

การออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องไฮดรอลิก

Design of Thermoplastic Mold by Compressed Force Hydraulic Machine

นางสาวเบญจมาศ	เหมวิบูลย์
นายอรรถพร	ธนาวิชกุล
นายอุกฤษฏ์	ใจงาม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องไฮดรอลิก

Design of Thermoplastic Mold by Compressed Force Hydraulic Machine

นางสาวเบญจมาศ	เหมวิบูลย์
นายอรรคมพร	ธนาวิชกุล
นายอุกฤษฏ์	ใจงาม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

DESIGN OF THERMOPLASTIC MOLD BY COMPRESSED FORCE
HYDRAULIC MACHINE

MISS BENCHAMART

MR. AKKAPORN

MR. UKRIT

HEMWIBOON

THANAWANICHAGUL

JAINGAM

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องไฮดรอลิก

Design of Thermoplastic Mold by Compressed Force Hydraulic Machine

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|------------|--------------|----------|
| 1. นางสาวเบญจมาศ | เหมวิบูลย์ | รหัสนักศึกษา | 54010746 |
| 2. นายอรรชพร | ธนานิซกุล | รหัสนักศึกษา | 54011511 |
| 3. นายอุกฤษฏ์ | ใจงาม | รหัสนักศึกษา | 54011569 |



(ดร.เจษฎา ชัยโถม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา



(ดร.เอกภาพ ไพรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

หัวข้อโครงการ	การออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องไฮดรอลิก	
จัดทำโดย	นางสาวเบญจมาศ	เหมวิบูลย์
	นายอรรถพร	ธนานิซกุล
	นายอุกฤษฏ์	ใจงาม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เจษฎา	ชัยโหม
	ดร.เอกภพ	ไพรมย์
	สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร	

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก เพื่อขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) และใยแก้วสองทิศทาง การออกแบบกลไกของแม่พิมพ์ขึ้นรูป (ชุดให้ความร้อนและชุดแม่พิมพ์) นั้นออกแบบโดยอาศัยการกดอัดภายใต้แรงดัน 15 ตัน (6.54 MPa) โดยชุดให้ความร้อนที่ใช้เป็นฮีตเตอร์ชนิดแท่ง ส่วนของแม่พิมพ์ได้มีการออกแบบให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 400x400 mm² มีความหนา 40 mm โดยในการอัดขึ้นรูปได้ศึกษาวัสดุผสมที่ผลิตจากอนุหภูมิแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 170 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการกดค้างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน คือ 1 3 5 และ 7 นาที โดยการอัดขึ้นรูปจะได้วัสดุผสมขนาด 150 x 150 mm² จากนั้นเป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ โดยต้องการให้เทอร์โมพลาสติกหลอมรวมกับใยแก้วเพื่อเป็นวัสดุผสม และทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์เพื่อให้พลาสติกแข็งตัว โดยมีการศึกษาข้อมูลต่างๆ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์อยู่ในช่วง 54-69 % และประสิทธิภาพในการหล่อเย็นแม่พิมพ์เท่ากับ 62.05 % ส่วนอัตราการหล่อเย็นแม่พิมพ์ในช่วง 3 นาทีแรกมีอัตรา 30-37 °C/min และหลังจากนั้นมีอัตรา 3-5 °C/min ช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการอัดขึ้นรูป เกิดจากอากาศและไอน้ำติดอยู่ขณะอัดขึ้นรูป ก่อนพลาสติกละลายซึ่งแรงอัดจากไฮดรอลิกไม่สามารถไล่ออกไปได้ อนุหภูมิในการขึ้นรูปมีผลกับความหนาของวัสดุผสมเพียงเล็กน้อย ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการคือ 4-6 บาทต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติกในแต่ละรอบ

คำสำคัญ : อัดขึ้นรูป Polypropylene ใยแก้ว

Project Title	Design of Thermoplastic Mold by Compressed force Hydraulic Machine	
Students	Miss Benchamart	Hemwiboon
	Mr. Akkaporn	Thanawanichagul
	Mr. Ukrit	Jaingam
Project Advisor	Dr.Jedsada	Chaishome
	Dr.Ekapop	Pairam
Submitted for	Bachelor's Degree in Food Engineering, Major of Food Engineering Faculty of Engineering King's Mongkut Institute of Technology Ladkrabang	

ABSTRACT

This project is a study of the design of thermoplastic mold by compressed force hydraulic machine for forming composite materials. Bi-directional glass fiber woven reinforced polypropylene composites were manufactured by compression force at 15 ton or 6.54 MPa within a pair of 400x400x40 mm mold size. The Process parameters are mold temperature at 170, 180, 190 and 200 degrees Celsius and 1, 3, 5 and 7 minutes of dwelling time. The results showed that the thermal efficiency of mold is 54 – 69 per cent at temperature of 170, 180, 190 and 200 degrees Celsius and cooling efficiency of mold is about 60 per cent. For the first three minute, the cooling rate is between 30 and 37 degree Celsius per minute and that then is between 3 and 5 degree Celsius per minute. Air and vapor entrapment in pre-impregnation molding is causing void inside composites as expected. Nevertheless, molding temperature has marginal effect on thickness of composites. Electricity cost per a process is 4-6 baht approximately.

Keyword : Compression molding; Polypropylene; fiberglass

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เจษฎา ชัยโฉม และ ดร.เอกภพ ไพรัมย์ ที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อข้อมูล ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สละเวลามาให้ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ให้คำแนะนำ และกำลังใจในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการวิจัย

และสำหรับคุณความดีอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีเสมอมา

นางสาวเบญจมาศ

เหมวิบูลย์

นายอรรชพร

ธนาวิชกุล

นายอุกฤษฏ์

ใจงาม

สารบัญ

	หน้า
ปกใน(ภาษาไทย)	I
ปกใน(ภาษาอังกฤษ)	II
หน้าอนุมัติ	III
บทคัดย่อ	IV
Abstract	V
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูปภาพ	XI
รายการสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสารและแหล่งข้อมูล	
2.1 วัสดุผสม	3
2.1.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค	3
2.1.2 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย	3
2.1.3 วัสดุผสมโครงสร้าง	4
2.2 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP)	5
2.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรไพลีน	5
2.3 ไยแก้ว	6
2.4 กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก	7
2.5 ฮีตเตอร์	7
2.5.1 ฮีตเตอร์แท่ง	7
2.5.2 ฮีตเตอร์แผ่น	7
2.5.3 ฮีตเตอร์รัดท่อ	7
2.6 ปิ้ม	8
2.6.1 ประเภทของปิ้มน้ำ	8
2.6.2 คุณสมบัติของปิ้มแต่ละชนิด	8
2.7 ระบบอัดไฮดรอลิก	9
2.7.1 ข้อดี ข้อด้อย ของระบบไฮดรอลิก	9
2.7.2 ระบบไฮดรอลิกเบื้องต้น	10
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11

2.8.1 ลักษณะเครื่องกดอัด	11
2.8.2 วัฏจักรกระบวนการกดอัด	13
2.8.3 แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัด	14
2.8.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกดอัด	16
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณ	
3.1 ความเค้นอัด	17
3.2 ความเครียดอัด	17
3.3 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดภายในคาน	18
3.4 ความเค้นดัด	19
3.5 ค่าความปลอดภัย	21
3.5.1 ปัจจัยในการกำหนด	21
3.6 ความร้อน	21
3.6.1 ปริมาณความร้อน	21
3.6.2 การถ่ายเทความร้อน	22
3.7 การไหลในท่อ	22
3.7.1 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อ	23
3.7.2 สมการการพาความร้อน	24
3.7.3 การสูญเสียความดันภายในท่อ	25
3.8 การคำนวณค่าไฟ	27
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบ	
4.1 การคำนวณความหนาเหล็ก	29
4.2 การคำนวณชุดให้ความร้อน	31
4.3 การคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิและปริมาณน้ำ	32
4.4 เครื่องปั๊มน้ำ	34
4.5 รายการชิ้นส่วน	35
4.6 หลักการทำงานของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกโดยเครื่องอัดไฮดรอลิก	37
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
5.1 วัตถุประสงค์การทดลอง	46
5.2 สมมติฐานการทดลอง	46
5.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	46
5.4 ขั้นตอนการทดลอง	46
5.5 ผลการทดลอง	48
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง	60
6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	60
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการปรับปรุง	60
เอกสารอ้างอิง	61

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางที่ใช้ในการคำนวณ

ภาคผนวก ข. วัสดุผสมที่ได้จากการทดลอง

ภาคผนวก ค. Controller Temperature Datasheet

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไฟเบอร์กลาส	6
ตารางที่ 4.1 แสดงชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก	35
ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ ครั้งที่ 1	47
ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ ครั้งที่ 2	48
ตารางที่ 5.3 ตารางบันทึกผลการทดลองวัดความหนา ครั้งที่ 1	49
ตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองวัดความหนา ครั้งที่ 2	50
ตารางที่ 5.5 ค่าไฟที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิแม่พิมพ์	50

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องกดอัด (Compression molding machine)	11
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด	12
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนกระบวนการกดอัด	13
รูปที่ 2.4 แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง	14
รูปที่ 2.5 แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก	15
รูปที่ 2.6 แม่แบบฝาประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก	15
รูปที่ 3.1 แรงอัดที่กระทำกับวัตถุ	17
รูปที่ 3.2 ความเครียดอัด	18
รูปที่ 3.3 ผลรวมทางพีชคณิตที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางที่หน้าตัดใด ๆ ของคาน	18
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด	19
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงความเค้นดัด	19
รูปที่ 3.6 การแปรเปลี่ยนความเค้นดัด	20
รูปที่ 3.7 การไหลของของไหลในท่อ (Flow in Closed Conduits)	23
รูปที่ 3.8 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)	24
รูปที่ 3.9 ค่า Re และ NuD ของท่อไม่กลม	25
รูปที่ 3.10 Relative roughness	26
รูปที่ 3.11 Moody diagram	27
รูปที่ 3.12 การสูญเสียในข้อต่อท่อ (Losses in Pipe Fitting)	27
รูปที่ 4.1 แรงที่กระทำกับคาน	29
รูปที่ 4.2 แรงที่กระทำกับคานระยะ $0 \leq x < 9$	29
รูปที่ 4.3 แรงที่กระทำกับคานระยะ $9 \leq x < 18$	30
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด	30
รูปที่ 4.5 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก	36
รูปที่ 4.6 ด้านหน้าของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก	37
รูปที่ 4.7 ด้านข้างของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก	38
รูปที่ 4.8 ด้านบนของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก	38
รูปที่ 4.9 ชุดแม่พิมพ์	39
รูปที่ 4.10 ขนาดในส่วนต่างๆของชุดแม่พิมพ์	39
รูปที่ 4.11 ชุดระบบหล่อเย็น	40
รูปที่ 4.12 ด้านหน้าของระบบหล่อเย็น	40
รูปที่ 4.13 ระบบตู้ไฟ	41
รูปที่ 4.14 ภาพจริงด้านหน้าของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก	41
รูปที่ 4.15 ภาพจริงชุดแม่พิมพ์	42

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดวัตถุ(m^2)
A_c	พื้นที่หน้าตัดของการไหล(m^2)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเป็น(m)
F	แรงอัดที่กระทำกับวัตถุ(N)
K	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (Loss Coefficient)
K_f	ค่าการนำความร้อนอากาศโดยเปิดจากตารางภาคผนวก(W/m.K)
L	ความยาวท่อ(m)
N_{uD}	Nusselt number
R_e	จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
P	กำลังไฟฟ้า
P_d	เส้นรอบรูปเปียก (Watted perimeter)(m)
Pr	pendle number
T	อุณหภูมิ(K)
T_c	อุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)(K)
T_h	อุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหลหรือพื้นผิวของของแข็ง)(K)
T_i	อุณหภูมิน้ำเข้า(K)
T_m	อุณหภูมิของไหล(K)
T_o	อุณหภูมิน้ำออก(K)
T_s	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
V	ความเร็วการไหล(m/s)
Q	ปริมาณความร้อน(J)
Q_w	อัตราการไหล(m^3/s)
Q_{loss}	ปริมาณความร้อนที่สูญเสีย(J)
X	ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน(m)
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะ(J/Kg.K)
f	ตัวประกอบของแรงเสียดทาน (Friction Factor)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน(W/m.K)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน(W/m ² .K)
h_{static}	ความสูงจากระดับน้ำจนถึงทางออกท่อ(m)
h_f	การสูญเสียหลัก(m)
h_m	การสูญเสียรอง(m)
h_{pump}	ค่าความสูงทั้งหมดเพื่อหาขนาดปั๊ม(m)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า $9.81 m/s^2$
m	น้ำหนัก(Kg)
\dot{m}	อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
q_{cond}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน(W)

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

Q_{convec}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน(W)
Q_{in}	การให้ความร้อนแก่แผ่นเหล็ก(W)
Q_{loss}	การสูญเสียความร้อน(W)
Q_{total}	ความร้อนทั้งหมดที่ให้แก่แม่พิมพ์(W)
Q_{rad}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี(W)
t	ความหนาของแม่พิมพ์ในแต่ละแผ่น(m)
x	ระยะห่างแรงจนถึงจุดโมเมนต์(m)
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสภาพแวดล้อมกับผิวของวัสดุ(K)
ρ	ความหนาแน่นของของไหล(kg/m^3)
μ	ความหนืดของของไหล(kg/m.s)
ϵ	ค่าความหยาบของผิว (Roughness)
ϵ_c	ความเครียดอัด
ϵ_R	ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ
δ	ความยาวที่เปลี่ยนไป(m)
σ_c	ความเค้นอัดที่เกิดขึ้น(N/m^2)
σ_R	ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมนซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมพลาสติกมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจไทย เนื่องจากมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมากและมีทิศทางการเติบโตอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมพลาสติกจัดเป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำ โดยมีอุตสาหกรรมต้นน้ำ ที่สำคัญ คือ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และมีอุตสาหกรรมปลายน้ำหลากหลาย ประเภทที่ต้องใช้พลาสติกเป็นส่วนประกอบในการผลิตสินค้า เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารแปรรูป ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องแต่งกาย เฟอร์นิเจอร์ และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกและอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยอุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกจะผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ ซึ่งมีทั้งการผลิตเม็ดใหม่จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) โพลีพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) และโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เป็นต้น เพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งจะผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายประเภทสำหรับผู้บริโภคโดยตรง หรือเพื่อป้อนอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ที่ใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นส่วนประกอบของสินค้า เช่น เครื่องใช้พลาสติก ถังและกระสอบพลาสติก แผ่นพลาสติก ฟิล์ม กล่อง เสื้อผ้า หลอดและท่อ พลาสติก พลาสติกปูพื้นและผนัง สิ่งประกอบเครื่องแต่งกาย และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น จาก ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวอุตสาหกรรมพลาสติกจึงมีความเชื่อมโยงอย่างมากกับอุตสาหกรรม อื่นๆ ทั้งการเชื่อมโยงไปข้างหน้า (Backward linkage) กับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีซึ่งผลิตวัตถุดิบ ป้อนโรงงานทำเม็ดพลาสติก และเชื่อมโยงไปข้างหน้า (Forward linkage) กับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ต่างๆ ที่ผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคชั้นปลาย อุตสาหกรรมปลายน้ำที่เชื่อมโยงจากอุตสาหกรรมพลาสติกไทยนับได้ว่ามีความหลากหลาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุตสาหกรรมพลาสติกในการเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศ (สมเจตน์, 2552)

ปัจจัยในการศึกษาโครงการนี้เพราะต้องการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกและใยแก้ว เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ และสามารถนำไปใช้งานได้ อย่างหลากหลาย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก
- 1.2.2 เพื่อขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องไฮดรอลิก

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกโดยใช้แรงกดจากเครื่องไฮดรอลิกสามารถขึ้นรูปพลาสติกได้ตามขนาดที่ออกแบบโดยมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบนขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปขนาด 15 ตัน หรือที่ความดันแกจ 1.64 MPa
- 1.4.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกที่ 170 180 190 และ 200 °ซ
- 1.4.3 เวลากดค้างเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด ที่เวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที
- 1.4.4 เทอร์โมพลาสติกที่ได้จะออกมาในรูปแบบแผ่นแบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$ ที่ความหนาประมาณ 2 mm.

บทที่ 2

ตรวจเอกสารและแหล่งข้อมูล

2.1 วัสดุผสม (composite materials)

คือวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไป เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย หรือ ตัวเสริมแรง (reinforcement) คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับคุณสมบัติและปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว

ประเภทของวัสดุผสมสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

2.1.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced)

วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค ประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวต่อเนื่องกันและมีการเสริมแรงและเพิ่มสมบัติให้กับเนื้อพื้นด้วยการเติมสารเสริมแรงแบบเม็ดผง อย่างเช่น เหล็กกล้าสเฟีย รอยโคตซึ่งมีเนื้อพื้นเป็นพอร์ไรต์ที่เป็นเหล็กมีความเหนียวสูงแต่ความแข็งและความแข็งแรงต่ำมาผสมกับซีเมนต์ไคท์ซึ่งมีความแข็งสูง ซึ่งทำให้วัสดุผสมระหว่างเหล็กกล้าสเฟีย รอยโคตและซีเมนต์ไคท์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับพอร์ไรต์เพียงอย่างเดียว

ในบางกรณีสมบัติที่ต้องการนำมาใช้เป็นสมบัติของตัวเสริมแรงโดยเนื้อพื้นมีหน้าที่ยึดติดเฟสที่กระจายไว้ด้วยกันเช่นวัสดุเชิงประกอบของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความแข็งแรงสูงซึ่งเหมาะสำหรับทำเครื่องมือสำหรับตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งแล้วแต่ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความเปราะสูงและแตกหักง่ายแต่เมื่อนำมาผสมกับโคบอลต์ในอัตราส่วนปริมาตรของโคบอลต์ประมาณ 10 – 15% ทำให้ได้วัสดุที่ยังมีความแข็งแรงสูงแต่มีความต้านทานการแตกหักที่ดีขึ้นเพราะมีเนื้อพื้นโคบอลต์ที่มีความเหนียวและคอยดูดซับพลังงาน

อีกตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเม็ดผงคือยางล้อรถยนต์ที่มีเนื้อพื้นเป็นยางและมีการผสมคาร์บอนแบล็กหลังจากการยางได้ผ่านกระบวนการวัลคาไรไนเซชันแล้วเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ความแกร่งและความต้านทานการสึกกร่อน

2.1.2 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced)

วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ยาวและเรียงตัวเป็นระเบียบ เป็นการผสมเส้นใยให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นเช่นการผสมเส้นใยของซิลิกอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นของแก้วเพื่อเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness) หรือการใช้เทคนิคทางการเย็นตัวเพื่อให้เกิดเฟสที่ต่อเนื่องกันในโลหะผสมเช่นกันการเย็นตัวแบบยูเทกติกในโลหะผสมของโมลิบดีนัม นิกเกิลและอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดเนื้อพื้นที่เป็นแอลฟา โมลิบดีนัมที่มีความเหนียวและมี "เส้นใย" ที่เป็นเฟสแกมมาไพรม์ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างโลหะของนิกเกิลและอลูมิเนียม (Ni_3Al) ซึ่งมีความเปราะสูง วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสมบัติทางกลที่ดีและมีความต้านทานความคืบที่เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับวัสดุตั้งต้น

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงโดยเส้นใยสั้น (Short fibre-reinforced composites) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงโดยเส้นใยสั้นเรียงตัวเป็นระเบียบ (Aligned discontinuous fiber-reinforced composites) ซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นเมื่อ

ต้องรับโหลดในทิศทางเดียวกับทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยทำให้วัสดุเชิงประกอบชนิดนี้มีสมบัติแบบ Anisotropy

- วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงโดยเส้นใยสั้นเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented discontinuous fiber-reinforced composites) เนื่องจากเส้นใยที่ใช้เป็นเฟสที่กระจายจัดเรียงตัวแบบสุ่มและไม่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษทำให้วัสดุชนิดนี้มีสมบัติที่เท่ากันในทุกทิศทาง (Isotropy) ไม่ว่าจะรับโหลดในทิศทางใดก็ตาม

2.1.3 วัสดุผสมโครงสร้าง (structural composit)

วัสดุผสมโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย

เราสามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

1. คอมโพสิตแบบชั้น

คอมโพสิตแบบชั้นประกอบด้วยแผ่นชีท (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวมาเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่น แผ่นคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัว ขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นคอมโพสิตแบบชั้น เพื่อประสิทธิภาพ ของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นชีทแบบสลับทิศทางของเส้นใย ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิต ประเภทนี้ เช่น กระดานสกี เป็นต้น

2. ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช

ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชเป็นคอมโพสิตโครงสร้างประเภทหนึ่ง ซึ่งมี ส่วนประกอบเป็นแกนกลางหรือที่เรียกว่า core และผิวนอกหรือที่เรียกว่า face

แกนกลางหรือที่เรียกว่า core จะถูกประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นชีท ที่เป็นแผ่น face โดยมีกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น core และ face ติดกัน โดยแต่ละส่วนทำหน้าที่ ดังนี้

- แกนกลาง core จะช่วยเพิ่มค่า shear rigidity ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น face และมักจะเป็นโครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน วัสดุที่ใช้ทำเป็น core ได้แก่ พอลิเมอร์ ยางสังเคราะห์ หรือโลหะ และอัลลอย พลาสติก ชนิด PE; polyethylene เป็นต้น

- แผ่น face คือ ตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ยกตัวอย่าง วัสดุที่ใช้ทำ face เช่น อะลูมิเนียมอัลลอย เหล็กกล้า ไทเทเนียม ไม้อัด หรือแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นต้น

เนื่องจาก core เป็นโครงสร้างแบบโปร่ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา ดังนั้นผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชจึงถูกนำไปใช้งานได้ หลากหลาย สามารถทำเป็นหลังคา พื้น กำแพงของอาคาร เป็นต้น

หากใช้เฟสเนื้อพื้นเป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิด วัสดุเชิงประกอบสามารถที่ถูกจำแนกได้เป็นสามประเภทคือ

- วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites, PMC) มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์และเฟสที่กระจายหรือเฟสเสริมแรงที่เป็นได้ทั้งพอลิเมอร์

โลหะ และเซรามิกส์โดยที่เส้นใยเสริมแรงได้ถูกเลือกให้เพิ่มสมบัติบางประการให้กับเนื้อพื้นเช่นเพิ่มมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) เพิ่มความแข็งแรง (Tensile strength) เพิ่มความเค้นจุดคราก (Yield strength, σ_y) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) เป็นต้น

2. วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นโลหะ (Metal matrix composites, MMC) ส่วนมากมีเฟสกระจายตัวที่เป็นโลหะหรือเซรามิกส์เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Tensile strength) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) ให้กับเนื้อพื้นที่เป็นโลหะเป็นต้น
3. วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นเซรามิกส์ (Ceramic matrix composites, CMC) เนื่องจากเนื้อพื้น เซรามิกส์มีความเพราะสูงเพราะฉะนั้นเฟสกระจายตัวที่เลือกมาผสมกับเนื้อพื้นต้องเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness, Kc) ให้กับเนื้อพื้น

2.2 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP)

พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) เรียกว่า PP หรือพีพีเทอร์โมพลาสติกประเภทโพลีโอเลฟินผลิตจากโพรพิลีน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของโพลีโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน ซินดีโอแทกติกโพลีโพรพิลีน และแอแทกติกโพลีโพรพิลีน เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นวัสดุผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ(0.90-0.91 kg/m³) มีจุดหลอมเหลว 160-170 °ซ คุณสมบัติทั่วไป เช่น ทนต่อความร้อนและสารเคมีป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี,ไม่ทนต่อความเย็น,มีความแข็งและเหนียว คงรูปดี ทนต่อการหักงอได้ปานกลาง มีสมบัติดีกว่าโพลีเอทิลีนหลายอย่าง ได้แก่ ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °ซ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลีโพรพิลีน ได้แก่ ก่อ่ง ของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย โคมเทียมพรมและแผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ของขนม ท่อปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว และอุปกรณ์ภายในรถยนต์

2.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรไพลีน

ผลิตภัณฑ์ที่พบเสมอคือ ก่อ่ง ของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย โคมเทียม พรมและแผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ของขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว อุปกรณ์ภายในรถยนต์ ก่อ่งเครื่องมือ กระเป๋า ปกแฟ้มเอกสาร ก่อ่งและตลับ เครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือนก่่องบรรจุอาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ขวดใส่สารเคมี กระจ่างน้ำมันเครื่องกระสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย

พลาสติกสำหรับใช้งานในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการส่วนมากทำจาก PP ซึ่งมีข้อดีคือทนต่อความร้อนสูงได้สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ก็สามารถนำเข้าเครื่องล้างจานอัตโนมัติ และภาชนะบรรจุอาหารสำหรับไมโครเวฟได้

การใช้เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ตัวอย่างเช่น ใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารในครัวเรือน เช่น จาม ขาม ถ้วย ใช้ผลิตถุงทนร้อน ที่มักเรียกว่า ถุงร้อนชนิดใส, ใช้ผลิตถ้วยหรือขาม สำหรับผลิตภัณฑ์ กิ่งสำเร็จรูป เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งขึ้นรูปด้วยการเติมน้ำร้อนจัด

