกี่ยวข้องกับระยะทางการไหลแล้วยังขึ้นอยู่กับการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันหรือการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันตลอดความหนาซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเค้นภายในตกค้างภายในชิ้นงานที่ไม่เท่ากันและโมเมนต์ดัด จากผลการทดลองเราสามารถทำนายได้ว่าการบิดงอของชิ้นงานจะมีค่าการโก่งตัว(Deflection) โดยมีค่ามากที่สุดที่ปลายชิ้นงาน และน้อยที่สุดที่บริเวณใกล้ Gate การบิดงอจะพิจารณาจากผิวกลางของชิ้นงาน เนื่องจากข้อกำหนดของโปรแกรมที่ใช้ โปรแกรมจะสร้างแบบจำลองของชิ้นงานแบบผิวระนาบกลาง(Mid Surface) ดังนั้นการบิดงอจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเมื่อเปรียบเทียบกับผิวระนาบเดิมซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นที่การหดตัวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของความดันในการฉีดและเวลาในการฉีดกับการหดตัวของพลาสติกชนิดอะมอर्फในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด สามารถสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

1 การทดลองการศึกษาผลกระทบของความดันในการฉีด(Packing Pressure) จะพบว่า การหดตัวของชิ้นงานพลาสติกจะลดลง เมื่อเพิ่มความดันในการฉีด เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นหรือปริมาตรจำเพาะของเนื้อพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เพราะการเพิ่มความดันในการฉีดมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการรักษาความดันในโพรงแบบไว้ เป็นการชดเชยเนื้อพลาสติกเนื่องจากการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติก ซึ่งเราสามารถหาค่าประมาณของความดันในการฉีดจากสูตรการคำนวณความดันในการฉีดหรือประมาณครึ่งหนึ่งของความดันที่ใช้ในช่วงเดิมเดิม ดังนั้นความดันที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการหดตัวมีค่าลดลงแต่ต้องไม่ทำให้เกิดแรงการจับยึดแม่พิมพ์ของเครื่องฉีด(Clamping Force)มากกว่าที่เครื่องกำหนด จากการทดลองจะมีการหดตัวลดลงทั้งในแนวระนาบและแนวความหนา

2 การทดลองการศึกษาผลกระทบของเวลาในการฉีด(Packing time) จะพบว่ามีค่าการหดตัวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงความดันในการฉีด เนื่องจากเวลาในการฉีดต้องสัมพันธ์กับเวลาการปิดตัวของ Gate เพราะเมื่อ Gate ปิดลงความดันที่ใช้ในการอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปในโพรงแบบก็จะไม่สามารถกระทำได้ เราสามารถหาค่าเวลาที่ในการปิดตัวของ Gate จากโปรแกรม โดยสังเกตค่า Ejection Temperature ที่ Node ใกล้ Gate จากกราฟระหว่งอุณหภูมิที่ Node ใกล้ Gate กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

3 จากการทดลองพบว่าค่าการหดตัวจะมีค่ามากในทิศทางขนานกับการไหลหรือทิศทางในแนวแกน Y สำหรับกรณีตัวอย่างมากกว่าในทิศทางอื่น ๆ เมื่อพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์ โซโมเลกุลบริเวณใกล้ผิวของโพรงแบบจะไหลและถูกดึงให้ตึงด้วยแรงที่เกิดจากความเร็วเฉือนและจะเรียงตัวในทิศทางการไหล ส่วนโซโมเลกุลพลาสติกบริเวณตรงกลางจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วเฉือนน้อย ทำให้โซโมเลกุลไม่มีการเรียงตัวกันตามแนวฉีด ดังนั้นบริเวณผิวของชิ้นงานจะมีความเค้นเฉือนมาก เนื่องจากการเรียงตัวของโซโมเลกุลที่ถูกดึงในแนวทิศการไหลและบริเวณตรงกลางจะเกิดความเค้นเฉือนน้อยที่สุดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการฉีดและเข้าสู่การหล่อเย็น การเรียงตัวของสายโซโมเลกุลเริ่มคลายตัว(Relaxation) โซโมเลกุลที่ถูกดึงจะเริ่มหดตัวกลับ ที่บริเวณใกล้กับผนังแม่พิมพ์การเรียงตัวของสายโซโมเลกุล (Residual Orientation) มีมากเนื่องจากการแข็งตัวที่เร็วมาก ดังนั้นโซโมเลกุลจึงมีเวลาในการผ่อนคลายน้อย การแข็งตัวที่ถูกดึงยึดค้างเอา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ทำให้มีความเค้นตกค้างสูง ส่วนบริเวณที่อยู่ห่างจากผนังแม่พิมพ์มีการถ่ายความร้อนที่ช้า การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตกค้างบริเวณนั้นจึงน้อย การหดตัวกลับที่ไม่เท่ากันของโซ่โมเลกุลตลอดความหนา จะทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานและจะมีค่าโดยเฉพาะทิศทางที่ขนานกับการไหล

4 เราสามารถวิเคราะห์การบิดตัวของชิ้นงานได้จากผลการวิเคราะห์การหดตัวได้ เนื่องจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันจะเป็นผลลัพธ์นำไปสู่การบิดงอ โดยทั่วไปชิ้นงานจะมีรูปร่างซับซ้อนจึงต้องการการออกแบบระบบของแม่พิมพ์, การหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพและสภาวะเงื่อนไขในการฉีดที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันภายในชิ้นงานและจะเป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นภายในรวมถึงการบิดงอในที่สุด ดังนั้นเราควรควบคุมการหดตัวให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อลดปัญหาการบิดตัว

