

การแก้ปัญหา AIR TRAP ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัย
การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

Troubleshooting for AIR TRAP in Plastic Injection Moulding

by using Computer Aided Engineering (CAE)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขที่.....
เลขทะเบียน... 46009
วัน, เดือน, ปี 27 ก.พ. 2546

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

511954013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัย
การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์
Troubleshooting for Air Trap in Plastic Injection Moulding
by using Computer Aided Engineering (CAE)

โดย
นาย วิศิษฐ์ ชัยเทอดเกียรติ, นาย อภิสิทธิ์ หัตถพร, นาย อุทัย รื่นญาติ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

Troubleshooting for Air Trap in Plastic Injection Moulding by using Computer Aided Engineering

ผู้จัดทำ

1. นาย วิศิษฐ์ ชัยเทอดเกียรติ รหัสประจำตัว 41014745
2. นาย อธิธิพล หัตถพร รหัสประจำตัว 41014810
3. นาย อุทัย รื่นญาติ รหัสประจำตัว 41014811



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัย
การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

นาย วิศิษฐ์ ชัยเทอดเกียรติ 41014745

นาย อธิธิพล หัตถพร 41014810

นาย อุทัย รื่นญาติ 41014811

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงส์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

กรณีศึกษานี้เป็นการแก้ปัญหาแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยใช้โปรแกรม Computer Aided Engineering (CAE) วิเคราะห์การเกิดปัญหาการเกิด Air Trap เนื่องจากแม่พิมพ์ที่นำมาวิเคราะห์มีปัญหาการเกิดรอยไหม้ที่ปลายชิ้นงานซึ่งเกิดจากอากาศร้อนที่อยู่ใน CAVITY ของแม่พิมพ์ซึ่งถูกไล่โดยน้ำพลาสติกแล้วไหลออกจากแม่พิมพ์ไม่ได้ ดังนั้นจึงนำแบบของแม่พิมพ์มาทำการ Simulation ในโปรแกรมทางด้าน CAE เพื่อหาจุดที่เกิด Air Trap และเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำพลาสติกในแม่พิมพ์ แล้วนำความรู้ที่ได้แก้ไขแบบของแม่พิมพ์และตัวแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการคิดจริงเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรมทางด้าน CAE เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกต่อไป

Troubleshooting for Air Trap in Plastic Injection Moulding
by using Computer Aided Engineering (CAE)

Wisit Chaiterdkerd

Ittipon Hutthaporn

Uthai Ruenyart

Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

This case study aims to find a technique to improve plastic – injection mould by applying CAE program for analyzing Air Trap initiation, As simulated the mould , burnmark locations were shown at the tip caused by hot air which generated by packing , holding pressure , causing by unflown plastic melt , the mould is simulated in CAE program to find Air Trap initiator and analyze flow direction of plastic melt . The analyzing results were used to configure . The experiments were also studied by injection moulding technique. Experimental and simulation results were compared . Final summary will be applied in designing and producing plastic mould in the future.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.พงษ์เจตพรหมวงศ์ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบนซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ศูนย์เทคโนโลยีวิศวกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และดร.วุฒิพงษ์ รุ่งศรีสันต์ดีวานนท์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและคำปรึกษา สำหรับใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้โดยตลอด

ขอบพระคุณ สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาววิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำแนะนำในการวิจัยนี้มาโดยตลอด



วิศิษฐ์ ชัยเทอดเกียรติ

อธิพิณ หัตถพร

อุทัย รันญาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	IV
สัญลักษณ์	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ	4
2.1 ชนิดของโพลีเมอร์	4
2.2 ความเหนียว, อัตราการยืดและความเค้นยืด	5
2.3 ของไหลชนิด Newtonian and Non-Newtonian	6
2.4 รูปแบบความเหนียวสำหรับการวิเคราะห์การไหล	6
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเหนียว, อุณหภูมิและอัตราการยืด	9
2.6 การประมาณค่านอกช่วงของข้อมูลความเหนียว	9
2.7 คุณสมบัติทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์การไหล	10
2.8 ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ความร้อน	15
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหล	18
3.1 ความเค้นและความเครียดในของของไหล	18
3.2 สมการควบคุมการไหล	24
3.3 สมการควบคุมในการวิเคราะห์การไหลในสภาวะการฉีดย้า	38
3.4 ผลเฉลยเชิงตัวเลขของกระบวนการฉีดย้า	47
บทที่ 4 แนะนำการใช้โปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นในการนำโปรแกรมไปประยุกต์กับปัญหา	57
4.1 แนะนำ โปรแกรม MOLDFLOW	57
4.2 ข้อคำนึงในการออกแบบ	61
4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ การฉีดพลาสติก	65

บทที่ 5 การวิจัยและการดำเนินงาน	67
5.1 อุปกรณ์การทดลอง	67
5.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	68
5.3 ปัญหาที่เกิดกับชิ้นงาน	68
5.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ	68
5.5 การส่งผ่านข้อมูลเพื่อเข้าสู่โปรแกรม	69
5.6 การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CAE	69
5.7 ผลการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม MOLDFLOW	70
5.8 ผลจากการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยโปรแกรม MOLDFLOW	79
5.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้แม่พิมพ์	80
5.10 ผลการทดลอง	82
บทที่ 6 สรุปผลการปฏิบัติงาน	114
6.1 บทสรุป	114
6.2 ข้อเสนอแนะ	114
บรรณานุกรม	116
ภาคผนวก	117



สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของพลาสติกและโลหะ

11



สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 แสดงแรงเฉือนเนื่องจากการไหลแบบสภาวะคงที่	5
รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน	6
รูปที่ 2.3 แสดงการประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ	9
รูปที่ 2.4 แสดงข้อมูลของความหนืดกับเส้นยุคการไหล	10
รูปที่ 2.5 แสดงการกำหนดสภาวะการนำความร้อน	11
รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอัตราเฉือนและอุณหภูมิข้ามหน้าตัดของโพรง	12
รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายของความหนืดข้ามหน้าตัดของโพรง	13
รูปที่ 2.8 ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความหนืดนอกช่วง	14
รูปที่ 2.9 PVT ใคอะแกรม	15
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุอะมอर्फิก ชนิดโพลีเอทิลีน	17
รูปที่ 3.1 มิติจำลองของ Stress Vector	18
รูปที่ 3.2 แสดงความเค้นของผิว 3 ด้าน	19
รูปที่ 3.3 แสดงสภาวะเงื่อนไขที่ขอบ	36
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ของโปรแกรม MOLDFLOW	59
รูปที่ 4.2 แผนภาพ แสดงขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	63
รูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกบน โปรแกรม MOLDFLOW	64
รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก	67
รูปที่ 5.2 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก	68
รูปที่ 5.3 แสดงแบบชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม Pro Engineer	69
รูปที่ 5.4 ชิ้นงานที่ทำกร Mesh	69
รูปที่ 5.5 แสดงจุดที่เกิด Air Trap	70
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการเกิด Air Trap	79
รูปที่ 5.7 ดอกส่วานและ Remmer	80
รูปที่ 5.8 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่จะทำการแก้ไข	80
รูปที่ 5.9 แบบ AutoCad ของแม่พิมพ์ที่ทำการแก้ไขแล้ว	81
รูปที่ 5.10 ชิ้นงานพลาสติกหลังทำการแก้ไขและฉีดด้วยค่าจากพนักงานฉีดพลาสติก	82
รูปที่ 5.11 ชิ้นงานพลาสติกหลังทำการแก้ไขและฉีดด้วยค่าจากโปรแกรม MOLDFLOW	82
รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบชิ้นงาน	82
รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบผลการแก้ไขชิ้นงาน	83
รูปที่ 5.14 กราฟแสดง Pressure Profile	93
รูปที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์ Residual Stress	94
รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ Pressure End of Filling	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และซ้่างอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์ทิศทางการไหล	96
รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์ Bulk Shear Rate	97
รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ Bulk Temperature	98
รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ Time to Freeze	99
รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ Time to Fill	100
รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน	101
รูปที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน	102
รูปที่ 5.24 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาตรชิ้นงาน	103
รูปที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน	104
รูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน	105
รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน	106
รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน	107
รูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาตรชิ้นงาน	108
รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน	109
รูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน	110
รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน	111
รูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน	111
รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาตรชิ้นงาน	112
รูปที่ 5.35 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน	112
รูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน	113



สัญลักษณ์

c_p	ค่าความจุความร้อน
\hat{e}_1, \hat{e}_2	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
\bar{g}	เวกเตอร์แรงโน้มถ่วง
h	ครึ่งความหนาของพลาสติกหลอมเหลวในโพรงแบบ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
m	มวล
\bar{k}	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	ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคของของไหลในทิศทาง x
v_x	ความเร็วในทิศทางแกน X
v_y	ความเร็วในทิศทางแกน Y
v_z	ความเร็วในทิศทางแกน Z
\bar{x}	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคของของไหล
A	พื้นที่บริเวณระนาบหรือหน้าตัดกลม
\bar{F}	เวกเตอร์ของแรง
\bar{H}	Specific Enthalpy
\underline{I}	Unit Tensor
L	ความยาวอิลิเมนต์ของ Runner
$N_i^{(e)}$	Shape Function สำหรับแต่ละอิลิเมนต์
$R(x)$	Residual เนื่องจากการประมาณค่า
S	เงื่อนงำที่พื้นผิว
\bar{S}	Specific Entropy

สัญลักษณ์ (ต่อ)

S_1	Fluidity สำหรับ Runner
S_2	Fluidity สำหรับคาร์วิตี
	อุณหภูมิ
g	อุณหภูมิช่วง Glass Transition
\hat{U}	Specific Internal Energy
	ปริมาตร
(t)	ปริมาตรของวัสดุ
$\hat{\cdot}$	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

ในปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันมากมายซึ่งก่อนขบวนการแปรรูปพลาสติกจะมาถึงนั้น จะมีปัจจัยสำคัญคือการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์นั้นมีหลายชนิดมีทั้งแม่พิมพ์ฉีด แม่พิมพ์เป่า แม่พิมพ์ Extrude และอื่นๆ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ผลิตกันอยู่ทั่วไปจะใช้ประสบการณ์การออกแบบแม่พิมพ์และผลิตแม่พิมพ์ ต่อจากนั้นก็ทำการลองผิดลองถูกในการฉีดและปรับค่าไปเรื่อยๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาตามมาในขั้นตอนฉีดขึ้นงานทำให้เกิดรอยเชื่อม การบิดตัว เกิดรอยไหม้และอื่นๆ ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางการออกแบบแม่พิมพ์ได้มีการพัฒนาไปมาก จนได้มีบริษัทผลิตโปรแกรม CAE ขึ้นมาใช้เพื่อเข้ามาช่วยวิเคราะห์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) และการประมาณค่า (Approximation Method) ที่เรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตแม่พิมพ์มากมาย โดยเฉพาะสามารถลดค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นหัวใจหลักในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก โดยก่อนที่ผู้ผลิตจะทำการผลิตแม่พิมพ์สามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบแม่พิมพ์ว่าจะเกิดปัญหาต่างๆ ที่บริเวณใด เพื่อนำผลที่ได้ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพ ปัญหาทางการใหม่ก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่โรงงานนี้จะนำมาเป็นกรณีศึกษารอยไหม้เกิดจากอากาศไม่สามารถระบายออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระ จึงเกิดการอุดตันของน้ำพลาสติกอุณหภูมิสูงกับอากาศ ทำให้พลาสติกบริเวณนั้นไหม้ ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดีจะต้องจัดหาตำแหน่งช่องอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้อากาศระบายออกได้ โดยโปรแกรมจะสามารถวิเคราะห์หาตำแหน่งนี้ได้อย่างแน่นอน ทำให้สามารถลดเวลาการสุ่ม โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ผลิตแม่พิมพ์ลงได้ ซึ่งบางครั้งขึ้นงานที่มีความซับซ้อนมากทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของช่องอากาศที่เหมาะสมได้ครบทุกจุดและจะส่งผลต่อชิ้นงาน ในภายหลัง

จากที่กล่าวมานี้ โปรแกรมCAEทำให้ผู้ผลิตแม่พิมพ์สามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำลดการแก้ไขแม่พิมพ์ภายหลัง ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ อีกทั้งยังสามารถหาสภาวะเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมได้ด้วย รวมทั้งยังวิเคราะห์ Air Trap, Stress, Weld Line, การบิดตัว, ทิศทางการไหล, และอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและสร้างผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้โปรแกรมทางด้าน CAD และ CAE กับการออกแบบแม่พิมพ์

1.2.2 สามารถวิเคราะห์ปัญหา Air Trap โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CAE และทำการแก้ไขแม่พิมพ์ในจุดที่เกิด Air Trap

1.2.3 ศึกษาทิศทางการไหลและเปรียบเทียบการไหลที่เกิดขึ้นจริงกับที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CAE

1.2.4 สามารถหาสภาวะเงื่อนไขงานฉีดที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้องส่งผลให้งานฉีดพลาสติกมีประ

สิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เป็นการศึกษาโดยใช้กรณีตัวอย่างเพื่อศึกษาปัญหาของการเกิด Air Trap ในกระบวนการฉีดพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่ออาการเกิดปัญหาการเกิดรอยไหม้ของชิ้นงาน

1.3.2 เป็นการศึกษาวิจัยชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิดเทอร์โมพลาสติกเท่านั้น

1.3.3 เป็นการศึกษาวิจัยที่เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการทำนายจากโปรแกรม

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตลอดเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป เพื่อแก้ปัญหาผลิตภัณฑ์ที่ขาดคุณภาพ และการออกแบบแม่พิมพ์ที่ให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน โดยมีการพัฒนาเริ่มจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะของกระบวนการและคุณภาพของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการและคุณภาพของการฉีดพลาสติกจึงเป็นสิ่งที่ยากในการกำหนดค่าสภาวะ สำหรับการศึกษาด้านการฉีดพลาสติกด้วยการศึกษาจากการทดสอบในการปฏิบัติจริงในระหว่างช่วงปี 1960 – 1970s ได้ศึกษาหลักการต่างๆ ในกรณีฉีดพลาสติก โดยเพิ่มความรู้พื้นฐานที่สัมพันธ์กับกระบวนการฉีดและคุณภาพของชิ้นงานเข้าไว้ด้วยกัน

แม้ว่ามีความพยายามที่จะกำหนดวิธีการเพื่อปรับปรุงการออกแบบชิ้นงานพลาสติกหลายวิธี ซึ่งขัดกับลักษณะทางธรรมชาติของโพลีเมอร์ที่เป็นนอนนิวโทเนียนและทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของพลาสติกและเนื่องจากมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ จึงได้เริ่มมีการให้ความสนใจในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด

ในปี 1974 บริษัท MOLDFLOW จำกัด ได้เสนอโปรแกรมทางการค้าบนระบบคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมดังกล่าวใช้เพื่อศึกษา สภาวะในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (อุณหภูมิของกาทลอมเหลว , อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และเวลาในการฉีด) และทำการสมมูลการไหลในชิ้นงานและระบบรูวู้งถึงแม้ว่าจะเป็นที่ยอมรับแต่โปรแกรมดังกล่าวใช้งานได้ค่อนข้างยากเนื่องชิ้นงานต้องออกแบบให้มีรูปร่างแบนมาก

ต่อมาได้มีการพิจารณาถึงความรู้เบื้องต้นของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) พบว่ามีข้อดีและเหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ต่อมาได้มีโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบรูปทรง 3 มิติ เป็นที่ยอมรับและได้มีการพัฒนาต่อมาจนถึงปัจจุบัน

อย่างไรก็ดี การนำโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวมาใช้ในงานฉีดพลาสติก จำเป็นต้องทดสอบเปรียบเทียบกับการทดลองจริงซึ่งเป็นกิจกรรมที่มีในงานวิจัยนี้

1.5 สมมติฐานของการศึกษา

1.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเงื่อนไขที่กำหนดรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติเชิงที่ใกล้เคียงฐานข้อมูลที่อยู่ใน Program โดยไม่คิดผลจากมาตรฐานกระบวนการผลิตจาก Supplier และสิ่งแวดลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.3 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองน่าจะส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมากกับผลการทดลอง เช่น เครื่องฉีดพลาสติก เป็นต้น

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการฉีดพลาสติก
- 1.6.2 ศึกษาการใช้งาน Program ทางด้าน CAD
- 1.6.3 ศึกษาการใช้งาน Program ทางด้าน CAE
- 1.6.4 ศึกษาหลักการ ,ทฤษฎีพื้นฐานและสภาวะเงื่อนไขของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้
- 1.6.5 ศึกษาทฤษฎีของโพลิเมอร์และพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติของวัสดุ

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

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆ ของโพลิเมอร์และข้อมูลที่ใช้เป็นต่อการวิเคราะห์ และการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อน

2.1 ชนิดของโพลิเมอร์

จากการพิจารณาพบว่า โครงสร้างโมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ในการฉีดของพลาสติกมีอิทธิพลกับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ กล่าวคือ โมเลกุลโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นสายของพันธะโคเวเลนต์กับกลุ่มของพันธะเคมี ตามกิ่งสาขาของสายพันธะหลัก (Primary Chain) โดยทั่วไปเราจะแบ่งชนิดของพลาสติกตามโครงสร้างพื้นฐานออกเป็น 2 ชนิด คือ เทอร์โมเซตติง และ เทอร์โมพลาสติก

สำหรับเทอร์โมเซตติงจะกลายเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อนและสังเกตได้ว่าถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพันธะเกิดการพันกันตามสายลูกโซ่ ขบวนการนี้เรียกว่า Cross-Link จากการศึกษ พบว่าการพันกันของโมเลกุลจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ถ้ายังได้รับความร้อนต่อไปอีก

พลาสติกจะกลายเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อถูกหล่อเย็น วัฏจักรเช่นนี้จะถูกทำซ้ำต่อไปเรื่อยๆ จนกว่ากระบวนการฉีดจะสิ้นสุดลงหลังการหล่อเย็นและปลดชิ้นงาน

ทั้งเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเราจะนำคุณสมบัตินี้มาใช้ในการฉีดพลาสติกได้ ข้อแตกต่างของวัสดุทั้งสองชนิดนี้คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ สำหรับเทอร์โมพลาสติกแม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนเทอร์โมเซตติงแม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูง ซึ่งเทอร์โมพลาสติกจะเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

2.1.1 วัสดุ Amorphous และ Semi-Crystalline

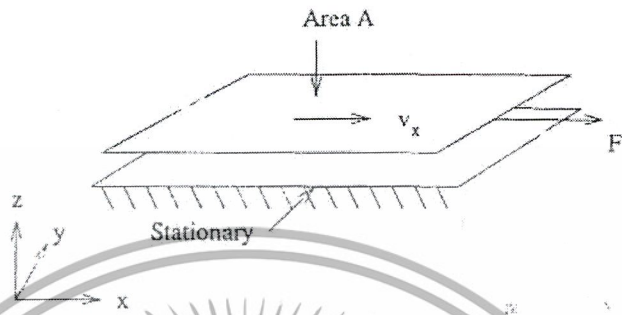
เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมของแนวลูกโซ่สามารถบิดงอได้และแต่ละส่วนของพันธะลูกโซ่สามารถบิดหมุนได้ เมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลวซึ่งโมเลกุลจะไม่มีระเบียบและจะลดการพันกันเมื่ออุณหภูมิต่ำลงถ้าไม่มีแรงภายนอกกระทำขณะที่โมเลกุลก็ยังคงพันกัน วัสดุที่กล่าวถึงคืออะมอर्फิล

อะมอर्फิลโพลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลวจะถูกทำให้เย็นลง จนกลายเป็น Rubbery การเย็นตัวลงจะเป็นสาเหตุทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงจาก Rubbery เป็นของแข็ง ซึ่งอุณหภูมิในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Glass Transition Temperature, Tg โดยทั่วไปช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจะมากกว่า 10 องศาเซลเซียส

โมเลกุลของอะมอर्फิลโพลิเมอร์จะพันกันในขณะหลอมตัวและเย็นตัว ซึ่งโมเลกุลอาจจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงใน Lattice ตัวอย่างเช่น คลิสตัลไลด์ วัสดุที่มีพฤติกรรมแบบอะมอर्फิลและคลิสตัลไลด์ถูกเรียกว่า Semi-Crystalline

2.2 ความหนืด, อัตราเฉือนและความเค้นเฉือน

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



รูปที่ 2.1 แสดงแรงเฉือนเนื่องจากการไหลแบบสม่ำเสมอ

ความเค้นเฉือน τ สามารถกำหนดได้ดังสมการ

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

กำหนดให้ A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่น F คือแรงเฉือน หน่วยของความเค้นเฉือนคือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยสังเกตได้จากความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเร็วของการไหล ใช้สัญลักษณ์แทนคือ dv_x / dz

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

ผลต่างของความเร็ว dv_x / dz เรียกว่า Shear Rate (อัตราเฉือน) ใช้สัญลักษณ์แทนคือ $\dot{\gamma}$ หน่วยคือส่วนกลับของวินาที 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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ของไหลชนิด Newtonian and Non-Newtonian

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่ออัตราเฉือนแบบเชิงเส้น ดังสมการ (2.3) เรียกว่า Newtonian สังเกตว่าความหนืดจะคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่ง โดยที่ความหนืดสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของของไหล สำหรับ (สมการ 2.3) ไม่ถือว่าเป็น Non-Newtonian สำหรับโพลิเมอร์หลอมเหลวที่มีพฤติกรรม Non-Newtonian และ Viscoelastic ปัจจุบันซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลไม่รวมผลกระทบนี้อีก

แบบจำลองการไหลของโพลิเมอร์ สามารถประยุกต์จากสมการ (2.3) สังเกตได้ว่าความหนืดจะเป็นฟังก์ชันของอัตราเฉือน กำหนดได้โดย

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

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

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

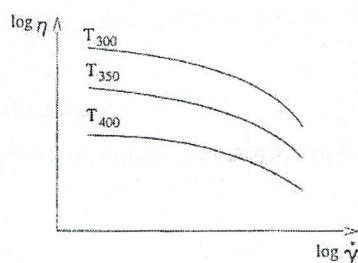
$\dot{\underline{\gamma}}$ คือ Rate of strain Tensor

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) ซึ่งเป็นรูปแบบสำหรับวัสดุทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก สังเกตว่าจะแสดงค่าที่หลายอุณหภูมิ จุดประสงค์ของแบบจำลองคือสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้แม่นยำใกล้เคียงความเป็นจริงและเป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 Power Law Model

รูปแบบคือ

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

m และ n คือค่าคงที่ เมื่อ $m = \mu$ และ $n = 1$ เราจะหาความสัมพันธ์สำหรับ Newtonian Fluid จากสมการ (2.4) สำหรับโพลิเมอร์หลอมเหลวควรมีค่าคงที่ n มีค่าระหว่าง 0 และ 1 นำลอการิทึมที่ใส่ทั้งสองข้าง เราจะได้

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

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

ข้อสำคัญของการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกคือแบบจำลองต้องแสดงความหนืดที่ช่วงของอัตราเฉือนมีค่าต่ำได้เพราะว่าเราไม่สามารถทำนาย Newtonian Viscosity η_0 ซึ่งถูกกำหนดความหนืดที่สถานะอัตราเฉือนเป็นศูนย์ได้

ตัวแปรของอุณหภูมิจะรวมกับสมการ (2.6) โดยพจน์เอ็กโปเนนเชียลคือ

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

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 คือค่าคงที่ใดๆ

แบบจำลองดังกล่าวสามารถหาได้จากผลการสังเกตการทดลองและต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดังนี้

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

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 กำหนดฟังก์ชันของความสัมพันธ์ในการประมาณค่านอกช่วงของข้อมูล

2.4.4 The Eills Model

รูปแบบคือ

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

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

2.4.5 The Carreau Model

รูปแบบคือ

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

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

ความสำคัญของแบบจำลองความหนืดคือ สามารถสังเกตพฤติกรรมของโพลิเมอร์หลอมเหลวโดยเฉพาะความสัมพันธ์ของแบบจำลองความหนืดต้องมีคุณสมบัติดังนี้

ระหว่าง ความหนืด/อุณหภูมิ

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

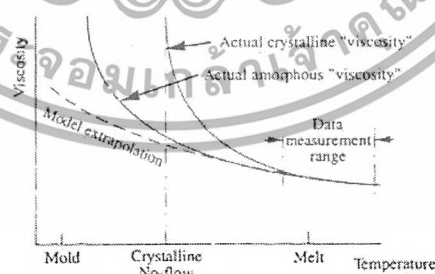
ระหว่าง ความหนืด/อัตราเฉือน

- ความหนืดลดลงกับการเพิ่มขึ้นอัตราเฉือน
- เส้นโค้งของ isotherms ควรจะเป็นความหนืดลดลงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน
- เส้นโค้ง isotherms ควรตัดกับแกนใดๆ

2.6 การประมาณค่านอกช่วงของข้อมูลความหนืด

การเลือกแบบจำลองอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การไหล เพราะช่วงของอุณหภูมิและอัตราเฉือนเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการวัดความหนืดในการทดลองซึ่งอาจจะไม่ครอบคลุมช่วงการจำลองทั้งหมด โดยเฉพาะการจำลองจะต้องรวมผลกระทบของ Solidification ตลอดจนขั้นตอนการเติมเต็ม (Filling Phase) และขั้นตอนการอัดตัว (Packing Phase) หรืออาจกล่าวได้ว่าจำเป็นต้องมีข้อมูลความหนืดที่อุณหภูมิวัสดุแข็งตัว เนื่องจากเราไม่สามารถวัดค่าความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำ การประมาณค่านอกช่วงจากการประมาณค่านอกช่วงจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล

การขาดข้อมูลของความหนืดที่อุณหภูมิต่ำเป็นปัญหาสำคัญโดยเฉพาะ Semi-Crystalline วัสดุมีการเปลี่ยนความหนืดอย่างรวดเร็วในระหว่างช่วงหลอมเหลวจนเป็นของแข็ง การเปลี่ยนแปลงของความหนืดที่รวดเร็วทำให้การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดจึงต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองและการประมาณค่านอกช่วง ณ อุณหภูมิต่ำ

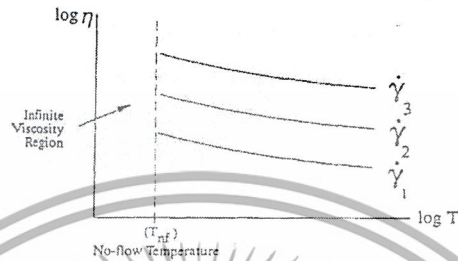


รูปที่ 2.3 แสดงการประมาณค่าความหนืดนอกช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

จากรูปจะสังเกตว่าการประมาณค่านอกช่วงจะแสดงความสัมพันธ์ของความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำ การประมาณค่านอกช่วงของรูปแบบความหนืดทั่วไป ไม่สามารถทำนายความหนืดที่อุณหภูมิต่ำได้

การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์จะใช้การประมาณค่านอกช่วงทำนายความดัน เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมทั้งหมด

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



รูปที่ 2.4 แสดงข้อมูลของความหนืดกับเส้นยูติการไหล

2.7 คุณสมบัติทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์การไหล

ขบวนการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์พลาสติก ต้องการ 3 พฤติกรรมพื้นฐาน

- การพาความร้อนในการหลอมเหลว
- การนำความร้อนผ่านแม่พิมพ์ขณะหล่อเย็น
- ความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน สาเหตุเกิดจากการเสียดสีของการหลอมเหลวเมื่อไหลในช่วง

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 จูลต่อกิโลกรัม ต่อองศาเซลเซียส ความจุความร้อนจำเพาะสามารถวัดภายใต้สภาวะปริมาตรคงที่ หรือความดันคงที่ที่กำหนด โดย C_v หรือ C_p ตามลำดับ

ความจุความร้อนจำเพาะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ต้องการให้วัสดุหลอมเหลวและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการถูกถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ภายหลังการฉีด ซึ่งจะถูกใช้คำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนจากโพลิเมอร์เหลวตลอดขบวนการเติมเต็มและฉีดอัดและการหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลของโพลิเมอร์ในแม่พิมพ์

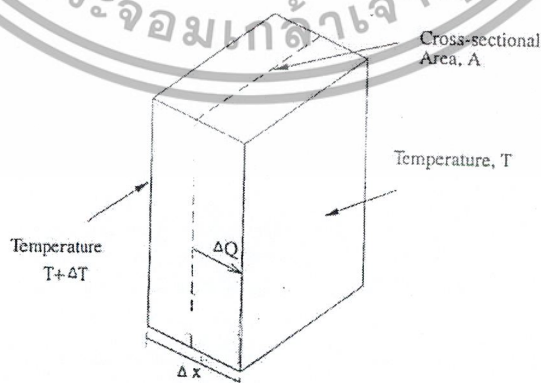
โดยทั่วไป ความจุความร้อนของโพลิเมอร์มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะ ตารางที่ (2.1) แสดงค่าของโพลิเมอร์ [3] และโลหะ [4] ที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก

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 $T+\Delta T$ และอีกข้างหนึ่งอุณหภูมิ T แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการกำหนดสถานะการนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อค่าคงที่การนำความร้อนเป็นบวก จะได้