2.3 โยแก้ว

ไฟเบอร์กลาสหรือโยแก้วนับได้ว่าเป็นวัสดุที่เป็นอรรถประโยชน์ ที่มีการนำมาใช้ในหลายรูปแบบ ดังที่หลายคนได้เคยเห็น ไฟเบอร์กลาสหรือโยแก้วที่เป็นฉนวนกันความร้อน และคนที่เคยได้ลองสัมผัส กับไฟเบอร์กลาสหรือโยแก้วจริงๆ คงเคยได้สัมผัสอาการคัน กันมาบ้างแล้ว สาเหตุเกิดจากการที่โย แก้วเส้นเล็กๆได้แทรกซึมเข้าสู่ผิวหนังนั่นเอง

ไฟเบอร์กลาส หรือโยแก้วเกิดจากการหลอมละลายและแข็งตัวของซิลิกา ซึ่งเป็นวัตถุดิบจาก แก้วที่การเผาในอุณหภูมิสูงๆ ประมาณ 1,000 องศาขึ้นไปตั้งแต่ 50-800 นาที ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไฟ เบอร์กลาสหรือโยแก้วจะประกอบไปด้วย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไฟเบอร์กลาส

SiO ₂	= 52.72%
Al ₂ O ₃	= 0.6-16%
CaO	= 10.25%
MgO	= 0-2.5%
B ₂ O ₂	= 2-13%
Na ₂ O-K ₂ O	= 0-14.2%
SO ₃	= 0.7%

คุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมของไฟเบอร์กลาสหรือโยแก้วได้แก่

1. ไม่ติดไฟและเป็นฉนวนไฟฟ้าชั้นยอด
2. ทนความร้อนได้ดีมาก
3. คงรูปเดิมได้ดี ไม่มีการยืดหยุ่น
4. ไม่เน่าเปื่อยหรือผุกร่อน
5. ไม่เป็นสนิม และทนต่อการกัดกร่อน
6. ไม่เกิดการแข็งตัวจากอากาศหนาวจัด

ตัวอย่างการนำไฟเบอร์กลาสหรือโยแก้วไปใช้งานจริง

1. ป้องกันความร้อนหรือฉนวนไฟฟ้า
2. งานเสริมแรง FRP (Fiberglass Reinforced Plastic)
3. อุปกรณ์กีฬาเช่น ก้านไม้กอล์ฟ, คันเบ็ดตกปลา, รถแข่ง
4. ตัดเย็บเสื้อหุ้มวาล์ว ผ้าม่านกันสะเก็ดไฟ, ชุดผจญเพลิง
5. งานกรองอลูมิเนียมเหลว, กรองแก๊สและฝุ่น
6. งานก่อสร้างเช่น เคลือบผิวตรงพื้นที่ที่ต้องปะทะกับความร้อนสูง, ผนังเบา, และ ฉนวนกันความร้อนภายในอาคาร เป็นต้น

2.4 กระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก เป็นพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลว และมีจุดอ่อนตัว มีโครงสร้างแบบสายยาวหรือแบบสาขา สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เทอร์โมพลาสติกจะเกิดการอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลง พลาสติกที่แข็งตัวแล้วสามารถนำมาหลอมซ้ำได้ด้วยความร้อนเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกจึงเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัว และหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลง พลาสติกที่แข็งตัวแล้วสามารถนำมาหลอมซ้ำได้ ด้วยความร้อนเทอร์โมพลาสติก

- 2.4.1 กระบวนการฉีด (Injection molding)
- 2.4.2 กระบวนการรีด (Extrusion molding)
- 2.4.3 กระบวนการอัด (Compression molding)
- 2.4.4 กระบวนการอัดส่ง (Transfer molding)
- 2.4.5 กระบวนการเป่า (Blow molding)
- 2.4.6 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Thermoforming)
- 2.4.7 กระบวนการรีดให้เป็นแผ่น (Calendering)
- 2.4.8 กระบวนการหล่อ (Casting)

2.5 ฮีตเตอร์ (Heater)

เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ ซึ่งส่งผลให้ลวดตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้น โดยแหล่งจ่ายไฟสามารถใช้ได้กับแรงดัน 220VAC และ 380VAC ทำให้ผู้ใช้สามารถใช้งานฮีตเตอร์ (Heater) ได้ง่ายและสะดวก เนื่องจากการใช้งานฮีตเตอร์ (Heater) นั้นสามารถเข้าใจหลักการทำงานได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมหันมาใช้ฮีตเตอร์ (Heater) มากยิ่งขึ้น เนื่องจากราคาถูก และสิ่งขนาด รูปทรง และวัสดุได้ตามความต้องการ

ฮีตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

2.5.1 ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater)

ลักษณะของฮีตเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแท่ง เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง หรือแม่พิมพ์, โมลต่างๆ เช่น เหล็ก, อลูมิเนียม, ทองเหลือง, หรือโลหะต่างๆ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ, งานขึ้นรูปเซรามิกส์ พลาสติก เป็นต้น

2.5.2 ฮีตเตอร์แผ่น (Strip Heater)

ลักษณะของฮีตเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่น สามารถออกแบบให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้ เช่น ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ทรงกลม เป็นต้น เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยแนบกับชิ้นงานโดยตรง

2.5.3 ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater)

ลักษณะของฮีตเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ภายในท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก โดยทำการรัดท่อจากภายนอก

2.6 ปั๊ม

เครื่องปั๊มน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานจากแหล่งต้นกำเนิดไปยังของเหลว เพื่อให้ของเหลวเคลื่อนที่จาก ตำแหน่งหนึ่งไป ยังอีก ตำแหน่งหนึ่งที่อยู่สูงกว่า หรือในระยะทางที่ไกลออกไป โดยจุดเริ่มต้นของเครื่องปั๊มน้ำนี้มีประวัติศาสตร์ที่ยาวนานกว่า 2,000 ปีก่อนคริสตศักราช ซึ่งในช่วงเริ่มแรกมีการใช้พลังงาน ที่ได้จากมนุษย์ สัตว์ ต่อมาจึงได้ใช้พลังงานจากธรรมชาติ เช่น พลังงานจากลม และน้ำเป็นแหล่งต้นกำเนิด ซึ่งในช่วงแรกเพียง เพื่อการอุปโภคบริโภคและทำการเกษตรเท่านั้น

ในปัจจุบันเครื่องปั๊มน้ำจัดเป็นอุปกรณ์เครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์อย่างมาก เป็นอุปกรณ์ ที่ช่วยจัดส่งน้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค การเกษตร คมนาคม อุตสาหกรรม ตลอดจนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อรักษา สภาวะแวดล้อม ที่ดีให้กับมนุษย์ ซึ่งวิวัฒนาการของเครื่องปั๊มน้ำในปัจจุบันได้เปลี่ยนไปจากเดิม ที่ใช้พลังงานจาก แหล่งธรรมชาติมาเป็น การใช้พลังงานจากไอน้ำ จากเครื่องยนต์ และที่นิยมกันมากคือ การใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากความสะดวก และง่ายต่อการใช้งาน

2.6.1 ประเภทของปั๊มน้ำ (Type of Pump)

ปัจจุบันมีการจัดแบ่งประเภทของปั๊มน้ำหลายรูปแบบ และมีการเรียกชื่อแตกต่างกันออกไปมากมาย ดังนั้นจึงมี การจัดหมวดหมู่ ออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. แยกตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว หรือการไหลของของเหลวในปั๊ม ได้แก่
 - 1.1 ประเภทปั๊มแรงเหวี่ยง หรือปั๊มเหวี่ยง (Centrifugal) เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลาง ปั๊มแบบนี้บางครั้งเรียกว่าแบบ Rota - dynamic
 - 1.2 ประเภทโรตารี (Rotary) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการหมุนของฟันเพื่อรอบแกนกลาง
 - 1.3 ประเภทลูกสูบชัก (Reciprocating) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการอัดโดยตรงในกระบอกสูบ
2. แยกตามลักษณะการขับเคลื่อนของเหลวในปั๊ม แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ
 - 2.1 ประเภททำงานโดยไม่อาศัยหลักการแทนที่ของเหลว (Dynamic) เป็นปั๊มประเภทอาศัยแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลางและแบบพิเศษ
 - 2.2 ประเภททำงานโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว (Positive Displacement) คือ การเคลื่อนที่ โดยอาศัยชิ้นส่วนของ เครื่องสูบ ปั๊มประเภทนี้จะรวมเอาแบบโรตารีและแบบลูกสูบชักเข้าอยู่ในกลุ่มด้วย

นอกจากการแบ่งเป็นสองแบบตามที่กล่าวมาแล้ว ยังอาจแบ่งปั๊มตามวัตถุประสงค์การใช้งานของแต่ละชนิดด้วยเช่น ปั๊มดับเพลิง ปั๊มลม ปั๊มสูญญากาศ ปั๊มบาดาล เป็นต้น

2.6.2 คุณสมบัติของปั๊มแต่ละชนิด

1. ลักษณะการทำงานของปั๊มแบบแรงเหวี่ยง

ปั๊มแบบแรงเหวี่ยงเป็นปั๊มที่ได้รับความนิยมสูงสุดเมื่อเทียบกับปั๊มแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เหมาะสมกับการใช้งานหลายประเภทประกอบกับการดูแลรักษาอย่างง่าย ส่วนประกอบของเครื่อง มีใบพัดอยู่ในเสื่อ เครื่องรูปหอยโข่ง (Volute Casing) ให้พลังงานแก่ของเหลวโดยการหมุนของใบพัด ทำให้สามารถยกน้ำจาก ระดับต่ำขึ้นไปสู่ระดับสูงได้

หลักการทำงานของเครื่อง พลังงานจะเข้าสู่ปั๊มโดยผ่านเพลลาซึ่งมีใบพัดติดอยู่ เมื่อใบพัดหมุนของเหลวภายในปั๊ม จะไหลจาก ส่วนกลางของใบพัดไปสู่ส่วนปลายของใบพัด (Vane) จากการกระทำของแรงเหวี่ยง จากแผ่นใบพัดนี้ จะทำให้ เฮดความดัน (Pressure Head) ของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่อของเหลวได้รับความเร่ง จากแผ่นใบพัด ก็จะทำให้มีเฮดความเร็วสูงขึ้น ส่งผลให้ของเหลวไหลจากปลายของใบพัดเข้าสู่สื่อบีรูบรูปหอยโข่ง แล้วออกไปสู่ทางออกของปั๊ม ในขณะเดียวกัน ก็เปลี่ยนเฮดความเร็วเป็นเฮดความดัน ดังนั้นเฮดที่ให้แก่ของเหลวต่อหนึ่งหน่วยความหนักเรียกว่า เฮดรวมของปั๊ม

2. ลักษณะการทำงานของปั๊มแบบลูกสูบชัก

ปั๊มประเภทลูกสูบชัก (Reciprocating pump)

เป็นประเภทที่เพิ่มพลังงาน ให้แก่ของเหลว โดยการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เข้าไปอัดของเหลวให้ไหล ไปสู่ทางด้านจ่าย ปริมาตรของของเหลวที่สูบได้ ในแต่ละครั้งจะเท่ากับ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบกับช่วงชักของกระบอกสูบนั้น

2.7 ระบบอัดไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกเป็นระบบที่มีการส่งถ่ายพลังงาน (Transmission) ของของไหลให้เป็นพลังงานกล โดยผ่านตัวกระทำ (Actuators) เช่น กระบอกสูบ (Cylinder) มอเตอร์ไฮดรอลิก (Hydraulic Motor) ในอุตสาหกรรมนิยมใช้น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน เพราะน้ำมันไฮดรอลิกมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ไม่สามารถยุบตัวได้ (Incompressible) จึงทำให้การส่งถ่ายพลังงานมีประสิทธิภาพมาก

การนำระบบไฮดรอลิกไปใช้งานในปัจจุบันได้มีการนำระบบไฮดรอลิกไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย แยกตามประเภทอุตสาหกรรม คือ อุตสาหกรรมเหล็ก, อุตสาหกรรมประเภทเครื่องอัดขึ้นรูป (Press) งานตัด (Cutting) งานดัด (Bending), อุตสาหกรรมอาหาร เช่น เครื่องบด อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วน อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และการพิมพ์ งานด้านวิศวกรรมโยธา งานด้านการเดินเรือทะเลและงานสำรวจแหล่งแร่ ชุด เจาะต่างๆ อุตสาหกรรมยาง ไม้ และ อุตสาหกรรมพลาสติก

งานทั่วๆ ไปที่นำระบบไฮดรอลิกไปใช้ เช่น เครื่องอัดขึ้นรูป (Press) เครื่องบีบขึ้นรูป (Plung) เครื่องดัด (Bending) เครื่องตัด (Cutting) เครื่องมือลำเลียง ขนถ่าย เครื่องบรรจุ เครื่องมือชุด เจาะ อุปกรณ์การยกเคลื่อนย้าย เป็นต้น

2.7.1 ข้อดี ข้อด้อย ของระบบไฮดรอลิก

เมื่อเปรียบเทียบระบบไฮดรอลิก กับระบบอื่น ๆ เช่น ระบบนิวแมติก ระบบเครื่องกล หรือระบบไฟฟ้าแล้ว จะเห็นว่าในระบบไฮดรอลิกมีข้อดีที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน คือ

1. สามารถรับแรง (Load) ได้สูงมาก ทั้งในแนวเส้นตรงและแนวหมุน โดยให้แรงที่คงที่ทุกความเร็ว
2. สามารถส่งถ่ายพลังงานไปได้ไกลๆ โดยผ่านทางท่อไฮดรอลิกไปที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกก็ได้โดยไม่ต้องใช้โซ่ หรือเพลลาส่งกำลังเหมือนระบบทางกล
3. สามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าระบบนิวแมติก และระบบไฟฟ้า
4. ราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับการรับภาระโหลดที่เท่ากัน
5. อุปกรณ์ทำงาน จะเคลื่อนที่ช้ากว่าระบบนิวแมติก และไฟฟ้า

และมีข้อเสีย คือ

1. การออกแบบวงจร และการติดตั้งเดินท่อจะทำได้ยากกว่าระบบนิวแมติก
2. สามารถเกิดการรั่วซึมของน้ำมันได้ตามจุดเชื่อมต่อต่างๆ
3. การบำรุงรักษายากกว่าระบบนิวแมติกส์ และไฟฟ้า

2.7.2 ระบบไฮดรอลิกเบื้องต้น

1. แหล่งจ่ายพลังงาน ทำหน้าที่ส่งถ่ายพลังงานน้ำมันปั๊มเข้าสู่ระบบ โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์เป็นตัวขับ (Drive) ไฮดรอลิกปั๊ม ให้หมุน เพื่อที่จะดูดน้ำมัน จากถังพักเข้ามาในตัวเสื้อของปั๊ม และส่งออกไปสู่ระบบ โดยส่วนมากมักจะเรียกส่วนนี้ว่า Power Unit ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น

- ไฮดรอลิกปั๊ม (Hydraulic pump)
- มอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องยนต์ขับ
- ถังพักน้ำมัน (Tank)
- ไส้กรองน้ำมัน (Strainer)
- ที่วัดระดับน้ำมัน (Level gauge)
- ฝาเติมน้ำมัน และระบายอากาศ (Air Breather)
- ยอยด์ (Drive Coupling)

2 ระบบควบคุมการทำงาน เป็นระบบที่ใช้ควบคุมการทำงานของ ระบายไฮดรอลิกหรือไฮดรอลิกมอเตอร์ โดยควบคุม

2.1 ทิศทางการไหลของน้ำมัน (Directional Control) ทำให้ระบายเคลื่อนที่เข้า-ออกได้ เช่น โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) เป็นต้น

2.2 ควบคุมความดันของน้ำมันในระบบ (Pressure Control) เพื่อจำกัดความดันในการใช้งานต่างๆ ให้เป็นไปตามต้องการอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความดัน ได้แก่

- วาล์วปลดความดัน หรือรีลิววาล์ว (Pressure relief valve)
- วาล์วลดความดัน (Pressure reducing valve)
- วาล์วจัดลำดับความดัน (Pressure sequence valve)
- เคาน์เตอร์บาลานซ์ วาล์ว (Counter balancing valve)
- อันโหลด วาล์ว (Unloading valve)

2.3 ควบคุมปริมาณการไหลของน้ำมัน (Flow Control) เพื่อจำกัดปริมาณการไหลของน้ำมันให้มากหรือน้อย ทำให้สามารถควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ทำงานได้

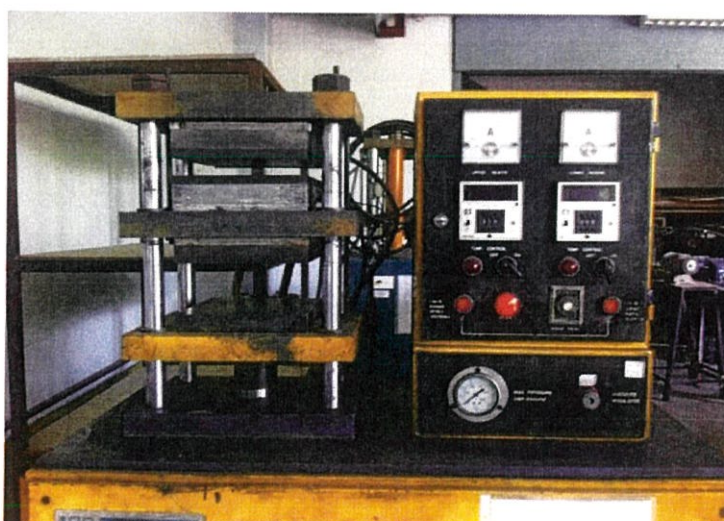
2.4 อุปกรณ์ทำงาน (Actuator) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานไฮดรอลิกเป็นพลังงานกล เพื่อกระทำต่อภาวะโหลด เช่น ระบายสูบ จะส่งถ่ายพลังงานในแนวเชิงเส้น (Linear) หรือไฮดรอลิกส์มอเตอร์ จะส่งถ่ายพลังงานในแนวเชิงหมุน (Rotary) กระทำต่อโหลด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการกดอัด คือ กระบวนการแปรรูปพลาสติกด้วยกระบวนการกดอัดหรือการอัดแบบชนิดแรงอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง โดยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกหลังจาก Bakeland ค้นพบการสังเคราะห์ฟีนอล ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซินในปี ค.ศ. 1908 แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยาง (Rubbers และ Elastomers) และพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) และยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ที่แปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีการผสมไฟเบอร์ต่างๆ การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และการแปรรูปพลาสติกไวนิลและสไตรีนสำหรับทำแผ่นเสียงที่ต้องการความละเอียดแน่นอน เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกดอัด ได้แก่ ช้อน ชาม งาน ที่เขียนูหรี สวิตช์ไฟ กล่องบรรจุสวิตช์ หูหม้อ หูกระต่าย มือจับเตารีด แผ่นเสียง ตัวกวนของเครื่องซักผ้า และที่รองนั่งโถชักโครก เป็นต้น

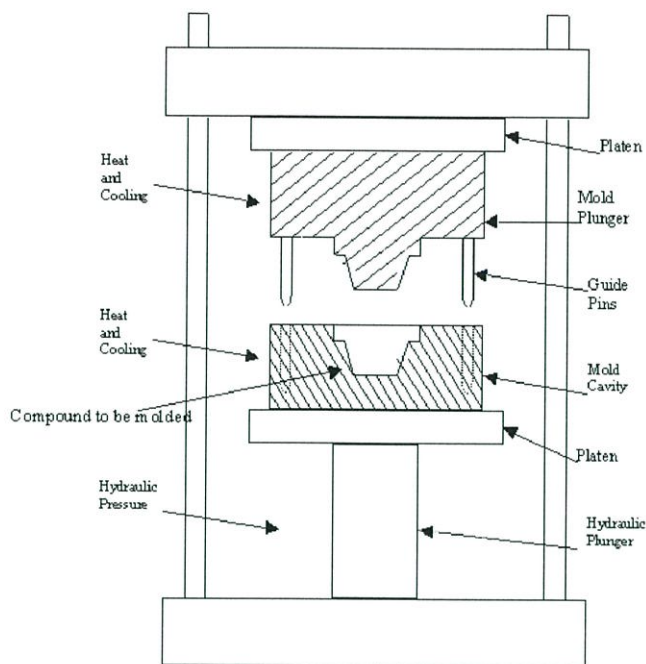
2.8.1 ลักษณะเครื่องกดอัด

กระบวนการกดอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการกดอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด (Compression molding machine) คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) แม่แบบสำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้



รูปที่ 2.1 เครื่องกดอัด (Compression molding machine)

ที่มา : ดร.ชรณี, 2550



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด
ที่มา : ดร.รชนี, 2550

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ รวมด้วย ได้แก่

1. ระบบการขับเคลื่อน

ในปัจจุบันเครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนจากระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนยังทำหน้าที่ในการให้ความดันในการอัดอีกด้วย เครื่องกดอัดขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 5-100 ตัน ส่วนเครื่องกดอัดที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 10-4,000 ตัน โดยขนาดของความดันจะขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัดซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต ชนิดของพลาสติก ความหนาของผนังผลิตภัณฑ์พลาสติก และการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนการกดอัด

2. ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น

ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการกดอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีและในการกดอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ (Curing) ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการกดอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบ เพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น ลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลง และยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการกดอัดได้อีกด้วย

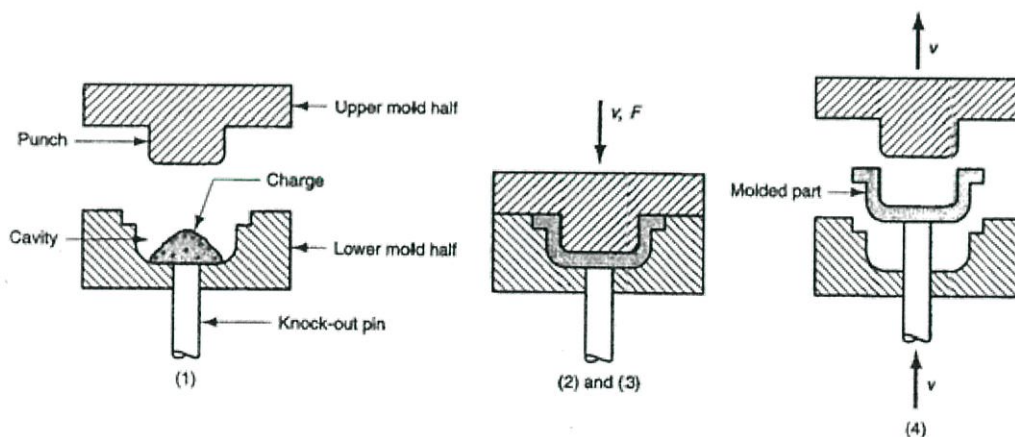
การให้ความร้อนแก่พลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การให้ความร้อนแก่วัตถุดิบก่อนการกดอัดและการให้ความร้อนแก่แม่แบบโดยตรงขณะทำการกดอัด

- การให้ความร้อนแก่วัตถุดิบก่อนการกดอัด เช่น การใช้แผ่นโลหะร้อน การใช้รังสีอินฟราเรด การใช้เตาอบหรือไมโครเวฟ และการใช้ตู้อบชนิดความถี่สูง (High frequency oven) เป็นต้น

- การให้ความร้อนในแม่แบบ เช่น ระบบไฟฟ้า ซึ่งนิยมใช้กันมากเนื่องจากออกแบบและติดตั้งได้ง่าย และมีความสะดวกในการซ่อมบำรุง ระบบไอน้ำ ซึ่งมีข้อดี คือ ให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ แต่ไม่สามารถให้ความร้อนเกิน 180 องศาเซลเซียสได้ และระบบน้ำร้อนไหลเวียน ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับคามนิยมมากในปัจจุบัน โดยใช้การเผาพลาด้วยเปลวไฟจากก๊าซหุงต้มแล้วให้น้ำร้อนในท่อไหลเวียนให้ความร้อนแก่แม่แบบนอกจากระบบให้ความร้อนแล้วอาจมีระบบหล่อเย็น เพื่อให้ชิ้นงานพลาสติกหลังการกดอัดเย็นตัวลง ระบบหล่อเย็นจะไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของแม่แบบหรืออาจใช้ระบบน้ำร้อนที่สามารถสลับจากการให้ความร้อนเป็นการหล่อเย็นก็ได้

2.8.2 วัฏจักรกระบวนการกดอัด (Compression molding cycle)

กระบวนการกดอัดเริ่มจากการยัดแม่แบบติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อนแก่แม่แบบตามชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปอุณหภูมิแม่แบบสำหรับบการกดอัดเทอร์โมเซตจะเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งอยู่ในช่วง 140-200 องศาเซลเซียสขึ้นกับชนิดของพลาสติก หลังจากนั้นจึงเติมวัตถุดิบซึ่งอาจอยู่ในรูปเม็ดพลาสติกหรือผงพลาสติกหรือพลาสติกคอมปาวด์ โดยปริมาณการเติมต้องเหมาะสมกับขนาดของผลิตภัณฑ์ จากนั้นปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันที่เหมาะสม พลาสติกจะเกิดการหลอมหรืออ่อนตัวไหลเข้าสู่ช่องว่าง (Cavity) ของแม่แบบ สำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมินี้ระยะหนึ่งตามระยะเวลาการสุกหรือการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (Cure time) ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้นๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นความดันภายในแม่แบบจะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็นจากนั้นจึงเปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดขึ้น ผลิตผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบ ซึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์ออกจะต้องเป็นช่วงที่พลาสติกแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว เพื่อป้องกันความเสียหายหรือการบิดตัวของผลิตภัณฑ์ แล้วเริ่มเติมพลาสติกลงในแม่แบบเพื่อทำงานในวัฏจักรต่อไป