5 นอกจากพารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ช่วยในการลดผลการหดตัวและบิดงอบนชิ้นงานเช่น การปรับค่า β หรือ α ในสมการ shrinkage , อุณหภูมิการหลอมเหลวของพลาสติก , อุณหภูมิของแม่พิมพ์ , อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น, ระบบการหล่อเย็นและการเลือกใช้วัสดุการทำแม่พิมพ์ เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกชิ้นงานเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา ควรเลือกชิ้นงานที่เกิดปัญหาจริงในอุตสาหกรรมหรือสร้างแม่พิมพ์เพื่อกำหนดลักษณะของปัญหาและวิธีการแก้ไขให้ชัดเจน
2. การทำการ Meshing หรือการแบ่งกริดเพื่อกำหนด Node และ Element บน Model ชิ้นงาน ควรใช้ค่า อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวหรือเรียกว่า (Aspect Ratio) ของ Element ชนิด 2 มิติ รูปร่างสามเหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 6 เนื่องจากต้องกำหนดขนาดของ Element ไม่ให้มีความแตกต่างกันมากนักทั้งชิ้นงานเพื่อผลการทำนายที่แม่นยำเพราะเราจะใช้ Node ตรงกลาง Element ในการทำไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาการกระจายตัวของความเค้นและอุณหภูมิ เป็นต้น
3. เนื่องจากชิ้นงานมีความซับซ้อนจึงไม่สามารถสร้าง Model ในโปรแกรม Mold Flow ได้ ฉะนั้นการใช้ โปรแกรมเพื่อสร้าง Model ควรใช้โปรแกรมที่สามารถทำ Finite Element Meshing ได้ และเนื่องจากการวิเคราะห์จะใช้ Mesh แบบผิว (Shell หรือ Surface) จึงจำเป็นต้องคัดเลือกผิวจากด้านบนหรือ (Cavity) มาทำ Meshing และกำหนดความหนาของชิ้นงาน เพื่อผลการทำนายที่แม่นยำ (ข้อเสนอแนะจากโปรแกรม)
4. การเลือกวัสดุที่จะใช้ในการทำนายผลจากโปรแกรม ในฐานะข้อมูลควรเลือกให้ตรงกับที่ใช้ในการทดลองจริงหรือให้มีคุณสมบัติของวัสดุที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะคุณสมบัติบางตัวมีผลกับการวิเคราะห์มาก เช่น ค่าการขยายตัวของวัสดุ เป็นต้น

5. การวิเคราะห์ช่วงเติมเต็มก่อนที่จะวิเคราะห์การฉีดยา ควรกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดให้ครบถ้วน เช่น เวลาที่ใช้ในการฉีดเติมเต็มหรืออัตราการไหลของพลาสติกเหลว มากกว่าที่จะให้โปรแกรมหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อผลการทำนายที่แม่นยำ
6. การตรวจสอบชิ้นงาน ควรมีการสุ่มการทำ Inspection เพื่อให้ได้ค่าที่มีมาตรฐาน
7. ภายหลังจากปลดชิ้นงาน ควรมีการควบคุมอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกับการหดตัว เพราะวัสดุพลาสติกส่วนใหญ่จะหดตัว 90%ภายในเวลา 4 ชั่วโมงหลังการปลดชิ้นงาน และ 10 % ภายใน 7 วันหรือมากกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubin, I.I., **Injection Molding Theory and Practice**, John Wiley & Sons, New York, (1992)
- [2] Austin, C.A., **Filling of Mold Cavities in Computer Aided Engineering for Injection Molding** Ed. E.C. Bernhardt, Hanser, New York, (1983).
- [3] Rodriguez, F., **Principle of Ploymer Systems**, McGraw-Hill, New York, (1992).
- [4] Menges, G. and Mohren, P., **How to Make Injection Mold**, Hanser, New York, (1986).
- [5] Shames, I.H., **Introduction to Solid Mechanics** (2nd End) Prentice Hall, NJ. (1989).
- [6] Fredrickson, A.G., **Principle and Applications of Rheology**, Prentice Hall, NJ. (1964).
- [7] Peter Kennedy, **A.U.S. Flow Analysis Reference Manual**, Shortrun Books. (1993).
- [8] Bird, R.B., Armsrong, R.C. and Hassager, o., **Dynamics of Polymeric Liquids: Volume 1 Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, New York. (1977).
- [9] Marsden, J.E., and Tromba, A.J., **Vector Calculus**, W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1976).
- [10] Aris, R. **Vector, Tensor and Basic Equations of Fluid Mechanics**, Dover, New York, (1989)
- [11] Bird, R.A., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., **Transport Phenomena**, John Wiley & Sons, New York, (1960).
- [12] Sears, F.W., Salinger, G.L., **Thermodynamics, Kinetic Theory and Statistical Thermodynamics** (3rd Ed) Addison-Wesley Publishing Company, New York, (1975).

