

สำนักหอสมุดกลาง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รายงานการวิจัย

การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดแผ่นและฟิล์มพลาสติก
Designing Slit Die for Plastic Sheet and Film

โดย
ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์
สุวัฒน์ อรุณวรดิolk

ท
๓๕
๕๕๕
๕๕๕๕

แหล่งทุน
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2549

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 แนวคิดในการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนในการทำวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ของการทำวิจัย	4
บทที่ 2. ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแม่พิมพ์อัดรีด	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.3 สรุปท้ายบท	18
บทที่ 3. การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้น	19
3.1 ทฤษฎีการออกแบบที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้การคำนวณ	25
3.3 การวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติ	28
3.4 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้กราฟ	36
3.5 การวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรม Fluent	40
3.6 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent	52
3.7 สรุปท้ายบท	55
บทที่ 4. สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
4.1 สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด	56
4.2 สรุปผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้น	57
4.3 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	60
ตารางแสดงค่าคงที่เพื่อหาความหนืดจากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ ของพลาสติกชนิดต่าง ๆ	60
ภาคผนวก ข	63
ตารางผลการคำนวณโดยใช้ HDPE (453 K) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟ	63
ภาคผนวก ค	90
การกำหนดค่าเพื่อจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent	90
ภาคผนวก ง	98
โปรแกรมที่ใช้สำหรับช่วยในการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้เขวนเส้น	98
ประวัติผู้วิจัย	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ตารางแสดงอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหลและช่องทางไหลของวัสดุ นิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์	20
3-2 ตารางแสดงขนาดแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับ กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{R_o}{L}$	46
3-3 ตารางแสดงขนาดแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับ กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{H}{y_o}$	46
3-4 อัตราการไหลบริเวณทางเข้าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการไหล	47
4-1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีซีของท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ อัดรีดกับค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีดและค่าความยาวของช่อง ทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด	56
ก-1 แสดงค่าคงที่เพื่อหาความหนืดจากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ของพลาสติกชนิดต่าง ๆ	61
ข-1 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.01$	65
ข-2 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.015$	66
ข-3 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.02$	67
ข-4 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0225$	68
ข-5 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.025$	69
ข-6 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0275$	70
ข-7 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.03$	71
ข-8 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0325$	72
ข-9 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.035$	73
ข-10 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0375$	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-11 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.04$	75
ข-12 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.045$	76
ข-13 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.05$	77
ข-14 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.01$	78
ข-15 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.02$	79
ข-16 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.03$	80
ข-17 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.04$	81
ข-18 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.05$	82
ข-19 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.06$	83
ข-20 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.07$	84
ข-21 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.08$	85
ข-22 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.09$	86
ข-23 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.10$	87
ข-24 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.15$	88
ข-25 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.2$	89

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 รูปร่างภายนอกของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับฉีดพลาสติกแผ่น	2
1-2 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด	2
2-1 รูปแสดงกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์ม	6
2-2 แสดงลักษณะของส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดต่าง ๆ	6
2-3 รูปแสดงทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุภายในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ	7
2-4 สมมติฐานของ Wortberg และ Kirchner ที่ใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด	8
2-5 แสดงรูปร่างและค่าตัวแปรของแม่พิมพ์อัดรีดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	9
2-6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ	11
2-7 แสดงการหาค่าคงที่ A และ C จากสมการของ Prandtl-Eyring ที่ได้จากการทาบทเส้น	13
2-8 กราฟใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดของ Görmar	13
2-9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_o และ y_o สำหรับโพลีไธลีน ที่ 210 °C อัตราการไหล 200 kg./hr.	14
2-10 แสดงรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบโดยสมมติฐานที่หนึ่งของ Douglas E. Smith, Daniel A. Tortorelli และ Charles L. Tucker III	16
2-11 แสดงรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบโดยสมมติฐานที่สองของ Douglas E. Smith, Daniel A. Tortorelli และ Charles L. Tucker III	17
3-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนิวทอเนียนและนอนนิวทอเนียน	20
3-2 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้การคำนวณ	24
3-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-4}	33
3-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_S \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3}	34
3-5 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ	35
3-6 แสดงการหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-7 แสดงการหาค่า $\frac{H}{y_o}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ	38
3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราเค้นเฉือนที่ใช้ในโปรแกรม Fluent	41
3-9 แสดงรูปร่างของช่องทางไหลในแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการจำลองการไหล	42
3-10 แสดงภาพแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม Fluent	43
3-11 Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral)	44
3-12 Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral)	44
3-13 แสดงลักษณะของ Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด	45
3-14 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในกับโปรแกรม Fluent	48
3-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้จาก Fluent	
ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_R \cdot \pi \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-4}	49
3-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้จาก Fluent	
ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_s \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3}	50
3-17 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่า $\Delta P_{Calculation}$ และ ΔP_{Fluent} ที่อัตราส่วน $\frac{R_o}{L}$ ต่าง ๆ	51
3-18 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่า $\Delta P_{Calculation}$ และ ΔP_{Fluent} ที่อัตราส่วน $\frac{H}{y_o}$ ต่าง ๆ	52
3-19 แสดงการหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \eta_R^2}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent	53
3-20 แสดงการหาค่า $\frac{H}{y_o}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent	54
ค-1 แสดงตำแหน่งการเลือกรูปแบบการคำนวณในโปรแกรม Fluent	91
ค-2 รูปแบบการคำนวณในโปรแกรม Fluent ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้	91
ค-3 แสดงตำแหน่งการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Fluent	92
ค-4 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติที่สามารถปรับค่าได้	92
ค-5 การกำหนดตัวแปรสำหรับวัสดุอนินวทอเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์	93
ค-6 แสดงตำแหน่งการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรม Fluent	93
ค-7 แสดงรูปแบบของเงื่อนไขขอบเขตที่สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม Fluent	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ค-8 แสดงการกำหนดอัตราการไหลบริเวณทางเข้าแม่พิมพ์	95
ค-9 แสดงการกำหนดความดันบริเวณทางออกแม่พิมพ์	95
ค-10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง	95
ค-11 แสดงตำแหน่งการปรับค่าตัวแปรสำหรับควบคุมการคำนวณ	96
ค-12 ตัวแปรและรูปแบบสมการสำหรับควบคุมการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย	96
ค-13 แสดงตำแหน่งการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ	96
ค-14 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ	97
ง-1 ภาพแสดงโปรแกรม Program_Write_Jou_File เพื่อทำการ คำนวณตำแหน่งของพิกัดที่จะใช้สร้างแบบจำลอง	99
ง-2 ภาพแสดงการวางข้อมูลลงในโปรแกรม Notepad เพื่อสร้าง Journal File ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit	100
ง-3 ภาพแสดงการดำเนินการเปิด Journal File ในโปรแกรม Gambit	100
ง-4 แสดงผลของการเปิด Journal File ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit	101

คำอธิบายสัญลักษณ์

B	ความกว้างทั้งหมดของปากแม่พิมพ์อัดรีด
H	ความสูงของช่องทางไหล (Slit)
L	ความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์อัดรีด
l	ระยะทางตามแกน x โดยเริ่มวัดจากบริเวณปลายแม่พิมพ์อัดรีด
R_o	รัศมีของท่อทางไหล (Manifold) บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด
y_o	ความยาวของช่องทางไหล (Slit) บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด
$\dot{V}_o$	อัตราการไหลของเนื้อวัสดุบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด
$R(l)$	รัศมีของพื้นที่หน้าตัดของท่อทางไหล ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ ของแม่พิมพ์
$y(l)$	ความยาวของช่องทางไหล (Slit) ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ ของแม่พิมพ์
$\dot{V}(l)$	อัตราการไหลของเนื้อวัสดุ ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ ของแม่พิมพ์
$\bar{v}_R$	ความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ท่อทางไหล (Manifold)
$\bar{v}_S$	ความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่บริเวณช่องทางไหล (Slit)
ΔP	ผลต่างของความดันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดซึ่งคำนวณจากการนำความดันบริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ลบความดันที่บริเวณทางออกแม่พิมพ์
ΔP_R	ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นที่ท่อทางไหล (Manifold)
ΔP_S	ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นที่บริเวณช่องทางไหล (Slit)
$\bar{\eta}_R(x)$	ตัวแทนความหนืดบริเวณท่อทางไหล (Manifold)
$\bar{\eta}_S(x)$	ตัวแทนความหนืดบริเวณช่องทางไหล (Slit)
$\bar{\gamma}_R$	ตัวแทนอัตราเค้นเฉือนบริเวณท่อทางไหล (Manifold)
$\bar{\gamma}_S$	ตัวแทนอัตราเค้นเฉือนบริเวณช่องทางไหล (Slit)
$\eta_R(x)$	ความหนืดบริเวณท่อทางไหล (Manifold)
$\eta_S(x)$	ความหนืดบริเวณช่องทางไหล (Slit)
$\dot{\gamma}_R$	อัตราเค้นเฉือนบริเวณท่อทางไหล (Manifold)
$\dot{\gamma}_S$	อัตราเค้นเฉือนบริเวณช่องทางไหล (Slit)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดแผ่นและฟิล์มพลาสติก
(ภาษาอังกฤษ) Designing Slit Die for Plastic Sheet and Film
ชื่อผู้วิจัย นายชาญยุทธ โกศลตะวงษ์ และนายสุพัฒน์ อรุณวรดิolk
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
หมายเลขโทรศัพท์ 02-587-0026 ต่อ 411
ได้รับทุนสนับสนุนนักวิจัยทั่วไป ประจำปี 2549
จำนวนเงิน 46,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ เพื่อใช้สำหรับผลิตพลาสติกแผ่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งทางด้านทฤษฎีและการจำลองการไหลบนคอมพิวเตอร์ โดยต้องการให้ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของปากแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วของพอลิเมอร์เหลวภายในแม่พิมพ์อัดรีด นอกจากนั้นขนาดของแม่พิมพ์อัดรีด และคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นเราจึงรวมกลุ่มตัวแปรข้างต้นให้เป็นตัวแปรไร้มิติ ทำการทดสอบการไหลภายในแม่พิมพ์ของวัสดุพอลิเมอร์ ชนิดเพาเวอร์ลอร์ว โดยจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีอยู่ ซึ่งสามารถนำกราฟมาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อได้สะดวกรวดเร็วขึ้น การออกแบบด้วยกราฟสามารถใช้ออกแบบได้ทั้งพลาสติกแผ่นและแผ่นฟิล์มพลาสติก ตัวอย่างการออกแบบแสดงให้เห็นว่าผลการออกแบบที่ได้จากการใช้กราฟที่สร้างขึ้น เมื่อเทียบกับการออกแบบของ Görmär พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันที่อัตราความเครียดเฉือนเดียวกัน

Project Title (Thai) การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดแผ่นและฟิล์มพลาสติก
(English) Designing Slit Die for Plastic Sheet and Film
Researchers Mr. Chanyut Kolutawong and Mr. Supat Arunworradirok
 Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
Tel 02-587-0026 ext 411
Research Scholarship Year 2549
Amount 46,000 baht

Abstract

This research objective is to study a coathanger die for plastics sheet and film manufacturing. To extrude the molten plastics through the die, engineers need to control the constant outlet pressure across the die width to maintain the uniform outlet velocity. The geometrical variations of the die such as the manifold radius, slit height and width affect shear stresses and thus the flow fields in the slit die. In this study, a power law fluid flow in the slit die is simulated by using Fluent, a commercial program. All parameters are described through dimensionless groups, thus one creates dimensionless charts from the relations between the dimensionless parameters helping extrusion die engineers to design a coathanger die for a specific plastics sheet and film. A die-design example shows that the die shape designed from the charts is in agreement with GÖrmar's design.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดีผู้เขียนต้องขอขอบคุณ คุณครู อาจารย์ทุกท่าน ที่
ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงต่าง ๆ จนกระทั่งทำให้มีความรู้ ความเข้าใจในการวาง
แนวทางและดำเนินงานวิจัย พี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจคำปรึกษา และคอยสอบถามเป็น
ระยะๆ ช่วยให้งานวิจัยสามารถดำเนินงานไปได้ เกินอย่างดี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยฉบับนี้ และ
ขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่านที่มีได้ กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านที่ได้กล่าวนามทั้งหมดไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์และ คุณค่า
ของงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ บิดาและมารดาที่เลี้ยงดู ให้กำลังใจในการทำงานและ ให้
การสนับสนุนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด

ชาญยุทธ โกลิขะวงษ์

สุพัฒน์ อรุณวรดิษฐ์

9 พฤษภาคม 2550

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการทำวิจัย

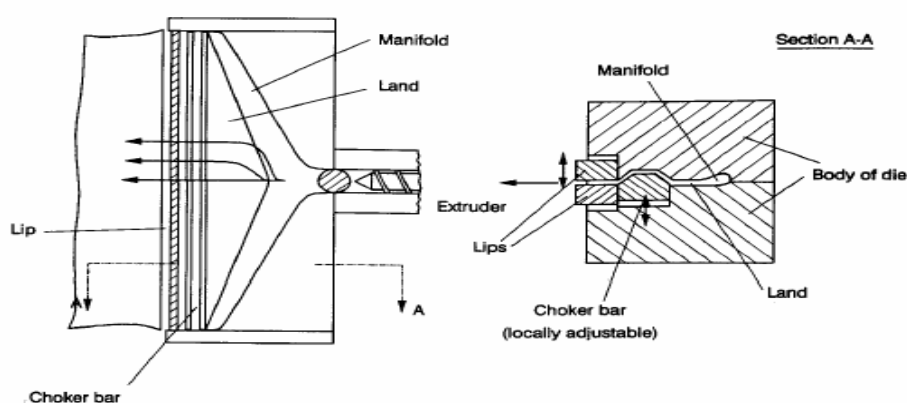
ปัจจุบันกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์มที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่ จำเป็นที่จะต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทั้งในเรื่องของการสั่งซื้อเครื่องจักรและแม่พิมพ์ อัดรีด และยังต้องมีการซ่อมบำรุงเมื่อเครื่องจักรและแม่พิมพ์อัดรีดเกิดการขัดข้อง ซึ่งนับว่าเป็น ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นผู้ประกอบการหลายแห่งก็ได้มีความคิดริเริ่มที่จะซ่อมบำรุงหรือพัฒนา เครื่องจักรและแม่พิมพ์อัดรีดขึ้นมาใช้เอง ซึ่งส่วนมากก็มักจะใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานใน การซ่อมบำรุงหรือออกแบบเป็นหลัก ทำให้ผลที่ได้ไม่มีความแน่นอน เช่น มักจะใช้เวลาในการ ซ่อมบำรุง หรือค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงเพราะไม่ทราบถึงต้นเหตุของปัญหาอย่างแท้จริง

ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงทำให้เกิดงานวิจัยขึ้นนี้ขึ้น เนื่องจากทางผู้วิจัยมีความเห็นว่าศาสตร์ที่มี ความเกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นนั้นส่วนใหญ่แล้ว มักจะได้รับการถ่ายทอดอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นตำรา งานวิจัย หรือบทความทางวิชาการ ต่าง ๆ อยู่แล้ว แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือการนำเอาทฤษฎีเหล่านั้นไปใช้ในการปฏิบัติยังคงทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้ความเข้าใจในตัวทฤษฎีอย่างถ่องแท้ จึงจะสามารถประยุกต์องค์ความรู้ที่เรามีอยู่ นั้นมาใช้ได้จริง ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะอธิบายทฤษฎีเหล่านั้นให้ง่ายต่อการใช้งาน ก็จะทำให้เรา นำทฤษฎีนั้นมาออกแบบสร้างแม่พิมพ์อัดรีดได้จริง สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้สนใจที่จะศึกษาและ วิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นชนิด ไม้แขวนเสื้อ โดยที่หลักสำคัญที่ใช้สำหรับการออกแบบคือ ต้องการที่จะออกแบบรูปร่างของ แม่พิมพ์อัดรีด ที่สามารถจะทำให้ลักษณะการไหลของเนื้อพลาสติกที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ มีคุณสมบัติคงที่ตลอดแนวความกว้างของปากแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์ อัดรีดมีคุณภาพดีเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน สำหรับค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ แม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อนั้นคือ ค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ อัดรีด (R_o) และความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (y_o) ซึ่งจะได้กล่าว รายละเอียดในการหาค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ในส่วนของเนื้อหาในบทถัดไป

รูปร่างและส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับขึ้นรูปพลาสติกแผ่นได้แสดง ไว้ในภาพที่ 1-1 และภาพที่ 1-2



ภาพที่ 1-1 รูปร่างภายนอกของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับฉีดพลาสติกแผ่น



ภาพที่ 1-2 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด

ปัญหาหลักที่พบในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อนำไปใช้งานคือ ยังไม่สามารถประยุกต์เอาทฤษฎีที่เป็นสูตรสำเร็จมาใช้ เนื่องจากความไม่เข้าใจในข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์บางประการที่เกิดจากการตั้งสมมติฐานในการออกแบบ อีกทั้งสมการที่ใช้ในการออกแบบยังใช้งานได้ยาก จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด เช่น รูปร่างของแม่พิมพ์มีความเกี่ยวข้องกับอะไรกับลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์บ้าง หรือชนิดของพลาสติกที่ใช้จะมีผลกับรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดหรือไม่ เป็นต้น โดยมุ่งเน้นที่จะศึกษาและวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลกระทบไปถึงรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่จะนำมาใช้งาน ในขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด โดยนำความรู้ด้านพลศาสตร์ของไหล และการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติเข้ามาอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น และจะทำการจำลองการไหลของไหลนอนนิวทอนเนียน (Non Newtonian) ชนิดเพาเวอร์ลอว์ (Power Law) โดยใช้โปรแกรม Fluent Version 6.0 จากนั้นทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งสามารถนำกราฟนี้ไปใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การรวบรวมและพัฒนาองค์ความรู้ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ เพื่อให้เราสามารถออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเองได้ ลดการพึ่งพาต่างประเทศลงนำประเทศไปสู่ความก้าวหน้าที่ยั่งยืน

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ดังนี้

ส่วนที่ 1 จะอยู่ในบทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไป ข้อดี ข้อเสีย ของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดต่าง ๆ ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

ส่วนที่ 2 จะอยู่ในบทที่ 3 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ จะทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ใช้การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติเข้ามาช่วยในการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด จากนั้นทำการจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้โปรแกรม Fluent และสร้างกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

ส่วนที่ 3 จะอยู่ในบทที่ 4 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ จะกล่าวสรุปผลของงานวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยชิ้นนี้ สำหรับผู้ที่มีความสนใจที่จะศึกษางานทางด้านนี้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อค้นคว้ารวบรวมและสร้างองค์ความรู้ทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

1.2.2 สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อได้

1.2.3 สามารถออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อให้ได้ลักษณะการไหลตามต้องการ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้การจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์

1.3.2 กำหนดขอบเขตของการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร ที่ใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

1.3.3 หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมการไหล

1.3.4 ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อตามลักษณะการไหลที่ต้องการ

1.4 ขั้นตอนในการทำวิจัย

1.4.1 ศึกษาการออกแบบของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ พร้อมทั้งค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้มีผู้ทำไว้แล้ว

1.4.2 ศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด

1.4.3 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการอัดรีด

1.4.4 ทำการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional Analysis) ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบกับการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด

1.4.5 ทดสอบและศึกษาการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด โดยใช้โปรแกรม Fluent ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ของโปรแกรมเพื่อหารูปแบบของการคำนวณที่เหมาะสม

1.4.6 ปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นและสามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบและผลกระทบเหล่านั้นได้

1.4.7 ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อตามเงื่อนไขที่ต้องการ

1.4.8 สรุปและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ของการทำวิจัย

1.5.1 เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง

1.5.2 เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลสำหรับผู้สนใจที่จะศึกษางานทางด้านนี้ต่อไปในอนาคต

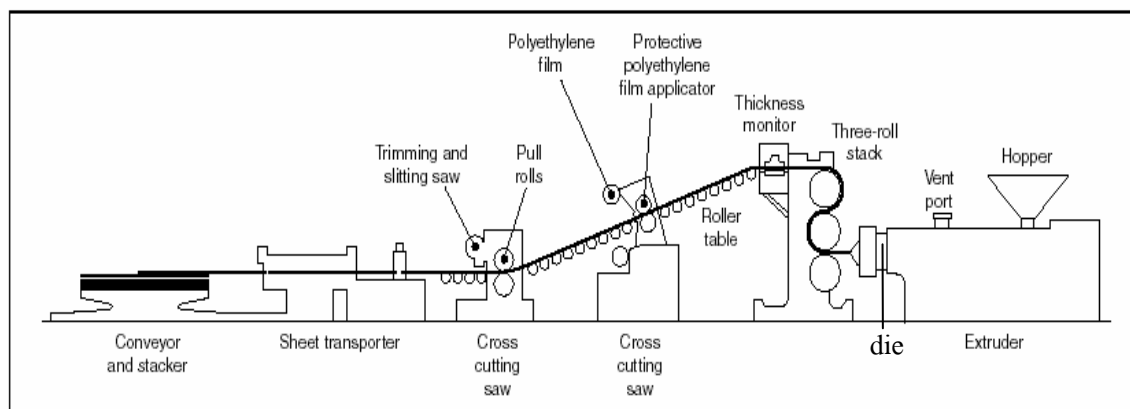
บทที่ 2

ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่ารูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด คือแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ เนื่องจากรูปร่างของแม่พิมพ์ชนิดนี้สามารถที่จะทำให้การไหลของเนื้อพลาสติกที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ มีลักษณะของการกระจายตัวของเนื้อพลาสติกที่ทั่วถึงตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ จากนั้นจะกล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ ซึ่งจะศึกษาเกี่ยวกับการหารูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่สอดคล้องกับลักษณะของการไหลที่ต้องการจะให้เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ เช่น ต้องการให้การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าความเร็วเท่ากันตลอดช่วงความกว้างของปากแม่พิมพ์อัดรีด หรือต้องการที่จะให้ความดันที่เกิดขึ้นบริเวณปากทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเท่ากัน หรือต้องการที่จะให้พลาสติกใช้เวลาไหลอยู่ในแม่พิมพ์น้อยที่สุด เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของพลาสติกที่เกิดจากความร้อนภายในแม่พิมพ์ จากนั้นทำการศึกษาวิธีการออกแบบแม่พิมพ์แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อจากงานวิจัยเหล่านั้น และนำความรู้เหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่ใช้ในการออกแบบสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแม่พิมพ์อัดรีด

กระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์มที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งคือเครื่องอัดรีดพลาสติกซึ่งเป็นส่วนเริ่มต้นของกระบวนการผลิต โดยจะเป็นตัวกำหนดชนิดของวัสดุและกำลังการผลิต ส่วนที่สองคือแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์[1-5] และส่วนสุดท้ายคือระบบลูกกลิ้งที่ใช้รีดแผ่นพลาสติก (ภาพที่ 2-1)

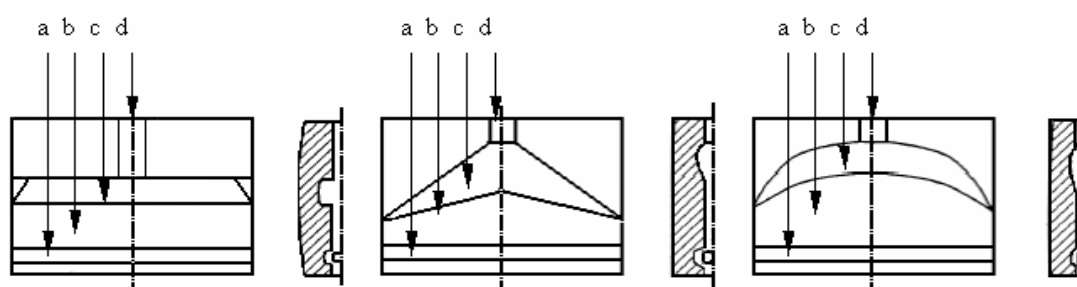


ภาพที่ 2-1 รูปแสดงกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์ม

ในงานวิจัยชิ้นนี้มุ่งที่จะศึกษาถึงส่วนประกอบสำคัญ ที่สามารถจะเป็นตัวกำหนดขนาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ส่วนประกอบดังกล่าวคือ แม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกแผ่นนั่นเอง ซึ่งแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับงานฉีดที่ต้องการให้ได้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเพื่อนำไปผ่านกระบวนการรีดอัดขึ้นรูปมีใช้อยู่ทั่วไป 3 ประเภท [4] คือ

1. แม่พิมพ์รูปตัวที (T-Dies)
2. แม่พิมพ์รูปหางปลา (Fishtail Dies)
3. แม่พิมพ์ชนิดไม้แขวนเสื้อ (Coat-Hanger Dies)

ซึ่งสามารถรายละเอียดลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดต่าง ๆ ได้จากภาพที่ 2-2



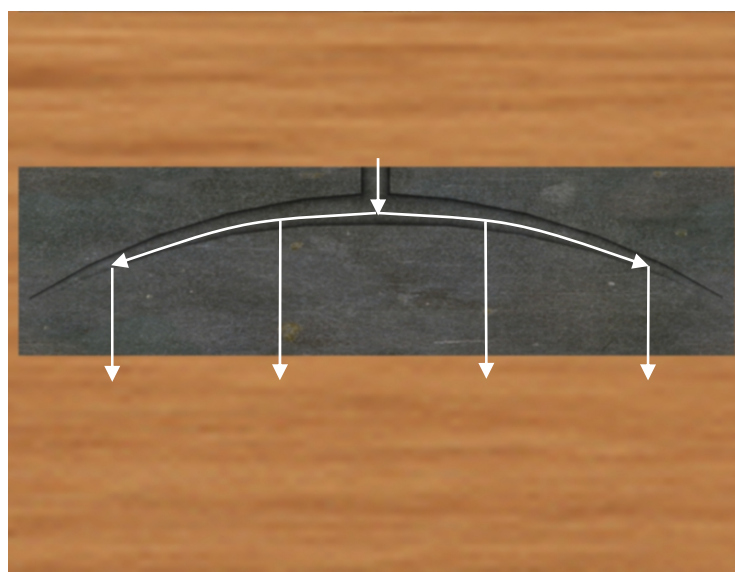
(ก) แม่พิมพ์อัดรีดรูปตัว T (ข) แม่พิมพ์อัดรีดรูปหางปลา (ค) แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะของส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดต่าง ๆ

- (a) ปากแม่พิมพ์อัดรีด (Die Lips)
- (b) ช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด (Slit)
- (c) ท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด (Manifold)
- (d) ทางเข้าของแม่พิมพ์อัดรีด

จากภาพที่ 1-2 และภาพที่ 2-2 แม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งพลาสติกเหลวให้ทั่วถึงตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดันเพื่อให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ในกรณีที่ท่อทางไหลไม่สามารถกระจายพลาสติกได้อย่างทั่วถึง เราอาจจะติดตั้งโชกเกอร์บาร์ (Choker Bar) เพื่อช่วยทำให้การกระจายตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์สม่ำเสมอขึ้น โดยเราสามารถปรับอัตราการไหลของพลาสติกเหลวที่ไหลผ่านโชกเกอร์บาร์ได้ในตำแหน่งที่ต้องการ ความหนาของแผ่นพลาสติกจะถูกกำหนดโดยขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die Lips)

แม่พิมพ์อัดรีดรูปตัวที และแม่พิมพ์อัดรีดรูปหางปลา นั้นเป็นแม่พิมพ์อัดรีดที่ออกแบบและผลิตได้ง่ายแต่จะมีข้อเสียคือ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเค้นเฉือน (Shear Rate) ตามแนวท่อทางไหลอย่างมาก ทำให้ความดันภายในท่อทางไหลลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะเกิดปัญหาทำให้การไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีดเป็นไปอย่างไม่เหมาะสมกล่าวคือ การไหลที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะบริเวณกลางแม่พิมพ์อัดรีดเท่านั้นเนื่องจากความดันที่ลดลง จะทำให้พลาสติกไม่สามารถที่จะไหลไปได้ถึงบริเวณปลายของท่อทางไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีดได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นออกแบบรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดขึ้นมาใหม่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยรูปแบบที่ได้รับการปรับปรุงแล้วก็คือแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อนั่นเอง ซึ่งจะทำให้อัตราเค้นเฉือนภายในท่อทางไหลมีค่าคงที่ และทำให้การไหลของพลาสติกมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น ทิศทางการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์อัดรีดแสดงไว้ในภาพที่ 2-3



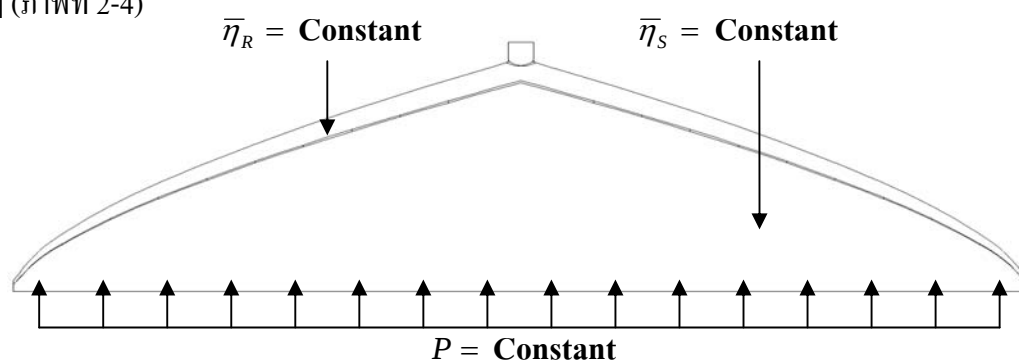
ภาพที่ 2-3 รูปแสดงทิศทางการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้นนั้น สิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดก็คืออัตราการไหลของพลาสติกที่ออกมาจากปากแม่พิมพ์อัดรีด จะต้องมีความเท่ากันตลอดช่วงความกว้างของปากแม่พิมพ์รวมทั้งความดันและอุณหภูมิจะต้องสม่ำเสมอด้วย Wortberg และ Kirchner [4] เสนอแนวทางการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้สมมติฐานดังนี้

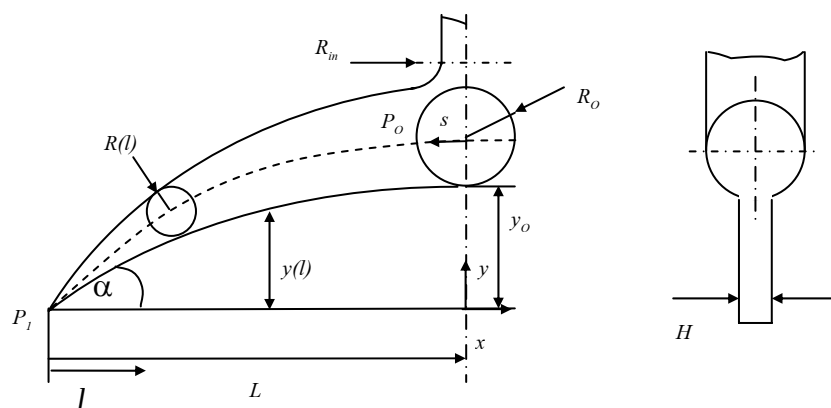
- (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Iso Thermal)
- (2) การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
- (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Fluid)
- (4) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมการไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก
- (5) ไม่คิดผลกระทบของวิสโคอีลาสติก (No Viscoelastic Effect)
- (6) ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No Slip Condition at Wall)
- (7) ใช้กับพลาสติกที่มีพฤติกรรมตามสมการเพาเวอร์ลอว์

โดย Wortberg และ Kirchner ใช้ค่าตัวแทนความหนืด (Representative Viscosity, $\bar{\eta}$) อธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุอนินิวทอนเนียน (Non-Newtonian) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งจากสมมติฐานที่กำหนดให้ตัวแทนอัตราเฉือนเฉือน (Representative Shear Rate, $\bar{\dot{\gamma}}$) มีค่าคงที่ตลอดช่วงท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ทำให้ตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล (Representative Viscosity in Manifold, $\bar{\eta}_R$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหล และตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล (Representative Viscosity in Slit, $\bar{\eta}_S$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของแม่พิมพ์อัดรีด [4, 5] (ภาพที่ 2-4)



ภาพที่ 2-4 สมมติฐานของ Wortberg และ Kirchner ที่ใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

สิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดคือต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหล $R(z)$ และความยาวของช่องทางไหล $y(z)$ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด (ดูภาพที่ 2-5) ที่จะทำให้ได้ค่าความเร็วและความดันคงที่ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดตามที่ต้องการ



ภาพที่ 2-5 แสดงรูปร่างและค่าตัวแปรของแม่พิมพ์อัดรีดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมมติฐานที่กำหนดให้ตัวแทนอัตราเฉือนในท่อทางไหล ($\dot{\gamma}_R$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหล ทำให้สามารถที่จะกำหนดรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล $R(l)$ [5] ได้คือ

$$R(l) = R_o \left(\frac{l}{L} \right)^{1/3} \quad (2-1)$$

โดย R_o คือ รัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

L คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์อัดรีด

l คือ ระยะทางตามแกน x โดยเริ่มวัดจากบริเวณปลายแม่พิมพ์อัดรีด

และความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดกับตัวแปรต่าง ๆ คือ

$$\Delta P(l) = \frac{8 \cdot \dot{V}_o \cdot \bar{\eta}_R}{\pi \cdot L} \int_l^L \frac{l}{R^4(s)} ds + \frac{12 \cdot \bar{\eta}_s \cdot \dot{V}_o}{L \cdot H^3} y(l) \quad (2-2)$$