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนกระบวนการกดอัด
ที่มา : ดรรชนี, 2550

การกดอัดพลาสติกบางครั้งอาจเกิดก๊าซหรือไอน้ำขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการฝั่งตัวของก๊าซใต้ผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดรอยบุบขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการกดอัด เพื่อแก้ปัญหาที่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการไล่ก๊าซ (Degassing stage) โดยในขณะที่ทำการกดอัดต้องมี

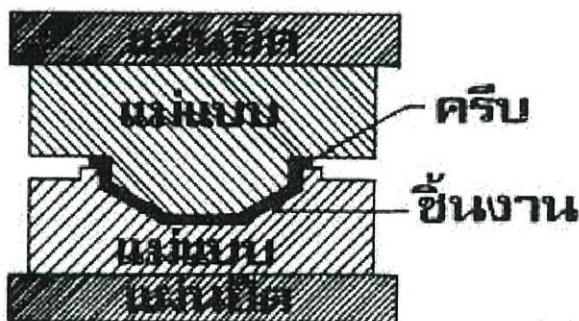
การยกแม่แบบตัวผู้ขึ้นจนความดันภายในแม่แบบลดลงถึงความดันบรรยากาศ เมื่อก๊าซระเหยออกไปแล้วจึงทำการกดอัดต่อไปจนพลาสติกแข็งตัว นอกจากปัญหาการเกิดก๊าซแล้วระยะเวลาของการแข็งตัวก็มีอิทธิพลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกเช่นกัน หากระยะเวลาของการแข็งตัวของพลาสติกสั้นเกินไปจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์พอง ผลิตภัณฑ์ทนความร้อนได้ไม่ดีและทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้น แต่หากปล่อยให้แข็งตัวนานเกินไปอาจทำให้เกิดรอยร้าวได้ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้นอีก ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงต้องมีความชำนาญและประสบการณ์ค่อนข้างสูงในการควบคุมขั้นตอนการทำงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ตรงตามความต้องการ

2.8.3 แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัด

แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดพลาสติกนั้นต้องรับการเสียดสีสูงมากจากพลาสติกและสารเติมแต่ง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบควรทนต่อความดันหรือแรงอัดสูง ทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการขีดสี และทนต่อการกัดกร่อน แม่แบบที่ใช้ในกระบวนการกดอัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง (Flat form หรือ Flash mold)

เป็นแม่แบบชนิดง่ายที่สุด มีความยุ่งยากน้อยที่สุด โดยปกติจะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแบน เช่น จานและชาม เป็นต้น เป็นแม่แบบที่ยอมให้พลาสติกไหลออกได้เมื่อกดแม่แบบตัวผู้ลงมาทำให้ไม่ต้องใช้แรงอัดมาก ข้อดีของแม่แบบประเภทนี้ คือ การออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อไม่แน่น ความแข็งแรงน้อย มีความหนาไม่สม่ำเสมอ และมีครีบ(Flash) มากทำให้ต้องมีขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงานหลังกระบวนการกดอัด

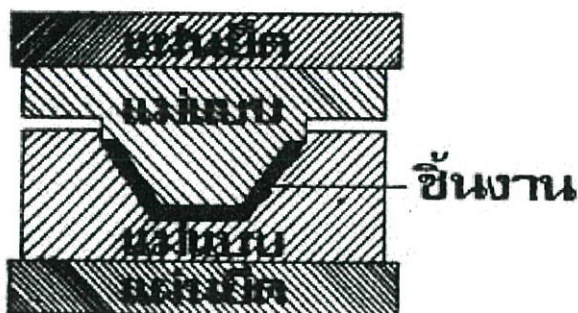


รูปที่ 2.4 แม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบหรือแม่แบบชนิดบาง
ที่มา : ดร.รชนี, 2550

2. แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก (Sealed mold หรือ Fully positive mold)

เป็นแม่แบบชนิดตรงข้ามกับแม่แบบอัดผลิตภัณฑ์ราบ คือ ยอมให้พลาสติกไหลมลละลายไหลออกน้อยที่สุดหรือไม่ให้ออกเลย เนื่องจากไม่มีร่องให้วัสดุพลาสติกไหลล้นออก โดยในขณะที่ปิดแม่แบบนั้นแม่แบบบนจะลึกลงไปในแม่แบบล่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร หรือจนถึง 20-30 มิลลิเมตร เพื่อปิดช่องทางไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกมา จึงทำให้สามารถอัดพลาสติกด้วยความดันสูง โดยพลาสติกจะได้รับแรงดันทั้งหมด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่มีข้อเสียคือ หากใส่วัสดุพลาสติกมากเกินไปแรงอัดจะทำให้แม่แบบแตกร้าวได้ นอกจากนี้แม่แบบประเภทนี้ไม่

ค่อนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความละเอียด เนื่องจากหากในการกดอัดแต่ละครั้งใช้ปริมาณพลาสติกที่ต่างกัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาต่างกัน ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.5 แม่แบบปิดอัดหรือแม่แบบชนิดบวก
ที่มา : ดร.รชนี, 2550

3. แม่แบบฝาประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก (Split mold หรือ Semi-positive mold)

แม่แบบประเภทนี้จะมีลักษณะผสมผสานอยู่ระหว่างสองประเภทข้างต้น โดยในจังหวะแรกที่แม่แบบตัวผู้เริ่มกดอัด พลาสติกส่วนเกินยังสามารถไหลล้นออกมาได้ แต่เมื่อแม่แบบตัวผู้เคลื่อนลงมาถึงระยะหนึ่งป่าของแม่แบบตัวผู้จะปิดช่องว่างไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกได้อีกแล้วจึงอัดแน่น แม่แบบชนิดนี้เหมาะสมกับงานทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงพอสมควร



รูปที่ 2.6 แม่แบบฝาประกบหรือแม่แบบชนิดกึ่งบวก
ที่มา : ดร.รชนี, 2550

การออกแบบลักษณะผลิตภัณฑ์และแม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดมีความสำคัญมาก เนื่องจากลักษณะของแม่แบบจะมีผลโดยตรงต่อความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการกดอัด รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย เช่น

- หากผลิตภัณฑ์มีความหนามาก จะทำให้พลาสติกหลอมไหลเข้าสู่ช่องว่างในแม่แบบได้ยาก ทำให้ต้องใช้ความดันสูงขึ้น

- หากรูปทรงของผลิตภัณฑ์มีเหลี่ยมหรือคม จะทำให้การไหลเข้าสู่ช่องว่างในแม่แบบของพลาสติกไม่ดี ทำให้ต้องใช้ความดันสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรออกแบบให้มีมุมโค้งมน ซึ่งจะช่วยให้พลาสติกไหลได้ดีขึ้น

- หากผิวของแม่แบบมีความขรุขระ ไม่เรียบ ก็จะทำให้ต้องให้ความดันสูงขึ้น ในการกดอัด

2.8.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกดอัด

แม้การแปรรูปด้วยกระบวนการกดอัดจะเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน แต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกดอัดมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ หลายประการ ดังนี้

- แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย

- มีการสูญเสียวัสดุุน้อยมาก คือ มีครีบหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2-5% เท่านั้น

- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมาก เนื่องจากในระหว่างการกดอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- เครื่องกดอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่น ๆ

- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงาน ซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย

- แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำพลาสติก (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงานถึงแม้ว่ากระบวนการกดอัดจะมีข้อได้เปรียบดังกล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น

- วัสดุที่อยู่ในสภาวะของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ทำให้เกิดความเครียดภายในแม่แบบสูงมาก ในขณะที่ทำการกดอัด จึงไม่สามารถใส่วัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ลงไปในแม่แบบได้ เนื่องจากจะทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยวและแม่แบบเกิดการเสียหายได้ จึงทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบหุ้มด้วยเทคนิคนี้ได้

- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาว ทำให้กำลังการผลิตต่ำ
- การผลิตชิ้นงานที่หนาต้องใช้เวลาานาน
- จำเป็นต้องมีการตัดครีบทิ้งเสมอ

สำหรับกรรมวิธีในการไล่ครีบออกนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทำด้วยมือ ได้แก่ การขัดด้วยตะไบหรือหินเจียร การเลื่อย และการใช้เหล็กกระทุ้ง เป็นต้น การไล่ครีบออกด้วยมือเป็นวิธีที่ทำได้เรียบร้อย แต่ช้าและมีค่าแรงสูง นิยมใช้สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ส่วนอีกวิธีเป็นการทำด้วยเครื่องอัตโนมัติ ได้แก่ การใส่ในถังหมุน การพ่นทราย การใช้แปรงขัด และการใช้การสั่น เป็นต้น วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้เร็ว ประหยัดเวลาได้มาก แต่ต้องระวังผิวของชิ้นงานอาจถูกขีดข่วนเสียหายได้ (ดร.รชนี, 2550)

บทที่ 3

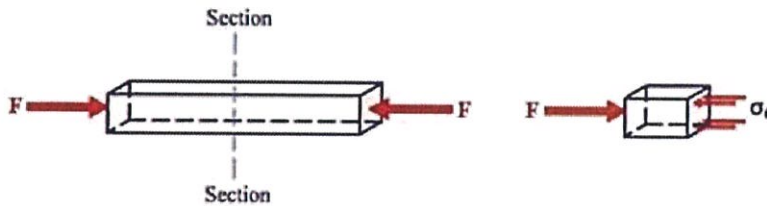
ทฤษฎีรายการคำนวณ

สำหรับเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก เราจะทำการออกแบบชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติกโดยใช้พื้นฐานทางด้านการคำนวณ และหลักในการคัดเลือกใช้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องตามความเหมาะสมกับการใช้เครื่องจักรกลกับงานลักษณะต่างๆ จะคำนวณและออกแบบชิ้นส่วนต่างๆได้แก่

- แผ่นเหล็ก
- ฮีตเตอร์
- การไหลภายในท่อ
- ขนาดของปั้มน้ำ

3.1 ความเค้นอัด (Compressive stress)

ความเค้นที่เกิดจากแรงอัดกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โดยแรงกระทำแนวแรงต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดเสมอสัญลักษณ์ σ_c ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แรงอัดที่กระทำกับวัตถุ
ที่มา : ชาวสวน กาญจนรัมย์

สำหรับสมการหาความเค้นอัดที่ใช้คือ

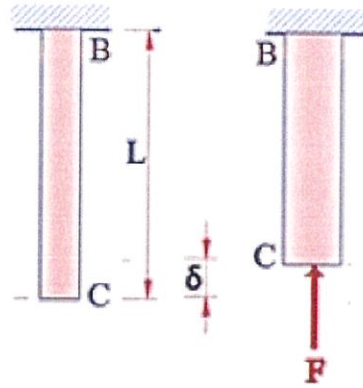
$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.1.1)$$

3.2 ความเครียดอัด (Compressive strain)

ความเครียดอัดเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงอัดทำให้วัตถุหดตัวลงเท่ากับ ϵ โดยแรงกระทำแนวแรงต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดเสมอ ใช้สัญลักษณ์ ϵ_c ดังรูปที่ 3.2

สำหรับสมการหาความเครียดอัดที่ใช้คือ

$$\epsilon_c = \frac{\delta}{L} \quad (3.2.1)$$

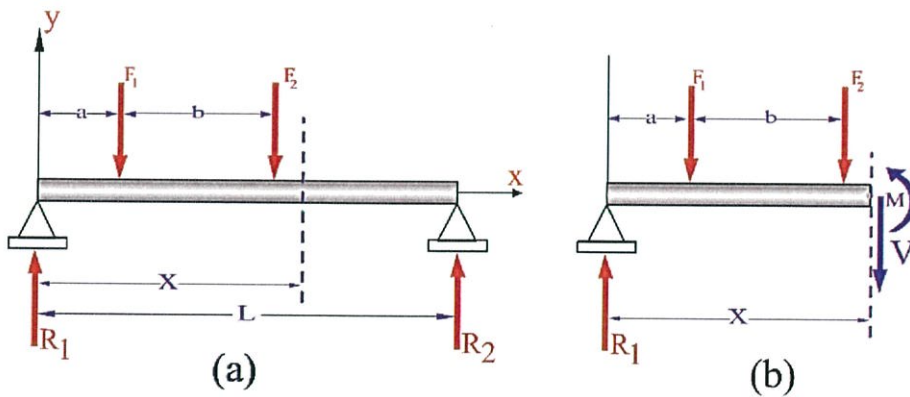


รูปที่ 3.2 ความเครียดอัด
ที่มา : ชาวสวน กาญจนโมทย์

3.3 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดภายในคาน

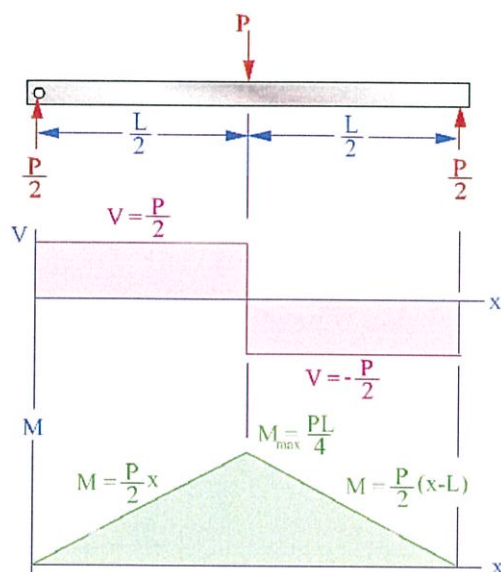
แรงเฉือน (Shearing Force) คือ ผลรวมทางพีชคณิตของแรงกระทำภายนอกผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงที่หน้าตัดใดๆ ของคาน (ระยะ X) จากปลายคานด้านใดด้านหนึ่งซึ่งในที่นี้กำหนดให้ V แทนแรงเฉือน

โมเมนต์ดัด (Bending Moment) คือ ผลรวมโมเมนต์ทางพีชคณิตของแรงภายนอกรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงในระนาบที่หน้าตัดใดๆ ของคานจากปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ M แทนโมเมนต์ดัด (ชาวสวน, 2549)



รูปที่ 3.3 ผลรวมทางพีชคณิตที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงที่หน้าตัดใด ๆ ของคาน
ที่มา : ชาวสวน, 2549

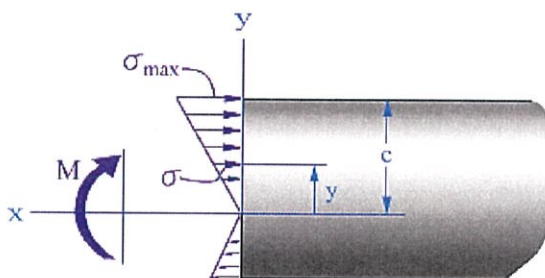
ซึ่งสามารถนำค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดและไดอะแกรมของแรงเฉือนและไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด
ที่มา : ชาวสวน, 2549

3.4 ความเค้นดัด (Bending stress)

ในการหาโมเมนต์ดัดโดยนำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมาใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่อยู่ในประเภทของความเค้นปกติ (Normal Stress) และเป็นได้ทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนหน้าตัด ในการหาสูตรคำนวณของความเค้นดัดพิจารณาจากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงความเค้นดัด
ที่มา : ชาวสวน, 2549

พิจารณาจากรูป 3.5

จาก

$$\epsilon = -\frac{y}{c} \epsilon_{\max} \quad (3.4.1)$$

จาก Hooke's Law;

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.4.2)$$

จะได้
$$\sigma = -\frac{y}{c}(\sigma_{\max}) \quad (3.4.3)$$

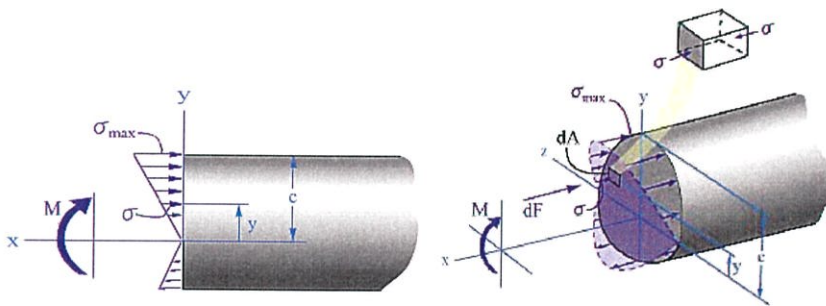
พิจารณาจากรูป 3.6 แรงลัพธ์บนหน้าตัดมีค่าดังนี้

$$F_R = \int_A \sigma dA \quad (3.4.4)$$

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad (3.4.5)$$

$$-\frac{\sigma_{\max}}{c} \int_A y dA \quad (3.4.6)$$

เนื่องจากค่าของ $\frac{\sigma_{\max}}{c}$ จะต้องไม่เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น ค่าที่เท่ากับศูนย์ คือ $\int_A y dA$ ในอีกนัยหนึ่งโมเมนต์แรกของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน (Neutral axis) ต้องเป็นศูนย์สภาพนี้ถ้าแกนสะเทิน คือ แกนศูนย์ถ่วงหรือแกนตัดในแนวนอนสำหรับพื้นที่หน้าตัด และต้องหาค่าพื้นที่หน้าตัด โดยต้องรู้ตำแหน่งของแกนสะเทิน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของความเค้นในคานอันนำไปสู่ผลลัพธ์ของโมเมนต์ภายใน M ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โมเมนต์นี้จะมีค่าเท่ากับโมเมนต์กระจายรอบแกนสะเทินโมเมนต์ของแรง dF รอบแกนสะเทิน คือ $dM = ydF$ ดังรูปที่ 3.6 ในที่นี้ค่าโมเมนต์มีค่าเป็นบวก เนื่องจากใช้กฎมือขวา ทิศทางไปทางบวกของแกน z เนื่องจาก $dF = \sigma dA$ เมื่อ y เป็นบวก และ σ มีค่าเป็นลบ (อัด) จะได้ $(M_R)_z$ เท่ากับโมเมนต์ลัพธ์รอบแกน z เพราะฉะนั้น $(M_R)_z$ เท่ากับ $\sum M_z$ ฉะนั้น โมเมนต์ลัพธ์รอบแกน z หาค่าได้ดังนี้ (ชาวสวน, 2549)



รูปที่ 3.6 การแปรเปลี่ยนความเค้นดัด
ที่มา : ชาวสวน, 2549

$$M = \int_A y dF \quad (3.4.7)$$

$$M = \int_A (-\sigma dA) \quad (3.4.8)$$

$$M = \int_A y \left(\frac{y}{c} \sigma_{\max} \right) dA \quad (3.4.9)$$

$$M = \frac{\sigma_{\max}}{c} \int_A y^2 dA \quad (3.4.10)$$

เพราะฉะนั้น

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (3.4.11)$$

3.5 ค่าความปลอดภัย (factor of safety)

ในการผลิตการออกแบบชิ้นงาน เครื่องจักร เครื่องก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งการขนส่งถ่ายวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ภายในโรงงานหรือที่หน้างานก่อสร้าง เมื่อดำเนินการใดๆก็ตามจะต้องมีค่าเผื่อไว้สำหรับออกแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้แรงหรือกำลังต่างๆที่มากกระทำกับเครื่องจักรหรือเครื่องมือก่อสร้างมีมากเกินไปกว่ากำลังที่เครื่องจักรนั้นๆจะรับได้ซึ่งค่าเผื่อดังกล่าวเรียกว่าค่าความปลอดภัย

จากค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากชิ้นงานทดสอบของวัสดุนั้นจะไม่สามารถที่จะนำค่าเหล่านั้นมาใช้ในการออกแบบหรือคำนวณได้เลยเนื่องจากแรงหรือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างนั้นอาจจะสูงกว่าค่าที่ได้จากชิ้นทดสอบ เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเกินค่าสูงสุดในโครงสร้างนั้นจะรับได้จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าความปลอดภัยหรือค่าเผื่อในการออกแบบชิ้นงานเอาไว้ดังนี้

$$\text{ค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{ค่าความเค้นสูงสุด}}{\text{ค่าความเค้นใช้งาน}} \quad (3.5.1)$$

3.5.1 ปัจจัยในการกำหนด

ในการออกแบบจะทราบชิ้นงานและขนาดของแรงหรือกำลังที่มากกระทำกับชิ้นงานนั้นๆเพื่อที่จะสามารถเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาทำเป็นชิ้นงานได้จึงต้องทราบค่าความปลอดภัยก่อน โดยค่าความปลอดภัยที่จะเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ลักษณะของแรงหรือกำลังที่มากกระทำกับชิ้นงานจะเป็นแรงที่อยู่นิ่งๆ เช่นแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของชิ้นงานเอง หรือแรงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น รถที่วิ่งอยู่บนสะพาน นอกจากนี้ความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นหากชิ้นงานหรือโครงสร้างพังทลายลงก็เป็นตัวกำหนดค่าความปลอดภัยที่จะใช้ได้เช่นเดียวกัน

ตัวอย่างเช่น สมมติว่าเป็นแรงประเภทอยู่นิ่งมีแรงกระทำเท่ากับ 140 หน่วย ใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2 สำหรับเหล็กเหนียว ดังนั้นต้องเลือกชนิดวัสดุที่มีความแข็งแรงเท่ากับ $140 \times 2 = 280$ หน่วย มาทำเป็นชิ้นงาน เป็นต้น (ชาวสวน, 2549)

3.6 ความร้อน (Thermal)

3.6.1 ปริมาณความร้อน (Quantity of heat)

ปริมาณความร้อน คือ จำนวนความร้อนที่มีอยู่ในสสารใดสสารหนึ่ง ซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของสสาร อุณหภูมิแตกต่าง และความร้อนจำเพาะของสสารนั้นเช่น สสารหนึ่งที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะมีปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad (3.6.1)$$

3.6.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

1. การนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊สแต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มี การเคลื่อนไหวภายในวัสดุ จะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) คูณกับพื้นที่ (A) ที่ความร้อนไหลผ่าน ดังสมการ

$$q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.6.2)$$

2. การพาความร้อน (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทอันมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุลและผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหลเป็นส่วนใหญ่ โดยสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาดังนี้

$$q_{\text{convec}} = h(T_h - T_c) \quad (3.6.3)$$

3. การแผ่รังสี (Radiation)

ในการพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อน ϵ กับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_h และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_c เราสามารถเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$q_{\text{rad}} = \epsilon_R \sigma_R A (T_h^4 - T_c^4) \quad (3.6.4)$$

วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (The log mean temperature difference (LMTD) method)

ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งในสมการของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchangers) ซึ่งสามารถหาได้จาก (จตุรรัตน์, 2552)

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T - T_o) - (T - T_i)}{\ln\left(\frac{T - T_o}{T - T_i}\right)} \quad (3.6.5)$$

3.7 การไหลในท่อ (Internal Flow)

การไหลของของไหลในท่อเมื่อใช้ร่วมกับปั๊ม ส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบเต็มท่อลักษณะของการไหลในท่ออาจจะจำแนกออกได้ โดยการพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลเมื่อเทียบ

กับ เวลา สถานที่ และแรงเฉื่อย (Force of inertia) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหลเมื่อเทียบกับแรงหนืด (Force of viscosity)

มวลสารที่เกิดการไหลในระบบหนึ่งจะเท่ากันตลอดทุกๆ หนาตัดเมื่อให้ปริมาณการไหลของมวลสารเป็น \dot{m} เขียนสมการได้ว่า (ตำราฟิสิกส์ของกรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน, 2548)

$$\dot{m} = \rho VA \quad (3.7.1)$$

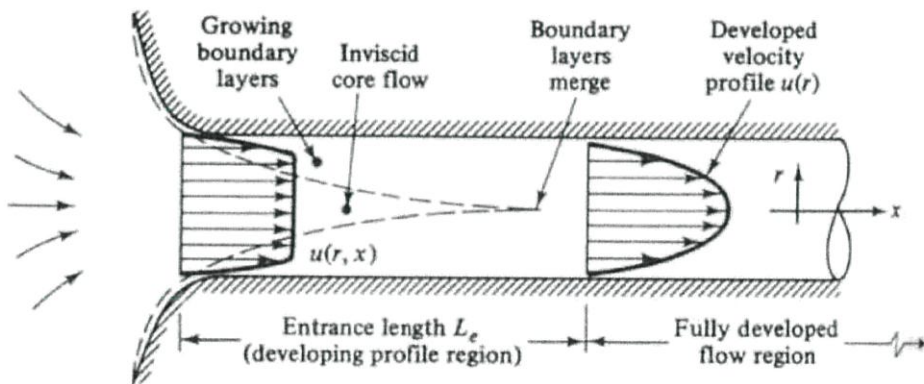
3.7.1 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อและ Fitting แบบต่าง ๆ แบ่งออกได้ 2 ประเภท

1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

หมายถึง การไหลชนิดที่อนุภาคของของไหลไม่ว่าจะเป็นอนุภาคเล็กหรือใหญ่ มีการเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือเป็นชั้นเรียบ ๆ อย่างเป็นระเบียบ ไม่แตกกระจายโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ความเร็วต่ำ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหลของลักษณะของท่อ ลักษณะการเกิดการไหลแบบราบเรียบเช่นการไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของเลือดและการดูดน้ำของต้นไม้ เป็นต้น

2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

หมายถึง การไหลของของไหลชนิดที่อนุภาคของของไหลไหลอย่างไม่เป็นระเบียบเคลื่อนที่ในลักษณะทิศทางที่ขึ้นลงและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม จากส่วนหนึ่งของของไหลไปยังส่วนอื่นๆ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ความเร็วสูงลักษณะการไหลของของไหลทั่วไปเกือบ 95% จะเป็นการไหลแบบนี้ เช่น การไหลของน้ำตามแม่น้ำลำคลอง การไหลของอากาศ ในท่อลม เป็นต้น



รูปที่ 3.7 การไหลของของไหลในท่อ (Flow in Closed Conduits)

ที่มา: พีรณัฐ และคณะ, 2554

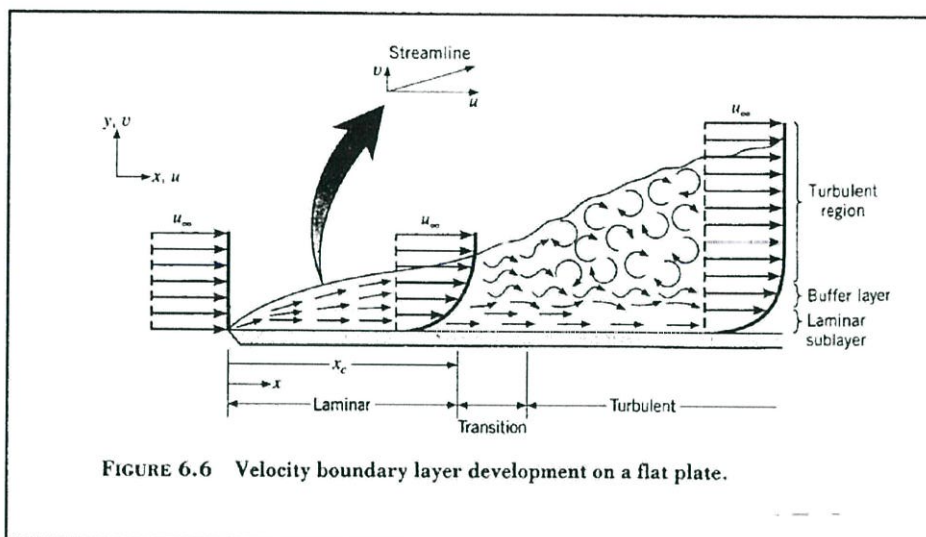


FIGURE 6.6 Velocity boundary layer development on a flat plate.