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายการ
หดตัวและบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด
Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection
Molding for the Prediction of Shrinkage and Warpage

จากรัตร์ เจริญสุข, อภินิษฐ์ สอนตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร66(2)326-9053, E-Mail: asontragul@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการการศึกษาพฤติกรรมของพลาสติกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด โดยวิธีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) จากโปรแกรมสำเร็จรูปคือ MOLD FLOW โดยใช้พลาสติกหลอมเหลวเป็นของไหลซึ่งเป็นของเหลวหนืดที่กักตัวได้และอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่คงที่ ทำการศึกษาเพื่อหาค่าตัวแปรของเส้นโครงร่างของช่วงการฉีด (Packing -Profile) ที่มีผลกระทบบกับการหดตัวหลายกรณีตัวอย่างจากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มของการทดลองกับการทำนายสอดคล้องกัน เปรียบเทียบกับข้อมูลจริง

Abstract

This thesis deals with a study, by mean of integrated mathematical simulation of fluid flow and heat transfer in injection molding for prediction of shrinkage, using a finite element method from software, MOLD FLOW ANALYSIS. The plastic is assumed, viscous, compressible, flowing under non-isothermal conditions. The effect of packing profile that influences both behaviors were studied. The trend of the experimental result is in agreement with the simulation.

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้พลาสติก เป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย การฉีดพลาสติกให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพนั้นต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย อย่าง ปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน ดังนั้นการฉีดพลาสติกที่ดีจำเป็นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างดีด้วย

เนื่องจากการแก้ปัญหาของการฉีดพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญ

มากกับหลาย ๆ อุตสาหกรรม พฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมีหลายปัญหาที่ทำให้ชิ้นงานขาดคุณภาพ

การหดตัวและการบิดงอเป็นปัญหาที่ยากต่อการพิจารณา และการแก้ไข ชิ้นงานพลาสติกจะถูกกำหนดค่าความตลัดเคลื่อน (Tolerance) ตามลักษณะการใช้งานและราคา เมื่อเราสามารถทำนายลักษณะของพฤติกรรมได้ก็สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและการแก้ไข เมื่อผ่านการวิเคราะห์แล้วซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์และการพัฒนาผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของพลาสติกมีหลายปัจจัย เช่น ความดันฉีด (Holding Pressure), เวลาที่ใช้ในการฉีด (Holding time), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature), อัตราการฉีด (Injection flow rate), รูปร่างของทางเข้า (Gate - Geometry) ลักษณะการหล่อเย็น (Cooling network) และอื่น ๆ

ในการแก้ปัญหาคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกในอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นแต่เดิมใช้วิธีอาศัยประสบการณ์ของช่างแม่พิมพ์และช่างฉีดพลาสติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีคำนวณแบบ Analytic เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นและทำการทดลองซ้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการกำหนดเงื่อนไขการฉีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ส่วนการวิเคราะห์แบบ Analytic ไม่สามารถให้คำตอบในปัญหาที่ซับซ้อน จึงนำเอาซอฟต์แวร์ที่ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) และ การประมาณค่า (Approximation Method) ที่เรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ มาเป็นเครื่องมือเพื่อทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการฉีด

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกถูกออกแบบให้ใช้กับชิ้นงานหลายประเภทแบ่งได้ดังนี้ 1. ชิ้นงานทั่วไป 2. ชิ้นงานทางวิศวกรรมและ 3. ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่า ในการผลิตชิ้นงานนั้น จำเป็น

ต้องให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์และมีเวลาการผลิตที่สั้น เพื่อการแข่งขันของ

ตลาดปัจจุบันจึงทำให้การออกแบบและการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

วิศวกรรมร่วมขนานถูกนำมาใช้เพื่อตอบสนองตลาดในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์,การผลิตแม่พิมพ์และขบวนการผลิต การใช้คอมพิวเตอร์ในงานวิศวกรรม Computer Aided Engineering (CAE)เป็นเครื่องมือที่สำคัญ เพราะCAEถูกใช้ในการอธิบายการทดลองเชิงตัวเลข(Numerical Experiments) และถูกใช้ในการหาค่าประมาณที่เหมาะสม จึงกลายเป็นสิ่งสำคัญเมื่อการวิเคราะห์มีขนาดใหญ่,ซับซ้อนและมีความละเอียดสูง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่มีหลายตัวแปรจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีด้าน Optimization เข้ามาช่วย ซึ่งต้องการฐานข้อมูลในช่วงกว้างจึงจำเป็นต้องใช้การประมาณค่าทั้งExtrapolate และInterpolate

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการ Continuity คือ

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z}\right) = 0 \tag{1}$$

สังเกตว่าพจน์สุดท้ายมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิดกล่าวคือไม่มีความเร็วในทิศทางความหนา สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาน้อยสมมติฐานนี้จะถูกใช้ในการไหลผ่านช่องผนังบางๆโดยความดันจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะและจะไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางความหนา สมการโมเมนตัมคือ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} (\tau_x) \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} (\tau_y) \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

เนื่องจากส่วนใหญ่ชิ้นงานพลาสติกมีความหนาน้อย เราสามารถสมมติว่าพจน์ของสมการโมเมนตัมบางพจน์มีค่าน้อยมาก ส่วนใหญ่พจน์ที่มีผลกระทบคือ ผลต่างของความดัน(Pressure Gradient) และแรงเนื่องจากความหนืด(Viscous Force) สมการพลังงาน รวมทั้งพจน์ของการพาความร้อนในทิศทางความหนา คือ

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{5}$$

Boundary Conditions กำหนดดังนี้

$P = P_{in}$ ความดันที่จุดกำหนดการฉีดเข้า ณ node ใดๆ

$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ผลต่างของความดันในด้านความหนาเท่ากับศูนย์

$T = T_w$ อุณหภูมิที่ node เท่ากับที่ผนังแม่พิมพ์

$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ผลต่างของอุณหภูมิในด้านความหนาเท่ากับศูนย์