โดย H คือ ความกว้างของช่องทางไหล (Slit) ภายในคาน

y_o คือ ความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

$\dot{V}_o$ คือ อัตราการไหลของพลาสติกบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

$\dot{V}(l)$ คือ อัตราการไหลของพลาสติก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

จากสมมติฐานที่ต้องการให้ ผลต่างของความดันตกคร่อมตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด

มีค่าคงที่ $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial l} = 0$ ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ความยาวของช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด

$$\text{ได้คือ } y(l) = y_o \left(\frac{l}{L} \right)^{2/3} \quad (2-3)$$

$$\text{โดยที่ } y_o = \frac{\bar{\eta}_R}{\bar{\eta}_s} \frac{H^3 B^2}{R_o^4 4\pi} \quad (2-4)$$

$$\text{โดย } B = 2 \cdot L \quad (2-5)$$

สมการที่ 2-1 และสมการที่ 2-3 เป็นสมการที่ใช้สำหรับกำหนดรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดจะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการที่จะออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดนั้นเราต้องทราบค่ารัศมี $R(I)$ และความยาวของช่องทางไหล $y(I)$ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่ารัศมีของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด R_0 และความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด y_0 ในการกำหนดค่าดังกล่าวได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและเสนอถึงวิธีการกำหนดค่าอยู่หลายวิธี เช่น Wortberg และ Kirchner ได้เสนอวิธีการกำหนดค่าขึ้นมา 2 วิธี ตามสมมติฐานที่จะใช้ในการออกแบบ (ภาพที่ 2-6) โดยในกรณีที่หนึ่งที่ใช้สมมติฐานคือ ค่าตัวแทนความหนืดในบริเวณช่องทางไหลและตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล มีค่าเท่ากันทั่วทั้งแม่พิมพ์อัดรีด ($\bar{\eta}_R = \bar{\eta}_s$, ภาพที่ 2-6 ด้าน N_1) ค่า R_0 และ y_0 ถูกกำหนดขึ้นโดยค่า H และ L และจากการศึกษาพบว่า จะเกิดข้อจำกัดในการใช้งานอยู่คือ ไม่สามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่ารัศมีของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดได้ และความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการคำนวณ มีค่ายาวมากเกินไป ความจำเป็น [5] ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุในการผลิตแม่พิมพ์โดยไม่จำเป็น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ค่าความหนืดที่เกิดขึ้นภายในบริเวณช่องทางไหลและช่องทางไหลจะมีค่าไม่เท่ากัน จึงเกิดสมมติฐานที่สองคือ ค่าตัวแทนความหนืดเป็นฟังก์ชันของค่าตัวแทนอัตราความเค้นเฉือน ($\bar{\eta}_R = f(\dot{\gamma}_R)$, $\bar{\eta}_s = f(\dot{\gamma}_s)$) ดังนั้นจึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการออกแบบโดย (ภาพที่ 2-6 ด้าน Y_1) เราสามารถที่จะปรับค่า R_0 เพื่อให้ได้ y_0 ตามที่เราต้องการได้ แต่ยังไม่มีการกำหนดฟังก์ชันของความหนืดในช่องทางไหลและในช่องทางไหลที่ชัดเจน เพียงกำหนดว่าฟังก์ชันนี้จะแปรผันกับอัตราการไหลและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลและช่องทางไหลตามลำดับ

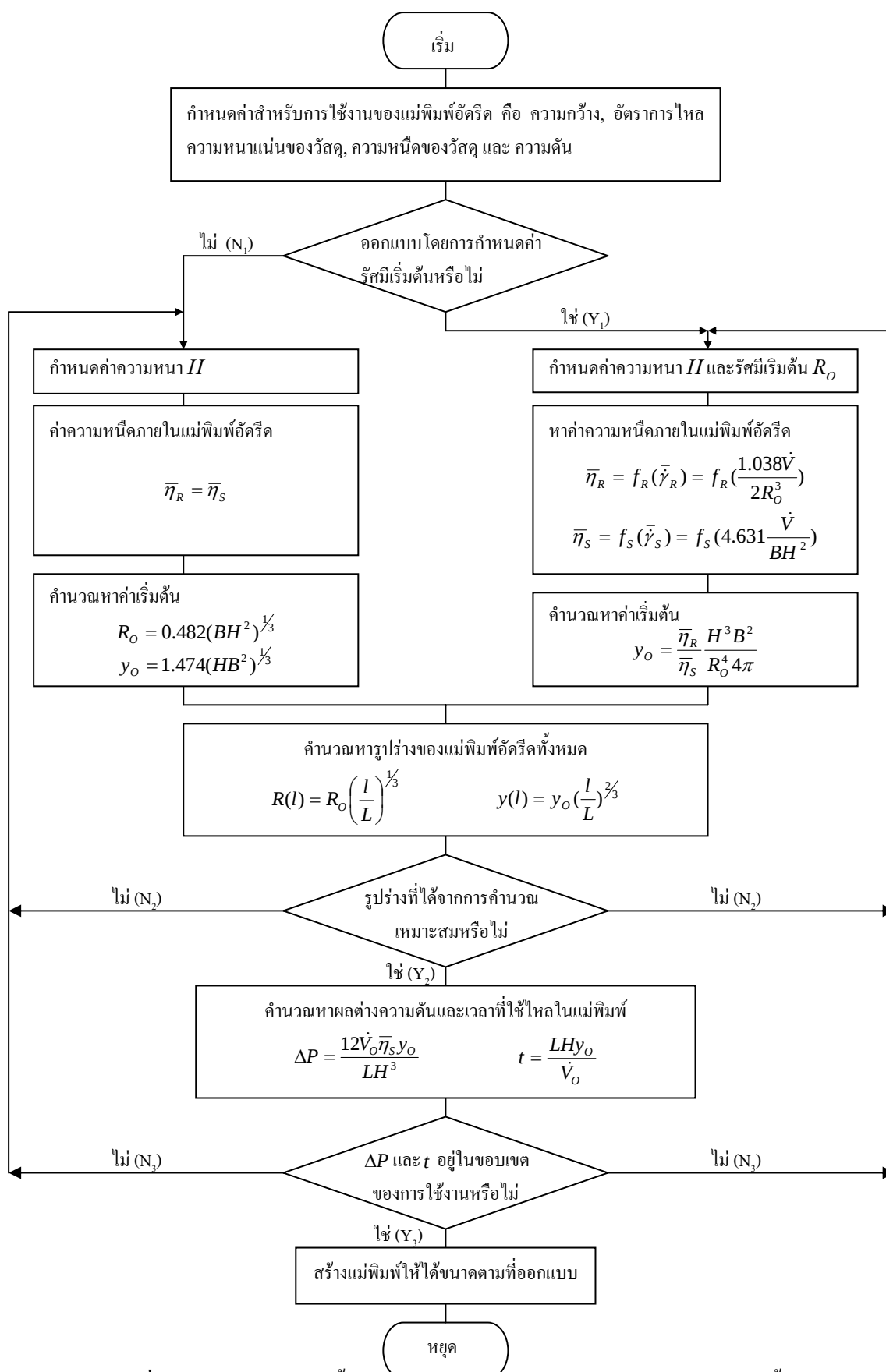
การตรวจสอบการออกแบบโดยใช้วิธีของ Wortberg และ Kirchner ตามขั้นตอนที่แสดงในภาพที่ 2-6 สามารถทำได้โดยตรวจสอบความเหมาะสมของรูปร่างที่ได้จากการออกแบบ เมื่อได้รูปร่างของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมตามต้องการแล้ว ก็จะทำการตรวจสอบค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางภายในแม่พิมพ์ นั่นคือ แทน $l = L$ ในสมการที่ 2-2 จะได้

$$\Delta P = \frac{12\dot{V}_0 \bar{\eta}_s y_0}{LH^3} \quad (2-6)$$

ซึ่งค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตการใช้งานของเครื่องอัดรีดพลาสติกที่ใช้งานหรือไม่ และทำการตรวจสอบเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ในแม่พิมพ์ (Residential Time) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$t = \frac{LHy_0}{\dot{V}_0} < t_D \quad (2-7)$$

โดยที่ค่าเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ในแม่พิมพ์ จะต้องอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเสื่อมคุณภาพลง (Degradation Time, t_D)



ภาพที่ 2-6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อคริลิกชนิดไม้วานเลื่อน

วิธีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดอีกวิธี คือ วิธีของ Görmar [5] ซึ่งคำนวณค่า รัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ R_o จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหล $\dot{V}_o$ ค่าความดันตกคร่อม ΔP ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{4\dot{V}_o}{\pi R_o^3 C} = \frac{1}{3} \frac{\Delta P}{A} \frac{R_o}{L} \phi \left(\frac{1}{3} \frac{\Delta P}{A} \frac{R_o}{L} \right) \quad (2-8)$$

$$\frac{6\dot{V}_o}{H^2 C L} = \frac{1}{2} \frac{H}{y_o} \frac{\Delta P}{A} \psi \left(\frac{1}{2} \frac{H}{y_o} \frac{\Delta P}{A} \right) \quad (2-9)$$

โดยที่ฟังก์ชัน $\phi(u)$ ในสมการที่ 2-8 และ $\psi(r)$ ในสมการที่ 2-9 เขียนอยู่ในรูปของผลรวมของไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน[4] ดังนี้

$$\phi(u) = \frac{8}{u^2} \left[\frac{1}{2} \cosh u - \frac{1}{u} \sinh u + \frac{1}{u^2} (\cosh u - 1) \right] \quad (2-10)$$

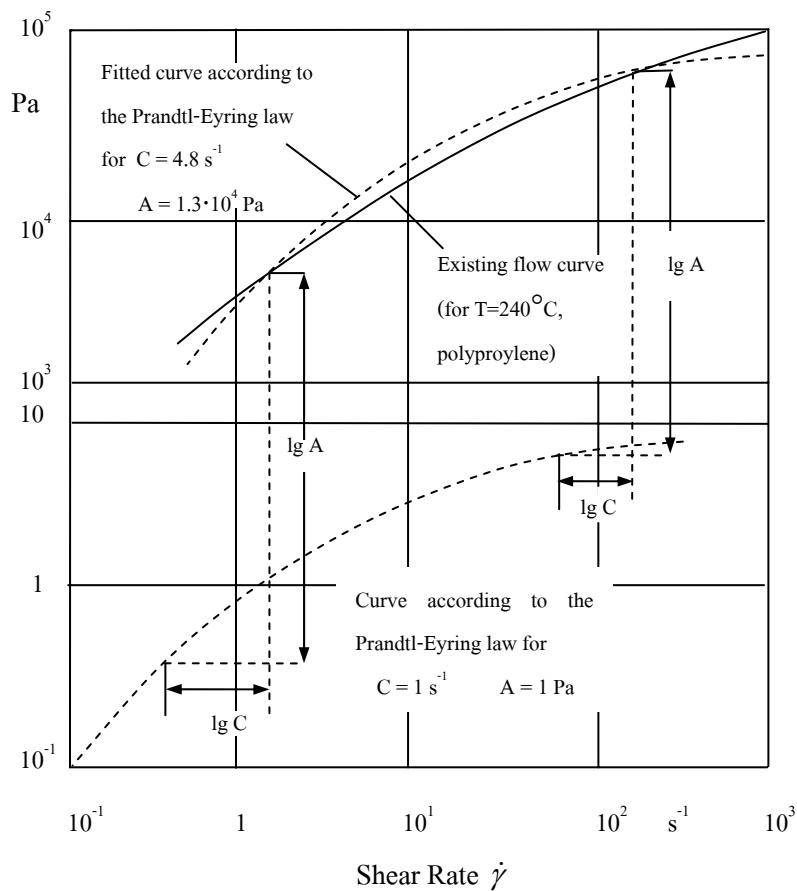
$$\psi(r) = \frac{3}{r^2} \left[\cosh r - \frac{1}{r} \sinh r \right] \quad (2-11)$$

ค่า A และ C ในสมการที่ 2-8 และสมการที่ 2-9 เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้โดยใช้วิธีการทาบเส้น (Curve Fitting) ระหว่างเส้นโค้งแสดงการไหลที่ได้จากการทดลองกับสมการกึ่งทฤษฎี (Constitutive Equation) ของ Prandtl-Eyring

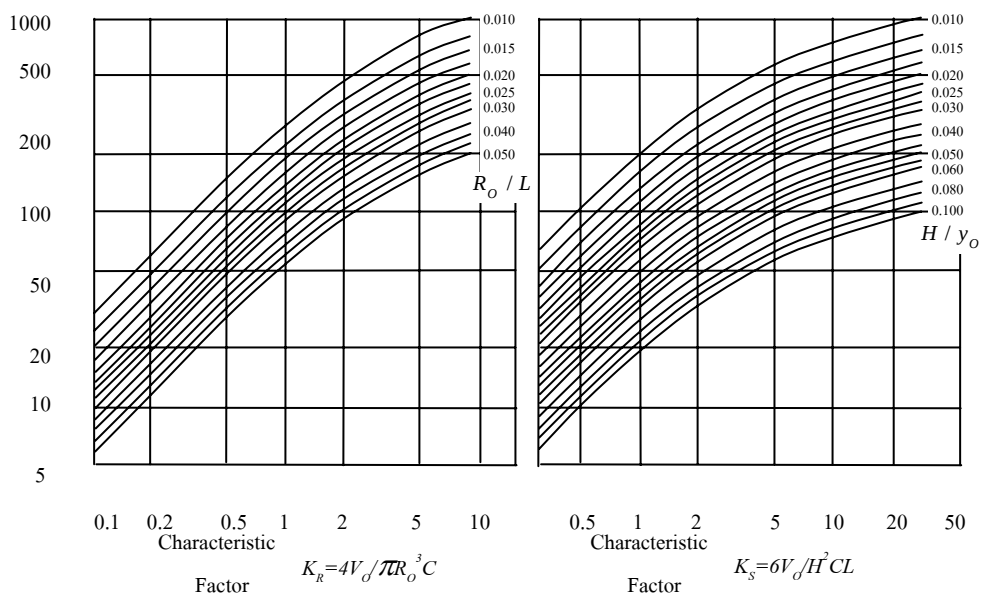
$$\dot{\gamma} = C \sinh \left(\frac{\tau}{A} \right) \quad (2-12)$$

สมการที่ 2-12 เป็นสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Shear Rate, $\dot{\gamma}$) และความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ) ดังแสดงในภาพที่ 2-7 ซึ่งแสดงการหาค่า A และ C ของพลาสติกโพลิโพรไพลีน (Polypropylene) ที่อุณหภูมิ 240 °C

จากสมการที่ 2-8 และสมการที่ 2-9 ซึ่ง Görmar ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ และนำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งนำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนกราฟดังแสดงในภาพที่ 2-8 ซึ่งจากกราฟเมื่อเราทราบค่าอัตราการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด $\dot{V}_o$ ค่าความหนาของแม่พิมพ์ H ค่าความกว้างของแม่พิมพ์ L ค่าคงที่ A และ C ที่ได้จากการทาบเส้น และทำการกำหนดค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ R_o สามารถที่จะหาค่า ΔP และค่า y_o เพื่อใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขนงเส้นได้ แต่เนื่องจากค่า A และ C ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของพลาสติกเหลวได้จากสมการไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน ดังนั้นแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีนี้จะใช้ได้กับพลาสติกที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเฉือนและความเค้นเฉือนตามสมการของ Prandtl-Eyring เท่านั้น

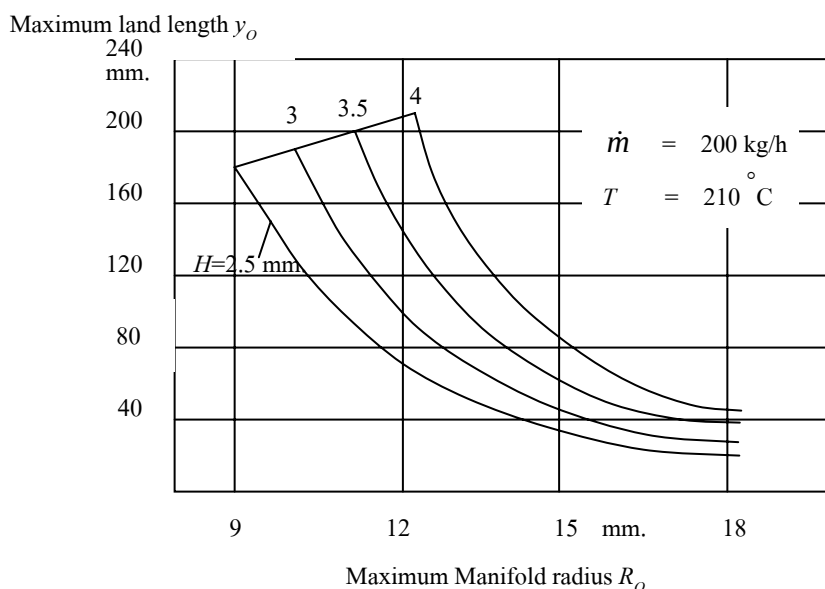
Shear Stress τ 

ภาพที่ 2-7 แสดงการหาค่าคงที่ A และ C จากสมการของ Prandtl-Eyring ที่ได้จากการทาบทเส้น

Characteristic Factor $\Delta P/A$ 

ภาพที่ 2-8 กราฟใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดของ Görmär

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้หาค่า R_o คือวิธีของ Münstedt, H [5] ซึ่งหาค่าได้โดยใช้กราฟที่ได้มาจากการทดลองสำหรับพลาสติกโพลีไธลีน ที่ $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ภาพที่ 2-9) แต่มีข้อจำกัดของการใช้งานคือกราฟที่มีอยู่สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้เฉพาะวัสดุเพียงชนิดเดียวและอัตราการไหลเพียงค่าเดียวเท่านั้น



ภาพที่ 2-9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_o และ y_o สำหรับโพลีไธลีน ที่ $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการไหล 200 kg./hr.

นอกจากนั้นยังมีทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ในตำราของ Donald G. Baird และ Dimitris I. Collias [6] ซึ่งกำหนดให้ผลต่างของความดันตกคร่อมตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดและมีสมมติฐานคือการไหลเป็นแบบราบเรียบ มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการไหล พลาสติกมีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ และมีการกระจายของค่าความเค้นอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Stress Distribution) เช่นเดียวกับ Wortberg และ Kirchner แต่มีเงื่อนไขที่แตกต่างออกไปคือใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ $\left(\frac{dy}{ds}\right) \approx -\tan\alpha$ มีค่าน้อยเท่านั้น (ดูภาพที่ 2-5) และใช้กับพลาสติกชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของแม่พิมพ์ได้ดังนี้

$$R(l) = \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1}{n} + 3 \right) / \left(2\pi \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \right) \right]^n (H^{2n+1})}{-\frac{dy}{ds}} \right\}^{\frac{1}{3n+1}} (l)^{\frac{n}{3n+1}} \quad (2-13)$$

โดยที่ค่า $\left(\frac{dy}{ds}\right)$ นี้จะเป็นค่าที่กำหนดรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด และเมื่อกำหนดค่า $\left(\frac{dy}{ds}\right)$ ลงไปในสมการที่ 2-13 โดยที่ทราบค่าความหนาของแม่พิมพ์ H และค่าคงที่ n ก็สามารที่จะเขียนความสัมพันธ์แสดงค่ารัศมีท่อทางไหล ณ บริเวณต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ได้ แต่เนื่องจากค่ามุม α ที่น้อยจะทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อทางไหลมีค่าน้อยในบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ และลดขนาดลงอย่างรวดเร็วบริเวณปลายของแม่พิมพ์ ทำให้การไหลที่เกิดขึ้นบริเวณปลายของท่อทางไหลเข้าสู่ช่องทางไหลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การไหลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ไม่สม่ำเสมอ

Douglas E. smith, Daniel A. Tortorelli และ Charles L. Tucker III เสนอวิธีออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเลื้อย โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบที่เหมาะสม (Optimal Design) โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบอยู่ 2 ลักษณะคือ

สมมติฐานแรกต้องการให้ผลต่างของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าน้อยที่สุดและ ความเร็วตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ [7] ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\min_{\phi \in R^N} f(\phi) = P_{in}(\phi) \quad (2-14)$$

ซึ่งค่า ϕ นี้เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงตำแหน่งที่จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข

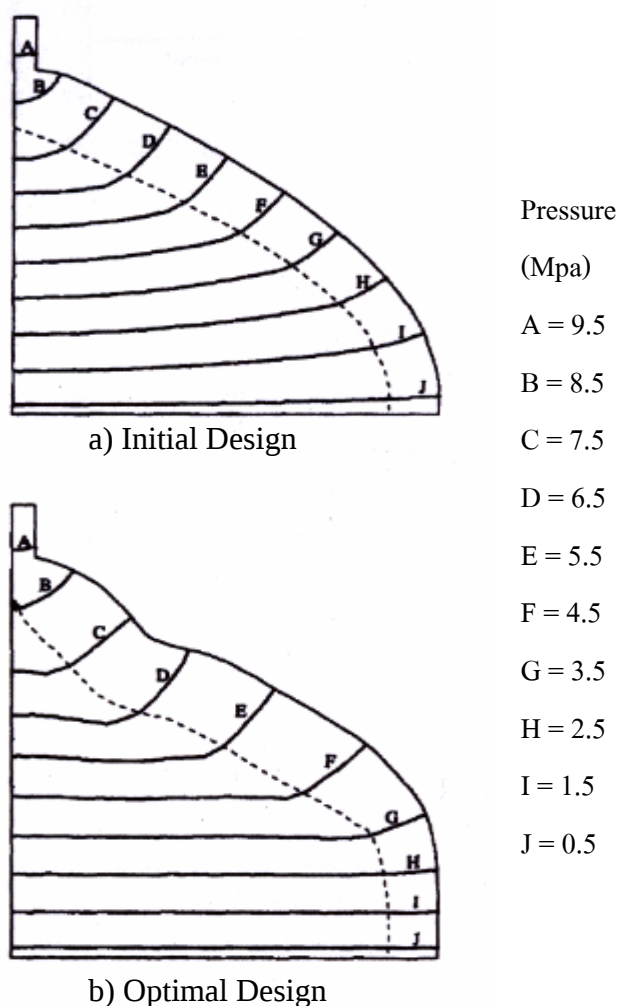
$$g_1(\phi) = \int_{l_{exit}} \left(\frac{\|\vec{v}(x, \phi)\|}{\bar{v}_p} - 1 \right)^2 dx_1 \leq \varepsilon \quad (2-15)$$

เมื่อ P_{in} คือความดันที่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์อัดรีด โดยที่ความดันบริเวณทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าความดันเป็นศูนย์ ตัวแปร $\|\vec{v}\|$ คือขนาดของความเร็วเฉลี่ยของความหนาแต่ละช่วงที่บริเวณทางออกของปากแม่พิมพ์อัดรีด ตัวแปร $\bar{v}_p$ คือความเร็วเฉลี่ยตลอดบริเวณทางออกของแม่พิมพ์อัดรีด ตัวแปร l_{exit} คือตัวกำหนดขอบเขตของการอินทิเกรตเฉพาะบริเวณทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดเท่านั้น

ตัวแปรสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดคือค่า ϕ ซึ่งค่านี้เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงตำแหน่งที่จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการที่ 2-15 โดยในสมการที่ 2-14 นั้นจะเป็นการหาค่า ϕ ที่ทำให้เกิดค่าผลต่างของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าน้อยที่สุด ส่วนในสมการที่ 2-15 นั้นเป็นการหาค่า ϕ ที่ทำให้บริเวณทางออกตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าความเร็วคงที่ จากสมการพบว่าถ้าค่าความเร็วเฉลี่ยของความหนาแต่ละช่วงที่บริเวณทางออกของปากแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยตลอดบริเวณทางออกของปากแม่พิมพ์อัดรีด ค่า $\left(\frac{\|\vec{v}(x, \phi)\|}{\bar{v}_p} - 1 \right)$ จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ดังนั้นค่า $g_1(\phi)$ จะเป็นตัวกำหนดลักษณะของความเร็วที่

บริเวณปากแม่พิมพ์อัดรีด โดยถ้า $g_1(\phi)$ มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าค่าของความเร็วตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่

Douglas E. Smith และคณะ นำความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 2-14 และสมการที่ 2-15 เขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหารูปร่างของแม่พิมพ์ที่สอดคล้องกับสมมติฐาน ซึ่งใช้รูปร่างเริ่มต้นในการออกแบบแสดงในภาพที่ 2-10a เมื่อทำการคำนวณจนได้รูปร่างเหมาะสมที่สอดคล้องกับสมมติฐานแล้วจะได้แม่พิมพ์รูปร่างดังแสดงในภาพที่ 2-10b ซึ่งมีรูปร่างยากต่อการผลิต



ภาพที่ 2-10 แสดงรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบโดยสมมติฐานที่หนึ่ง

ของ Douglas E. Smith, Daniel A. Tortorelli และ Charles L. Tucker III

วิธีการออกแบบของ Douglas E. Smith และคณะ อีกวิธีคือต้องการให้เวลาที่ใช้ในการฉีดและความเร็วตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ [8] ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

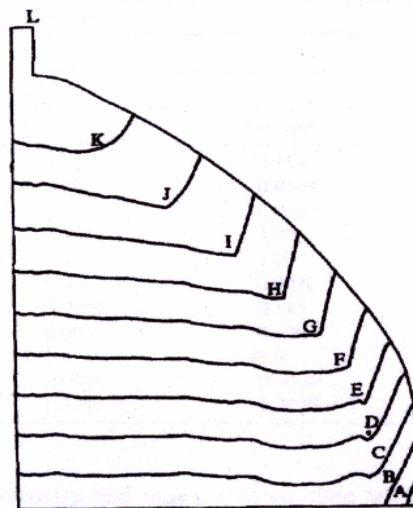
$$\min_{\phi \in R^N} f(\phi) = \theta_1 g_1(\phi) + \theta_2 g_2(\phi) \quad (2-16)$$

$$g_1(\phi) = \int_{l_{exit}} \left(\frac{\|\bar{v}(x, \phi)\|}{\bar{v}_p} - 1 \right)^2 dx_1 \quad (2-17)$$

$$g_2(\phi) = \int_{l_{exit}} \left(\frac{\tau(x, \phi)}{\tau_a(\phi)} - 1 \right)^2 dx_1 \quad (2-18)$$

สมการที่ 2-16 เป็นผลรวมระหว่างฟังก์ชันความเร็วที่ทางออกจากแม่พิมพ์อัดรีดและฟังก์ชันของเวลาที่ใช้ในการฉีด ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้สำหรับปรับค่าคือ θ_1, θ_2 โดยที่ค่า $g_1(\phi)$ จะได้จากสมการที่ 2-17 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับหาค่า ϕ ที่ทำให้บริเวณทางออกตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าความเร็วคงที่ และจากสมการพบว่าถ้าค่าความเร็วเฉลี่ยของความหนาแน่นแต่ละช่วงที่บริเวณทางออกของปากแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยตลอดบริเวณทางออกของปากแม่พิมพ์อัดรีดค่าแล้ว $g_1(\phi)$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ค่า $g_2(\phi)$ จะได้จากสมการที่ 2-18 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับหาค่า ϕ ที่ทำให้บริเวณทางออกตลอดแนวความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีเวลาที่ใช้ในการฉีดคงที่ และจากสมการพบว่าถ้าเวลาที่ใช้ในการฉีดของแต่ละช่วงมีค่าใกล้เคียงกับเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีดแล้ว $g_2(\phi)$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

เมื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้เขียนโปรแกรม เพื่อคำนวณหารูปร่างของแม่พิมพ์ที่สอดคล้องกับสมมติฐานก็จะได้แม่พิมพ์รูปร่างดังแสดงในภาพที่ 2-11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการคำนวณมีค่ายาวมากเกินไปจนความจำเป็น ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุในการผลิตแม่พิมพ์โดยไม่จำเป็น



Optimal design

Residence Time

(sce)

A = 0.130

B = 0.118

C = 0.106

D = 0.0942

E = 0.0824

F = 0.0707

G = 0.0589

H = 0.0471

I = 0.0353

J = 0.0236

K = 0.0118

L = 0.0

ภาพที่ 2-11 แสดงรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการการออกแบบโดยสมมติฐานที่สอง

ของ Douglas E. smith, Daniel A. Tortorelli และ Charles L. Tucker III

2.3 สรุปท้ายบท

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดพบว่า ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นค่อนข้างจะยุ่งยาก ยกเว้นงานวิจัยของ Görmar ซึ่งใช้กราฟ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่คือ เนื่องจากผู้ผลิตพลาสติกจะกำหนดคุณสมบัติของความหนืดด้วยค่าคงที่ n และ k ของสมการเพาเวอร์ลอว์ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกในการหาค่าคงที่ A และ C ซึ่งได้จากสมการกึ่งทฤษฎีของ Prandtl-Eyring โดยวิธีการหาเส้นเท่านั้น ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยวิธีของ Görmar จะเหมาะสมกับพลาสติกที่ไหลตามสมการกึ่งทฤษฎีดังกล่าวเท่านั้น งานวิจัยชิ้นนี้เลือกที่จะทำการออกแบบโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบของ Wortberg และ Kirchner เนื่องจากสามารถศึกษาและเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบได้ง่าย และสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบได้อย่างรวดเร็วทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ซึ่งรายละเอียดของทฤษฎีจะกล่าวโดยละเอียดในบทถัดไป

บทที่ 3

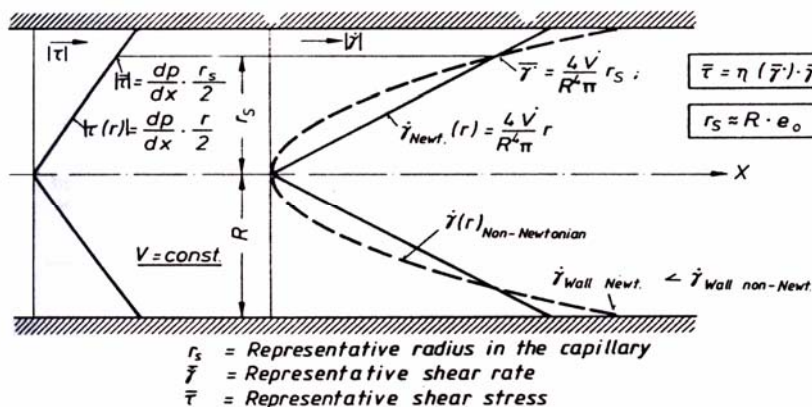
การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ

จากการสืบค้นเอกสารการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ที่กล่าวมาในบทที่ 2 พบว่ามีความไม่สะดวกในการออกแบบอยู่มาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับพลาสติกเพาเวอร์ลอร์ว เราจึงได้ทำการเสนอแนวทางการคำนวณเพื่อออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ และจัดรูปตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดขึ้นมาให้เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ [9, 10, 11] เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น ทำให้การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดมีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น

3.1 ทฤษฎีการออกแบบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุประสงค์ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ คือ ต้องการให้ผลรวมของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ เพื่อที่จะทำให้การกระจายความเร็วของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากปากแม่พิมพ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้สมมติฐานในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดในงานวิจัยชิ้นนี้เช่นเดียวกับสมมติฐานของ Wortberg และ Kirchner นั่นคือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Iso Thermal) (2) การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Fluid) (4) ไม่เกิดผลกระทบจากพฤติกรรมการไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก (5) ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No Slip Condition at Wall) และ (6) ใช้กับพลาสติกที่มีพฤติกรรมตามสมการเพาเวอร์ลอร์ว ดังนั้นเราจะไม่คิดผลกระทบของวิสโคอีลาสติก (No Viscoelastic Effect) โดยกำหนดให้ค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลและช่องทางไหล เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแทนอัตราเค้นเฉือนที่บริเวณท่อทางไหลและช่องทางไหลภายในแม่พิมพ์ตามลำดับ ($\bar{\eta}_R = f(\dot{\gamma}_R), \bar{\eta}_s = f(\dot{\gamma}_s)$)

การออกแบบแม่พิมพ์ชนิดไม้แขวนเสื้อนั้น จะใช้สมการที่ 2-1 ในการหาค่ารัศมีท่อทางไหล และสมการที่ 2-3 ในการหาค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ ซึ่งในสมการทั้งสองจะต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหล R_0 และค่าความยาว y_0 บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ โดยที่ค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์สามารถหาได้จากสมการที่ 2-4 ซึ่งจะพบว่าเราต้องทราบค่าคงที่ 2 ตัว คือ ค่าตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล ($\bar{\eta}_R$) และ ค่าตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล ($\bar{\eta}_s$) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเค้นเฉือนของ
วัสดุนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียน

ตารางที่ 3-1 แสดงอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหลและช่องทางไหลของวัสดุนิวทอนเนียนและ
นอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์

Geometry	Newtonian ($\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$)	Non-Newtonian; Power Law Model ($\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$)
Circle (Pipe)	$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot \bar{v}_z \cdot r}{R^2} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r}{\pi \cdot R^4}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3}$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{n} + 3 \right) \frac{\bar{v}_z}{R} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{\left(\frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3}$
Rectangular Slit	$\dot{\gamma} = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y}{B \cdot H^3}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \frac{2\bar{v}_z}{H} \left(\frac{2y}{H} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{2y}{H} \right)^{\frac{1}{n}}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{2 \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}$