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

เมื่อกำหนดให้ Δx เข้าใกล้ศูนย์และ ΔT เข้าใกล้ศูนย์

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

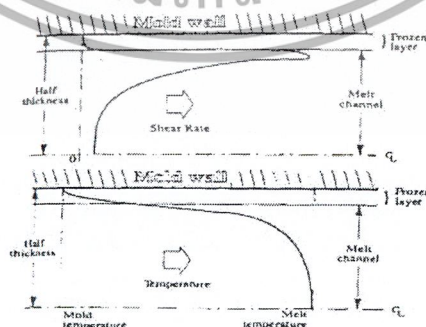
เมื่อ ค่าการนำความร้อน K , อุณหภูมิของวัสดุ T กำหนดโดยสมการ 2.17 ดังข้างบน

สำหรับโพลีเมอร์ ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, ทิศทางของการจัดเรียงตัวเชิงโมเลกุลและชั้นของของไหล

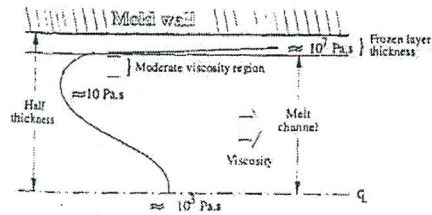
2.7.3 No-Flow Temperature

No-Flow Temperature คือการกำหนดอุณหภูมิของพลาสติกมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหล ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุ ตัวอย่างเช่น การนำความร้อน แต่ No-Flow Temperature ก็จะถูกใช้เป็นแบบจำลองเพื่อพิจารณาผลกระทบของชั้นการแข็งตัวซึ่งจะเริ่มพิจารณาจากผนังของแม่พิมพ์จนถึงตรงกลาง Cavity ตลอดกระบวนการฉีดพลาสติก

รูปที่ (2.7) แสดงรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราการไหลผ่านช่องความหนา ส่วนการกระจายความหนืดแสดงในรูปที่ (2.8)



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอัตราไหลและอุณหภูมิข้ามหน้าตัดของโพรง



รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายตัวของความหนืดข้ามหน้าตัดของโพรง

สังเกตว่ารูปร่างของการกระจายความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนและอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยชั้นการแข็งตัวบางๆ เราสามารถอธิบายได้ว่าถ้าไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ ความหนืดจะลดลงในขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและในทางตรงกันข้ามถ้าเราไม่พิจารณาอัตราเฉือน ความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งสองตัวแปรส่งผลกับรูปร่างของการกระจายความหนืดในรูปที่ (2.7) นอกจากนี้อัตราเฉือนของโพลิเมอร์หลอมเหลวที่มีค่าต่ำจะแสดงพฤติกรรมแบบ 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 ที่สูงหมายความว่าของไหลสามารถไหลได้ง่ายและโพลิเมอร์ที่ดีควรมีค่าต้านทานการไหลต่ำที่สุด

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

ในจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก Fluidity จะถูกใช้ในการคำนวณกระจายของความดันในช่องความหนา เมื่อทราบการกระจายตัวของความดันก็สามารถหาความเร็วการไหลได้ การคำนวณของ Fluidity จึงจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การไหล

หลักเกณฑ์พื้นฐาน 2 ประการของการคำนวณ Fluidity คือ

- การประมาณค่าข้อมูลความหนืดนอกช่วง ซึ่งความหนืดจะเป็นตัวถูกกำหนดด้วยสถานะของแข็งจากชั้นการแข็งตัว การคำนวณ Fluidity จึงเป็นพื้นฐานของการกระจายของความหนืดตลอดช่องความหนา

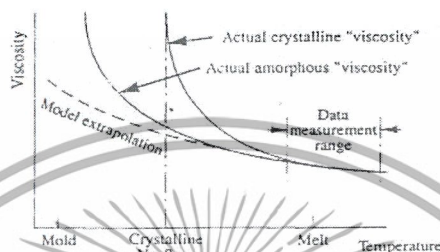
- การใช้แนวทางของ No-Flow Temperature ซึ่งให้เห็นบริเวณที่ของไหลมีความเร็วมีค่าเป็นศูนย์และความหนืดมีค่าอินฟินิตี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 ข้อผิดพลาดของประมาณค่า

เพื่อที่จะคำนวณค่า Fluidity เราจะต้องใช้ข้อมูลต่างๆ เช่นการกระจายตัวของความหนืดตลอดความหนา, การประมาณค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ, การเปลี่ยนแปลงความร้อนในช่วง glass, ช่วยการแข็งตัวและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เราจะสังเกตได้ว่าการวัดอุณหภูมิทุกค่าทำได้ยากมากโดยเฉพาะวัสดุ Semi-Crystalline ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่รวดเร็วและเป็นไปได้อย่างที่ระมัดระวัง

รูปที่ (2.9) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของ Semi-Crystalline และ Amorphus



รูปที่ 2.8 ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความหนืดนอกช่วง

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของ Semi-Crystalline จะเกิดขึ้นเร็วกว่าวัสดุอะมอร์ฟิ ดิโออะแกรม แสดงช่วงการวัดค่าของความหนืดต่างๆ ไป ซึ่งข้อมูลจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันของคณิตศาสตร์โดยการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ เราจะพิจารณาความสามารถของฟังก์ชันในการพล็อตข้อมูลที่วัดได้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันอาจเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมจริงของวัสดุเมื่อมีการประมาณค่านอกช่วง ดังแสดงในรูป ปัญหาจะเน้นที่วัสดุ Semi-Crystalline เพื่อศึกษาขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของความหนืด

2.7.5 การใช้ No-Flow temperature

จากแนวทาง No-Flow temperature เราจะสังเกตเห็นว่าเราพยายามขจัดปัญหาการประมาณค่า นอกช่วงในการกำหนดค่าความหนืด ถึงแม้ว่า No-Flow temperature ไม่ใช่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ แต่ในวิเคราะห์การไหลเราจำเป็นต้องใช้ No-Flow temperature ในการวิเคราะห์

การใช้ No-Flow temperature คือการแสดงค่าความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นการแข็งตัวของ การวัด No-Flow temperature จะเป็นการวัดภายใต้ผลกระทบของการหล่อเย็นที่ถูกกำหนด ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก

สำหรับชิ้นงานที่ผนังบางซึ่งการหล่อเย็นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคือความสำคัญของสัดส่วนของความหนาของคาร์วิตกับอุณหภูมิภายใต้ No-Flow temperature การประมาณค่านอกช่วงของความหนืดและบริเวณทั้งหมด จะได้รับผลการทำนายความดันที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง

ข้อสรุปแนวทางการใช้ No-Flow temperature ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่ใช่คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ แต่ก็มีผลกระทบกับพฤติกรรมของวัสดุจริง การสร้างรูปแบบการจำลองก็เพื่อลดความไม่แน่นอน โดยการประมาณค่านอกช่วงของฟังก์ชัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ Fluidity ของ Semi-Crystalline จะถูกสร้างขึ้น การวัด No-Flow temperature อย่างเหมาะสมจะเป็นประโยชน์มากกว่าการประมาณค่านอกช่วงของความหนืด จึงต้องพิจารณาอย่างเหมาะสมในการใช้

2.8 ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ความร้อน

การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกต้องการคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกในการวิเคราะห์ ซึ่งอาจหาได้จากข้อมูล PVT ของวัสดุ ซึ่งเราจะกล่าวถึงค่าการขยายตัวและค่าการหดตัวของวัสดุ

2.8.1 ค่าการขยายตัวและการหดตัวของวัสดุ

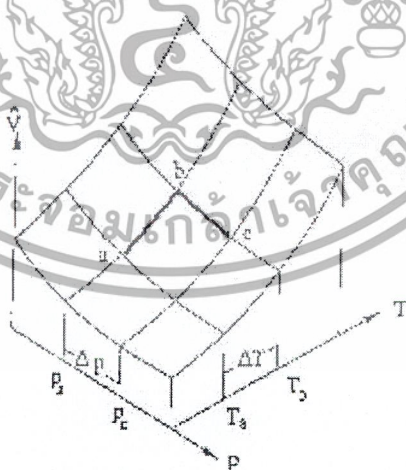
สมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ความดัน P, ปริมาตรจำเพาะ \hat{v} , อุณหภูมิ T สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

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

กรณีใช้สองตัวแปร สามารถเขียนได้ดังนี้

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

g คือฟังก์ชันระหว่างความดันกับอุณหภูมิ ถ้าเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูล เราสามารถพิจารณากระบวนการไหลโดยใช้ PVT ได้ แสดงดังรูปที่ (2.9)



รูปที่ 2.9 PVT ไดอะแกรม

เมื่อ a คืออุณหภูมิของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะความดันคงที่ เราสามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่จุด a และ b การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก a เป็น $a + \Delta T$ สาเหตุจากการ

เปลี่ยนแปลงปริมาตรคือ $g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)$ ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ

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

ΔT เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรชั่วขณะ ใช้แทนได้โดย

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

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 ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยเฉลี่ยเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันกำหนดได้โดย

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

Δp เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ย ใช้แทนได้โดย

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

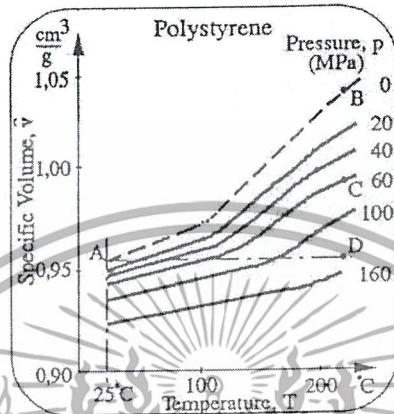
เมื่อ Isothermal compressibility (K) คือ

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

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

2.8.2 ข้อมูล PVT สำหรับการวิเคราะห์การไหล

ข้อมูล PVT จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอัดตัว (Packing phase) แต่อาจจะใช้ในขบวนการเติมเต็ม Filling phase ก็ได้ ข้อมูลสามารถหาได้จากการทดลองและกราฟที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์การหดตัวและบดอง สำหรับวัสดุอะมอฟท์จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว สำหรับโพลีสไตรีนแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟ PVT สำหรับวัสดุอะมอฟท์ชนิดโพลีสไตรีน

จากกราฟการทดลองจากรูปที่ 2.10 และ 2.11 จะถูกนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ

$$\hat{v} = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} + a_5 e^{a_6 T - a_7 p} \tag{2.27}$$

ช่วงอุณหภูมิสูง

$$\hat{v} = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} \tag{2.28}$$

ช่วงการเปลี่ยนแปลง

$$p = b_1 + b_2 T \tag{2.29}$$

ทั้ง a_i และ b_i คือค่าคงที่ หาได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานของการไหล

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงคุณสมบัติของของไหลที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะความเค้น, อัตราเฉือนและชนิดของของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

3.1 ความเค้นและความเครียดในของของไหล

3.1.1 ความเค้นในของของไหล

การไหลของพลาสติกไหลอมเหลวในแม่พิมพ์ฉีดจะทำให้เกิดแรงที่กระทำกับเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ เราจะพบว่ามีความหลายทฤษฎีที่อธิบายการถ่ายเทของแรงขณะเกิดการไหลและความเค้นจะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาผลกระทบของแรงบนชิ้นงานภายในวัสดุ

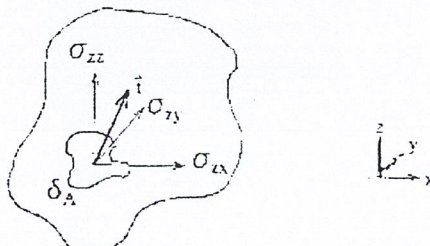
ความเค้นเป็นพารามิเตอร์ที่วัดการถ่ายของแรงเมื่อแรงกระทำกับวัตถุ ซึ่งวัสดุจะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยทั่วไปแรงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงที่กระทำกับวัตถุทั้งก้อนและกระทำที่พื้นผิวของวัตถุ (Body Forced) คือแรงที่กระทำกับมวลภายในวัตถุและมีหน่วยคือแรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือแรงต่อหนึ่งหน่วยมวล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

3.1.1.1 ความเค้นบนพื้นผิวสมมติ

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

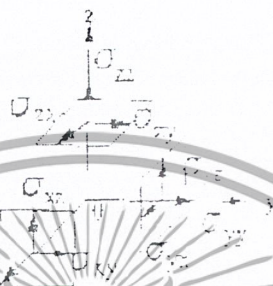
$$\vec{T} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A} \quad (3.1)$$

จากสมการจะพบว่า Stress Tensor \vec{T} จะอธิบายแรงที่กระทำ ณ จุดใดๆ บนผิวนอกของวัตถุ ซึ่งอ้างอิงจากพิกัด x, y และ z สมมติว่า Stress Tensor มีทิศทางตั้งฉากกับผิวสมมติ ณ จุดหนึ่งบนวัตถุ ซึ่งเราสามารถแตก Stress Tensor ให้อยู่ในทิศทางตามระบบพิกัดฉากได้ดังนี้คือในทิศทางแกน z จะได้ t_z , ทิศทาง x และ y , t_x และ t_y ตามลำดับ (ดูจากรูปที่ 3. 1)



3.1.1.2 ความเค้นที่จุดภายในวัตถุ

เนื่องจากการหาค่าความเค้นของ Stress Tensor ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นได้ทั้งหมด เราจึงต้องใช้แบบจำลองลูกบาศก์หนึ่งหน่วยในการแสดงค่าความเค้นชนิดต่างๆ ดังนั้นเราสามารถหาค่าความเค้นของแต่ละด้านได้ แต่ละด้านจะต้องการความเค้น 3 ค่า ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 1 ค่า และความเค้นเฉือน 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 σ

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

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

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

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

ซึ่ง Dot ซี่ให้ให้เห็น Vector Tensor Product

เราสามารถกำหนดเครื่องหมายสำหรับทิศทางของค่าความเค้นได้ดังนี้คือ ความเค้นที่มีเครื่องหมายเป็นบวกคือความเค้นดึง ค่าลบคือความเค้นกด

3.1.1.3 ความดันสถิตย

ความเค้นในของเหลวเรียกว่าความดันสถิตย (Hydrostatic Pressure) คือแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ภายในของของเหลว โดยทั่วไปของเหลวทุกชนิดจะมีความสัมพันธ์ของความเค้นตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.1.2 Rate of Strain Tensor

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

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

Dagger ซึ่งให้เห็นถึง Transposed Matrix [7]

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

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

Tensor นี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ 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 $\dot{\underline{\gamma}}$ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกเรียกว่า Constitutive Equation

สมการ Constitutive ที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับ Newtonian Fluids [8] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่ง μ คือความหนืด และ μ_v คือ Dilatational Viscosity

สำหรับ Dilatational Viscosity จะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับก๊าซในอุดมคติและของไหลที่กักอัดตัวได้ สมการ Constitutive สำหรับ Newtonian Fluids จะกลายมาเป็น

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

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

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

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 ซึ่ง Viscous Stress Tensor มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Rate of Strain Tensor สังเกตว่าความหนืดของของไหลจะคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งหรือแปรผันตามอุณหภูมิของของไหล สำหรับสมการ (3.12) จะไม่เรียกว่า Non-Newtonian แต่เนื่องจากโพลิเมอร์มีพฤติกรรมแบบ Non-Newtonian และ Viscoelastic สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมก็ไม่รวมผลกระทบของ Viscoelastic

การทำนายพฤติกรรมการไหลของโพลิเมอร์เหลว เราจึงต้องปรับปรุงสมการ (3.10) โดยการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราการเสียรูปแล้วนำมาสร้างกราฟและใช้เทคนิคการประมาณค่าเพื่อสร้างสมการหาค่าความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

สมการ (3.13) จะถูกใช้เป็นแบบจำลองการไหลของโพลิเมอร์เหลวโดยที่ความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน

แทนสมการ Newtonian Fluid (3.13) ในสมการ (3.4) เราจะได้ Stress Tensor ที่มีผลกระทบของ Viscous Shear Stress ดังนี้

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

สำหรับกรณีของไหลกดอัดไม่ได้ เราจะใช้หลักการของ Newtonian Fluids แทนค่า Deviatoric Rate ของ Stain Tensor กับ Rate of Stain Tensor เราจะได้

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

3.1.5 อัตราเฉือนและการเลือกฟังก์ชันความหนืด

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ เราได้กล่าวถึงฟังก์ชันของความหนืด $\eta(\dot{\underline{\gamma}})$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสีรูปของของไหล ดังนั้นเราสามารถกำหนดความหนืดให้ขึ้นอยู่กับ Deviatoric Rate ของ Strain Tensor $\underline{\dot{\gamma}}'$ แต่ $\underline{\dot{\gamma}}'$ จะขึ้นอยู่กับระบบพิกัดฉากที่ใช้สำหรับ Deviatoric Rate of Strain Tensor เราจะใช้เทคนิคของ Tensor โดยใช้ Invariants กำหนดความสัมพันธ์ได้ดังนี้ อันดับที่หนึ่ง, สอง และสามของ Invariants ใช้สัญลักษณ์แทนโดย I, II และ III ตามลำดับ [7]

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

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

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

นอกจากนี้เราสามารถแสดงว่า Third Invariant เท่ากับศูนย์ [8] สำหรับชนิดการไหลแบบมีแรงเฉือนและจะถูกใช้ในการจำลองการฉีดพลาสติก เราจะกำหนดให้ความหนืดขึ้นอยู่กับ $II_{\dot{\underline{\gamma}}'}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{\gamma}' = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma} : \dot{\gamma}^t} \quad (3.19)$$

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

$$\begin{aligned} II_{\dot{\gamma}'} &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{ji} \\ &= \sum_i \sum_j \dot{\gamma}'_{ij} \dot{\gamma}'_{ij} \\ &= \dot{\gamma}' : \dot{\gamma}'^t \\ &= 2\dot{\gamma}'^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}' &= \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}'}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma}' : \dot{\gamma}'^t} \end{aligned} \quad (3.21)$$

เราจะกำหนดอัตราเฉือนในพจน์ของขนาดของ Deviatoric Rate of Strain Tensor และความสัมพันธ์ที่คล้ายกันสำหรับ Rate of Strain Tensor อาจถูกใช้ในกรณีของของไหลกืดตัวไม่ได้

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

ฟังก์ชันของความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนถูกกำหนดดังข้างบน หัวข้อนี้เราจะพิจารณาจากอัตราเฉือนในระบบพิกัดฉากสำหรับ Simple Shear Flow ซึ่งจะใช้อธิบายการไหลของโพลิเมอร์เหลวในช่องของแม่พิมพ์

เราจะใช้ระบบพิกัดฉากในการกำหนดการไหลแบบสภาวะคงตัวในระนาบ x-y จากสมการ

(3.6) พบว่ามีรูปแบบเมตริกของ Rate of strain tensor คือ

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

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

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

Second Invariant คือ

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

ดังนั้นอัตราเฉือนจะมีความสัมพันธ์กับ Second Invariant ตาม

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

สำหรับการไหลแบบสภาวะคงตัวในระนาบ x-y อัตราเฉือนคือ

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

3.2 สมการควบคุมการไหล

เราจะกล่าวถึงสมการควบคุมการไหลของของไหลชนิดคอลลอยด์ได้ ซึ่งจะอธิบายของไหลแบบมีความหนืด สมการนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับการไหลของโพลิเมอร์เหลวโดยใช้หลักการของกฎทรงมวล, โมเมนตัม และพลังงาน

3.2.1 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์

ในการอธิบายสมการควบคุมของของไหล (ของโพลิเมอร์เหลว) เราสมมติว่าของเหลวคือ Continuum หมายความว่าเราจะไม่คิดผลกระทบของโครงสร้างโมเลกุลแต่เราสามารถกำหนดลักษณะทางกายภาพของวัสดุได้ เช่น ความเร็วและความหนาแน่น นอกจากนี้เรายังสมมติให้ค่าของตัวแปรเปลี่ยนแปลงแบบคงที่และการใช้เทคนิคการดิฟเฟอเรนเชียลจึงสามารถนำมาใช้ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเราจะอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลโดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.2 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

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

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

กำหนดให้พจน์ทั่วไปเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งเวลา $f(x, y, z, t)$ 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุพันธ์เชิงเวกเตอร์ของคุณสมบัติ 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

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

เมื่อ V คือพื้นที่ในระนาบ, S คือเส้นขอบของ A , \vec{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตั้งฉากกับ 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] สามารถคำนวณ $F(t)$ เทียบกับเวลาได้และสังเกตว่า $V(t)$ จะแปรผันตามเวลาและการเคลื่อนที่ของของไหล เราจะเขียนสมการใหม่ได้คือ

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

เมื่อ \vec{v} คือความเร็วของอนุภาค

เราจะประยุกต์ทฤษฎี Divergence ทางด้านขวาของสมการ (3.37) ดังนั้นสมการสมดุลจากทฤษฎี Transport คือ

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

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

สมการ (3.38) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของ $f(\bar{X}, t)$ เท่ากับอินทิกรัลของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $f(\bar{X}, t)$ ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดบวกกับผลกระทบบของการไหลของ $f(\bar{X}, t)$ ทั่วทั้ง $S(t)$

3.2.2 กฎการอนุรักษ์มวล

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

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

เมื่อ $\rho(\bar{X}, t)$ คือความหนาแน่นของของไหล ณ ตำแหน่ง \bar{X} และเวลา t กฎทรงมวลจะชี้ให้เห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลเทียบกับเวลา จะเท่ากับศูนย์

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

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 (อินทิกรัลแล้วเท่ากับศูนย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สมการนี้เรียกว่าสมการ Continuity สำหรับของไหลที่กดอัดตัวได้

สำหรับของไหลที่กดอัดตัวไม่ได้ จะมีความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นสมการ (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

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมกล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคของของไหลในปริมาตรของวัสดุ $V(t)$ 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 \vec{F}_b กำหนดโดย

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

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

$$\vec{F}_t = \int_{S(t)} \vec{t} dS$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \int_{S(t)} \underline{\sigma} \cdot \vec{n} dS \quad (3.47)$$

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 ทางด้านซ้ายของสมการ 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 $V(t)$ ภายใต้งานที่ขอบ $S(t)$ จะเท่ากับงานที่ทำลบกับปริมาตรความร้อนที่ผ่าน $S(t)$ อัตราการเพิ่มขึ้นของงานที่กระทำโดยแรงที่กระทำกับพื้นผิวภายนอก กำหนดได้ดังนี้

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

เราจะใช้ Stress Tensor \vec{t} และประยุกต์ทฤษฎี Divergence ที่ด้านขวามือของสมการ เราจะได้

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

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)

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

เราจะพิจารณาความหมายของสมการ (3.57) สำหรับแต่ละพจน์ของสมการดังนี้

- (i) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์
- (ii) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน
- (iii) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของงานภายในวัสดุโดยแรงหนืด

- (iv) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของงานภายในวัสดุโดยแรงโน้มถ่วง
- (v) คือการสูญเสียความร้อนภายในวัสดุเนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิว

เราสามารถแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์คือ

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

แทนผลลัพธ์ลงในสมการ (4.32) จะได้

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

ประยุกต์กับทฤษฎี Transport เข้ากับทางค้ำซ้ายมือของสมการ เราจะได้

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

กำหนดให้ $v(t)$ คือตัวแปรอิสระ เราจะได้

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

ขยายสมการด้านซ้ายมือ จะได้

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

ให้สมการ (3.62) เท่ากับสมการ (3.61) จัดรูปใหม่ เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.4.1 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับอุณหภูมิต

โดยทั่วไปเราจะเขียนสมการ (3.63) ในรูปของอุณหภูมิต, T มากกว่าในรูปของพลังงานภายใน U ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงพื้นฐานความสัมพันธ์ของลักษณะทางเทอร์โมไดนามิกส์ แต่จะไม่ลงรายละเอียดมากนัก

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

เมื่อ p คือความดัน และ \hat{V} คือปริมาตรจำเพาะ \hat{H} คือเอนทัลปี 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} คือฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิต 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และ

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

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนผลลัพธ์ที่ได้ในสมการ (3.65) เราจะได้

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

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

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

ดังนั้นสมการ (3.75) จะเขียนใหม่ได้เป็น

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

จากสมการ (3.63) เราจะพบว่า

$$dH = dU + \hat{V} dp + p d\hat{V} \quad (3.78)$$

แทนค่า dH และจัดรูปสมการใหม่สำหรับ $d\hat{V}$ เราจะได้

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

อนุพันธ์ของพลังงานกับเวลา กำหนดโดย

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

เราจัดรูปใหม่ในเทอมของอนุพันธ์เชิงวัสดุ เราจะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

แทนค่าสมการ (3.82) ในสมการ (3.81) และคูณความหนาแน่นในทุกพจน์ของสมการ จะได้

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

สมการ (3.83) ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจำเพาะกับอัตราเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

3.2.4.2 สมการพลังงานในพจน์ของอุณหภูมิ

เราสามารถแสดงสมการพลังงาน คือ

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

ผลลัพธ์ของสมการจะถูกแสดงในพจน์ของอุณหภูมิ ซึ่งจะเหมือนกับสมการ (3.53) จากสมการพลังงานจากสมการ (3.62) คือ

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

แทนสมการ (3.84) ในสมการ (3.85) เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการอนุพันธ์เชิงวัสดุ เราจะได้

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

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

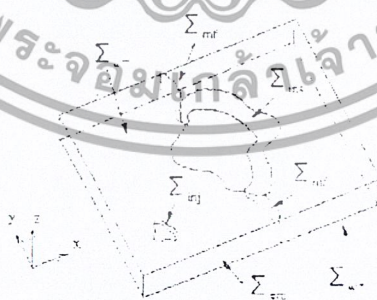
$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (3.88)$$

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

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

3.2.5 สภาวะเงื่อนไขที่ขอบ

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาของการฉีดพลาสติก ซึ่งจะเหมือนกับสมการควบคุมและเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาทั่วไป การกำหนดสภาวะเงื่อนไขที่ขอบจึงถือว่าเป็นหลักเกณฑ์พื้นฐานในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.3 แสดงสภาวะเงื่อนไขที่ขอบสำหรับปัญหาการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก

เราจะอธิบายเงื่อนไขที่ขอบ ณ บริเวณพื้นผิวต่างๆ ดังนี้

- \sum_{inj} คือพื้นผิวซึ่งพลาสติกเหลวถูกฉีดในช่องของแม่พิมพ์
- \sum_{em} คือพื้นผิวที่กำหนดของขอบของแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้ใช้ฟรีโดยไม่คิดค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตาม เอกสารนี้เป็นการนำเสนอสู่สาธารณะโดยไม่มีการรับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\sum w_+$ คือพื้นที่ผิวบนของแม่พิมพ์
- $\sum w_-$ คือพื้นที่ผิวล่างของแม่พิมพ์
- $\sum ins$ คือพื้นที่ผิวที่กำหนดขอบเขตของ Insert
- $\sum mf$ คือพื้นที่ผิวซึ่งพลาสติกเหลวถูกฉีดในช่องของแม่พิมพ์

สำหรับปัญหาแม่ฉีดพลาสติก เงื่อนไขที่ขอบจะสัมพันธ์กับปัญหาของความดันและการกระจายอุณหภูมิภายในช่องของแม่พิมพ์ ซึ่งเราสามารถจะรวมสมการคอนติเนอิตีและโมเมนตัมลงในสมการความดัน เนื่องจากสมการความดันจะสัมพันธ์กับสมการพลังงาน เพราะค่าความหนืดของวัสดุ, ผลกระทบของความดันถูกหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราเฉือน ปัญหาของการฉีดพลาสติกจึงต้องการสมการความดันและสมการพลังงาน เพื่อใช้เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์

การกำหนดสภาวะเงื่อนไขของความดัน

เงื่อนไขที่ขอบจะมีความสัมพันธ์กับความหนืด ดังนี้

- ผลต่างความดันในทิศทางตั้งฉากกับผนังแม่พิมพ์จะมีค่าเป็นศูนย์ เงื่อนไขที่ขอบรวมถึงขอบของแม่พิมพ์, ผนังแม่พิมพ์ และ insert กำหนดโดย

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{on} \quad \sum em + \sum w_+ + \sum w_- + \sum ins \quad (3.90)$$

ข้อกำหนดวัสดุไม่สามารถไหลผ่านผนังและขอบแม่พิมพ์ได้

- อัตราการไหล q , หรือความดัน p , คือค่าเฉพาะที่พื้นผิวเมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าช่องแม่พิมพ์

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

ปกติการวิเคราะห์การไหลจะใช้วิธีการกำหนดอัตราการไหลในช่วงการฉีดเต็มเต็ม ซึ่งสามารถหาได้โดยการประมาณปริมาตรของงานและระยะเวลาที่ใช้ในการฉีดเต็มเต็ม

- การสมมติ ความดันที่จุดฉีดเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นเราจะกำหนดให้ความดันเท่ากับศูนย์ ที่จุด Melt Front คือ

$$p = 0 \quad \text{ที่จุด} \quad \sum inf \quad (3.92)$$

สภาวะเงื่อนไขของอุณหภูมิ

เงื่อนไขที่ขอบจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนี้

เส้น Profile แสดงการกระจายของอุณหภูมิผ่านความหนาของแม่พิมพ์คือ $T(z)$ ถูกกำหนดสำหรับผิวซึ่งพลาสติกหลอมถูกฉีดผ่าน คือ

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

การวิเคราะห์การไหล สมมติว่าอุณหภูมิไหลลอมเหลวคงที่ ณ จุดเริ่มต้นของการฉีด ในทางปฏิบัตินี้ จะไม่เกิดขึ้นแต่การไหลลอมเหลวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การนำความร้อนเกิดในช่องว่างหรือระบบ runner ซึ่งผลกระทบของความร้อนขึ้นอยู่กับ shear heating และการนำความร้อนผ่านความหนาอย่างรวดเร็ว

