

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการ  
ขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย

A STUDY OF PROCESSING PARAMETERS ON THE  
WALL THICKNESS OF PLUG – ASSISTED VACUUM  
THERMOFORMING PRODUCT

นางสาวณัฏฐา ดวงมณี

MS. NATTHA DUANGMANEE

นางสาวปาริชาติ พูลสวัสดิ์

MS. PARSARB POOLSAWASDI

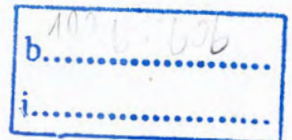
นางสาวพลอยไพลิน กล้าชัยญา

MS. PLOYPAILIN KLAMTANYA



T119344

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 119344  
วัน,เดือน,ปี - 7 ส.ค. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF PROCESSING PARAMETERS ON THE  
WALL THICKNESS OF PLUG – ASSISTED VACUUM  
THERMOFORMING PRODUCT**



**MISS. NATTHA DUANGMANEE**

**MISS. PARNARB POOLSAWASDI**

**MISS. PLOYPAILIN KLAMTANYA**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังงานที่ผ่านการขึ้นรูป  
พลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย

A Study Of Processing Parameters On The Wall Thickness Of Plug – Assisted  
Vacuum Thermoforming Product

นักศึกษา

นางสาวณัฏฐา	ดวงมณี	รหัสประจำตัว	50010436
นางสาวปานทรัพย์	พูลสวัสดิ์	รหัสประจำตัว	50010955
นางสาวพลอยไพลิน	กล้าธัญญา	รหัสประจำตัว	50011070

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(ดร.วิภู ศรีสืบสาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญาานิพนธ์	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย		
นักศึกษา	นางสาวณัฐษา ดวงมณี	รหัสประจำตัว	50010436
	นางสาวปานทรัพย์ พูลสวัสดิ์	รหัสประจำตัว	50010955
	นางสาวพลอยไพลิน กล้าธัญญา	รหัสประจำตัว	50011070
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2553		
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญาานิพนธ์	ดร.วิภู ศรีสืบสาย		

### บทคัดย่อ

ปริญาานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และจัดทำแม่พิมพ์และตัวช่วยกด สำหรับใช้กับเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานของการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง โดยปัจจัยที่ศึกษานั้น ประกอบด้วย ความเร็วของแท่งกดสูญญากาศ อุณหภูมิในการให้ความร้อนทั้งระดับต่ำและระดับสูง และลำดับการทำงานของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย แม่พิมพ์และแท่งกดถูกออกแบบมาเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นแก้วน้ำ ในการทดลองนั้นจะเก็บของมูลความหนาของผนังชิ้นงานส่วนตัวแก้วน้ำเป็นสามระดับ และหนึ่งระดับในส่วนกันแก้ว การวัดค่าจะใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อความแม่นยำ จากการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานโดยขึ้นรูปแผ่นพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง พบว่าอุณหภูมิ จะแปรผันตรงกับความหนาของผนังชิ้นงาน และความเร็วของแท่งกดจะแปรผกผันกับความหนาชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** A STUDY OF PROCESSING PARAMETERS ON THE WALL THICKNESS OF PLUG – ASSISTED VACUUM THERMOFORMING PRODUCT

**Student** Ms. Nattha Duangmanee  
Ms. Parnsarb Poolsawasdi  
Ms. Ploypailin Klamtanya

**Degree** Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Academic Year** 2010

**Thesis Advisor** Dr. Wipoo Sriseubsai

### ABSTRACT

The purposes of the thesis were to study, design, create punch and die for the plug-assist vacuum thermoforming machine and to determine the effect of processing parameter on the wall thickness of thermoformed part. Those parameters were plug speed, processing temperatures which were set as low and high level to perform the experiment and the sequence of plug and vacuum pressure to make the specimens. The plug and die were designed to make a high impact polystyrene cup. The height of cup was divided to three levels and each level was measured the wall thickness. In addition, the bottom wall thickness of cup was recorded. The average wall thickness was presented and the results showed that when plug pushed the plastic sheet before vacuum pressure active, the wall thickness of cup was uniform than performed the experiment by using vacuum pressure before the plug assist pressure. Moreover, when using high processing temperature, the wall thickness was increased. However, high plug speed would decrease the wall thickness of cup.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะคำแนะนำและการสนับสนุนของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีตลอดเสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งมอบความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือทุกด้านรวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างดีและทุกสิ่งทุกอย่างที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่มผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการ

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.ชุมพล ขวงโย ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข และอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำเสียสละเวลามาให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการจัดทำโครงการ

คุณสุชัย ปัญญาณิมิต ร้านพรชัย กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ ความรู้ต่างๆ ในการจัดทำแม่พิมพ์ด้วยดีตลอดมาของการจัดทำโครงการฉบับนี้

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่สุดในการให้โอกาสในการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาที่มอบให้แก่ผู้วิจัยที่ทำให้มีความสำเร็จที่สดใสในวันนี้

ขอบพระคุณ สาขาวิชาอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องชาวลาดกระบังทุกคนที่ให้ความรู้ดีๆ ที่มีให้กันตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาและให้คำแนะนำ กำลังใจในการจัดทำโครงการตลอดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ หนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าจัดทำปริญญาานิพนธ์และแหล่งความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอันทรงคุณค่าสำหรับการทำโครงการนี้

นางสาวณัฐชา ดวงมณี

นางสาวปานทรัพย์ พูลสวัสดิ์

นางสาวพลอยไพลิน กล้าธัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 นิยาม.....	3
2.2 หลักการทำงานของเครื่องปั๊มขึ้นรูปความร้อน.....	3
2.3 แม่พิมพ์.....	6
2.3.1 แม่พิมพ์ตัวเมีย.....	7
2.3.2 แม่พิมพ์ตัวผู้.....	7
2.3.3 วัสดุทำแม่พิมพ์.....	8
2.3.4 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปร้อน.....	8
2.4 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์พลาสติกสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย.....	9
2.4.1 อัตราส่วนการขึ้นรูป.....	9
2.4.2 อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่.....	9
2.4.3 อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้น.....	12
2.4.4 ประโยชน์ของอัตราส่วนการขึ้นรูป.....	13
2.4.5 การขยายตัว.....	14
2.5 หลักการออกแบบแท่งช่วยกด.....	17
2.5.1 การวิเคราะห์กรณีใช้แท่งช่วยกด (plug).....	19
2.6 หลักการออกแบบการทดลอง.....	24
2.6.1 ปัจจัยในการผลิต.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง.....	24
2.6.3 คำจำกัดความ.....	24
2.6.4 หลักในการออกแบบการทดลอง.....	24
2.6.5 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง.....	27
2.6.6 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง.....	26
2.6.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	30
2.6.8 แบบจำลองการถดถอย.....	35
2.6.9 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง.....	36
2.7 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วย โปรแกรม Minitab.....	37
<b>บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.1.1 ชิ้นงานทดลอง.....	38
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2.1 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย.....	39
3.2.2 ไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาของผนังชิ้นงาน.....	39
3.3 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์.....	40
3.3.1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน.....	40
3.3.2 การออกแบบแม่พิมพ์.....	40
3.3.3 การออกแบบตัวช่วยกด.....	42
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	44
3.4.1 แนวทางการวิเคราะห์ปัญหา.....	44
3.4.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต.....	44
3.4.3 เลือกการออกแบบการทดลอง.....	45
3.4.4 แผนการทดลอง.....	45
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.5.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง.....	48
3.5.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง.....	48
3.5.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง.....	51
4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	52
4.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	52
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนเชิงพื้นที่สำหรับรูปเรขาคณิตต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2.2 การขยายตัวโดยใช้ความดันอากาศของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.3 การคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	33
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง.....	45
ตารางที่ 3.2 เมตริกการออกแบบการทดลอง.....	46
ตารางที่ 3.3 การสุ่มอย่างสมบูรณ์.....	46
ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดลองอย่างง่าย.....	47
ตารางที่ 3.5 การเก็บค่าความหนาแน่นซึ่งงานที่ตำแหน่งต่างๆ.....	50
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง.....	51