จากภาพที่ 3-1 แสดงการไหลภายในท่อทางไหล(หรือในช่องทางไหล) จะพบว่าบริเวณที่
ค่าอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนิวทอนเนียน ($\dot{\gamma}_{Newt}$) และนอนนิวทอนเนียน ($\dot{\gamma}_{non-Newt}$) ตัดกันซึ่งก็คือ
บริเวณที่อัตราเค้นเฉือนเท่ากัน (มีค่ารัศมีเท่ากับ r_s) ดังนั้นที่บริเวณจุดตัดกันดังกล่าวก็จะมี
ค่าความหนืดเท่ากันด้วย ดังนั้นเราสามารถแทนค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอนเนียน ด้วยค่าคงที่
ที่ตำแหน่งค่าอัตราเค้นเฉือนเท่ากันได้ ซึ่งเราจะเรียกค่าตัวแทนนี้ว่า ค่าตัวแทนความหนืด
(Representative Viscosity, $\bar{\eta}$) ส่วนตารางที่ 3-1 แสดงอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหลและ

ช่องทางไหลของวัสดุนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งสามารถรายละเอียดได้จากหนังสือเกี่ยวกับพลาสติกและพอลิเมอร์ทั่วไป [5]

วัสดุนอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์จะหาค่าความหนืดได้จากความสัมพันธ์

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3-1)$$

เมื่อ k คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency Index) และ n คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-Law Index) จากสมการที่ 3-1 พบว่าในการหาค่าความหนืดของของไหลจะต้องทราบค่าอัตราเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ต้องการซึ่งมีอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนอนนิวทอนเนียนที่เกิดขึ้นในท่อทางไหลที่รัศมีต่าง ๆ ของท่อตามสมการ (ดูตารางที่ 3-1)

$$\dot{\gamma}_{R, non-Newt} = \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R^3} \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-2)$$

ดังนั้นที่ตำแหน่งรัศมี r_s (บริเวณที่อัตราเค้นเฉือนเท่ากัน) จะมีค่าอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\dot{\gamma}_{R, non-Newt} = \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3} \left(\frac{r_s}{R_o}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-3)$$

ซึ่งค่าของ r_s สามารถหาได้จากสมมติฐานที่กำหนดให้ ณ ตำแหน่งดังกล่าวค่าของอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนอนนิวทอนเนียนและวัสดุนิวทอนเนียนมีค่าเท่ากัน ซึ่งจากตารางที่ 3-1 ค่าอัตราเค้นเฉือนบริเวณท่อทางไหลวงกลมสำหรับวัสดุนิวทอนเนียนจะมีค่าคือ

$$\dot{\gamma}_{R, Newt} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r}{\pi \cdot R^4} \quad (3-4)$$

ดังนั้นที่ตำแหน่งรัศมี r_s จะมีค่าอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\dot{\gamma}_{R, Newt} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r_s}{\pi \cdot R_o^4} \quad (3-5)$$

และจากสมมติฐานเมื่อค่าอัตราเค้นเฉือนจากสมการที่ 3-3 และสมการที่ 3-5 มีค่าเท่ากันที่ตำแหน่ง r_s จะได้

$$\frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r_s}{\pi \cdot R_o^4} = \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3} \left(\frac{r_s}{R_o}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-6)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ค่า r_s เป็น

$$r_s = R_o \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3\right)\right)^{\left(\frac{n}{n-1}\right)} \quad (3-7)$$

นำค่า r_s ที่ได้ในสมการที่ 3-7 แทนค่ากลับไปในสมการที่ 3-3 จะได้ค่าตัวแทนอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\bar{\gamma}_R = \left[\left(\frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3} \left(\left(\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3 \right) \right)^{\left(\frac{1}{n-1} \right)} \right) \right] \quad (3-8)$$

นำสมการที่ 3-8 แทนลงในสมการที่ 3-1 จะได้ค่าตัวแทนความหนืดในท่อทางไหลคือ

$$\bar{\eta}_R = \frac{k}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3 \right)^n \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3} \right)^{n-1} \quad (3-9)$$

ค่าตัวแทนความหนืดที่ได้จากสมการที่ 3-9 จะเป็นค่าของวัสดุอนุอนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์ แต่จากข้อสมมติฐานที่กำหนดให้ค่าอัตราเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ ทำให้เราสามารถที่จะนำค่าตัวแทนความหนืดซึ่งเป็นค่าคงที่นี้ ไปใช้แทนค่าความหนืดของวัสดุอนุอนิวทอนเนียนในท่อทางไหลได้

ในทำนองเดียวกันสำหรับบริเวณช่องทางไหล จากตารางที่ 3-1 จะได้ค่าอัตราเค้นเฉือนของวัสดุอนุอนิวทอนเนียน ที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของช่องทางไหลตามสมการ

$$\dot{\gamma}_{S, non-Newt} = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{2y}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-10)$$

ดังนั้นที่ตำแหน่งความสูง y_s (บริเวณที่อัตราเค้นเฉือนเท่ากัน) จะมีค่าอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\dot{\gamma}_{S, non-Newt} = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{2y_s}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-11)$$

เช่นเดียวกันค่าของ y_s สามารถหาได้จากสมมติฐานที่กำหนดให้ ณ ตำแหน่งดังกล่าวค่าอัตราเค้นเฉือนของวัสดุอนุอนิวทอนเนียนและวัสดุนิวทอนเนียนมีค่าเท่ากัน ซึ่งจากตารางที่ 3-1 ค่าอัตราเค้นเฉือนบริเวณช่องทางไหลสี่เหลี่ยมสำหรับวัสดุนิวทอนเนียนจะมีค่าคือ

$$\dot{\gamma}_{S, Newt} = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y}{B \cdot H^3} \quad (3-12)$$

ดังนั้นที่ตำแหน่งความสูง y_s จะมีค่าอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\dot{\gamma}_{S, Newt} = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y_s}{B \cdot H^3} \quad (3-13)$$

และจากสมมติฐานเมื่อค่าอัตราเค้นเฉือนจากสมการที่ 3-11 และสมการที่ 3-13 มีค่าเท่ากันที่ตำแหน่ง y_s จะได้

$$\frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y_s}{B \cdot H^3} = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{2y_s}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-14)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ค่า y_s เป็น

$$y_s = \frac{H}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} \quad (3-15)$$

นำค่า y_s ที่ได้ในสมการที่ 3-15 แทนค่ากลับไปในสมการที่ 3-11 จะได้ค่าตัวแทนอัตราเค้นเฉือนคือ

$$\bar{\gamma}_s = \left[\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \right)^{\left(\frac{1}{n-1} \right)} \right] \quad (3-16)$$

นำสมการที่ 3-16 แทนลงในสมการที่ 3-1 จะได้ตัวแทนความหนืดคือ

$$\bar{\eta}_s = \frac{k}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2 \right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \right)^{n-1} \quad (3-17)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางของแม่พิมพ์ y_o ได้จากการนำค่า $\bar{\eta}_R, \bar{\eta}_s$ ที่ได้จากสมการที่ 3-9 และสมการที่ 3-17 กลับไปแทนในสมการที่ 2-4 และสามารถหาค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ $y(l)$ ได้จากสมการที่ 2-3

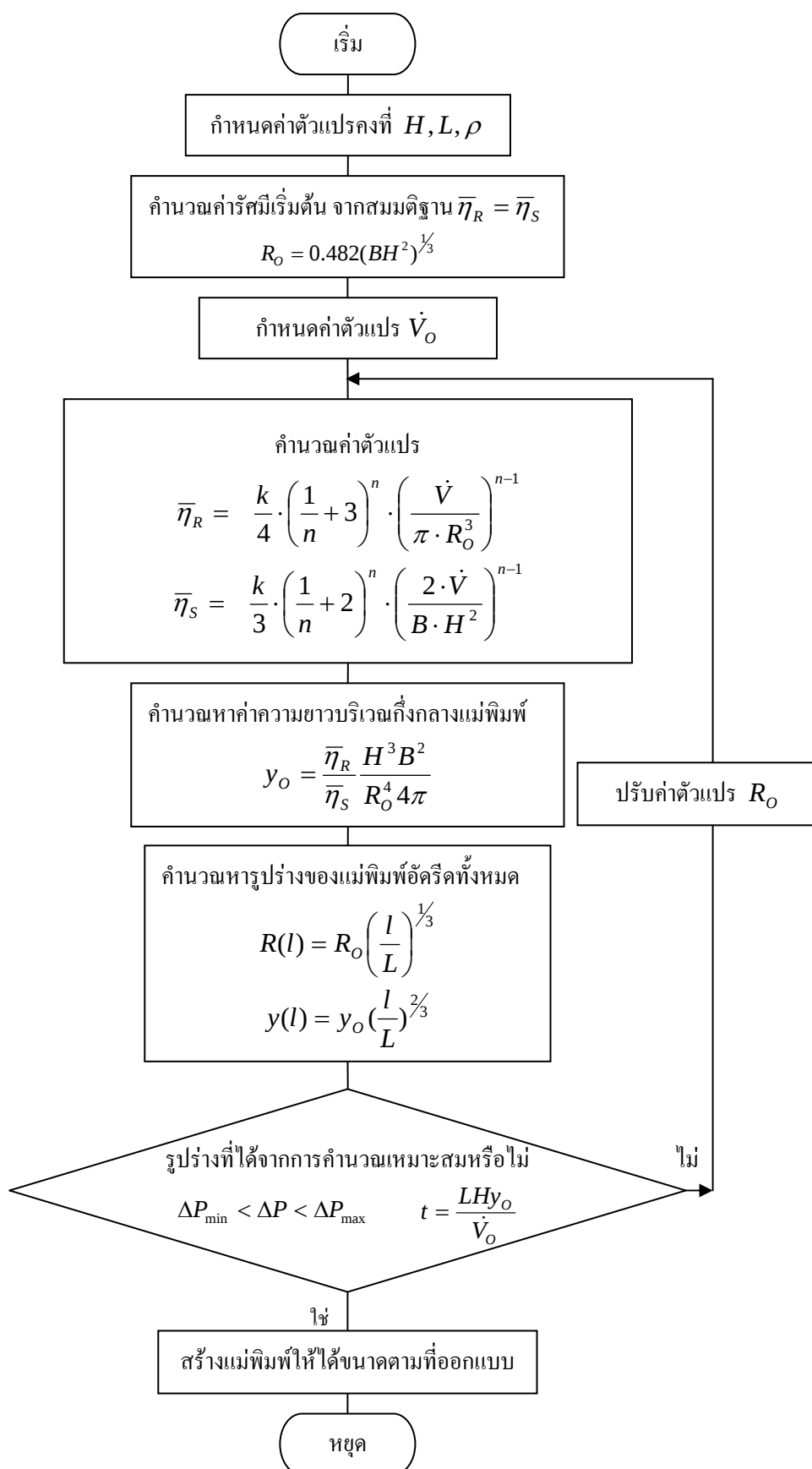
นำค่ารัศมี $R(l)$ ที่ได้จากสมการที่ 2-1 และค่าความยาวของแม่พิมพ์ $y(l)$ จากสมการที่ 2-3 แทนค่าลงในสมการที่ 2-2 และทำการอินทิเกรตสมการจากนั้นทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$\Delta P = \left\{ \frac{12 \dot{V}_o \bar{\eta}_R L^{1/3}}{\pi R_o^4} \left(L^{2/3} - l^{2/3} \right) \right\} + \left\{ \left(\frac{12 \bar{\eta}_s \dot{V}_o}{L H^3} \right) \left(y_o \left(\frac{l}{L} \right)^{2/3} \right) \right\} \quad (3-18)$$

สมการที่ 3-18 เป็นสมการที่ใช้สำหรับการหาผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ΔP ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน ซึ่งผลต่างความดันที่ได้จะมีค่าเท่ากันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนในแผนภาพที่ 3-2

ซึ่งจากแผนภาพที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าเราสามารถตรวจสอบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อได้จากค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ (สมการที่ 3-18) โดยค่าที่คำนวณได้จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตการใช้งานของเครื่องอัดรีด $\Delta P_{\min} < \Delta P < \Delta P_{\max}$ ซึ่งถ้าผลการคำนวณที่ได้ออกมาอยู่นอกช่วงขอบเขตการใช้งาน ก็จะต้องทำการออกแบบใหม่ โดยการปรับค่าตัวแปร R_o

ถ้าผลต่างความดันที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า $\Delta P_{\max}$ เราสามารถที่จะลดค่าความดันที่เกิดขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า R_o ในทางกลับกันถ้าผลต่างดันที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า $\Delta P_{\min}$ เราสามารถที่จะเพิ่มค่าความดันที่เกิดขึ้นได้ โดยการลดค่า R_o ซึ่งการปรับตัวแปร R_o จะมีผลทำให้ค่า y_o เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปร R_o จะต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมในการใช้งานของค่า y_o และเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ในแม่พิมพ์ (Residential Time) จากสมการที่ 2-7 ด้วย



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัตรัดชนิดไม้วานเส้นโดยใช้การคำนวณ

3.2 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้การคำนวณ

ตัวอย่าง: วิศวกรโรงงานผลิตแผ่นพลาสติกในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง ได้รับคำสั่งให้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อผลิตพลาสติกแผ่นโพลีโพรไพลีนขนาดความกว้าง 2 เมตร และความหนา 0.005 เมตร โดยฉีดด้วยอัตราการไหล 250 กก./ชม. ด้วยเครื่องอัดรีด MITSUBISHI Model 80MSIII5E ปี ค.ศ. 1998 ที่มีอยู่ในโรงงานซึ่งสามารถให้แรงดันได้สูงสุดที่ 2000 kg/cm^2

จากภาคผนวก ก คุณสมบัติของพลาสติกเหลวโพลีโพรไพลีนที่อุณหภูมิ 190°C มีค่าความหนาแน่น 900 kg/m^3 และค่าคงที่สำหรับสมการเพาเวอร์ลอว์คือ $k = 48900 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2$ และ

$$n = 0.41$$

เริ่มต้นทำการคำนวณหาค่ารัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$R_o = 0.482 \cdot ((2 \text{ m}) \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2)^{1/3} = 17.76 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

ทำการคำนวณหาอัตราการไหลของปริมาตรจากอัตราการไหลของมวลที่กำหนด

$$\dot{V}_o = \frac{(250 \text{ kg/hr})}{2 \cdot (3600 \text{ s/hr}) \cdot (900 \text{ kg/m}^3)} = 38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

จากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลโดยใช้สมการที่ 3-9 และค่าตัวแทนความหนืดของช่องทางไหลโดยใช้สมการที่ 3-17 ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_R &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{4} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 3 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (17.76 \times 10^{-3} \text{ m})^3} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \\ \bar{\eta}_s &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{3} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 2 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{2 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{2 \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้สมการที่ 2-4

$$y_o = \frac{(15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) (5 \times 10^{-3} \text{ m})^3 (2 \text{ m})^2}{(23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) (17.76 \times 10^{-3} \text{ m})^4 4\pi} = 265 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

จากสมการที่ 2-1 จะได้ค่ารัศมีของท่อทางไหลภายใน ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดคือ

$$R(l) = (17.76 \text{ mm}) \left(\frac{l}{(1 \text{ m})} \right)^{1/3}$$

และจากสมการที่ 2-3 จะได้ค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดคือ

$$y(l) = (265 \text{ mm}) \left(\frac{l}{(1 \text{ m})} \right)^{2/3}$$

ถ้ารูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการคำนวณเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานได้ ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการคำนวณหาค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ΔP โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ 3-18 ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left\{ \frac{12 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})(15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)(1 \text{ m})^{1/3}}{\pi \cdot (17.76 \times 10^{-3} \text{ m})^4} \left((1 \text{ m})^{2/3} - (0.5 \text{ m})^{2/3} \right) \right\} \\ &+ \left\{ \frac{12 \cdot (23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{(1 \text{ m}) \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^3} \left(265 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \left(\frac{0.5 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right)^{2/3} \right) \right\} \\ &= 22.82 \text{ MPa} \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ที่ได้แสดงไว้ในตัวอย่างนี้เป็นการหาค่าผลต่างความดันบริเวณ $l = 0.5 \text{ m}$. และจากการคำนวณ ณ บริเวณอื่น ๆ ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ก็จะได้อาผลต่างความดันเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบคือ ต้องมีค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์เท่ากันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ และจากการคำนวณจะได้ผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเท่ากับ 22.82 MPa ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเครื่องอัดรีด MITSUBISHI Model 80MSIII5E ปี ค.ศ. 1998 ซึ่งมีค่าความดันสูงสุดที่ $\Delta P_{\max} = 200 \text{ MPa}$ ได้ จากนั้นทำการตรวจสอบเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้พลาสติกเสื่อมคุณภาพลงโดยจะมีค่าเท่ากับ $t = \frac{(1 \text{ m})(5 \times 10^{-3} \text{ m})(265 \times 10^{-3} \text{ m})}{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})} = 34.34 \text{ s}$

ในกรณีที่รูปร่างที่ได้จากการคำนวณไม่เหมาะสม เช่นถ้าต้องการให้ความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีขนาดน้อยกว่า 250 มม. แต่จากการออกแบบจะให้ความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด 265 มม. ดังนั้นเราจะต้องทำการคำนวณใหม่ให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งการออกแบบแก้ไขใหม่ทำได้โดยปรับขนาดรัศมีท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ R_0 โดยถ้าต้องการให้ความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีขนาดลดลง เราจะต้องเพิ่มขนาดรัศมีท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ ดังนั้นในตัวอย่างนี้เราก็สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มขนาดรัศมีท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ และทำการเริ่มต้นขั้นตอนการออกแบบใหม่ดังนี้

เริ่มต้นคำนวณใหม่โดยการกำหนดค่ารัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดให้มีค่าเพิ่มขึ้น

$$R_o = 20 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

จากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลโดยใช้สมการที่ 3-9 และค่าตัวแทนความหนืดของช่องทางไหลโดยใช้สมการที่ 3-17 ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{\eta}_R &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{4} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 3 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s})}{\pi \cdot (20 \times 10^{-3} \text{ m})^3} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 19.01 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \\ \bar{\eta}_S &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{3} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 2 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{2 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s})}{2 \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2\end{aligned}$$

จากนั้นการคำนวณหาค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้สมการที่ 2-4

$$y_o = \frac{(19.01 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)}{(23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)} \frac{(5 \times 10^{-3} \text{ m})^3 (2 \text{ m})^2}{(20 \times 10^{-3} \text{ m})^4 4\pi} = 203 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

จากสมการที่ 2-1 จะได้ค่ารัศมีของท่อทางไหล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดคือ

$$R(l) = (20 \text{ mm}) \left(\frac{l}{(1 \text{ m})} \right)^{1/3}$$

และจากสมการที่ 2-3 จะได้ค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดคือ

$$y(l) = (203 \text{ mm}) \left(\frac{l}{(1 \text{ m})} \right)^{2/3}$$

จะเห็นว่าค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีขนาดลดลงมาเป็น 203 มม. ซึ่งน้อยกว่า 250 มม ตามที่เราต้องการ และสิ่งที่ได้มาจากการเพิ่มค่ารัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดจะทำให้ค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจากการคำนวณค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีดจะมีค่าเท่ากับ 17.51 MPa สามารถนำไปใช้กับเครื่องอัดรีด MITSUBISHI Model 80MSIII5E ปี ค.ศ. 1998 ที่มีอยู่ในโรงงานได้เช่นกัน เวลาที่พลาสติกไหลอยู่ภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเท่ากับ $t = \frac{(1 \text{ m})(5 \times 10^{-3} \text{ m})(203 \times 10^{-3} \text{ m})}{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s})} = 26.31 \text{ s}$

จากตัวอย่างขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ตามแผนภาพที่ 3-2 พบว่าในทางปฏิบัติถ้าผลการคำนวณหาผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์หรือรูปร่างที่ได้มีค่าที่ไม่เหมาะสม จะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบ R_o ใหม่ทุกครั้ง ซึ่งจะเกิดความไม่สะดวกในการออกแบบ

เนื่องจากต้องเริ่มต้นขั้นตอนในการคำนวณใหม่ทั้งหมด ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ขึ้น เพื่อทำให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนค่าเพื่อการออกแบบ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.3 การวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติ

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นนั้น จะวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ (สมการที่ 3-18) และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จะทำการจัดรูปตัวแปรใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของของไหล $\bar{v}$ ในท่อทางไหลจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของไหล $\dot{V}_O$ และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นภายในท่อทางไหลได้เท่ากับ

$$\bar{v}_R = \frac{\dot{V}_O}{\pi \cdot R^2(l)} \quad (3-19)$$

ในทำนองเดียวกันความเร็วที่เกิดขึ้นภายในช่องทางไหลจะมีค่าเท่ากับ

$$\bar{v}_S = \frac{\dot{V}_O}{L \cdot H} \quad (3-20)$$

เมื่อนำสมการที่ 3-19 และสมการที่ 3-20 แทนค่ากลับไปในสมการที่ 3-18 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์เพื่อหาผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดใหม่ได้คือ

$$\Delta P = \left\{ \frac{12\bar{v}_R\bar{\eta}_R L^{1/3}}{R_O^2} \left(L^{2/3} - l^{2/3} \right) \right\} + \left\{ \left(\frac{12\bar{v}_S\bar{\eta}_S}{H^2} \right) \left(y_o \left(\frac{l}{L} \right)^{2/3} \right) \right\} \quad (3-21)$$

จากสมการที่ 3-21 จะเห็นได้ว่าผลต่างความดันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ จะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างผลต่างความดันที่เกิดขึ้นในช่องทางไหล

$$\Delta P_R = \frac{12\bar{v}_R\bar{\eta}_R L^{1/3}}{R_O^2} \left(L^{2/3} - l^{2/3} \right) \quad (3-22)$$

และผลต่างความดันที่เกิดขึ้นในช่องทางไหล

$$\Delta P_S = \left(\frac{12\bar{v}_S\bar{\eta}_S}{H^2} \right) \left(y_o \left(\frac{l}{L} \right)^{2/3} \right) \quad (3-23)$$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-21 นั้นจะทำได้โดยการจัดรูปตัวแปรใหม่ ซึ่งเราสามารถที่จะวิเคราะห์ผลต่างความดันได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่หนึ่งผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดจากท่อทางไหลอย่างเดียว ซึ่งสามารถหาได้โดยการแทนค่า $l = 0$ ลงไปในสมการที่ 3-21 จะได้ค่าผลต่างความดันตกคร่อมคือ

$$\Delta P = \Delta P_{l=0} = \frac{12 \cdot \bar{v}_R \cdot \bar{\eta}_R \cdot L}{R_O^2} \quad (3-24)$$

ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์จากสมการที่ 3-24 ได้เป็น

$$\Delta P = f_R(\bar{v}_R, \bar{\eta}_R, L, R_O) \quad (3-25)$$

โดยพบว่าค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อทางไหล ค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด ความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด และรัศมีท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

กรณีที่สองผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดจากช่องทางไหลอย่างเดียว ซึ่งสามารถหาได้โดยการแทนค่า $l = L$ ลงไปในสมการที่ 3-21 จะได้ค่าผลต่างความดันตกคร่อมคือ

$$\Delta P = \Delta P_{l=L} = \frac{12 \cdot \bar{\eta}_S \cdot \bar{v}_S \cdot y_O}{H^2} \quad (3-26)$$

ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์จากสมการที่ 3-26 ได้เป็น

$$\Delta P = f_S(\bar{v}_S, \bar{\eta}_S, H, y_O) \quad (3-27)$$

โดยพบว่าค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วเฉลี่ยภายในช่องทางไหล ค่าตัวแทนความหนืดของช่องทางไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด ความหนาของแม่พิมพ์อัดรีด ความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางด้านกลศาสตร์ของไหล ค่าความดันที่เกิดขึ้นของของไหลจะเป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นของของไหล ρ ซึ่งในกรณีนี้ความหนาแน่นของของไหลแบบอัดตัวไม่ได้จะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับสมการที่ 3-25 และสมการที่ 3-27 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ใหม่ได้ ดังนี้

ความสัมพันธ์จากสมการที่ 3-25 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta P = f_R(\bar{v}_R, \bar{\eta}_R, L, R_O, \rho) \quad (3-28)$$

ความสัมพันธ์จากสมการที่ 3-27 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta P = f_S(\bar{v}_S, \bar{\eta}_S, H, y_O, \rho) \quad (3-29)$$

จากทฤษฎีจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติด้วยวิธี Buckingham Pi เราสามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-28 และสมการที่ 3-29 ได้คือ

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho \cdot \bar{v}_R^2} \right) = \phi_R \left(\left(\frac{\rho \cdot \bar{v}_R \cdot R_O}{\bar{\eta}_R} \right), \left(\frac{R_O}{L} \right) \right) \quad (3-30)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho \cdot \bar{v}_S^2} \right) = \phi_S \left(\left(\frac{\rho \cdot \bar{v}_S \cdot H}{\bar{\eta}_S} \right), \left(\frac{H}{y_O} \right) \right) \quad (3-31)$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งานจะกำหนดตัวแปรที่ใช้เขียนแสดงกลุ่มตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$Cp_R = \left(\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}_R^2} \right) \quad (3-32)$$

$$Re_R = \left(\frac{\rho \cdot \bar{v}_R \cdot R_O}{\bar{\eta}_R} \right) \quad (3-33)$$

$$Cp_S = \left(\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}_S^2} \right) \quad (3-34)$$

$$Re_S = \left(\frac{\rho \cdot \bar{v}_S \cdot H}{\bar{\eta}_S} \right) \quad (3-35)$$

จากสมการที่ 3-30 และสมการที่ 3-31 พบว่าภายในกลุ่มตัวแปรไร้มิติจะมีค่าของ R_O , $\bar{v}_R$ และ $\bar{v}_S$ รวมอยู่ในกลุ่มด้วย ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของรัศมีกึ่งกลางของแม่พิมพ์อัดรีด R_O ขึ้นจะทำให้ค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติดังกล่าวเปลี่ยนแปลงค่าตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดความลำบากในการกำหนดขอบเขตของค่ารัศมีกึ่งกลางของแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นจึงได้ทำการกำจัดค่าดังกล่าวออกไปด้วยวิธีจัดรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติขึ้นมาใหม่ เพื่อความสะดวกในการกำหนดขอบเขตของการกำหนดค่ารัศมีกึ่งกลางของแม่พิมพ์อัดรีด โดยกลุ่มตัวแปรที่ได้จัดรูปขึ้นมาใหม่ประกอบไปด้วย

$$\frac{Cp_R \cdot Re_R^2}{\left(\frac{R_O}{L} \right)^2} = \left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right) \quad (3-36)$$

$$Cp_S \cdot Re_S^2 = \left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_S^2} \right) \quad (3-37)$$

$$Re_R \cdot \frac{R_O}{L} = \left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right) \quad (3-38)$$

$$Re_S \cdot \frac{L}{L} = \left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_S \cdot L} \right) \quad (3-39)$$

โดย $\dot{V}_O$ ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของไหลกับอัตราการไหลของไหลในสมการที่ 3-19 และสมการที่ 3-20 ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right) = \psi_R \left(\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right), \left(\frac{R_O}{L} \right) \right) \quad (3-40)$$

$$\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_S^2} \right) = \psi_S \left(\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_S \cdot L} \right), \left(\frac{H}{y_O} \right) \right) \quad (3-41)$$

จากสมการที่ 3-40 และสมการที่ 3-41 เราสามารถที่จะนำความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติมาเขียนกราฟได้ กล่าวคือจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-40 จะพบว่าตัวแปรตาม

$$\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right) \text{ เป็นฟังก์ชันของกลุ่มตัวแปรอิสระสองกลุ่มคือ } \left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right) \text{ และ } \left(\frac{R_O}{L} \right) \text{ ในการ}$$

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรทั้งสาม เราจะต้องกำหนดให้กลุ่มตัวแปรอิสระตัวใดตัวหนึ่งเป็นค่าคงที่และพลอตความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เหลืออีกสองกลุ่ม โดยในงานวิจัยนี้

เลือกที่จะกำหนดให้ $\left(\frac{R_O}{L} \right)$ เป็นกลุ่มตัวแปรคงที่ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรอีก

สองกลุ่มที่เหลืออยู่ ดังนั้นค่า $\left(\frac{R_O}{L} \right)$ หนึ่งค่าสามารถเขียนกราฟได้หนึ่งเส้น และเมื่อทำการปรับค่า

$\left(\frac{R_O}{L} \right)$ ก็จะสามารถเขียนเส้นแสดงความสัมพันธ์ขึ้นมาใหม่ได้อีก ดังนั้นกราฟที่ได้ก็จะสามารถ

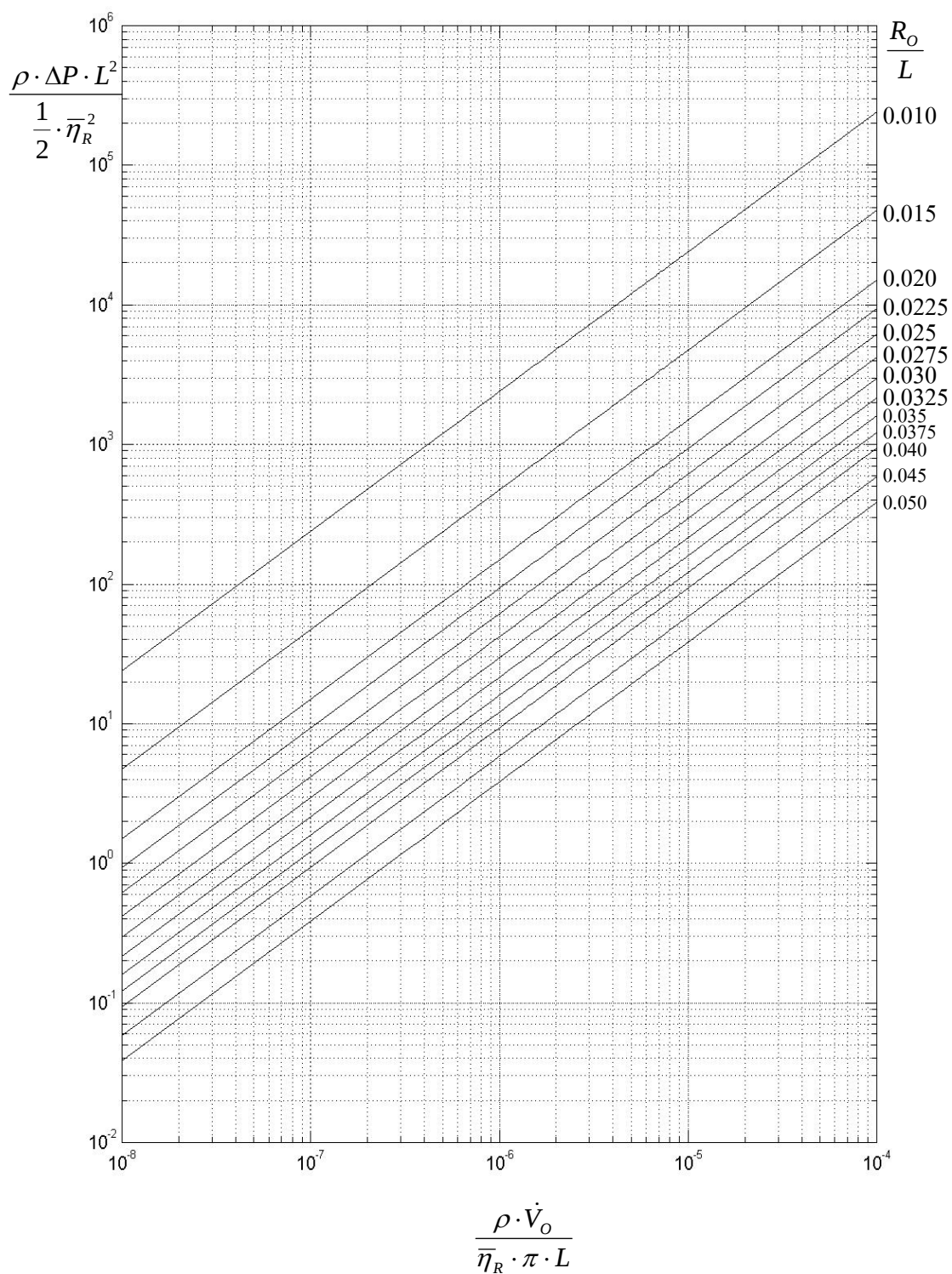
เขียนเป็นชุดของความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right)$ และ $\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right)$ โดยที่ในแต่ละเส้นนั้น

จะมีค่า $\left(\frac{R_O}{L} \right)$ คงที่ เช่นเดียวกันในสมการที่ 3-41 ก็จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็นชุดของ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_S^2} \right)$ และ $\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_S \cdot L} \right)$ โดยที่ในแต่ละเส้นนั้นจะมีค่า $\left(\frac{H}{y_O} \right)$ คงที่