$T = T_{in}$ กำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวที่จุดฉีด

3. หลักการทั่วไปของ Shrinkage

การหดตัว(Shrinkage)ถูกใช้ในหลายความหมายโดยมีความสัมพันธ์กับขนาดของชิ้นส่วนพลาสติก กล่าวคือหมายถึงความแตกต่าง

ของขนาดระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นส่วนพลาสติกซึ่งเรียกว่า Processing Shrinkage , Mold Shrinkage และเป็นส่วนที่สนใจในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก เราจะกล่าวถึงชนิดของการหดตัวต่อไปในงานวิจัยภายหลัง ขณะที่ชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดแบบซ้ำๆ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุล (Orientation) ซึ่งจะถูกกำหนดเป็นมาตรฐานของคุณสมบัติของพลาสติกแต่ละชนิด เปอร์เซ็นต์ของการหดตัวของพลาสติกจะถูกกำหนดเป็นมาตรฐานตามมาตรฐานสากลทั่วไป เพื่อประโยชน์ในการใช้งานและแบ่งประเภทของชิ้นงาน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมพิถีพิถันความเผื่อของชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐาน เช่น JIS

การหดตัวของชิ้นงานพลาสติกขึ้นอยู่กับปัจจัยดังที่ความดันการฉีด,เวลาในการฉีด,อุณหภูมิการหลอมของพลาสติกที่Nozzle และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ การเย็นตัวไม่เท่ากันและการนำความร้อนของชิ้นงานแข็งตัวที่ไม่เท่ากันของด้านCoreและCavityเป็นสาเหตุของการหดตัว การหดตัวสามารถป้องกันได้โดยการใช้ Insert ,Ribและการเปลี่ยนแปลงความหนา (4)

ปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยพฤติกรรมการหดตัวของพลาสติกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เช่นการสะสมของการหดตัวเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับพลาสติกอะมอर्फ(1) การวัดการหดตัวของพลาสติกโดยใช้ Optical Sensor (2) การปรับปรุงผลการทำนายการหดตัวและการบดองโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุ(PVT) (3) ผลกระทบของความดันฉีดเข้ากับเวลาการฉีดเข้ากับพลาสติก ชนิดโพลีสไตรีน(4)การทำนายการหดพลาสติกด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขและการใช้ Process window (5) สมการการหดตัวของพลาสติกอะมอर्फในแนวระนาบและความหนา(6)

$$S_x = S_y = -\beta \cdot \bar{P}_s + \alpha \cdot [T_s - T_\infty] \tag{6}$$

$$S_z = -\frac{\nu}{1-\nu} \cdot (S_x + S_y) - \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \beta \cdot P_e - C_M \cdot P_{gf} \tag{7} \text{ เมื่อ}$$

กำหนดให้ S_x, S_y และ S_z คือค่าการหดตัวในด้านความกว้าง,ความยาวและความหนาของชิ้นงานตามลำดับ α คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น, β คือ ความสามารถในการการกอดตัวเชิงเส้น, $\bar{P}_s(z)$ ความดันของแต่ละชั้นความหนา, T_s คืออุณหภูมิของการแข็งตัว, P_e คือความดันก่อนปลดชิ้นงาน, $C_M \cdot P_{gf}$ คือเป็นพจน์ของการสูญเสียความร้อนของผนังแม่พิมพ์

4 การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง และผลกระทบของเส้นโครงร่างของช่วงการฉีดคือความดันการฉีดเข้าและเวลาการฉีดต่อการหดตัวในด้านความกว้าง,ความยาวและความสูง โดยการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทาง Numerical โดยใช้Software MOLD FLOW ANALYSIS

4.1 ข้อมูลของวัสดุ

วัสดุที่ใช้เป็นเทอร์โมพลาสติกแบบ Amorphous Crystalline

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ Acrolonitrile-butadiene-styrene (ABS) Supplier คือ TPI รูปแบบของความหนืดใช้ของ Mold Flow Second-order Model ซึ่งสร้างขึ้นโดยการทดลองของบริษัท Mold Flow ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของพลาสติกของแต่และผู้ผลิตพลาสติก เก็บไว้เป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก รูปแบบการไหลของโพลิเมอร์

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (8)$$

เมื่อกำหนดให้ τ คือ ความเค้นเฉือน

η คือ ส.ป.ของความหนืดที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับอัตราเฉือน

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz} \text{ คือ ความแตกต่างของความเร็ว (Velocity gradient)}$$

โดยฟังก์ชันของความหนืดหาได้จากการประมาณค่าตัวแปรสัมพันธ์ (Empirical Parameter)

Second-order Model

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_3 (\ln \dot{\gamma})^2 + A_4 T \ln \dot{\gamma} + A_5 T^2 \quad (9)$$

เมื่อ A_i คือ ค่าคงที่ รูปแบบนี้หาได้จากการทดลองที่ต้องการ

จะอธิบายพฤติกรรมของการหลอมเหลวของพลาสติก ข้อสำคัญมากที่สุดคือสมการนี้ต้องมีความแม่นยำสูงจึงจะทำให้การทำนายพฤติกรรมมีความถูกต้อง เมื่อใช้รูปแบบกับข้อมูลการทดลองและเพื่อให้มั่นใจว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้อธิบายค่าความเค้นเฉือนค่า

ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้ในการฉีดมีค่าดังนี้ ค่าการนำความร้อน