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ด้านบน).....	55
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (ด้านบน).....	56
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น(ด้านบน).....	57
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (กึ่งกลาง).....	57
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (กึ่งกลาง).....	59
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (กึ่งกลาง).....	59
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ด้านล่าง).....	60
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (ด้านล่าง).....	61
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (ด้านล่าง).....	62
ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ก้นถ้วย).....	62
ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (ก้นถ้วย).....	64
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (ก้นถ้วย).....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การขีดตัวของแผ่นพลาสติกในขณะที่ถูกดึงด้วยแรงดันสูญญากาศ .....	4
รูปที่ 2.2 วิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปรีออน .....	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัวเมีย.....	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัวผู้.....	7
รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปของชิ้นงานตัวเมียรูปทรงกระบอก.....	10
รูปที่ 2.6 การขึ้นรูป (บน) ทรงกระบอกมุมตรง (ล่าง) ทรงกระบอกมีรัศมีตรงมุม $r' = d/8$ .....	12
รูปที่ 2.7 สำหรับการขึ้นรูปที่มีรูปร่างไม่เรียบ .....	12
รูปที่ 2.8 (a) อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่, $R_u$ (b) อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้น, $R_L$ และ (c) $H : D$ หรือ $H : d$ .....	13
รูปที่ 2.9 อุณหภูมิขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่และ $H : D$ .....	14
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นพลาสติกกับอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ โดยใช้ PS และ PVB.....	15
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎีของการขยายตัวความหนา.....	15
รูปที่ 2.12 plug สำหรับชิ้นงานที่สมมาตร (ซ้าย) รูปกรวยที่ตัดโคน และ (ขวา) รูปทรงกระบอก.....	17
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของ plug สำหรับแม่พิมพ์ตัวผู้.....	17
รูปที่ 2.14 เส้นสัมผัสของแผ่นพลาสติกสัมผัสกับ plug ระหว่างการขยายตัว.....	18
รูปที่ 2.15 การเสียรูปของแผ่นพลาสติก.....	19
รูปที่ 2.16 ลำดับการถอดแผ่นพลาสติกจาก plug และการวางแผ่นพลาสติกลงบนผิวหน้าแม่พิมพ์.....	20
รูปที่ 2.17 ความลึกของ plug มีผลความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D เมื่อ $X_0 / R_0 = 0.33$ .....	21
รูปที่ 2.18 ความลึกของ plug มีผลความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D เมื่อ $X_0 / R_0 = 1.0$ .....	21
รูปที่ 2.19 ความลึกของ plug มีผลความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D เมื่อ $X_0 / R_0 = 1.5$ .....	22
รูปที่ 2.20 การใช้ plug กดและแผ่นพลาสติกขยายตัวด้วยความเค้น (บน) แสดงขีดจำกัดการเสียรูปของวงกลม (ล่าง) แสดงการเสียรูปอย่างสมบูรณ์ของวงกลม.....	23
รูปที่ 2.21 ผลกระทบของความดันที่แตกต่างกันในการขึ้นรูประหว่างใช้ plug กดช่วย.....	24
รูปที่ 2.22 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	25
รูปที่ 2.23 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์ .....	26
รูปที่ 2.24 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่อันตรกิริยาระหว่างกัน.....	29
รูปที่ 2.25 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน .....	29
รูปที่ 3.1 แผ่นพลาสติกพอลิโอสไทรนชนิดทนแรงกระแทกสูง.....	38
รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย.....	39
รูปที่ 3.3 ไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาของชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 3.4 รูปร่างและขนาดชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 3.5 รูปร่างและขนาดแม่พิมพ์.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 ขนาดมุมเอียงของผนังชิ้นงาน.....	41
รูปที่ 3.7 ขนาดมุมเอียงของผนังเบ้าแม่พิมพ์.....	41
รูปที่ 3.8 รัศมีส่วนโค้งของแม่พิมพ์.....	42
รูปที่ 3.9 ขนาดและลักษณะของตัวช่วยกด.....	42
รูปที่ 3.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวช่วยกด.....	43
รูปที่ 3.11 ความสูงของตัวกด.....	43
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งต่างๆ ในการทดสอบการกระจายตัวของความหนา.....	49
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้.....	49
รูปที่ 4.1 ความน่าจะเป็นของความหนาผนังชิ้นงานที่มีการแจกแจงแบบปกติ.....	53
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผนังชิ้นงานบริเวณต่างๆที่มีค่าคงที่.....	54