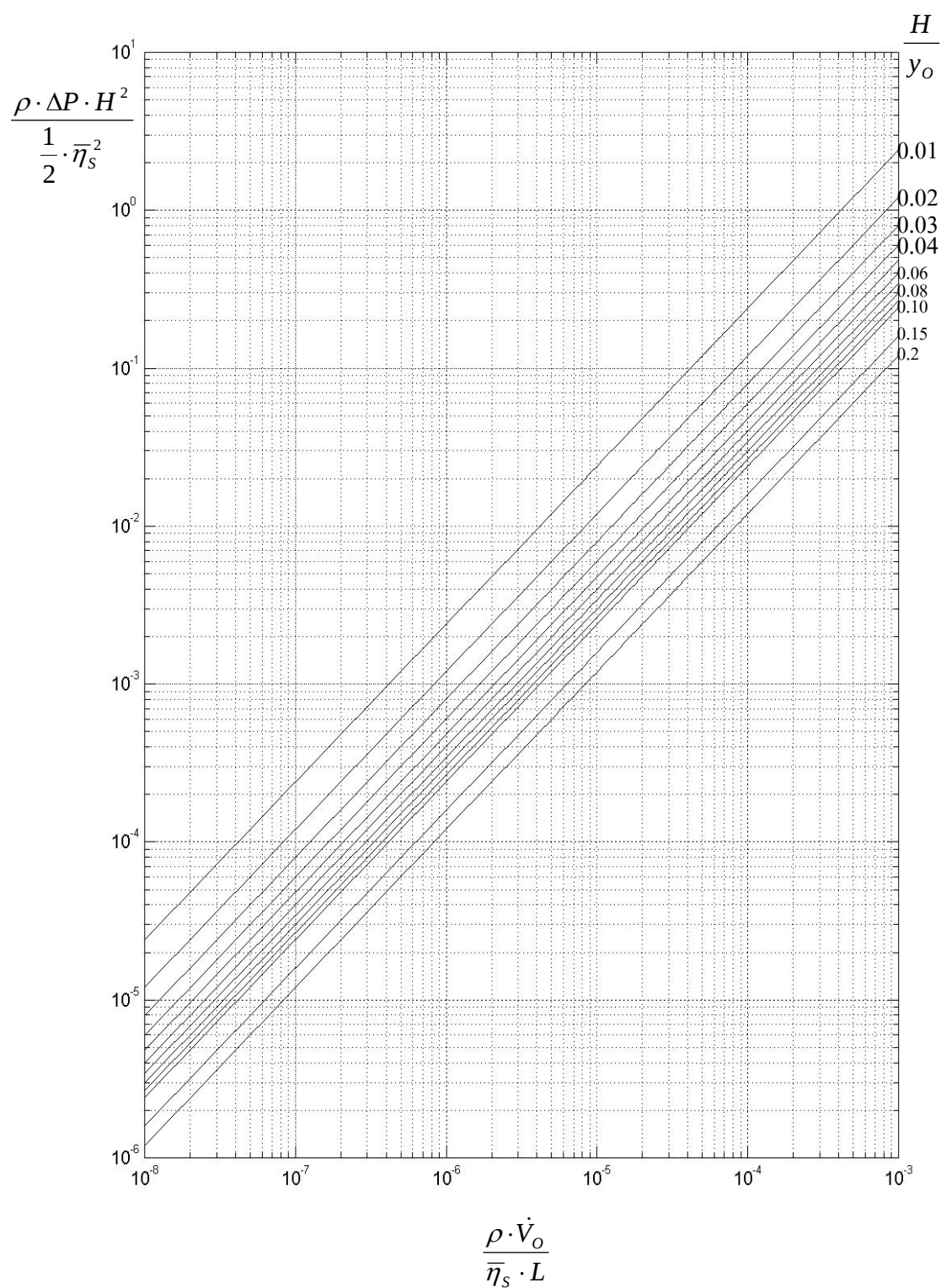
เมื่อนำสมการที่ 3-18 มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการที่ 3-40 และสมการที่ 3-41 สามารถที่จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ออกแบบแม่พิมพ์ได้ดังภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 ในที่นี้จะใช้คุณสมบัติของพลาสติก HDPE ที่ 453 K ซึ่งมีค่า ความหนาแน่น 950 kg/m^3 , ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี $k \text{ 6190 N} \cdot \text{s}^n/\text{m}^2$ และดัชนีชี้กำลัง $n \text{ 0.56}$ ในการแทนค่าสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (ดูภาคผนวก ก และ ข) ซึ่งช่วงการใช้งานของกราฟที่ถูก

กำหนดโดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{R_o}{L}$ จะมีค่าระหว่าง 0.01 ถึง 0.05 โดยที่ถ้าค่า $\frac{R_o}{L}$ อยู่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ จะทำให้รูปร่างของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน นั่นคือถ้า $\frac{R_o}{L}$ มีค่าเท่ากับ 0.01 แม่พิมพ์ที่ได้จะมีขนาดความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์มากทำให้รูปร่างใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งเป็นรูปร่างที่ทำให้แม่พิมพ์มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น และทำให้ต้องใช้เวลาที่พลาสติกไหลอยู่ภายในแม่พิมพ์อัดรีดมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้พลาสติกเสื่อมคุณภาพลงได้ ในทางกลับกันถ้า $\frac{R_o}{L}$ มีค่าเท่ากับ 0.05 จะทำให้แม่พิมพ์ที่ได้มีขนาดความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์น้อยทำให้รูปร่างใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ชนิดรูปตัวที ซึ่งเป็นรูปร่างที่เราไม่ต้องการ กราฟของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{H}{y_o}$ ก็จะถูกกำหนดช่วงใช้งานด้วยเหตุผลเดียวกัน



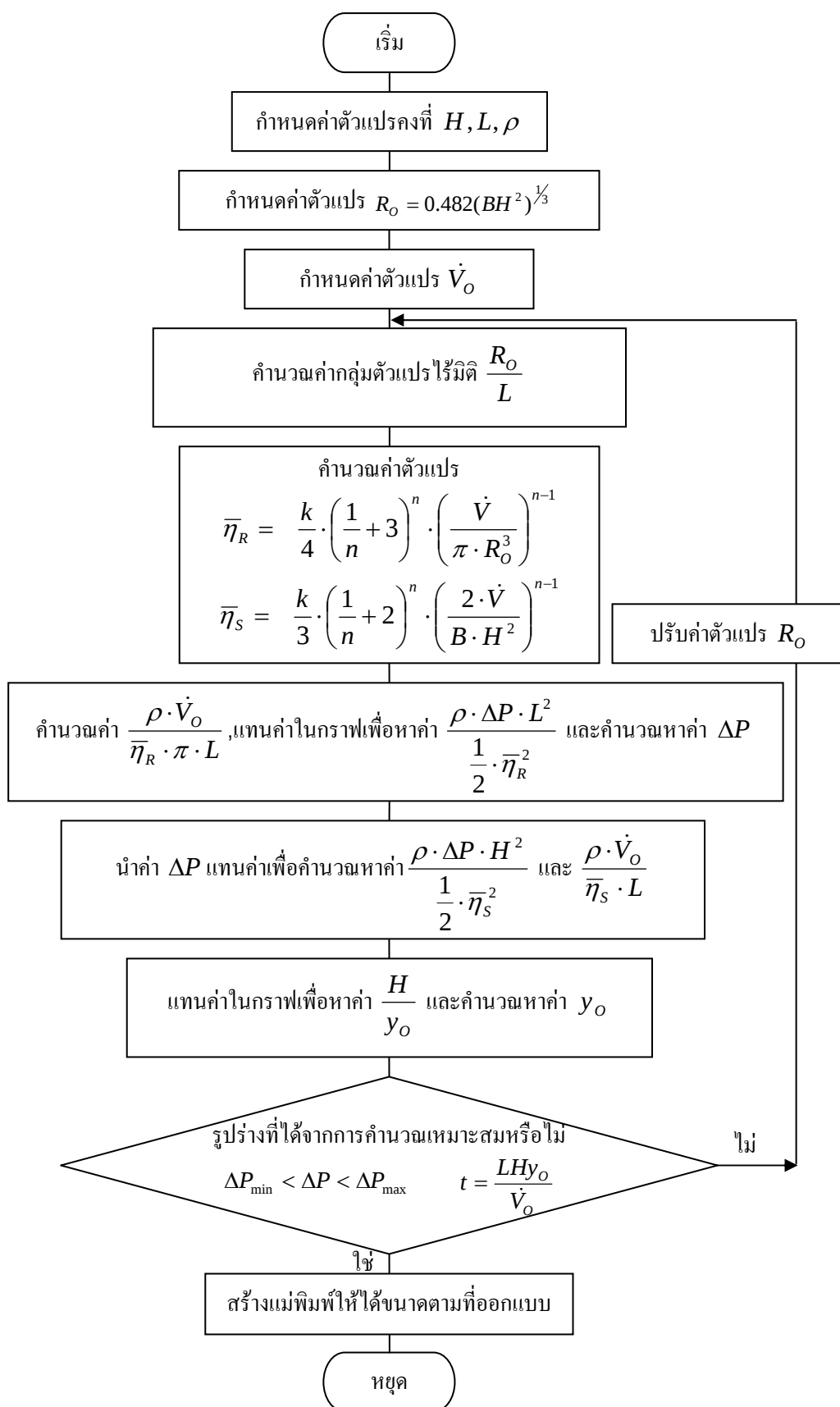
ภาพที่ 3-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ

ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-4}



ภาพที่ 3-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ

ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3}



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ

3.4 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้กราฟ

แผนภาพที่ 3-5 แสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้กราฟในภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 โดยขั้นตอนการออกแบบจะคล้ายคลึงกับการออกแบบแม่พิมพ์ในแผนภาพที่ 3-2 การใช้งานแผนภาพจะแสดงไว้ในตัวอย่างข้างล่างนี้

ตัวอย่าง: หัวข้อนี้จะเป็นการแสดงตัวอย่าง การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณสมการที่ 3-18 วิเคราะห์ร่วมกับความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติในสมการที่ 3-40 และสมการที่ 3-41 ซึ่งจะใช้ตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.2 เป็นเงื่อนไขในการออกแบบและใช้ขั้นตอนดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

จากตัวอย่างการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด จะใช้การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อฉีดโพลีโพรไพลีน ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีความหนาแน่น 900 kg/m^3 และค่าคงที่สำหรับสมการเพาเวอร์ลอว์คือ $k = 48900 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2$ และ $n = 0.41$ โดยต้องการฉีดพลาสติกแผ่นให้มีขนาดความกว้าง 2 เมตร และมีความหนา 0.005 เมตร ฉีดด้วยอัตราการไหล 250 กก./ชม.

เริ่มต้นทำการคำนวณหาค่ารัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$R_o = 0.482 \cdot ((2 \text{ m}) \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2)^{1/3} = 17.76 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

จะได้ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{R_o}{L}$ คือ

$$\frac{R_o}{L} = \frac{(17.76 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1 \text{ m})} = 17.76 \times 10^{-3} \approx 0.018$$

ทำการคำนวณหาอัตราการไหลของปริมาตรจากอัตราการไหลของมวลที่กำหนด

$$\dot{V}_o = \frac{(250 \text{ kg/hr})}{2 \cdot (3600 \text{ s/hr}) \cdot (900 \text{ kg/m}^3)} = 38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

จากนั้นทำการหาค่าตัวแทนความหนืดจากสมการที่ 3-9 และสมการที่ 3-17 ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

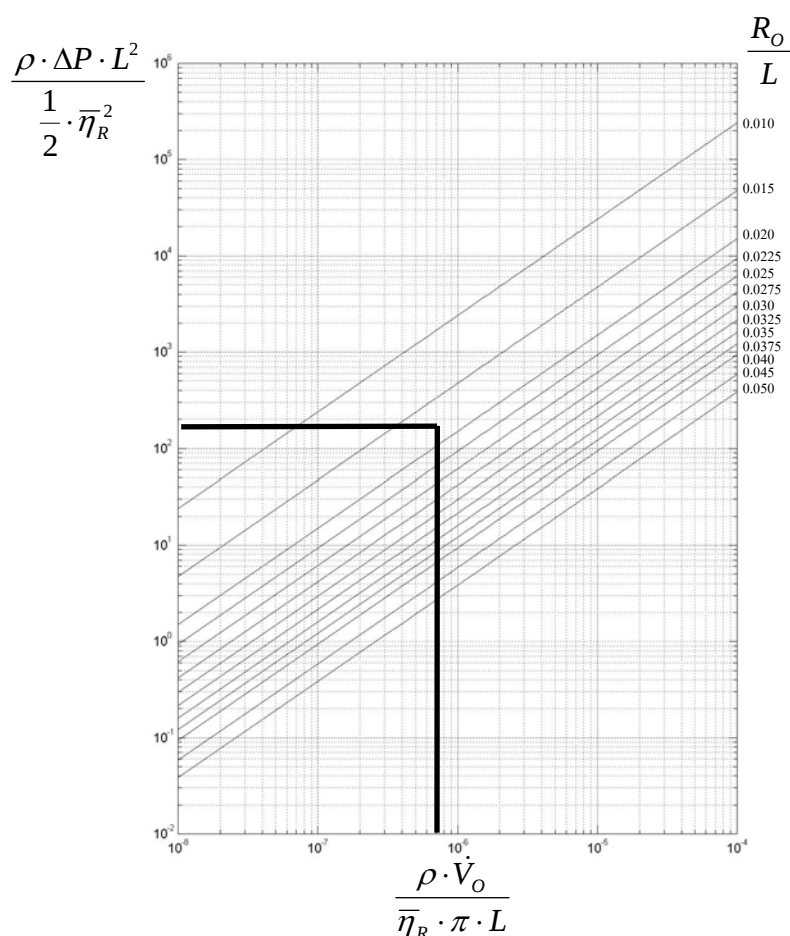
$$\begin{aligned} \bar{\eta}_R &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{4} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 3 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (17.76 \times 10^{-3} \text{ m})^3} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \\ \bar{\eta}_S &= \frac{(48.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2)}{3} \cdot \left(\frac{1}{0.41} + 2 \right)^{0.41} \cdot \left(\frac{2 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{2 \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2} \right)^{(0.41-1)} \\ &= 23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าตัวแทนความเค้นแล้วขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณหาค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ ที่
จะต้องนำไปใช้ในกราฟ ซึ่งกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ต้องการคือ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} = \frac{(900 \frac{kg}{m^3}) \cdot (38.58 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s})}{(15.41 \times 10^3 \frac{N \cdot s}{m^2}) \cdot \pi \cdot (1 m)} = 0.7174 \times 10^{-6}$$

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณคือ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ และ $\frac{R_O}{L}$

แทนค่าลงในกราฟเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 3-6 แสดงการหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ

จากกราฟเมื่อใช้ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} = 0.7174 \times 10^{-6}$ และ $\frac{R_o}{L} \approx 0.018$ จะได้

ค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \approx 170$ และทำการคำนวณหาค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะได้ค่า

คือ

$$\Delta P = \frac{170 \cdot (15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)^2}{2 \cdot (900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (1 \text{ m})^2} = 22.43 \text{ MPa}$$

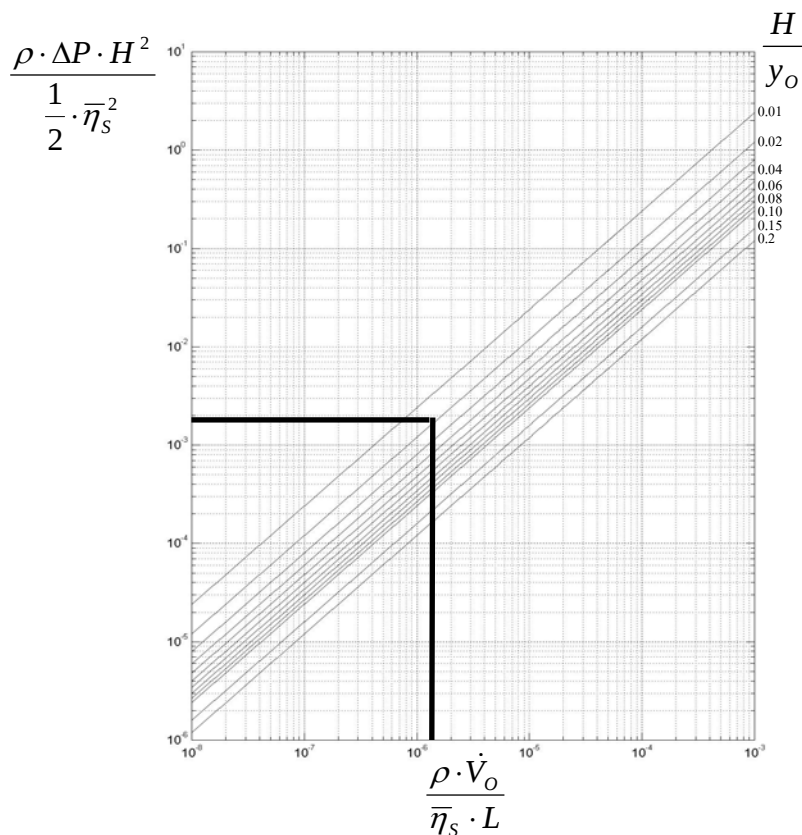
จากนั้นนำค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้ไปหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2} = \frac{(900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (22.43 \text{ MPa}) \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{\frac{1}{2} \cdot (23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)^2} = 1.87 \times 10^{-3}$$

ทำการคำนวณหาค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ เพื่อนำไปใช้งานในกราฟ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L} = \frac{(900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s})}{(23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) \cdot (1 \text{ m})} = 1.49 \times 10^{-6}$$

นำค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$ และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ ที่ได้แทนลงในกราฟเพื่อหาค่าของ $\frac{H}{y_o}$ ดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 3-7 แสดงการหาค่า $\frac{H}{y_o}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ

จากกราฟเมื่อใช้ค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \eta_s^2} = 1.87 \times 10^{-3}$ และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_s \cdot L} = 1.49 \times 10^{-6}$ จะได้

ค่า $\frac{H}{y_o} \approx 0.019$ และทำการคำนวณหาความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ซึ่งจะได้ค่าคือ

$$y_o = \frac{(5 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.019} = 263 \times 10^{-3} \text{ m}$$

จากผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ จะได้ค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดเท่ากับ 22.43 MPa และค่าความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 263 มม. ซึ่งผลการออกแบบที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการออกแบบโดยการคำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าที่ได้จากกราฟ และเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเท่ากับ $t = \frac{(1 \text{ m})(5 \times 10^{-3} \text{ m})(263 \times 10^{-3} \text{ m})}{(38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})} = 34.09 \text{ s}$

ผลการออกแบบที่ใช้กราฟของ Görmar จากการหาเส้นกับคุณสมบัติของโพลิโพรไพลีนจะได้ค่าคงที่ A และ C ของ Prandtl-Eyring ($\dot{\gamma} = C \sinh\left(\frac{\tau}{A}\right)$) คือ 41200 Pa และ 1 s^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจะนำค่าดังกล่าวแทนค่าหากกลุ่มตัวแปรไร้มิติ K_R และ K_S จะได้ค่าดังนี้

$$K_R = \frac{4 \cdot \dot{V}_O}{\pi \cdot R_O^3 \cdot C} = \frac{4 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (17.76 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \cdot (1 \text{ s}^{-1})} = 8.77$$

$$K_S = \frac{6 \cdot \dot{V}_O}{H^2 \cdot C \cdot L} = \frac{6 \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})}{(5 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot (1 \text{ s}^{-1}) \cdot (1 \text{ m})} = 9.26$$

$$\frac{R_O}{L} = \frac{(17.76 \times 10^{-3} \text{ m})}{1} \approx 0.018$$

จากกราฟจะได้ค่า $\frac{\Delta P}{A} = 550$ แทนค่ากลับเพื่อหาค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีด จะได้ค่าคือ

$$\Delta P = 550 \cdot 41200 \text{ Pa} = 22.66 \text{ MPa}$$

เปรียบเทียบกับผลการออกแบบโดยใช้กราฟที่ได้จากการคำนวณ กับผลการออกแบบโดยใช้กราฟของ Görmar พบว่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์มีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าจากกราฟ

3.5 การวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรม Fluent

หัวข้อนี้จะแสดงถึงการสร้างกราฟ ที่ใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น เช่นเดียวกับกราฟที่แสดงในภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 แต่จะหาค่าของตัวแปรที่ใช้จัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยวิธีการทดสอบการไหลโดยใช้โปรแกรม Fluent แทนการคำนวณด้วยสมการที่ 3-18

3.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรม Fluent

เนื่องจากการเก็บข้อมูลโดยตรงจากการทดลองจริง จะต้องสร้างแม่พิมพ์ให้ได้ขนาดและจำนวนตามต้องการที่จะใช้สำหรับสร้างกราฟให้เหมือนกับภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 โดยที่แม่พิมพ์ 1 ตัวจะแสดงความสัมพันธ์ของกราฟในภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 ได้เพียง 1 เส้นเท่านั้น ดังนั้นในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ทั้งหมดให้ครบตามภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 จะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงมาก แต่ถ้าใช้การจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นทำให้สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ ส่วนโปรแกรม Fluent ที่เลือกใช้สำหรับการวิเคราะห์เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถเพียงพอที่จะกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ [12]

- (1) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ
- (2) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบไม่อัดตัวหรือการไหลแบบอัดตัว

(3) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบสภาวะคงตัว (Steady-State) และไม่คงตัว (Transient)

(4) จำนวนการไหลได้ทั้งชนิดราบเรียบ (Laminar) และปั่นป่วน (Turbulent)

(5) จำนวนการไหลของวัสดุประเภทนิวทอนเนียนหรือนอนนิวทอนเนียน

จะเห็นได้ว่าความสามารถของโปรแกรม Fluent ครอบคลุมสมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1

3.5.1.1 สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณ

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3-42)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equations)

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \vec{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (3-43)$$

โดยที่ค่า ρ คือค่าของความหนาแน่นของวัสดุ, $\vec{v}$ คือเวกเตอร์ความเร็วของวัสดุ, $\vec{A}$ คือเวกเตอร์แสดงพื้นที่หน้าตัดที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล, I คือเมตริกซ์เอกลักษณ์, $\vec{\tau}$ คือค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน (Shear Stress), $\vec{F}$ คือเวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับวัสดุ, V คือปริมาตรควบคุมของวัสดุ โดยมีสมการกึ่งทฤษฎีสำหรับของไหลนิวทอนเนียนชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Newtonian Fluids) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน ($\vec{\tau}$) และ เทนเซอร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Rate-of-Deformation Tensor ($\vec{\bar{D}}$)) คือ

$$\vec{\tau} = \mu \vec{\bar{D}} \quad (3-44)$$

ซึ่งค่าสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของ $\vec{\bar{D}}$ กำหนดโดย

$$D_{ij} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3-45)$$

โดย u_i คือ ความเร็วตามแนวแกน i , u_j คือ ความเร็วตามแนวแกน j , x_i คือ ระยะทางตามแนวแกน i , x_j คือ ระยะทางตามแนวแกน j , และสำหรับของไหลนอนนิวทอนเนียน ค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน เขียนอยู่ในรูปของความหนืด (η) ได้ดังนี้

$$\vec{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \vec{\bar{D}} \quad (3-46)$$

ในโปรแกรม Fluent ค่าของ η ถูกกำหนดให้เป็น ฟังก์ชันของอัตราเค้นเฉือน ($\dot{\gamma}$) และ อัตราเค้นเฉือนเป็นความสัมพันธ์กับค่าของ Second Invariants ของ $\vec{\bar{D}}$ ถูกกำหนดโดย

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\vec{\bar{D}} : \vec{\bar{D}}} \quad (3-47)$$

โปรแกรม Fluent ได้เตรียมรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราเค้นเฉือนไว้ 4 รูปแบบคือ Power Law, Carreau Model for Pseudo-Plastics, Cross Model, และ Heschel-Bulkley Model for Birgham Plastics

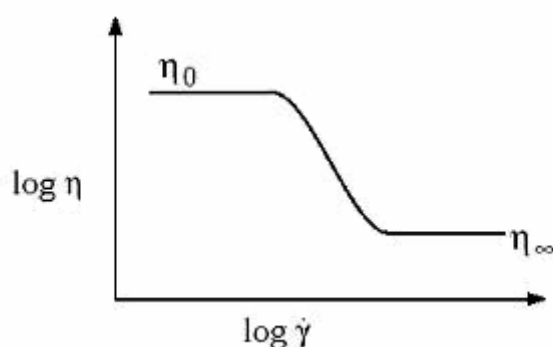
ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้สมการเพาเวอร์ลอว์ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)}e^{(T_0/T)} \quad (3-48)$$

เมื่อ k คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency Index) n คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-Law Index), T_0 คือค่าของอุณหภูมิอ้างอิง (273 K), T คือค่าของอุณหภูมิของวัสดุ และในโปรแกรมยังสามารถที่จะกำหนดขอบเขตของค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่า η ได้ดังนี้

$$\eta_\infty < \eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)}e^{(T_0/T)} < \eta_0 \quad (3-49)$$

โดยที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ 3-49 จะแสดงในภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราเฉือน
ที่ใช้ในโปรแกรม Fluent

โดยคุณสมบัติของวัสดุถูกกำหนดได้ด้วยค่า n กล่าวคือ $n = 1$ เป็นค่าความหนืดของวัสดุนิวทอนเนียน, $n > 1$ เป็นค่าความหนืดของวัสดุชนิดนิวทอนเนียนแบบ Shear-Thickening (Dilatant Fluids), และ $n < 1$ เป็นค่าความหนืดของวัสดุชนิดนิวทอนเนียนแบบ Shear-Thinning (Pseudo-Plastics) โดยถ้าต้องการจำลองการไหลแบบอุณหภูมิคงที่เราจะกำหนดค่า $T_0 = 0$

ซึ่งการคำนวณสมการสมการความต่อเนื่อง สมการการเคลื่อนที่ และสมการกึ่งทฤษฎีในโปรแกรม Fluent จะใช้การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งแบ่งแยกหน่วยย่อยและคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์โวลุ่ม (Finite Volume)

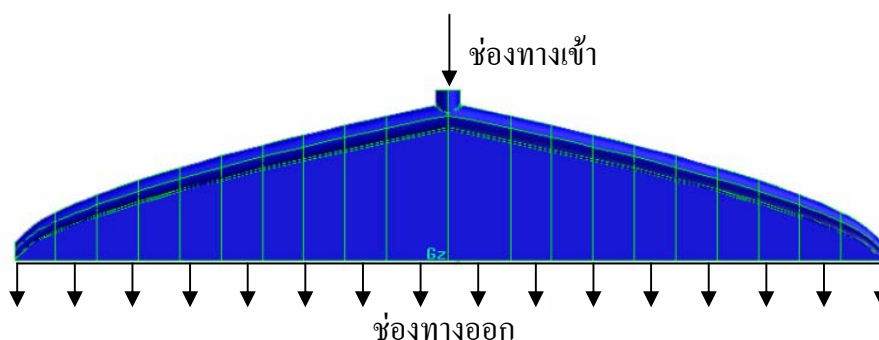
3.5.1.2 วิธีไฟไนท์โวลุ่ม (Finite Volume)

วิธีไฟไนท์โวลุ่มจะใช้สมการอนุรักษ์ (Conservation Equation) ที่อยู่ในรูปของการอินทิเกรต (Integral Form) แสดงในสมการที่ 3-42 และสมการที่ 3-43 เป็นสมการเริ่มต้น โดยที่ขอบเขตของบริเวณในการหาคำตอบจะถูกแบ่งให้เป็นปริมาตรควบคุม (Control Volume) ขนาดเล็ก ๆ โดยปริมาตรควบคุมย่อยเหล่านั้นจะต้องประพฤติตัวเป็นไปตามสมการอนุรักษ์ โดยจะใช้จุดศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละปริมาตรเป็นตัวแทนเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นค่าที่อินเทอร์โพลเลต (Interpolate) มาจากพื้นผิวของปริมาตรควบคุม

วิธีไฟไนท์โวลุ่มสามารถใช้งานกับการแบ่งโครงสร้างของรูปร่างย่อย (Mesh) ได้ทุกชนิด ดังนั้นจึงสามารถใช้งานได้ดีกับงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และเนื่องจากวิธีนี้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและง่ายต่อการเขียนโปรแกรมดังนั้นจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้หมู่วิศวกรที่จะนำไปใช้งาน [13]

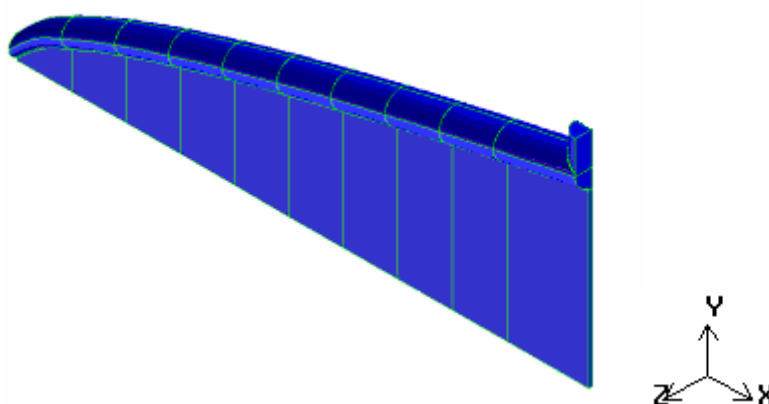
3.5.2 แบบจำลองที่ใช้ทดสอบการไหลในโปรแกรม Fluent

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการไหลในงานวิจัยชิ้นนี้ จะสร้างขึ้นมาจากเอ็กทรูเดท (Extrudate) ซึ่งเป็นลักษณะรูปร่างของพลาสติกที่ไหลอยู่ภายในแม่พิมพ์อัดรีด โดยรูปร่างของแบบจำลองจะสร้างให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล $R(z)$ ตามสมการที่ 2-1 และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางไหล $y(z)$ ตามสมการที่ 2-3 ตัวอย่างของแบบจำลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 แสดงรูปร่างของช่องทางไหลในแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการจำลองการไหล

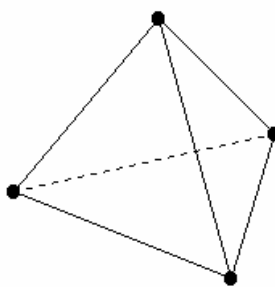
เนื่องจากรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อมีความสมมาตรใน 2 ระนาบตามทิศทางการไหล (ระนาบ XY และ YZ) และไม่สมมาตรในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ระนาบ XZ) ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ จะสร้างแค่เพียง $\frac{1}{4}$ ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด เพื่อลดจำนวน Mesh ที่ใช้ในการคำนวณ ทำให้สามารถทำการคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงรูปร่างที่ใช้ในการทดสอบการไหลตามภาพที่ 3-10



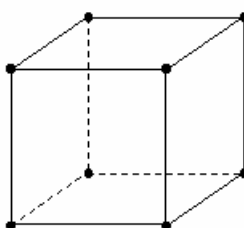
ภาพที่ 3-10 แสดงภาพแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม Fluent

ในที่นี้เราจะใช้โปรแกรม Gambit Version 2.0 สำหรับสร้างแบบจำลองและ Mesh เพื่อใช้สำหรับจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent เนื่องจากโปรแกรม Gambit เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการสร้าง Mesh ได้ดีและสามารถนำแบบจำลองจากโปรแกรม Gambit เข้าสู่โปรแกรม Fluent ได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการแก้ไขอีก ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการสร้างแบบจำลอง ทั้งสิ้น 25 แบบจำลอง โดยขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สร้างแบบจำลอง จะแสดงในตารางที่ 3-2 และตารางที่ 3-3 ตามลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการสร้างกราฟในหัวข้อที่ 3.3

เมื่อทำการสร้างรูปร่างของแบบจำลองที่จะใช้ในการทดสอบแล้ว จะทำการสร้าง Mesh ที่จะใช้กับแบบจำลองนั้น ซึ่งในแบบจำลองนี้จะเลือกใช้ Mesh 2 ชนิด คือ ชนิดที่หนึ่งทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral, ภาพที่ 3-11) ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีด้านแต่ละด้านเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีด้านประกอบทั้งสิ้นสี่ด้าน รูปทรงนี้เป็นรูปทรงที่สามารถนำมาใช้ในการสร้าง Mesh ในแบบจำลองได้ง่ายที่สุด เนื่องจากด้านที่เป็นรูปสามเหลี่ยมของรูปทรงนี้ ทำให้สามารถที่จะสร้างรูปทรงนี้ได้ในทุก ๆ ส่วนของปริมาตรที่เรากำหนด และชนิดที่สองทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral, ภาพที่ 3-12) ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีด้านแต่ละด้านเป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีด้านประกอบทั้งสิ้นหกด้าน แต่การสร้าง Mesh ในแบบจำลองโดยใช้รูปทรงนี้ทำได้ยากกว่าทรงเหลี่ยมสี่หน้าเนื่องจาก ในบางรูปทรงของแบบจำลองอาจจะไม่สามารถใช้รูปทรงนี้ในการสร้าง Mesh ได้



ภาพที่ 3-11 Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral)