- อุณหภูมิ, T จะถูกกำหนดบนเงื่อนไขที่ขอบของแม่พิมพ์ ความแตกต่างของอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละชนิด อธิบายดังนี้

$$\begin{aligned} T &= T_{em} \quad \text{on } \sum_{em} \\ T &= T_{w+} \quad \text{on } \sum_{w+} \\ T &= T_{w-} \quad \text{on } \sum_{w-} \\ T &= T_{ins} \quad \text{on } \sum_{ins} \end{aligned} \quad (3.94)$$

3.3 สมการควบคุมในการวิเคราะห์การไหลในสภาวะการฉีด

3.3.1 สมมติฐานของสมการโมเมนตัม

สมการ Generalized Newtonian Fluid ในระบบพิกัดฉากภายใต้สมมติฐานจาก [7] เราจะได้

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

เราจะอินทิเกรตสมการข้างบนนี้เกี่ยวกับความเร็วในแนวความหนา จะได้

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

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

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

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

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 ใชกฎของลูกโซ่กระจายแต่ละพจน์ 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นเรียกอีกอย่าง คือส่วนกลับของปริมาตรจำเพาะ \hat{V} เขียนได้เป็น

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

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 ความดันที่ใช้ในช่วงนี้จึงเป็นการเพิ่มความดันสถิตย์ (Hydrostatic) ให้กับพลาสติกหลอมเหลวเท่านั้น ผลต่างของความดันในแนวระนาบคือ $\partial p / \partial x$ และ $\partial p / \partial y$ จะมีค่าน้อยกว่าช่วงการเติมเต็มมาก และเราจะทราบที่ $\partial p / \partial z = 0$ เพราะมีค่าผลต่างของความดันน้อย

สมมติฐาน พจน์ของการพาความร้อนจะถูกตัดทิ้งในการคำนวณของช่วงการฉีดอัดสมการ (3.107) กลายเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 สมการพลังงานสำหรับคาร์วีตี้

จากสมการพลังงานในบทที่ 2 เราจะได้

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

สมมติฐานสำหรับพฤติกรรมเชิงวิสคู คือ ของไหลเป็นของไหลกอดอัดได้และค่าการนำความร้อนคงที่ ดังนั้นสมการพลังงานจะกลายเป็น

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

สุดท้ายสมการพลังงานสำหรับช่วงการฉีดย้าคือ

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + k \nabla^2 T \quad (3.112)$$

ในระบบพิกัดฉาก รูปแบบของสมการพลังงานคือ

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.113)$$

จากการวิเคราะห์ในการฉีดย้า เราจะตัดพจน์การพาความร้อนในทุกทิศทางและการนำความร้อนในทิศทาง x และ y แต่ยังคงรวมพจน์ $\partial p / \partial t$ เพราะว่าพจน์ของผลต่างความดัน $\partial p / \partial x, \partial p / \partial y$ มีความสัมพันธ์น้อยในช่วงการฉีดย้า แต่ $\partial p / \partial t$ มีผลกระทบค่อนข้างมาก ความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในคาร์วีตี้ในช่วงการฉีดย้า จึงเป็นผลกระทบของโพลิเมอร์ภายใต้ความดันสถิตย์ (Hydrostatic Pressure) สมการพลังงานจึงกลายเป็น

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.114)$$

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 $\dot{\gamma}^2$ ซึ่งถูกแสดงในระบบพิกัดฉากของการไหลในคาร์วีตี้

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

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

$$0 = K \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} - \eta \dot{\gamma}'^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (3.118)$$

สมการ (3.118) ถูกอินทิเกรตเทียบกับค่า z (ความหนาของครีวิตี) จะได้

$$0 = \int_{H^-}^{H^+} K \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^+} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}'^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz + \int_{H^-}^{H^+} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dz = \int_{H^-}^{H^+} \left(K - \frac{\beta^2 T}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^+} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}'^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz + \int_{H^-}^{H^+} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dz \quad (3.119)$$

จากเทคนิคการอินทิเกรต [7] เราจะได้

$$0 = + \int_{H^-}^{H^+} \left(K - \frac{\beta^2 T}{\rho c_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} dz - \int_{H^-}^{H^+} \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\eta \dot{\gamma}'^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz - 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3.120)$$

เมื่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะกล่าวถึงสมมติที่ใช้คือ การไหลจะถูกสมมติให้สมมาตรตลอดความหนาของคาร์วีตี้ จากสมมติฐานนี้ สมการ (3.120) จะถูกกำหนดขอบเขตของการอินทิเกรต เราจะได้

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

ซึ่ง

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (3.123)$$

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

เราจะกำหนดค่าเฉลี่ยของ Compressibility coefficient, \bar{K}

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

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

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

3.3.5 สมการควบคุมการไหลของ Runners

สำหรับสมมติฐานเชิงวัสดุของ Runner กับ Cavity จะเหมือนกันทั้งสมการคอนทิวนิตี้, สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน แต่จะไม่เหมือนกันในระบบพิกัดฉาก เราสามารถอธิบายได้ว่าในระบบของคาร์วีตี้จะใช้ระบบพิกัดฉาก (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 $0t$ กลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ความหนาแน่น ρ ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ดังนั้นเราจะใช้กฎลูกโซ่สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์, กำหนดค่าการขยายตัว β และความสามารถในการกดอัด κ เราจะได้

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

แทนสมการ (3.128) ใน (3.127) จัดรูปใหม่จะได้

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

เราสมมติว่าพจน์ของ Pressure Convection ถูกตัดทิ้งสุดท้ายจะได้

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

3.3.5.2 สมการโมเมนตัมสำหรับ Runner

ดังนั้นสมการโมเมนตัมในช่วงการฉีดจะ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 เราจะได้สมการพลังงานถูกใช้ในการคำนวณอุณหภูมิในการฉีดอัดคือ

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

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

$$\begin{aligned} 0 &= K \frac{\partial p}{\partial t} - \beta \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + v \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ &= K \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\beta}{\rho c_p} \left(\beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \\ &\quad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.137)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

สุดท้ายเราจะได้ว่า

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

ซึ่ง

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

สมการ (3.140) กลายเป็น

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

3.4 ผลเฉลยเชิงตัวเลขของกระบวนการฉีดอัด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยเชิงตัวเลขของกระบวนการฉีดอัด (Packing Phase) โดยจะต่างจากกระบวนการเติมเต็ม (Filling Phase) ถือเป็นผลเฉลยของการอัดตัวและการขยายตัว จะถูกนำมารวมด้วยที่ทุก Node ภายในคาร์วิตี้ โดยเงื่อนไขที่ขอบสำหรับกระบวนการฉีดอัดจะแตกต่างจากที่ใช้ในกระบวนการเติมเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 วิธีการกำหนดและแก้ปัญหาของกระบวนการ

สมการควบคุมสำหรับกระบวนการฉีดอัด (Packing Phase) สำหรับคาร์วิตีเป็น

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

โดยที่

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

และ

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

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) จะถูกแก้ปัญหโดยใช้เงื่อนไขที่ขอบต่อไปนี้

i. ความดันจะถูกกำหนดที่จุดฉีดคือ

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

ii. ความแตกต่างของความดัน จะเป็นศูนย์ที่ขอบกรณีที่ไม่มีการซึม จะได้เงื่อนไขขอบเป็น

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

iii. อุณหภูมิที่ผนังหรือที่จุดอื่นภายในผนังแม่พิมพ์จะถูกกำหนดไว้

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

iv. ผลต่างของอุณหภูมิในทิศทาง z จะเป็นศูนย์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องความหนาคือ

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

v. อุณหภูมิไหลที่จุดฉีดจะถูกกำหนดไว้

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

สมการ (3.144) จะต่างจากสมการที่ใช้ในกระบวนการเดิมตรงที่เทอมที่เพิ่มเข้ามาทางด้านขวามือซึ่งจะใช้อธิบายผลกระทบของการอัดตัวและขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิตามลำดับ เทอมหลังสุดจะอธิบายความร้อนที่เกิดจากการอัดตัว สมการ (3.144) สามารถเขียนให้กระชับขึ้นได้เป็น

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

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 อุณหภูมิและการกระจายตัวของความดันของชั้นเวลาที่แล้ว ต่อไปให้ทำการหาความดันที่ชั้นเวลาใหม่โดยใช้สมการ(3.153) โดยใช้ค่า b จากชั้นเวลาที่แล้ว $\partial p / \partial t$ คือการเปลี่ยนแปลงของความดันต่อเวลาซึ่งจะมีค่ามาก โดยเราจำเป็นต้องใช้ช่วงเวลานั้นๆ ซึ่งจะเกิดเมื่อมีการเดิมเต็มอย่างรวดเร็ว หรือมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกระบวนการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อจำลองรูปร่างโดยอัตโนมัติ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการฉีดจะน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความดันมาก แต่ในทางปฏิบัติทั้งผลเฉลยของอุณหภูมิและความดันที่แต่ละชั้นเวลาจะทำการคำนวณหลายครั้ง และพบว่าโปรแกรม จะมีช่วงที่อุณหภูมิคงที่เราจะสมมติว่าอุณหภูมิคงที่ โดยช่วงนี้จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้ ซึ่งปกติจะอยู่ที่ 0.05 วินาที เป็นผลให้จำนวนครั้งการคำนวณเกิดขึ้นจำนวนมาก สามารถทำให้เสร็จได้โดยใช้ช่วงเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งวิธีนี้ใช้ลดภาระในการคำนวณ

ขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในผลเฉลยในช่วง กระบวนการฉีด

1. หาสนามความดันที่ตำแหน่งเวลาใหม่, $t_n + 1$
2. หาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุ
3. หาความหนาแน่นและอนุพันธ์ของมันเทียบกับความดันและอุณหภูมิโดยใช้ข้อมูลวัสดุ PVT และผลจากข้อ 1 และ 2

และผลจากข้อ 1 และ 2

4. ปรับปรุงค่าความหนืดและค่าความต้านทานการไหล (Fluidity)
5. เพิ่มเวลาไปอีกขั้น
6. ถ้ายังอยู่ในช่วงอุณหภูมิคงที่ ให้เริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอน 1 ใหม่จนกว่าจะหมดช่วง
7. หาอุณหภูมิที่เปลี่ยนเนื่องจากการอัดตัว, การพาความร้อน, การแพร่ และการทำความ

ร้อน

8. ปรับปรุงค่าความหนืด
9. หาความดันที่เปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยน
10. หาความหนาแน่นโดยใช้ข้อมูล PVT
11. เพิ่มชั้นเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า Packing Time ครบ ให้หยุด แต่ยังไม่ให้กลับไปทำข้อ 1 ใหม่

3.4.2 สมการความดันในช่วงคาร์วิต

จากที่เราได้กำหนดรูปร่างของคาร์วิตด้วยอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมแล้ว เราจะใช้การประมาณค่าเชิงเส้น สำหรับประมาณค่าความดันภายในอิลิเมนต์โดยความดันภายในแต่ละอิลิเมนต์จะถูกกำหนดเป็น

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

โดยที่ N_1 เป็น Element Shape Function ซึ่งเมื่อเขียนในพจน์ของระบบพิกัดฉาก จะเป็น

$$\begin{aligned} N_1 &= \xi_1 \\ N_2 &= \xi_2 \\ N_3 &= \xi_3 \end{aligned} \quad (3.156)$$

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1$$

จัดสมการ (3.155) ใหม่กลายเป็น

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

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

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

พิจารณาเทอมแรกของแต่ละสมการใน (3.158)

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

สมมติให้ค่า K และ H คงที่ทั้งพื้นที่ของ element จะได้

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

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

$$\int_A \kappa H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_i dA = \bar{\kappa} H \int_A \frac{\partial}{\partial t} (\xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \xi_3 p_3) \xi_i dA$$

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

สำหรับที่ $i = 1, 2$ และ 3 จะได้

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

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

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

และสามารถเขียนในรูป Matrix ได้ดังนี้

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

โดยที่ $p_i = \partial p_i / \partial t$

และสามารถเขียนย่อๆ ได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปเราจะพิจารณาเทอมที่ 2 ของแต่ละสมการใน (3.158) ซึ่งคล้ายๆ กับพจน์ในกระบวนการเดิมเต็ม จากสมการ Formular Element และ Divergence Theorem จะได้

$$\begin{aligned} \int_A (\nabla \cdot S_2 \nabla \tilde{p}) dA &= \int_A (\nabla \cdot N_1 S_2 \nabla \tilde{p}) dA - \int_A S_2 (\nabla \tilde{p} \cdot \nabla N_1) dA \\ &= \int_{\Sigma} N_1 S_2 \nabla \tilde{p} \cdot \vec{n} d\Sigma - \int_A S_2 (\nabla \tilde{p} \cdot \nabla N_1) dA \quad (3.167) \end{aligned}$$

โดยทั้ง 2 เทอมทางด้านขวามือได้หาไว้แล้ว ซึ่งทั้ง 3 สมการจาก I=1,2,3 สามารถเขียนในรูปเมทริก ได้ดังนี้

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

เขียนให้กระชับขึ้นได้

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

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

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

โดยที่

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

จัดรูปใหม่

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

ซึ่งจะเป็นสมการของอีลิเมนต์สำหรับกระบวนการนิตย้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.1 การรวมเมตริกของสมการอิลิเมนต์

เราจะกล่าวถึงการรวมสมการอิลิเมนต์ (3.172) และจะสังเกตได้ว่า สมการระบบจะใช้สัญลักษณ์คล้ายกับที่ใช้ด้านบน เพียงแต่จะไม่มีตัวยก คือ

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

ใช้การประมาณแบบ 1st Order Forward Difference สำหรับการหาอนุพันธ์ของความดัน เพื่อหาความดันที่ตำแหน่งชั้นเวลาปัจจุบัน 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

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

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

3.4.2.2 สมการความดันของรูวิ่ง

สมการการความดันสำหรับรูวิ่ง (Runners) ในกระบวนการอัดยี้ (Packing Phase) คือ

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

กำหนดให้

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

สามารถเขียนให้กระชับได้เป็น

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

เราจะใช้การประมาณแบบเชิงเส้นประมาณค่าความดันระหว่าง 2 Node ที่กำหนดอิลิเมนต์ของรูวิ่ง (Runners Element) คือ \tilde{p} โดยจะอยู่ในรูป

$$\tilde{p} = \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \right) p_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) p_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= N_1 p_1 + N_2 p_2 \quad (3.179)$$

โดย

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} = \frac{1}{L}(x_2 - x) \\ N_2 &= \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{1}{L}(x - x_1) \end{aligned} \quad (3.180)$$

และ L จะเป็นความยาวของอีลิเมนต์

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

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

ใช้ Galerkin's Method ได้

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

แทน (3.182) ลงใน (3.183) จะได้ 2 สมการที่ $j=1,2$ เป็น

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

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

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

$$\begin{aligned} \bar{\kappa}_e R^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dx &= \bar{\kappa}_e R^2 \int_{x_1}^{x_2} (N_1 \dot{p}_1 + N_2 \dot{p}_2) N_1 dx \\ &= \bar{\kappa}_e R^2 \left\{ \dot{p}_1 \int_{x_1}^{x_2} N_1^2 dx + \dot{p}_2 \int_{x_1}^{x_2} N_2 N_1 dx \right\} \end{aligned} \quad (3.185)$$

ใช้สมการ (3.180) หาค่า Integral ได้เป็น

$$\int_{x_1}^{x_2} N_1^2 dx = \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{x_2} (x_2 - x)^2 dx$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (3.188) และ (3.183) จะได้

$$\int_{x_1}^{x_2} R(x)W_1 dx = \frac{\bar{\kappa}LR^2}{6} (2\dot{p}_1 + \dot{p}_2) + \int_{x_1}^{x_2} bN_2 dx - q_2 + \frac{r^+S_1}{L} (p_1 - p_2) \quad (3.194)$$

สมการ (3.193) และ (3.194) สามารถนำมาเขียนรวมกันในรูปสมการเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} R(x)W_1 dx \\ \int_{x_1}^{x_2} R(x)W_2 dx \end{Bmatrix} = \frac{\bar{\kappa}LR^2}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} + \frac{r^+S_1}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} \quad (3.195)$$

โดยที่

$$b_1 = \int_{x_1}^{x_2} bN_1 dx \quad b_2 = \int_{x_1}^{x_2} bN_2 dx \quad (3.196)$$

จากสมการ (3.182) เติมทางด้านซ้ายมือของสมการ (3.195) มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ (3.195) มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ (3.195) เขียนใหม่ได้เป็น

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

และเขียนให้กระชับได้เป็น

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

ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการจะมีลักษณะคล้ายๆกับสมการของอิลิเมนต์ที่ใช้สำหรับ คาร์วิตตี

3.4.3 การใช้ข้อมูล PVT และการกำหนดหาอุณหภูมิ

ในกระบวนการฉีดอัด เราจะใช้ PVT Data เพื่อหาความหนาแน่นของวัสดุ , สัมประสิทธิ์ การกดอัดตัว (Isothermal Compressibility Coefficient) K และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Volume Expansion) β

ถ้าเราทราบค่าด้านบนทั้งหมดเราจะสามารถหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ เมื่อเทียบกับการอัดตัวของวัสดุ ซึ่งแสดงได้โดยสมการนี้

$$\Delta T_{comp}^{n+1} = \Delta t \left(\frac{\beta T^n}{pc_p} \right) \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$= \frac{1}{L^2} \left[-\frac{1}{3} (x_2 - x)^3 \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \quad (3.186)$$

$$= \frac{1}{3L^2} (x_2 - x_1)^3$$

$$= \frac{1}{3}$$

$$\int_{x_1}^{x_2} N_1 N_2 dx = \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{x_2} (x_2 - x)(x - x_1) dx$$

$$= \frac{1}{L^2} \left[\frac{1}{2} x_2 x^2 - x_2 x_1 x - \frac{1}{3} x^3 + \frac{1}{2} x^2 x_1 \right]_{x=x_1}^{x=x_2}$$

$$= \frac{1}{6L^2} (x_2 - x_1)^3 \quad (3.187)$$

ใช้ค่าเหล่านี้แทนใน (3.185) จะได้

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

ใช้วิธีเดียวกันกับ Integral เทอมแรกทางด้านขวามือของสมการ (3.184) จะได้

$$\frac{K_e R^2}{L} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} N_1 dx = \frac{K_e L R^2}{6} (\dot{p}_1 + 2\dot{p}_2) \quad (3.189)$$

ต่อไปเราจะพิจารณา Integral เทอมสุดท้ายทางด้านขวามือของสมการ (3.183) และ (3.184) ใช้วิธี Integral by Part จะได้

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \right) N_1 dx = \left(r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} N_1 \right)_{x=x_1}^{x=x_2} - \int_{x_1}^{x_2} r^+ S_1 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} dx = 1,2 \quad (3.190)$$

โดยเทอมที่ได้ทางด้านขวามือจะเหมือนกับในกระบวนการฉีดเติมเต็มจะได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \Delta t \left(\frac{\beta T^n}{\rho C_p} \right) \frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} \\
 &= \frac{\beta T^n}{\rho C_p} (\rho^{n+1} - \rho^n)
 \end{aligned}
 \tag{3.198}$$

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

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

ในช่วงที่เริ่มต้นของ Isothermal Period สมการพลังงานจะถูกใช้เพื่อหาสนามของอุณหภูมิ (Temperature Field) โดยจะใช้วิธีเดียวกันทั้งในกระบวนการเติมเต็มและฉีดย้ำ โดยจะต่างกันตรงที่ Source Term ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการอัดตัวได้

หลังจากที่หาสนามของอุณหภูมิได้แล้วจะต้องคำนวณค่าความหนืดและค่าความต้านทานการไหลใหม่ โดยใช้ค่าความหนาแน่นค่าใหม่, ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวค่าใหม่ ส่วน $\partial \rho / \partial p$ และ $\partial \rho / \partial t$ ก็จะหาได้จาก PVT data และค่าสัมประสิทธิ์การหดตัว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวใหม่ก็就会被ปรับปรุงในเมตริก $[C^{(e)}]$ และ $[K^{(e)}]$ ทุกครั้งเมื่อขั้นเวลาเพิ่มขึ้น การคำนวณความดันจะถูกคำนวณอีกครั้งหนึ่งเสมอ

ผู้ใช้สามารถป้อนค่าได้ทั้ง เวลาที่ใช้ในการฉีดย้ำ (Packing Time) และเวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) การคำนวณเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิจะกระทำในช่วงการฉีดย้ำและตอนท้ายของช่วงการฉีดย้ำ ก็จะเริ่มหล่อเย็น ซึ่งจะมีการคำนวณเฉพาะอุณหภูมิเท่านั้น

บทที่ 4

แนะนำการใช้โปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นในการนำโปรแกรมไปประยุกต์กับปัญหา

4.1 แนะนำ โปรแกรม MOLDFLOW

กระบวนการที่จะใช้ทำการผลิตชิ้นงานออกสู่ตลาดนั้น ต้องใช้กระบวนการการออกแบบทำต้นแบบ ออกแบบแม่พิมพ์ สร้างแม่พิมพ์ และผลิตชิ้นงานออกมา รวมทั้งต้องทำการตลาดด้วย แต่ละขั้นตอนดังกล่าว ทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านเวลา ถ้าเกิดลดเวลาลงได้จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการผลิตออกสู่ตลาดได้ไวขึ้น การลดระยะเวลาทำงานลงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับผลตอบแทนที่จะได้รับ ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ มาช่วยในการวิเคราะห์คำนวณ จึงตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยปัจจุบัน การจำลองเหตุการณ์ของการเติมเนื้อพลาสติกจนเต็มแม่พิมพ์ (Filling) ด้วยภาพ 3 มิติ

พื้นฐานของการคำนวณจะอาศัยไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element) ซึ่งประกอบรวมกันเข้าเป็น 3 D Shell Model หรือการมองวัตถุที่จะทำการวิเคราะห์คำนวณให้เหลือเพียงแค่โครงสร้างที่ไม่มีความหนา และเป็นรูปทรง 3 มิติ ข้อกำหนดดังกล่าว ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ (Simulate) ของ Finite Element ด้วยสมการ 2 มิติ ได้

การสร้าง Finite – Element Mesh สามารถสร้างได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ (Software) ที่อาศัย

- มุมมองรูปทรงต่างๆ ถูกกำหนดค่าลงไปทีค่าโคออร์ดิเนต x,y,z ณ ค่าหนึ่งๆ
- มุมสองมุมคู่ใดๆ ถูกเชื่อมต่อกันด้วยเส้นตรงจนครบ
- จุดของเส้นที่ปิดหรือเชื่อมต่อกันเป็นวง จะล้อมรอบจนเกิดเป็นพื้นที่ขึ้น

และในที่สุด Finite Element จะถูกสร้างขึ้นภายในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวภายหลังจากที่จำนวนของจุด (Node) อิลิเมนต์ (Element) หรือขนาด Element ที่ต้องการ ได้ถูกป้อนค่าลงไปภายในซอฟต์แวร์ ซึ่งการสร้าง Mesh ของ Finite Element จะช้าเร็วขึ้นอยู่กับความละเอียด จำนวน และประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์

ข้อดีของการเลือกใช้ Finite Element แบบ 3 D-Shell Model เป็นผลมาจากการเลือกตำแหน่งของทางเข้าของพลาสติกที่หลอมเหลว (Gate) เพื่อทำการจำลองสถานการณ์ (Simulate) ด้วย (Gate) แบบใดแบบหนึ่ง และผลจากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ภายหลังการคำนวณของการเติมเต็มของพลาสติกหลอมเต็มแม่พิมพ์ (Filling Image) จะดำเนินการไปโดยอัตโนมัติด้วยตัวของ ซอฟต์แวร์เอง และสามารถที่จะใช้ ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) อื่นๆ เพื่อส่งถ่ายข้อมูลของ Mesh เข้าสู่ CAE (Computer Aided Engineering) ของการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกด้วยการเชื่อมต่อ (Interface) เช่น IGES ,VDAFS เป็นต้น

เมื่อได้ Finite Element Mesh มาเรียบร้อยแล้ว จึงทำการคำนวณโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ จุดที่ทำการวิเคราะห์ ก็คือ ค่าที่สถานะภาพ (Condition) ต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการฉีดพลาสติก (Plastic Injection) โดยจะวิเคราะห์หาส่วนที่เป็นจุดที่เกิดข้อบกพร่องหรือจุดด้อยของคุณสมบัติของวัสดุ ดังเช่น จุดที่เกิดรอยการเชื่อมประสานของพลาสติกเหลวที่มาชนสัมผัสกัน (Weld Line) หรือบริเวณที่เกิดค่าแรงเค้นสูงๆ ค่าจุดที่เกิดอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่พลาสติกจะเสื่อมคุณภาพ (Degrade) ถ้าการวิเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ แล้วไม่เกิดจุดบกพร่องหรือจุดบกพร่องน้อย ก็ย่อมที่จะสรุปได้ว่า เงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการออกแบบสร้างโมลด์

ค่าที่ต้องใช้ในการกำหนดเงื่อนไขเพื่อการวิเคราะห์ ก็คือ

1. ตัวแปรในการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความดัน และเวลา
2. วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการฉีด เช่น พลาสติกประเภทใด
3. ลักษณะรูปแบบของชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์

เมื่อทำการวิเคราะห์จนได้ผลที่พึงพอใจแล้ว ซึ่งอาจจะต้องทำการทดลอง แบบลองผิดลองถูก (Trial- Error) หลายครั้ง กว่าจะได้ค่าที่ดี ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่งของทางเข้าของพลาสติกเหลวสู่แม่พิมพ์ (Gate) ค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับการฉีดพลาสติกจะถูกนำมาเอาไปใช้จริงๆ กับการออกแบบแม่พิมพ์ และสำหรับการฉีดจริงๆ ภายหลังจากที่ทำการผลิตแม่พิมพ์เรียบร้อยแล้ว ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า เป็นการประหยัดเวลาการลองผิดลองถูกกับการทำงานจริงๆ ลงไปมาก และลดความเสี่ยงเปลี่ยนจากการทำผิดพลาดได้

เราสามารถนำเอาขั้นตอนทั้งหมดมาเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพ (Flow-Chart) ได้ดังภาพที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.1 แผนภาพ (Flow Chart) แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ของโปรแกรม Moldflow
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้นหากมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติก Moldflow จะเป็นโปรแกรมที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะแบ่งโปรแกรมในการวิเคราะห์ให้ได้ 2 แบบ คือ

1. MFL4 จะใช้ Finite Element สำหรับการคะเนความดัน และทำการจำลองการไหลของพลาสติกล่วงหน้าก่อนที่จะทำโมลด์เบส (Moldbase) ส่วนการคำนวณด้านอุณหภูมิ จะใช้รูปแบบของอัลกอริทึมบน Moldflow ซึ่งโปรแกรมนี้จะวิเคราะห์ได้เพียงการเติมเต็มในโมลด์เท่านั้น

2. MFLP จะใช้ Finite Element สำหรับการคะเนความดัน และทำการจำลองการไหลของพลาสติกล่วงหน้าก่อนที่จะทำโมลด์เบส (Moldbase) ส่วนการคำนวณด้านอุณหภูมิ จะใช้ส่วนของสมการ (Finite Difference) ซึ่งโปรแกรมนี้จะวิเคราะห์ได้ในส่วนของการเติมเต็ม (Filling) และการรวมเป็นเนื้อเดียวของพลาสติก (Packing)

- MFL4

เนื่องจาก MFL4 จะใช้อัลกอริทึม (Algorithm) บน Moldflow สำหรับการคำนวณอุณหภูมิซึ่งจะมีความละเอียดลออในการคำนวณหาค่าตอขที่น้อยกว่าแบบ MFLP แต่อย่างไรก็ตาม ก็มีความสำคัญที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ

อัลกอริทึมบน Moldflow นี้จะสมมติให้รูปแบบของอุณหภูมิจะสม่ำเสมอเมื่อพลาสติกไหลเข้าชั้นความหนาของโมลด์ โดยรูปแบบของอุณหภูมิจะมีการถ่ายเทเป็นการประมาณค่าเป็นไปตามรูปพาราโบลา (Parabolic) ข้อสมมติฐานจะสมเหตุสมผลก็ต่อเมื่อ โมลด์จะถูกฉีดพลาสติกเข้าเต็มอย่างรวดเร็ว และความหนาของชั้นแข็งตัวจะไม่ใหญ่เกินไป ถ้าโมลด์ถูกฉีดให้เต็มอย่างช้าๆ ความหนาของชั้นแข็งตัวก็จะมีได้ ทำให้ผลที่ออกมาไม่สามารถที่จะคาดคะเนได้

เป็นที่แน่นอนว่า จะต้องมีปัญหาที่เกิดขึ้นว่า ทำอย่างไรจะให้โมลด์ถูกฉีดพลาสติกได้เร็วที่สุด และเหมาะสมที่สุด และอัตราต่างๆ ที่เป็นตัวแปรในการฉีดพลาสติก เช่น อุณหภูมิก่อนฉีด และอุณหภูมิเมื่อพลาสติกเต็มโมลด์แล้ว จะต้องมีการประมาณค่าให้เท่ากับอุณหภูมิไหลของพลาสติกที่จุดฉีด ซึ่งภายใต้สภาวะเหล่านี้ การถ่ายเทความร้อนจะต้องมีความสมดุลกับความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการนำความร้อนในโมลด์