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว.....	55
รูปที่ 4.4 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็วและลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว..	56
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว.....	58
รูปที่ 4.6 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็วและลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว..	58
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ.....	60
รูปที่ 4.8 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็วและลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว..	61
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิลำดับการทำงานและความเร็ว.....	63
รูปที่ 4.10 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็วและลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในอดีตและปัจจุบัน พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือนและมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สามารถนำมาแปรรูปได้ง่ายและยังมีคุณสมบัติที่เหนียวทนทานต่อการแตกหักเหมาะแก่การนำมาใช้ใหม่ ซึ่งในอุตสาหกรรมมีกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกอยู่หลายวิธีอาทิเช่น การฉีดขึ้นรูป การดันขึ้นรูป การเป่าขึ้นรูป ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความยากง่ายของกระบวนการการขึ้นรูปและมีปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้สังเกตเห็นถึงปัญหาที่มีกพบในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกจำพวกแก้วน้ำ หรือกล่องสำหรับบรรจุอาหาร ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องการความละเอียดอ่อนในเรื่องของคุณภาพเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องใช้ในการบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ดังนั้นทางกลุ่มจึงสังเกตเห็นความสำคัญของคุณภาพของบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะในส่วนของความหนาของผนังชิ้นงานที่ถือว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาของผนังไม่สม่ำเสมอหรือไม่ได้ตามมาตรฐานที่ตั้ง ก็จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานของผู้บริโภค ทางกลุ่มจึงได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานพลาสติก ที่ได้มาจากกระบวนการขึ้นรูปแผ่นพลาสติก โดยวิธีการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลทำให้การกระจายความหนาของผนังชิ้นงานไม่สม่ำเสมออาทิเช่น ปัจจัยในเรื่องอุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูป ลำดับการใช้แท่งกด และ ความเร็วของแท่งกด เป็นต้น โดยจะทำการศึกษาวิธีการออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์ และตัวช่วยกด สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย โดยใช้อะลูมิเนียมผสม สำหรับชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบความหนาของผนังที่ได้จากการขึ้นรูปในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดความหนาผนังในบริเวณต่างๆของชิ้นงาน เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยและสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการผลิตให้ชิ้นงานมีคุณภาพดียิ่งขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อทำการศึกษาระบวนการขึ้นรูปร้อนแผ่นพลาสติก โดยวิธีการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
- 1.2.2 เพื่อทำการศึกษาหลักการออกแบบและจัดทำ Punch และ Die สำหรับใช้กับเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
- 1.2.3 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
- 1.2.4 ศึกษาและทำการออกแบบการทดลอง สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติของปัจจัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1.3.1 จัดทำ Punch และ Die โดยใช้อะลูมิเนียมผสม เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นแก้วน้ำ
- 1.3.2 ทดสอบชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene) ด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย โดยการวัดและเก็บข้อมูลความหนาของผนังชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์
- 1.3.3 วิเคราะห์ผลการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยที่ดีที่สุด โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูป ลำดับการใช้แท่งกด และความเร็วของแท่งกด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ศึกษากระบวนการการผลิตการขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานขึ้นรูปพลาสติกแบบร้อนด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการปรับปรุงการผลิตเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพตามมาตรฐาน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นิยาม