รูปที่ 3.8 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ที่มา: พีรณัฐ และคณะ, 2554

วิศวกรชาวอังกฤษชื่อว่า Osborne Reynolds ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกชนิดของไหล และได้สรุปเป็นตัวแปรไร้มิติที่มีชื่อว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.7.1)$$

ในกรณีที่

$Re < 2300$ การไหลในท่อจะเป็นแบบ laminar flow

$Re > 2300$ การไหลในท่อจะเป็นแบบ turbulent flow

3.7.2 สมการการพาความร้อน

1. การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม (Laminar flow, $Re < 2300$)

ย่าน fully-develop ค่า N_{UD} หาได้จาก

$$N_{UD} = 4.36 \quad (q'' = \text{const.}) \quad (3.7.2)$$

$$N_{UD} = 3.66 \quad (T_s = \text{const.}) \quad (3.7.3)$$

2. การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม (Turbulent flow, $Re > 2300$)

ย่าน fully-develop ค่า N_{UD} ของการไหลปั่นป่วนภายในท่อทั้งในกรณีอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอและความร้อนสม่ำเสมอหาได้จาก

$$N_{UD} = 0.023 Re^{4/5} Pr^n \quad (3.7.4)$$

โดยที่ $n = 0.4$ เมื่อ $T_s > T_m$; $n = 0.3$ เมื่อ $T_s < T_m$

3. สมการสำหรับการพาความร้อนในท่อไม่กลม

ใช้ hydraulic diameter, D_h แทนเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับการคำนวณ Re และ N_{uD} ของท่อไม่กลม

$$D_h = \frac{4A_c}{P_d} \quad (3.7.5)$$

การไหลแบบราบเรียบในท่อไม่กลมในลักษณะการไหลแบบราบเรียบในย่าน fully develop ใช้รูปที่ 3.10

ในการไหลแบบราบเรียบในย่าน fully develop สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จาก

$$h = N_{uD} \frac{k}{D} \quad (3.7.6)$$


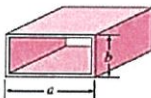
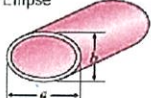
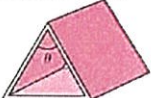
3.7.3 การสูญเสียความดันภายในท่อ (Pressure Head Losses, h_L)

เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ความดันในท่อเกิดการเปลี่ยนแปลง การสูญเสียความดันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท

1. การสูญเสียหลัก (Major Head losses), h_f คือ การสูญเสียที่มีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับความหนืดของไหล ดังนั้นการสูญเสียหลัก คำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g} \quad (3.7.7)$$

Nusselt number and friction factor for fully developed laminar flow in tubes of various cross sections ($D_h = 4A_c/P_d$, $Re = V_{avg}D_h/\nu$, and $Nu = hD_h/k$)

Tube Geometry	a/b or θ°	Nusselt Number		Friction Factor f
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Circle 	—	3.66	4.36	64.00/Re
Rectangle 	1	2.98	3.61	56.92/Re
	2	3.39	4.12	62.20/Re
	3	3.96	4.79	68.36/Re
	4	4.44	5.33	72.92/Re
	6	5.14	6.05	78.80/Re
	∞	5.60	6.49	82.32/Re
Ellipse 	1	3.66	4.36	64.00/Re
	2	3.74	4.56	67.28/Re
	4	3.79	4.88	72.96/Re
	8	3.72	5.09	76.60/Re
	16	3.65	5.18	78.16/Re
Isosceles Triangle 	10°	1.61	2.45	50.80/Re
	30°	2.26	2.91	52.28/Re
	60°	2.47	3.11	53.32/Re
	90°	2.34	2.98	52.60/Re
	120°	2.00	2.68	50.96/Re

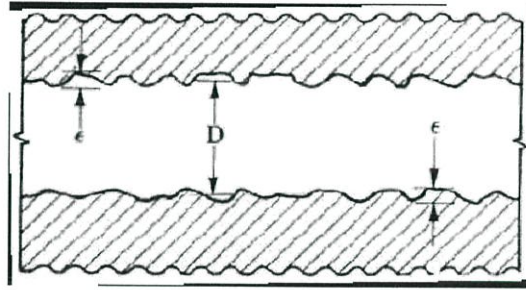
รูปที่ 3.9 ค่า Re และ N_{uD} ของท่อไม่กลม

ที่มา: Yoav Peles, 1998

ในกรณีเป็นการไหลแบบ Laminar flow ค่า $f = \frac{64}{Re}$

ในกรณีเป็นการไหลแบบ Turbulent flow ค่า f ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของ Reynolds Number เพียงอย่างเดียวเหมือนการไหลแบบ laminar แต่ยังขึ้นอยู่กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ของผิว (Relative roughness)

Relative roughness คือ อัตราส่วนของค่าความขรุขระของผนังท่อ (Roughness), กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) และหาค่า f ได้จากกราฟ Moody's Chart



รูปที่ 3.10 Relative roughness

ที่มา: พีรณัฐ และคณะ, 2554

ความขรุขระของท่อจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นท่อ ค่าความขรุขระของวัสดุบางชนิดได้แสดงดังตารางที่ ก.1

การหาค่า f โดยการใช้อยู่ Moody diagram คือเริ่มต้นจาก Reynolds Number ในแนวนอนแล้วลากเส้นตรงในแนวตั้งไปพบกับเส้นโค้งในรูปซึ่งแทนค่า ϵ/D หลังจากนั้นก็ลากเส้นในแนวนอนและอ่านค่าแฟกเตอร์ของความเสียดทาน

การสูญเสียรอง (Minor head losses), h_m คือ การสูญเสียซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของการไหลและความเร็วของการไหลทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการสูญเสียรองจึงอยู่ในรูปของเฮดความเร็ว ($V^2/2g$) คูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง (Loss Coefficient, K) เช่น ข้อต่อ, ข้องอ, ข้อโค้ง, วาล์ว, ท่อลด, ท่อขยาย เป็นต้น การสูญเสียรองคำนวณได้จากสมการ

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.7.8)$$

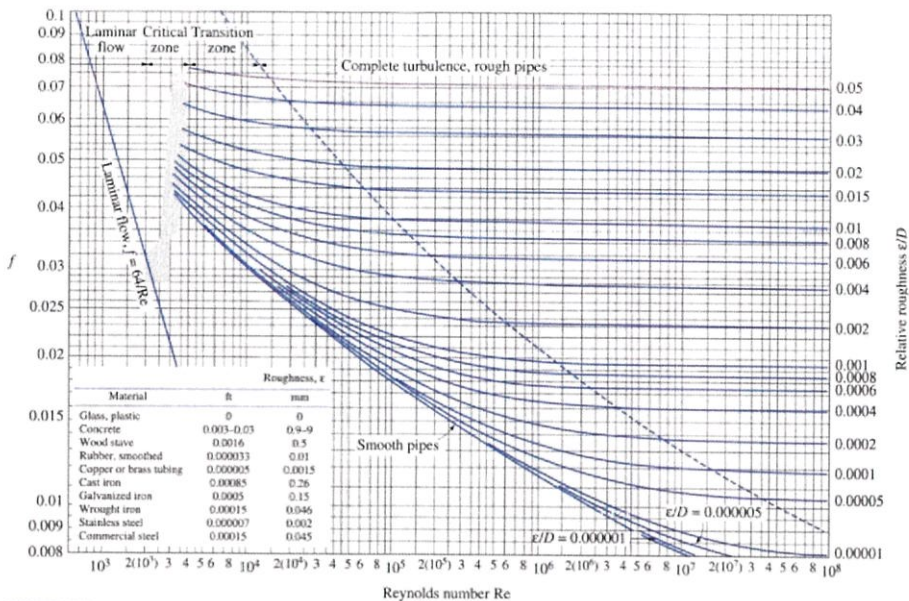
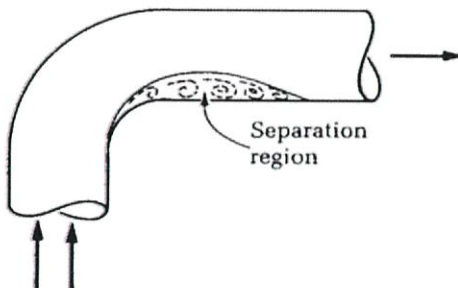


FIGURE A-27 The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

รูปที่ 3.11 Moody diagram
ที่มา: พีรพันธุ์ และคณะ, 2554

การสูญเสียในข้อต่อท่อ (Losses in Pipe Fitting) การสูญเสียความดันที่เกิดในข้อต่อเป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย (K) แสดงดังตารางที่ ก.2 (พีรพันธุ์ และคณะ, 2554)



รูปที่ 3.12 การสูญเสียในข้อต่อท่อ (Losses in Pipe Fitting)
ที่มา: พีรพันธุ์ และคณะ, 2554

3.8 การคำนวณค่าไฟ

ในการคิดค่าไฟที่ใช้ในกระบวนการซึ่งในขั้นตอนแรกต้องหาลังงานไฟฟ้า (หน่วย) ที่ใช้ก่อนเมื่อได้ปริมาณหน่วยที่ใช้แล้วจึงนำไปคูณกับราคาซึ่งในการไฟฟ้าแห่งประเทศไทยกำหนดไว้หน่วยละ 4 บาท ซึ่งในการคำนวณหาลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.8.1

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{เวลาที่ใช้}}{1000} \quad (3.8.1)$$

ซึ่งในการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าหาได้จากสมการ 3.8.2

$$P = IV \quad (3.8.2)$$

โดยกระแสไฟฟ้านั้นสามารถวัดได้จากแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) เป็นอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละอุปกรณ์ในขณะที่ทำการทดลอง

บทที่ 4

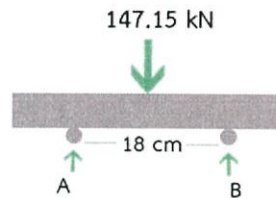
การคำนวณและการออกแบบ

4.1 การคำนวณความหนาเหล็ก

ในการเลือกความหนาเหล็กต้องมีการคำนวณแรงซึ่งเกิดจากการกระทำที่แผ่นเหล็กโดยมีทั้งแรงเฉือน โมเมนต์ดัด ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นภายในคานอีกทั้งต้องมีค่าความปลอดภัยเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อแม่พิมพ์

กำหนดให้ $F = 15 \text{ ton}$

แปลงค่า F ให้อยู่ในหน่วย kN จะได้ $F = (15)(9.81)(1000) = 147.15 \text{ kN}$



รูปที่ 4.1 แรงที่กระทำกับคาน

จาก $\sum F_y = 0$ กำหนดให้ทิศขึ้นเป็นบวก

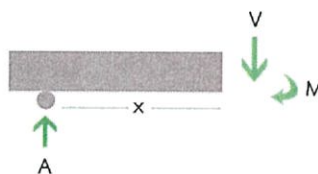
$$\text{จะได้} \quad F_A + F_B = 147.15 \text{ kN} \quad (4.1.1)$$

จาก $\sum M_A = 0$ กำหนดทิศตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก

$$\text{จะได้} \quad -F_B(0.18) + 147.15(0.09) = 0 \quad (4.1.2)$$

จากสมการที่ 1 และ 2 จะได้ $F_A = 73.57 \text{ kN}$ และ $F_B = 73.57 \text{ kN}$

ทำการตัดหน้าตัดช่วงที่ $[0 \leq x < 9]$

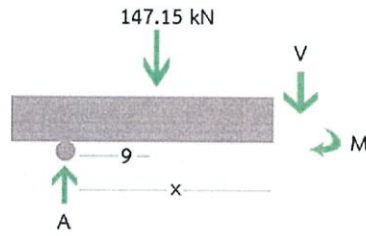


รูปที่ 4.2 แรงที่กระทำกับคานระยะ $0 \leq x < 9$

จาก $\sum F_y = 0$ กำหนดให้ทิศขึ้นเป็นบวก จะได้ $V_1 = 73.57 \text{ kN}$

จาก $\sum M = 0$ กำหนดทิศตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก จะได้ $M_1 = 73.57(x) \text{ kN.m}$

ทำการตัดหน้าตัดช่วงที่ $[9 \leq x < 18]$



รูปที่ 4.3 แรงที่กระทำกับคานระยะ $9 \leq x < 18$

จาก $\sum F_y = 0$ กำหนดให้ทิศขึ้นเป็นบวก

จะได้ $73.57 - V_2 - 147.15 = 0$

$$V_2 = 73.57 \text{ kN}$$

จาก $\sum M = 0$ กำหนดทิศตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก

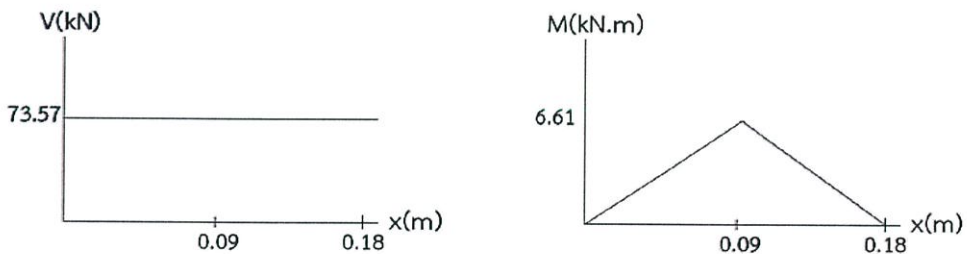
จะได้ $M_2 - 147.15(x - 0.09) + 73.57(x) = 0$

$$M_2 = 73.57(x) - 13.24 \text{ kN.m}$$

เมื่อแทนค่าระยะ $x = 0.09 \text{ m}$ และ $x = 0.18 \text{ m}$

$$M_1 = 6.62 \text{ kN.m} \text{ และ } M_2 = 0 \text{ kN.m}$$

ซึ่งนำมาเขียนไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ตัดได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมแรงเฉือนและโมเมนต์ตัด

หาความหนาแม่พิมพ์

จากสมการที่ 3.4.1

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} c}{I} \quad (4.1.3)$$

จากรูปที่ 4.4 จะได้

$$M_{\max} = 6.61 \text{ kN.m}$$

จากตารางที่ ก.3 และตารางที่ ก.4

ค่า yield strength ของเหล็กเท่ากับ 250 MPa

ค่า Moment of inertia เท่ากับ $I = \frac{bh^3}{12}$

กำหนดให้ค่าความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2

จากสมการที่ 3.5.1 ค่าความปลอดภัย = $\frac{\text{ค่าความเค้นสูงสุด}}{\text{ค่าความเค้นใช้งาน}}$

$$2 = \frac{250 \times 10^6}{\text{ค่าความเค้นใช้งาน}}$$

ค่าความเค้นใช้งาน = 125×10^6

จะได้ $250 \times 10^6 = \frac{(6.61 \times 10^3) \left(\frac{h}{2}\right)^2}{(0.4 \times h^3)}$

$$h = 28.1 \text{ mm}$$

ซึ่งความหนาของเหล็กทั้งหมดที่ใช้ต้องมีความหนาน้อย 28.1 mm

4.2 การคำนวณชุดให้ความร้อน (Heater)

โดยคิดที่ความหนาของแม่พิมพ์มีความหนามากสุด 4 cm

กำหนดให้

$k_{Fe} = 80.3 \text{ W/m.k}$	$\epsilon_{Fe} = 0.56$
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$	$C_{Fe} = 0.49 \text{ KJ/Kg.K}$
$T_{max} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{surr} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
$t = 0.04 \text{ m}$	

ปริมาณความร้อนคำนวณได้จากสมการ 3.6.1

จะได้

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = mc(T_{max} - T_{min})$$

ในการให้ความร้อนจะเกิดความร้อนที่สูญเสียได้แก่ การนำความร้อน และการแผ่รังสี ดังสมการที่ 3.6.4 และ 3.6.2 จะได้

$$Q_{loss} = kA \frac{\Delta T}{\Delta X} + \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

เมื่อนำมารวมกันจะได้ความร้อนที่ต้องการให้แก่แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปจะได้

$$Q = mc(T_{max} - T_{min}) + kA \frac{\Delta T}{\Delta X} + \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

ในการทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิ $250 \text{ }^\circ\text{C}$ นั้นในความจริงแล้วจะไม่เกิด $250 \text{ }^\circ\text{C}$ พอดีจึงมีการคำนวณอุณหภูมิ (T_h) ที่เกิดขึ้นจริงดังนี้

$$Q_{cond} = Q_{conv}$$

$$k_{Fe} A \frac{\Delta T}{\Delta X} = \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

$$80.3 \left(\frac{250 - T_s}{0.03} \right) = 0.56 \times 5.67 \times 10^{-8} (T_s^4 - 308^4)$$

จะได้ $T_s = 249.22 \text{ }^\circ\text{C}$

จากนั้นคำนวณหาน้ำหนักของแม่พิมพ์แต่ละแผ่น

$$\begin{aligned} m_{Fe} &= \rho V \\ &= 7850 \times 0.4 \times 0.4 \times 0.04 \\ m_{Fe} &= 50.24 \text{ Kg} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ปริมาณความร้อน

$$\begin{aligned} Q &= 50.24 \times 0.49 \times 10^3 \times (250 - 25) \\ qt &= 5.54 \times 10^6 \end{aligned}$$

ในเวลา t นาที จะได้

$$q_{in} = \frac{5.54 \times 10^6}{t} \text{ W}$$

จากสมการการสูญเสียความร้อนจะได้

$$\begin{aligned} q_{loss} &= 80.3 \times 0.4^2 \times \left(\frac{250 - 249.22}{4 \times 10^{-3}} \right) + 0.56 \times 0.4^2 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (522.22^4 - 308^4) \\ &= 2837.48 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad q_{total} &= q_{in} + q_{loss} \\ &= \frac{5.54 \times 10^6}{t} + 2837.48 \text{ W} \end{aligned}$$

โดยใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เป็นเวลา 15 นาที

$$t = 900 \text{ s} \quad \text{จะได้} \quad q_{total} = 8993.03 \text{ W}$$

ดังนั้นจึงต้องใช้ฮีตเตอร์ขนาดประมาณ 9000 W ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

4.3 การคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิและปริมาณน้ำ

ในการคำนวณระยะเวลาที่ใช้ต้องกำหนดอุณหภูมิน้ำขาออก (T_0) ซึ่งเป็นค่าที่ยังไม่ทราบและกำหนดอัตราการไหลของน้ำ (\dot{m}) ซึ่งการคำนวณในหัวข้อนี้จะนำสมการ $\dot{m}c_p\Delta T$ และสมการ $hA\Delta T_{lm}$ จับมาเท่ากันและดูผลต่างที่ให้ค่าที่น้อยที่สุดเพื่อที่จะได้รู้ว่าในการกำหนดค่าอุณหภูมิน้ำขาออก (T_0) นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับความจริง

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้} \quad T_0 &= 345 \text{ K} & T_i &= 298 \text{ K} \\ \bar{T} &= 321.5 \text{ K} & D &= 15 \text{ mm} \\ C_p &= 4182 \text{ J/Kg}\cdot\text{K} & \mu &= 562.5 \times 10^{-6} \\ K_f &= 641.5 \times 10^{-3} & Pr &= 3.665 \\ \dot{m} &= 0.01 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

หาค่า h เป็นลำดับแรก

จากสมการที่ 3.7.2

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

จากสมการ 3.7.1 $\dot{m} = \rho VA$ และ $A = \frac{\pi D^2}{4}$ จะได้

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu}$$

$$= \frac{4(0.01)}{3.14(0.015)(562.5 \times 10^{-6})}$$

$$= 1509.79$$

เนื่องจากค่า $Re < 2300$ จึงเป็นการไหลแบบ Laminar flow

หาค่า N_{uD} จากสมการที่ 3.7.5

$$N_{uD} = 0.023 Re^{4/5} Pr^n$$

เนื่องจาก $T_s > T_m$ จะได้ค่า $n = 0.4$

$$N_{uD} = 0.023 Re^{4/5} Pr^{0.4}$$

$$= 23.51$$

หาค่า h จากสมการที่ 3.7.7

$$h = N_{uD} \frac{K_f}{D}$$

$$= 23.51 \left(\frac{641.5 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-3}} \right)$$

$$h = 186.46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

ในการหาค่า Δ ระหว่าง 2 สมการโดยให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในระหว่างการหล่อเย็นเท่ากับ 125°C หรือ 398 K

$$\dot{m} c_p \Delta T = h A \Delta T_{lm}$$

$$\dot{m} c_p \Delta T = h (\pi D L) \Delta T_{lm}$$

$$(0.01)(4182)(345-298) =$$

$$(186.46)(\pi)(0.015)(2.92) \left(\frac{(398-345) - (398-298)}{\ln\left(\frac{398-345}{398-298}\right)} \right)$$

$$1965.54 = 1899.4$$

จะได้ Δ เท่ากับ 66.14

ซึ่งค่า Δ น้อยมากระดังนั้นอุณหภูมิน้ำขาออก (T_0) สามารถนำมาคำนวณในการหาเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแผ่นเหล็กและปริมาณน้ำที่ใช้ได้

การหาเวลาในการหล่อเย็น จากสมการ

$$Q = m c_p \Delta T$$

$$qt = m c_p \Delta T$$

$$t = \frac{(50.24)(490)(250-50)}{1899.4}$$

$$t = 43 \text{ min}$$

หาปริมาณน้ำจาก

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณน้ำ} &= \dot{m}t \\ &= (0.01)(43)(60) \\ &= 25.8 \text{ L}\end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นเหล็กในแต่ละแผ่นอย่างมากที่สุดประมาณแผ่นละ 26 L

4.4 เครื่องปั้มน้ำ (Pump)

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานจากแหล่งต้นกำเนิดไปยังของเหลวเพื่อทำให้ของเหลวเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งที่อยู่สูงกว่าหรือในระยะทางที่ไกลออกไป ซึ่งขั้นแรกต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นก่อน

$$\begin{aligned}\text{กำหนด} \quad \dot{m} &= 0.178 \text{ kg/s} & L &= 7.54 \text{ m} \\ D &= 0.0127 \text{ m} & h_{\text{static}} &= 1.25 \text{ m}\end{aligned}$$

หาอัตราการไหล (Q_w)

$$\begin{aligned}\text{จาก} \quad \dot{m} &= \rho Q_w \\ 0.178 &= (1000)Q_w \\ \text{จะได้} \quad Q_w &= 1.78 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

หาความเร็วของของไหล (V)

$$\begin{aligned}\text{จาก} \quad Q_w &= VA \\ 1.78 \times 10^{-4} &= V \left\{ \frac{\pi}{4} (1.27 \times 10^{-2})^2 \right\} \\ \text{จะได้} \quad V &= 1.41 \text{ m/s}\end{aligned}$$

หาตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) เพื่อที่จะทราบว่าเป็นการไหลแบบ laminar flow หรือ Turbulent flow

$$\begin{aligned}\text{จากสมการที่ 3.7.1} \quad Re &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ &= \frac{(1000)(1.41)(1.27 \times 10^{-2})}{0.89 \times 10^{-3}} \\ \text{จะได้} \quad Re &= 2.12 \times 10^4\end{aligned}$$