0.14 W/m°C, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ 1248 J/kg°C, ค่าความหนาแน่นขณะหลอมเหลว 949.1 kg/cm³ อุณหภูมิปลดชิ้นงาน 111.9°C อุณหภูมิที่พลาสติกหยุดการไหล 145.3°C ค่าเมื่อหดตัวของพลาสติก 0.5% สำหรับแม่พิมพ์



รูปที่ 1 แสดงชิ้นส่วนพลาสติก, และการทำ meshing

4.2 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติก และ แม่พิมพ์

การทดลองใช้เครื่องฉีดพลาสติก ผลิตโดยประเทศญี่ปุ่น

Model JSW 350 ขนาด 280 ตัน มีรายละเอียดดังนี้

1. แรงมากที่สุดในการจับยึด 280 ตัน
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 63 มิลลิเมตร
3. ปริมาตรการฉีดสูงสุด 748 ลบ.ซม.
4. ความดันสูงสุดในการฉีด 1600 ก.ก./ตร.ซม.

ชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนพลาสติกของตู้แช่แข็ง ขนาด 34 ม.ม. x 603 ม.ม. หนา 2 ม.ม. มีครีบริมแข็ง หนา 1.2 ม.ม. ลึก 35 ม.ม.

ลักษณะของแม่พิมพ์

1. 2 คาวีตี
2. Gate เข้าด้านข้าง
3. Sprue bush ยาว 40 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เรียว 2 องศา

สภาวะเงื่อนไขในการฉีด (Mold Conditions)

ในการทดลองการฉีดพลาสติก ได้กำหนดค่าเงื่อนไข

ในการฉีดดังนี้

1. ความเร็วในการฉีดเต็มเต็ม ชั้นที่ 1 - 3 ลบ.ซม./วินาที
2. ความเร็วในการฉีดเต็มเต็ม ชั้นที่ 2 - 50 ลบ.ซม./วินาที
3. ความเร็วในการฉีดเต็มเต็ม ชั้นที่ 3 - 7 ลบ.ซม./วินาที
4. อุณหภูมิการหลอมเหลว 225 องศา °C
5. อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น 30 องศา °C
6. เวลาที่ใช้ในการฉีดย้ำ 5 - 20 วินาที
7. ความดันที่ใช้ในการฉีดย้ำ 30 - 70 %
8. เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 40 วินาที
9. เวลาที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์ 2.5 วินาที

4.3 เส้นโครงร่างการฉีดพลาสติก (Packing Profile)

Packing Profile คือ การเปลี่ยนแปลงของความดันการฉีดย้ำ (Packing Pressure) กับเวลา

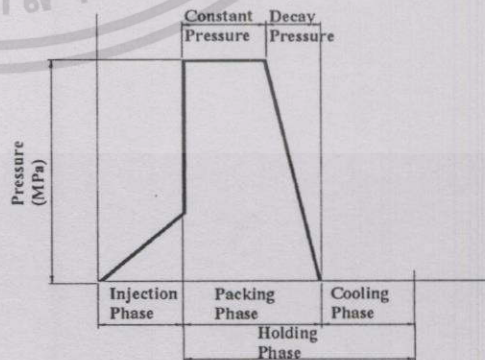
การบิดงอ (warpage) จะเกิดขึ้นเมื่อการหดตัวที่แตกต่างกันของชิ้นงาน บริเวณที่หดตัวไม่เท่ากันจะทำให้เกิดความเค้น (stress) บนชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสียรูป (deform) และการแตกร้าว

Packing Pressure คือ ความดันที่กระทำกับคาร์วีตีภายหลังการเติมเนื้อ เพื่อเป็นการชดเชยการหดตัวของพลาสติกเมื่อเย็นตัว

Packing time คือ ระยะเวลาของ Packing Pressure ควรเหมาะสมกับเวลาที่ทำให้ gate แข็งตัว

Cooling time คือ ระยะเวลาจาก Packing time ถึงแม่พิมพ์เปิด

Holding time คือ เวลาจากการสิ้นสุดการเติมเนื้อจนถึงการปลดชิ้นงาน เท่ากับ Packing time + Cooling time สำหรับ Packing time แล้ว Holding time สำคัญมาก เพราะมันเป็นผลรวมของระยะเวลาของการทำ Packing Analysis



แผนผัง เส้นโครงร่างของความดันฉีดย้ำ (Packing Profile)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวัดการหดตัวและค่าผิดพลาด

ในการทดลองนี้จะวัดชิ้นงานตัวอย่างเปรียบเทียบกับ

อุณหภูมิห้อง (คือ 25 องศาเซลเซียส) สัมพันธ์กับค่าการหดตัว $S = (d_0 - d) / d_0$ เมื่อ d_0 คือ ขนาดที่ต้องการวัดจากแม่พิมพ์ และ d คือ ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างคือชิ้นส่วนของตู้แช่แข็ง

ภายหลังจากชิ้นงานถูกปลดออกจากแม่พิมพ์จะทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2 วัน ส่วนการวัดจะแบ่งออกเป็น 3 ทิศทางคือความกว้าง, ความยาว และความหนา โดยวิธีการวัดดังนี้ หากการวัดโดยการสุ่มการวัด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดแต่ละทิศทางแล้วจึงนำไปหาค่าการหดตัว เครื่องมือวัดใช้เวอร์เนีย ชนิดอ่านค่าด้วยดิจิตอล มีความละเอียดเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร 2 ขนาดคือ 300 มิลลิเมตร และ 1000 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการทดลองจะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Mold Flow Analysis