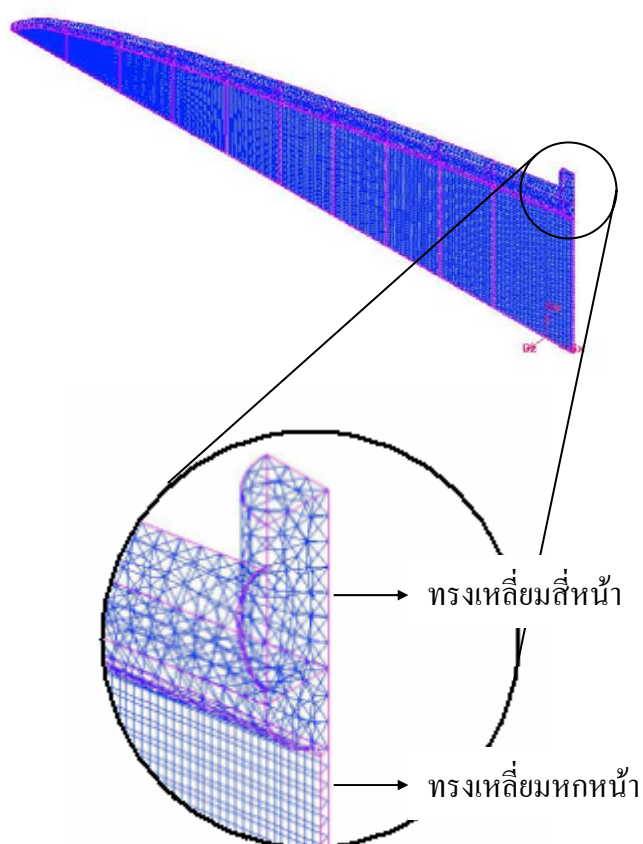


ภาพที่ 3-12 Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral)

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้ Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมหกหน้าในบริเวณช่องทางไหล เนื่องจากการกำหนด Mesh ที่ดีจะต้องสร้างให้พื้นผิวของปริมาตรของ Mesh นั้นตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังนั้นในบริเวณช่องทางไหลที่มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมตรง ๆ จึงสามารถที่จะสร้าง Mesh ชนิดนี้ได้ และในบริเวณท่อทางไหลซึ่งมีลักษณะเป็นท่อเรียวทำให้ไม่สะดวกในการกำหนดให้ Mesh บริเวณนี้มีรูปแบบเป็นทรงเหลี่ยมหกหน้า ดังนั้นเราจึงกำหนดให้ใช้ Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมสี่หน้าแทนในบริเวณท่อทางไหล ซึ่งจะสามารถกำหนดได้ง่ายกว่า ลักษณะของ Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดจะแสดงอยู่ในภาพที่ 3-13

ขนาดของ Mesh ที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.005 ม.เนื่องจากเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านของเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณ และด้านผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ กล่าวคือ ถ้ากำหนดให้ Mesh มีขนาดใหญ่กว่านี้จะไม่สามารถสร้าง Mesh ได้ในบริเวณของปลายแบบจำลองซึ่งมีรูปร่างของแบบจำลองเป็นท่อที่เรียวแหลม แต่ถ้ากำหนดให้ Mesh มีขนาดเล็กกว่านี้จะทำให้แบบจำลองนี้มีจำนวน Mesh ที่มากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้ Mesh ขนาด 0.005 ม. กับ Mesh ที่มีขนาดเล็กกว่านี้ จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ Mesh ขนาด 0.005 ม. ในการสร้างแบบจำลองนี้จะทำให้ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องในเวลาที่รวดเร็ว

การกำหนดให้ขนาดของ Mesh มีค่าเท่ากับ 0.005 ม. จะใช้กับแบบจำลองทั้ง 25 แบบจำลอง เนื่องจากรูปร่างของแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดทั้ง 25 แบบจำลองนั้นมีขนาดไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้ขนาดของ Mesh มีค่าเท่ากันหมดได้เพื่อความสะดวกในการสร้างแบบจำลอง จากผลของการกำหนดขนาดของ Mesh ให้มีค่าเท่ากับ 0.005 ม.คงที่เท่ากันหมดทุกแบบจำลองนั้น ทำให้จำนวนของ Mesh จะมีจำนวนไม่เท่ากัน ซึ่งจำนวนของ Mesh ในแต่ละแบบจำลองนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-2 และตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-13 แสดงลักษณะของ Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงขนาดแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับ

กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{R_o}{L}$

$\frac{R_o}{L} (m.)$	$H (m.)$	$L (m.)$	$R_o (m.)$	$y_o (m.)$	จำนวน Mesh
0.010	0.005	1	0.010	1.3661	110189
0.015	0.005	1	0.015	0.4608	38752
0.020	0.005	1	0.020	0.2132	36205
0.0225	0.005	1	0.0225	0.1555	39146
0.025	0.005	1	0.025	0.1172	44317
0.0275	0.005	1	0.0275	0.0908	49252
0.030	0.005	1	0.030	0.0719	56431
0.0325	0.005	1	0.0325	0.0580	65630
0.035	0.005	1	0.035	0.0476	74910
0.0375	0.005	1	0.0375	0.0395	84020
0.040	0.005	1	0.040	0.0333	93902
0.045	0.005	1	0.045	0.0243	117670
0.050	0.005	1	0.050	0.0183	142887

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงขนาดแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับ

กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{H}{y_o}$

$\frac{H}{y_o} (m.)$	$H (m.)$	$L (m.)$	$R_o (m.)$	$y_o (m.)$	จำนวน Mesh
0.01	0.01071	1	0.02	1.0717	93238
0.02	0.00576	1	0.02	0.2877	39703
0.03	0.00401	1	0.02	0.1335	32102
0.04	0.00310	1	0.02	0.0774	29797
0.05	0.00254	1	0.02	0.0507	28429
0.06	0.00216	1	0.02	0.0360	27486
0.07	0.00188	1	0.02	0.0268	27004
0.08	0.00167	1	0.02	0.0208	26650
0.09	0.00150	1	0.02	0.0166	26319
0.10	0.00137	1	0.02	0.0137	26374
0.15	0.00095	1	0.02	0.0063	25733
0.20	0.00074	1	0.02	0.0037	25913

3.5.3 กราฟที่ได้จากการจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent

เมื่อได้แบบจำลองที่จะใช้ในการจำลองการไหลตามต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ให้กับแบบจำลอง โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้บริเวณทางเข้าเป็นปริมาณอัตราการไหลของมวล ซึ่งสามารถกำหนดค่าอัตราการไหลได้ตามที่ต้องการ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ค่าอัตราการไหลเพื่อทำการจำลองการไหลทั้งสิ้น 10 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 อัตราการไหลบริเวณทางเข้าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการไหล

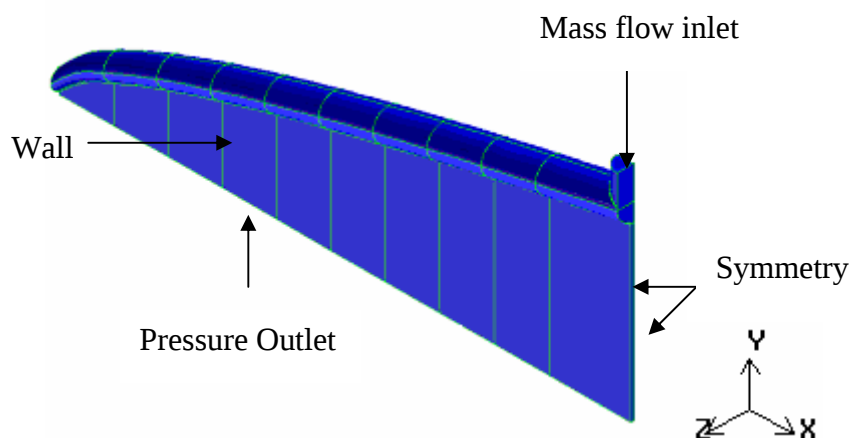
การจำลองการไหลครั้งที่	Mass Flow-Rate(Kg/s)
1	0.001389
2	0.002778
3	0.004167
4	0.005556
5	0.006944
6	0.008333
7	0.009722
8	0.011111
9	0.012500
10	0.013889

บริเวณทางออกของแม่พิมพ์กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีค่าความดันคงที่ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะกำหนดให้ความดันมีค่าเท่ากับ 0 ปาสคาล ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณนี้ จะสร้างแค่เพียง $\frac{1}{4}$ ของรูปร่างแม่พิมพ์ อัดรีดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขให้ระนาบ XY และ YZ เป็นระนาบที่มีความสมมาตร

เงื่อนไขขอบเขตสุดท้ายที่ทำการกำหนดคือ การกำหนดให้พื้นผิวที่เหลืออยู่เป็นผนัง และกำหนดให้เป็นผนังที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

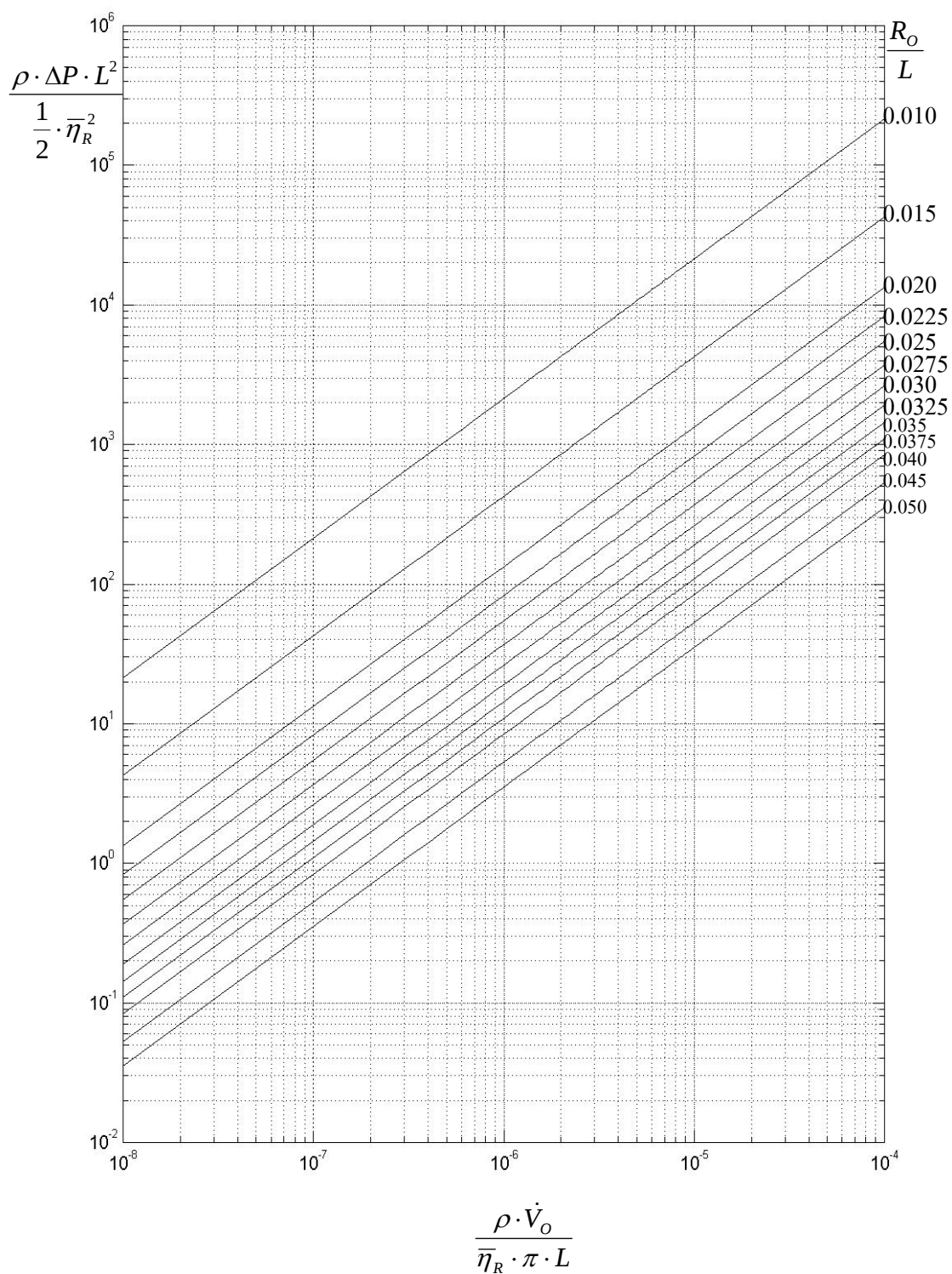
เงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดที่กำหนดให้กับแบบจำลองของแม่พิมพ์อัดรีดตามที่ได้กล่าวไปแล้ว นั้น สามารถที่จะแสดงได้ในภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในกับโปรแกรม Fluent

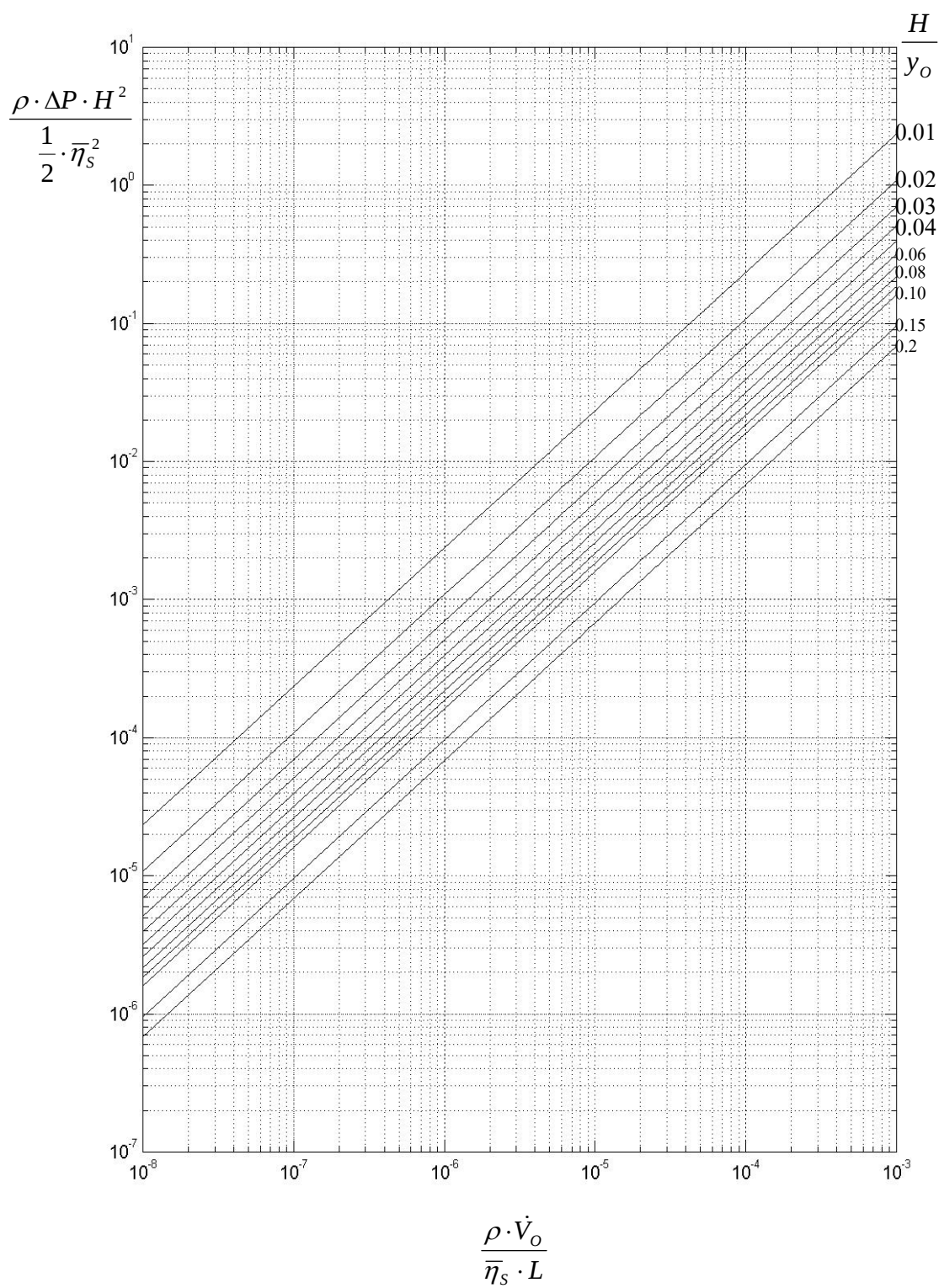
ขั้นตอนสุดท้ายก่อนเริ่มทำการคำนวณคือ การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ (Initial Condition) ซึ่งจะเป็นการกำหนดค่าให้กับทุก Mesh เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับแทนค่าในการคำนวณ โดยสามารถที่จะกำหนดให้ค่าของ mesh มีค่าเท่ากับเท่าใดก็ได้ ซึ่งถ้าสามารถกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่จะได้จากการคำนวณก็จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง เนื่องจากจะใช้อรอบการคำนวณน้อยลงนั่นเอง

เมื่อกำหนดค่าทุกอย่างตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้แล้ว จึงเริ่มขั้นตอนการจำลองการไหล และเมื่อคำนวณจนได้ผลลัพธ์แล้วตรวจสอบผลการคำนวณโดยดูจากค่า ΔP จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณหาค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ และทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลเป็นขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งแสดงกราฟในภาพที่ 3-15 และภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้จาก Fluent

ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-4}



ภาพที่ 3-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้จาก Fluent

ค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_s \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3}

3.5.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Fluent

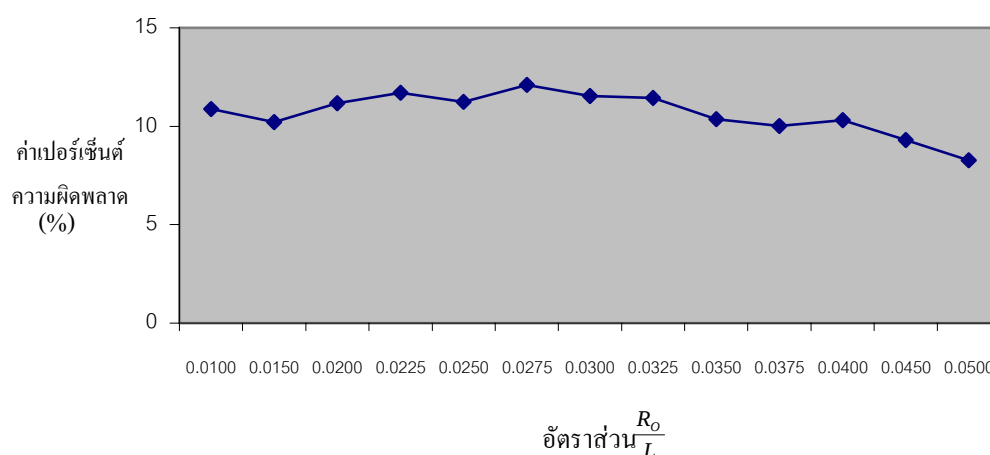
เนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด จะต้องมีการตรวจสอบ ΔP ของแม่พิมพ์ทุกครั้ง ดังนั้น เราสามารถเปรียบเทียบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดทั้งสองวิธีโดยใช้ค่า ΔP ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถทำได้โดย กำหนดขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดที่จะใช้ในการคำนวณและคำนวณหาค่า ΔP ออกมา จากนั้นก็จะทำการเปรียบเทียบกับ ΔP ที่ได้จากโปรแกรม Fluent การเปรียบเทียบความผิดพลาดจะคำนวณออกมาให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Percent Error) ซึ่งจะมีค่าคือ

$$\text{Percent Error} = \frac{\Delta P_{\text{Calculation}} - \Delta P_{\text{Fluent}}}{\Delta P_{\text{Calculation}}} \cdot 100\% \quad (3-50)$$

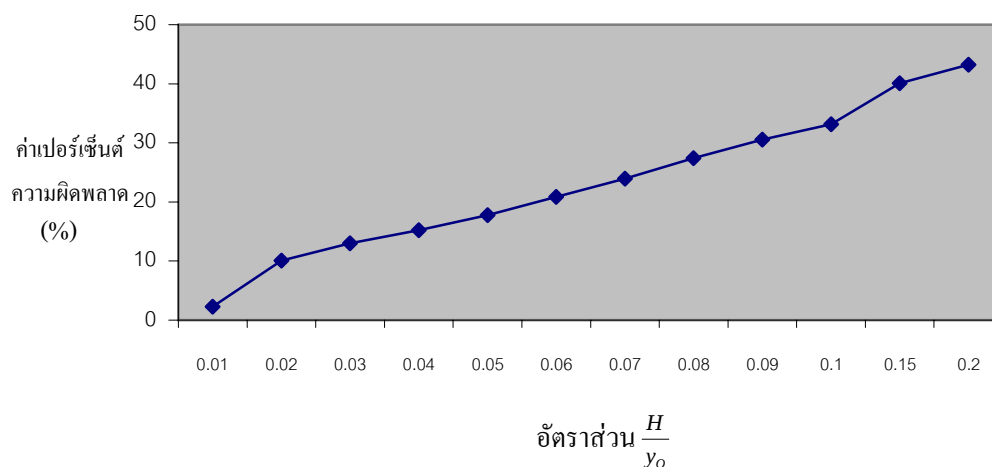
โดยที่ $\Delta P_{\text{Calculation}}$ คือ ค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากสมการที่ 3-18

ΔP_{Fluent} คือ ค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากโปรแกรม Fluent

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดนั้นจะทำการคำนวณทั้งสิ้น 25 จำนวน ตามจำนวนของแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด ที่ใช้ในการสร้างกราฟสำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด และในแต่ละค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้แสดงในภาพที่ 3-17 และภาพที่ 3-18 จะใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 10 จำนวนจากสมการที่ 3-50 ซึ่งในแต่ละจำนวนนั้นจะใช้ค่า $\Delta P_{\text{Calculation}}$ จากสมการที่ 3-18 ดังแสดงในตารางของภาคผนวก ข และใช้ค่า ΔP_{Fluent} ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม Fluent 10 จำนวนเช่นกัน โดยจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณทั้ง 2 วิธีดังนี้



ภาพที่ 3-17 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่า $\Delta P_{\text{Calculation}}$ และ ΔP_{Fluent} ที่อัตราส่วน $\frac{R_o}{L}$ ต่าง ๆ



ภาพที่ 3-18 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่า $\Delta P_{Calculation}$ และ ΔP_{Fluent} ที่อัตราส่วน $\frac{H}{y_o}$ ต่าง ๆ

จากภาพที่ 3-17 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ที่อัตราส่วน $\frac{R_o}{L}$ ค่าต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยประมาณ 10 % แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน $\frac{H}{y_o}$ (ภาพที่ 3-18) พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน $\frac{H}{y_o}$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความผิดพลาดก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องมาจากขัดกับสมมติฐาน Lubrication Approximation ที่ใช้ในการคำนวณ และการใช้ค่าตัวแทนความหนืด $\bar{\eta}_R(x)$ และ $\bar{\eta}_S(x)$ คงที่ แต่ในกรณีที่ใช้โปรแกรม Fluent คำนวณจะกำหนดให้มีค่าตัวแทนความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นเมื่อค่า $\frac{H}{y_o}$ มีค่ามากขึ้น ทำให้ค่า $\bar{\eta}_R(x)$ และ $\bar{\eta}_S(x)$ มีค่าที่ได้จากการคำนวณต่างกันมาก ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่า $\bar{\eta}_R(x)$ และ $\bar{\eta}_S(x)$ ที่มีค่าต่างกันมาก ๆ มีค่าคงที่ ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นถ้าต้องการใช้งานกราฟในระดับความผิดพลาด 20% จะต้องใช้งานที่ค่า $\frac{H}{y_o}$ ไม่เกิน 0.06

3.6 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent

ตัวอย่าง: หัวข้อนี้จะเป็นการแสดงตัวอย่าง การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นโดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent ซึ่งจะใช้ตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.4 เป็นเงื่อนไขในการออกแบบ และใช้ขั้นตอนดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

รัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเท่ากับ

$$R_o = 17.76 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{R_o}{L}$ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{R_o}{L} = 17.76 \times 10^{-3}$$

ค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลและช่องทางไหลมีค่าเท่ากับ

$$\bar{\eta}_R = 15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

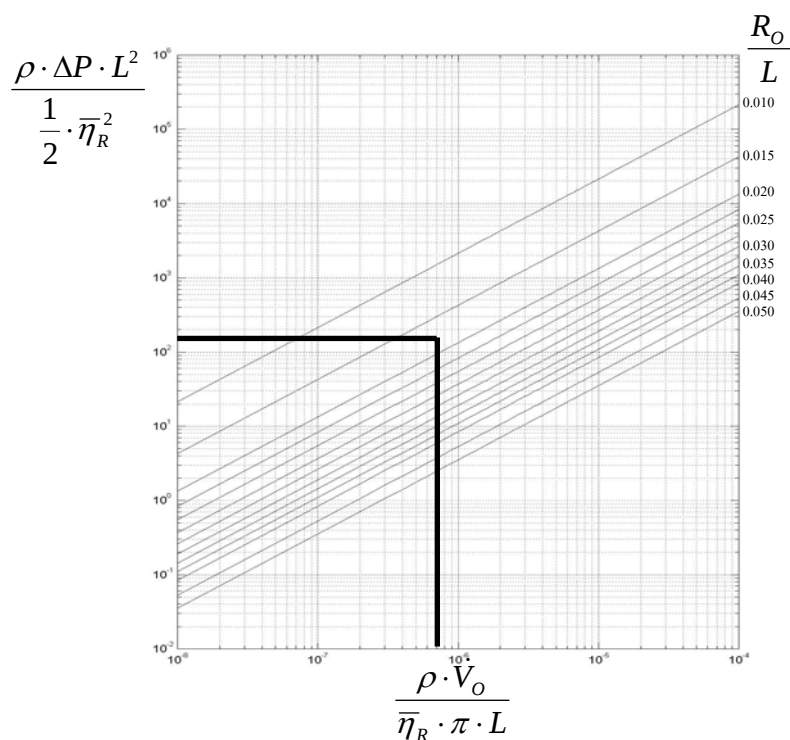
$$\bar{\eta}_S = 23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} = 0.7174 \times 10^{-6}$$

นำค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณคือ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ และ $\frac{R_o}{L}$ แทนค่าลงในกราฟเพื่อ

ทำการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 3-19 แสดงการหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent

จากกราฟเมื่อ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} = 0.7174 \times 10^{-6}$ และ $\frac{R_o}{L} = 17.76 \times 10^{-3}$ จะได้ค่า

$$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \approx 160 \text{ และทำการคำนวณหาค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะได้ค่าคือ}$$

$$\Delta P = \frac{160 \cdot (15.41 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)^2}{2 \cdot (900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (1 \text{ m})^2} = 21.11 \text{ MPa}$$

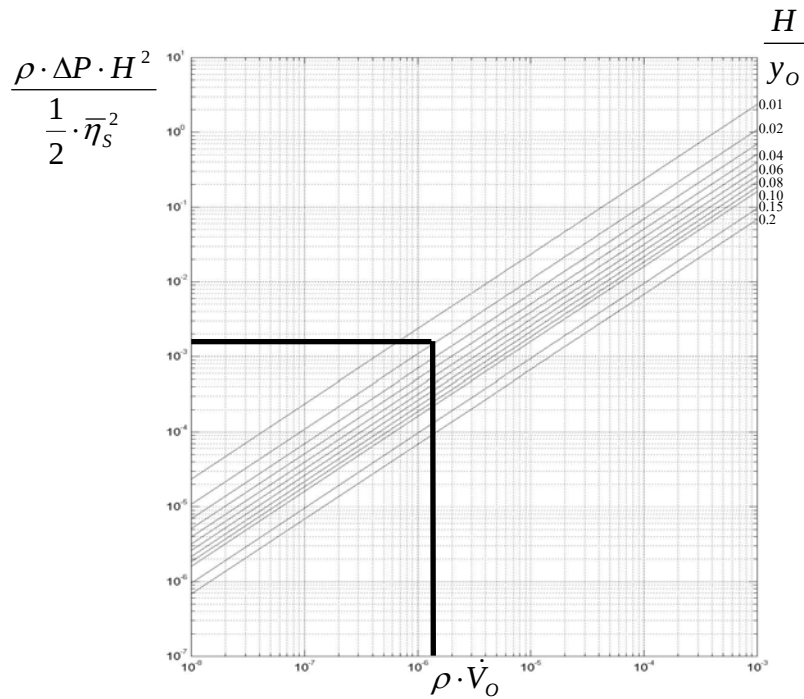
จากนั้นนำค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้ไปหาค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2} = \frac{(900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (21.11 \text{ MPa}) \cdot (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{\frac{1}{2} \cdot (23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)^2} = 1.76 \times 10^{-3}$$

ทำการคำนวณหาค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ เพื่อนำไปใช้งานในกราฟ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L} = \frac{(900 \text{ kg} / \text{m}^3) \cdot (38.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s})}{(23.25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) \cdot (1 \text{ m})} = 1.49 \times 10^{-6}$$

นำค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$ และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ ที่ได้แทนลงในกราฟเพื่อหาค่าของ $\frac{H}{y_o}$ ดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 3-20 แสดงการหาค่า $\frac{H}{y_o}$ โดยใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม Fluent

จากกราฟเมื่อใช้ค่า $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2} = 1.76 \times 10^{-3}$ และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_0}{\bar{\eta}_s \cdot L} = 1.49 \times 10^{-6}$ จะได้

ค่า $\frac{H}{y_0} \approx 0.02$ และทำการคำนวณหาความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ซึ่งจะได้ค่าคือ

$$y_0 = \frac{(5 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.02} = 250 \times 10^{-3} \text{ m}$$

จากผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากโปรแกรม Fluent จะได้ค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดเท่ากับ 21.11 MPa และค่าความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 250 มม. ซึ่งผลการออกแบบที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเล็กน้อย (ความดันลดลงประมาณ 5.88 % และความยาวของช่องทางไหลลดลงประมาณ 4.92 %) เมื่อเทียบกับการออกแบบโดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.5.4

3.7 สรุปท้ายบท

การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับพลาสติกเพาเวอร์ลอว์ ที่ได้แสดงในบทนี้แบ่งเป็น 3 วิธี คือ

- 1 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้การคำนวณ
- 2 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการคำนวณ
- 3 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้จากโปรแกรม Fluent

ซึ่งผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดจากทั้ง 3 วิธีนั้นจะมีค่าคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อย โดยผลของความคลาดเคลื่อนของวิธีการออกแบบที่ 1 และ 2 นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าที่ได้จากกราฟ สำหรับความคลาดเคลื่อนของการออกแบบด้วยวิธีที่ 3 นั้นเกิดขึ้นจากสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ โดยในกรณีที่คำนวณจากสมการจะใช้ค่า $\bar{\eta}_R(x)$ และ $\bar{\eta}_S(x)$ คงที่ แต่ในกรณีที่ใช้โปรแกรม Fluent คำนวณจะกำหนดให้ค่าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด และเมื่อนำผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับผลของผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้กราฟของ Görmär จะพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถใช้กราฟที่ได้แสดงในบทที่ 3 นี้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์แทนกราฟของ Görmär ได้

บทที่ 4

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แข็งตัว ค่าที่ใช้ในการตรวจสอบการออกแบบก็คือ ค่าของผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ค่าความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด และเวลาที่พลาสติกใช้ไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด จำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรดังกล่าวกับตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว และเป็นค่าที่ใช้เปลี่ยนเพื่อการปรับเปลี่ยนค่าสำหรับการออกแบบคือค่าของรัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด สามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เมื่อรัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลง และความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลง และถ้ารัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลง ทำให้ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเพิ่มขึ้น และความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดกับค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีดและค่าความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน		ΔP	y_o
R_o	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง
	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

4.2 สรุปผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ

การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับพลาสติกเพาเวอร์ลอร์ว ที่ทำให้พลาสติกที่ถูกอัดรีดภายในแม่พิมพ์มีค่าผลต่างความดันตกคร่อมและ ความเร็วของเนื้อพลาสติกที่ออกมาจากแม่พิมพ์มีค่าเท่ากันตลอดแนวความกว้างของปากแม่พิมพ์อัดรีด สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

- 1 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้การคำนวณ
- 2 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปร 3 มิติที่ได้จากการคำนวณ
- 3 การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปร 3 มิติที่คำนวณได้จากโปรแกรม Fluent

ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบทั้ง 3 วิธีนั้นจะมีขั้นตอนใกล้เคียงกัน คือ เริ่มต้นจากการกำหนดขนาดความหนาและความกว้างของปากแม่พิมพ์อัดรีด ซึ่งตัวแปรส่วนนี้ก็จะได้มาจากขนาดของแผ่นพลาสติกที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ จากนั้นทำการกำหนดค่ารัศมีทางเข้าของแม่พิมพ์อัดรีด (R_0) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก ในการกำหนดรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยขอบเขตของการกำหนดค่ารัศมีทางเข้าของแม่พิมพ์นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง $0.001 \cdot L$ ถึง $0.005 \cdot L$ ซึ่งได้แสดงค่าอยู่ในกราฟที่ใช้สำหรับการออกแบบแล้ว เมื่อผ่านขั้นตอนการออกแบบแล้ว จะได้ผลลัพธ์ออกมาคือ ค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีด (ΔP) ค่าความยาวของแม่พิมพ์อัดรีดบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ (y_0) และระยะเวลาที่พลาสติกไหลในแม่พิมพ์ (t) ซึ่งเราจะใช้ค่าทั้ง 3 นี้ตรวจสอบความเหมาะสมของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อที่ได้ออกแบบมา

จากผลการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้วิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจะมีค่าต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากสมมติฐานที่แตกต่างกันในการออกแบบ โดยที่การออกแบบวิธีที่ 1 และ 2 จะใช้สมมติฐานที่กำหนดให้ค่าตัวแทนความหนืดในท่อทางไหลและช่องทางไหลมีค่าคงที่ แต่สำหรับในกรณีของการออกแบบวิธีที่ 3 จะกำหนดให้ค่าตัวแทนความหนืดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของช่องทางไหล ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ค่าความหนืดภายในช่องทางไหลนั้นจะมีค่าไม่คงที่ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของช่องทางไหล ดังนั้นผลการออกแบบโดยใช้วิธีที่ 3 นั้น จึงเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงที่สุดที่จะนำไปใช้งาน