จากค่า Re ได้ว่าการไหลนี้เป็น Turbulent flow

หาค่าตัวประกอบของแรงเสียดทาน (Friction Factor, f)

ขั้นแรกคือการหา Relative roughness จาก ϵ/D จะได้ ซึ่งค่า ϵ หาได้จากตารางภาคผนวก ซึ่งเป็น cast iron จะได้ $0.00026/0.0127$ เท่ากับ 0.02

จากกราฟ Moody diagram จะได้ค่า f เท่ากับ 0.045

หาการสูญเสียหลัก (Major Head losses, h_f)

$$\begin{aligned}\text{จากสมการที่ 3.7.7} \quad h_f &= \frac{fLV^2}{D2g} \\ &= \frac{(0.045)(754 \times 10^{-2})(1.41^2)}{(1.27 \times 10^{-2})(2)(9.81)} \\ h_f &= 2.71 \text{ m}\end{aligned}$$

หาการสูญเสียรอง (Minor head losses, h_m)

จากสมการที่ 3.7.8

$$h_m = K \frac{v^2}{2g}$$

สามารถหาค่า K ได้จากตารางภาคผนวก จะได้ $K = (1.90 \times 2) + 0.05 + (0.75 \times 2) + 1 \times 4 = 9.35$

จะได้

$$= \frac{(9.35)(1.41^2)}{2(9.81)}$$

$$h_m = 0.95 \text{ m}$$

นำค่าความยาวท่อ ค่าความสูงจากระดับน้ำถึงทางออกท่อ ค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง นำมารวมกันจะได้

$$h_{\text{pump}} = 7.54 + 1.25 + 2.71 + 0.95$$

$$= 12.45 \text{ m}$$

หาขนาดของปั๊มโดย

$$\text{Power} = \rho g h_{\text{pump}} Q_w$$

$$= (1000)(9.81)(12.45)(1.78 \times 10^{-4})$$

$$= 21.74 \text{ W}$$

ดังนั้นต้องใช้ปั๊มน้ำมีขนาดอย่างน้อย 21.74 W

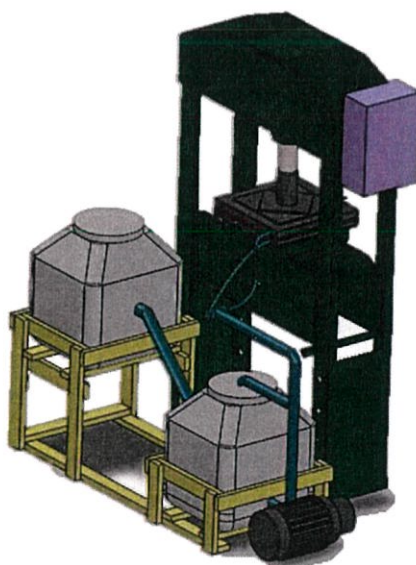
4.5 รายการชิ้นส่วน

ตารางที่ 4.1 แสดงชิ้นส่วน (Part of List) ของแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 4.5

หมายเลข	ชื่อชิ้นงาน	จำนวนชิ้นงาน	ขนาดที่ใช้ทั้งหมด	รายละเอียดปลีกย่อย
1	แผ่นเหล็ก	2	หนา 4 mm	1. ขนาด 400x400 mm
		2	หนา 20 mm	2. ขนาด 400x400 mm
		1	หนา 10 mm	3. ขนาด 400x400 mm
		1	หนา 8 mm	4. ขนาด 400x400 mm
		1	หนา 5 mm	5. ขนาด 300x300 mm
		1	หนา 5 mm	6. ขนาด 200x200 mm
2	ฮีตเตอร์แห้ง	11	Ø 11 mm	1. ยาว 200 mm
3	ใยแก้ว	1		1. MR600-1000
4	ฟิล์มโพรลึโพรพิลีน	3	หนา 0.03 mm	1. 54นิ้วx50
5	เหล็กเพลลา	1	Ø 80 mm	1. ยาว 150 mm
6	Controller Temp	2		1. 460x460 mm
7	Thermocouple Type K	4		
8	ตู้ไฟพลาสติก	1		
9	แมคเนติกส์คอน แทคเตอร์	2		
10	เบรกเกอร์ 63A	1		
11	ไฟแสดงการทำงาน	3		

ตารางที่ 4.1 แสดงชิ้นส่วน (Part of List) ของแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 4.5 (ต่อ)

12	สวิทช์ลูกศร	3		
13	สายใยลวด	1	Ø 5/8 นิ้ว	1. ยาว 2 m
14	ทางไหลทองเหลือง	4	Ø 3/4 นิ้ว	
15	เข็มขัดรัดท่อ	6		
16	ท่อเหล็กตรง	1 2 3	Ø 1/2 นิ้ว	1. ยาว 20 cm 2. ยาว 15 cm 3. ยาว 25 cm
17	ข้อต่อท่อเหล็กสามทาง	3	Ø 1/2 นิ้ว	
18	ท่อ PVC ต่อเกลียวนอก	1	Ø 1/2 นิ้ว	
19	ท่อ PVC ลดกลม	1	Ø 1/2 x 1 1/2	
20	ท่องอ PVC	1	Ø 1/2 นิ้ว	1. งอ 30° 2. งอ 90°
21	ท่อ PVC ต่อตรง	1	Ø 1/2 นิ้ว	
22	ท่อ PVC ลดเหลี่ยม	1	Ø 1/2 นิ้ว	



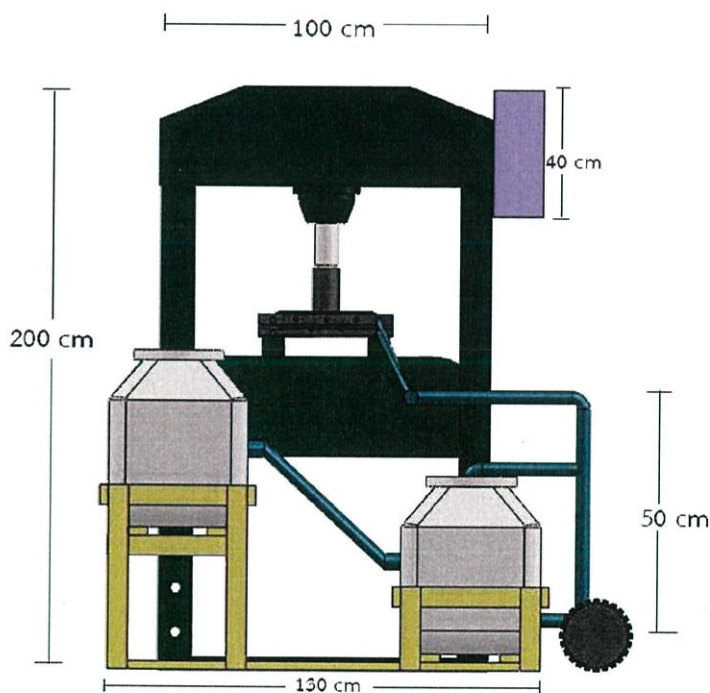
รูปที่ 4.5 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก

4.6 หลักการทำงานของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกโดยเครื่องอัดไฮดรอลิก

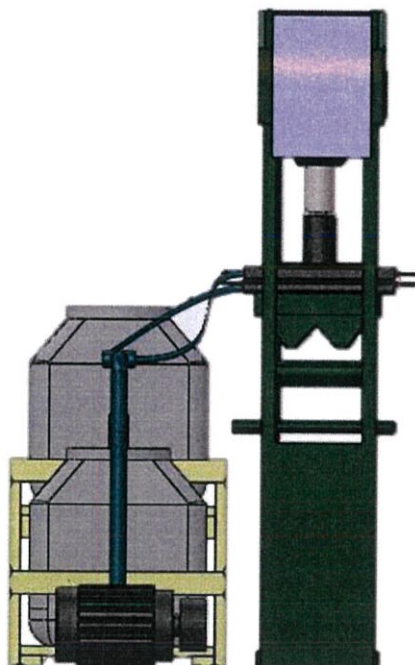
ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย 3 ชุด คือ

1. ชุดแม่พิมพ์
2. ระบบหล่อเย็น
3. ระบบตู้ไฟ

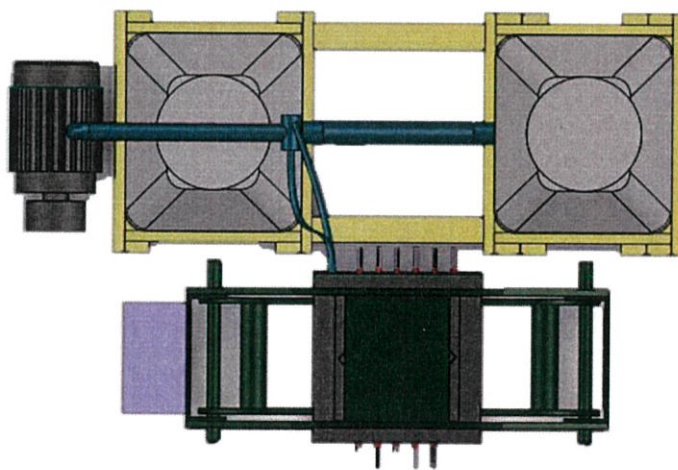
ขั้นตอนทำงาน บรรจุพลาสติกลงกรอบ (Picture Frame) นำไปวางที่แผ่นเหล็กแผ่นล่าง จากนั้นทำการปั๊มหัวกดไฮดรอลิกด้วยมือที่ตรงกันยกข้างๆเครื่องอัดไฮดรอลิก กดอัดให้แผ่นเหล็กทั้งสองประกบอัดกันแน่นที่ค่าความดันที่ต้องการ เปิดเบรกเกอร์เพื่อให้ไฟเข้าสู่ขั้นตอนการให้ความร้อน แก่แม่พิมพ์โดยชุดให้ความร้อน (Heater) จากนั้นทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการที่ตัวคอนโทรลเลอร์ รอจนกว่าอุณหภูมิจะสูงจนถึงค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล Type K เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำการหล่อเย็นโดยใช้ปั๊มน้ำ ปั๊มน้ำจากถังเก็บน้ำไปยังแม่พิมพ์และรอจนกว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ลดลงถึงค่าอุณหภูมิที่ต้องการ



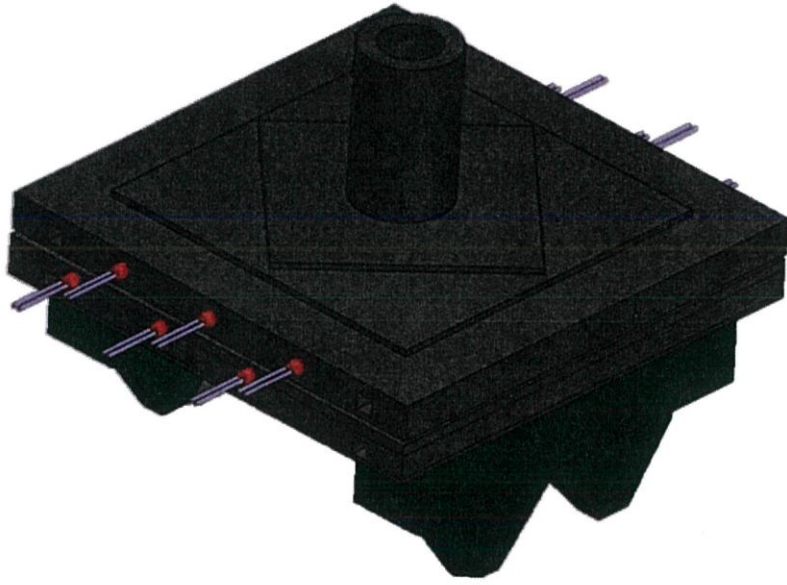
รูปที่ 4.6 ด้านหน้าของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก



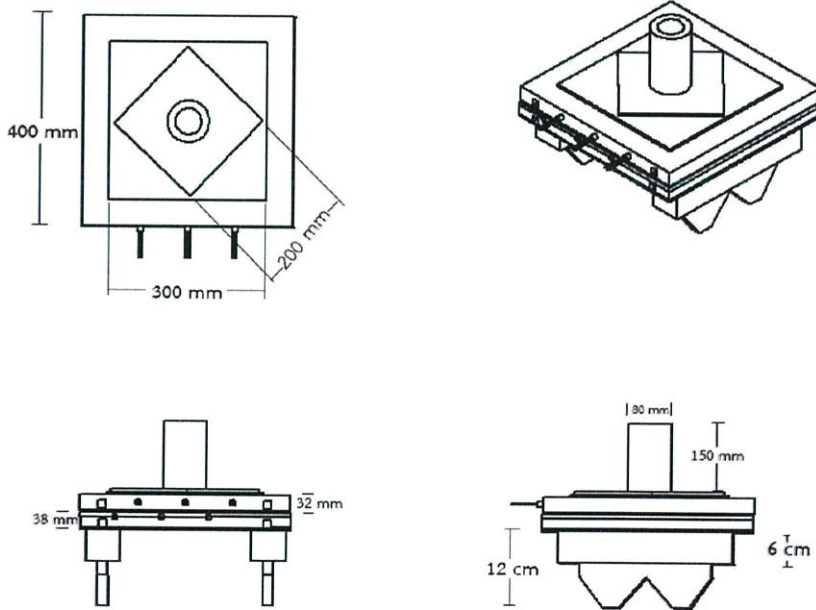
รูปที่ 4.7 ด้านข้างของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก



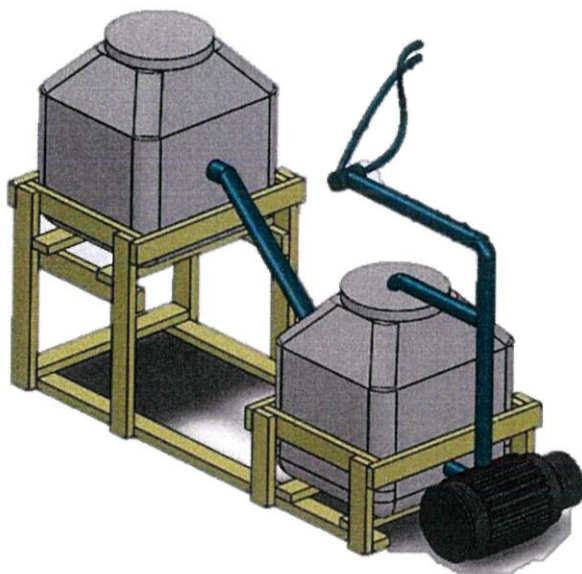
รูปที่ 4.8 ด้านบนของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก



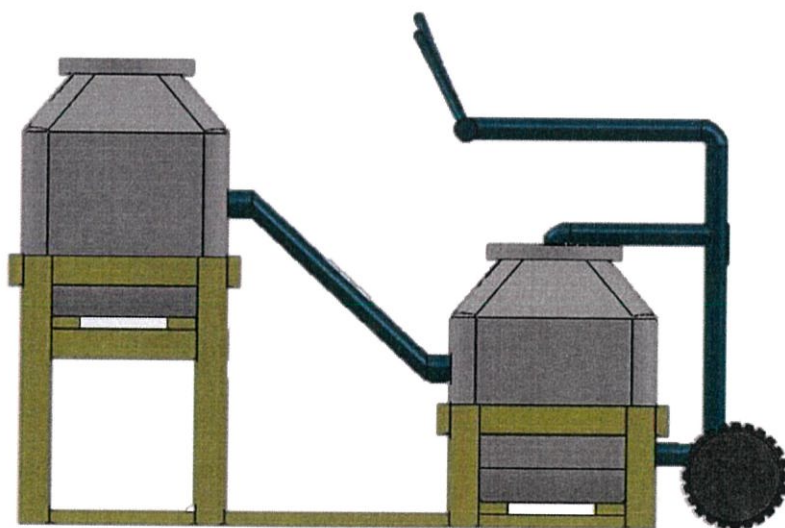
รูปที่ 4.9 ชุดแม่พิมพ์



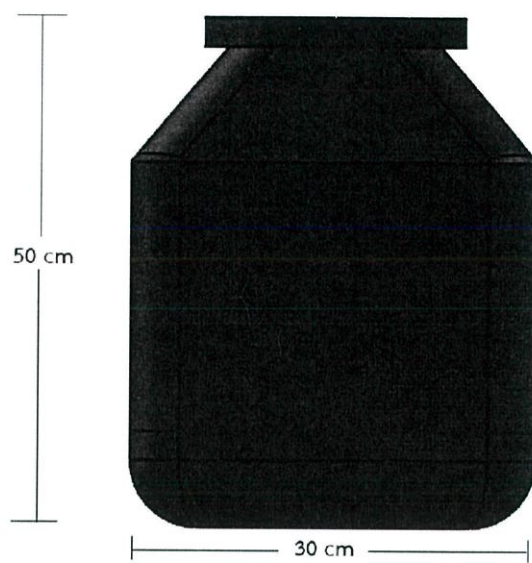
รูปที่ 4.10 ขนาดในส่วนต่างๆของชุดแม่พิมพ์



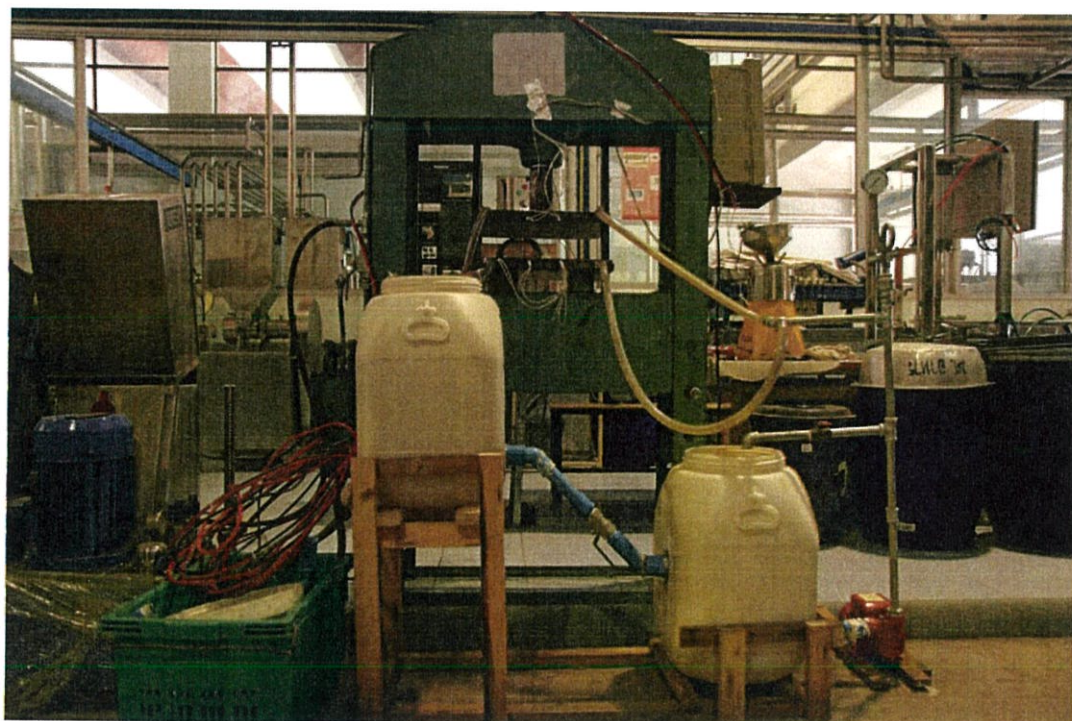
รูปที่ 4.11 ชุดระบบหล่อเย็น



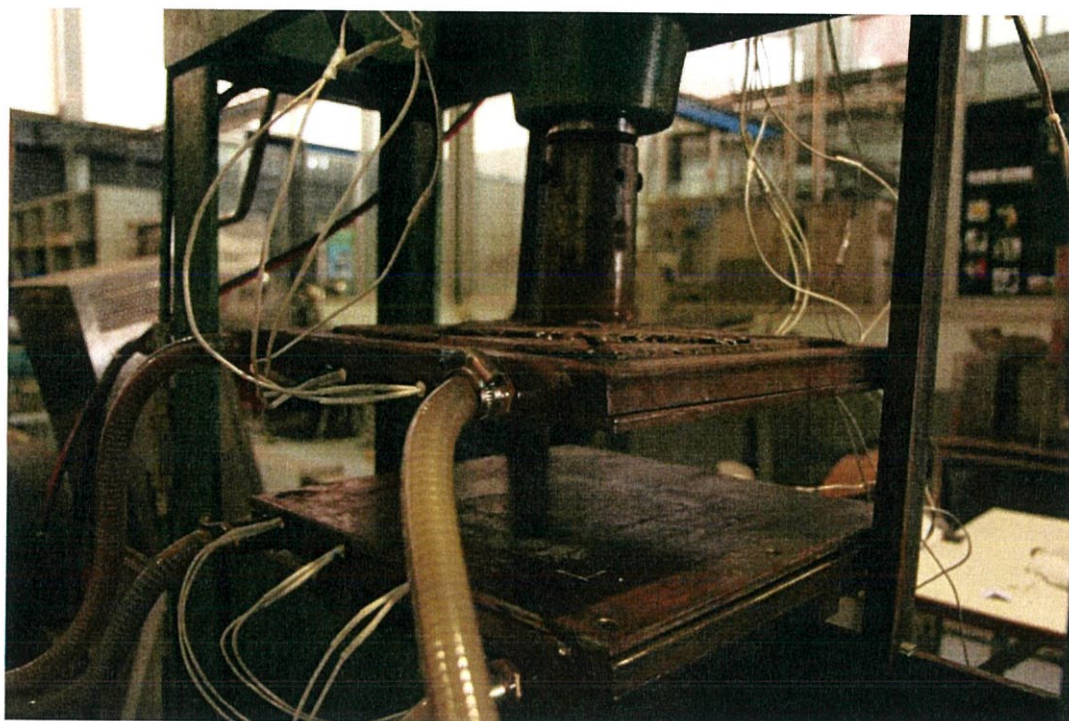
รูปที่ 4.12 ด้านหน้าของระบบหล่อเย็น



รูปที่ 4.13 ด้านหน้าถังเก็บน้ำ



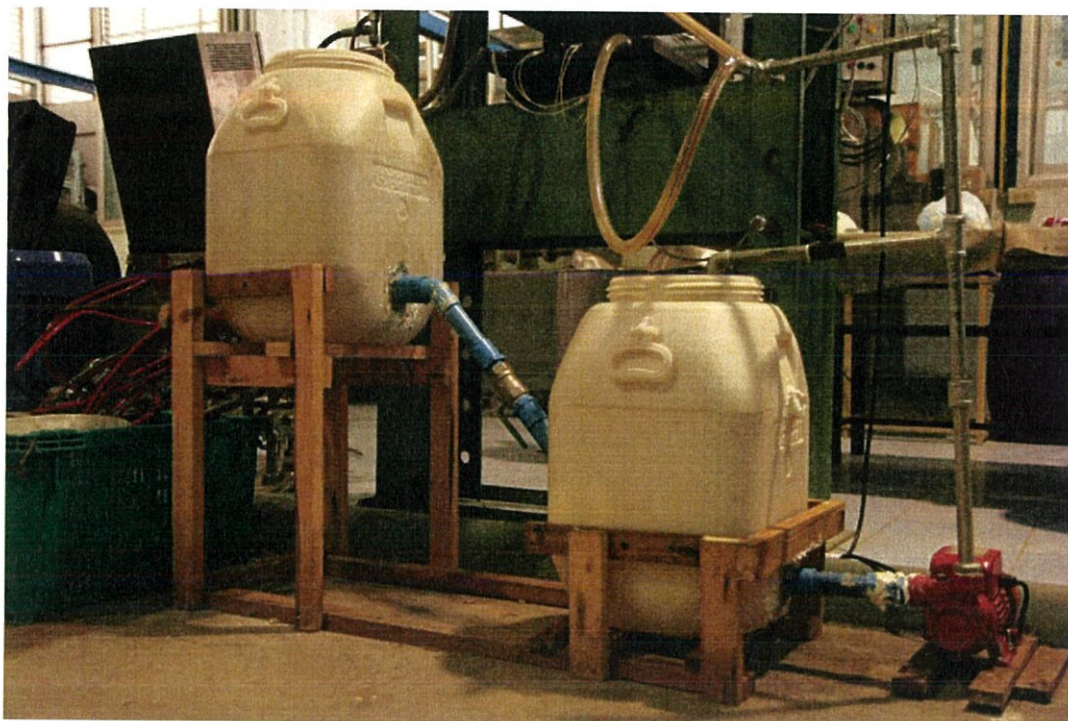
รูปที่ 4.14 ภาพจริงด้านหน้าของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกจากแรงอัดไฮดรอลิก



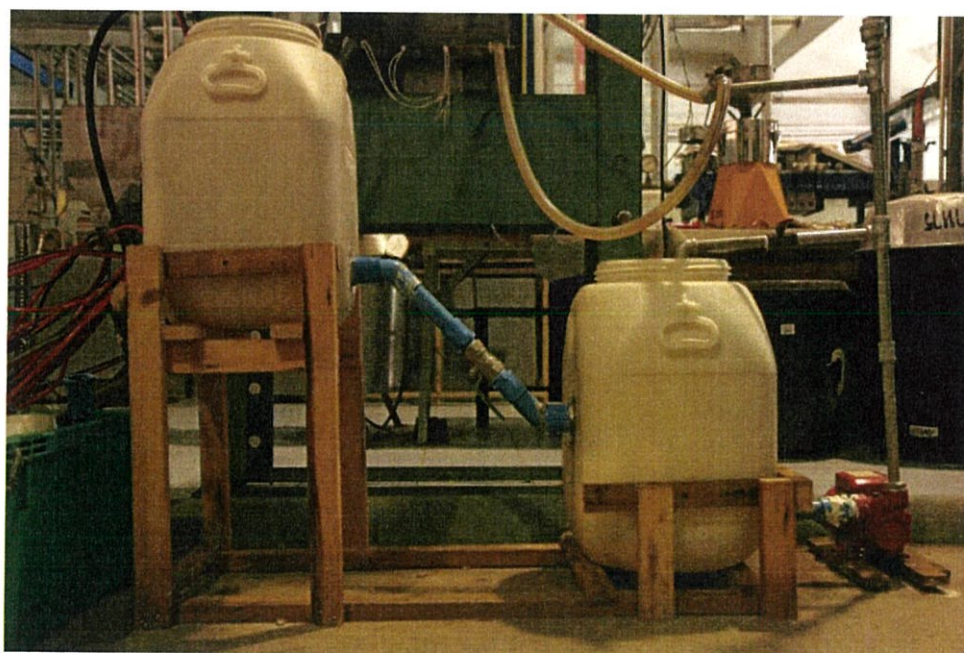
รูปที่ 4.15 ภาพจริงชุดแม่พิมพ์



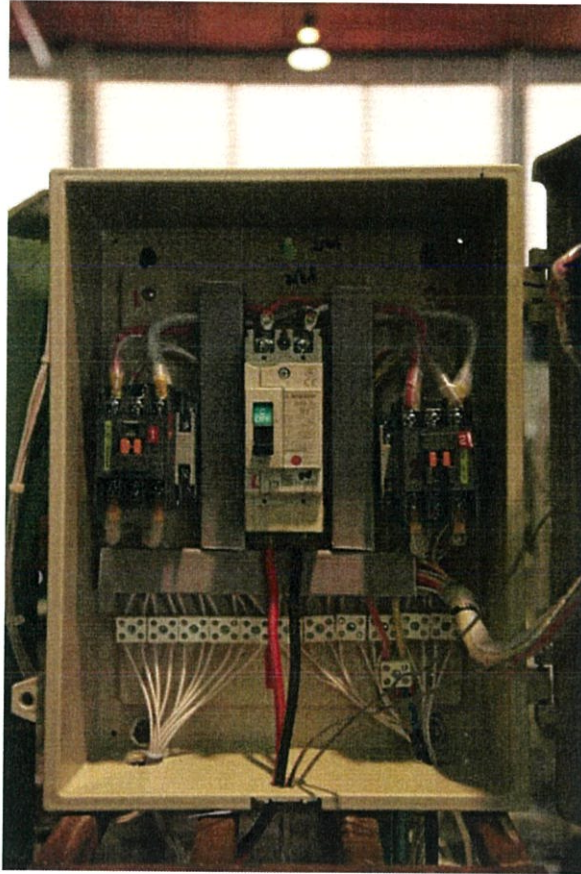
รูปที่ 4.16 ภาพจริงด้านหน้าชุดแม่พิมพ์



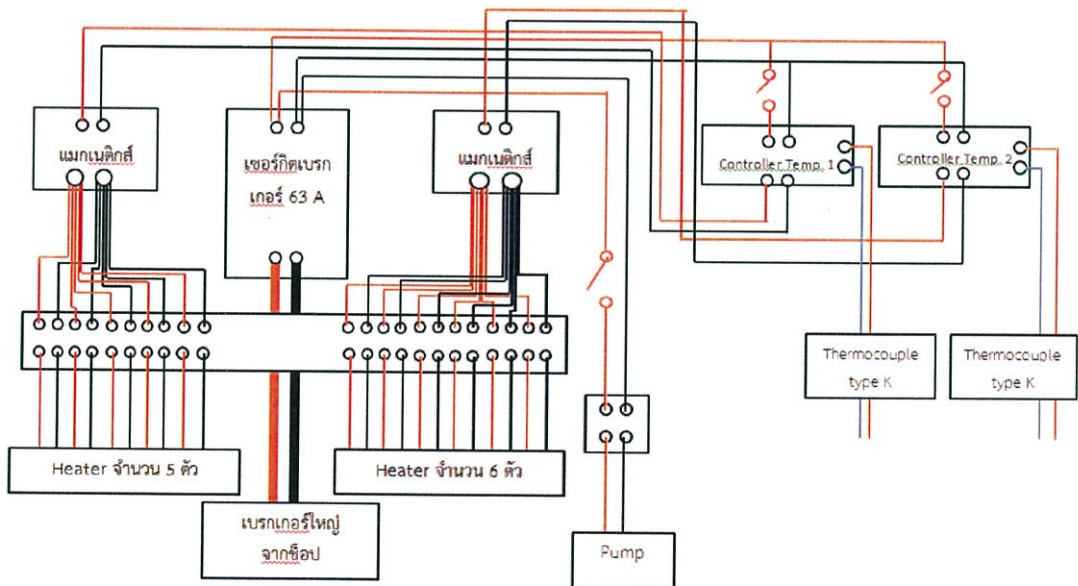
รูปที่ 4.17 ภาพจริงชุดระบบหล่อเย็น



รูปที่ 4.18 ภาพจริงด้านหน้าชุดระบบหล่อเย็น



รูปที่ 4.19 ภาพจริงระบบตู้ไฟ



รูปที่ 4.20 แผนผังวงจรไฟฟ้าตู้ไฟ



รูปที่ 4.21 ภาพจริงบริเวณฝาเปิดระบบตู้ไฟ

- หมายเลข 1 ไฟแสดงการทำงานของฮีตเตอร์
- หมายเลข 2 Controller Temperature
- หมายเลข 3 ปุ่มเปิด - ปิด การทำงานของฮีตเตอร์
- หมายเลข 4 ไฟแสดงการทำงานของปั๊ม
- หมายเลข 5 ปุ่มเปิด - ปิด การทำงานของปั๊ม

บทที่ 5

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในการออกแบบเครื่องขึ้นรูปพลาสติก ผู้ออกแบบจะทำการทดสอบและทดลองเพื่อหาอัตราการให้ความร้อนและประสิทธิภาพการให้ความร้อนของฮีตเตอร์ อัตราการหล่อเย็นและประสิทธิภาพการหล่อเย็น ความหนาและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในแผ่นพลาสติกที่ทำการขึ้นรูปที่ 15 ตัน แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาปรับปรุงแก้ไขให้เครื่องจักรที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

- 5.1.1 เพื่อหาอัตราการให้ความร้อนและประสิทธิภาพการให้ความร้อนของฮีตเตอร์
- 5.1.2 เพื่อหาอัตราการหล่อเย็นและประสิทธิภาพการหล่อเย็น
- 5.1.3 เพื่อศึกษาความหนาและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในแผ่นพลาสติก
- 5.1.4 เพื่อหาค่าไฟในการขึ้นรูปพลาสติก

5.2 สมมติฐานการทดลอง

- 5.2.1 พลาสติกเสริมใยแก้วขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$ มีความหนาเฉลี่ย 2 mm
- 5.2.2 พลาสติกละลายทั้งหมดและซึมผ่านช่องว่างของใยแก้วได้ทั่วถึง และเกิดฟองอากาศขึ้นน้อย

5.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 5.3.1 พลาสติกหนา 0.03mm ขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$ จำนวน 64 แผ่น ต่อหนึ่งการทดลอง
- 5.3.2 ใยแก้วเบอร์ 600 ขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$
- 5.3.3 ชุด data logger
- 5.3.4 เทอร์โมมิเตอร์
- 5.3.5 แคลมป์มิเตอร์
- 5.3.6 ไมโครมิเตอร์
- 5.3.7 กรอบกำหนดขนาด $150 \times 150 \text{ mm}$

5.4 ขั้นตอนการทดลอง

5.4.1 ตอนที่ 1 การจัดเตรียมวัตถุดิบในการขึ้นรูป

ในกระบวนการการขึ้นรูปพลาสติกนี้ต้องการพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) ผสมกับไฟเบอร์กลาสที่มีพื้นที่ $15 \times 15 \text{ mm}^2$ มีความหนารวม 2 mm โดยอัตราส่วนระหว่างพลาสติกและไฟเบอร์กลาสคือ 70 ต่อ 30 ในส่วนของพลาสติกนั้นมีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีความหนา 0.03 mm จึงต้องใช้พลาสติกจำนวน 64 แผ่นและไฟเบอร์กลาสจำนวน 1 แผ่นนำมาจัดเรียงซ้อนกันในลักษณะ

Sandwich ลงไปในกรอบ)Picture Frame) โดยให้ไฟเบอร์กลาสอยู่ตรงกลางระหว่างพลาสติกโดยแบ่งพลาสติกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนละ 32 แผ่น

5.4.2 ตอนที่ 2 การนำวัสดุติดเข้าสู่แม่พิมพ์

หลังจากเตรียมวัสดุติดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำวัสดุติดเข้าสู่แม่พิมพ์โดยแม่พิมพ์ขนาด 400×400 mm² ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือประกอบไปด้วยแผ่นบนและแผ่นล่างโดยทั้งสองแผ่นมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กหนา 40 mm ในส่วนของแผ่นบนจะติดกับหัวเพลลาที่เชื่อมต่อกับกวดไฮดรอลิกและมีแผ่นเหล็กเสริม 2 แผ่น มีความหนาแผ่นละ 5 mm มีลักษณะเป็นชั้นบันไดเพื่อช่วยเสริมในการรับแรงจากหัวกวด ในการกดอัดของหัวไฮดรอลิกเพื่อให้แม่พิมพ์ทั้งสองประกบติดกันเพื่อที่จะอัดพลาสติกในการขึ้นรูปนั้นจะกดอัดภายใต้แรงดัน 15 ton (0.92 MPa) อีกทั้งในส่วนของภายในแม่พิมพ์จะมีท่อลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 15×15 mm ยาว 2.92 m เพื่อใช้ในการหล่อเย็นหลังจากให้ความร้อนจากการขึ้นรูป

5.4.3 ตอนที่ 3 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

1. หลังจากกดอัดแม่พิมพ์ด้วยแรงกดจากไฮดรอลิกแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ทั้งสองโดยอุณหภูมิสูงสุดในการทดลองคือ 250°C ในการให้ความร้อนจะใช้ฮีตเตอร์ชนิดแท่งเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 11 mm ความยาว 200 mm มีขนาด 840 W จำนวน 11 แท่ง นำมาใส่ในตัวของแผ่นเหล็ก โดยแผ่นเหล็กแผ่นบนซึ่งมีความหนาที่มากกว่าแผ่นเหล็กแผ่นล่างจะใช้ฮีตเตอร์แท่งจำนวน 6 แท่งและแผ่นเหล็กแผ่นล่างใช้ฮีตเตอร์แท่งจำนวน 5 แท่ง ซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิทั้งหมด 4 ค่าอุณหภูมิได้แก่ 170°C , 180°C , 190°C และ 200°C และทำการกดแม่พิมพ์ค้างไว้หลังจากที่ค่าอุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ในเวลา 1 นาที, 3 นาที, 5 นาที และ 7 นาที ตามลำดับซึ่งในทดลองจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง

2. บันทึกผลการทดลองด้วย data logger ซึ่งแสดงค่าออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

3. คำนวณหาค่าอัตราการให้ความร้อนและประสิทธิภาพการให้ความร้อนของฮีตเตอร์

5.4.4 ตอนที่ 4 การหล่อเย็นแม่พิมพ์ (Cooling)

1. ในการหล่อเย็นแม่พิมพ์จะใช้น้ำเปล่าในการหล่อเย็นแม่พิมพ์โดยใช้ปั๊ม ปั๊มน้ำจากถังขนาด 50 ลิตรผ่านท่อเหล็กเข้าสู่ท่อภายในของแม่พิมพ์เพื่อทำการหล่อเย็นโดยอัตราการไหลของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.178 kg/s ในการหล่อเย็นนั้นจะทำการลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้เหลือ 50°C

2. บันทึกผลการทดลองด้วยเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำก่อนหล่อเย็นและหลังหล่อเย็น พร้อมจับเวลาตลอดการหล่อเย็น

3. คำนวณหาค่าอัตราการหล่อเย็นและประสิทธิภาพการหล่อเย็น

5.4.5 ตอนที่ 5 การหาเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศและความหนาของพลาสติกหลังการอัดขึ้นรูป

หลังจากขึ้นรูปพลาสติกเสร็จเรียบร้อยแล้วขั้นตอนการหาเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวพลาสติกโดยขั้นแรกคือนำพลาสติกหลังการทดลองมาถ่ายรูปในกล่องลูกบารักสีเหลี่ยม จากนั้นนำรูปถ่ายมาสใช้ควบคู่กับโปรแกรม image J ช่วยเพื่อแยกความแตกต่างที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวของพลาสติก ขั้นตอนต่อมาคือการหาความหนาของพลาสติกหลังการอัดขึ้นรูปโดยตัดแผ่นพลาสติกให้มีขนาด 20×20 mm² จำนวน 5 ชิ้น จากนั้นวัดความหนาโดยใช้ไมโครมิเตอร์แล้วจึงนำค่าความหนาทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละแผ่นของการทดลอง

5.4.6 ตอนที่ 6 การหาค่าไฟที่ใช้ในแต่ละขบวนการ

ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการใช้ไฟของแต่ละอุปกรณ์ทดลองเช่น ฮีตเตอร์, บั้มและตัวควบคุมอุณหภูมิ การใช้ไฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นใช้ไฟ 1 เฟส ไฟในกระบวนการอัดขึ้นรูปนั้นจะใช้นการคิดค่า(แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) ในการวัดกระแสไฟจากนั้นจะได้ค่ากำลังไฟฟ้า

5.5 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ ครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ กดขึ้นรูป (นาที)	เปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ (%)		
		ด้านหน้า	ด้านหลัง	เฉลี่ย
170	1	0.47	1.19	0.83
	3	0.24	2.15	1.20
	5	3.91	3.21	3.56
	7	2.73	6.32	4.53
180	1	0.28	2.07	1.18
	3	5.20	11.08	8.14
	5	1.34	2.67	2.01
	7	1.91	4.49	3.20
190	1	3.09	1.95	2.52
	3	2.73	0.28	1.51
	5	9.58	10.24	9.91
	7	3.97	9.21	6.59
200	1	3.25	3.77	3.51
	3	4.28	4.76	4.52
	5	4.47	9.86	7.17
	7	6.69	4.84	5.77

ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ ครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ กดขึ้นรูป (นาที)	เปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ (%)		
		ด้านหน้า	ด้านหลัง	เฉลี่ย
170	1	8.40	5.57	6.99
	3	4.56	1.15	2.86
	5	3.73	7.73	5.73
	7	0.56	2.52	1.54
180	1	1.39	3.87	2.63
	3	6.12	9.75	7.94
	5	2.94	9.14	6.04
	7	1.86	3.69	2.78
190	1	2.86	3.92	3.39
	3	6.94	4.00	5.47
	5	1.86	1.14	1.50
	7	1.39	2.36	1.88
200	1	1.86	2.50	2.18
	3	2.88	3.13	3.01
	5	2.87	3.15	3.01
	7	1.13	2.26	1.70

ตารางที่ 5.3 ตารางบันทึกผลการทดลองวัดความหนา ครั้งที่ 1

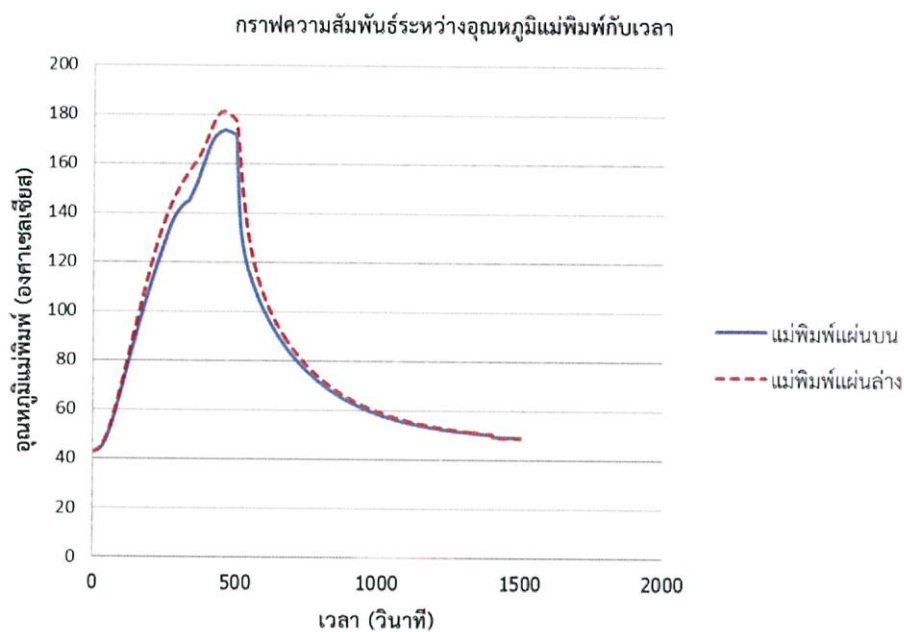
อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ กดขึ้นรูป (นาท)	ความหนา (mm)					
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	เฉลี่ย
170	1	1.87	1.94	1.97	1.89	2.03	1.94
	3	1.89	1.81	1.97	2.04	1.90	1.92
	5	1.87	1.91	1.89	1.86	1.97	1.90
	7	1.83	1.86	1.92	1.94	1.91	1.89
180	1	1.95	1.91	2.02	2.06	1.95	1.98
	3	1.96	2.01	1.98	1.79	2.04	1.96
	5	1.94	1.87	1.96	1.98	2.04	1.96
	7	1.96	1.92	2.00	1.89	1.85	1.92
190	1	1.97	1.96	2.01	1.96	2.04	1.99
	3	1.90	1.87	2.00	1.84	1.96	1.91
	5	1.96	1.96	1.94	1.82	1.76	1.89
	7	1.97	1.95	1.88	1.87	1.91	1.92
200	1	1.88	1.92	1.87	1.89	1.96	1.90
	3	1.91	1.87	1.95	1.94	1.95	1.92
	5	1.76	1.81	1.87	1.91	1.87	1.84
	7	1.77	1.80	1.86	1.89	1.95	1.85

ตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองวัดความหนา ครั้งที่ 2

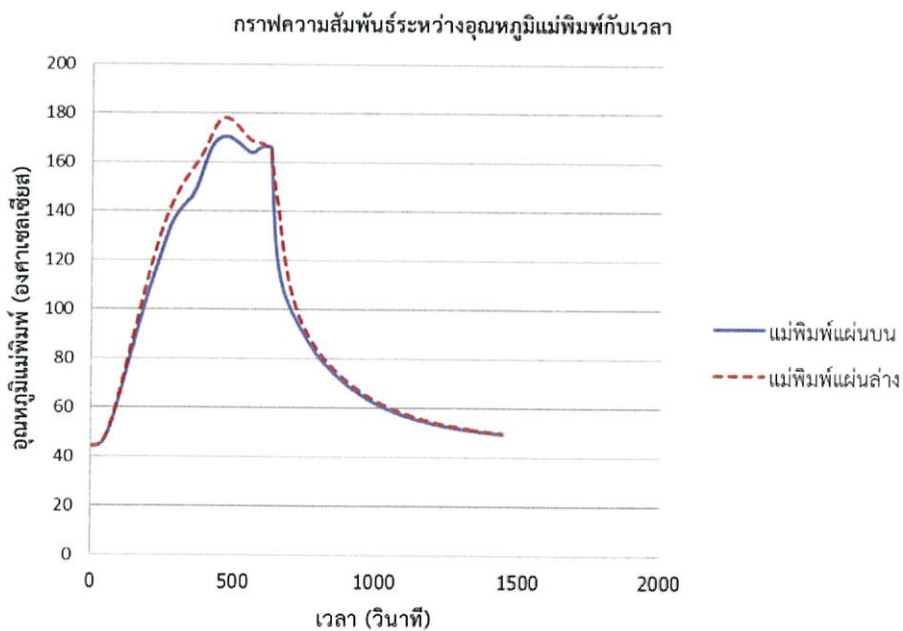
อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ กดขึ้นรูป (นาที)	ความหนา (mm)					
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	เฉลี่ย
170	1	1.81	1.95	1.93	1.86	1.96	1.90
	3	1.96	1.89	1.93	1.97	2.09	1.97
	5	1.95	1.92	2.10	2.15	1.85	1.99
	7	1.90	1.99	1.93	1.95	1.98	1.95
180	1	1.87	1.85	1.86	2.01	2.11	1.94
	3	1.85	1.84	1.91	1.88	1.96	1.89
	5	1.95	1.92	1.94	1.91	1.77	1.90
	7	1.77	1.86	1.76	1.80	1.91	1.82
190	1	1.78	1.84	1.95	1.78	1.92	1.85
	3	1.86	1.80	1.70	1.84	1.99	1.84
	5	1.86	1.85	1.87	1.95	1.97	1.90
	7	1.80	1.90	1.89	1.89	2.06	1.91
200	1	1.93	1.89	1.87	1.95	1.96	1.92
	3	1.63	1.74	1.81	1.84	1.91	1.79
	5	1.78	1.94	1.89	1.83	1.83	1.85
	7	1.79	1.78	1.94	1.86	1.84	1.84

ตารางที่ 5.5 ค่าไฟที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิแม่พิมพ์

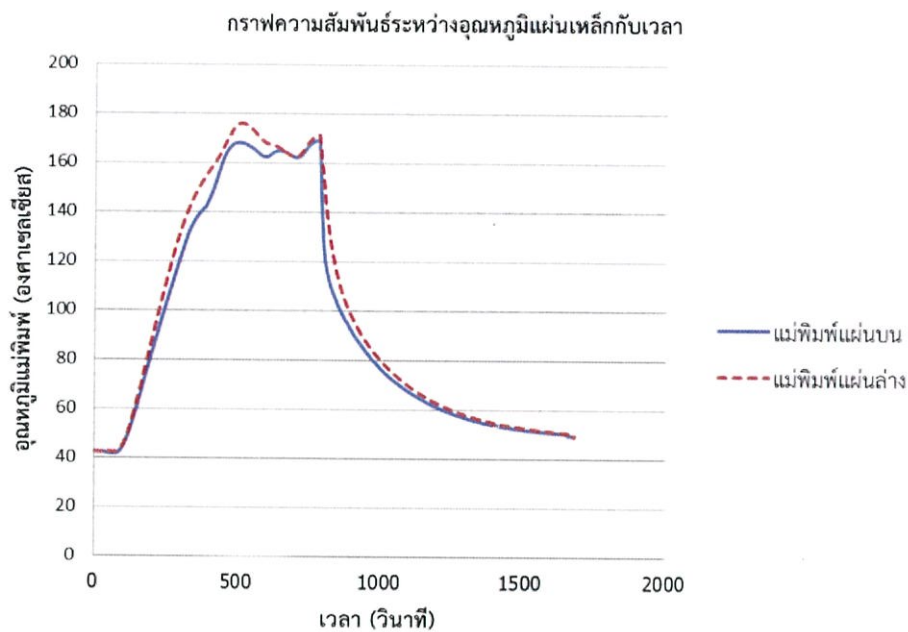
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	ค่าไฟ (บาท)
170	4.59
180	5.12
190	5.57
200	6.13



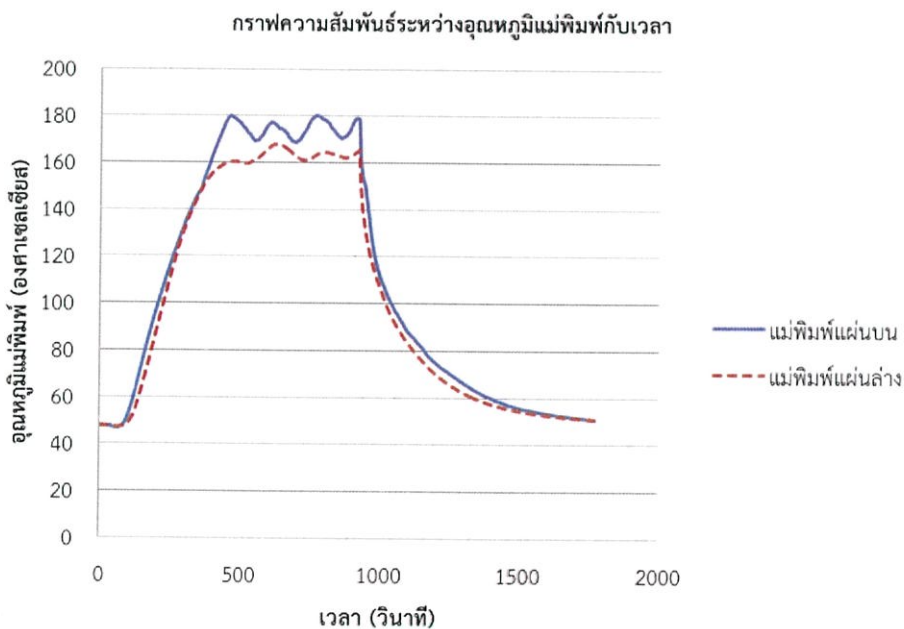
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 170 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 1 นาที