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการหดตัวของชิ้นงาน

การทดลองจะใช้สภาวะเงื่อนไขในการฉีดตามตารางที่ 1 คือ การศึกษาการหดตัวเมื่อความดันฉีดเปลี่ยนแปลง และตารางที่ 2 คือ การศึกษาการหดตัวเมื่อเวลาการฉีดเปลี่ยนแปลง

การหดตัวสามารถเกิดขึ้นได้ทุกทิศทางทั้งความกว้าง, ความยาวและความสูงจากผลการทดลองการฉีดชิ้นงานตัวอย่างพบว่า การหดตัวจะมีค่าลดลง อย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความดันฉีด การเพิ่มความดันการฉีดจะทำให้พลาสติกที่ถูกอัดตัวในโพรงแม่พิมพ์มีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้การหดตัวมีค่าน้อยลงและจะหยุดทำงานเมื่อ gate ปิดหรือแข็งตัวเพราะเมื่อ gate ปิดความดันจากเครื่องฉีดจะไม่สามารถเข้าถึงโพรงคาร์วิตได้ ยิ่งความดันมากก็จะทำให้เนื้อพลาสติกที่อยู่ในโพรงมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีค่าการหดตัวลดลง ความดันการฉีดที่สูงมากเกินไปก็ไม่มีผลกระทบต่อ การหดตัว เมื่อเพิ่มเวลาการฉีดจะมีผลกระทบต่อ เพราะเวลาการฉีดต้องสัมพันธ์กับเวลาที่ gate ของชิ้นงานแข็งตัวซึ่งทำให้ความดันในการที่จะ pack ไม่มีผลกระทบต่อ การหดตัว โดยปกติความดันจะสามารถใช้ pack ชิ้นงานให้มีขนาดตามแม่พิมพ์ได้ก็ต่อเมื่อ gate ยังไม่แข็งตัวการที่ชิ้นงานแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว จะทำให้การหดตัวมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถใช่โปรแกรม mold flow หาค่าเวลาที่ gate แข็งตัวจากกราฟระหว่างความดันกับเวลา ณ node ใกล้ gate เพื่อสังเกตความดันที่จะทำให้ gate ปิด หรือ 0 MPa

ผลการวัดการหดตัวจากการฉีดพลาสติกจะแสดงในตารางที่ 3 และผลการทำนายจากซอฟต์แวร์ Mold Flow แสดงในตารางที่ 4

6. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทำนาย

จากกราฟรูปที่ 2 - 3 เป็นการแสดงการหดตัวด้านความยาวเปรียบเทียบกับผลการทำนาย พบว่าผลการฉีดมีค่าน้อยกว่าการทำนาย เนื่องจากผลกระทบของระบบการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ที่สามารถถ่ายเทความร้อนในคาร์วิตได้ดีกว่าการทำ optimization ของระบบหล่อเย็นในตัวโปรแกรม เนื่องจากการใช้โปรแกรมการประมาณค่าจึงมีค่าผิดพลาดอยู่ระหว่าง 2-4 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับในทางวิศวกรรม

กราฟรูปที่ 4 - 5 แสดงการหดตัวด้านความกว้างซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทำนายและการเพิ่มความดันจะลดค่าการหดตัวได้ชัดเจนและสามารถลดการหดตัวได้ดีกว่าการเพิ่มเวลาในการฉีด เพราะการเพิ่มเวลาการฉีดทำให้การหดตัวแทบไม่เปลี่ยนแปลง

กราฟรูปที่ 6 - 7 แสดงการหดตัวด้านความสูงซึ่งค่าใกล้เคียงกับผลการทำนาย

จากรูปที่ 10 - 11 การหดตัวในทิศทางความกว้างและความยาวมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือจะหดตัวมากที่สุดสิ้นสุดของการไหล คือที่ปลายชิ้นงานและบริเวณกลางชิ้นงานเพราะบริเวณที่การไหลบรรจบกัน ทั้งสองบริเวณจะเย็นตัวก่อนบริเวณอื่น ณ เวลาเดียวกัน ส่วนรูปที่ 12 ด้านความหนาจะหดตัวที่ปลายครึ่งมากเพราะจะเย็นตัวก่อนบริเวณอื่น การเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของชิ้นงานทำให้เกิดความเค้นตึงภายในชิ้นงานและเกิดโมเมนต์ดัดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการหดตัวและการบิดของชิ้นงาน ฉะนั้นควรออกแบบแม่พิมพ์ให้ชิ้นงานเย็นตัวเท่าๆกันก่อนที่จะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เพื่อลดการหดตัวของชิ้นงาน

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของความดันในการฉีดและเวลาในการฉีดกับการหดตัวของพลาสติกชนิดอะมัลไฟในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด โดยทำการเปรียบเทียบผลการฉีดพลาสติกกับการทำนายโดยใช้โปรแกรม Mold Flow ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เรียกว่า Finite Element Method เป็นการนำเทคโนโลยีทางด้าน Computation Engineering มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นการทำนายพฤติกรรมของไหลและผลกระทบต่างๆ ของพลาสติกหรือเรียกว่า Rheology