เทอร์โมฟอร์มมิง (Thermoforming) หรือกระบวนการขึ้นรูปความร้อน หมายถึง การขึ้นรูปพลาสติก ในขณะที่พลาสติกอ่อนตัวเนื่องจากความร้อน โดยการทำให้พลาสติกยึดตัวออกภายใต้แรงดันลม (Pneumatic) แรงดันสุญญากาศ (Vacuum) หรือการดึงเชิงกล (Mechanical drawing) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามแม่พิมพ์วัตถุประสงค์ที่นิยมใช้คือ แผ่นพลาสติกและฟิล์มพลาสติก[1]

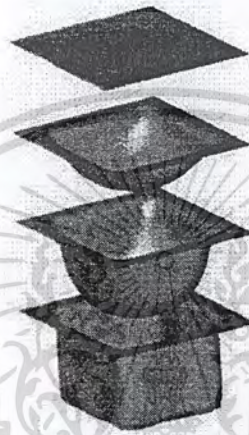
#### 2.1 หลักการทำงานของเครื่องปั๊มขึ้นรูปความร้อน

การแปรรูปพลาสติกโดยวิธีขึ้นรูปร้อน ด้วยเทคนิคต่างๆมีขั้นตอนดังนี้ คือเริ่มให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการอ่อนตัว ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) กับ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มไหล (Flow temperature,  $T_f$ ) ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ สามารถทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการยึดตัวได้สูงสุดถึง 5 เท่า [1] ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการแปรรูปโดยใช้เทคนิคขึ้นรูปร้อนเมื่อแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิเหมาะสมแล้วทำการปั๊มขึ้นรูป โดยใช้แรงดันลม แรงดูดสุญญากาศ จากนั้นทำการหล่อเย็นแล้วปลดชิ้นงาน โดยพลาสติกนั้นต้องอยู่ในรูปแบบของแผ่นพลาสติกหรือฟิล์มเท่านั้น มีความหนาอยู่ใน ช่วง 0.3 – 1 มิลลิเมตร

#### เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ (Plug-Assist Vacuum Forming)

เทคนิคการทำเทอร์โมฟอร์มมิงชนิดนี้เป็นเทคนิคที่ผสมผสานข้อดีของเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (straight vacuum forming) และเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้เบ้าดินแผ่นพลาสติกก่อนแล้วใช้แรงดันสุญญากาศ (vacuum drape forming) ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความลึก มีความหนาใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงาน และถอดชิ้นงานออกจากเบ้าได้ง่ายขึ้น รายละเอียดของการแปรรูปโดยการใช้อัด (plug) ช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ เทคนิคการแปรรูปชนิดนี้ เริ่มต้นจากการจับแผ่นพลาสติก แล้วให้ความร้อน เช่นเดียวกับเทคนิคอื่น ๆ หลังจากนั้นใช้หัวอัด เคลื่อนตัวลงมาเพื่ออัดแผ่นพลาสติกให้ยึดตัวลงในช่องว่างส่วนบนของเบ้า (pre-stretching) หัวอัดจะหยุดเคลื่อนเมื่อดันผ่านพลาสติกให้ยึดตัวออกจนเข้าใกล้เบ้าหลังจากนั้น ใช้แรงดันสุญญากาศดูดให้แผ่นพลาสติกประกบเบ้า แล้วถอดตัวอย่างออกจากเบ้าโดยการ ใช้ลมเป่า เพื่อให้ชิ้นงานหลุดออกจากเบ้า