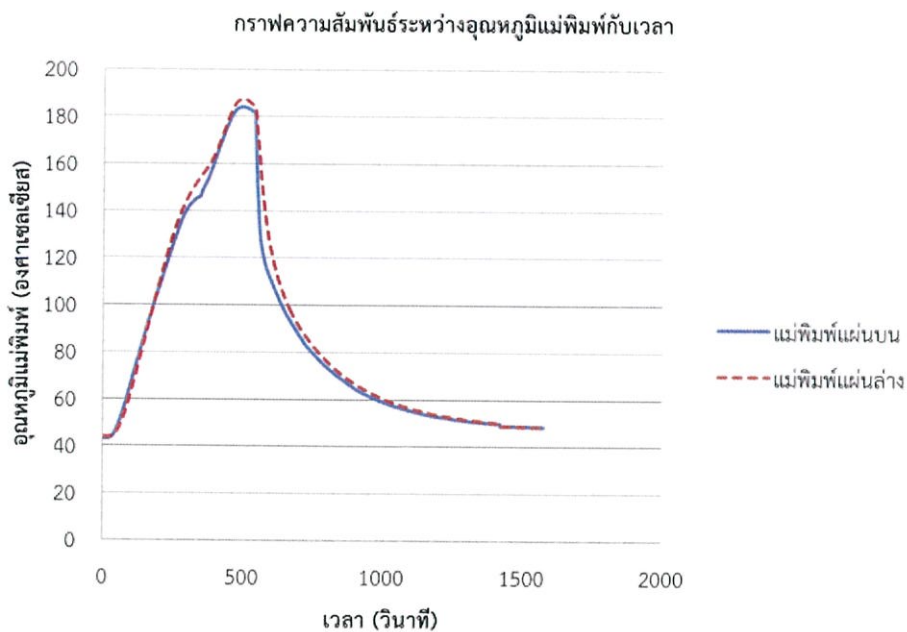
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 170 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 3 นาที



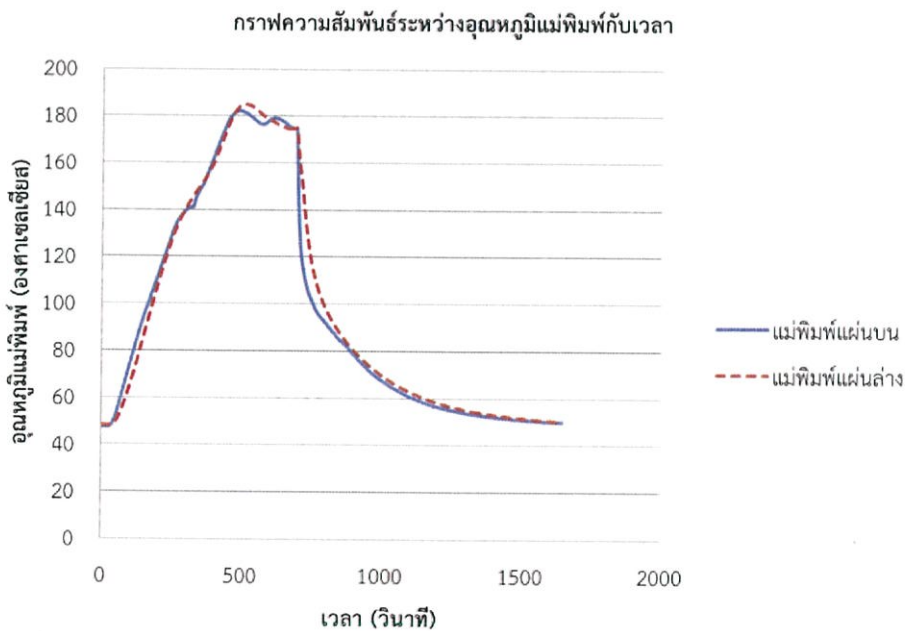
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 170 องศาเซลเซียส และกวดค้างไว้ที่ 5 นาที



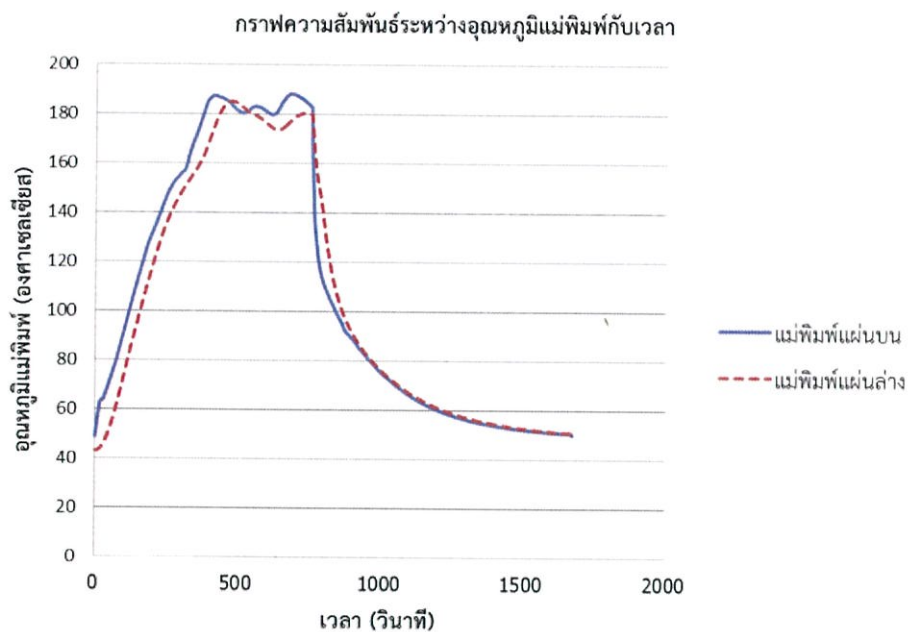
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 170 องศาเซลเซียส และกวดค้างไว้ที่ 7 นาที



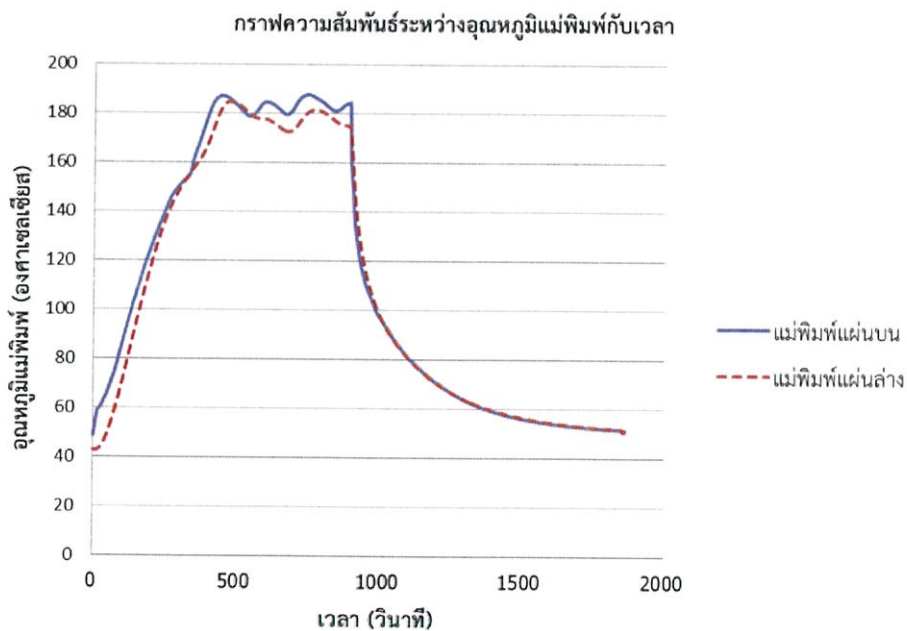
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 180 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 1 นาที



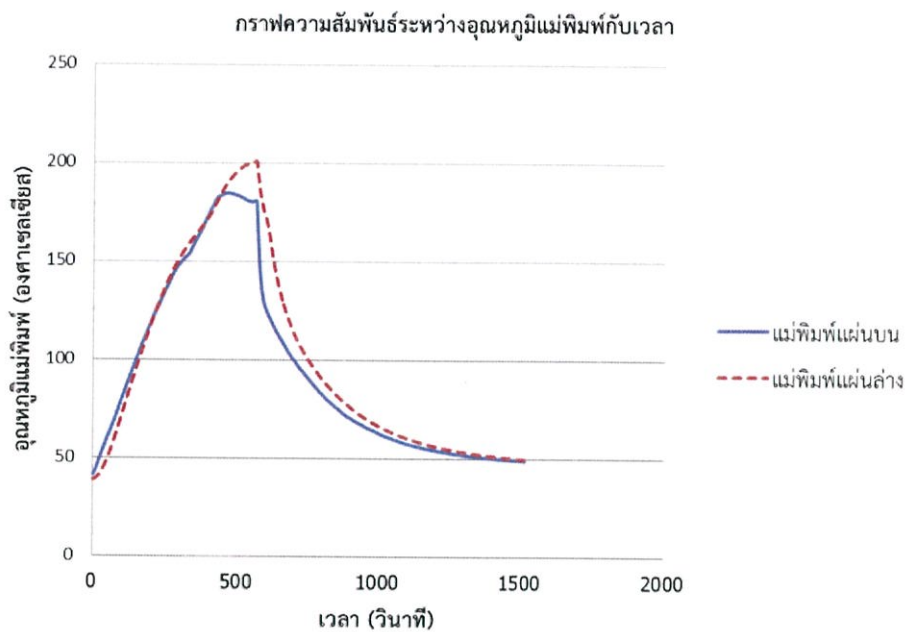
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 180 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 3 นาที



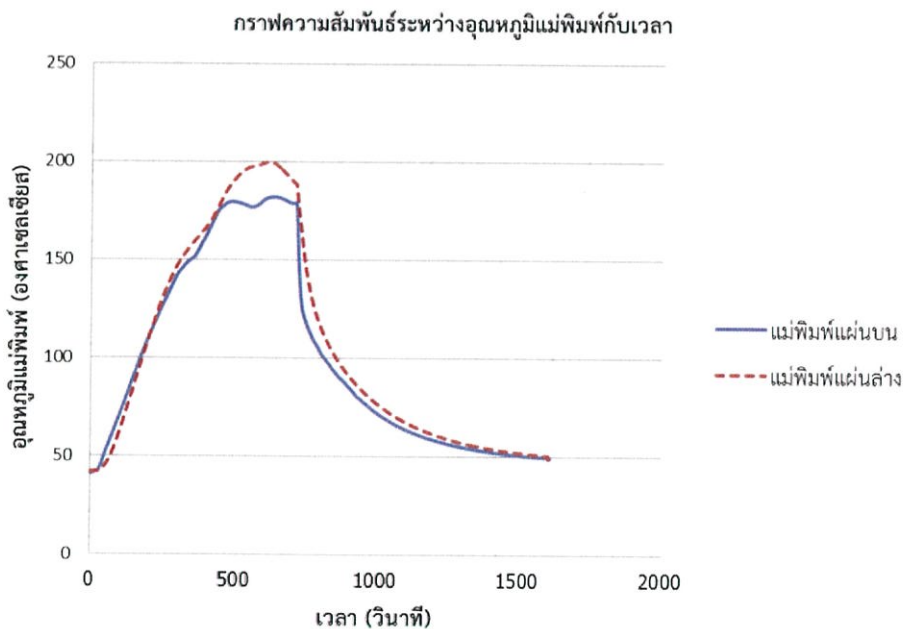
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 180 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 5 นาที



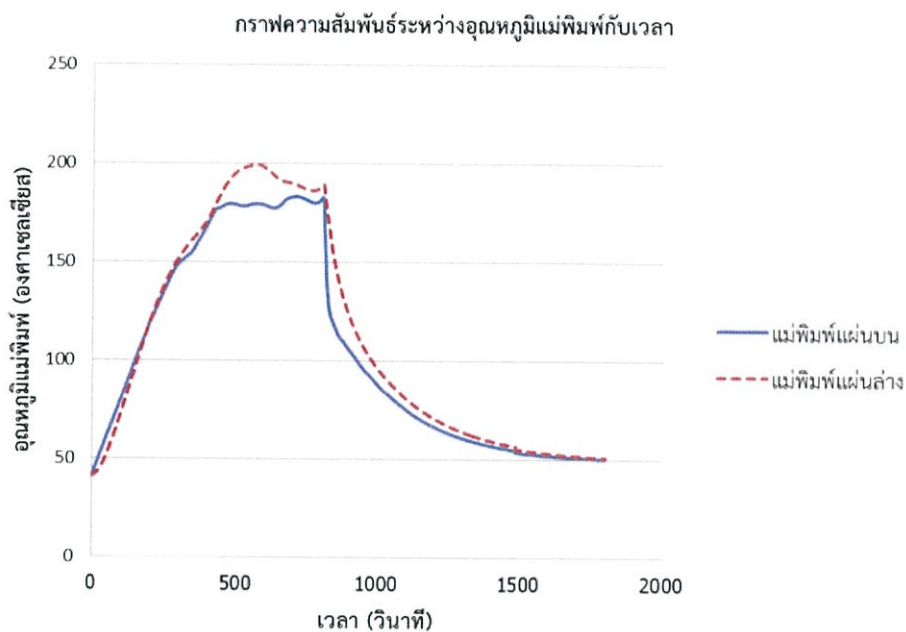
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 180 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 7 นาที



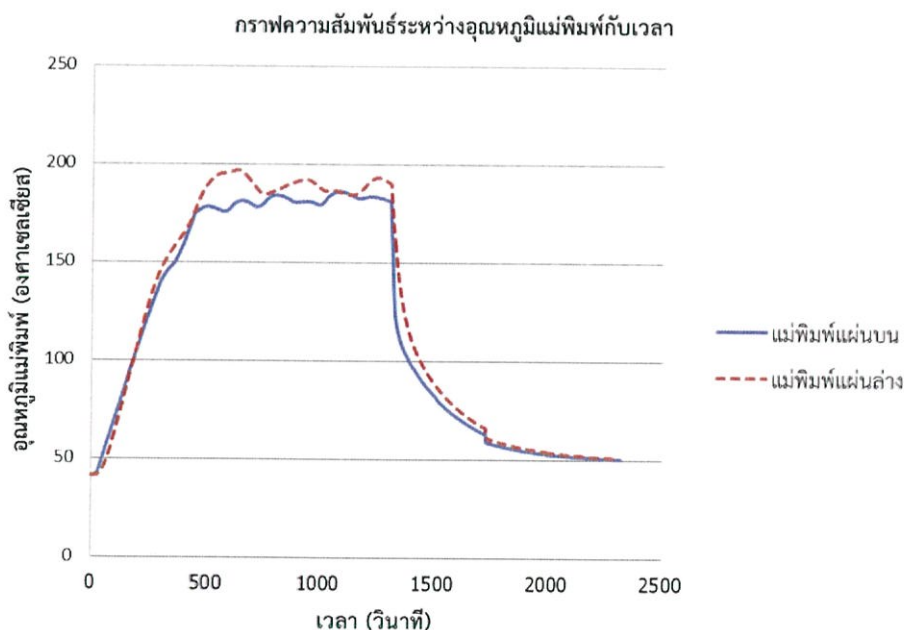
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 190 องศาเซลเซียส และกวดค้างไว้ที่ 1 นาที



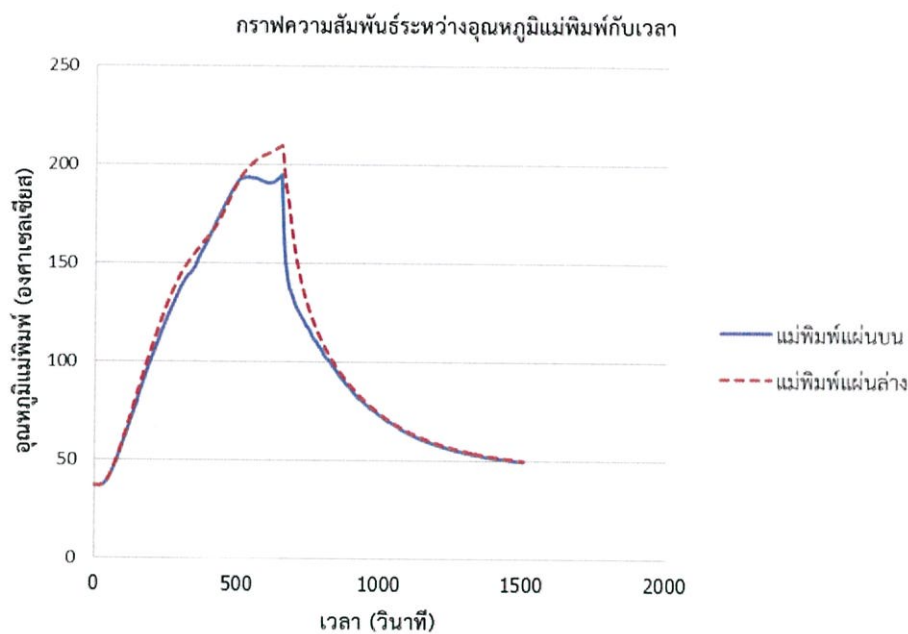
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 190 องศาเซลเซียส และกวดค้างไว้ที่ 3 นาที



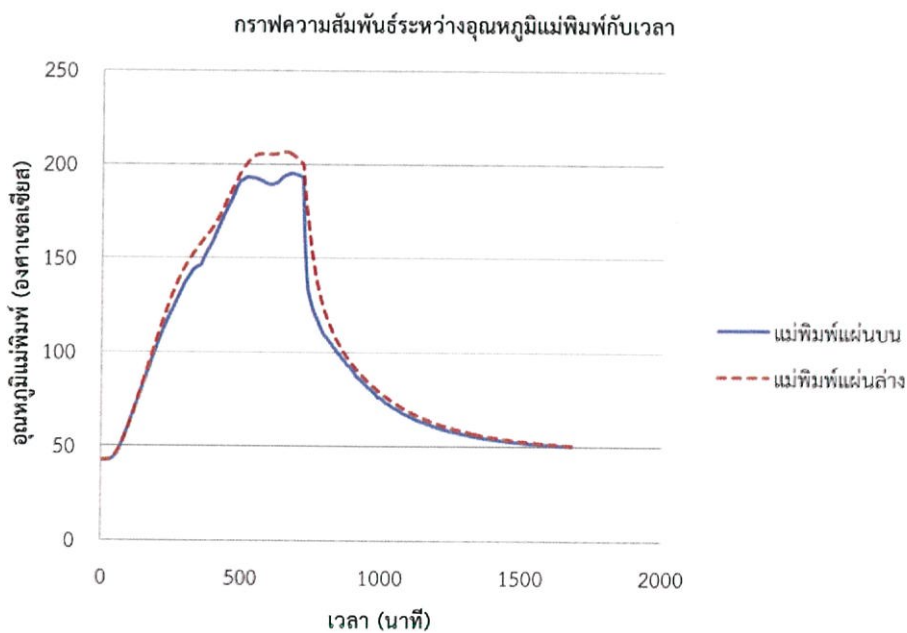
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 190 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 5 นาที



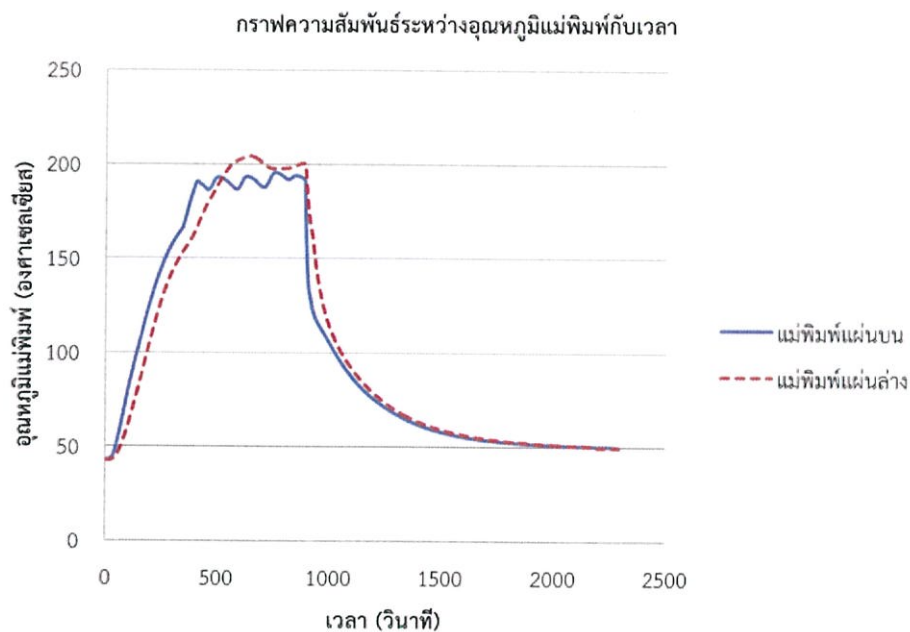
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 190 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 7 นาที



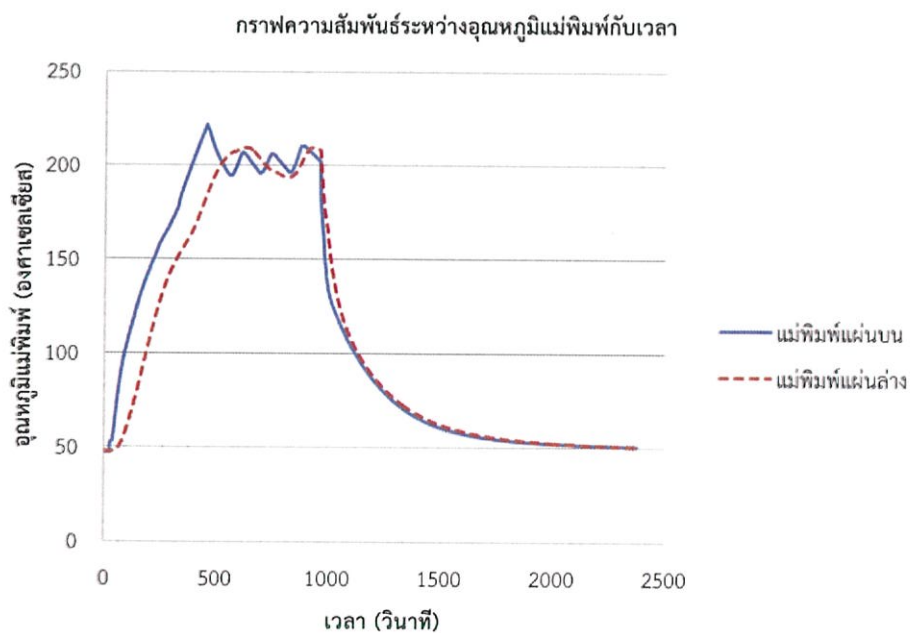
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 200 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 1 นาที



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 200 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 3 นาที



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 200 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 5 นาที



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงสุด 200 องศาเซลเซียส และกีดค้างไว้ที่ 7 นาที

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุปผล

6.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยแรงกดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก ในส่วนของการให้ความร้อนโดยฮีตเตอร์แท่งมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ถึง 54-69 % ในช่วงอุณหภูมิ 170-200 °C เนื่องจากฮีตเตอร์แท่งที่อยู่ในแผ่นเหล็กอาจมีช่องว่างที่เหลื่ออยู่ทำให้ไม่สามารถให้ความร้อนได้อย่างเต็มที่ ส่วนขั้นตอนการหล่อเย็นแม่พิมพ์อัตราการหล่อเย็นในช่วง 3 นาทีแรกมีอัตราการหล่อเย็น 30-37 °C/min และหลังจาก 3 นาทีเป็นต้นไปมีอัตราการหล่อเย็น 3-5 °C/min ในด้านประสิทธิภาพในการหล่อเย็นแม่พิมพ์เท่ากับ 62.05 % ในส่วนของช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการอัดขึ้นรูปเกิดจากอากาศและไอน้ำติดอยู่ขณะอัดขึ้นรูปก่อนพลาสติกละลายซึ่งแรงอัดจากไฮดรอลิกไม่สามารถไล่ออกไปได้ ด้านของความหนาพลาสติกโดยเฉลี่ยพบว่าสามารถควบคุมความหนาได้โดยการกำหนดค่าอุณหภูมิและค่าไฟที่ใช้ในกระบวนการคือ 4-6 บาทต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติกในแต่ละรอบซึ่งพบว่าแผ่นที่บางกว่าจะเสียค่าใช้จ่ายในการอัดขึ้นรูปที่สูงกว่า

6.2 วิจัยรณัผลการทดลอง

1. มีบางบริเวณของแม่พิมพ์แผ่นบนที่ความร้อนจากฮีตเตอร์ไปไม่ถึงทำให้พลาสติกที่สัมผัสในบริเวณนั้นไม่ละลายถ้าอุณหภูมิไม่สูงมากพอ
2. ตัวคอนโทรลเลอร์มีค่าเออเร่อในการอ่านค่าจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งค่าเออเร่อมีค่าประมาณ 6-7 °C
3. ในระบบหล่อเย็นน้ำจากอุณหภูมิห้องไม่เพียงพอต่อการหล่อเย็นเนื่องจากท่อน้ำเพื่อหล่อเย็นมีขนาดใหญ่กว่าตอนแรก จึงต้องมีการนำน้ำร้อนจากการหล่อเย็นในตอนแรกนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้การหล่อเย็นแม่พิมพ์ใช้เวลานานขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการปรับปรุง

1. ปรับเปลี่ยนช่องของแม่พิมพ์แผ่นบนให้มีการวางของชุดให้ความร้อน ให้ทั่วถึงเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะให้วัสดุเกิดอาการหลอมเหลวได้ดีขึ้น
2. ต้องมีการจูนค่า PID ของตัวคอนโทรลเลอร์ใหม่เพื่อให้ค่าเออเร่อที่อาจจะเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง
3. ปรับเปลี่ยนถังเก็บน้ำให้มีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะไม่ต้องใช้น้ำที่ผ่านการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์นำกลับมาใช้ใหม่และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเย็นแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จุฑารัตน์ ทะสระระ. 2552. การนำความร้อนที่สภาวะคงตัว, หน้า 29
- ชาวสวน กาญจน์มัย. 2549. กลศาสตร์วัสดุ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 25-33
- ดรชณี พัทธวรากร. 2550. “กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกเบื้องต้น.” หน้า 5, 11. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน. 2548. กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น. หน้า 2-4.
- พิรณัฐ ภูมิร, พิระสิทธิ์ ลาไป, การุณต์ มะหะหมัดยูซบและนายนพดล ผลมีทรัพย์. 2554. เครื่องทดสอบการสูญเสีย ความดันในการไหลผ่านท่อ, ครงงาสาขาวิชาเครื่องกล สาขา งานเทคนิคยานยนต์ วิทยาลัยเทคโนโลยี ภาคตะวันออก (อี.เทค), หน้า 20-23.
- สุวิทย์ โวแสง, พงศกร กองสำลี, จักรพงษ์ ภูครองนาค, ธนากร ศรีพินนา, ส่งเสริม ดาวเรืองรัมย์ และ ชาญณรงค์ สุภา. 2548. การจำแนกประเภทของวัสดุผสม.
- สมเจตน์ พัชรพันธ์. 2552. ข้อบกพร่องในชิ้นงานพลาสติก ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป:สาเหตุและ แนวทางการแก้ไข. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.
- Daive S.A. De Focatiis. 2012. Tooling for near net-shape compression molding of polymer specimens Polymer Testing, Volume 31, Issue 4, Pages 550–556
- D. DeWayne Howell, Scott Fukumoto. “Compression molding of long chopped fiber thermoplastic composite.” journal of Composites.
- Feng Qiu, Yongbo Hao, Xiaoyun Li, Bo Wang. 2014. “Functionalized grapheme sheets filled isotactic polypropylene nanocomposites.” journal of composites 2014(27): 1359-8368.
- M.D. Wakeman*, T.A. Cain, C.D. Rudd, R. Brooks, A.C. Long. 1999 “Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimized macro- and micro- mechanical properties.” journal of Composites Science and Technology 1999(59): 1153-1167.
- S.M. Luz , A.R. Gonç,alves , A.P. Del’Arco Jr. 2007. “Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fiber reinforced polypropylene composites.” journal of composites 2007(38): 1455–1461.