จากความสัมพันธ์และกราฟที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด พบว่านอกจากจะใช้สำหรับออกแบบรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดแล้ว เรายังสามารถใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าว ในการกำหนดกระบวนการผลิตได้ด้วย กล่าวคือจากความสัมพันธ์จะพบว่าค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายใน

แม่พิมพ์จะมีค่าแปรผันตามกับค่าอัตราการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะกำหนดค่าอัตราการไหลได้ จากขอบเขตของค่าความดันที่เครื่องอัดรีดพลาสติกสามารถทำได้

4.3 ข้อเสนอแนะ

4.3.1 จากรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบ จะพบว่าลักษณะการไหลของพลาสติกบริเวณปลายบริเวณกึ่งกลางของแม่พิมพ์อัดรีดจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน คือในบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติก จะเริ่มไหลผ่านจากช่องทางไหลเข้าไปในช่องทางไหลก่อนบริเวณอื่น ดังนั้นการไหลในบริเวณนี้จึงได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างให้เข้าใกล้การไหลพัฒนาสมบูรณ์ (Fully Developed Flow) ส่วนในบริเวณปลายแม่พิมพ์จะยังไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหล ดังนั้นเพื่อให้ลักษณะการไหลตลอดความกว้างของปากแม่พิมพ์อัดรีด มีลักษณะการไหลที่เหมือนกันในการออกแบบแม่พิมพ์ จึงควรที่จะให้บริเวณช่องทางไหลมีความยาวยื่นต่อไปอีกเล็กน้อยเพื่อทำการปรับลักษณะการไหล ให้เป็นการไหลพัฒนาสมบูรณ์ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด แต่ถ้าไม่ต้องการที่จะให้ช่องทางไหลมีขนาดยาวมากเกินไป อาจจะใช้การติดตั้งโชกเกอร์บาร์ (Choker Bar) เพื่อช่วยทำให้การกระจายตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์สม่ำเสมอขึ้น โดยเราสามารถปรับอัตราการไหลของพลาสติกที่ไหลผ่านโชกเกอร์บาร์ได้ในตำแหน่งที่ต้องการ

4.3.2 การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้วิเคราะห์สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ จะมีค่าอัตราเค้นเฉือนต่ำ เนื่องจากอัตราการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่คิดผลกระทบของพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (No Viscoelastic Effect) แต่ถ้ามีการเพิ่มอัตราการไหลของพลาสติกที่ใช้งานขึ้น จะต้องนำผลกระทบของพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกเข้ามาร่วมวิเคราะห์ด้วย

4.3.3 เนื่องจากวิธีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้เสนอไปนั้น เป็นผลที่ได้มาจากการคำนวณและจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบอาจจะยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจาก สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นผู้วิจัยมีความเห็นว่าเป็นอนาคต ถ้าสามารถที่จะสร้างแม่พิมพ์อัดรีดให้มีขนาดเท่ากับขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการคำนวณและทำการทดสอบการไหลจริง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ทั้งคู่ และทำการหาเงื่อนไขเพื่อปรับเปลี่ยนค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. J.-F. Agassant, P. Arenas, J.-Ph. Sergent, P.J. Carreau. *Polymer Processing Principles and Modeling*. Hanser Publishers. Munich Vienna New York. 1991
2. R. Byron Bird, Warren e. Stewart, Edwin N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. John Wiley&son. New York. 1960
3. R. Byron Bird, Robert C. Armstrong, Ole Hassager. *Dynamics of Polymeric Liquids Volume 1 Fluid Mechanics Second Edition*. John Wiley&son. New York. 1987
4. Walter Michaeli. *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*. Hanser Publishers. Munich Vienna New York Barcelona. 1992.
5. Walter Michaeli. *Extrusion Dies Design and Engineering Computations*. Hanser Publishers. Munich Vienna New York. 1984.
6. Donald G. Baird and Dimitris I. Collias. *Polymer Processing Principles and Design*. Butterworth-Heinemann. 1995.
7. Douglas E. smith, Daniel A. Tortorelli and Charles L. Tucker III. *Optimal design for polymer extrusion. Part I: Sensitivity analysis for nonlinear steady-state systems*. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 167. 283-302. Elsevier Science S.A. 1998.
8. Douglas E. smith, Daniel A. Tortorelli and Charles L. Tucker III. *Optimal design for polymer extrusion. Part II: Sensitivity analysis for weakly-coupled nonlinear steady-state systems*. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 167. 303-323. Elsevier Science S.A. 1998.
9. Ronald L.Panton. *Incompressible flow*. A Wiley-Interscience publication. John Wiley&son. 1984.
10. Merle C.Potter and David C. Wiggert. *Mechanic of fluids*. Prentice-Hall, Inc. 2002.
11. Rolf H. Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann and E.M. Gates. *Fluid Flow A first course in fluid mechanics*. Prentice-Hall, Inc. 1999.
12. *Fluent User Manual*. Fluent Inc. 2001.
13. Joel H. Ferziger, Milovan Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag. Germany. 1999.

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าคงที่เพื่อหาความหนืดจากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ของพลาสติกชนิดต่าง ๆ

ตาราง ก-1 แสดงค่าคงที่เพื่อหาความหนืดจากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ของพลาสติกชนิดต่าง

Polymer	Temperature (K)	Power Law Model		
		Shear Rate Range (s ⁻¹)	k $\left(\frac{N \cdot s^n}{m^2} \right)$	n
High impact Polystyrene(HIPS) LX-2400	443	100-7000	7.58×10^4	0.20
	463	100-7000	4.57×10^4	0.21
	483	100-7000	3.61×10^4	0.19
Polystyrene(PS) Dylene™ 8	463	100-4500	4.47×10^4	0.22
	483	100-4000	2.38×10^4	0.25
	498	100-5000	1.56×10^4	0.28
Styrene acrylonitrile (San) Lustran™ 31-1000	463	100-9000	9.0×10^4	0.21
	493	100-8000	3.22×10^4	0.27
	523	100-8000	1.11×10^4	0.35
Thermoplastic Olefin (TPO) Vistaflex™ 905B	463	100-5000	2.75×10^4	0.27
	493	100-4000	1.83×10^4	0.30
	513	100-3000	1.99×10^4	0.28
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) AM-1000	443	100-5500	1.19×10^5	0.25
	463	100-6000	6.29×10^4	0.25
	483	100-7000	3.93×10^4	0.25
Polypropylene (PP) CD-460	453	100-4000	6.79×10^4	0.37
	463	100-3500	4.89×10^4	0.41
	473	100-4000	4.35×10^4	0.41
Ethylene ethyl acrylate DPDA-6169	443	100-6000	1.21×10^4	0.38
	463	100-4000	6.91×10^3	0.43
	483	100-6000	3.77×10^3	0.48

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Polymer	Temperature (K)	Power Law Model		
		Shear Rate Range (s ⁻¹)	k $\left(\frac{N \cdot s^n}{m^2} \right)$	n
High density polypropylene (HDPE) Alathon TM 7040	453	100-1000	6.19×10^3	0.56
	473	100-1000	4.68×10^3	0.59
	493	100-1000	3.73×10^3	0.61
Low density polypropylene (LDPE) Alathon TM 1540	433	100-4000	9.36×10^3	0.41
	453	100-6500	5.21×10^3	0.46
	473	100-6000	4.31×10^3	0.47
Nylon Capron TM 8200	498	100-2500	2.62×10^3	0.63
	503	100-2000	1.95×10^3	0.66
	508	100-2300	1.81×10^3	0.66
Polypropylene (PP) E-612	483	100-3000	3.21×10^4	0.25
	513	50-3000	2.24×10^4	0.28
Polymethylmethacrylate (PMMA) Lucite TM 147	493	100-6000	8.83×10^4	0.19
	513	100-6000	4.27×10^4	0.25
	533	100-7000	2.62×10^4	0.27
Polycarbonate (PC) Lexan TM	553	100-1000	8.39×10^3	0.64
	573	100-1000	4.31×10^3	0.67
	593	100-1000	1.08×10^3	0.80

ภาคผนวก ข

ตารางผลการคำนวณโดยใช้ HDPE (453 K)เพื่อใช้ในการสร้างกราฟ

ภาคผนวก ข แสดงผลการคำนวณโดยใช้พลาสติก HDPE (453 K) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ความหนาแน่น} &= 950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ k &= 6190 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^n}{\text{m}^2} \\ n &= 0.56\end{aligned}$$

โดยใช้สมการประกอบการคำนวณเพื่อใช้ในการสร้างกราฟคือ

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n$$

$$\bar{\eta}_R = k \left(\left(\frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \frac{\dot{V}_o}{\pi \cdot R_o^3} \left(\left(\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3 \right) \right)^{\left(\frac{1}{n-1} \right)} \right) \right)^{(n-1)}$$

$$\bar{\eta}_s = k \left(\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \frac{2 \cdot \dot{V}_o}{B \cdot H^2} \left(\left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \right)^{\left(\frac{1}{n-1} \right)} \right) \right)^{(n-1)}$$

$$\Delta P = \frac{12 \cdot \dot{V}_o \cdot \bar{\eta}_R \cdot L^{1/3}}{\pi \cdot R_o^4} \cdot \left(L^{2/3} - l^{2/3} \right) + \frac{12 \cdot \bar{\eta}_s \cdot \dot{V}_o \cdot y_o \cdot l^{2/3}}{L^{5/3} \cdot H^3}$$

จากนั้นนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้นำมาจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยจะใช้กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$

และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$ เพื่อนำมาสร้างกราฟกรณีที่ $\frac{R_o}{L}$ คงที่ และจะใช้กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$

และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$ เพื่อนำมาสร้างกราฟกรณีที่ $\frac{H}{y_o}$ คงที่

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.01$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.01 \quad \text{m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \quad \text{m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \quad \text{m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.01} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.01^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 1.3661 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.01$

$\dot{V}_o \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	3838.1176	11178.8537	4286704.48	552.89236201	0.0000002304
0.00000585	2829.2093	8240.3199	6319756.46	1500.11234184	0.0000006250
0.00000877	2366.9273	6893.8832	7930698.65	2689.64645481	0.0000011207
0.00001170	2085.5081	6074.2250	9317022.41	4070.11778919	0.0000016959
0.00001462	1890.4773	5506.1808	10557151.35	5612.51347391	0.0000023385
0.00001754	1744.7441	5081.7199	11691984.89	7297.57203981	0.0000030407
0.00002047	1630.3286	4748.4748	12746133.05	9111.32982202	0.0000037964
0.00002339	1537.3002	4477.5215	13735799.34	11043.07881208	0.0000046013
0.00002632	1459.6596	4251.3863	14672338.92	13084.27923575	0.0000054518
0.00002924	1393.5363	4058.7964	15564083.25	15227.92013312	0.0000063450

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.015$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.015 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \text{ m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.015} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.015^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.4608 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.015$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	6554.7894	11178.8537	1446102.15	63.94919652	0.0000001349
0.00000585	4831.7621	8240.3199	2131943.88	173.50751346	0.0000003660
0.00000877	4042.2706	6893.8832	2675388.61	311.09261317	0.0000006562
0.00001170	3561.6591	6074.2250	3143059.24	470.76208722	0.0000009930
0.00001462	3228.5829	5506.1808	3561411.64	649.16021952	0.0000013693
0.00001754	2979.6976	5081.7199	3944243.07	844.05917052	0.0000017804
0.00002047	2784.2973	4748.4748	4299855.62	1053.84386067	0.0000022230
0.00002339	2625.4222	4477.5215	4633715.48	1277.27576943	0.0000026943
0.00002632	2492.8264	4251.3863	4949653.26	1513.36716080	0.0000031923
0.00002924	2379.9002	4058.7964	5250479.55	1761.30712602	0.0000037153

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.02$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.02 \quad \text{m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \quad \text{m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \quad \text{m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.2132 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.02$

$\dot{V}_o \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	11178.8537	668903.02	13.84079427	0.0000000923
0.00000585	7063.5768	8240.3199	986143.13	37.55296281	0.0000002504
0.00000877	5909.4154	6893.8832	1237516.67	67.33108613	0.0000004489
0.00001170	5206.8070	6074.2250	1453840.46	101.88902372	0.0000006793
0.00001462	4719.8812	5506.1808	1647351.82	140.50048380	0.0000009367
0.00001754	4356.0346	5081.7199	1824432.74	182.68328564	0.0000012179
0.00002047	4070.3779	4748.4748	1988923.41	228.08787079	0.0000015206
0.00002339	3838.1176	4477.5215	2143352.24	276.44618101	0.0000018430
0.00002632	3644.2752	4251.3863	2289491.11	327.54443643	0.0000021836
0.00002924	3479.1878	4058.7964	2428640.07	381.20712866	0.0000025414

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0225$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.0225 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.0225} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.0225^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.1555m.$$

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0225$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	11194.3583	11178.8537	487836.62	7.39655676	0.0000000790
0.00000585	8251.7489	8240.3199	719202.51	20.06840180	0.0000002143
0.00000877	6903.4447	6893.8832	902531.36	35.98190900	0.0000003842
0.00001170	6082.6497	6074.2250	1060298.12	54.44976147	0.0000005815
0.00001462	5513.8177	5506.1808	1201427.58	75.08382698	0.0000008018
0.00001754	5088.7680	5081.7199	1330574.20	97.62642691	0.0000010425
0.00002047	4755.0607	4748.4748	1450538.63	121.89075627	0.0000013016
0.00002339	4483.7316	4477.5215	1563164.88	147.73356407	0.0000015776
0.00002632	4257.2828	4251.3863	1669745.19	175.04060576	0.0000018692
0.00002924	4064.4258	4058.7964	1771227.70	203.71808921	0.0000021754

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.025$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.025 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \text{ m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.025} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.025^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.1172 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.025$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	12864.6830	11178.8537	367827.61	4.22279253	0.0000000687
0.00000585	9483.0031	8240.3199	542276.92	11.45731723	0.0000001865
0.00000877	7933.5166	6893.8832	680506.42	20.54254992	0.0000003344
0.00001170	6990.2498	6074.2250	799462.17	31.08609227	0.0000005060
0.00001462	6336.5416	5506.1808	905873.44	42.86635443	0.0000006977
0.00001754	5848.0697	5081.7199	1003249.66	55.73622424	0.0000009072
0.00002047	5464.5695	4748.4748	1093702.55	69.58905226	0.0000011326
0.00002339	5152.7550	4477.5215	1178622.46	84.34305459	0.0000013728
0.00002632	4892.5175	4251.3863	1258983.76	99.93300751	0.0000016265
0.00002924	4670.8841	4058.7964	1335501.32	116.30536384	0.0000018930

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0275$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.0275 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.0275} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.0275^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0908m.$$

ตารางที่ ข-6 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0275$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	14589.4001	11178.8537	284912.78	2.54325940	0.0000000606
0.00000585	10754.3517	8240.3199	420038.14	6.90039343	0.0000001644
0.00000877	8997.1318	6893.8832	527108.27	12.37215254	0.0000002948
0.00001170	7927.4048	6074.2250	619249.30	18.72220717	0.0000004461
0.00001462	7186.0566	5506.1808	701673.59	25.81710050	0.0000006152
0.00001754	6632.0972	5081.7199	777099.49	33.56823136	0.0000007999
0.00002047	6197.1826	4748.4748	847162.70	41.91136802	0.0000009987
0.00002339	5843.5645	4477.5215	912940.17	50.79725454	0.0000012105
0.00002632	5548.4379	4251.3863	975186.61	60.18660866	0.0000014342
0.00002924	5297.0910	4058.7964	1034455.77	70.04718053	0.0000016692

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.03$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.03 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.03} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85) + 1}{(2 \cdot 0.85) + 1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.03^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0719m.$$

ตารางที่ ข-7 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.03$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	16365.0876	11178.8537	225651.69	1.60086797	0.0000000540
0.00000585	12063.2724	8240.3199	332671.33	4.34348883	0.0000001466
0.00000877	10092.1799	6893.8832	417471.17	7.78771630	0.0000002628
0.00001170	8892.2556	6074.2250	490447.11	11.78479149	0.0000003977
0.00001462	8060.6772	5506.1808	555727.37	16.25070930	0.0000005485
0.00001754	7439.2951	5081.7199	615464.89	21.12969926	0.0000007131
0.00002047	6951.4467	4748.4748	670955.14	26.38133039	0.0000008904
0.00002339	6554.7894	4477.5215	723051.07	31.97459826	0.0000010791
0.00002632	6223.7427	4251.3863	772350.42	37.88477645	0.0000012786
0.00002924	5941.8042	4058.7964	819291.75	44.09156512	0.0000014881

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0325$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.0325 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.0325} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.0325^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0580 m.$$

ตารางที่ ข-8 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0325$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	18188.8112	11178.8537	182085.82	1.04573371	0.0000000486
0.00000585	13407.6022	8240.3199	268443.53	2.83729377	0.0000001319
0.00000877	11216.8513	6893.8832	336871.32	5.08716374	0.0000002365
0.00001170	9883.2076	6074.2250	395758.03	7.69817000	0.0000003579
0.00001462	8958.9582	5506.1808	448434.83	10.61543795	0.0000004935
0.00001754	8268.3293	5081.7199	496639.02	13.80253670	0.0000006416
0.00002047	7726.1152	4748.4748	541415.94	17.23305554	0.0000008011
0.00002339	7285.2544	4477.5215	583453.88	20.88674147	0.0000009709
0.00002632	6917.3159	4251.3863	623235.16	24.74744248	0.0000011504
0.00002924	6603.9582	4058.7964	661113.67	28.80189813	0.0000013389

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.035$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.035 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.035} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.035^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0476 m.$$

ตารางที่ ข-9 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.035$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	20058.0217	11178.8537	149286.72	0.70501539	0.0000000441
0.00000585	14785.4620	8240.3199	220088.82	1.91285384	0.0000001196
0.00000877	12369.5740	6893.8832	276190.72	3.42967684	0.0000002144
0.00001170	10898.8757	6074.2250	324470.17	5.18997161	0.0000003245
0.00001462	9879.6440	5506.1808	367658.31	7.15674265	0.0000004475
0.00001754	9118.0411	5081.7199	407179.48	9.30542890	0.0000005818
0.00002047	8520.1052	4748.4748	443890.74	11.61822471	0.0000007264
0.00002339	8033.9385	4477.5215	478356.39	14.08147588	0.0000008805
0.00002632	7628.1881	4251.3863	510971.87	16.68429300	0.0000010432
0.00002924	7282.6275	4058.7964	542027.33	19.41773610	0.0000012141

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0375$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.0375 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.0375} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.0375^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0395m.$$

ตารางที่ ข-10 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.0375$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	21970.4803	11178.8537	124085.13	0.48842091	0.0000000402
0.00000585	16195.2014	8240.3199	182934.89	1.32518783	0.0000001092
0.00000877	13548.9674	6893.8832	229566.04	2.37601322	0.0000001958
0.00001170	11938.0434	6074.2250	269695.28	3.59551110	0.0000002963
0.00001462	10821.6317	5506.1808	305592.68	4.95805171	0.0000004085
0.00001754	9987.4128	5081.7199	338442.15	6.44661963	0.0000005312
0.00002047	9332.4659	4748.4748	368956.06	8.04887946	0.0000006632
0.00002339	8799.9450	4477.5215	397603.45	9.75537183	0.0000008038
0.00002632	8355.5078	4251.3863	424713.00	11.55855276	0.0000009524
0.00002924	7976.9993	4058.7964	450525.88	13.45222882	0.0000011084

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.04$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.04 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \text{ m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.04} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.04^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0333m.$$

ตารางที่ ข-11 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.04$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	23924.2023	11178.8537	104376.51	0.34648261	0.0000000370
0.00000585	17635.3575	8240.3199	153879.07	0.94007960	0.0000001003
0.00000877	14753.8076	6893.8832	193103.73	1.68552828	0.0000001798
0.00001170	12999.6324	6074.2250	226859.18	2.55063212	0.0000002721
0.00001462	11783.9439	5506.1808	257054.95	3.51720954	0.0000003752
0.00001754	10875.5422	5081.7199	284686.89	4.57318991	0.0000004878
0.00002047	10162.3542	4748.4748	310354.23	5.70982259	0.0000006090
0.00002339	9582.4789	4477.5215	334451.51	6.92039714	0.0000007382
0.00002632	9098.5202	4251.3863	357255.21	8.19956192	0.0000008746
0.00002924	8686.3528	4058.7964	378968.20	9.54292337	0.0000010179

$$\text{ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ} \quad \frac{R_o}{L} = 0.045$$

$$\text{รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด} (R_o) = 0.045 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด} (H) = 0.005 \text{ m.}$$

$$\text{ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด} (L) = 1 \text{ m.}$$

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.045} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.045^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0243m.$$

ตารางที่ ข-12 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.045$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	27948.5188	11178.8537	76122.67	0.18516121	0.0000000316
0.00000585	20601.8205	8240.3199	112225.31	0.50238101	0.0000000858
0.00000877	17235.5618	6893.8832	140832.18	0.90075073	0.0000001539
0.00001170	15186.3149	6074.2250	165450.32	1.36306449	0.0000002329
0.00001462	13766.1340	5506.1808	187472.34	1.87960600	0.0000003211
0.00001754	12704.9291	5081.7199	207624.55	2.44392468	0.0000004176
0.00002047	11871.7750	4748.4748	226343.96	3.05134416	0.0000005214
0.00002339	11194.3583	4477.5215	243918.31	3.69827838	0.0000006319
0.00002632	10628.9923	4251.3863	260549.24	4.38186739	0.0000007487
0.00002924	10147.4938	4058.7964	276384.71	5.09976327	0.0000008713

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.05$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.05 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.005 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.005 \cdot 2}{8 \cdot 0.05} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85) + 1}{(2 \cdot 0.85) + 1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.005^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.05^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0183m.$$

ตารางที่ ข-13 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{R_o}{L} = 0.05$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$
0.00000292	32118.7536	11178.8537	57396.30	0.10571100	0.0000000275
0.00000585	23675.8449	8240.3199	84617.61	0.28681599	0.0000000747
0.00000877	19807.3024	6893.8832	106187.12	0.51425056	0.0000001339
0.00001170	17452.2846	6074.2250	124749.13	0.77819163	0.0000002027
0.00001462	15820.1968	5506.1808	141353.69	1.07309204	0.0000002795
0.00001754	14600.6481	5081.7199	156548.40	1.39526907	0.0000003634
0.00002047	13643.1780	4748.4748	170662.79	1.74205292	0.0000004537
0.00002339	12864.6830	4477.5215	183913.80	2.11139626	0.0000005498
0.00002632	12214.9580	4251.3863	196453.49	2.50166632	0.0000006515
0.00002924	11661.6146	4058.7964	208393.39	2.91152261	0.0000007582

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.01$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.01071 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.01071 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.01071^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 1.0717 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-14 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.01$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	21853.3692	668903.02	0.00030525	0.0000001271
0.00000585	7063.5768	16108.8747	986143.13	0.00082821	0.0000003449
0.00000877	5909.4154	13476.7462	1237516.67	0.00148496	0.0000006183
0.00001170	5206.8070	11874.4091	1453840.46	0.00224711	0.0000009357
0.00001462	4719.8812	10763.9482	1647351.82	0.00309867	0.0000012903
0.00001754	4356.0346	9934.1760	1824432.74	0.00402899	0.0000016777
0.00002047	4070.3779	9282.7203	1988923.41	0.00503037	0.0000020947
0.00002339	3838.1176	8753.0379	2143352.24	0.00609689	0.0000025388
0.00002632	3644.2752	8310.9697	2289491.11	0.00722384	0.0000030081
0.00002924	3479.1878	7934.4788	2428640.07	0.00840735	0.0000035009

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.02$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00576 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00576 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00576^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.2877 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-15 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.02$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	12661.2170	668903.02	0.00026303	0.0000002194
0.00000585	7063.5768	9333.0213	986143.13	0.00071366	0.0000005953
0.00000877	5909.4154	7808.0413	1237516.67	0.00127957	0.0000010673
0.00001170	5206.8070	6879.6930	1453840.46	0.00193632	0.0000016151
0.00001462	4719.8812	6236.3237	1647351.82	0.00267010	0.0000022271
0.00001754	4356.0346	5755.5775	1824432.74	0.00347175	0.0000028957
0.00002047	4070.3779	5378.1426	1988923.41	0.00433463	0.0000036155
0.00002339	3838.1176	5071.2598	2143352.24	0.00525364	0.0000043820
0.00002632	3644.2752	4815.1381	2289491.11	0.00622472	0.0000051920
0.00002924	3479.1878	4597.0101	2428640.07	0.00724454	0.0000060426

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.03$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00401 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00401 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00401^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.1335 m.$$

ตารางที่ ข-16 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.03$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	9205.9946	668903.02	0.00024114	0.0000003017
0.00000585	7063.5768	6786.0572	986143.13	0.00065426	0.0000008187
0.00000877	5909.4154	5677.2414	1237516.67	0.00117306	0.0000014678
0.00001170	5206.8070	5002.2376	1453840.46	0.00177513	0.0000022212
0.00001462	4719.8812	4534.4427	1647351.82	0.00244783	0.0000030630
0.00001754	4356.0346	4184.8911	1824432.74	0.00318275	0.0000039826
0.00002047	4070.3779	3910.4576	1988923.41	0.00397379	0.0000049724
0.00002339	3838.1176	3687.3225	2143352.24	0.00481630	0.0000060267
0.00002632	3644.2752	3501.0959	2289491.11	0.00570655	0.0000071406
0.00002924	3479.1878	3342.4946	2428640.07	0.00664147	0.0000083105

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.04$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.0031 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.0031 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.0031^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0774m.$$

ตารางที่ ข-17 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.04$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	7340.0997	668903.02	0.00022669	0.0000003784
0.00000585	7063.5768	5410.6415	986143.13	0.00061506	0.0000010268
0.00000877	5909.4154	4526.5634	1237516.67	0.00110278	0.0000018410
0.00001170	5206.8070	3988.3711	1453840.46	0.00166879	0.0000027859
0.00001462	4719.8812	3615.3900	1647351.82	0.00230119	0.0000038416
0.00001754	4356.0346	3336.6865	1824432.74	0.00299209	0.0000049950
0.00002047	4070.3779	3117.8759	1988923.41	0.00373575	0.0000062364
0.00002339	3838.1176	2939.9664	2143352.24	0.00452779	0.0000075587
0.00002632	3644.2752	2791.4847	2289491.11	0.00536470	0.0000089558
0.00002924	3479.1878	2665.0291	2428640.07	0.00624362	0.0000104231

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.05$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00254 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00254 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00254^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0507 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-18 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.05$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	6159.6685	668903.02	0.00021611	0.0000004510
0.00000585	7063.5768	4540.5048	986143.13	0.00058634	0.0000012236
0.00000877	5909.4154	3798.6037	1237516.67	0.00105129	0.0000021938
0.00001170	5206.8070	3346.9632	1453840.46	0.00159087	0.0000033198
0.00001462	4719.8812	3033.9648	1647351.82	0.00219375	0.0000045778
0.00001754	4356.0346	2800.0822	1824432.74	0.00285238	0.0000059522
0.00002047	4070.3779	2616.4606	1988923.41	0.00356132	0.0000074316
0.00002339	3838.1176	2467.1624	2143352.24	0.00431637	0.0000090072
0.00002632	3644.2752	2342.5595	2289491.11	0.00511421	0.0000106721
0.00002924	3479.1878	2236.4404	2428640.07	0.00595209	0.0000124205

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.06$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00216 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00216 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00216^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.036 m.$$

ตารางที่ ข-19 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.06$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	5341.0048	668903.02	0.00020786	0.0000005201
0.00000585	7063.5768	3937.0395	986143.13	0.00056398	0.0000014111
0.00000877	5909.4154	3293.7423	1237516.67	0.00101119	0.0000025301
0.00001170	5206.8070	2902.1281	1453840.46	0.00153019	0.0000038286
0.00001462	4719.8812	2630.7293	1647351.82	0.00211006	0.0000052795
0.00001754	4356.0346	2427.9314	1824432.74	0.00274357	0.0000068646
0.00002047	4070.3779	2268.7144	1988923.41	0.00342546	0.0000085707
0.00002339	3838.1176	2139.2590	2143352.24	0.00415172	0.0000103878
0.00002632	3644.2752	2031.2167	2289491.11	0.00491912	0.0000123079
0.00002924	3479.1878	1939.2016	2428640.07	0.00572504	0.0000143243

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.07$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00188 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00188 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00188^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0268 m.$$

ตารางที่ ข-20 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.07$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	4726.7494	668903.02	0.00020105	0.0000005877
0.00000585	7063.5768	3484.2505	986143.13	0.00054549	0.0000015945
0.00000877	5909.4154	2914.9373	1237516.67	0.00097805	0.0000028588
0.00001170	5206.8070	2568.3617	1453840.46	0.00148004	0.0000043261
0.00001462	4719.8812	2328.1758	1647351.82	0.00204091	0.0000059656
0.00001754	4356.0346	2148.7012	1824432.74	0.00265366	0.0000077566
0.00002047	4070.3779	2007.7953	1988923.41	0.00331321	0.0000096845
0.00002339	3838.1176	1893.2283	2143352.24	0.00401566	0.0000117377
0.00002632	3644.2752	1797.6116	2289491.11	0.00475791	0.0000139073
0.00002924	3479.1878	1716.1790	2428640.07	0.00553742	0.0000161858

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.08$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00167 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00167 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00167^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0208 m.$$

ตารางที่ ข-21 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.08$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	4258.8678	668903.02	0.00019542	0.0000006522
0.00000585	7063.5768	3139.3589	986143.13	0.00053021	0.0000017696
0.00000877	5909.4154	2626.3996	1237516.67	0.00095064	0.0000031729
0.00001170	5206.8070	2314.1301	1453840.46	0.00143856	0.0000048014
0.00001462	4719.8812	2097.7192	1647351.82	0.00198371	0.0000066209
0.00001754	4356.0346	1936.0101	1824432.74	0.00257928	0.0000086088
0.00002047	4070.3779	1809.0519	1988923.41	0.00322035	0.0000107484
0.00002339	3838.1176	1705.8254	2143352.24	0.00390311	0.0000130273
0.00002632	3644.2752	1619.6734	2289491.11	0.00462456	0.0000154352
0.00002924	3479.1878	1546.3014	2428640.07	0.00538222	0.0000179640

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.09$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.0015 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.0015 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.0015^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0166m.$$

ตารางที่ ข-22 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.09$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	3874.9310	668903.02	0.00019045	0.0000007169
0.00000585	7063.5768	2856.3458	986143.13	0.00051672	0.0000019450
0.00000877	5909.4154	2389.6298	1237516.67	0.00092646	0.0000034873
0.00001170	5206.8070	2105.5113	1453840.46	0.00140197	0.0000052772
0.00001462	4719.8812	1908.6099	1647351.82	0.00193325	0.0000072770
0.00001754	4356.0346	1761.4788	1824432.74	0.00251367	0.0000094617
0.00002047	4070.3779	1645.9659	1988923.41	0.00313843	0.0000118134
0.00002339	3838.1176	1552.0453	2143352.24	0.00380383	0.0000143180
0.00002632	3644.2752	1473.6599	2289491.11	0.00450693	0.0000169646
0.00002924	3479.1878	1406.9024	2428640.07	0.00524531	0.0000197439

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.1$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00137 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00137 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00137^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0137 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-23 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.1$

$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	3577.8141	668903.02	0.00018635	0.0000007764
0.00000585	7063.5768	2637.3306	986143.13	0.00050560	0.0000021065
0.00000877	5909.4154	2206.4008	1237516.67	0.00090652	0.0000037769
0.00001170	5206.8070	1944.0676	1453840.46	0.00137179	0.0000057154
0.00001462	4719.8812	1762.2640	1647351.82	0.00189164	0.0000078813
0.00001754	4356.0346	1626.4144	1824432.74	0.00245958	0.0000102475
0.00002047	4070.3779	1519.7587	1988923.41	0.00307088	0.0000127944
0.00002339	3838.1176	1433.0395	2143352.24	0.00372196	0.0000155071
0.00002632	3644.2752	1360.6645	2289491.11	0.00440993	0.0000183734
0.00002924	3479.1878	1299.0258	2428640.07	0.00513242	0.0000213835

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.15$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.00095 m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.00095 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.00095^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0063m.$$

ตารางที่ ข-24 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.15$

$\dot{V}_o \left(m^3/s \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	2592.3906	668903.02	0.00017067	0.0000010715
0.00000585	7063.5768	1910.9408	986143.13	0.00046307	0.0000029072
0.00000877	5909.4154	1598.7004	1237516.67	0.00083027	0.0000052126
0.00001170	5206.8070	1408.6206	1453840.46	0.00125640	0.0000078879
0.00001462	4719.8812	1276.8904	1647351.82	0.00173253	0.0000108771
0.00001754	4356.0346	1178.4574	1824432.74	0.00225269	0.0000141428
0.00002047	4070.3779	1101.1774	1988923.41	0.00281258	0.0000176579
0.00002339	3838.1176	1038.3430	2143352.24	0.00340889	0.0000214016
0.00002632	3644.2752	985.9020	2289491.11	0.00403899	0.0000253575
0.00002924	3479.1878	941.2401	2428640.07	0.00470071	0.0000295119

ค่าที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.2$

รัศมีของท่อทางไหล(Manifold)บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด (R_o) = 0.02 m.