เทคนิคการใช้แรงดันสูญญากาศเพียงอย่างเดียว มีขั้นตอนน้อยที่สุด ใช้เวลาในการผลิตสั้น ควบคุมการผลิตได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือมีส่วนเกินที่บาง ลักษณะการยึดตัวของแผ่นพลาสติก ขณะที่ถูกดึงด้วยแรงสูญญากาศดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในกรณีที่ต้องการชิ้นงานที่มีความลึกสูง การใช้เทคนิคการขึ้นรูปร้อนโดยใช้หัวอัดช่วยจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า หัวอัดที่ใช้เทคนิคนี้ ทำจากโลหะหรือโพลีพลาสติก เพื่อให้การทำงานของหัวอัดมีประสิทธิภาพสูง ต้องมีการคุมอุณหภูมิ และความเร็วของหัวอัดให้เหมาะสม ถ้าหัวอัดมีอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้แผ่นพลาสติกขาดและเหนียวติดที่หัวอัด หรืออาจจะทำให้ส่วนเกิน (bottom) ของภาชนะที่ทำการผลิตบางจนเกินไป



รูปที่ 2.1 การยึดตัวของแผ่นพลาสติกในขณะที่ถูกดึงด้วยแรงดันสูญญากาศ [2]

### วิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปร้อน

ถ้าเทอร์โมพลาสติกมีการอ่อนตัวจากความร้อน เมื่อได้รับความดันไปยังด้านหนึ่งของพื้นผิวจะเกิดการยึดตัวได้อย่างอิสระ ซึ่งรูปร่างจะถูกขึ้นรูปแล้วจะมีการกระจายความหนาในระหว่างการขึ้นรูปร้อน ปริมาตรสมมูลของแผ่นพลาสติกและรูปร่างสุดท้ายสามารถที่จะเป็นตัวกำหนดความหนาของผลิตภัณฑ์ได้

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad (2.1)$$

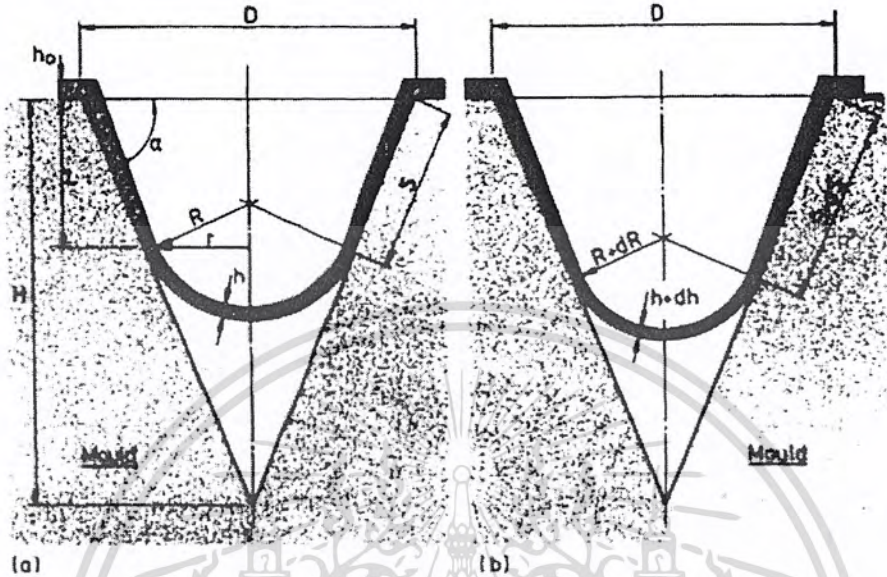
ซึ่ง  $A =$  พื้นที่ผิว,  $h =$  ความหนาผนัง ('i' และ 'f' บอกถึง ปัจจัยตั้งต้นและปัจจัยสุดท้าย)

การคำนวณที่กล่าวถึงนี้ เป็นประโยชน์ในการประมาณเบื้องต้นของการกำหนดขนาดของชิ้นงานที่ได้รับการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามก็ยังมีขาดความแม่นยำเนื่องจากในสภาวะความเป็นจริง เมื่อแผ่นพลาสติกได้ถูกดึงไปยังแม่พิมพ์ เย็นมันจะเกิดการแข็งตัวที่ความหนาเท่าไรก็ได้ที่มันถูกยึดลงไปเมื่อมันสัมผัสกับแม่พิมพ์