จากผลการศึกษาพบว่าความดันในการฉีดจะมีผลกระทบต่อโดยตรงกับการหดตัวของพลาสติกทั้งแนวระนาบและความหนา เพราะว่าการเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้ไม่ว่าจะเป็น การหดตัวเชิงปริมาตร, เหนือหน้าหรือขนานตามรูปร่างของชิ้นงาน ขณะที่เวลาในการฉีดสัมพันธ์กับการหดตัวของพลาสติกก็ต้องให้สัมพันธ์กับการแข็งตัวของ gate ส่วนใหญ่การหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามแนวการไหลของพลาสติกจนกว่าจะสิ้นสุดขบวนการ holding ถ้าสามารถทำนายและมีการป้องกันการหดตัวแล้วชิ้นงานก็จะมีผลการหดตัวน้อยหรือได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้

นอกจากพารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ช่วยในการลดผลการ shrinkage บนชิ้นงาน เช่น การปรับค่า β หรือ α ในสมการ shrinkage, อุณหภูมิการหลอมเหลวของพลาสติก, อุณหภูมิของแม่พิมพ์, อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น, ระบบการหล่อเย็นและการเลือกใช้วัสดุการทำแม่พิมพ์ เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

1. R. Greiner and F. R. Kryszevski, Rheol. Acta, 23, 387 (1984)
2. Charles L. Thomas and Anthony J. Buy, Polym. Eng. Sci. 39, 9 (1999)
3. P. Niggemeier and W. Machaeli, SPE Antec. Paper,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0358 , (1999)

4. K.M.B Jnassen , R.Pantani and G. Titomalió ,Polym .Eng.Sci.38,2 (1998)

5. T.James Wang,SPE Antec. Paper ,0351,(1999)

6. K.M.B Jansen and G. Titomalió , Polym. Eng.Sci. 36,2029 (1996)

No.	Code	HP1	HP2	HP3	TH1	TH2	TH3	CT
1	P45t20	45	40	35	10	5	5	40
2	P50t20	50	40	35	10	5	5	40
3	P55t20	55	40	35	10	5	5	40
4	P60t20	60	40	35	10	5	5	40
5	P65t20	65	40	35	10	5	5	40
6	P70t20	70	40	35	10	5	5	40

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดในช่วงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการหดตัวเมื่อความดันในการฉีดเปลี่ยนแปลง

No.	Code	HP1	HP2	HP3	TH1	TH2	TH3	CT
7	P55t5	55	40	35	2	2	1	40
8	P55t7	55	40	35	3	3	1	40
9	P55t9	55	40	35	4	3	2	40
10	P55t11	55	40	35	5	3	3	40
11	P55t13	55	40	35	5	4	4	40
12	P55t15	55	40	35	5	5	5	40
13	P55t17	55	40	35	7	5	5	40
14	P55t19	55	40	35	9	5	5	40

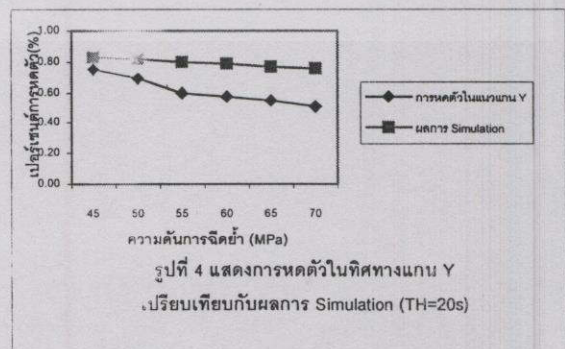
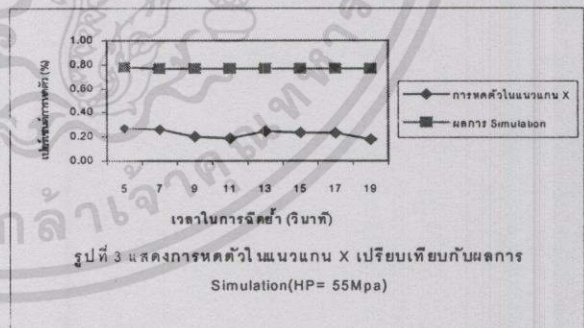
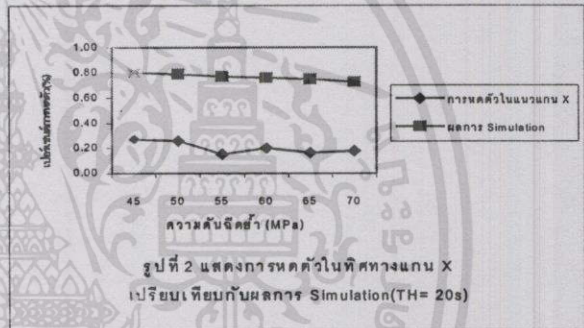
ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดในช่วงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการหดตัวเมื่อเวลาในการฉีดเปลี่ยนแปลง

No.	Code	Sx	Sy	Sz
1	P45t20	0.27	0.75	0.620
2	P50t20	0.26	0.69	0.580
3	P55t20	0.15	0.60	0.580
4	P60t20	0.20	0.57	0.539
5	P65t20	0.16	0.55	0.498
6	P70t20	0.18	0.51	0.498
7	P55t5	0.27	0.67	0.622
8	P55t7	0.26	0.67	0.622
9	P55t9	0.20	0.67	0.580
10	P55t11	0.19	0.64	0.539
11	P55t13	0.24	0.63	0.539
12	P55t15	0.23	0.60	0.498
13	P55t17	0.23	0.59	0.498
14	P55t19	0.18	0.56	0.456