ค่าความหนาของช่องทางไหล(Slit)ของแม่พิมพ์อัดรีด (H) = 0.000737m.

ค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์อัดรีด (L) = 1 m.

$$y_o = \frac{3HB}{8R_o} \left(\left(\frac{3n+1}{2n+1} \right) \left(\frac{BH^2}{2\pi R_o^3} \right) \right)^n = \frac{3 \cdot 0.000737 \cdot 2}{8 \cdot 0.02} \left(\left(\frac{(3 \cdot 0.85)+1}{(2 \cdot 0.85)+1} \right) \left(\frac{2 \cdot 0.000737^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.02^3} \right) \right)^{0.56}$$

$$= 0.0037 \text{ m.}$$

ตารางที่ ข-25 แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับกำหนดเส้นกราฟ $\frac{H}{y_o} = 0.2$

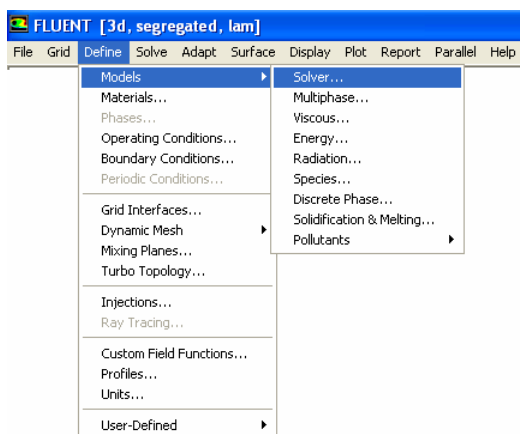
$\dot{V}_o \left(\frac{m^3}{s} \right)$	$\bar{\eta}_R$	$\bar{\eta}_R$	ΔP	$\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_s^2}$	$\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$
0.00000292	9582.4789	2073.3616	668903.02	0.00016058	0.0000013397
0.00000585	7063.5768	1528.3466	986143.13	0.00043570	0.0000036350
0.00000877	5909.4154	1278.6206	1237516.67	0.00078119	0.0000065174
0.00001170	5206.8070	1126.5972	1453840.46	0.00118214	0.0000098625
0.00001462	4719.8812	1021.2410	1647351.82	0.00163012	0.0000136000
0.00001754	4356.0346	942.5155	1824432.74	0.00211953	0.0000176832
0.00002047	4070.3779	880.7080	1988923.41	0.00264632	0.0000220782
0.00002339	3838.1176	830.4538	2143352.24	0.00320739	0.0000267591
0.00002632	3644.2752	788.5121	2289491.11	0.00380024	0.0000317053
0.00002924	3479.1878	752.7921	2428640.07	0.00442284	0.0000368997

ภาคผนวก ก

การกำหนดค่าเพื่อจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent

ขั้นตอนในการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Fluent มีดังนี้

- (1) เลือกรูปแบบการคำนวณที่จะใช้ในการจำลองการไหล โดยเลือกไปที่ Define/Models/Solver ดังแสดงในภาพที่ ค-1



ภาพที่ ค-1 แสดงตำแหน่งการเลือกรูปแบบการคำนวณในโปรแกรม Fluent

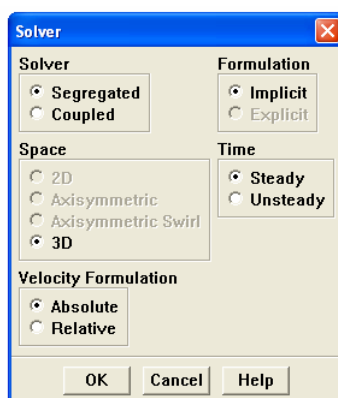
รูปแบบของการคำนวณกำหนดดังนี้

ช่อง Solver กำหนดให้เป็นแบบ Segregated

ช่อง Time กำหนดให้เป็นแบบ Steady

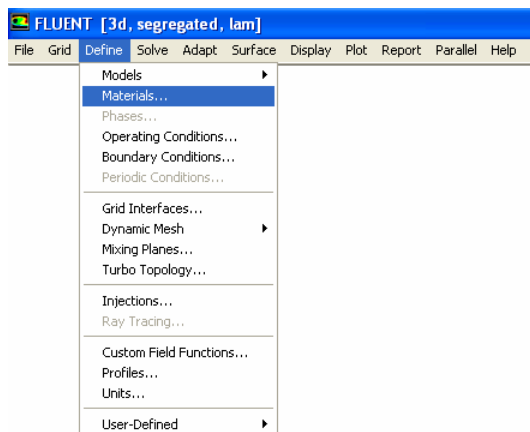
ช่อง Velocity Formulation กำหนดให้เป็นแบบ Absolute

อีก 2 ช่องที่เหลืออยู่เมื่อกำหนด Solver ให้เป็นแบบ Segregated จะไม่สามารถกำหนดค่าได้ โดยในช่อง Space จะกำหนดเป็น 3D และในช่อง Formulation กำหนดเป็น Implicit ดังแสดงในภาพที่ ค-2



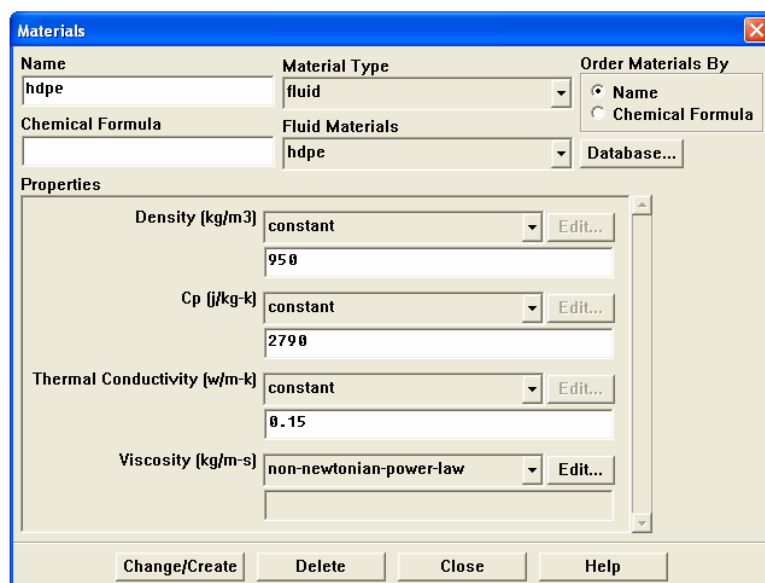
ภาพที่ ค-2 รูปแบบการคำนวณในโปรแกรม Fluent ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้

(2) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยเลือกไปที่ Define/Materials ดังแสดงในภาพที่ ค-3



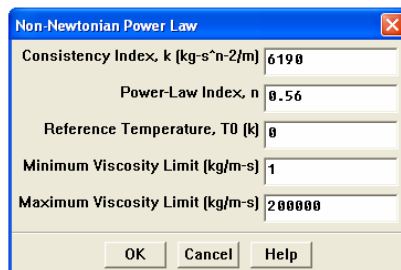
ภาพที่ ค-3 แสดงตำแหน่งการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Fluent

ในช่อง Materials จะกำหนดค่าตามคุณสมบัติของ HDPE ดังนี้
 ช่อง Density กำหนดให้มีค่าคงที่เป็น $950 \text{ (kg / m}^3\text{)}$
 ช่อง Cp กำหนดให้มีค่าคงที่เป็น $2790 \text{ (j / kg - k)}$
 ช่อง Thermal Conductivity กำหนดให้มีค่าคงที่เป็น 0.15 (w / m - k)



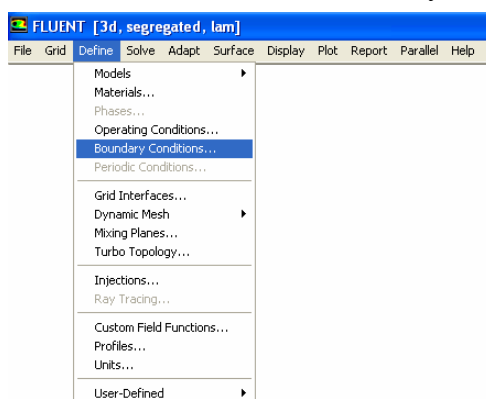
ภาพที่ ค-4 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติที่สามารถปรับค่าได้

ส่วนในช่อง Viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการกึ่งทฤษฎีชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งจะกำหนดค่าตัวแปรตามภาพที่ ค-5



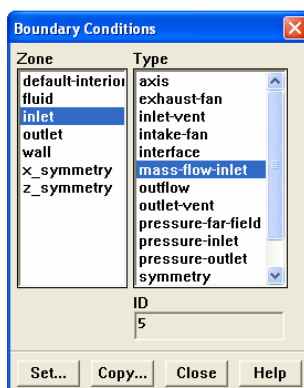
ภาพที่ ค-5 การกำหนดตัวแปรสำหรับวัสดุอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์

(3) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยเลือกไปที่ Define/Boundary Conditions แสดงในภาพที่ ค-6



ภาพที่ ค-6 แสดงตำแหน่งการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรม fluent

ทำการเลือกบริเวณที่จะกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Zone) และกำหนดชนิดเงื่อนไขขอบเขต (Type) ตามต้องการ ดังแสดงในภาพที่ ค-7



ภาพที่ ค-7 แสดงรูปแบบของเงื่อนไขขอบเขตที่สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม Fluent

ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ซึ่งกำหนดให้บริเวณทางเข้าเป็น Mass Flow Inlet (ภาพที่ ค-8) และกำหนดค่าตามอัตราการไหลที่ต้องการ บริเวณทางออกกำหนดให้เป็น Pressure Outlet กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 Pa (ภาพที่ ค-9) บริเวณผนังแม่พิมพ์กำหนดให้เป็น Wall และส่วนบริเวณระบายที่สมมาตรก็กำหนดให้เป็นเงื่อนไขแบบสมมาตร (ภาพที่ ค-10) ซึ่งมีรายละเอียดของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีดังนี้

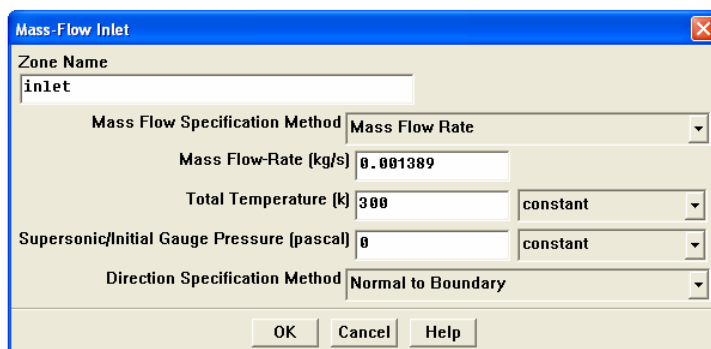
(3.1) กำหนดเงื่อนไขสมมาตรบริเวณผิวบนระนาบ XY และ YZ ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขนี้จะส่งผลให้บริเวณตั้งฉากกับระนาบไม่มีการเปลี่ยนแปลงข้ามผ่านระนาบนั้น (Zero Normal Gradient) โดยเงื่อนไขที่ใช้กำหนดความเป็นสมมาตรคือ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (Gradient) ของค่าใด ๆ ก็ตามข้ามผ่านระนาบนั้น

(3.2) บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ สามารถกำหนดเงื่อนไขได้ 2 ลักษณะ คือ Mass Flow Inlet และ Velocity Inlet ซึ่งจากสมมติฐานของการออกแบบกำหนดให้การไหลภายในแม่พิมพ์เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว ทำให้ค่าความหนาแน่นของพลาสติกไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทั้ง 2 ลักษณะจะให้ผลเช่นเดียวกัน แต่ถ้าเป็นการไหลแบบอัดตัวได้จะใช้ได้เฉพาะ Velocity Inlet เท่านั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้เงื่อนไขขอบเขตบริเวณทางเข้าเป็น Mass Flow Inlet เนื่องจากการกำหนดอัตราการผลิตในกระบวนการนี้จะกำหนดเป็นค่าของอัตราการไหล

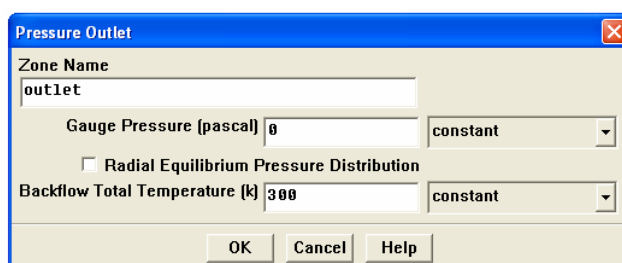
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอัตราการไหลในโปรแกรม Fluent สามารถที่จะกำหนดได้ทั้งขนาด ทิศทางและอุณหภูมิของของไหลที่จะใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้กำหนดให้ทิศทางของของไหลตั้งฉากกับพื้นที่บริเวณทางเข้า ส่วนค่าอุณหภูมินั้นไม่มีผลกับการคำนวณเนื่องจากสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณคืออุณหภูมิของพลาสติกไม่เปลี่ยนแปลง และค่าอัตราการไหลกำหนดตามความต้องการที่ใช้ในการสร้างกราฟ

(3.3) บริเวณทางออกของแม่พิมพ์กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีค่าความดันคงที่ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะกำหนดให้ค่าความดันมีค่าเท่ากับ 0 ปาสคาล ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

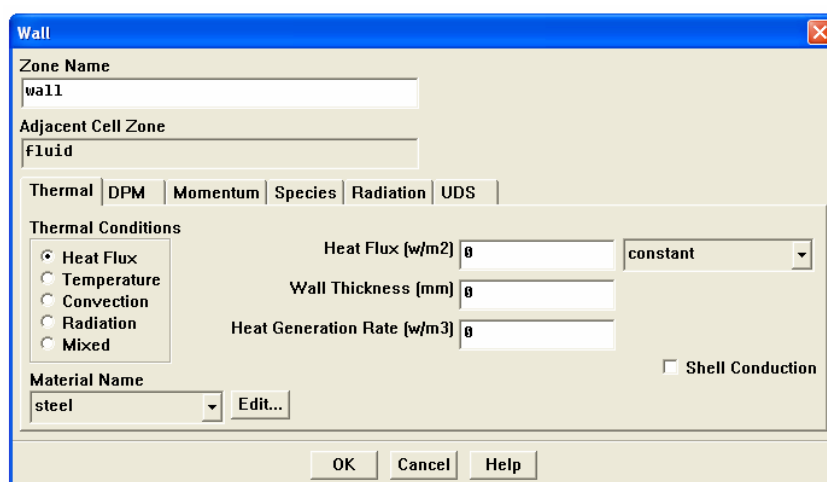
(3.4) เงื่อนไขขอบเขตสุดท้ายที่ทำการกำหนดคือ การกำหนดให้พื้นผิวที่เหล็อยู่เป็นผนัง และกำหนดให้ผนังไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยใส่ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้เท่ากับศูนย์



ภาพที่ ค-8 แสดงการกำหนดอัตราการไหลบริเวณทางเข้าแม่พิมพ์

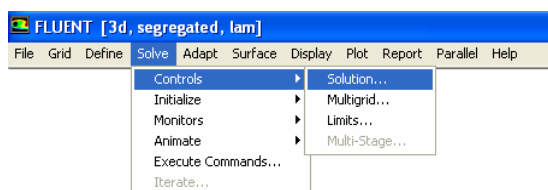


ภาพที่ ค-9 แสดงการกำหนดความดันบริเวณทางออกแม่พิมพ์



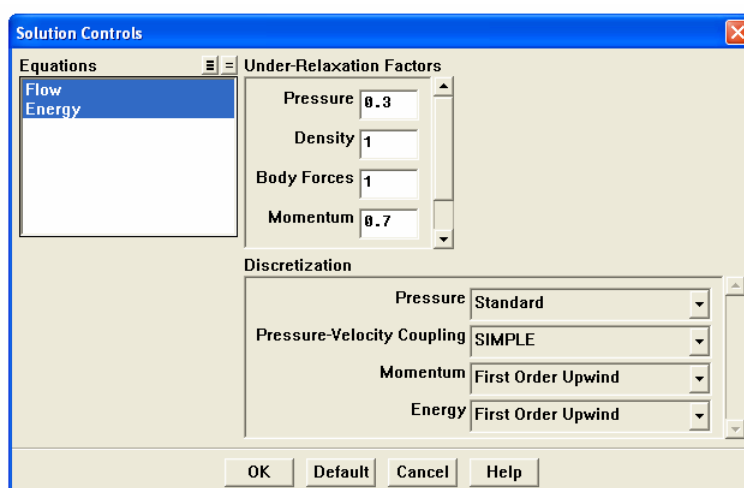
ภาพที่ ค-10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง

(4) ปรับค่าตัวแปรสำหรับควบคุมการคำนวณ โดยเลือกไปที่ Solve/Controls/Solution ดังแสดงในภาพที่ ค-11



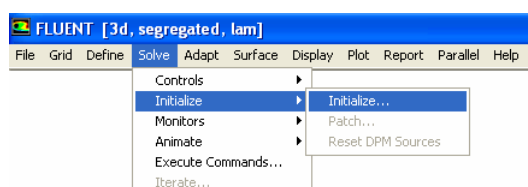
ภาพที่ ค-11 แสดงตำแหน่งการปรับค่าตัวแปรสำหรับควบคุมการคำนวณ

การปรับค่าตัวแปรสำหรับควบคุมการคำนวณ จะเป็นส่วนที่กำหนดค่า Relaxation Factors ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการคูณกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละ Mesh เพื่อปรับค่าจากการคำนวณให้ลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วขึ้น และรูปแบบของการกำหนดค่าในการ Discretization เพื่อทำการกำหนดค่าให้กับ Mesh ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับ Mesh ที่ได้ทำการคำนวณแล้ว แสดงการกำหนดค่าในภาพที่ ค-12



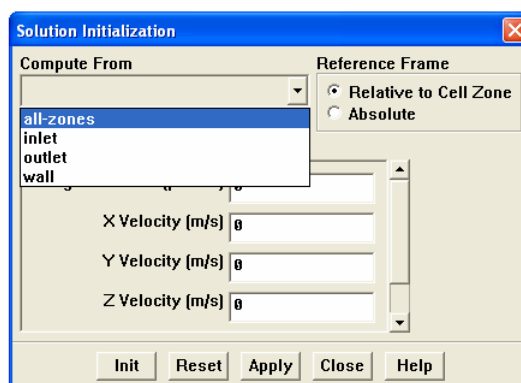
ภาพที่ ค-12 ตัวแปรและรูปแบบสมการสำหรับควบคุมการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย

(5) กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ โดยเลือกไปที่ Solve/Initialize/Initialize ดังแสดงในภาพที่ ค-13



ภาพที่ ค-13 แสดงตำแหน่งการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ

การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ จะเป็นการกำหนดค่าให้กับทุก Mesh เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับแทนค่าในการคำนวณ โดยกำหนดให้ค่าของ Mesh มีค่าเท่ากับเงื่อนไขขอบเขตค่าใดค่าหนึ่งที่ได้กำหนดไว้แล้ว หรืออาจจะกำหนดโดยใช้ค่าเฉลี่ยของ Mesh ทุก Mesh (All-Zones) เป็นค่าเริ่มต้นก็ได้ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณเป็นแบบ All-Zones แสดงการกำหนดในภาพที่ ค-14



ภาพที่ ค-14 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ

เมื่อกำหนดค่าทุกอย่างตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการจำลองการไหล

ภาคผนวก ง

โปรแกรมที่ใช้สำหรับช่วยในการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

การสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้โปรแกรม Gambit นั้นจะมีขั้นตอนในการสร้างหลายขั้นตอน ซึ่งจะเกิดความไม่สะดวกขึ้นถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องแก้ไขรูปร่างของแม่พิมพ์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยสำหรับการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อขึ้น โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel เพื่อช่วยในการคำนวณตำแหน่งของพิกัดที่จะใช้สร้างแบบจำลอง และทำการเขียนไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น .JOU ซึ่งเป็นชนิดของไฟล์ที่สามารถนำไปใช้เพื่อสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit ได้ ซึ่งจะมีขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังนี้

ขั้นตอนแรกทำการเปิดโปรแกรม Excel และเปิดไฟล์ Program_Write_Jou_File (อยู่ในแผ่นข้อมูลที่ได้นำมาเก็บกับวิทยานิพนธ์) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้เตรียมไว้เพื่อทำการคำนวณตำแหน่งของพิกัดที่จะใช้สร้างแบบจำลอง ในการใช้งานโปรแกรมก็คือ สามารถที่จะกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยตัวแปรที่สามารถกำหนดได้ประกอบด้วย ความหนาของปากแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ค่าดัชนีชี้กำลังซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของวัสดุ ค่ารัศมีบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ และระยะเผื่อของช่องทางไหล ซึ่งค่าที่สามารถกำหนดได้จะเป็นตัวอักษรสีแดงพื้นสีเหลืองดังแสดงในภาพที่ ง-1

ความหนา	ความกว้าง	ก	ระยะเผื่อ	พ
10.00000	100.00000	0.50000	-1.00000	40.00000

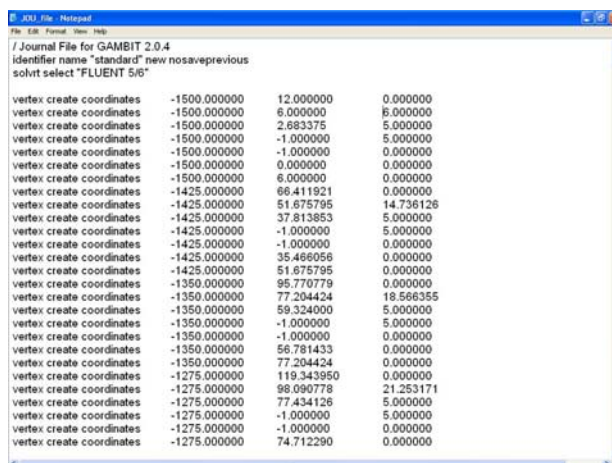
พ	ก	พ
32.26666819	40.00000	272.17389

Journal File for GAMBIT 2.0.4
vertex create coordinates
-1500.00000 12.30000 0.00000
-1500.00000 0.00000 0.00000
-1500.00000 2.682376 0.00000
-1500.00000 -1.00000 0.00000
-1500.00000 -1.00000 0.00000
-1500.00000 0.00000 0.00000
-1500.00000 0.00000 0.00000
-1500.00000 0.00000 0.00000
-1425.00000 66.411921 0.00000
-1425.00000 51.875795 14.736126
-1425.00000 37.813853 0.00000

ภาพที่ ง-1 ภาพแสดงโปรแกรม Program_Write_Jou_File เพื่อทำการคำนวณตำแหน่งของพิกัดที่จะใช้สร้างแบบจำลอง

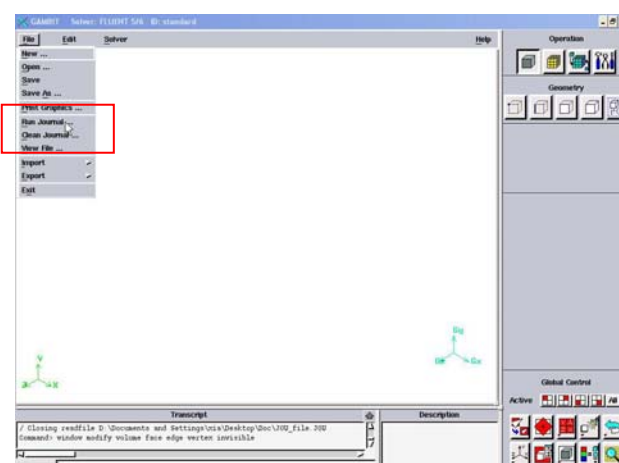
เมื่อทำการกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อแล้ว จะทำการคัดลอกข้อมูลในช่อง A ถึง D ระหว่างบรรทัดที่ 8 ถึง 730 และนำไปวางไว้ที่โปรแกรม

Notepad ทำการบันทึกไฟล์ให้มีนามสกุลเป็น .JOU เพื่อสร้าง Journal File ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit ดังแสดงในภาพที่ ง-2



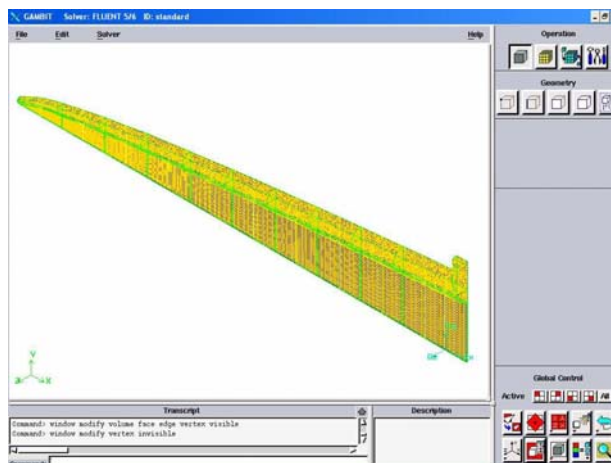
ภาพที่ ง-2 ภาพแสดงการวางข้อมูลลงในโปรแกรม Notepad เพื่อสร้าง Journal File ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit

จากนั้นสามารถที่จะนำ Journal File นี้ไปใช้ในโปรแกรม Gambit เพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น ซึ่งตำแหน่งของการเปิด Journal File ในโปรแกรม Gambit นี้จะอยู่ที่ File/Run Journal ดังแสดงในภาพที่ ง-3



ภาพที่ ง-3 ภาพแสดงการตำแหน่งของการเปิด Journal File ในโปรแกรม Gambit

เมื่อโปรแกรม Gambit อ่าน Journal File ที่ได้เขียนไว้แล้ว ก็จะทำการสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์อัดรีด รอนจนกระทั่งโปรแกรมอ่าน Journal File เรียบร้อยแล้วก็จะได้แบบจำลองของแม่พิมพ์อัดรีดที่พร้อมนำไปใช้จำลองการไหลในโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ ง-4



ภาพที่ ง-4 แสดงผลของการเปิด Journal File ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit

ตัวอย่าง Journal File ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้นในโปรแกรม Gambit ซึ่งขนาดของแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ได้จาก Journal File นี้จะมีขนาดของรัศมีของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 40 มม. ความหนาของปากแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 10 มม. ความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 1500 มม. ระยะเผื่อของช่องทางไหลมีค่าเท่ากับ 1 มม. (เครื่องหมายกำหนดให้เป็นลบเนื่องจากการตั้งแกนในแบบจำลอง) และใช้สำหรับพลาสติกที่มีค่า n เท่ากับ 0.56

/ Journal File for GAMBIT 2.0.4

identifier name "standard" new nosaveprevious

solvr select "FLUENT 5/6"

vertex create coordinates	-1000.000000	12.000000	0.000000
vertex create coordinates	-1000.000000	6.000000	6.000000
vertex create coordinates	-1000.000000	0.545644	2.500000
vertex create coordinates	-1000.000000	-1.000000	2.500000

vertex create coordinates	-1000.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-1000.000000	0.000000	0.000000
vertex create coordinates	-1000.000000	6.000000	0.000000
vertex create coordinates	-950.000000	43.667391	0.000000
vertex create coordinates	-950.000000	36.299328	7.368063
vertex create coordinates	-950.000000	29.368358	2.500000
vertex create coordinates	-950.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-950.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-950.000000	28.194459	0.000000
vertex create coordinates	-950.000000	36.299328	0.000000
vertex create coordinates	-900.000000	64.491876	0.000000
vertex create coordinates	-900.000000	55.208699	9.283178
vertex create coordinates	-900.000000	46.268487	2.500000
vertex create coordinates	-900.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-900.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-900.000000	44.997203	0.000000
vertex create coordinates	-900.000000	55.208699	0.000000
vertex create coordinates	-850.000000	81.432628	0.000000
vertex create coordinates	-850.000000	70.806043	10.626586
vertex create coordinates	-850.000000	60.477716	2.500000
vertex create coordinates	-850.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-850.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-850.000000	59.116798	0.000000
vertex create coordinates	-850.000000	70.806043	0.000000
vertex create coordinates	-800.000000	96.294362	0.000000
vertex create coordinates	-800.000000	84.598291	11.696071
vertex create coordinates	-800.000000	73.172528	2.500000
vertex create coordinates	-800.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-800.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-800.000000	71.732613	0.000000

vertex create coordinates	-800.000000	84.598291	0.000000
vertex create coordinates	-750.000000	109.793954	0.000000
vertex create coordinates	-750.000000	97.194743	12.599210
vertex create coordinates	-750.000000	84.846055	2.500000
vertex create coordinates	-750.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-750.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-750.000000	83.335612	0.000000
vertex create coordinates	-750.000000	97.194743	0.000000
vertex create coordinates	-700.000000	122.306251	0.000000
vertex create coordinates	-700.000000	108.917592	13.388659
vertex create coordinates	-700.000000	95.764410	2.500000
vertex create coordinates	-700.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-700.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-700.000000	94.190067	0.000000
vertex create coordinates	-700.000000	108.917592	0.000000
vertex create coordinates	-650.000000	134.057539	0.000000
vertex create coordinates	-650.000000	119.962942	14.094597
vertex create coordinates	-650.000000	106.091832	2.500000
vertex create coordinates	-650.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-650.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-650.000000	104.458885	0.000000
vertex create coordinates	-650.000000	119.962942	0.000000
vertex create coordinates	-600.000000	145.197313	0.000000
vertex create coordinates	-600.000000	130.461187	14.736126
vertex create coordinates	-600.000000	115.938673	2.500000
vertex create coordinates	-600.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-600.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-600.000000	114.251449	0.000000
vertex create coordinates	-600.000000	130.461187	0.000000
vertex create coordinates	-550.000000	155.830692	0.000000

vertex create coordinates	-550.000000	140.504503	15.326189
vertex create coordinates	-550.000000	125.383589	2.500000
vertex create coordinates	-550.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-550.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-550.000000	123.645696	0.000000
vertex create coordinates	-550.000000	140.504503	0.000000
vertex create coordinates	-500.000000	166.035059	0.000000
vertex create coordinates	-500.000000	150.161048	15.874011
vertex create coordinates	-500.000000	134.485137	2.500000
vertex create coordinates	-500.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-500.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-500.000000	132.699637	0.000000
vertex create coordinates	-500.000000	150.161048	0.000000
vertex create coordinates	-450.000000	175.869419	0.000000
vertex create coordinates	-450.000000	159.482993	16.386425
vertex create coordinates	-450.000000	143.288397	2.500000
vertex create coordinates	-450.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-450.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-450.000000	141.457925	0.000000
vertex create coordinates	-450.000000	159.482993	0.000000
vertex create coordinates	-400.000000	185.380036	0.000000
vertex create coordinates	-400.000000	168.511382	16.868653
vertex create coordinates	-400.000000	151.829012	2.500000
vertex create coordinates	-400.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-400.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-400.000000	149.955864	0.000000
vertex create coordinates	-400.000000	168.511382	0.000000
vertex create coordinates	-350.000000	194.604015	0.000000
vertex create coordinates	-350.000000	177.279233	17.324782
vertex create coordinates	-350.000000	160.135777	2.500000

vertex create coordinates	-350.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-350.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-350.000000	158.221973	0.000000
vertex create coordinates	-350.000000	177.279233	0.000000
vertex create coordinates	-300.000000	203.571681	0.000000
vertex create coordinates	-300.000000	185.813601	17.758080
vertex create coordinates	-300.000000	168.232378	2.500000
vertex create coordinates	-300.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-300.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-300.000000	166.279713	0.000000
vertex create coordinates	-300.000000	185.813601	0.000000
vertex create coordinates	-250.000000	212.308211	0.000000
vertex create coordinates	-250.000000	194.137005	18.171206
vertex create coordinates	-250.000000	176.138596	2.500000
vertex create coordinates	-250.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-250.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-250.000000	174.148679	0.000000
vertex create coordinates	-250.000000	194.137005	0.000000
vertex create coordinates	-200.000000	220.834794	0.000000
vertex create coordinates	-200.000000	202.268439	18.566355
vertex create coordinates	-200.000000	183.871169	2.500000
vertex create coordinates	-200.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-200.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-200.000000	181.845448	0.000000
vertex create coordinates	-200.000000	202.268439	0.000000
vertex create coordinates	-150.000000	229.169472	0.000000
vertex create coordinates	-150.000000	210.224107	18.945365
vertex create coordinates	-150.000000	191.444415	2.500000
vertex create coordinates	-150.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-150.000000	-1.000000	0.000000

vertex create coordinates	-150.000000	189.384206	0.000000
vertex create coordinates	-150.000000	210.224107	0.000000
vertex create coordinates	-100.000000	237.327764	0.000000
vertex create coordinates	-100.000000	218.017976	19.309788
vertex create coordinates	-100.000000	198.870708	2.500000
vertex create coordinates	-100.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-100.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-100.000000	196.777210	0.000000
vertex create coordinates	-100.000000	218.017976	0.000000
vertex create coordinates	-50.000000	245.323140	0.000000
vertex create coordinates	-50.000000	225.662188	19.660951
vertex create coordinates	-50.000000	206.160829	2.500000
vertex create coordinates	-50.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	-50.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	-50.000000	204.035142	0.000000
vertex create coordinates	-50.000000	225.662188	0.000000
vertex create coordinates	0.000000	253.167385	0.000000
vertex create coordinates	0.000000	233.167385	20.000000
vertex create coordinates	0.000000	213.324250	2.500000
vertex create coordinates	0.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	0.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	0.000000	211.167385	0.000000
vertex create coordinates	0.000000	233.167385	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	260.87088	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	240.54296	20.327927
vertex create coordinates	50.000000	220.369345	2.500000
vertex create coordinates	50.000000	-1.000000	2.500000
vertex create coordinates	50.000000	-1.000000	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	218.18224	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	240.54296	0.000000

vertex create coordinates	50.000000	241.542957	0.000000
vertex create coordinates	30.000000	241.542957	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	241.542957	20.000000
vertex create coordinates	50.000000	290.870885	0.000000
vertex create coordinates	30.000000	290.870885	0.000000
vertex create coordinates	50.000000	290.870885	20.000000