เพราะว่า MFL4 จะเกี่ยวเนื่องกับการเติมเต็ม (Filling) จึงควรที่จะถูกใช้เมื่อมีการออกแบบที่ตั้งของทางเข้า (Gate) การตรวจขั้นตอนของสถานะการฉีด ท่อพลาสติกเข้า และการสมดุลของการไหลพลาสติกในโมลด์

- MFLP

MFLP เป็นการพัฒนาซอฟต์แวร์เริ่มต้นของ Moldflow ในเรื่องของหดตัว (Shrinkage) และการบิดตัว (Warpage) การวิเคราะห์ของการหดตัวจำเป็นต้องใช้ ไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์เทคนิค (Finite Difference Technique) มาใช้ในการคำนวณด้านอุณหภูมิ ซึ่งจำเป็นต้องมีผลการคำนวณอื่นๆ ตามมาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ค่าของความหนืด (Viscosity) ความเค้น (Shear Stress) ซึ่งจะนำไปคำนวณหาความหนาของพลาสติกในโมลด์ได้

โปรแกรมการหดตัว (Shrinkage) และการบิดตัว (Warpage) บนเครื่องฉีดโมลด์พลาสติกจะมีการแสดงถึงผลของการอัดตัวขณะหลอมเหลวในขณะที่มีการเติมเต็มโมลด์ ดังนั้น MFLP จะใช้ข้อมูล PVT (Pressure Volume and Temperature) ซึ่งจะมาทำโมเดลในการคำนวณความสามารถของการอัดและการขยายตัวในขณะที่มีการเติมเต็ม

MFLP จะสามารถวิเคราะห์การรวมตัวของพลาสติกได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แรงดันแคลมป์ (Clamp Tonnage) ที่มีการคาดคะเนไว้อย่างแม่นยำและการหดตัวของปริมาตรในโมลด์ ซึ่งในจุดๆ นี้ จะนำมาซึ่งการหลีกเลี่ยงการผลิตที่ไม่ได้ขนาดตามต้องการ การบิดตัวของผลิตภัณฑ์ และการไม่รวมเป็นเนื้อเดียวของผลิตภัณฑ์

4.2 ข้อคำนึงในการออกแบบ

ประโยชน์ของทั้งสองโปรแกรมนี้ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะต้องใช้ในการเปลี่ยนการออกแบบให้ดีขึ้น ซึ่งในส่วนนี้ใช้การวิเคราะห์ MFLP ซึ่งจะต้องมีการอธิบายในส่วนต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ความหนืด ฯลฯ โดยจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมาทำการจำลอง ขั้นตอนการฉีดพลาสติกในโมลด์

1. การเติมเต็มของโมลด์ (Mold Filling) เป็นส่วนที่สำคัญมาก จะมีปัญหาที่จะต้องคำนวณคือว่า จะใช้ “ความดันเท่าใดในการเติมเต็ม” ซึ่งในจุดๆ นี้ Moldflow จะช่วยในการคะเนค่าความดันให้และการจำลองการฉีดได้

2. การวิเคราะห์การรวมเป็นเนื้อเดียว (Packing Analysis) โดยในการวิเคราะห์หัวข้อนี้ จะใช้ MFLP ซึ่งจะช่วยในงานจริงที่ต้องมีการเปลี่ยนความดันในการฉีดพลาสติกเพื่อจะให้การเติมเต็มในโมลด์มีคุณภาพดีที่สุด

หนทางที่ดีที่สุดจะต้องใช้การจำลองด้วย MFLP ในการควบคุมความดันในการฉีดก่อนที่โมลด์จะเต็ม และ เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรจะประมาณค่าได้ตามสมการ

$$V_p = (100 - P / 10)\%$$

P = ความดันใช้ฉีดเข้าแม่พิมพ์

V_p = ร้อยละของปริมาตรพลาสติกที่ฉีดเข้าแม่พิมพ์

3. การหดตัวของปริมาตร (Volumetric Shrinkage) เป้าหมายหลักของการวิเคราะห์การรวมเป็นเนื้อเดียว (Packing) นี้ ช่วยย้ำความแน่นอนของผลิตภัณฑ์ว่า ในการคำนวณของ MFLP ในเรื่องการหดตัวของปริมาตร จะแสดงได้ทาง Moldflow ซึ่งการแปรผันของการหดตัวนี้เอง จะมีผลต่อการเกิดปัญหาของการบิดตัว ซึ่งจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลง

โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีสูตรในการหาการฉีดพลาสติกที่ดีที่สุดไว้ แต่จะเป็นการเปลี่ยนสถานะเพื่อทดลองการฉีดที่ดีที่สุด (Trial and Error) ดังนั้น จึงต้องมีความรู้และความสามารถที่เพียงพอในการวินิจฉัยสถานะต่างๆ ได้

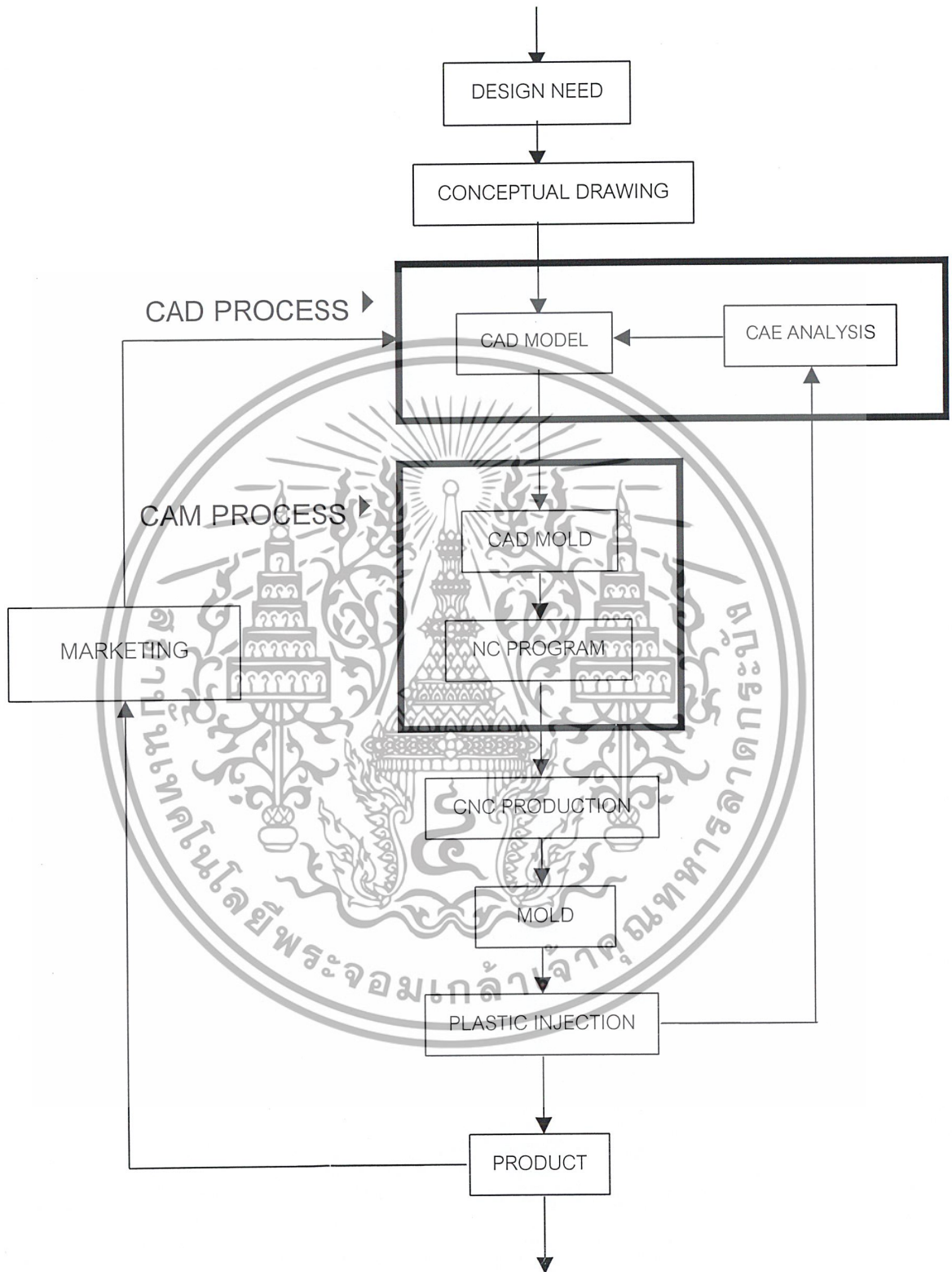
ในการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกเริ่มต้นจากการนำเอาความต้องการชิ้นงานอุปกรณ์ จากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นความคิดพื้นฐานของแต่ละชิ้นงาน (Conceptual Drawing) อย่างเช่นภาพคร่าวๆ ของรูปแบบชิ้นงาน ขนาดคร่าวๆ ที่จำเป็นรวมทั้งหน้าที่การทำงาน (Function) ที่จะใช้จากชิ้นงานนั้น จากนั้นนำเอาข้อมูลของขนาดรูปทรงอย่างคร่าวๆ ไปออกแบบวิศวกรรม CAD (Computer Aided Design) ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนยุ่งยากในการออกแบบ พร้อมทั้งเห็นภาพและขนาดจริงๆ ทั้งที่เป็นสองมิติและสามมิติได้ ทำให้สามารถแก้ไขเมื่อต้องการได้ทันที เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จแล้วก็จะนำเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์และตรวจสอบแบบชิ้นงานว่า สามารถทนต่อสถานะของแรงที่กระทำจากการใช้งานจริงๆ ได้หรือไม่ อย่างไร เพื่อนำไปสู่การแก้ไขแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานได้ด้วยโดยใช้ซอฟต์แวร์ เพื่อช่วยวิเคราะห์ CAE (Computer Aided Engineering)

หลังจากออกแบบเสร็จแล้ว นำเอามิติและขนาดของแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบไว้ นำไปออกแบบการจำลองเส้นทางของมีดกัด (Tool Path) โดยใช้ CAM (Computer Aided Manufacturing) โดยจะต้องทราบถึงขั้นตอนในการกัดเป็นอย่างดี โดยจะเริ่มจากการกัดแม่พิมพ์โดยใช้ดอกกัดหยาบ การกัดละเอียดตลอดจนการเพื่อความหนาสำหรับที่จะนำมาขัดให้เป็นผิวสำเร็จหลังจากนั้นก็สามารถนำ Tool Path มาทำการ Postprocess เป็น NC Program (G-Code) ซึ่งจะนำไปสู่ขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ต่อไป

เมื่อได้ NC Program แล้ว นำเอาชิ้นวัตถุดิบไปผ่านขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน (แม่พิมพ์) โดยอาศัยเครื่อง CNC โดยใช้โปรแกรมคำสั่งที่ได้จากขั้นตอน CAM เพื่อสร้างแต่ละชิ้นส่วน จากนั้นนำไปประกอบและทดสอบแม่พิมพ์ (Mold) ว่าสามารถทำงานได้ตามต้องการหรือไม่ แล้วจึงนำไปติดตั้งบนเครื่องฉีดพลาสติก (Plastic Injection Mold Machine) เพื่อทำการผลิตชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้เป็นจำนวนมากๆ เพื่อป้อนสู่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

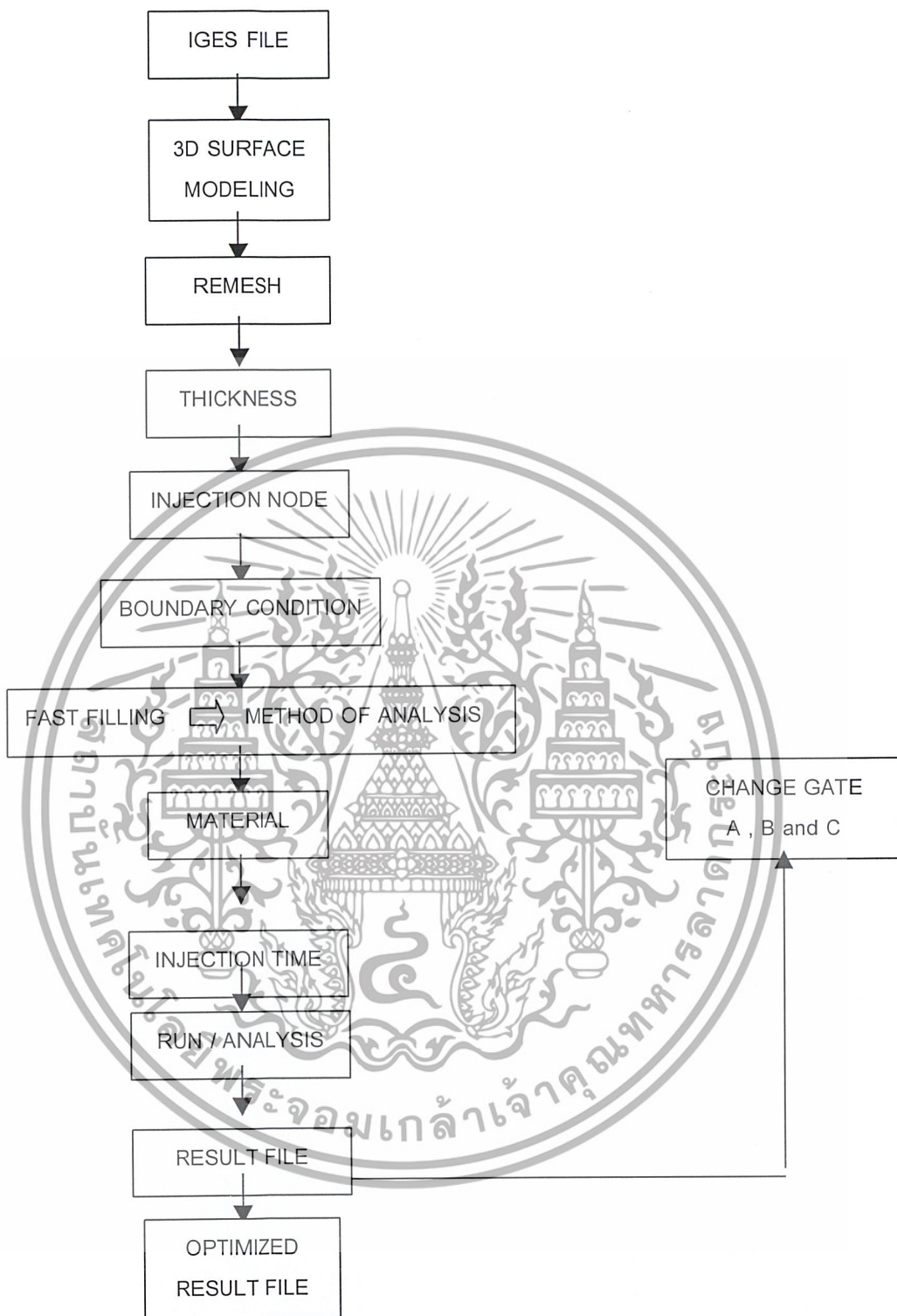
ชิ้นงานที่ได้ออกแบบมาแล้วสามารถนำไปใช้งานได้ทันที ในภายหน้าถ้าต้องการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงรูปทรงตามความต้องการของตลาดแล้ว สามารถนำเอาข้อมูลเก่าที่เก็บไว้นำไปแก้ไขเฉพาะส่วนที่ต้องการ เพื่อนำไปสู่การผลิตได้อีก โดยไม่ต้องเริ่มออกแบบใหม่หมด

ภาพนี้เป็น Block Diagram ที่แสดงขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยใช้คอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.2 Block Diagram แสดงขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 Block Diagram แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ การฉีดพลาสติกบน Moldflow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ การฉีดพลาสติก

การทดลองวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนี้บน Moldflow จะเป็นไปตาม Block Diagram ดังภาพ
เริ่มจาก

1. IGE Fille เปิดไฟล์ที่ได้สร้าง Midsurface จาก UGII พร้อมทั้งจะนำมาทำการวิเคราะห์บน Moldflow
2. 3D Surface Modeling เปลี่ยน โมด (Model) ให้แสดงแต่ 3D Surface Modeling
3. Remesh ทำการ Remesh ซึ่ง Moldflow จะทำการสร้าง Node และ Element โดยอัตโนมัติ โดยใช้หลักในการสร้าง Node และ Element ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์
4. Thickness กำหนดค่าความหนาของชิ้นงาน จากที่ได้ทำการออกแบบบน CAD โดยให้ Thickness เท่ากับ 2 mm.
5. Injection Node จะเป็นเครื่องมือในการกำหนดจุดฉีดพลาสติกเข้าชิ้นงาน
6. Boundary Condition จะเป็นการกำหนดสภาวะขอบเขตของชิ้นงาน ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนจุดสิ้นสุดของการฉีดบนชิ้นงาน
7. Method of Analysis โดยในการวิเคราะห์ในขั้นนี้ จะใช้วิธี Fast Filling
8. Material จะใช้วัสดุดิบ ซึ่งก็คือ พลาสติก ในการใช้พลาสติกในการวิเคราะห์ได้มาจากโรงงาน โดยจะใช้พลาสติกซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกนี้จะได้มาจาก Database ของ Moldflow กล่าวคือ จะมีคุณสมบัติดังนี้
 - สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 - ค่าความร้อนจำเพาะ
 - ความหนาแน่นเมื่อหลอมเหลว
 - อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก
 - อุณหภูมิเมื่อไม่มีการไหล
 (รายละเอียดอื่นๆ ดูได้จาก Result File)
9. Injection Time กำหนดช่วงเวลาในการฉีดให้เป็นอัตโนมัติ เพื่อว่าจะทราบถึงการใช้เวลาทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มต้นทำการฉีดพลาสติกจนกระทั่งสิ้นสุดหรือไม่มีการไหลของพลาสติกอีกต่อไป
10. Run/Analysis ทำการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกในชิ้นงานโดย Moldflow จะทำการวิเคราะห์ให้ได้ผล ณ เวลาต่างๆ เมื่อพลาสติกไหลเข้าชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Result File เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์ จะได้ Result File จะเห็นรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ เช่น ความดัน (pressure) อุณหภูมิ (Temperature) ความเค้นเฉือน (Shear Stress) อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) อากาศที่ค้างอยู่ (Air Trap) รอยเชื่อมประสานพลาสติก (Weld Line) ความหนืด (Viscosity) ทิศทางการไหลและอื่นๆ
12. Change Gate (A,B,C) โดยการทดลองนี้จะให้ขั้นตอนทุกขั้นตอนเป็นไปตาม Block Diagram ดังกล่าว แต่จะให้ตัวแปรต้นเป็นการเปลี่ยนจุดฉีด (Inject Node) และตัวแปรตามคือผลซึ่งได้จากการวิเคราะห์บน Moldflow
- A – จุดศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงาน
 - B - จุดศูนย์กลางวงกลมใหญ่
 - C – จุดศูนย์กลางวงกลมเล็ก
13. Optimized Result File ทำการเปลี่ยน Injection Node ในลักษณะต่างๆ แล้วทำการ วิเคราะห์ใหม่ทั้งหมด ก็จะได้ Result File ออกมา



บทที่ 5

การวิจัยและการดำเนินงาน

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เม็ดพลาสติก โพลีสไตรีน Polystyrene (PS) ของบริษัท DOW CHEMICAL จำกัด

5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองใช้เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 2000 / 630 CDC เป็นเครื่องฉีดพลาสติกของบริษัท Battenfeld Austria ใช้ระบบ Hydraulic ควบคุมการปิด - เปิดของแม่พิมพ์ และควบคุมการทำงานด้วย control unit รุ่น UNILOG 4000 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

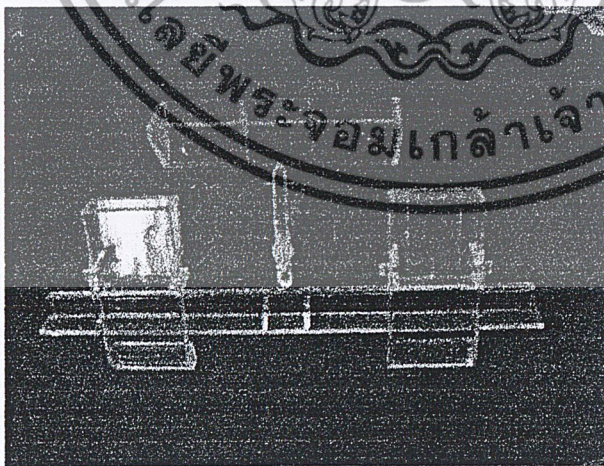
1. แรงมากสุดในการจับยึด 200 ตัน
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูฉีด 45 mm.
3. ปริมาตรการฉีดสูงสุด 286 cm³
4. ความดันสูงสุดในการฉีด 2138 bar
5. แรงดันในหัวฉีด 99 กิโลนิวตัน

เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบ Unix Model 02 ของบริษัท Silicon graphic (ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีวศุแห่งชาติ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD และ CAE (Pro Engineer II และ Mold Flow)

5.1.3 รูปร่าง (Model) ชิ้นงานและแม่พิมพ์

ชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนพลาสติกของที่กดทดลองน้ำ



รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก

ลักษณะของแม่พิมพ์

1. 2 Cavity (ที่ไม่สมมาตรกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Gate ทางเข้าด้านข้าง

3. Sprue bush ยาว 80 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เรียว 2 องศา

5.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. คัดเลือกชิ้นงานเพื่อการเป็นกรณีศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานนี้
2. วาดแบบชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CAD
3. นำชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม CAD แล้วส่งต่อมา meshing ในโปรแกรม CAE
4. ทำการ Simulation ในโปรแกรม CAE เพื่อวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน
5. นำปัญหา Air Trap ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAE มาทำการแก้ไขแม่พิมพ์ โดยการทำให้ Air Vent
6. ทดลองฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่แก้ไขแล้วและทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์
7. เปรียบเทียบทิศทางการไหลระหว่างการใช้โปรแกรมและการทดลองฉีดพลาสติกจริง สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน



รูปที่ 5.2 แสดงรูปร่างชิ้นงานพลาสติก

ชิ้นงานที่ต้องการแก้ไขมีปัญหที่เกิดขึ้นดังนี้ รอยไหม้ ครีบ รอยแตกร้าว การยุบตัวปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานวิเคราะห์ที่เด่นชัดคือ รอยไหม้ที่เกิดที่ปลายชิ้นงาน ผิวชิ้นงาน

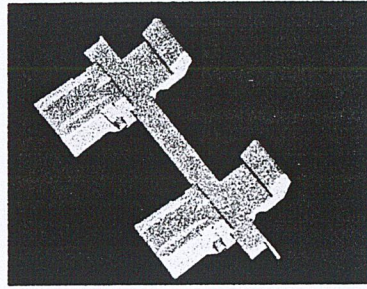
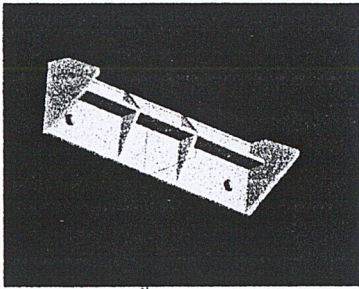
5.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ

การออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design)

ทำการออกแบบชิ้นงานที่ต้องการด้วยการใช้โปรแกรม Pro Engineer โดยทำการออกแบบใน

ลักษณะพื้นผิว(Solid Modeling)

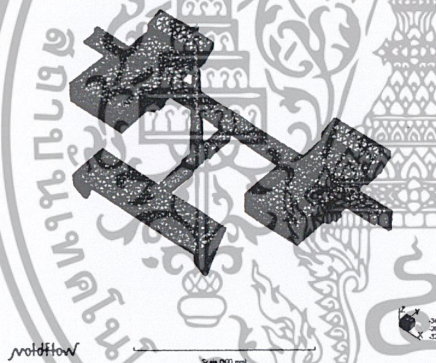
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงแบบชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม Pro Engineer

5.5 การส่งผ่านข้อมูลเพื่อเข้าสู่โปรแกรมCAE(Computer Aided Engineer)

หลังจากได้ทำการออกแบบชิ้นงานด้วยCADจากโปรแกรมPro Engineer แล้วให้ทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบ Nastran ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถส่งข้อมูลที่สร้างไว้เข้าไปยังโปรแกรม Moldflow เพื่อทำการMesh โดยสร้างRUNNER ของชิ้นงานบนโปรแกรม Moldflow หลังจากนั้นทำการ MESH แบบ DUAL DOMAIN หรือ SURFACE MESH เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ต่อไป



รูปที่ 5.4 ชิ้นงานที่ทำการ Mesh

5.6 การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CAE

โปรแกรมที่ใช้ทำการวิเคราะห์คือ โปรแกรม MOLDFLOW MPI 3.0

ค่า CONDITON ที่วิเคราะห์ในโปรแกรม MOLDFLOW

1. กำหนดเกรดพลาสติก PS จากบริษัท DOW CHEMICAL
2. เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 2000 / 630 CDC เป็นเครื่องฉีดพลาสติกของบริษัท Battenfeld Austria แผง Control unit รุ่น UNILOG 4000
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์ 22 องศาเซลเซียส
4. อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก PS 225 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติของพลาสติกโพลีสไตรีน (PS)

คุณสมบัติ แข็งแรง ตากแดดได้ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดี เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงฉีด	ฉนวนไฟฟ้า คุณซึมซับน้ำน้อย ให้ความเที่ยงตรงทาง ขนาดสูง,ใสเหมือนแก้ว,ยอมให้เป็นสีต่างๆได้ง่าย ไม่ต้องการแรงฉีดสูง(เพราะมีการไหลตัวที่ดี)
Holding Pressure	30-60% ของแรงฉีด
ความเร็วฉีด	ขึ้นงานรูปกล่อง ผันบาง ใช้ความเร็วสูง
อุณหภูมิโมลด์	5-60 C
การอบแห้ง	ไม่จำเป็น
ค่าหดตัว	0.5-0.6%
ปริมาณการฉีด	5-95% ของปริมาตรกระบอกลัด
อุณหภูมิหลอมละลาย	200-250 เซลเซียส
ความหนาแน่น	1.05
ความจุความร้อน	1300 J/kg.K

5.7 ผลการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม MOLDFLOW

รูปที่ 5. 5 แสดงจุดที่จะเกิด Air Trap

ผลการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม MOLDFLOW

AUTO-SETTING

Copyright Moldflow Corporation and Moldflow Pty. Ltd. All Rights Reserved.

(C)2000 2001

This product may be covered by

US patent 6,096,088 ,

Australian Patent No. 721978 ,

and foreign patents and pending applications

Flow Analysis

Version: mpi300 (Build 01443) สำหรับการให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis commenced at Wed Jan 23 12:39:28 2002

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

Packing Analysis

Residual Stress Analysis

Date : JAN23-02

Time : 12:39:30

Allocating memory for analysis...

... finished allocating memory

Match ratio is 93 %.

Reciprocal match ratio is 93 %.

Reading input data...

File name : study_kmit_auto-setting_(copy)-1

Reading solver parameters...

Reading material data...

Reading process settings...

Reading finite element mesh...

**** WARNING **** No cooling channel is specified.

Set up cooling channel information, then run the analysis again.

Reading cooling data...

NOTE: The analysis sequence does not include a cooling analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Uniform mold temperatures will be assumed.

**** WARNING **** The flow analysis is continuing without using the .C2P file.

Reading restart data...

Note: No restart data was found.

Finished reading input data

Checking input data...

... finished checking input data

Optimizing memory usage...

... finished optimizing memory usage

Initializing variables...