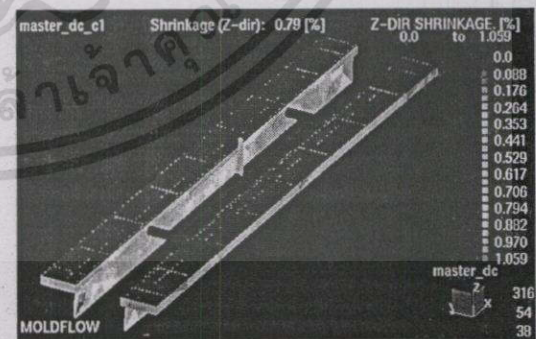
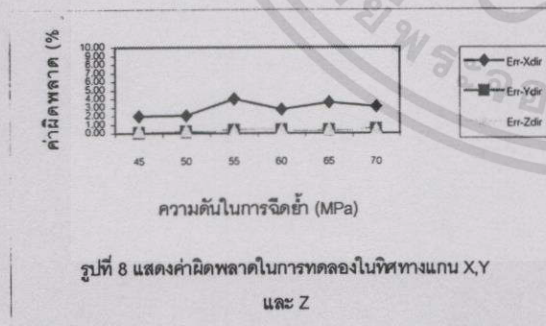
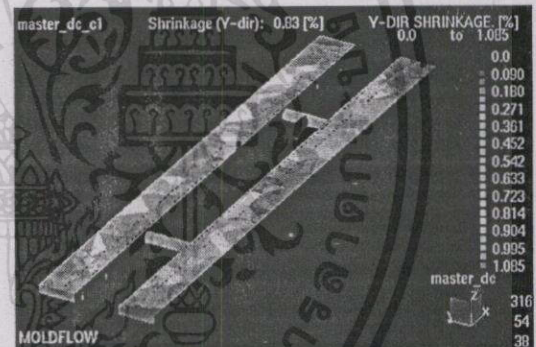
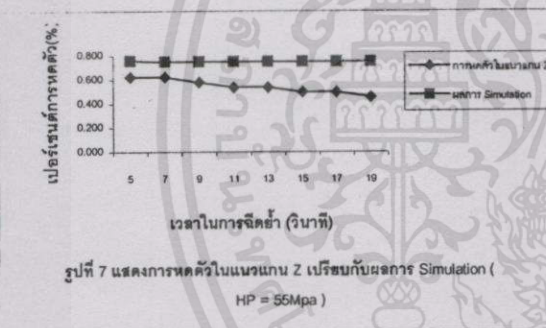
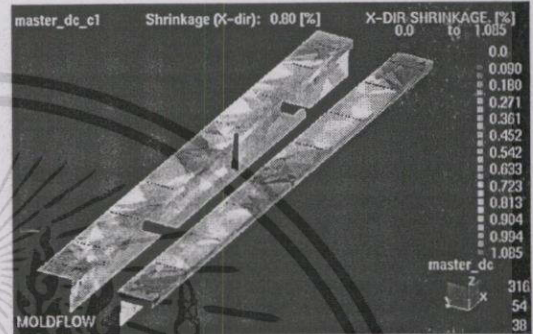
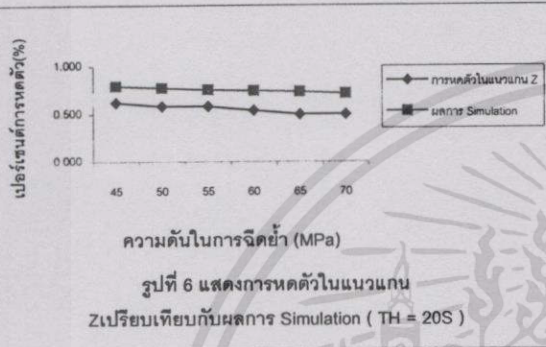
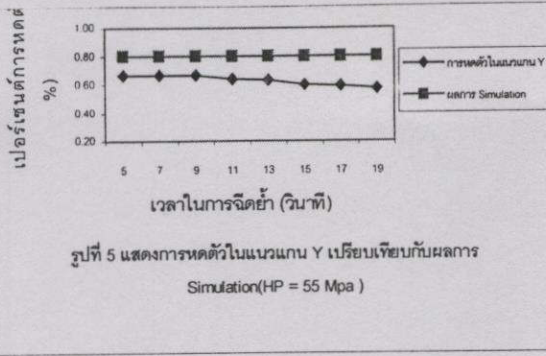
ตารางที่ 3 แสดงค่าการหดตัวโดยวัดจากการทดลองการฉีดพลาสติก

No.	Code	Sx	Sy	Sz
1	P45t20	0.8	0.83	0.79
2	P50t20	0.79	0.82	0.77
3	P55t20	0.77	0.8	0.75
4	P60t20	0.76	0.79	0.74
5	P65t20	0.75	0.77	0.73
6	P70t20	0.73	0.76	0.71
7	P55t5	0.78	0.80	0.76
8	P55t7	0.77	0.80	0.75
9	P55t9	0.77	0.80	0.75
10	P55t11	0.77	0.80	0.75
11	P55t13	0.77	0.80	0.75
12	P55t15	0.77	0.80	0.75
13	P55t17	0.77	0.80	0.75
14	P55t19	0.77	0.80	0.75

ตารางที่ 4 แสดงค่าการหดตัวโดยวัดจากผลการทดลองการจากโปรแกรม Mold Flow



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอกนิษฐ์ สอนตระกูล เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน 2516 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2539

ปี พ.ศ. 2539 ได้เข้าทำงานที่ บริษัท โมลด์ แอนด์ไดแมนิฟแฟคเจอร์ริง จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรประจำสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี ปัจจุบันในตำแหน่ง ผู้จัดการแผนก Mold Engineering Service



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้