/-----

```

edge create threepoints "vertex.1""vertex.2""vertex.3" arc
edge split "edge.1" vertex "vertex.2" connected
edge create straight "vertex.3""vertex.4"
edge create straight "vertex.4""vertex.5"
edge create straight "vertex.5""vertex.6"
edge create straight "vertex.6""vertex.7"
edge create straight "vertex.7""vertex.1"
edge create threepoints "vertex.8""vertex.9""vertex.10" arc
edge split "edge.8" vertex "vertex.9" connected
edge create straight "vertex.10""vertex.11"
edge create straight "vertex.11""vertex.12"
edge create straight "vertex.12""vertex.13"
edge create straight "vertex.13""vertex.14"
edge create straight "vertex.14""vertex.8"
edge create threepoints "vertex.15""vertex.16""vertex.17" arc
edge split "edge.15" vertex "vertex.16" connected
edge create straight "vertex.17""vertex.18"
edge create straight "vertex.18""vertex.19"
edge create straight "vertex.19""vertex.20"
edge create straight "vertex.20""vertex.21"
edge create straight "vertex.21""vertex.15"
edge create threepoints "vertex.22""vertex.23""vertex.24" arc
edge split "edge.22" vertex "vertex.23" connected

```

```
edge create straight "vertex.24""vertex.25"
edge create straight "vertex.25""vertex.26"
edge create straight "vertex.26""vertex.27"
edge create straight "vertex.27""vertex.28"
edge create straight "vertex.28""vertex.22"
edge create threepoints "vertex.29""vertex.30""vertex.31" arc
edge split "edge.29" vertex "vertex.30" connected
edge create straight "vertex.31""vertex.32"
edge create straight "vertex.32""vertex.33"
edge create straight "vertex.33""vertex.34"
edge create straight "vertex.34""vertex.35"
edge create straight "vertex.35""vertex.29"
edge create threepoints "vertex.36""vertex.37""vertex.38" arc
edge split "edge.36" vertex "vertex.37" connected
edge create straight "vertex.38""vertex.39"
edge create straight "vertex.39""vertex.40"
edge create straight "vertex.40""vertex.41"
edge create straight "vertex.41""vertex.42"
edge create straight "vertex.42""vertex.36"
edge create threepoints "vertex.43""vertex.44""vertex.45" arc
edge split "edge.43" vertex "vertex.44" connected
edge create straight "vertex.45""vertex.46"
edge create straight "vertex.46""vertex.47"
edge create straight "vertex.47""vertex.48"
edge create straight "vertex.48""vertex.49"
edge create straight "vertex.49""vertex.43"
edge create threepoints "vertex.50""vertex.51""vertex.52" arc
edge split "edge.50" vertex "vertex.51" connected
edge create straight "vertex.52""vertex.53"
edge create straight "vertex.53""vertex.54"
```

edge create straight "vertex.54""vertex.55"
edge create straight "vertex.55""vertex.56"
edge create straight "vertex.56""vertex.50"
edge create threepoints "vertex.57""vertex.58""vertex.59" arc
edge split "edge.57" vertex "vertex.58" connected
edge create straight "vertex.59""vertex.60"
edge create straight "vertex.60""vertex.61"
edge create straight "vertex.61""vertex.62"
edge create straight "vertex.62""vertex.63"
edge create straight "vertex.63""vertex.57"
edge create threepoints "vertex.64""vertex.65""vertex.66" arc
edge split "edge.64" vertex "vertex.65" connected
edge create straight "vertex.66""vertex.67"
edge create straight "vertex.67""vertex.68"
edge create straight "vertex.68""vertex.69"
edge create straight "vertex.69""vertex.70"
edge create straight "vertex.70""vertex.64"
edge create threepoints "vertex.71""vertex.72""vertex.73" arc
edge split "edge.71" vertex "vertex.72" connected
edge create straight "vertex.73""vertex.74"
edge create straight "vertex.74""vertex.75"
edge create straight "vertex.75""vertex.76"
edge create straight "vertex.76""vertex.77"
edge create straight "vertex.77""vertex.71"
edge create threepoints "vertex.78""vertex.79""vertex.80" arc
edge split "edge.78" vertex "vertex.79" connected
edge create straight "vertex.80""vertex.81"
edge create straight "vertex.81""vertex.82"
edge create straight "vertex.82""vertex.83"
edge create straight "vertex.83""vertex.84"

edge create straight "vertex.84""vertex.78"
edge create threepoints "vertex.85""vertex.86""vertex.87" arc
edge split "edge.85" vertex "vertex.86" connected
edge create straight "vertex.87""vertex.88"
edge create straight "vertex.88""vertex.89"
edge create straight "vertex.89""vertex.90"
edge create straight "vertex.90""vertex.91"
edge create straight "vertex.91""vertex.85"
edge create threepoints "vertex.92""vertex.93""vertex.94" arc
edge split "edge.92" vertex "vertex.93" connected
edge create straight "vertex.94""vertex.95"
edge create straight "vertex.95""vertex.96"
edge create straight "vertex.96""vertex.97"
edge create straight "vertex.97""vertex.98"
edge create straight "vertex.98""vertex.92"
edge create threepoints "vertex.99""vertex.100""vertex.101" arc
edge split "edge.99" vertex "vertex.100" connected
edge create straight "vertex.101""vertex.102"
edge create straight "vertex.102""vertex.103"
edge create straight "vertex.103""vertex.104"
edge create straight "vertex.104""vertex.105"
edge create straight "vertex.105""vertex.99"
edge create threepoints "vertex.106""vertex.107""vertex.108" arc
edge split "edge.106" vertex "vertex.107" connected
edge create straight "vertex.108""vertex.109"
edge create straight "vertex.109""vertex.110"
edge create straight "vertex.110""vertex.111"
edge create straight "vertex.111""vertex.112"
edge create straight "vertex.112""vertex.106"
edge create threepoints "vertex.113""vertex.114""vertex.115" arc

edge split "edge.113" vertex "vertex.114" connected
edge create straight "vertex.115""vertex.116"
edge create straight "vertex.116""vertex.117"
edge create straight "vertex.117""vertex.118"
edge create straight "vertex.118""vertex.119"
edge create straight "vertex.119""vertex.113"
edge create threepoints "vertex.120""vertex.121""vertex.122" arc
edge split "edge.120" vertex "vertex.121" connected
edge create straight "vertex.122""vertex.123"
edge create straight "vertex.123""vertex.124"
edge create straight "vertex.124""vertex.125"
edge create straight "vertex.125""vertex.126"
edge create straight "vertex.126""vertex.120"
edge create threepoints "vertex.127""vertex.128""vertex.129" arc
edge split "edge.127" vertex "vertex.128" connected
edge create straight "vertex.129""vertex.130"
edge create straight "vertex.130""vertex.131"
edge create straight "vertex.131""vertex.132"
edge create straight "vertex.132""vertex.133"
edge create straight "vertex.133""vertex.127"
edge create threepoints "vertex.134""vertex.135""vertex.136" arc
edge split "edge.134" vertex "vertex.135" connected
edge create straight "vertex.136""vertex.137"
edge create straight "vertex.137""vertex.138"
edge create straight "vertex.138""vertex.139"
edge create straight "vertex.139""vertex.140"
edge create straight "vertex.140""vertex.134"
edge create threepoints "vertex.141""vertex.142""vertex.143" arc
edge split "edge.141" vertex "vertex.142" connected
edge create straight "vertex.143""vertex.144"

```

edge create straight "vertex.144""vertex.145"
edge create straight "vertex.145""vertex.146"
edge create straight "vertex.146""vertex.147"
edge create straight "vertex.147""vertex.141"
edge create threepoints "vertex.148""vertex.149""vertex.150" arc
edge split "edge.148" vertex "vertex.149" connected
edge create straight "vertex.150""vertex.151"
edge create straight "vertex.151""vertex.152"
edge create straight "vertex.152""vertex.153"
edge create straight "vertex.153""vertex.154"
edge create straight "vertex.154""vertex.148"
edge create fillet "edge.2" "edge.3" parameters 0.9 0.9 radius 1.20000 trim
edge create fillet "edge.9" "edge.10" parameters 0.9 0.9 radius 1.47361 trim
edge create fillet "edge.16" "edge.17" parameters 0.5 0.5 radius 1.85664 trim
edge create fillet "edge.23" "edge.24" parameters 0.5 0.5 radius 2.12532 trim
edge create fillet "edge.30" "edge.31" parameters 0.5 0.5 radius 2.33921 trim
edge create fillet "edge.37" "edge.38" parameters 0.5 0.5 radius 2.51984 trim
edge create fillet "edge.44" "edge.45" parameters 0.5 0.5 radius 2.67773 trim
edge create fillet "edge.51" "edge.52" parameters 0.5 0.5 radius 2.81892 trim
edge create fillet "edge.58" "edge.59" parameters 0.5 0.5 radius 2.94723 trim
edge create fillet "edge.65" "edge.66" parameters 0.5 0.5 radius 3.06524 trim
edge create fillet "edge.72" "edge.73" parameters 0.5 0.5 radius 3.17480 trim
edge create fillet "edge.79" "edge.80" parameters 0.5 0.5 radius 3.27729 trim
edge create fillet "edge.86" "edge.87" parameters 0.5 0.5 radius 3.37373 trim
edge create fillet "edge.93" "edge.94" parameters 0.5 0.5 radius 3.46496 trim
edge create fillet "edge.100" "edge.101" parameters 0.5 0.5 radius 3.55162 trim
edge create fillet "edge.107" "edge.108" parameters 0.5 0.5 radius 3.63424 trim
edge create fillet "edge.114" "edge.115" parameters 0.5 0.5 radius 3.71327 trim
edge create fillet "edge.121" "edge.122" parameters 0.5 0.5 radius 3.78907 trim
edge create fillet "edge.128" "edge.129" parameters 0.5 0.5 radius 3.86196 trim

```

edge create fillet "edge.135" "edge.136" parameters 0.5 0.5 radius 3.93219 trim
 edge create fillet "edge.142" "edge.143" parameters 0.5 0.5 radius 4.00000 trim
 edge create fillet "edge.149" "edge.150" parameters 0.5 0.5 radius 4.06559 trim
 edge create nurbs "vertex.1""vertex.8""vertex.15" interpolate
 edge create nurbs "vertex.2""vertex.9""vertex.16" interpolate
 edge create nurbs "vertex.162""vertex.164""vertex.166" interpolate
 edge create nurbs "vertex.4""vertex.11""vertex.18" interpolate
 edge create nurbs "vertex.5""vertex.12""vertex.19" interpolate
 edge create nurbs "vertex.6""vertex.13""vertex.20" interpolate
 edge create nurbs "vertex.7""vertex.14""vertex.21" interpolate
 edge create nurbs "vertex.15""vertex.22""vertex.29" interpolate
 edge create nurbs "vertex.16""vertex.23""vertex.30" interpolate
 edge create nurbs "vertex.166""vertex.168""vertex.170" interpolate
 edge create nurbs "vertex.18""vertex.25""vertex.32" interpolate
 edge create nurbs "vertex.19""vertex.26""vertex.33" interpolate
 edge create nurbs "vertex.20""vertex.27""vertex.34" interpolate
 edge create nurbs "vertex.21""vertex.28""vertex.35" interpolate
 edge create nurbs "vertex.29""vertex.36""vertex.43" interpolate
 edge create nurbs "vertex.30""vertex.37""vertex.44" interpolate
 edge create nurbs "vertex.170""vertex.172""vertex.174" interpolate
 edge create nurbs "vertex.32""vertex.39""vertex.46" interpolate
 edge create nurbs "vertex.33""vertex.40""vertex.47" interpolate
 edge create nurbs "vertex.34""vertex.41""vertex.48" interpolate
 edge create nurbs "vertex.35""vertex.42""vertex.49" interpolate
 edge create nurbs "vertex.43""vertex.50""vertex.57" interpolate
 edge create nurbs "vertex.44""vertex.51""vertex.58" interpolate
 edge create nurbs "vertex.174""vertex.176""vertex.178" interpolate
 edge create nurbs "vertex.46""vertex.53""vertex.60" interpolate
 edge create nurbs "vertex.47""vertex.54""vertex.61" interpolate
 edge create nurbs "vertex.48""vertex.55""vertex.62" interpolate

edge create nurbs "vertex.49""vertex.56""vertex.63" interpolate
 edge create nurbs "vertex.57""vertex.64""vertex.71" interpolate
 edge create nurbs "vertex.58""vertex.65""vertex.72" interpolate
 edge create nurbs "vertex.178""vertex.180""vertex.182" interpolate
 edge create nurbs "vertex.60""vertex.67""vertex.74" interpolate
 edge create nurbs "vertex.61""vertex.68""vertex.75" interpolate
 edge create nurbs "vertex.62""vertex.69""vertex.76" interpolate
 edge create nurbs "vertex.63""vertex.70""vertex.77" interpolate
 edge create nurbs "vertex.71""vertex.78""vertex.85" interpolate
 edge create nurbs "vertex.72""vertex.79""vertex.86" interpolate
 edge create nurbs "vertex.182""vertex.184""vertex.186" interpolate
 edge create nurbs "vertex.74""vertex.81""vertex.88" interpolate
 edge create nurbs "vertex.75""vertex.82""vertex.89" interpolate
 edge create nurbs "vertex.76""vertex.83""vertex.90" interpolate
 edge create nurbs "vertex.77""vertex.84""vertex.91" interpolate
 edge create nurbs "vertex.85""vertex.92""vertex.99" interpolate
 edge create nurbs "vertex.86""vertex.93""vertex.100" interpolate
 edge create nurbs "vertex.186""vertex.188""vertex.190" interpolate
 edge create nurbs "vertex.88""vertex.95""vertex.102" interpolate
 edge create nurbs "vertex.89""vertex.96""vertex.103" interpolate
 edge create nurbs "vertex.90""vertex.97""vertex.104" interpolate
 edge create nurbs "vertex.91""vertex.98""vertex.105" interpolate
 edge create nurbs "vertex.99""vertex.106""vertex.113" interpolate
 edge create nurbs "vertex.100""vertex.107""vertex.114" interpolate
 edge create nurbs "vertex.190""vertex.192""vertex.194" interpolate
 edge create nurbs "vertex.102""vertex.109""vertex.116" interpolate
 edge create nurbs "vertex.103""vertex.110""vertex.117" interpolate
 edge create nurbs "vertex.104""vertex.111""vertex.118" interpolate
 edge create nurbs "vertex.105""vertex.112""vertex.119" interpolate
 edge create nurbs "vertex.113""vertex.120""vertex.127" interpolate

edge create nurbs "vertex.114""vertex.121""vertex.128" interpolate
edge create nurbs "vertex.194""vertex.196""vertex.198" interpolate
edge create nurbs "vertex.116""vertex.123""vertex.130" interpolate
edge create nurbs "vertex.117""vertex.124""vertex.131" interpolate
edge create nurbs "vertex.118""vertex.125""vertex.132" interpolate
edge create nurbs "vertex.119""vertex.126""vertex.133" interpolate
edge create nurbs "vertex.127""vertex.134""vertex.141""vertex.148" interpolate
edge create nurbs "vertex.128""vertex.135""vertex.142""vertex.149" interpolate
edge create nurbs "vertex.198""vertex.200""vertex.202""vertex.204" interpolate
edge create nurbs "vertex.130""vertex.137""vertex.144""vertex.151" interpolate
edge create nurbs "vertex.131""vertex.138""vertex.145""vertex.152" interpolate
edge create nurbs "vertex.132""vertex.139""vertex.146""vertex.153" interpolate
edge create nurbs "vertex.133""vertex.140""vertex.147""vertex.154" interpolate
edge create straight "vertex.2""vertex.7"
edge create straight "vertex.162""vertex.6"
edge create straight "vertex.16""vertex.21"
edge create straight "vertex.166""vertex.20"
edge create straight "vertex.30""vertex.35"
edge create straight "vertex.170""vertex.34"
edge create straight "vertex.44""vertex.49"
edge create straight "vertex.174""vertex.48"
edge create straight "vertex.58""vertex.63"
edge create straight "vertex.178""vertex.62"
edge create straight "vertex.72""vertex.77"
edge create straight "vertex.182""vertex.76"
edge create straight "vertex.86""vertex.91"
edge create straight "vertex.186""vertex.90"
edge create straight "vertex.100""vertex.105"
edge create straight "vertex.190""vertex.104"
edge create straight "vertex.114""vertex.119"

```

edge create straight "vertex.194""vertex.118"
edge create straight "vertex.128""vertex.133"
edge create straight "vertex.198""vertex.132"
edge create straight "vertex.149""vertex.154"
edge create straight "vertex.204""vertex.153"
edge create center2points "vertex.155""vertex.156""vertex.157" minarc arc
edge create straight "vertex.155""vertex.156"
edge create straight "vertex.155""vertex.157"
edge create center2points "vertex.158""vertex.159""vertex.160" minarc arc
edge create straight "vertex.158""vertex.159"
edge create straight "vertex.158""vertex.160"
edge create straight "vertex.155""vertex.158"
edge create straight "vertex.156""vertex.159"
edge create straight "vertex.157""vertex.160"
edge create nurbs "vertex.161""vertex.163""vertex.165" interpolate
edge create nurbs "vertex.165""vertex.167""vertex.169" interpolate
edge create nurbs "vertex.169""vertex.171""vertex.173" interpolate
edge create nurbs "vertex.173""vertex.175""vertex.177" interpolate
edge create nurbs "vertex.177""vertex.179""vertex.181" interpolate
edge create nurbs "vertex.181""vertex.183""vertex.185" interpolate
edge create nurbs "vertex.185""vertex.187""vertex.189" interpolate
edge create nurbs "vertex.189""vertex.191""vertex.193" interpolate
edge create nurbs "vertex.193""vertex.195""vertex.197" interpolate
edge create nurbs "vertex.197""vertex.199""vertex.201""vertex.203" interpolate
/-----
face create wireframe "edge.1""edge.247""edge.7" real
face create wireframe "edge.2""edge.155""edge.248""edge.6""edge.247" real
face create wireframe "edge.3""edge.4""edge.5""edge.248" real
face create wireframe "edge.15""edge.249""edge.21" real
face create wireframe "edge.16""edge.157""edge.250""edge.20""edge.249" real

```

```

face create wireframe "edge.17""edge.18""edge.19""edge.250" real
face create wireframe "edge.29""edge.251""edge.35" real
face create wireframe "edge.30""edge.159""edge.252""edge.34""edge.251" real
face create wireframe "edge.31""edge.32""edge.33""edge.252" real
face create wireframe "edge.43""edge.253""edge.49" real
face create wireframe "edge.44""edge.161""edge.254""edge.48""edge.253" real
face create wireframe "edge.45""edge.46""edge.47""edge.254" real
face create wireframe "edge.57""edge.255""edge.63" real
face create wireframe "edge.58""edge.163""edge.256""edge.62""edge.255" real
face create wireframe "edge.59""edge.60""edge.61""edge.256" real
face create wireframe "edge.71""edge.257""edge.77" real
face create wireframe "edge.72""edge.165""edge.258""edge.76""edge.257" real
face create wireframe "edge.73""edge.74""edge.75""edge.258" real
face create wireframe "edge.85""edge.259""edge.91" real
face create wireframe "edge.86""edge.167""edge.260""edge.90""edge.259" real
face create wireframe "edge.87""edge.88""edge.89""edge.260" real
face create wireframe "edge.99""edge.261""edge.105" real
face create wireframe "edge.100""edge.169""edge.262""edge.104""edge.261" real
face create wireframe "edge.101""edge.102""edge.103""edge.262" real
face create wireframe "edge.113""edge.263""edge.119" real
face create wireframe "edge.114""edge.171""edge.264""edge.118""edge.263" real
face create wireframe "edge.115""edge.116""edge.117""edge.264" real
face create wireframe "edge.127""edge.265""edge.133" real
face create wireframe "edge.128""edge.173""edge.266""edge.132""edge.265" real
face create wireframe "edge.129""edge.130""edge.131""edge.266" real
face create wireframe "edge.148""edge.267""edge.154" real
face create wireframe "edge.149""edge.176""edge.268""edge.153""edge.267" real
face create wireframe "edge.150""edge.151""edge.152""edge.268" real
face create wireframe "edge.1""edge.15""edge.177""edge.178" real
face create wireframe "edge.2""edge.278""edge.16""edge.178" real

```

```

face create wireframe "edge.3""edge.17""edge.179""edge.180" real
face create wireframe "edge.4""edge.18""edge.180""edge.181" real
face create wireframe "edge.5""edge.19""edge.181""edge.182" real
face create wireframe "edge.6""edge.20""edge.182""edge.183" real
face create wireframe "edge.7""edge.21""edge.183""edge.177" real
face create wireframe "edge.15""edge.29""edge.184""edge.185" real
face create wireframe "edge.16""edge.279""edge.30""edge.185" real
face create wireframe "edge.17""edge.31""edge.186""edge.187" real
face create wireframe "edge.18""edge.32""edge.187""edge.188" real
face create wireframe "edge.19""edge.33""edge.188""edge.189" real
face create wireframe "edge.20""edge.34""edge.189""edge.190" real
face create wireframe "edge.21""edge.35""edge.190""edge.184" real
face create wireframe "edge.29""edge.43""edge.191""edge.192" real
face create wireframe "edge.30""edge.280""edge.44""edge.192" real
face create wireframe "edge.31""edge.45""edge.193""edge.194" real
face create wireframe "edge.32""edge.46""edge.194""edge.195" real
face create wireframe "edge.33""edge.47""edge.195""edge.196" real
face create wireframe "edge.34""edge.48""edge.196""edge.197" real
face create wireframe "edge.35""edge.49""edge.197""edge.191" real
face create wireframe "edge.43""edge.57""edge.198""edge.199" real
face create wireframe "edge.44""edge.281""edge.58""edge.199" real
face create wireframe "edge.45""edge.59""edge.200""edge.201" real
face create wireframe "edge.46""edge.60""edge.201""edge.202" real
face create wireframe "edge.47""edge.61""edge.202""edge.203" real
face create wireframe "edge.48""edge.62""edge.203""edge.204" real
face create wireframe "edge.49""edge.63""edge.204""edge.198" real
face create wireframe "edge.57""edge.71""edge.205""edge.206" real
face create wireframe "edge.58""edge.282""edge.72""edge.206" real
face create wireframe "edge.59""edge.73""edge.207""edge.208" real
face create wireframe "edge.60""edge.74""edge.208""edge.209" real

```

face create wireframe "edge.61""edge.75""edge.209""edge.210" real
 face create wireframe "edge.62""edge.76""edge.210""edge.211" real
 face create wireframe "edge.63""edge.77""edge.211""edge.205" real
 face create wireframe "edge.71""edge.85""edge.212""edge.213" real
 face create wireframe "edge.72""edge.283""edge.86""edge.213" real
 face create wireframe "edge.73""edge.87""edge.214""edge.215" real
 face create wireframe "edge.74""edge.88""edge.215""edge.216" real
 face create wireframe "edge.75""edge.89""edge.216""edge.217" real
 face create wireframe "edge.76""edge.90""edge.217""edge.218" real
 face create wireframe "edge.77""edge.91""edge.218""edge.212" real
 face create wireframe "edge.85""edge.99""edge.219""edge.220" real
 face create wireframe "edge.86""edge.284""edge.100""edge.220" real
 face create wireframe "edge.87""edge.101""edge.221""edge.222" real
 face create wireframe "edge.88""edge.102""edge.222""edge.223" real
 face create wireframe "edge.89""edge.103""edge.223""edge.224" real
 face create wireframe "edge.90""edge.104""edge.224""edge.225" real
 face create wireframe "edge.91""edge.105""edge.225""edge.219" real
 face create wireframe "edge.99""edge.113""edge.226""edge.227" real
 face create wireframe "edge.100""edge.285""edge.114""edge.227" real
 face create wireframe "edge.101""edge.115""edge.228""edge.229" real
 face create wireframe "edge.102""edge.116""edge.229""edge.230" real
 face create wireframe "edge.103""edge.117""edge.230""edge.231" real
 face create wireframe "edge.104""edge.118""edge.231""edge.232" real
 face create wireframe "edge.105""edge.119""edge.232""edge.226" real
 face create wireframe "edge.113""edge.127""edge.233""edge.234" real
 face create wireframe "edge.114""edge.286""edge.128""edge.234" real
 face create wireframe "edge.115""edge.129""edge.235""edge.236" real
 face create wireframe "edge.116""edge.130""edge.236""edge.237" real
 face create wireframe "edge.117""edge.131""edge.237""edge.238" real
 face create wireframe "edge.118""edge.132""edge.238""edge.239" real

face create wireframe "edge.119""edge.133""edge.239""edge.233" real
 face create wireframe "edge.127""edge.148""edge.240""edge.241" real
 face create wireframe "edge.128""edge.287""edge.149""edge.241" real
 face create wireframe "edge.129""edge.150""edge.242""edge.243" real
 face create wireframe "edge.130""edge.151""edge.243""edge.244" real
 face create wireframe "edge.131""edge.152""edge.244""edge.245" real
 face create wireframe "edge.132""edge.153""edge.245""edge.246" real
 face create wireframe "edge.133""edge.154""edge.246""edge.240" real
 face create wireframe "edge.178""edge.247""edge.183""edge.249" real
 face create wireframe "edge.179""edge.248""edge.182""edge.250" real
 face create wireframe "edge.185""edge.249""edge.190""edge.251" real
 face create wireframe "edge.186""edge.250""edge.189""edge.252" real
 face create wireframe "edge.192""edge.251""edge.197""edge.253" real
 face create wireframe "edge.193""edge.252""edge.196""edge.254" real
 face create wireframe "edge.199""edge.253""edge.204""edge.255" real
 face create wireframe "edge.200""edge.254""edge.203""edge.256" real
 face create wireframe "edge.206""edge.255""edge.211""edge.257" real
 face create wireframe "edge.207""edge.256""edge.210""edge.258" real
 face create wireframe "edge.213""edge.257""edge.218""edge.259" real
 face create wireframe "edge.214""edge.258""edge.217""edge.260" real
 face create wireframe "edge.220""edge.259""edge.225""edge.261" real
 face create wireframe "edge.221""edge.260""edge.224""edge.262" real
 face create wireframe "edge.227""edge.261""edge.232""edge.263" real
 face create wireframe "edge.228""edge.262""edge.231""edge.264" real
 face create wireframe "edge.234""edge.263""edge.239""edge.265" real
 face create wireframe "edge.235""edge.264""edge.238""edge.266" real
 face create wireframe "edge.241""edge.265""edge.246""edge.267" real
 face create wireframe "edge.242""edge.266""edge.245""edge.268" real
 face create wireframe "edge.269""edge.270""edge.271" real
 face create wireframe "edge.272""edge.273""edge.274" real

face create wireframe "edge.275""edge.274""edge.277" "edge.271" real
 face create wireframe "edge.275""edge.273""edge.276" "edge.270" real
 face create wireframe "edge.276""edge.272""edge.277" "edge.269" real
 face create wireframe "edge.155""edge.157""edge.179""edge.278" real
 face create wireframe "edge.157""edge.159""edge.186""edge.279" real
 face create wireframe "edge.159""edge.161""edge.193""edge.280" real
 face create wireframe "edge.161""edge.163""edge.200""edge.281" real
 face create wireframe "edge.163""edge.165""edge.207""edge.282" real
 face create wireframe "edge.165""edge.167""edge.214""edge.283" real
 face create wireframe "edge.167""edge.169""edge.221""edge.284" real
 face create wireframe "edge.169""edge.171""edge.228""edge.285" real
 face create wireframe "edge.171""edge.173""edge.235""edge.286" real
 face create wireframe "edge.173""edge.176""edge.242""edge.287" real

/-----

volume create stitch "face.1""face.4""face.34""face.40""face.104" real
 volume create stitch "face.2""face.5""face.35""face.129""face.39""face.104""face.105" real
 volume create stitch "face.3""face.6""face.36""face.37""face.38""face.105" real
 volume create stitch "face.4""face.7""face.41""face.47""face.106" real
 volume create stitch "face.5""face.8""face.42""face.130""face.46""face.106""face.107" real
 volume create stitch "face.6""face.9""face.43""face.44""face.45""face.107" real
 volume create stitch "face.7""face.10""face.48""face.54""face.108" real
 volume create stitch "face.8""face.11""face.49""face.131""face.53""face.108""face.109" real
 volume create stitch "face.9""face.12""face.50""face.51""face.52""face.109" real
 volume create stitch "face.10""face.13""face.55""face.61""face.110" real
 volume create stitch "face.11""face.14""face.56""face.132""face.60""face.110""face.111" real
 volume create stitch "face.12""face.15""face.57""face.58""face.59""face.111" real
 volume create stitch "face.13""face.16""face.62""face.68""face.112" real
 volume create stitch "face.14""face.17""face.63""face.133""face.67""face.112""face.113" real
 volume create stitch "face.15""face.18""face.64""face.65""face.66""face.113" real
 volume create stitch "face.16""face.19""face.69""face.75""face.114" real

```

volume create stitch "face.17""face.20""face.70""face.134""face.74""face.114""face.115" real
volume create stitch "face.18""face.21""face.71""face.72""face.73""face.115" real
volume create stitch "face.19""face.22""face.76""face.82""face.116" real
volume create stitch "face.20""face.23""face.77""face.135""face.81""face.116""face.117" real
volume create stitch "face.21""face.24""face.78""face.79""face.80""face.117" real
volume create stitch "face.22""face.25""face.83""face.89""face.118" real
volume create stitch "face.23""face.26""face.84""face.136""face.88""face.118""face.119" real
volume create stitch "face.24""face.27""face.85""face.86""face.87""face.119" real
volume create stitch "face.25""face.28""face.90""face.96""face.120" real
volume create stitch "face.26""face.29""face.91""face.137""face.95""face.120""face.121" real
volume create stitch "face.27""face.30""face.92""face.93""face.94""face.121" real
volume create stitch "face.28""face.31""face.97""face.103""face.122" real
volume create stitch "face.29""face.32""face.98""face.138""face.102""face.122""face.123" real
volume create stitch "face.30""face.33""face.99""face.100""face.101""face.123" real
volume create stitch "face.124" "face.125" "face.126" "face.127" "face.128" real
volume unite volumes "volume.31" "volume.28"
edge round "edge.288" radius1 2
volume blend "volume.31"
window modify vertex invisible
window modify edge invisible
/-----
physics create "z_symmetry" btype "SYMMETRY" face "face.140" "face.102" \
"face.101" "face.96" "face.95" "face.94" "face.89" "face.88" "face.87" \
"face.82" "face.81" "face.80" "face.75" "face.74" "face.73" "face.68" \
"face.67" "face.66" "face.61" "face.60" "face.59" "face.54" "face.53" \
"face.52" "face.47" "face.46" "face.45" "face.40" "face.39" "face.38"
physics create "x_symmetry" btype "SYMMETRY" face "face.141" "face.32" "face.33"
physics create "inlet" btype "MASS_FLOW_INLET" face "face.125"
physics create "outlet" btype "PRESSURE_OUTLET" face "face.100" "face.93" "face.86" \
"face.79" "face.72" "face.65" "face.58" "face.51" "face.44" "face.37"

```

```
physics create "wall" btype "WALL" face "face.142" "face.143" "face.98" "face.138" \
"face.99" "face.128" "face.90" "face.91" "face.137" "face.92" "face.83" \
"face.84" "face.136" "face.85" "face.76" "face.77" "face.135" "face.78" \
"face.69" "face.70" "face.134" "face.71" "face.62" "face.63" "face.133" \
"face.64" "face.55" "face.56" "face.132" "face.57" "face.48" "face.49" \
"face.131" "face.50" "face.41" "face.42" "face.130" "face.43" "face.34" \
"face.35" "face.129" "face.36" "face.1" "face.2" "face.3"
```

/-----

```
volume mesh "volume.30" "volume.27" "volume.24" "volume.21" "volume.18" \
"volume.15" "volume.12" "volume.9" "volume.6" "volume.3" map size 5
volume mesh "volume.1" "volume.2" "volume.4" "volume.5" "volume.7" "volume.8" \
"volume.10" "volume.11" "volume.13" "volume.14" "volume.16" "volume.17" \
"volume.19" "volume.20" "volume.22" "volume.23" "volume.32" "volume.34" \
"volume.31" "volume.33" tetrahedral size 5
```

/-----

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายชาญยุทธ โกศลตะวงษ์
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ.2514 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับ ปวช. สาขาช่างกลโรงงาน จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมการผลิต (เกียรตินิยม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากLehigh University, USA

พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก The University of Wisconsin-Madison, USA

ชื่อ : นายสุพัฒน์ อรุณวรดิolk

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด
พลาสติกชนิดไม้แขวนเสื้อ

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดลพบุรี

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2538 สำเร็จการศึกษาระดับ ปวช. สาขาเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

พ.ศ.2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