พิจารณากระบวนการขึ้นรูปร้อนของแผ่นพลาสติกที่ความหนา  $h_0$  ไปยังเข้าแม่พิมพ์ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (a) ณ เวลา  $t$  พลาสติกสัมผัสกับแม่พิมพ์เป็นระยะ  $S$  และยังคงมีส่วนหนึ่งของแผ่นที่อยู่ในรูปของโดมกลมรัศมี  $R$  มีความลึกของแม่พิมพ์  $H$  และความหนา  $h$  จากรูปทรงของแม่พิมพ์รัศมีสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = (H - S \sin \alpha) / (\sin \alpha \tan \alpha) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 วิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปรีออน [3]

เนื่องด้วยพื้นที่ผิว A ของแผ่นที่อยู่ในรูปของ โคกลมสามารถหาได้จาก

$$A = 2\pi R^2 (1 - \cos \alpha) \quad (2.3)$$

โดยที่  $\alpha$  คือมุมเอียงของผนังแม่พิมพ์ ซึ่งที่เวลาใด ๆ  $(t+dt)$  แผ่นพลาสติกจะถูกขึ้นรูปมีรูปร่างดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.3 (b) การเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นพลาสติกในรอบเวลานี้อาจจะประมาณได้ด้วยการสมมติว่าปริมาตรยังคงคงที่

$$2\pi R^2 (1 - \cos \alpha) h = 2\pi (R+dR)^2 R^2 (1 - \cos \alpha) (h+dh) + 2\pi R h dS \sin \alpha$$

ทำการแทนที่  $r = R \sin \alpha$  และสำหรับ R จากสมการที่ 2.2 สมการนี้อาจจะถูกลดรูปให้อยู่ในรูปแบบต่อไปนี้

$$dh/h = [2 - ((\sin^2 \alpha \tan \alpha) / (1 - \cos \alpha))] \cdot [(\sin \alpha dS) / (H - S \sin \alpha)] \quad (2.4)$$

สมการนี้อาจจะถูกอินทิเกรตกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยที่  $h = h_1$  ที่  $S = 0$  ซึ่งการศึกษาความหนา h ที่ระยะ S ไปตามด้านข้างของเบ้าแม่พิมพ์สามารถหาได้จาก

$$h = h_1 [(H - S \sin \alpha) / h]^{sec \alpha - 1} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ถูกเสนอไว้เบื้องต้นอีกครั้ง เมื่อถึงจุดที่พลาสติกที่อ่อนตัวเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์เป็นครั้งแรก รูปร่างของมันจะเป็นพองกลม ซึ่งไม่ได้สัมผัสกับด้านใดของแม่พิมพ์รูปโคน ปริมาตรสมมูลจึงเป็น

$$(D^2/4)h_0 = [2(D/2)^2(1 - \cos \alpha)h_1]/(\sin^2 \alpha)$$

ดังนั้น

$$h_1 = [(\sin^2 \alpha)/(2(1 - \cos \alpha))] \cdot h_0$$

ทำการแทนที่  $h_1$  ลงในสมการที่ 2.5

$$h = [(\sin^2 \alpha)/(2(1 - \cos \alpha))] [(H - S \sin \alpha)/h]^{\sec \alpha - 1} \cdot h_0$$

หรือ

$$h/h_0 = [(1 + \cos \alpha)/2] [(H - L)/H]^{\sec \alpha - 1} \quad (2.6)$$

สมการนี้อาจถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของความหนาแน่นในรูปถ้วยโคนลึกที่ถูกตัด และจะถูกต้องมากขึ้นเมื่อแผ่นที่อ่อนตัวอยู่ในรูปของ โดมกลมสัมผัสกับจุดศูนย์กลางของฐานเท่านั้น หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับปริมาตรสมมูลกับการแข็งตัวของตัวที่ฐานและด้านข้างของถ้วย