... finished initializing variables

Summary of analysis inputs :

Solver parameters :

No. of laminae across thickness	=	12
No. of intermediate results (filling)	=	20
No. of profiled intermediate results (filling)	=	20
No. of intermediate results (packing)	=	20
No. of profiled intermediate results (filling)	=	20
Melt temperature convergence tolerance	=	0.2000 C
Mold-melt heat transfer coefficient	=	2.5000E+04 W/m ² -C
Maximum no. of melt temperature iterations	=	100
Pressure trace sample frequency	=	10 Hz
Total number of pressure trace nodes	=	1
Node 1	=	4079
Residual stress analysis	=	1
Option for structural package	=	0
Isolate mechanism for warpage? (0=No,1=Yes)	=	1
Number of modes for stress analysis	=	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material data :

Polymer 1 : Styron 685D : Dow Chemicals USA

PVT Model: 2-domain modified Tait

coefficients: $b_5 = 376.3700 \text{ K}$

$b_6 = 3.5650\text{E-}07 \text{ K/Pa}$

Liquid phase Solid phase

$b_1 = 0.0010$ $b_1 = 0.0010 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_2 = 5.9960\text{E-}07$ $b_2 = 2.3710\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{kg-K}$

$b_3 = 1.7978\text{E+}08$ $b_3 = 2.6402\text{E+}08 \text{ Pa}$

$b_4 = 0.0048$ $b_4 = 0.0039 \text{ 1/K}$

$b_7 = 0.0000 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_8 = 0.0000 \text{ 1/K}$

$b_9 = 0.0000 \text{ 1/Pa}$

Specific heat (C_p) = 1768.0000 J/kg-C

Thermal conductivity = 0.1230 W/m-C

Viscosity model: Cross-WLF

coefficients: $n = 0.3011$

$TAUS = 1.4400\text{E+}04 \text{ Pa}$

$D1 = 3.4100\text{E+}13 \text{ Pa-s}$

$D2 = 373.1500 \text{ K}$

$D3 = 0.0000 \text{ K/Pa}$

$A1 = 29.5960$

$A2T = 51.6000 \text{ K}$

Transition temperature = 120.0000 C

Transition temperature (strength) = 120.0000 C

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transversely isotropic elastic tensor

coefficients: $E1 = 3000.0000 \text{ MPa}$
 $E2 = 3000.0000 \text{ MPa}$
 $\nu12 = 0.3800$
 $\nu23 = 0.3800$
 $G = 1090.0000 \text{ MPa}$

Transversely iso thermal expansion

coefficients: $a1 = 7.1100\text{E-}05 \text{ 1/C}$
 $a2 = 7.1100\text{E-}05 \text{ 1/C}$

Process settings :

Machine parameters :

Maximum machine clamp force = $7.0002\text{E}+03 \text{ tonne}$
Maximum injection volume = $2.0000\text{E}+04 \text{ cm}^3$
Maximum injection pressure = 100.0000 MPa
Maximum machine injection rate = $5.0000\text{E}+03 \text{ cm}^3/\text{s}$
Machine hydraulic response time = $1.0000\text{E-}02 \text{ s}$

Process parameters :

Fill time = 1.3304 s
Cooling time = Automatic
Fill/pack switch-over by = Automatic
Packing/holding time = 10.0000 s
Ram speed profile (rel):

% Shot volume % speed

0.0000 100.0000

Pack/hold pressure profile (rel):

duration % fill pressure

----- -----

0.0000 s 80.0000

10.0000 s 80.0000

Ambient temperature = 25.0000 C

Inlet melt temperature = 225.0000 C

Ideal cavity-side mold temperature = 22.0000 C

Ideal core-side mold temperature = 22.0000 C

NOTE: Mold wall temperature data from cooling analysis not available

Model details :

Total number of nodes = 4074

Total number of injection location nodes = 1

The injection location node numbers are:

4079

Total number of elements = 8141

Number of part elements = 8132

Number of sprue/runner/gate elements = 9

Number of channel elements = 0

Number of connector elements = 0

Parting plane normal (dx) = 0.0000

(dy) = 0.0000

(dz) = 1.0000

Average aspect ratio of triangle elements = 2.3397

Maximum aspect ratio of triangle elements = 18.8881

No. of triangle elements having max. aspect ratio = 7974

Minimum aspect ratio of triangle elements = 1.1590

No. of triangle elements having min. aspect ratio = 3748

Total volume	=	40.9716 cm ³
Volume filled initially	=	0.0000 cm ³
Volume to be filled	=	40.9716 cm ³
Part volume to be filled	=	36.3519 cm ³
Sprue/runner/gate volume to be filled	=	4.6197 cm ³
Total projected area	=	105.7540 cm ²

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

Packing Analysis

Residual Stress Analysis

analysis is beginning

Filling phase:

Time	Volume	Pressure	Clamp force	Flow rate	Status
(s)	(%)	(MPa)	(tonne)	(cm ³ /s)	
0.08	5.15	13.16	0.00	31.76	F
0.14	9.92	15.36	0.04	30.27	F
0.20	13.80	19.78	0.25	31.23	F
0.27	18.75	21.12	0.41	31.55	F
0.33	23.52	22.19	0.60	31.52	F
0.40	28.43	23.69	0.96	31.43	F
0.47	33.24	25.48	1.48	31.35	F
0.53	38.02	27.26	2.09	31.31	F
0.60	42.84	29.09	2.76	31.53	F
0.67	47.53	33.00	5.39	30.97	F
0.73	52.67	32.95	5.80	31.98	F

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.80 57.38 33.70 6.17 31.73 F
0.87 62.33 34.68 6.75 31.76 F
0.93 67.09 35.82 7.46 31.76 F
1.00 71.93 37.05 8.28 31.82 F
1.07 76.84 38.06 9.02 31.84 F
1.13 81.65 38.99 9.75 31.87 F
1.20 86.62 40.31 10.80 31.82 F
1.26 91.27 42.27 12.42 31.88 F
1.33 95.90 46.04 15.87 31.89 F
1.36 97.82 F/P
1.36 97.82 47.55 17.63 31.39 P
1.40 99.05 38.04 16.59 10.57 P
1.46 99.87 38.04 18.80 6.14 P
1.46 100.00 38.04 20.35 4.87 Filled

Execution time in Filling Phase = 1014.40 s

Packing phase:

Time	Packing	Pressure	Clamp force	Status
(s)	(%)	(MPa)	(tonne)	
1.46 0.00 38.04 20.38 P				
1.49 0.26 38.04 22.95 P				
2.12 6.66 38.04 23.26 P				
2.62 11.72 38.04 18.90 P				
3.12 16.77 38.04 14.17 P				
3.62 21.83 38.04 10.79 P				
4.12 26.88 38.04 8.50 P				
4.62 31.93 38.04 6.77 P				
5.12 36.99 38.04 5.51 P				
5.62 42.04 38.04 4.50 P				
6.12 47.09 38.04 3.69 P				

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.62 52.15 38.04 3.09 P
7.12 57.20 38.04 2.62 P
7.62 62.26 38.04 2.26 P
8.12 67.31 38.04 1.98 P
8.62 72.36 38.04 1.77 P
9.12 77.42 38.04 1.60 P
9.62 82.47 38.04 1.47 P
10.12 87.52 38.04 1.37 P
10.62 92.58 38.04 1.29 P
11.12 97.63 38.04 1.23 P
11.36 Pressure released
11.36 100.00 37.28 1.21 P

Preparing interface data...

Preparing PPC file for cooling analysis...

Preparing LSP file for warpage analysis...

Finished preparing the interface data

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

Packing Analysis

Residual Stress Analysis

has completed successfully.

SYNERGY Weld-line and air trap

Reading input data...

Reading flow analysis output...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Finished reading input data

Beginning weld line/air trap analysis...

Weld line/air trap analysis completed

Preparing output data...

Finished preparing output data

SYNERGY Weld-line and air trap
has completed successfully.

Execution time

Analysis commenced at Wed Jan 23 12:39:28 2002

Analysis completed at Wed Jan 23 13:13:41 2002

CPU time used 2052.97 s

5.8 ผลจากการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยโปรแกรมMoldflow

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MOLDFLOW เกิด Air Trap ตรงกับปัญหารอยไหม้ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจึงเลือกทำการแก้ไขแม่พิมพ์ตรงจุดที่เกิดรอยไหม้ โดยการทำ Air Vent ที่บริเวณรอยไหม้ รอยไหม้เกิดจากปัญหา Air Trap อากาศที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์จากการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์นั้นระบายออกไม่ได้ (Air Trap) ส่วนมากเกิดที่ตำแหน่งปลายสุดของคาร์ไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ ซึ่งศึกษาได้จากทิศทางการไหลของน้ำพลาสติก เมื่ออากาศถูกอัดตัวจึงเกิดความร้อนขึ้น รวมกับความร้อนที่ได้รับจากน้ำพลาสติกเหลว เมื่อความร้อนที่บริเวณที่เกิด Air trap นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพลาสติก จึงทำให้เกิดรอยไหม้ที่บริเวณนั้น



รูปที่ 5. 6 แสดงลักษณะการเกิด Air Trap

การระบายอากาศ(VENTING)

เมื่อพลาสติกหลอมถูกฉีดเข้าไปใน Cavity อากาศภายในจะถูกเนื้อพลาสติกเข้าแทนที่ โดยปกติอากาศจะหนีออกไปได้ตรงรอยต่อระหว่างแผ่นแม่พิมพ์ทั้งสอง แต่หากการปรับแต่งผิวรอยต่อมีความเอียงมากหรือของเป่าหรือคอร์มีความหนาหรือลึกมาก อากาศจะถูกขังอยู่ใน Cavity ซึ่งจะทำให้เกิดรอยไหม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำหนิหรือทำความเสียหายให้กับชิ้นงานได้ เช่น ทำให้เกิดรอยไหม้ รอยดำง เนื้อพลาสติกเปลี่ยนสี ทำให้เกิดรอยบุ๋ม การเติมเนื้อพลาสติกไม่เต็ม Cavity เป็นต้น

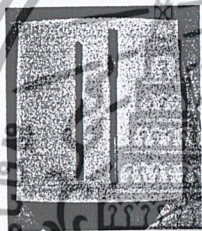
ดังนั้นจึงจะจัดเตรียมช่องอากาศ (Vent) ไว้ในแม่พิมพ์ด้วยเพื่อให้อากาศและก๊าซอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถหนีหรือระบายออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระ

ตำแหน่งของ Cavity ที่ควรทำช่องอากาศมีดังนี้

1. จุดที่อยู่ห่างจากรูเข้ามากที่สุด ในชิ้นงานที่สมมาตรกัน
2. จุดที่พลาสติกหลอมไหลมาบรรจบกันใน Cavity
3. ตรงผิวที่ลึกที่สุดของร่องในแผ่นเป้าของแม่พิมพ์

5.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้แม่พิมพ์

1. ดอกสว่าน ขนาด 0.8 mm.
2. ดอก Remmer ขนาด 1.0 mm.
3. เครื่อง Milling

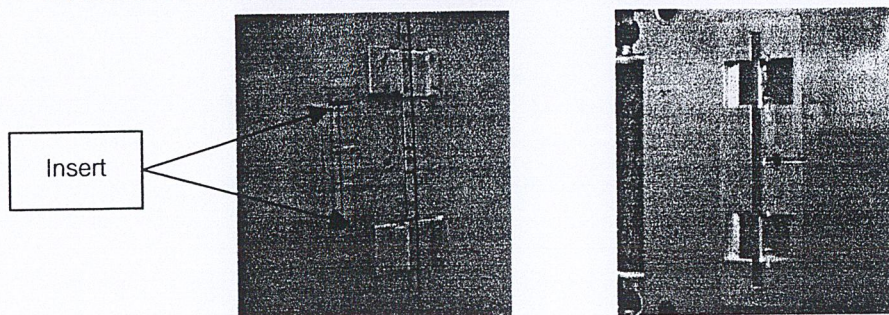


รูปที่ 5.7 ดอกสว่านและ Remmer

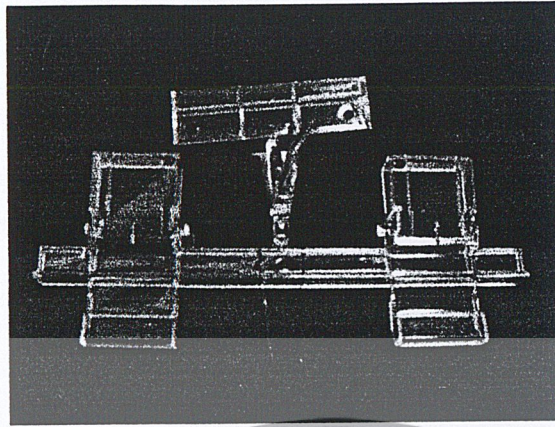
วิธีการแก้ไขแม่พิมพ์โดยการทำ Air Vent

1. ถอด INSERT ก่อนที่เป็น CAVITY ออก
2. เอา INSERT CAVITY มาจับยึดด้วยปากกาขีด
3. ใช้ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8mm. เจาะไปในตำแหน่งที่ปลายชิ้นงาน (อากาศอันอยู่) และใช้ดอก REMMER ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm. ตามเข้าไปเพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน (H7) เพื่อให้สวมกับ EJECTOR PIN ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm. ตามมาตรฐาน (H6) ต่อมาพลิก INSERT CAVITY กลับเพื่อทำเป็นบ่าของ EJECTOR PIN ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm.

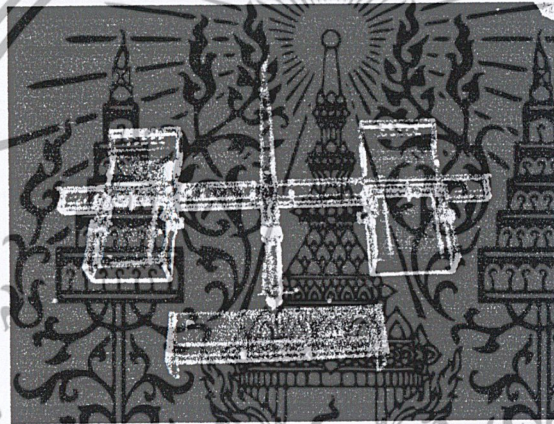
4. ใช้ตะไบเซาะร่องให้อากาศออกมาตรงนี้อัดยึด INSERT



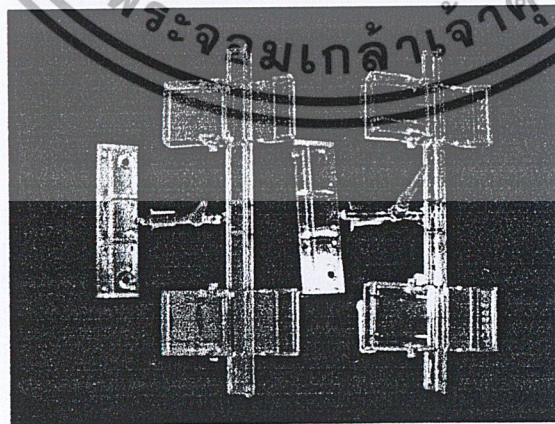
เอกสารรูปที่ 5.8 แสดงแม่พิมพ์ที่จะทำการแก้ไข ชิ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ชิ้นงานพลาสติกหลังทำการแก้ไขแม่พิมพ์และฉีดด้วยการปรับตั้งค่าของพนักงานฉีดพลาสติก

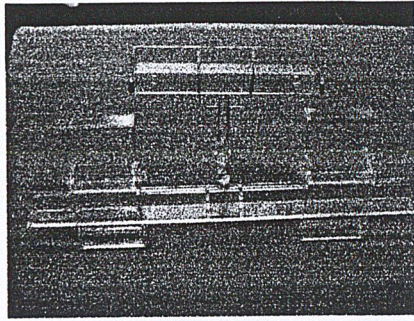


รูปที่ 5.11 แสดงชิ้นงานพลาสติกหลังการแก้ไขแม่พิมพ์และฉีดด้วยค่า CONDITION ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MOLDFLOW

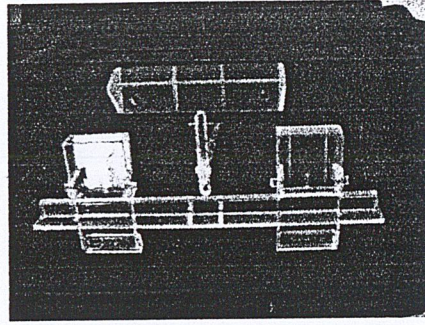


รูปที่ 5. 12 การเปรียบเทียบลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติกด้วยค่า CONDITION ระหว่างค่าจากโปรแกรม MOLDFLOW และค่าจากพนักงานฉีดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อนทำการแก้ไข



หลังทำการแก้ไข

รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการแก้ไขแม่พิมพ์

พิจารณาคูสมบัตินี้ภายในชิ้นงาน โดยนำค่าที่ได้พนักงานฉีด มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์จาก โปรแกรมMoldflow

5.10.1 ผลการวิเคราะห์การฉีดด้วยโปรแกรม MOLDFLOW

MANUAL-SETTING

Copyright Moldflow Corporation and Moldflow Pty. Ltd. All Rights Reserved.

(C)2000 2001

This product may be covered by

US patent 6,096,088 ;

Australian Patent No. 721978 ;

and foreign patents and pending applications.

Flow Analysis

Version: mpi300 (Build 01443)

Analysis commenced at Mon Jan 21 14:36:45 2002

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Packing Analysis

Residual Stress Analysis

Date : JAN21-02

Time : 14:36:46

Allocating memory for analysis...

... finished allocating memory

Match ratio is 93 %,

Reciprocal match ratio is 93 %.

Reading input data...

File name : study_kmit_compare_1~1

Reading solver parameters...

Reading material data...

Reading process settings...

Reading finite element mesh...

**** WARNING **** No cooling channel is specified.

Set up cooling channel information, then run the analysis again.

Reading cooling data...

NOTE: The analysis sequence does not include a cooling analysis.

Uniform mold temperatures will be assumed.

**** WARNING **** The flow analysis is continuing without using the .C2P file.

Reading restart data...

Note: No restart data was found.

Finished reading input data

Checking input data...

... finished checking input data

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimizing memory usage...

... finished optimizing memory usage

Initializing variables...

... finished initializing variables

Summary of analysis inputs :

Solver parameters :

No. of laminae across thickness	=	12
No. of intermediate results (filling)	=	20
No. of profiled intermediate results (filling)	=	20
No. of intermediate results (packing)	=	20
No. of profiled intermediate results (filling)	=	20
Melt temperature convergence tolerance	=	0.2000 C
Mold-melt heat transfer coefficient	=	2.5000E+04 W/m ² -C
Maximum no. of melt temperature iterations	=	100
Pressure trace sample frequency	=	10 Hz
Total number of pressure trace nodes	=	1
Node 1	=	4079
Residual stress analysis	=	1
Option for structural package	=	0
Isolate mechanism for warpage? (0=No,1=Yes)	=	1
Number of modes for stress analysis	=	3

Material data :

Polymer 1 : Styron 685D : Dow Chemicals USA

coefficients: $b_5 = 376.3700 \text{ K}$

$b_6 = 3.5650\text{E-}07 \text{ K/Pa}$

Liquid phase Solid phase

 $b_1 = 0.0010$ $b_1 = 0.0010 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_2 = 5.9960\text{E-}07$ $b_2 = 2.3710\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{kg-K}$

$b_3 = 1.7978\text{E+}08$ $b_3 = 2.6402\text{E+}08 \text{ Pa}$

$b_4 = 0.0048$ $b_4 = 0.0039 \text{ 1/K}$

$b_7 = 0.0000 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_8 = 0.0000 \text{ 1/K}$

$b_9 = 0.0000 \text{ 1/Pa}$

Specific heat (C_p) = 1768.0000 J/kg-C

Thermal conductivity = 0.1230 W/m-C

Viscosity model:

Cross-WLF

coefficients: $n = 0.3011$

$\text{TAUS} = 1.4400\text{E+}04 \text{ Pa}$

$D_1 = 3.4100\text{E+}13 \text{ Pa-s}$

$D_2 = 373.1500 \text{ K}$

$D_3 = 0.0000 \text{ K/Pa}$

$A_1 = 29.5960$

$A_{2T} = 51.6000 \text{ K}$

Transition temperature = 120.0000 C

Transition temperature (strength) = 120.0000 C

Transversely isotropic elastic tensor

coefficients: $E_1 = 3000.0000 \text{ MPa}$

$E_2 = 3000.0000 \text{ MPa}$

$\nu_{12} = 0.3800$

$\nu_{23} = 0.3800$

$G = 1090.0000 \text{ Mpa}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transversely iso thermal expansion

coefficients: $a_1 = 7.1100E-05 \text{ 1/C}$

$a_2 = 7.1100E-05 \text{ 1/C}$

Process settings :

Machine parameters :

Maximum machine clamp force = $7.0002E+03 \text{ tonne}$
 Maximum injection volume = $2.0000E+04 \text{ cm}^3$
 Maximum injection pressure = 100.0000 MPa
 Maximum machine injection rate = $5.0000E+03 \text{ cm}^3/\text{s}$
 Machine hydraulic response time = $1.0000E-02 \text{ s}$

Process parameters :

Flow Rate = $85.7500 \text{ cm}^3/\text{s}$
 Cooling time = 8.0000 s
 Fill/pack switch-over by % volume = 99.5000%
 Packing/holding time = 0.9000 s

Ram speed profile (rel):

% Shot volume	% speed
100.0000	100.0000
0.0000	100.0000

Pack/hold pressure profile (abs):

duration	pressure
0.0000 s	2.5000 MPa
0.3000 s	2.5000 MPa
0.0000 s	3.5000 MPa
0.4000 s	3.5000 MPa

0.0000 s	1.5000 MPa	
0.2000 s	1.5000 MPa	
8.0000 s	0.0000 MPa	
Ambient temperature	=	25.0000 C
Inlet melt temperature	=	225.0000 C
Ideal cavity-side mold temperature	=	22.0000 C
Ideal core-side mold temperature	=	22.0000 C

NOTE: Mold wall temperature data from cooling analysis not available

Model details :

Total number of nodes	=	4074
Total number of injection location nodes	=	1
The injection location node numbers are:		4079
Total number of elements	=	8141
Number of part elements	=	8132
Number of sprue/runner/gate elements	=	9
Number of channel elements	=	0
Number of connector elements	=	0
Parting plane normal	(dx) =	0.0000
	(dy) =	0.0000
	(dz) =	1.0000
Average aspect ratio of triangle elements	=	2.3397
Maximum aspect ratio of triangle elements	=	18.8881
No. of triangle elements having max. aspect ratio	=	7974
Minimum aspect ratio of triangle elements	=	1.1590
No. of triangle elements having min. aspect ratio	=	3748
Total volume	=	40.9716 cm ³
Volume filled initially	=	0.0000 cm ³
Volume to be filled	=	40.9716 cm ³

เอกสารนี้เป็นงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part volume to be filled = 36.3519 cm³
 Sprue/runner/gate volume to be filled = 4.6197 cm³
 Total projected area = 105.7540 cm²

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

Packing Analysis

Residual Stress Analysis
 analysis is beginning

Filling phase:

Time	Volume	Pressure	Clamp force	Flow rate	Status
(s)	(%)	(MPa)	(tonne)	(cm ³ /s)	
0.03	4.92	17.24	0.00	85.41	F
0.05	9.00	17.81	0.01	86.29	F
0.07	12.85	23.59	0.27	82.86	F
0.10	17.65	24.41	0.43	85.30	F
0.12	22.42	24.88	0.62	85.05	F
0.14	27.13	25.75	0.93	84.89	F
0.17	31.92	26.97	1.45	84.63	F
0.19	36.58	28.15	2.00	84.94	F
0.22	41.32	29.36	2.60	84.70	F
0.24	46.09	31.02	3.52	83.69	F
0.26	50.77	32.58	5.44	86.38	F
0.29	55.62	32.70	5.67	85.36	F
0.31	60.31	33.50	6.19	85.41	F
0.34	65.09	34.23	6.74	85.50	F

0.36 69.84 34.90 7.34 85.49 F
0.38 74.53 35.37 7.86 85.62 F
0.41 79.35 35.91 8.39 85.62 F
0.43 84.00 36.56 8.98 85.59 F
0.46 88.67 37.84 10.03 85.48 F
0.48 93.33 39.48 11.54 85.65 F
0.50 97.91 43.19 15.16 85.67 F
0.51 99.59 F/P
0.51 99.59 45.28 18.91 73.78 P
0.51 99.74 39.14 18.95 30.06 P
0.52 100.00 33.69 19.68 9.42 Filled

Execution time in Filling Phase = 921.42 s

Packing phase:

Time (s)	Packing (%)	Pressure (MPa)	Clamp force (tonne)	Status
0.53 0.14 2.50 16.18 P				
0.57 0.57 2.50 11.37 P				
0.62 1.15 2.50 8.14 P				
0.72 2.30 2.50 3.16 P				
0.80 3.23 2.50 0.36 P				
0.82 3.37 3.50 0.26 P				
0.83 3.51 3.50 0.18 P				
0.91 4.38 3.50 0.03 P				
1.01 5.53 3.50 0.03 P				
1.20 7.72 3.50 0.03 P				
1.22 7.87 1.50 0.03 P				
1.25 8.30 1.50 0.01 P				
1.31 8.87 1.50 0.00 P				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.42 10.14	0.81	0.00	P
1.42			Pressure released

1.42 10.21	0.00	0.00	P
3.83 37.22	0.00	0.00	P
6.58 68.13	0.00	0.00	P
9.33 99.03	0.00	0.00	P
9.58 100.00	0.00	0.00	P

Preparing interface data...

Preparing PPC file for cooling analysis...

Preparing LSP file for warpage analysis...

Finished preparing the interface data

Moldflow Plastics Insight 3.0

Filling Analysis

Packing Analysis

Residual Stress Analysis

has completed successfully.

SYNERGY Weld-line and air trap

Reading input data...

Reading flow analysis output...

Finished reading input data

Beginning weld line/air trap analysis...

Weld line/air trap analysis completed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparing output data...

Finished preparing output data

SYNERGY Weld-line and air trap

has completed successfully.

Execution time

Analysis commenced at Mon Jan 21 14:36:45 2002

Analysis completed at Mon Jan 21 15:09:20 2002

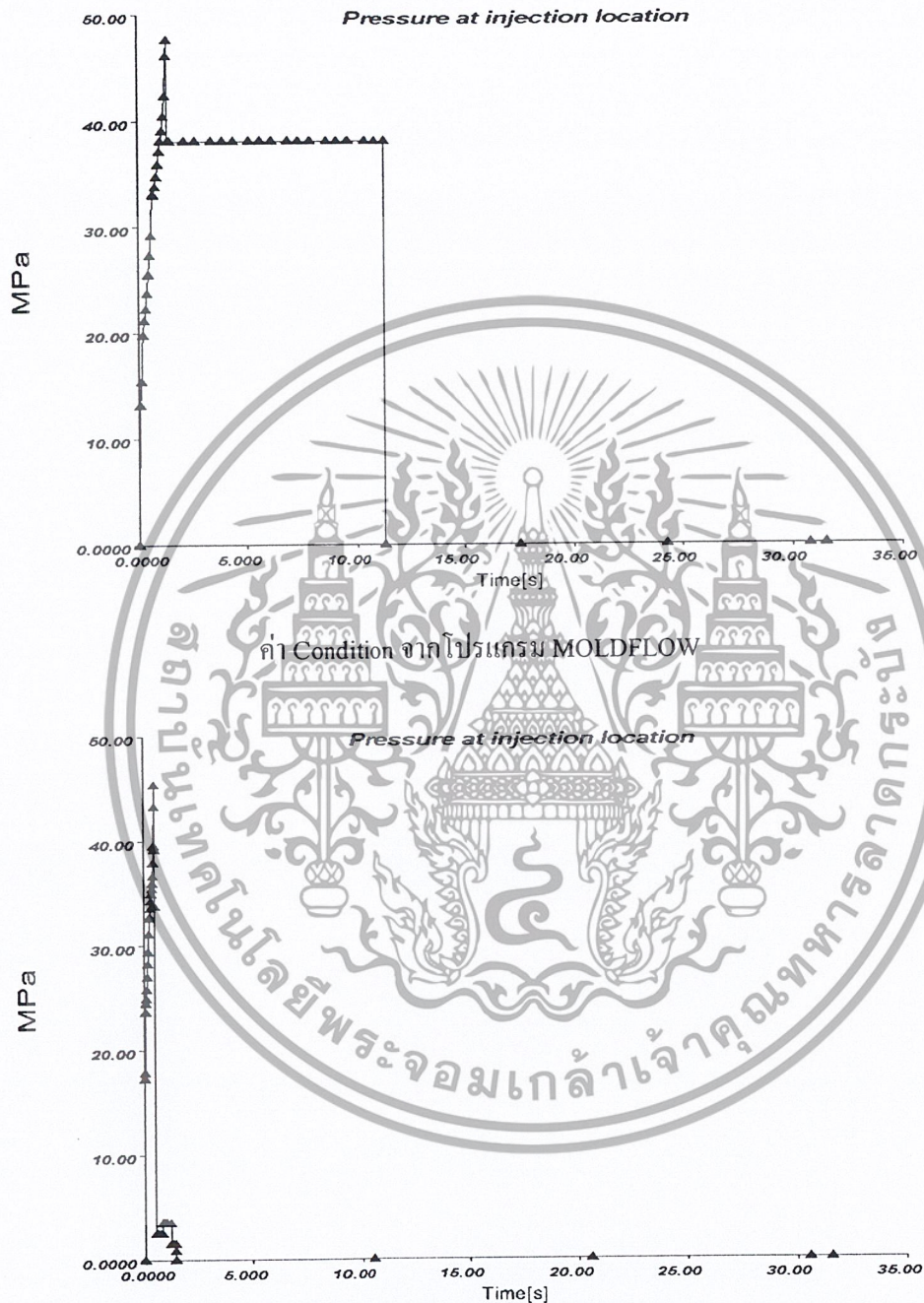
CPU time used 1954.47 s

5.10.2 ค่า CONDITION การฉีดพลาสติกระหว่างค่าจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MoldFlow กับค่าจากพนักงานฉีดพลาสติก

ค่าสภาวะเงื่อนไข	Program MOLDFLOW	พนักงานฉีดพลาสติก	
1. ความเร็วฉีดเติมเต็มขั้นที่ 1	31	53.125	ลบ.ซม. / วินาที
2. ความเร็วฉีดเติมเต็มขั้นที่ 2	31	74.375	ลบ.ซม. / วินาที
3. ความเร็วฉีดเติมเต็มขั้นที่ 3	31	42.5	ลบ.ซม. / วินาที
4. Follow-up press stroke	5	11.2	มิลลิเมตร
5. Max. Injection Pressure	100	90	bar
6. อุณหภูมิการหลอมเหลว	225	225	องศาเซลเซียส
7. อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่หล่อเย็น	22	22	องศาเซลเซียส
8. เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น	15	15	วินาที
9. ระยะ Screw ถอยหลัง	33.5	41	มิลลิเมตร
10. ระยะแรงฉีดย้ำ (Cushion)	5	5	มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.3 เปรียบเทียบผลการ SIMULATION การฉีดพลาสติกด้วยค่า CONDITION ระหว่างค่าจากโปรแกรม MOLDFLOW และค่าจากพนักงานฉีดพลาสติก