- Usa Somnuk, Wandee Thomtong, Nitinat Suppakarn, Wimonlak Sutapun and Yupaporn Ruksakulpiwat. 2006. **An investigation on using vetiver grass in polypropylene composite**, journal of Polymer Engineering, pp. 4.
- Yoav Peles. 1998. **Internal Forced Convection**. Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering Rensselaer Polytechnic Institute, pp. 27.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางที่ใช้ในการคำนวณ

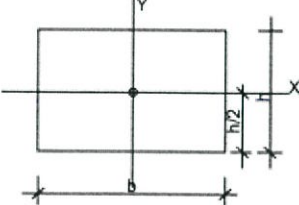
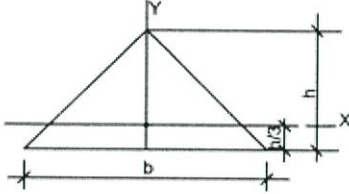
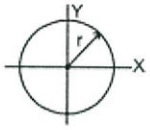

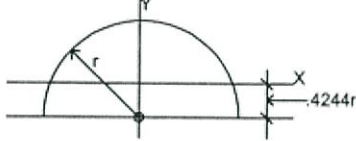
ตารางที่ ก.1 ค่าความขรุขระของวัสดุบางชนิด

Material (new)	Roughness (ϵ)	
	ft	m
Riveted ท่อเหล็กที่ย้ำด้วยหมุด	0.003-0.03	0.0009-0.009
Concrete ท่อคอนกรีต	0.001-0.01	0.0003-0.003
Wood stave ท่อไม้	0.0006-0.003	0.0002-0.0009
Cast iron ท่อเหล็กหล่อ	0.00085	0.00026
Galvanized iron ท่อเหล็ก อาบสังกะสี	0.0005	0.00015
Commercial steel or wrought iron ท่อเหล็กกล้า หรือท่อเหล็กเหนียว	0.00015	0.000046
Drawn brass or copper tubing ท่อที่ได้จากการรีด	0.000005	0.0000015

ตารางที่ ก.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง (K) ของวาล์วและข้อต่อต่าง ๆ

ที่	ชนิดของวาล์วและข้อต่อ	ค่า K
1	Globe Valve เปิดเต็มที	10
2	Angle Valve เปิดเต็มที	2
3	Gate Valve เปิดเต็มที	0.15
4	บอลวาล์ว (Ball Valve)	0.05
5	ข้องอ (elbow) 45 องศา	0.35
6	ข้องอ (elbow) 90 องศา	0.75
7	สามทาง (Tee joint)	1.9
8	ข้อโค้งกลับ (Return bend)	1.5
9	ตัวกรอง (Basket Strainer)	1.3

ตารางที่ ก.3 การหาโมเมนต์ภายในชิ้นส่วนโครงสร้าง (Moment of Inertia) (Onouye and Kane, 2002)

Shape	Moment of Inertia (I_x)
	$I_x = \frac{bh^3}{12}$
	$I_x = \frac{bh^3}{36}$
	$I_x = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi d^4}{64}$
	$I_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$
	$I_x = r^4 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi} \right) = 0.11r^4$

ตารางที่ ก.4 ค่า tensile strength ของวัสดุ

Material	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Density (g/cm ³)
Structural steel ASTM A36 steel	250	400	7.8
Mild steel 1090	248	841	7.58
AISI 4130	951	1110	7.85
Steel, API 5L X65	448	531	7.8
Steel high strength alloy ASTM A514	690	760	7.8
Polypropylene	12-43	19.7-80	0.91

ตารางที่ ๓.5 Thermophysical properties of water

Temperature, T (K)	Pressure, p (bars) ^a	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, h_{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)		Prandtl Number		Surface Tension, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Expansion Coefficient, $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperature, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385
390	1.794	1.058	0.980	2212	4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841	390
400	2.455	1.067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896	400
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952	410
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010	420
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2		430

Temperature, T (K)	Pressure, p (bars) ^b	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, h_{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)		Prandtl Number		Surface Tension, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Expansion Coefficient, $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperature, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	—	440
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9	—	450
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	—	460
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	—	470
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	—	480
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	33.9	—	490
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	—	500
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	—	510
520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	—	520
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	—	530
540	52.38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	—	540
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	—	550
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	—	560
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	—	570
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	12.8	—	580
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	1.05	1.84	10.5	—	590
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	1.14	2.15	8.4	—	600
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	103	1.30	2.60	6.3	—	610
620	159.1	1.705	0.0094	941	9.35	15.4	72	25.9	444	114	1.52	3.46	4.5	—	620
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	121	1.65	4.20	3.5	—	625
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	2.6	—	630
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392	141	2.7	6.0	1.5	—	635
640	202.7	2.075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	155	4.2	9.6	0.8	—	640
645	215.2	2.351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	178	12	26	0.1	—	645
647.3 ^c	221.2	3.170	0.0032	0	∞	∞	45	45.0	238	238	∞	∞	0.0	—	647.3 ^c



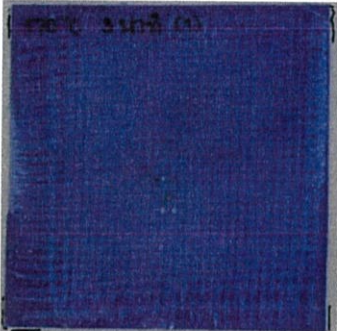
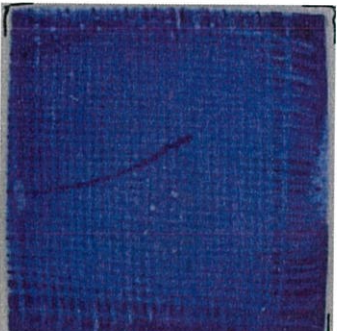




^aAdapted from Reference 22.

^b1 bar = 10⁵ N/m².




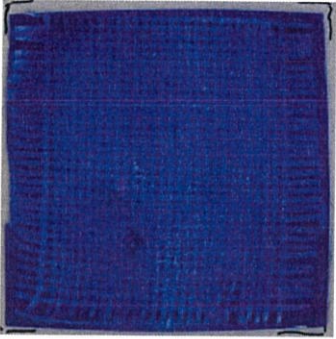




^cCritical temperature.

ภาคผนวก ข. วัสดุผสมที่ได้จากการทดลอง






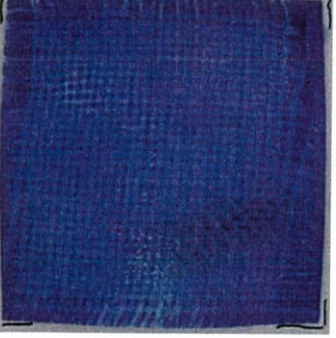
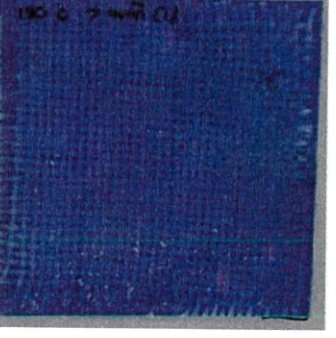

ตารางที่ ข.1 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 170 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

เวลาตกค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		






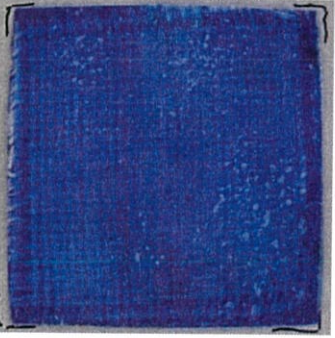


ตารางที่ ข.2 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 170 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

เวลาตกค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		

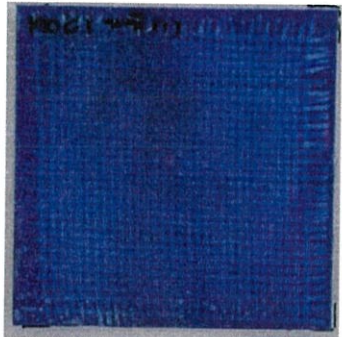
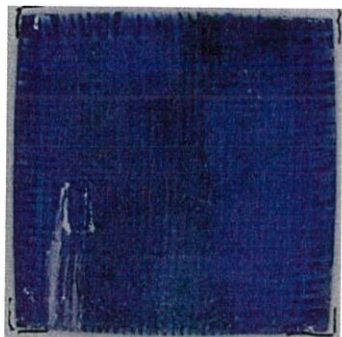
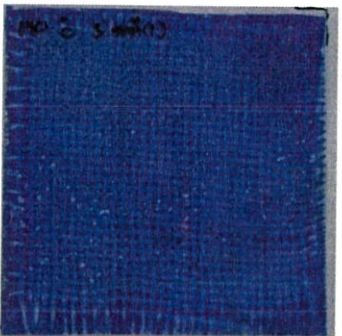





ตารางที่ ข.3 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 180 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

เวลาตกค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		




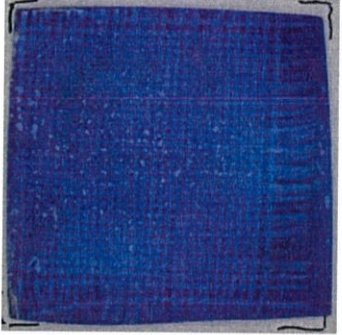

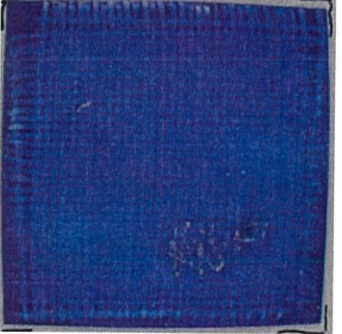
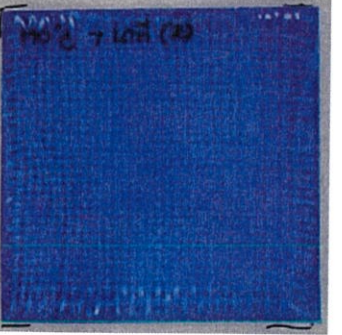
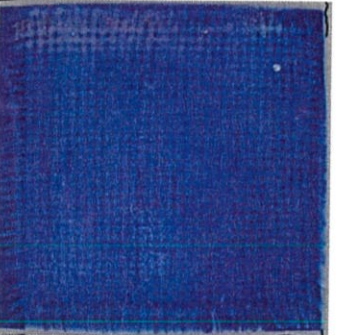
ตารางที่ ข.4 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 180 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

เวลาตกค้าง (นาทีก)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		




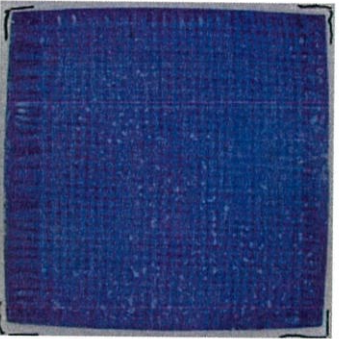




ตารางที่ ข.5 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 190 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

เวลาตกค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1	 <p>Handwritten text: 190°C 1 นาที</p>	
3	 <p>Handwritten text: 190°C 3 นาที</p>	
5	 <p>Handwritten text: 190°C 5 นาที</p>	
7	 <p>Handwritten text: 190°C 7 นาที</p>	






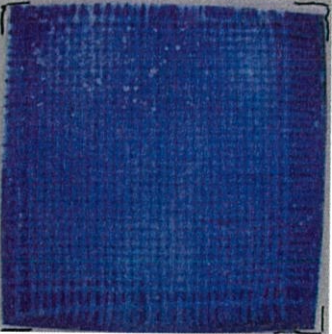


ตารางที่ ข.6 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 190 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

เวลากดค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		

ตารางที่ ข.7 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 200 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

เวลาตกค้าง (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		

ตารางที่ ข.8 รูปวัสดุผสมจากการทดลองอุณหภูมิแม่พิมพ์ 200 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

เวลากดค้ำ (นาที)	วัสดุผสมด้านหน้า	วัสดุผสมด้านหลัง
1		
3		
5		
7		

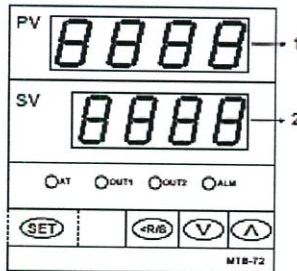
Digital Temperature Controller

MTB Serials

User Manual

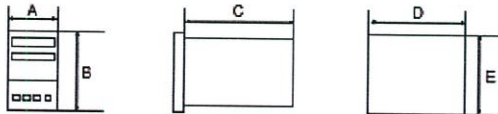
Thank you for purchasing our products, please read this manual before using and keep this manual for future reference

1:Panel description



Number	Symbol	Description
1	PV	Process Value
2	SV	Setting Value
Refer to left figure		Function Key Enter/Arrow parameters
Refer to left figure		Shift Key
Refer to left figure		Decrease Key
Refer to left figure		Increase Key
Refer to left figure	AT	Indicator for Auto-Tuning
Refer to left figure	OUT1	output 1 indicator
Refer to left figure	OUT2	output 2 indicator
Refer to left figure	ALM	Alarm indicator

2:Mounting and Size

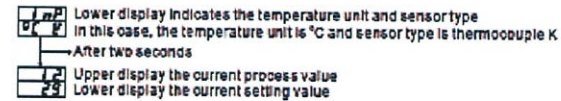


ITEM NO	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)
MTB-96	96	96	70	91.5	91.5
MTB-72	72	72	92	67.5	67.5
MTB-49	48	96	70	45	91.5
MTB-45	48	48	78	45	45
MTB-94	96	48	70	91.5	45

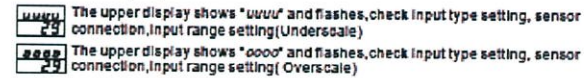
3:Power on self-check

3.1:Sensor type and temperature unit display

This unit will perform self-check after power on, and it will display some symbols as following charts



3.2:Error Display



4:Run or stop the program

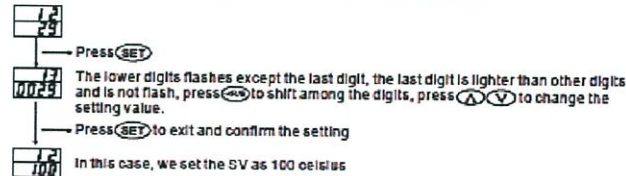
It is possible to Run/Stop the controller during the operation, when the upper display shows PV and Lower display shows SV, press for more than three seconds can stop the program press again for more than three seconds can run the program.



5:Setting and configuration

5.1:Setting Value(SV) configuration

Setting value can only be configured when temperature shows PV in the upper display and SV in the lower display, follow below steps to set the setting value

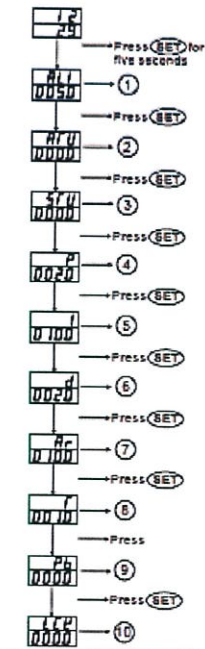


5.2:Field parameters table and settings can be done within this level

There are three level of parameters table within the software menu of this controller, each level of parameters table contains various parameters, user have to access to different level to configure the parameters, below charts shows the sequence of different parameters that are displayed within field parameters table, go through the charts will help you pinpoint the exact parameters to be modified to execute different functions.

At PV/SV status, press for at least three seconds to access field parameters level, details refer to below charts.

Field parameters level



Parameters are numbered from 1 to 10, and each of them define some function or settings, see below details setting guide for parameters ① to ⑩.

- ① **AL**—this parameter defines the value for alarm, for example if the alarm mode is deviation high alarm, setting value is 100C, alarm value is 20C, means the alarm will be triggered when temperature reach to 120C. press **SET** can modify the value.
- ② **AF**—This is a auto-tuning switch parameter, modify the value to '1' will perform the auto-tuning and '0' will terminate the auto-tuning
- ③ **ST**—Function disabled
- ④ **P**—This is proportional band value for PID action, normally the value will be set automatically via auto-tuning function, but also can be set manually to have better control result
- ⑤ **I**—This is integral time value for PID action, normally the value will be set automatically via auto-tung function, but also can be set manually to have better control result.
- ⑥ **d**—This parameter defines the deviation time value for PID action, can be set automatically via auto-tuning process or manually.
- ⑦ **Rr**—This is a anti-reset windup parameters, overshoot or under-shoot are restricted by the integral effect.
- ⑧ **f**—Cycle time for control
- ⑨ **Pb**—PV bias value, this parameter can compensate display deviation, the display(PV)= Measuring value+/- PV Bias can be positive or negative number, for example can be 10C or -10C.
- ⑩ **LCK**—This a data lock value parameters, there are some parameter within the controller is very sensitive to the integral and accuracy of the system, therefore, those parameters should not be modified by mistake or by unauthorized personal, the data lock can prevent unauthorized personal access to certain parameter and therefore will prevent parameters be modified by mistake.

Press **SET** at any time of during the setting can save the modification and exit to PV/SV status

See below table 1 for the range and default value of field parameters.(Table 1)

Symbol	Name	Range	Factory default
AL	Alarm value	-1999 to 9999	50/50.0
AF	auto-tuning switch	0 or 1	0
ST	not applicable	not applicable	not applicable
P	Proportional band	0-9999 or 0.1-999.9	15/15.0
I	Integral time	1-3600 S	40
d	deviation time	1-3600 S	20
Rr	anti-reset windup	0-100%	25
f	cycle time	1-100S	20/2
Pb	PV Bias	-1999 to 1999/-199.9 to 999.9	0
LCK	Data Lock	See table 2	0000

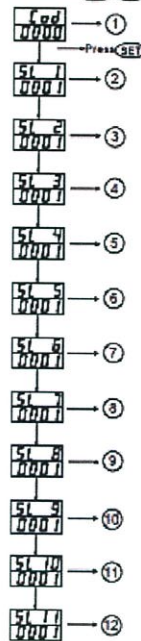
Data Lock Details (Table 2)

Lock value	Protection	Lock value	Protection
0000	SV and all parameters can be modified	0011	Only SV can be modified
0001	Only SV and alarm value can be modified	0101	Only alarm value can be modified
0010	All parameters except alarm can be modified	0110	All parameters can be modified except SV and alarm
0100	All parameters except SV can be modified	0111	All parameters are locked

5.3: System parameters level 1

Go to field parameters level and shift to parameter "LOCK", change the lock value to "1000" and press **SET** to save and exit the field parameters table. Press **SET** at the same time can access to system parameters level 1, please note whenever press **SET** at the same time means press **SET** first, and followed with **SET**, because these two keys are not possible to be pressed at exactly the same time and have to follow the sequence that press **SET** first and **SET** followed to make sure this two keys are pressed for more than 3 seconds, following charts for details of system parameters level 1

Change the lock value to "1000"
Press the **SET** at the same time. Press **SET** to shift between parameters



- ① **Lcd**—system parameter level code, "0000" means system parameters level 1
- ② **SL 1**—This parameter defines the type of input signals, if the sensor for the system has changed, for example from thermocouple type K to J, the value of this parameter has to be modified accordingly, please refer to below table 3 for details

Sensor type table (table 3)

Value	Input Type	Range
0 0 0 0	K	(0 to 1372 °C)
0 0 0 1	J	(0 to 1200 °C)
0 0 1 0	L	(0 to 200 °C)
0 0 1 1	E	(0 to 1000 °C)
0 1 0 0	N	(0 to 1300 °C)
0 1 1 1	R	(0 to 1769 °C)
1 0 0 0	S	(0 to 1769 °C)
1 0 0 1	B	(0 to 1820 °C)
1 0 1 0	W5Re/W26Re	(0 to 2320 °C)
1 0 1 1	PL II	(0 to 1390 °C)
0 1 0 1	T	(-199.9 to 400 °C)
0 1 1 0	U	(-199.9 to 600 °C)
1 1 0 0	Pt100(JIS/IEC)	(-199.9 to 649 °C)
1 1 0 1	JPt100(JIS)	(-199.9 to 649 °C)
1 1 1 0	0 to 5V DC	-1999 to 9999
1 1 1 1	1 to 5V DC	(configurable)
1 1 1 0	0 to 20mA DC	-1999 to 9999
1 1 1 1	4-20mA DC	(configurable)

- ③ **SL 2**—function disabled
- ④ **SL 3**—function disabled

- ⑧SL 4- This parameter is to select the alarm mode for alarm. refer to below table four for details change to different value can have different alarm mode

*Alarm mode table (Table 4)

Value	Alarm Type
0 0 0 0	Alarm disabled
0 0 0 1	Deviation high-limit alarm
0 0 1 0	Deviation high/low-limit alarm
0 0 1 1	Absolute value high-limit alarm
0 1 0 1	Deviation low-limit alarm
0 1 1 0	Deviation high-low limit reverse alarm
0 1 1 1	Absolute value low-limit alarm

- ⑥SL 5- Function disabled

- ⑦SL 6- Output type selection, the output code was configured at the factory floor when item was made do not change the value at anytime during the operation, otherwise the controller will not be able to work properly. see below table 5 for output details

*Output table (Table 5)

Value	Control Action
0	Direct Action
1	Reverse Action
0	PID action
1	Heat/Cool PID action
0	Relay/SSR drive output
1	4-20mA output

- ⑧SL 7- Function disabled

- ⑨SL 8- Function disabled

- ⑩SL 9- Function disabled

- ⑪SL 10- To configure RUN/STOP function, "1001" enable the RUN/STOP function via **CRS** key on front panel. "1000" to disable the RUN/STOP function on front panel.

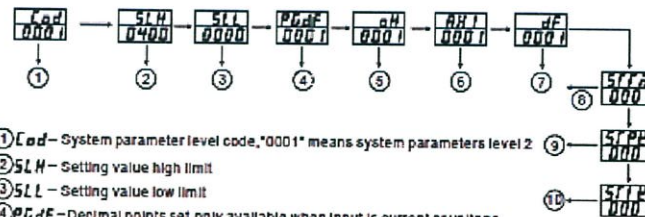
- ⑫SL 11- Function disabled

Note: Be sure to press **SET** and do not release, then press **CRS** at the same time These two keys are pressed at the same time for more than three seconds will save the modification and exit to PV/SV status

Maxwell Electrical Limited
www.maxwell-fa.com
Sales@maxwell-fa.com

5.4: System parameters level 2

Change the Cod value to "0001" at system parameter level 1 and press **SET** to go to system parameter level 2.



- ①Cod- System parameter level code, "0001" means system parameters level 2
- ②SLH- Setting value high limit
- ③SLL- Setting value low limit
- ④PGdF- Decimal points set, only available when input is current or voltage can set up to three decimal points tops
- ⑤aH - Action dead band for on/off control action
0 to 100 or 0.0 to 100.0
0.0% to 10.0% of full scale for voltage current input (Factory default is 2.0)
- ⑥RH I - Action dead band for alarm action
0 to 100 or 0.0 to 100.0
0.0% to 10.0% of full scale for voltage current input (Factory default is 2.0)

Parameter ⑦⑧⑨⑩ are disabled.

6: Terminal Arrangement