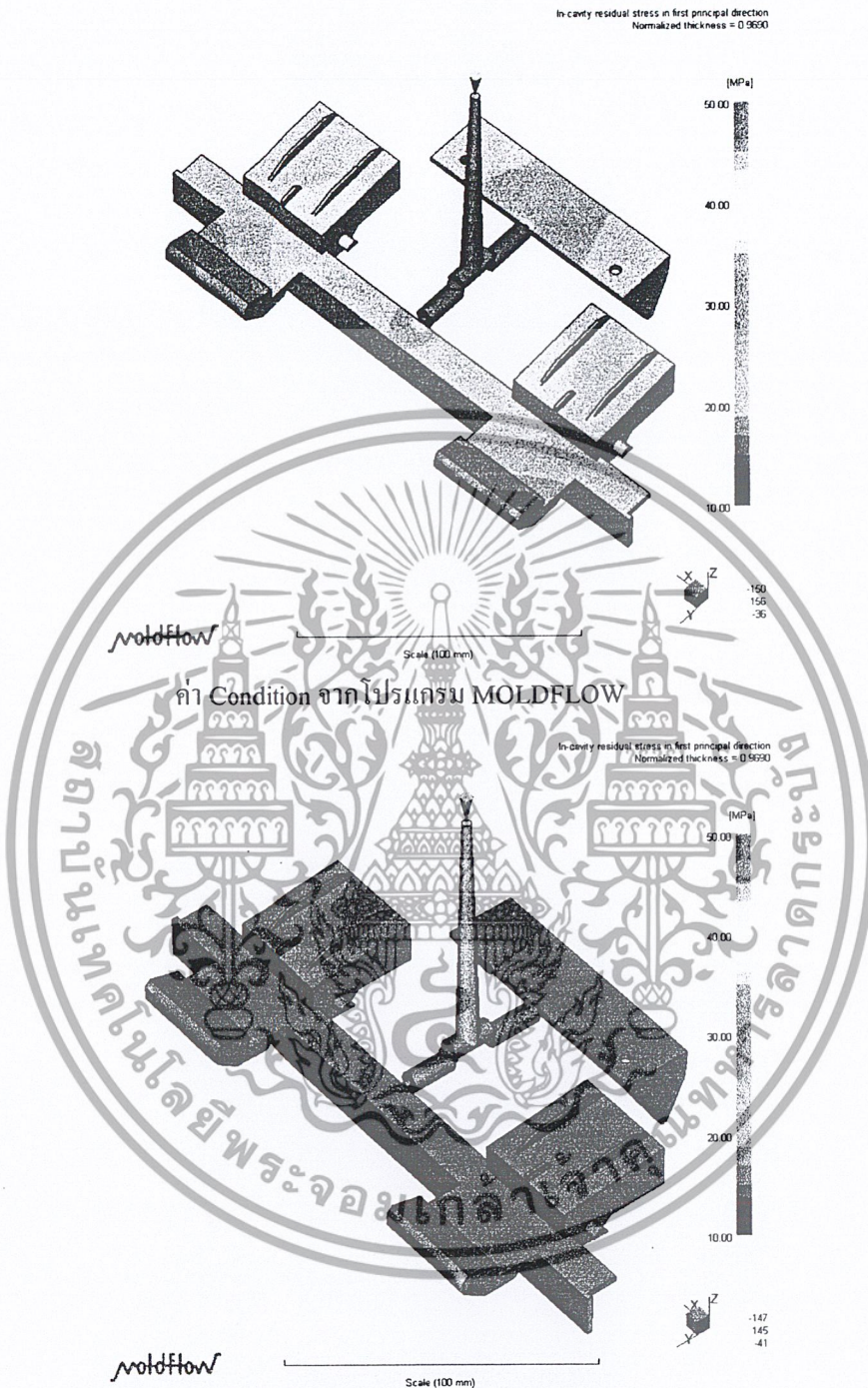


รูปที่ 5.14 กราฟแสดง Pressure Profile

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure (Mpa) ตั้งแต่ช่วง Filling จนถึงช่วง Packing กับ เวลา (s) เห็นได้ว่า Pressure ที่ใช้ในการ Pack ของค่าจากพนักงานฉีดนั้นมีความเร็วสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Residual stress



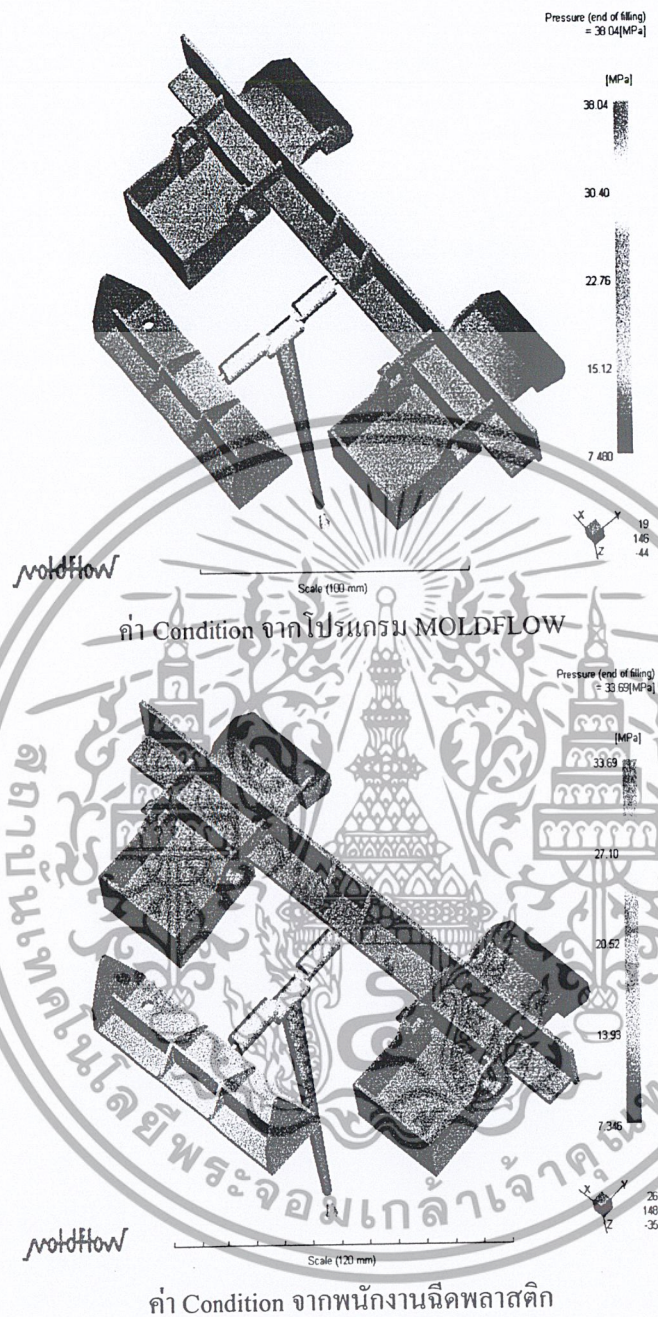
รูปที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ Residual Stress

การแสดงผลของความเค้นจะแสดงเป็นความเค้นสูงสุดของความเค้นเฉือน (Maximum shear stress) ที่คิดตัดผ่านความหนาของชิ้นงาน ขณะที่ทำการหล่อเย็นส่วนที่เกิดความเค้นเมื่อการฉีดสิ้นสุดลง จะเกิดการคลายตัว แต่จะมีความเค้นบางส่วนที่ยังคงเหลืออยู่ (Residual stress) หลังจากชิ้นงานแข็งตัวแล้ว ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานเกิดการผิดรูปร่าง (Distort) ดังนั้นความเค้นเฉือนควรจะมีความไม่เกินกว่าที่

กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Pressure End of Filling



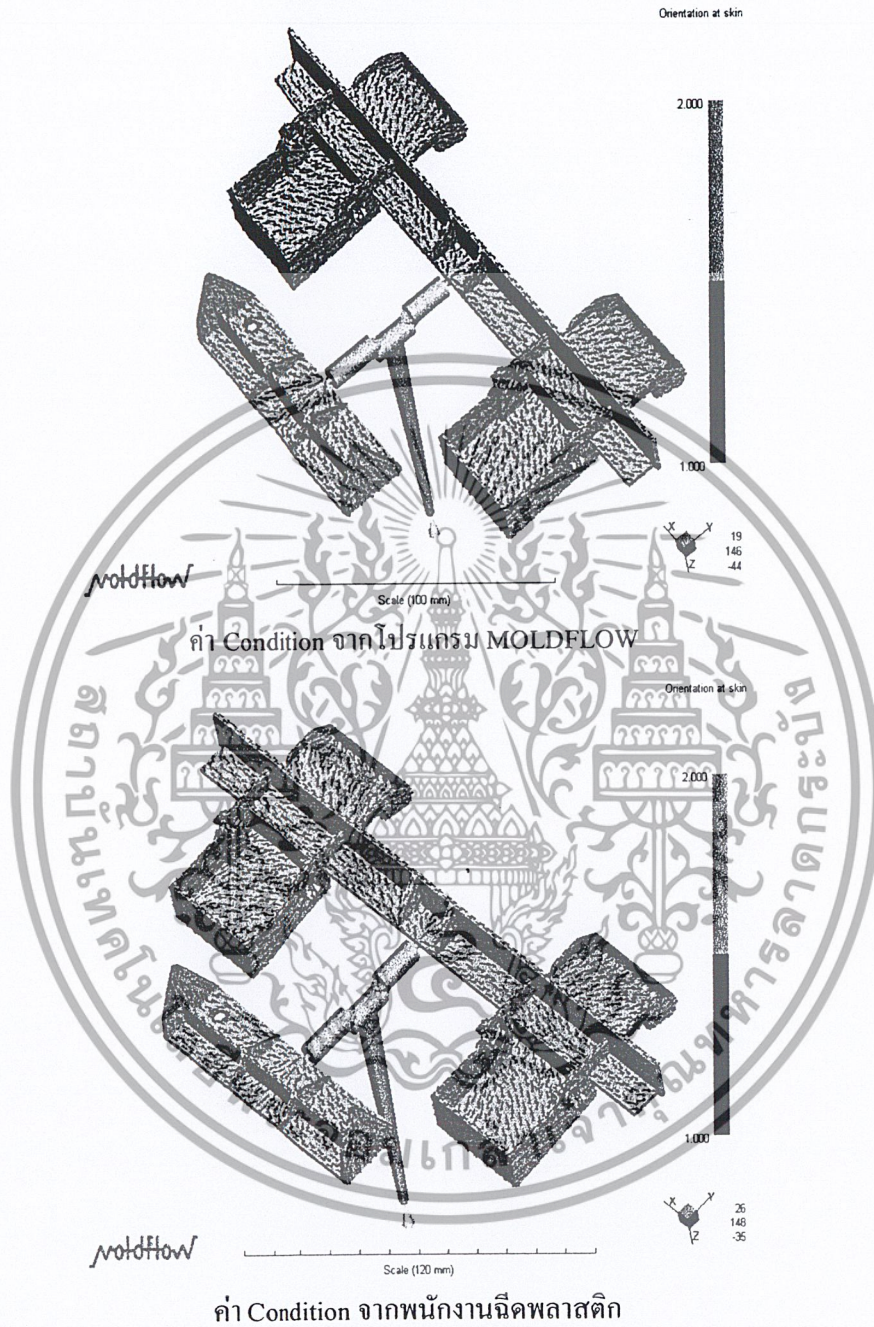
รูปที่ 5.16 แสดงผลการวิเคราะห์ Pressure End of Filling

ความดัน (Pressure)

การแสดงผลของความดันจะแสดงเป็นแบบการกระจายตัวของความดัน (Pressure distribution) ค่าที่ได้จะบอกถึงบริเวณที่มีการฉีดอัดมากเกินไป (Overpacking) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการหดตัวและการบิดงอที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของพลาสติก



รูปที่ 5.17 แสดงทิศทางการไหลของน้ำพลาสติก

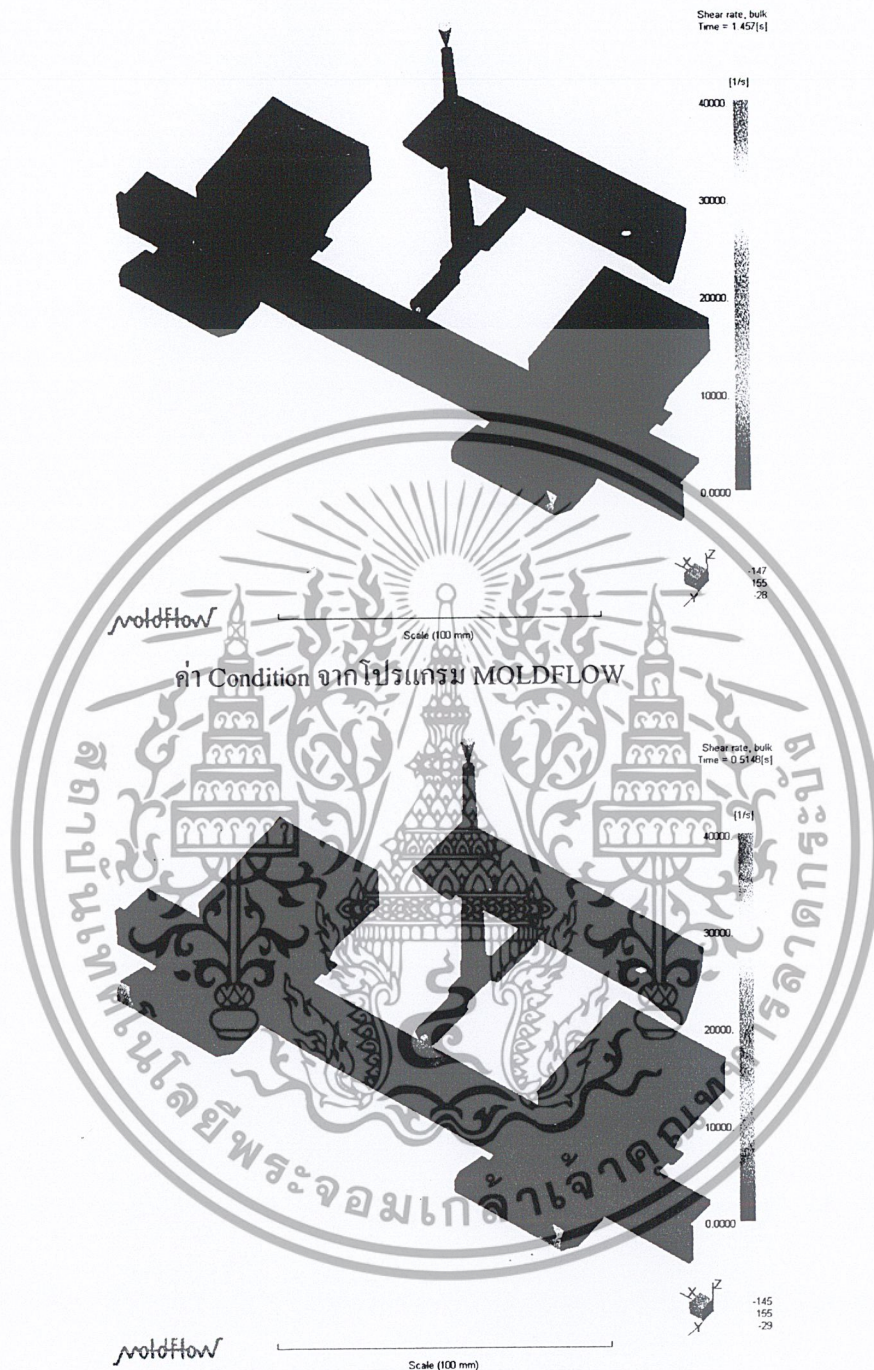
ทิศทางการไหล

การแสดงผลของทิศทางการไหล จะแสดงเป็นทิศทางการไหลในแต่ละเอลิเมนต์ ทำให้เกิดความเข้าใจในรูปแบบของการฉีดเติมเต็มมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ทำนายการเกิดรอยประสาน (Weld line) และเพื่อ

ช่วยในการพิจารณาสาเหตุของการบิดงอ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Bulk Shear rate



ค่า Condition จากพนักงานฉีดพลาสติก

รูปที่ 5.18 แสดงผลการวิเคราะห์ Bulk Shear Rate

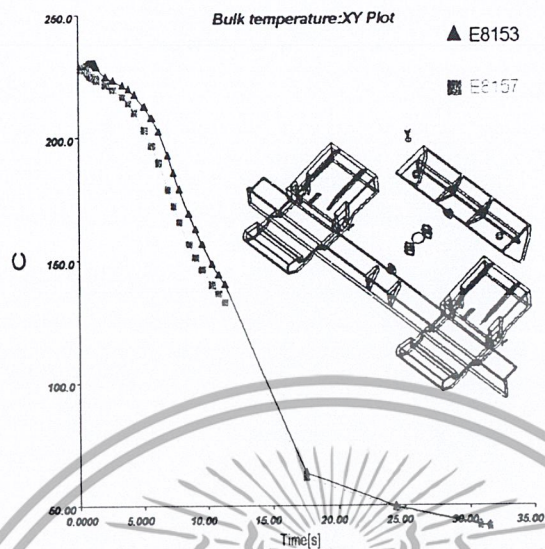
อัตราเฉือนขณะไหล (Shear Rate)

อัตราเฉือนขณะไหลคือความแตกต่างระหว่างความเร็วในการไหลของชั้นของไหล (Laminar layers) ที่อยู่ติดกันหารด้วยความหนาของชั้นของไหล (หาได้จากโปรไฟล์ของความเร็ว (Velocity profile)) ค่าที่แสดงเป็นค่าสูงสุดของอัตราเฉือนที่เกิดขึ้น โดยคิดตัดผ่านความหนาของผนังชิ้นงาน

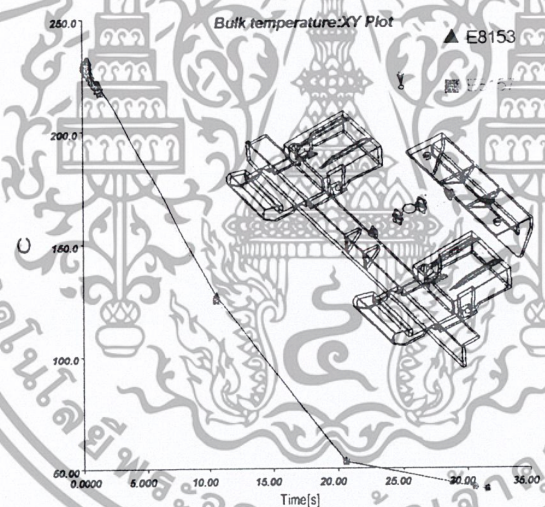
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Bulk Temperature



ค่า Condition จากโปรแกรม MOLDFLOW



ค่า Condition จากพนักงานฉีดพลาสติก

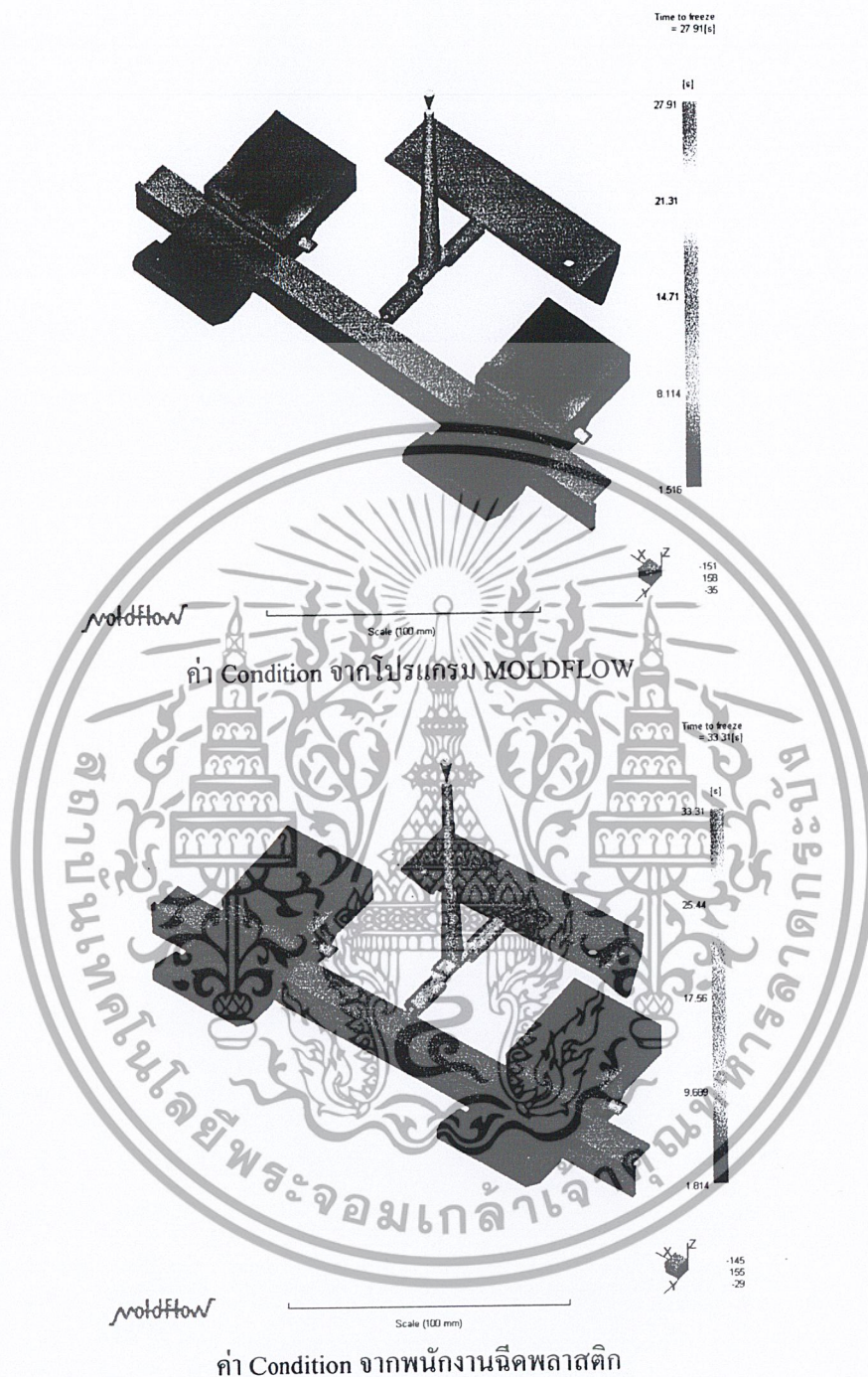
รูปที่ 5.19 แสดงผลการวิเคราะห์ Bulk Temperature

อุณหภูมิ (Temperature)

การแสดงผลของอุณหภูมิจะแสดงเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) โดยจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของวัสดุที่กีดตัดผ่านความหนาของชิ้นงานของแต่ละเอลิเมนต์ ค่าอุณหภูมินี้สามารถคำนวณที่ละขั้นเวลา (Time step หรือ short shot) หรือเมื่อสิ้นสุดการฉีดเต็มเต็มก็ได้ การที่จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ อุณหภูมิในทุกบริเวณของชิ้นงานควรมีค่าแตกต่างกันไปไม่มากนัก (โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 15-20 องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Time to Freeze



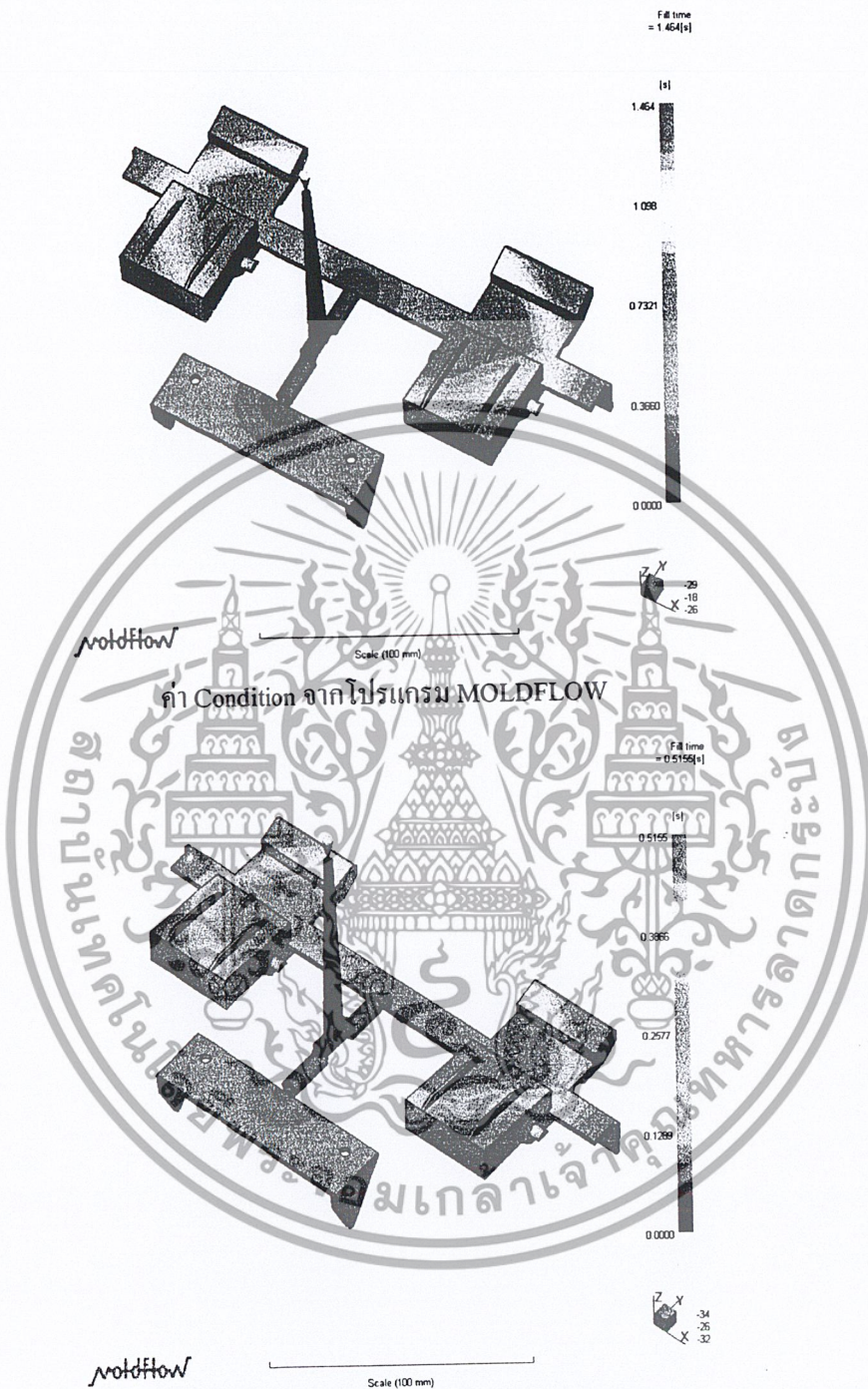
รูปที่ 5. 20 แสดงผลการวิเคราะห์ Time to Freeze

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น(Cooling time)

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นคือ เวลาที่ใช้สำหรับทำให้จุดกึ่งกลางของแต่ละเอลิเมนต์มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแข็งตัว (Freezing temperature) ของพลาสติก โดยทั่วไปจะเป็นเวลามากที่สุดที่ใช้ในการหล่อเย็นจนสามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์เวลาในการเติมเต็ม



รูปที่ 5.21 แสดงผลการวิเคราะห์เวลาเติมเต็ม

เวลาในการฉีดเติมเต็ม (Fill Time)

การแสดงผลของเวลาที่ใช้ในการฉีดเติมเต็มจะแสดงเป็นสี ซึ่งจะแสดงเป็นสีต่าง ๆ กันสำหรับหน้าคลื่น การไหลที่เคลื่อนไป โดยแต่ละสีจะสัมพันธ์กับระยะฉีดที่เวลาต่าง ๆ กัน ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.4 การเปรียบเทียบทิศทางการไหลระหว่างการฉีดจริงกับการ SIMULATION ด้วยโปรแกรม MOLDFLOW ค่าจากการ Simulation



รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



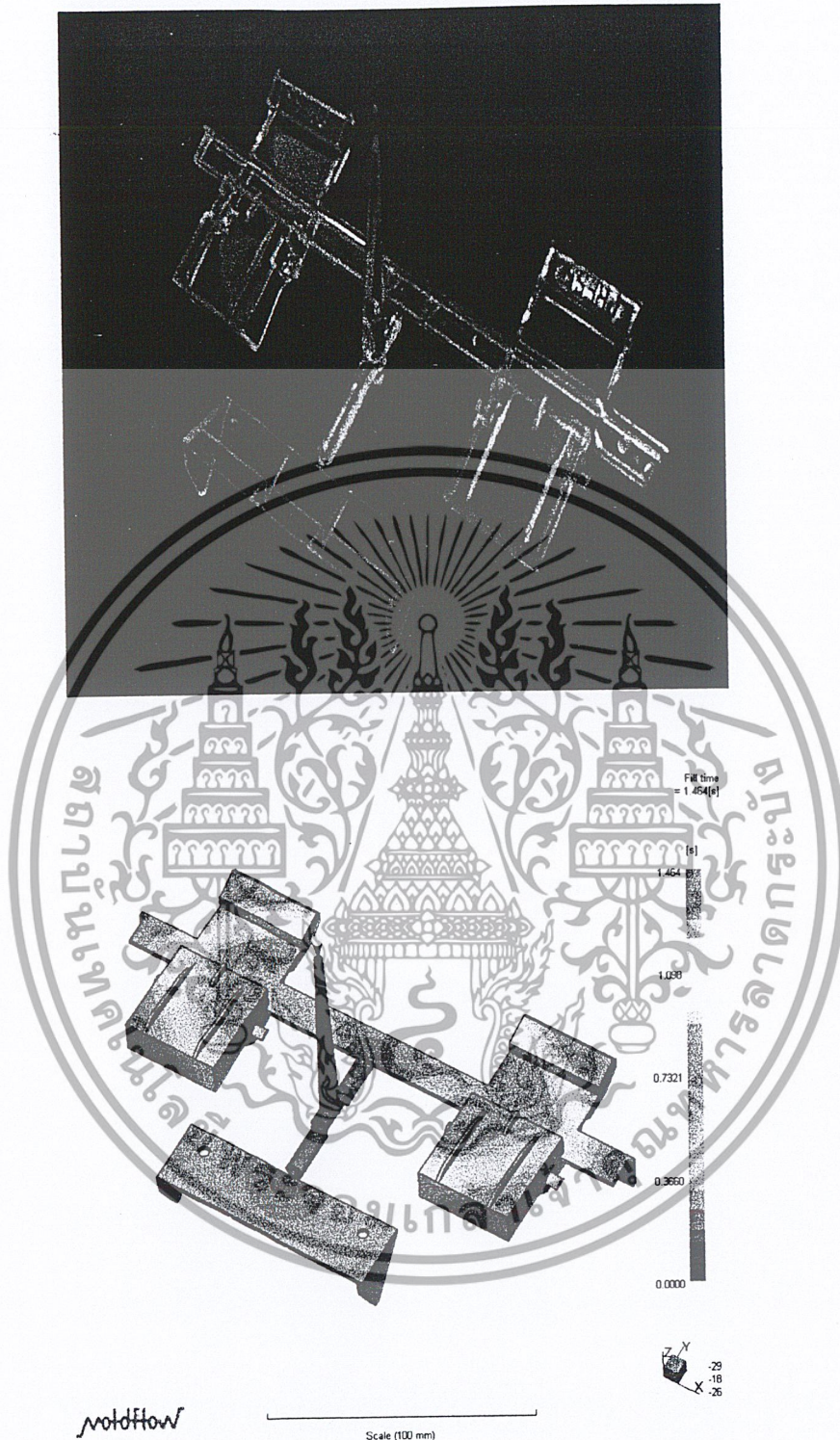
moldflow

Scale (100 mm)



รูปที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน

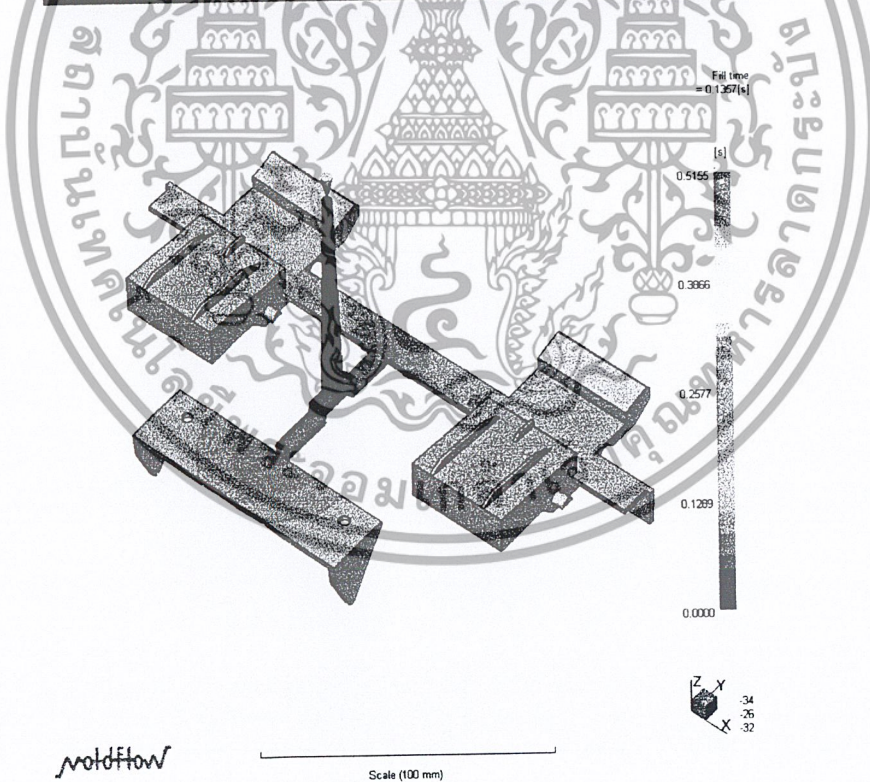
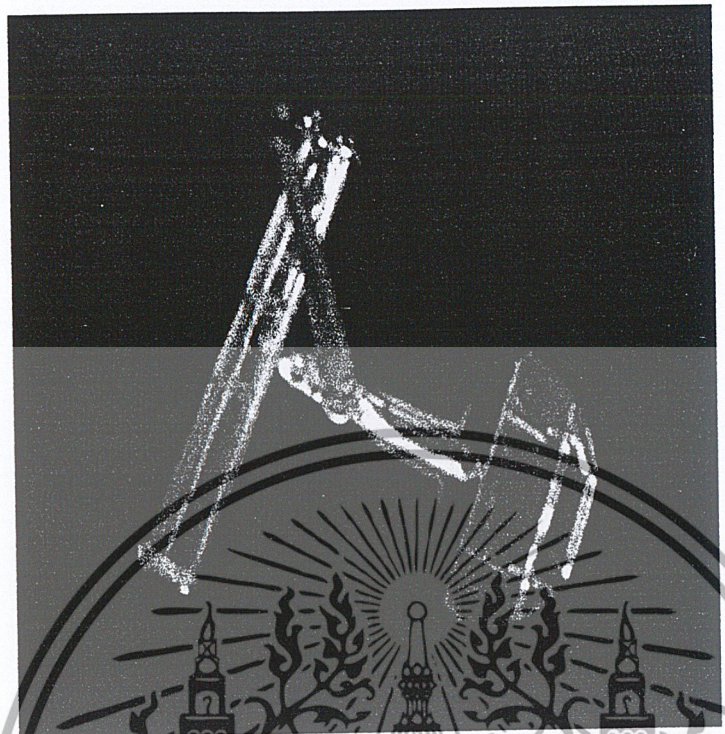
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.5 การเปรียบเทียบทิศทางการไหลระหว่างการฉีดจริงกับการ SIMULATION ด้วยโปรแกรม MOLDFLOW ค่าจากพนักงานฉีดพลาสติก



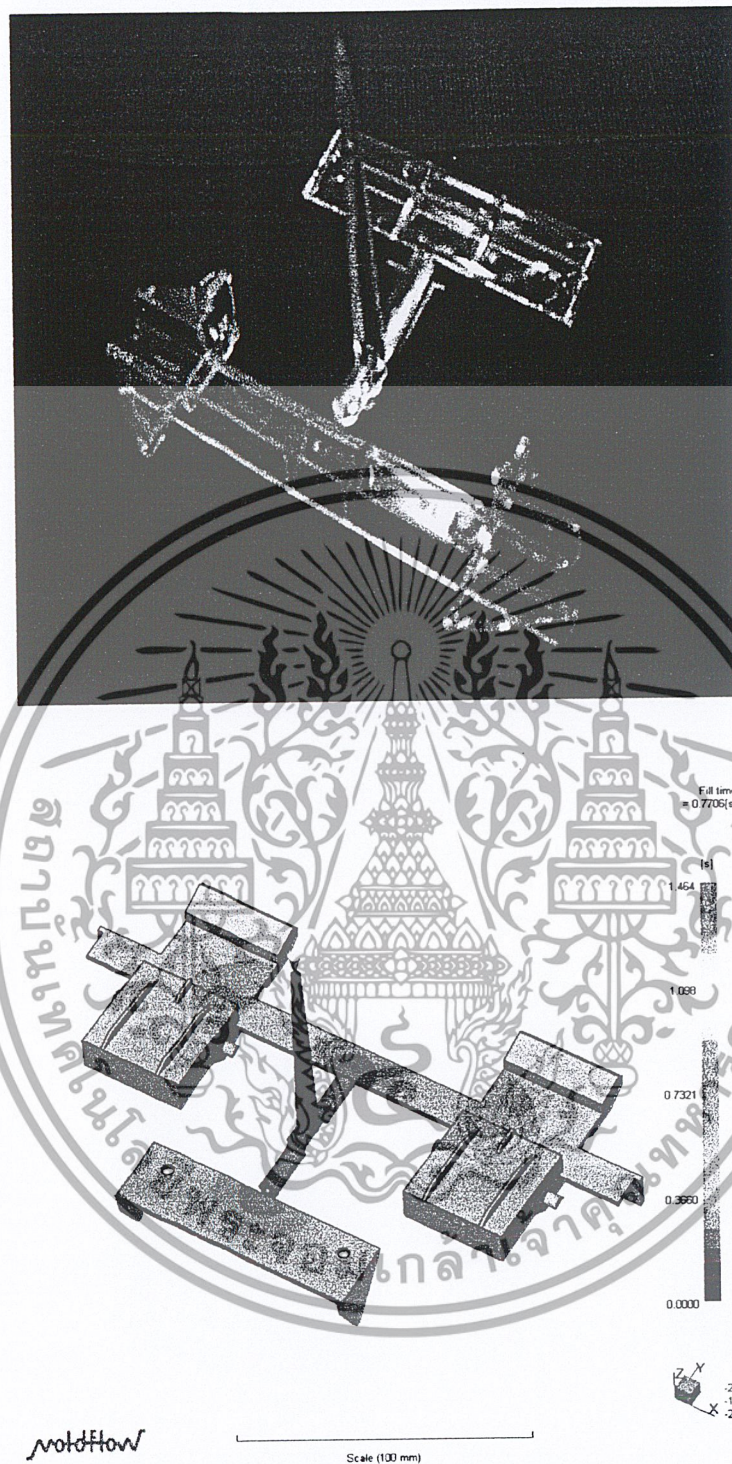
รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



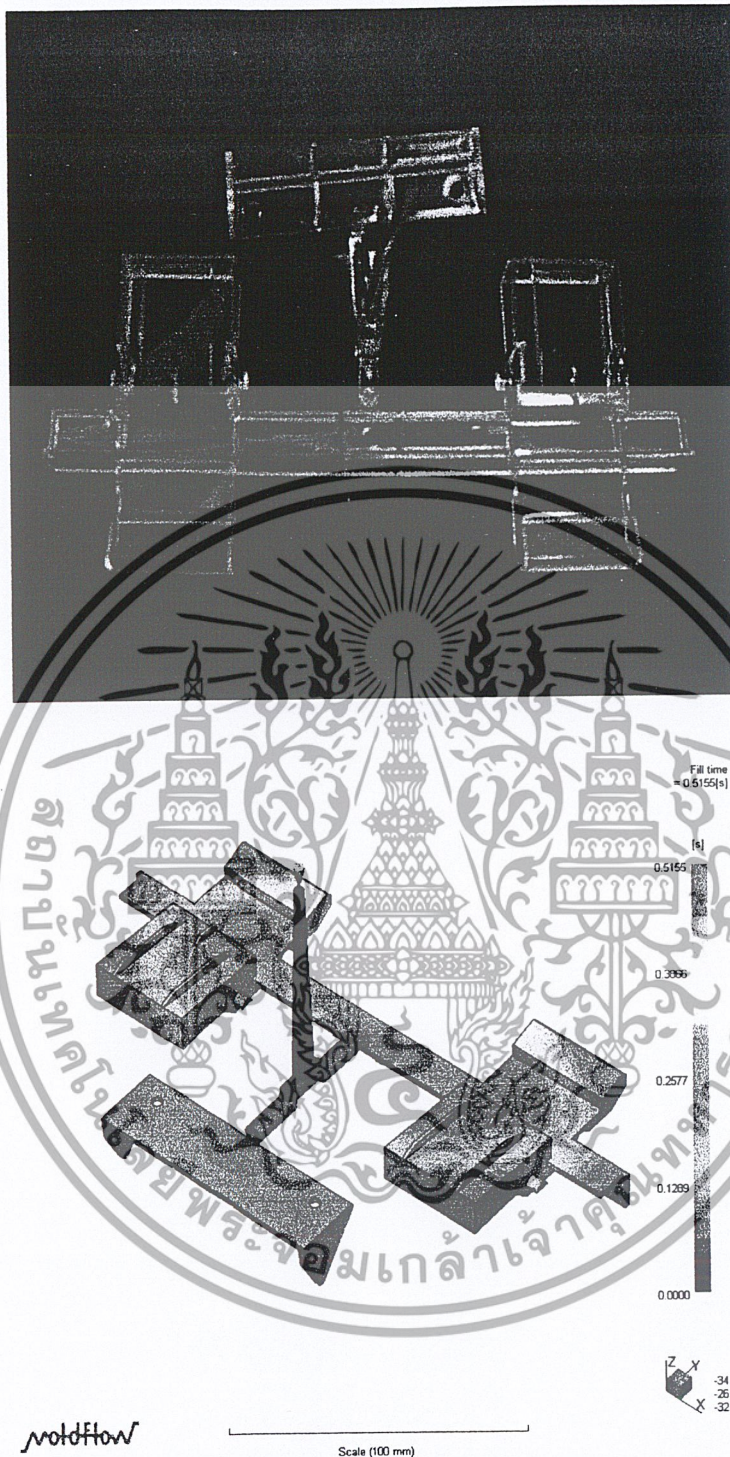
รูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาณชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

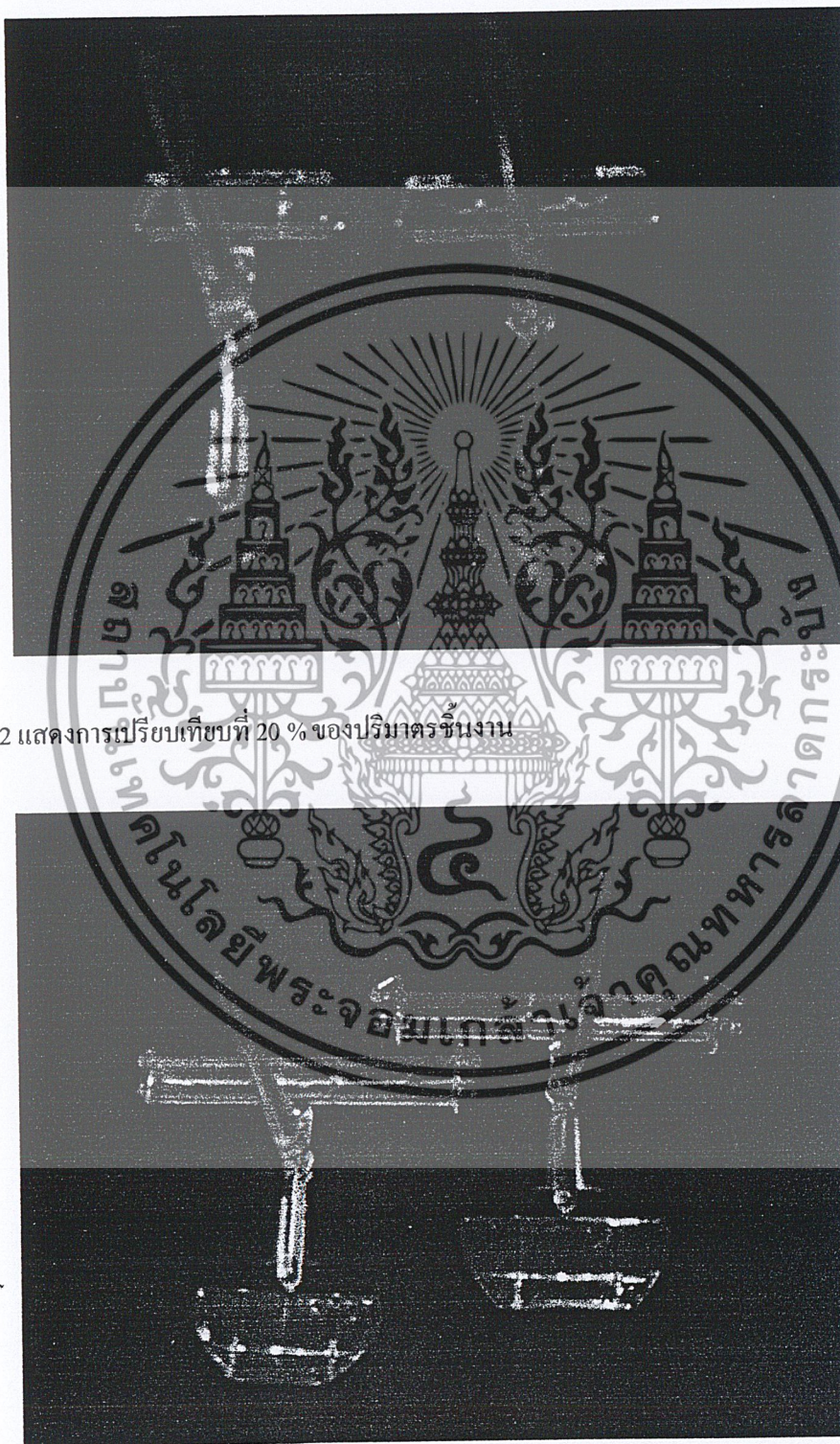


รูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.6 เปรียบเทียบลักษณะการไหลของพลาสติกระหว่างค่า Condition จากการ Simulation และ พนักงานฉีด

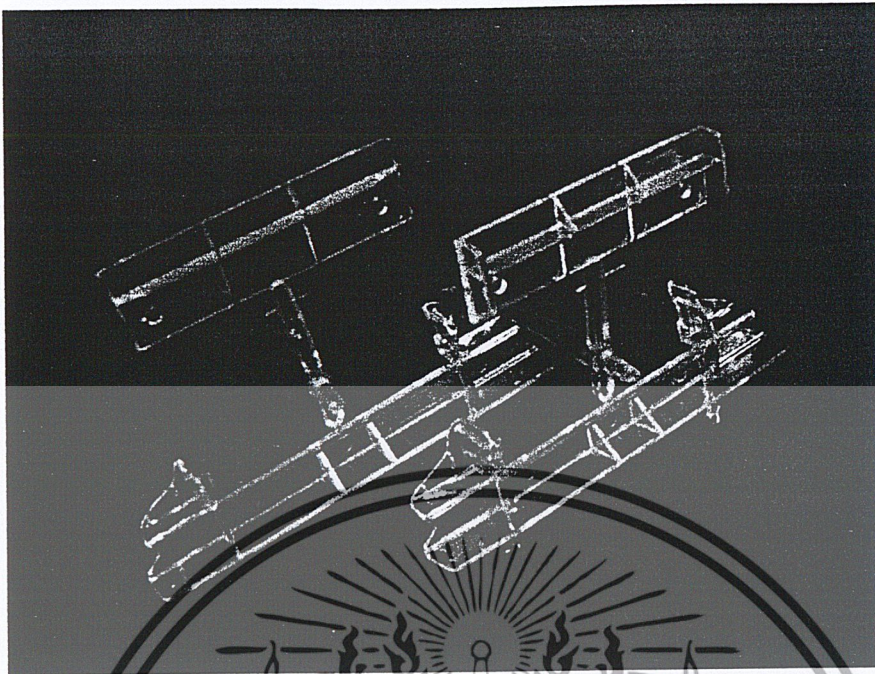
ค่าCondition วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MOLDFLOW ค่า Condition ปรับตั้งด้วยพนักงานฉีดพลาสติก



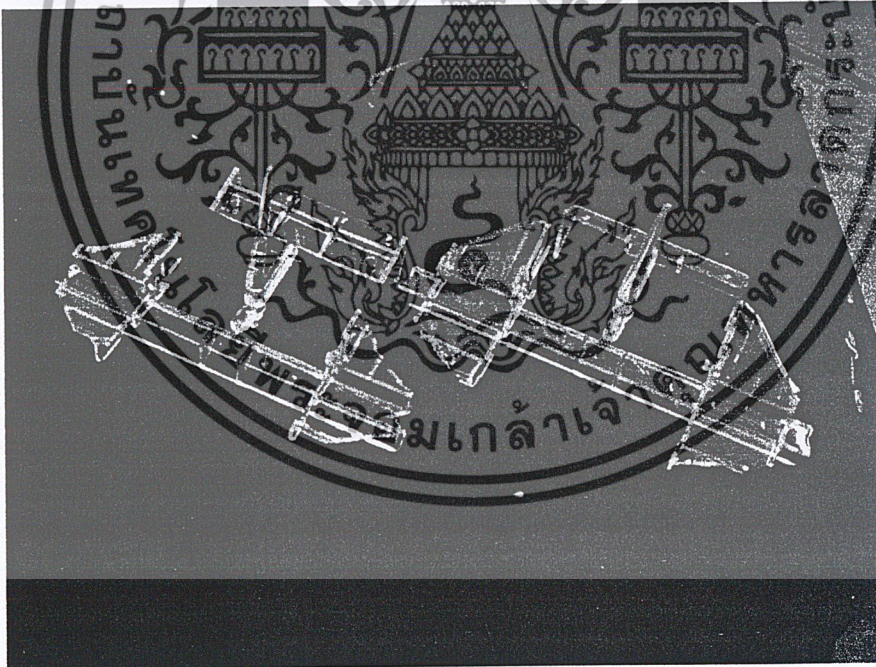
รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบที่ 20 % ของปริมาตรชิ้นงาน

รูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบที่ 40 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

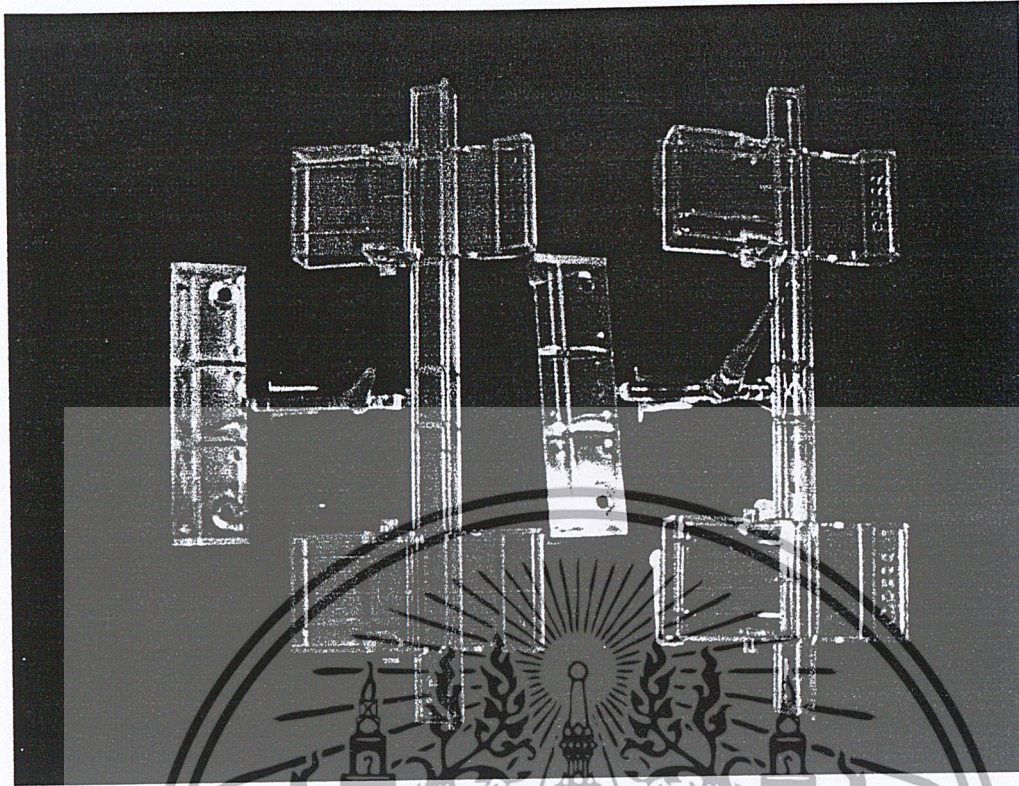


รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบที่ 60 % ของปริมาตรชิ้นงาน



รูปที่ 5.35 แสดงการเปรียบเทียบที่ 80 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบที่ 100 % ของปริมาตรชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการปฏิบัติงาน

6.1 บทสรุป

จากการทดลองพบว่า การแก้ไขปัญหาคาการเกิดรอยไหม้ที่แม่พิมพ์ เมื่อใช้โปรแกรม MOLDFLOW วิเคราะห์จะให้ผลในทางปฏิบัติจริงคือสามารถนำผลการวิเคราะห์มาใช้แก้ไขปัญหาคาขึ้นงานที่มีปัญหารอยไหม้ได้และจากผลของการเปรียบเทียบทิศทางการไหลก็ยังแสดงให้เห็นว่ามีทิศทางการไหลเหมือนกับผลที่โปรแกรม MOLDFLOW วิเคราะห์ซึ่งเป็นการสนับสนุนความน่าเชื่อถือของโปรแกรม MOLDFLOW ดังนั้นในการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกผู้ออกแบบควรใช้โปรแกรม CAE มาช่วยในการวิเคราะห์แบบแม่พิมพ์ก่อนทำการผลิตแม่พิมพ์เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในภายหลังซึ่งเป็นการช่วยผู้ออกแบบประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์ ลดเวลาในการผลิตแม่พิมพ์และสามารถหาสถานะเงื่อนไขในการฉีดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ

ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีทาง CAD/CAM/CAE ได้เข้ามามีบทบาทต่อกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งเห็นได้จากการทดลองดังกล่าว จะช่วยในการออกแบบ และการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนที่จะผลิตจริง โดยในอดีตจะอาศัยความชำนาญของช่างทำแม่พิมพ์ และออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ในการทำแม่พิมพ์

PRO-ENGINEER2000i2 เป็นซอฟต์แวร์ทางด้าน CAD/CAM ตัวหนึ่ง ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ จะสามารถแก้ไขได้ทันทีทางคอมพิวเตอร์ และทำการจำลองการกัด (Milling) โดยสามารถที่จะทราบถึงวิธีการกัดที่ดีที่สุด ประหยัดเวลาในการกัดน้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการผลิตและลดต้นทุนได้

Moldflow ก็เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ทางด้าน CAE โดย Moldflow จะใช้วิธี Finite Element ในการคำนวณเพื่อจำลองภาพการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โปรแกรมนี้จะช่วยให้ออกแบบได้รวดเร็ว สามารถวิเคราะห์แก้ไขแบบได้ก่อนที่จะนำแบบที่ออกแบบไว้ไปทำการผลิตแม่พิมพ์จริง

ผลจากการออกแบบโดย PRO-ENGINEER และการวิเคราะห์โดย Moldflow จะสามารถเป็นแนวทางในการตัดสินใจที่จะเลือกการออกแบบแม่พิมพ์และเครื่องจักรต่างๆ ในการผลิตชิ้นงานได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามในการใช้ซอฟต์แวร์ทาง CAD/CAM/CAE นั้นจะต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญสูง จึงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกชิ้นงานเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา ควรเลือกชิ้นงานที่เกิดปัญหาจริงในอุตสาหกรรมหรือสร้างแม่พิมพ์เพื่อกำหนดลักษณะของปัญหาและวิธีการแก้ไขให้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำการ Meshing หรือการแบ่งกริดเพื่อกำหนด Node และ Element บน Model ชิ้นงานควรใช้ค่า อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวหรือเรียกว่า (Aspect Ratio) ของ Element ชนิด 2 มิติ รูปร่างสามเหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 6 เนื่องจากต้องกำหนดขนาดของ Element ไม่ให้มีความแตกต่างกันมากนักทั้งชิ้นงานเพื่อผลการทำนายที่แม่นยำเพราะเราจะใช้ Node ตรงกลาง Element ในการทำไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาการกระจายตัวของความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น

3. เนื่องจากชิ้นงานมีความซับซ้อนจึงไม่สามารถสร้าง Model ในโปรแกรม MoldFlow ได้ฉะนั้นการใช้โปรแกรมเพื่อสร้าง Model ควรใช้โปรแกรมที่สามารถทำ Finite Element Meshing ได้และเนื่องจากการวิเคราะห์จะใช้ Mesh แบบผิว (Shell หรือ Surface) จึงจำเป็นต้องคัดเลือกผิวจากด้านบนหรือ (Cavity) มาทำ Meshing และกำหนดความหนาของชิ้นงาน เพื่อผลการทำนายที่แม่นยำ (ข้อแนะนำจากโปรแกรม)

4. การเลือกวัสดุที่จะใช้ในการทำนายผลจากโปรแกรม ในฐานข้อมูลควรเลือกให้ตรงกับที่ใช้ในการทดลองจริงหรือให้มีคุณสมบัติของวัสดุที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะคุณสมบัติบางตัวมีผลกับการวิเคราะห์ห้มาก เช่น ค่าความหนืด ค่าความจุความร้อน ค่าการขยายตัวของวัสดุ เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ ชัยรัตน์ แก้วค้ำวง, "แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก", กรุงเทพฯ ; สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- [2] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. "พลาสติก" กรุงเทพฯ : ห.จ.ก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์
- [3] Mold Flow, "Manual Release 7"
- [4] Hans Gastrow, "Injection Molds", Second Edition, New York ; Hanser Publisher , 1993
- [5] สถาบัน RDIPT มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ "คู่มือการใช้ PRO-ENGINEER "
- [6] อภินิชฐ์ สอนตระกูล , " การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายการหดตัวและบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด", กรุงเทพฯ ; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรม RDIPT มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ " การฉีดพลาสติก "
- [8] Peter Kennedy , "Flow Analysis of Injection Molds " , Hanser Publishers , New York , 1995
- [9] Prof. Dr-Ing , Harald Kaiser " Simulation Programs for The Injection Moulding Process " , ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) , 2541



ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัย การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ Troubleshooting for Air Trap in Plastic Injection Moulding by using Computer Aided Engineering (CAE)

วิศิษฐ์ ชัยเทอดเกียรติ, อธิรพล หัตถพร, อุทัย รื่นญาติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. พงษ์เจต

พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

กรณีศึกษาเป็นการแก้ปัญหาแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยใช้โปรแกรม Computer Aided Engineering (CAE) วิเคราะห์การเกิด Air Trap เนื่องจากแม่พิมพ์ที่นำมาวิเคราะห์มีปัญหาการเกิดรอยไหม้ที่ปลายชิ้นงานซึ่งเกิดจากอากาศร้อนที่อยู่ใน CAVITY ของแม่พิมพ์ซึ่งถูกไล่น้ำพลาสติกแล้วไหลออกจากแม่พิมพ์ไม่ได้ ดังนั้นจึงนำแบบของแม่พิมพ์มาทำการ Simulation ในโปรแกรมทางด้าน CAE เพื่อหาจุดที่เกิด Air Trap และเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำพลาสติกในแม่พิมพ์ แล้วนำความรู้ที่ได้แก้ไขแบบของแม่พิมพ์และตัวแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการฉีดจริงเปรียบเทียบกับโปรแกรมทางด้าน CAE เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกต่อไป

Abstract

This case study aims to find a technique to improve plastic – injection mould by applying CAE program for analyzing Air Trap initiation, As simulated the mould , burnmark locations were shown at the tip caused by hot air which generated by packing , holding pressure , causing by unflown plastic melt , the mould is simulated in CAE program to find Air Trap initiator and analyze flow direction of plastic melt . The analyzing results were used to configure . The experiments were also studied by injection moulding technique. Experimental and simulation results were compared . Final summary will be applied in designing and producing plastic mould in the future.

บทนำ

ในปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันมาก

ซึ่งก่อนขบวนการแปรรูปพลาสติกจะมาถึงนั้น จะมีปัจจัยสำคัญคือการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์นั้นมีหลายชนิดมีทั้งแม่พิมพ์ฉีด แม่พิมพ์เป่า และอื่นๆ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ผลิตกันอยู่ทั่วไปจะใช้ประสบการณ์ในการออกแบบแม่พิมพ์และผลิตแม่พิมพ์เป็นหลัก ต่อจากนั้นก็ทำการลองผิดลองถูกในการฉีดและปรับค่าสภาวะเงื่อนไขไปเรื่อยๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาตามมาในขั้นตอนฉีดชิ้นงานทำให้เกิดรอยเชื่อม การบิดตัว เกิดรอยไหม้และอื่นๆ ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางการออกแบบแม่พิมพ์ได้มีการพัฒนาไปมาก จนได้มีบริษัทผลิตโปรแกรมทางด้าน CAE ขึ้นมาใช้เพื่อเข้ามาช่วยวิเคราะห์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) และการประมาณค่า (Approximation Method) ที่เรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตแม่พิมพ์มาก โดยเฉพาะสามารถลดค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นหัวใจหลักในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก โดยก่อนที่ผู้ผลิตจะทำการผลิตแม่พิมพ์สามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบแม่พิมพ์ว่าจะเกิดปัญหาต่างๆ ที่บริเวณใด เพื่อนำผลที่ได้ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพ ปัญหาทางด้านความร้อนก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่โรงงานนี้จะนำมาเป็นกรณีศึกษา รอยไหม้เกิดจากอากาศไม่สามารถระบายออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระ จึงเกิดการอัดตัวของน้ำพลาสติกอุณหภูมิสูงกับอากาศทำให้พลาสติกบริเวณนั้นไหม้ ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดีจะต้องจัดหาตำแหน่งช่องอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้อากาศระบายออกได้ โดยโปรแกรมจะสามารถวิเคราะห์หาตำแหน่งนี้ได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถลดเวลาการสุ่ม โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ผลิตแม่พิมพ์ลงได้ ซึ่งบางครั้งชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของช่องอากาศที่เหมาะสมได้ครบทุกจุดและจะส่งผลต่อชิ้นงานในภายหลัง

จากที่กล่าวมานี้โปรแกรมทางด้าน CAE ทำให้ผู้ผลิตแม่พิมพ์สามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำลดการแก้ไขแม่พิมพ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลัง ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ อีกทั้งยังสามารถหาสภาวะเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมให้ด้วย รวมทั้งยังวิเคราะห์ Air Trap, Stress, Weld Line, การบิดตัว, ทิศทางการไหล, และอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและสร้างผลิตภัณฑ์

2. ทฤษฎีการไหล

สมการที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหล จะมีสมการที่เกี่ยวข้อง 3 สมการ คือ

1. สมการ Continuity

$$(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

2. สมการ Momentum

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{g} + \nabla p - [\nabla \cdot \eta \gamma] = \rho [\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}] \quad (2)$$

3. สมการพลังงาน

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + \eta \gamma^2 + \kappa \nabla^2 T \quad (3)$$

โดยมีรูปแบบความหนืดของพลาสติกแต่ละชนิดแตกต่างกันไป โดยการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับรูปแบบความหนืดของชนิดพลาสติก ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดจะมีรูปแบบความหนืดที่แตกต่างกันออกไป โดยแบบความหนืดแต่ละชนิดเป็นผลมาจากการทดลองสามารถจำแนกเป็นแบบจำลองต่างๆที่ใช้กันคือ Moldflow Second Order Model

$$\ln \eta = 4 \ln \gamma + A_2 T + A_3 (\ln \gamma)^2 + A_4 T \ln \gamma + A_5 T^2 \quad (4)$$

3. รอยไหม้

รอยไหม้ที่ผิวชิ้นงานจะเกิดขึ้นเนื่องจากอากาศร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์จากการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์จนระบายออกไม่ได้ (Air Trap) อากาศร้อนจึงเกิดการอัดตัวกันขึ้นจนทำให้อากาศร้อนมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นเกินอุณหภูมิหลอมเหลวสูงสุดของพลาสติก ทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้นที่ผิวชิ้นงานพลาสติกได้ ซึ่งส่วนมากจะเกิดรอยไหม้ตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ซึ่งศึกษาได้จากทิศทางการไหลของน้ำพลาสติก การที่อากาศร้อนจะเกิดขึ้นมากก็เนื่องจากอุณหภูมิหน้าพลาสติกสูงมาก และใช้ความเร็วในการฉีดสูงเกินไปจะทำให้อากาศร้อนระบายออกไม่ทัน หรืออาจทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างพลาสติกเหลวกับผิวของแม่พิมพ์จนทำให้มีอุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิหลอมเหลวสูงสุดของพลาสติกจนเกิดรอยไหม้ได้

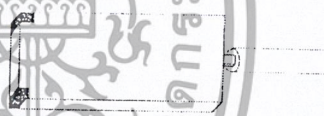
สาเหตุหลักของการเกิดปัญหาคือ อากาศร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์หนีออกไม่ทันกับการไหลของพลาสติกเหลวที่เข้าไปในแม่พิมพ์

วิธีการแก้ปัญหาของการเกิดรอยไหม้คือ

1. ปรับปรุงแม่พิมพ์โดยการทำ Air Vent (ระบายอากาศในแม่พิมพ์) ขึ้นในจุดที่มี Air Trap เป็นจุดที่อากาศไหลมาสะสมและถูกอัดตัวกัน เกิดจากการระบายอากาศออกไม่ทันกับการไหลของพลาสติกเข้ามาใน CAVITY จึงสะสมและอัดตัวกัน จนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องทำการเจาะ Air Vent ให้อากาศจำนวนนี้ระบายออกได้ทัน

2. ลดปริมาณและอุณหภูมิของอากาศร้อนโดยการลดอุณหภูมิของพลาสติกเหลว เมื่ออากาศที่อยู่ใน CAVITY ได้รับความร้อนจากน้ำพลาสติกจะขยายตัวและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ต่อมาน้ำพลาสติกถูกฉีดไหลเข้าเกือบเต็มแม่พิมพ์ อากาศจะถูกแทนที่และถูกดันให้ออกจากแม่พิมพ์ตามทางระบายอากาศ แต่หากมีอากาศร้อนที่ขยายตัวมากเกินไปจะทำให้อากาศระบายออกไม่ทัน จนเกิดปัญหา Air Trap นำไปสู่การเกิดรอยไหม้ได้ ถ้าเราสามารถลดอุณหภูมิของน้ำพลาสติกลงได้จะทำให้อากาศใน CAVITY ไม่ขยายตัวมากเกินไป และสามารถระบายอากาศร้อนที่ขยายตัวออกได้ทัน

3. ลดความเร็วในการฉีดลงเพื่อให้อากาศหนีออกได้ทัน เมื่อทำการฉีดน้ำพลาสติกจะไหลเข้าสู่ CAVITY และเข้าแทนที่อากาศใน CAVITY อากาศจะถูกดันให้ระบายออกจากแม่พิมพ์โดยทางรูระบายอากาศที่ทำขึ้น ถ้าตั้งค่าความเร็วฉีดพลาสติกในระดับที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากคุณสมบัติของพลาสติกที่ทำการฉีดและจากการทดลอง แล้วการระบายอากาศออกจะทำได้อย่างสมบูรณ์ไม่เกิดปัญหาใดๆ แต่กำหนดค่าความเร็วฉีดในระดับที่สูงเกินไปจะทำให้อากาศระบายออกไม่ทัน จนเกิดการอัดตัวเป็นปัญหา Air Trap ขึ้น



รูปที่ 1. แสดงลักษณะการเกิด Air trap

4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้โปรแกรมทางด้าน CAD และ CAE กับการออกแบบแม่พิมพ์
2. สามารถวิเคราะห์ปัญหา Air Trap โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CAE และทำการแก้ไขแม่พิมพ์ในจุดที่เกิด Air Trap
3. ศึกษาทิศทางการไหลและเปรียบเทียบการไหลที่เกิดขึ้นจริงกับที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CAE
4. สามารถหาสภาวะเงื่อนไขงานฉีดที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้องส่งผลให้งานฉีดพลาสติกมีประสิทธิภาพ

5. วิธีการทดลอง

1. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานพลาสติกนี้
2. วาดแบบชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CAD
3. นำชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม CAD แล้วส่งต่อมา meshing ในโปรแกรม CAE
4. ทำการ Simulation ในโปรแกรม CAE เพื่อวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำปัญหา Air Trap ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAE มาทำการแก้ไขแม่พิมพ์โดยการทำ Air Vent
6. ทดลองฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่แก้ไขแล้วและทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์
7. เปรียบเทียบทิศทางการไหลระหว่างการโนโปรแกรมและการทดลองฉีดพลาสติกจริง
8. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อมูลของวัสดุ

วัสดุที่เลือกใช้ในการทดลองคือ โพลีสไตรีน Polystyrene (PS)

คุณสมบัติ	แข็งแรง ตกแตกได้ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดี เป็นฉนวนไฟฟ้า ดูดซึ่มซึบน้ำน้อย ให้ความเที่ยงตรงทางขนาดสูง,ใสเหมือนแก้ว, ย้อมให้เป็นสีต่างๆได้ง่าย
แรงฉีด	ไม่ต้องการแรงฉีดสูง(เพราะมีการไหลตัวที่ดี)
Holdng Pressure	30-60% ของแรงฉีด
Back Pressure	10-20 bar
ความเร็วฉีด	ชิ้นงานรูปกล่อง ผันบาง ใช้ความเร็วสูง
อุณหภูมิโมลต์	5-60 องศาเซลเซียส
การอบแห้ง	ไม่จำเป็น
ค่าหดตัว	0.5 % - 0.6 %
ปริมาณการฉีด	5 - 95 % ของปริมาตรกระบอกลัด
อุณหภูมิหลอมละลาย	200 - 250 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.05
ความจุความร้อน	1300 J/kg.K

5.2 ลักษณะของเครื่องฉีดพลาสติก และ แม่พิมพ์

การทดลองใช้เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 2000 / 630 CDC เป็นเครื่องฉีดพลาสติกของบริษัท Battenfeld Austria ใช้ระบบ Hydraulic ควบคุมการปิด - เปิดของแม่พิมพ์ และควบคุมการทำงานด้วย control unit รุ่น UNILOG 4000 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

1. แรงมากสุดในการจับยึด 200 ตัน
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูฉีด 45 mm.
3. ปริมาตรการฉีดสูงสุด 286 cm³
4. ความดันสูงสุดในการฉีด 2138 bar
5. แรงดันในหัวฉีด 99 กิโลนิวตัน

ชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนพลาสติกของที่กดหลอดน้ำ และลักษณะของแม่พิมพ์คือ

1. 2 Cavity (ที่ไม่สมมาตรกัน)
2. Gate ทางเข้าด้านข้าง
3. Sprue bush ยาว 80 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เรียว 2 องศา

สภาวะเงื่อนไขในการฉีด (Mold Condition)

ในการทดลองการฉีดพลาสติก ได้กำหนดค่าเงื่อนไขในการฉีดไว้ 2 แบบดังนี้

1. สภาวะเงื่อนไขที่ Program Moldflow วิเคราะห์ได้

1. ความเร็วในการฉีดเติมเต็ม	31	ลบ.ซม. / วินาที
2. Follow-up press stroke	5	มิลลิเมตร
3. Max. Injection Pressure	100	bar
4. อุณหภูมิการหลอมเหลว	225	องศาเซลเซียส
5. อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น	22	องศาเซลเซียส
6. เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น	15	วินาที
7. ระยะ Screw ถอยหลัง	33.5	มิลลิเมตร
8. ระยะแรงฉีดย้า (Cushion)	5	มิลลิเมตร

2. สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการฉีดของโรงงานก่อนการวิเคราะห์

1. ความเร็วในการฉีดเติมเต็มขั้นที่ 1	25	ลบ.ซม. / วินาที
2. ความเร็วในการฉีดเติมเต็มขั้นที่ 2	35	ลบ.ซม. / วินาที
3. ความเร็วในการฉีดเติมเต็มขั้นที่ 3	20	ลบ.ซม. / วินาที
4. Follow-up press stroke	11.2	มิลลิเมตร
5. Max. Injection Pressure	100	bar
6. อุณหภูมิการหลอมเหลว	225	องศาเซลเซียส
7. อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น	22	องศาเซลเซียส
8. เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น	15	วินาที
9. ระยะ Screw ถอยหลัง	41	มิลลิเมตร

5.3 กรรมวิธีการฉีดพลาสติก

พลาสติกซึ่งอาจเป็นเม็ดหรือเป็นผงในกรวยเติมจะถูก Screw หมุนส่งไปยังด้านหน้าของกระบอกลัดซึ่งมีแผ่นความร้อนหรือน้ำมันร้อนหุ้มอยู่จะทำให้พลาสติกหลอมเหลวหลังจากนั้น Screw จะเคลื่อนที่ดันหน้าพลาสติกผ่านหัวฉีดไปเข้าแม่แบบซึ่งปิดอยู่ หลังจากนั้นแม่แบบซึ่งหล่อเย็นอยู่จะทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัวสามารถถอดออกจากแบบได้ในระยะเวลาอันสั้น ในการผลิตชิ้นงานจะต้องพิจารณาตัวประกอบที่สำคัญ 3 อย่าง คือ อุณหภูมิ เวลาและความดัน ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับจังหวะการทำงานทั้งสามคือ หลอมพลาสติก ฉีด และหล่อเย็น

5.4 การระบายอากาศ (VENTING)

เมื่อพลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดเข้าไปใน Cavity อากาศภายใน Cavity จะถูกเนื้อพลาสติกเข้าแทนที่ โดยปกติอากาศจะหนีออกไปได้ตรงรอยต่อระหว่างแผ่นแม่พิมพ์ทั้งสอง แต่หากการปรับตั้งผิวรอยต่อมีความเรียบมากหรือของเป่าหรือคอร์มีความหนาหรือลึกลงมาก อากาศจะถูกขังอยู่ใน Cavity ซึ่งจะก่อให้เกิดรอยตำหนิหรือทำความเสียหายให้กับชิ้นงานได้ เช่น ทำให้เกิดรอยไหม้ รอยดำ เนื้อพลาสติกเปลี่ยนสี ทำให้เกิดรอยบวม การเติมเนื้อพลาสติกไม่เต็ม Cavity เป็นต้น ดังนั้นจึงจะจัดเตรียมช่องอากาศ (Vent) ไว้ในแม่พิมพ์ด้วยเพื่อให้อากาศและก๊าซอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถหนีหรือระบายออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระ

ช่องอากาศโดยปกติจะทำเป็นร่องสั้น ๆ ที่มีความลึกไม่เกิน 0.05 มิลลิเมตร และ กว้าง 3 มิลลิเมตร หากช่องอากาศมีความลึกมากเนื้อพลาสติกจะไหลผ่านเข้าไปได้ทำให้เกิดเป็นครีบบนชิ้นงาน ตำแหน่งของ Cavity ที่ควรทำช่องอากาศมีดังนี้

1. จุดที่อยู่ห่างจากรูเข้ามากที่สุด ในชิ้นงานที่สมมาตรกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่พลาสติกหลอมไหลมาบรรจบกันใน Cavity
- ตรงผิวที่ลึกที่สุดของร่องในแผ่นเป่าของแม่พิมพ์

5.5 ทฤษฎีการวิเคราะห์การไหล

หลักพื้นฐานทางMoldflowก็คือการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นกรวิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ระบบที่ความซับซ้อนหรือมีปริมาณการคำนวณมาก

การวิเคราะห์นี้จะนำเอาสมการของวิชากลศาสตร์ของแข็ง กลศาสตร์ของเหลวและการถ่ายเทความร้อนมาใช้โดยมองวัตถุทั้งชิ้น เกิดจากการรวมตัวกันของรูปทรงเล็กๆ (Finite Element) มากมาย แล้วคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อแก้ไขสมการดังกล่าว

ค่าตัวแปรที่ต้องการกำหนดลงไปในการคำนวณก็คือ

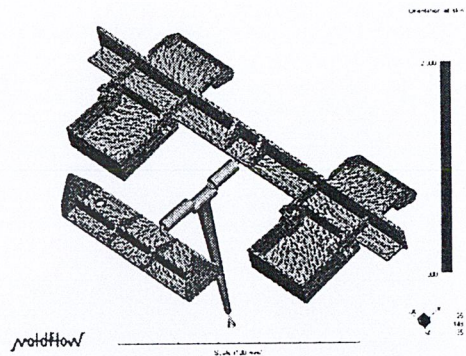
- ค่าคุณสมบัติทางวัสดุ (Material Properties)
- ตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกเหลว (gate)
- เวลาที่ใช้ในการฉีด (Injection Time)
- อุณหภูมิหลอมตัวของพลาสติก (Melt Temperature)
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature)
- ความดันฉีด (Holding Pressure)
- เวลาช่วงหล่อเย็น (Cooling Time)

โดยจะสามารถวิเคราะห์การฉีดตามหัวข้อได้ดังนี้

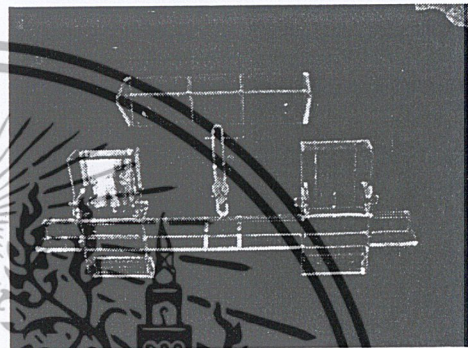
- การเติมเนื้อพลาสติกเหลวจนเต็มแม่พิมพ์ (ทิศทางการเดินของพลาสติก)
- การกระจายของความดันในการฉีด
- การกระจายอุณหภูมิในการฉีด
- แรงเฉือน (Shear)
- อัตราของแรงเฉือน (Shear Rate)

ด้วยการวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงข้อมูลและผลการวิเคราะห์อย่างมากมายอย่างไม่สามารถได้มาจากประสบการณ์จากผู้มีประสบการณ์ทำโมลด์ โดยจอภาพอนิเมเตอร์จะแสดงการจำลองภาพการฉีดให้ทราบอย่างชัดเจนครบถ้วนไม่ว่าจะเป็น Flow mark รอยเชื่อมประสาน (Weld Line) , อากาศตกค้าง (Air Trap) เป็นต้น

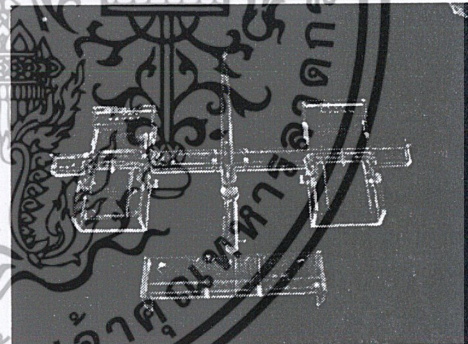
6. ผลการทดลอง



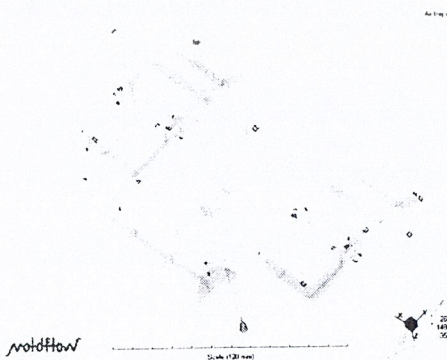
รูปที่ 3. ทิศทางการไหลที่วิเคราะห์โดยโปรแกรมMOLDFLOW



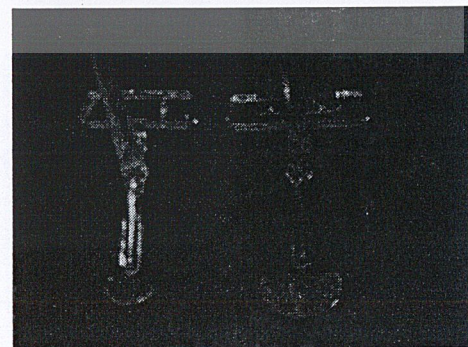
รูปที่ 4. ชิ้นงานเกิดรอยไหม้ (ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์)



รูปที่ 5. ชิ้นที่ฉีดโดยเงื่อนไขวิเคราะห์โดยโปรแกรมMOLDFLOW

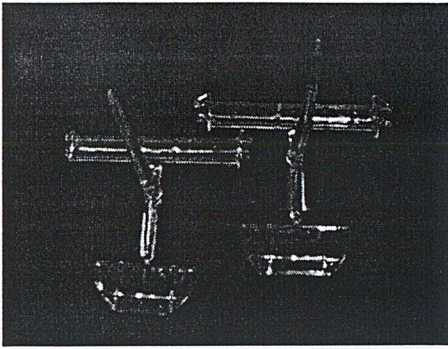


รูปที่ 2. AIR TRAP วิเคราะห์โดยโปรแกรม MOLDFLOW

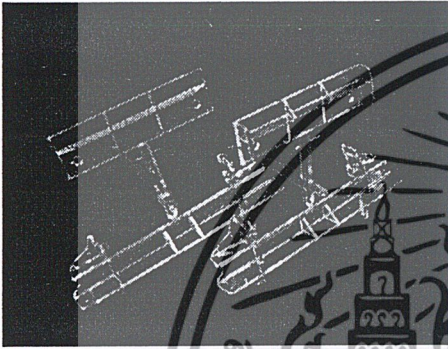


รูปที่ 6. ชิ้นงานเปรียบเทียบทิศทางการไหลที่20%ปริมาตรชิ้นงาน

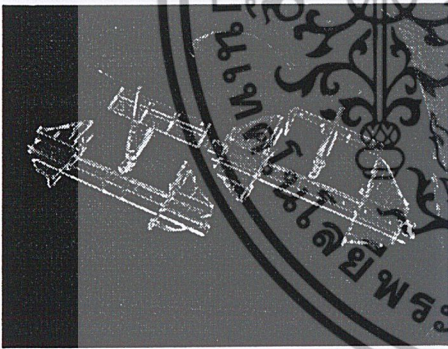
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



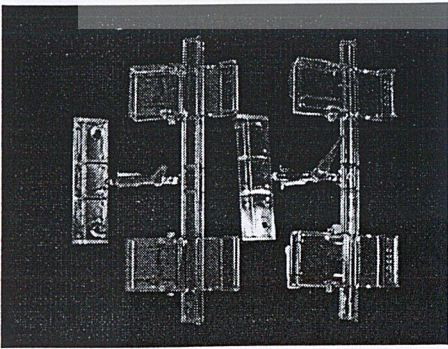
รูปที่ 7. ชิ้นงานเปรียบเทียบทิศทางการไหลที่40%ปริมาตรชิ้นงาน



รูปที่ 8. ชิ้นงานเปรียบเทียบทิศทางการไหลที่60%ปริมาตรชิ้นงาน



รูปที่ 9. ชิ้นงานเปรียบเทียบทิศทางการไหลที่80%ปริมาตรชิ้นงาน



รูปที่ 10. ชิ้นงานเปรียบเทียบทิศทางการไหลที่100%ปริมาตรชิ้นงาน

7. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทำนาย

เพื่อทดสอบผลของการ Simulation ในโปรแกรมเมื่อนำมาฉีดทดสอบจริงในเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะพบว่ามีความแตกต่างกันในเรื่องของปริมาณการฉีดซึ่งโปรแกรมวิเคราะห์ได้ 25.7 mm. แต่เมื่อนำมาฉีดจริงจะต้องใช้ปริมาณการฉีด 28.5 mm. จึงจะได้ชิ้นงานสมบูรณ์ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำหนด Follow-up Press stroke ที่ต่างกันระหว่างโปรแกรมกับฉีดจริง เพราะในการฉีดจริงนั้นต้องเผื่อระยะ Follow-up Press stroke เพื่อป้องกันเครื่องฉีด อีกทั้งอาจเกิดจากค่าความผิดพลาดของเครื่องฉีดทำให้ฉีดได้ไม่ตรงกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม และค่าความเร็วฉีดที่ใช้ในการฉีดพลาสติกจริงสูงกว่าที่โปรแกรมคำนวณได้ (15 % ของความเร็วเครื่องฉีด > 14.5% ของความเร็วเครื่องฉีด) เนื่องจากความผิดพลาดของเครื่องฉีดพลาสติก

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAE จะได้ค่าสภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างไปจากค่าสภาวะเงื่อนไขที่ใช้งานอยู่ในโรงงาน โดยค่าจากโปรแกรม CAE ค่าความเร็วฉีดจะต่ำกว่า (31 ลบ.ซม.< 35 ลบ.ซม.) , ปริมาณเนื้อพลาสติกน้อยกว่า (33.5 mm.< 41 mm.) , และเวลาในการฉีดมากกว่า (เนื่องจากความเร็วฉีดต่ำกว่า) ซึ่งผลต่างๆที่พบนี้สามารถสรุปได้ว่าค่าสภาวะเงื่อนไขการฉีดที่ได้จากโปรแกรมเป็นค่าสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการฉีดพลาสติกมากกว่าค่าสภาวะเงื่อนไขที่ใช้อยู่ในโรงงาน โดยสามารถประหยัดปริมาณเนื้อพลาสติกประมาณ 20 % . คุณภาพชิ้นงานที่ดีกว่าเนื่องจากไม่มีครีบที่ชิ้นงานดังรูปที่ 10 อีกทั้งทำให้ประหยัดเวลาในการปรับตั้งชิ้นงาน (การตัดครีบ) และมีค่า Stress ต่ำกว่า

8. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การแก้ไขปัญหาการเกิดรอยไหม้ที่แม่พิมพ์ เมื่อใช้โปรแกรม MOLDFLOW วิเคราะห์จะให้ผลในทางปฏิบัติจริงคือสามารถนำผลการวิเคราะห์มาใช้แก้ไขปัญหารอยไหม้ที่มีปัญหา รอยไหม้ได้และจากผลของการเปรียบเทียบทิศทางการไหลก็ยังแสดงให้เห็นว่ามีทิศทางการไหลเหมือนกับผลที่โปรแกรม MOLDFLOW วิเคราะห์ซึ่งเป็นการสนับสนุนความน่าเชื่อถือของโปรแกรม MOLDFLOW ดังนั้นในการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกผู้ออกแบบควรใช้โปรแกรม CAE มาช่วยในการวิเคราะห์แบบแม่พิมพ์ก่อนทำการผลิตแม่พิมพ์เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในภายหลังซึ่งเป็นการช่วยผู้ออกแบบประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์ , ลดเวลาในการผลิตแม่พิมพ์และสามารถหาสภาวะเงื่อนไขในการฉีดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ

9. เอกสารอ้างอิง

- (1) วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ ชัยรัตน์ แก้วดั่งง., "แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก", กรุงเทพฯ ;สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- (2) พิเชิด เลี่ยมพิพัฒน์."พลาสติก" กรุงเทพฯ : ห.จ.ก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์
- (3) Mold Flow," Manual Release 7"

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (4) Hans Gastrow, "Injection Molds", Second Edition, New York ; Hanser Publisher , 1993
- (5) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คู่มือการใช้ PRO-ENGINEER
- (6) อภินิษฐ์ สอนตระกูล , " การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายการหดตัวและบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด", กรุงเทพฯ ; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- (7) การฉีดพลาสติก สถาบัน RDIRT มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- (8) Peter Kennedy , "Flow Analysis of Injection Molds " , Hanser Publishers , New York , 1995
- (9) Prof. Dr-Ing , Harald Kaiser " Simulation Programs for The Injection Moulding Process " , ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) , 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้