### 2.3 แม่พิมพ์

แม่พิมพ์ในการทดลองครั้งนี้ออกแบบเป็นรูปถ้วยเพื่อประโยชน์ในการศึกษาความแตกต่างของความหนาแน่น ตำแหน่งต่างๆและง่ายต่อการจัดสร้าง โดยทำจากอะลูมิเนียมผสม

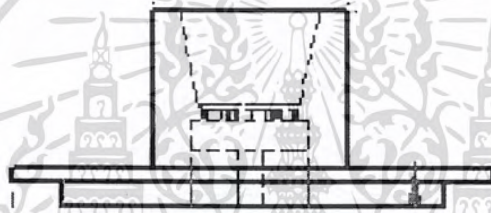
#### วิเคราะห์กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งกับแม่พิมพ์

ถ้าเทอร์โมพลาสติกมีการอ่อนตัวจากความร้อน เมื่อได้รับความดันไปยังด้านหนึ่งของพื้นผิวจะเกิดการยืดตัวได้อย่างอิสระ ซึ่งรูปร่างที่ถูกขึ้นรูปแล้วจะมีการกระจายความหนาในระหว่างการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ความสมมูลปริมาตรของแผ่นและรูปร่างสุดท้ายสามารถที่จะเป็นตัวกำหนดความหนาของผลิตภัณฑ์ได้ โดยลักษณะการยืดตัวของแผ่นเริ่มต้นจะถูกกดยึดลงไปสัมผัสกับขอบแม่พิมพ์ตัวเมีย แล้วบริเวณส่วนก้นก็จะถูกดูดให้แผ่นยึดแนบกับก้นแม่พิมพ์ตัวเมียด้วยแรงดูดสุญญากาศ ในระหว่างนี้ควรมีช่วงเวลาในการดูดสุญญากาศหลังจากการบีบที่เหมาะสม เนื่องจากพลาสติกที่โดนความร้อนจะเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับแม่พิมพ์ตัวผู้และเริ่มเกิดการเย็นตัว ทำให้พลาสติกยึดตัวได้ไม่ดี และกระจายความหนาไม่สม่ำเสมอ ในกระบวนการขึ้นรูปนั้นแม่พิมพ์ตัวผู้จะทำการกดแผ่นพลาสติกเปล่า ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมียทำให้แม่พิมพ์เกิดการติดและดัดกลับ เนื้อโลหะที่อยู่ระหว่างแผ่นกจะมีความเค้นดึงตามแนวการกดของแม่พิมพ์ตัวผู้ และความเค้นอัดตามแนวเส้นรอบวง เนื้อโลหะที่ผนังถ้วยได้รับความเค้นดึงแนวแกน ส่วนที่ก้นถ้วยเนื้อโลหะเกิดสภาวะความเค้นดึงทั้งสองแนวแกน สภาวะความเค้นที่กล่าวมาจะมีผลต่อแรงในการขึ้นรูปและความหมายของถ้วยกลมอย่างมาก ดังนั้นแม่พิมพ์ที่ดีควรได้รับการออกแบบให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งควรพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ร่วมกัน เช่น แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป รัศมีขอบแม่พิมพ์ ความลาดชันของ

แม่พิมพ์ ความลึกของแม่พิมพ์ตัวเมีย และคุณสมบัติของวัสดุที่จะทำการขึ้นรูป เป็นต้น ถ้าหากทำการออกแบบแม่พิมพ์ไม่ดีแล้ว ชิ้นงานก็อาจจะเกิดความเสียหายจากกระบวนการขึ้นรูปได้ เช่น เกิดการย่น หรือเกิดการฉีกขาด ซึ่งรัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย มีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ถ้ารัศมีแม่พิมพ์ตัวเมียเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการขึ้นรูปได้ดีขึ้น แต่ถ้ารัศมีแม่พิมพ์ใหญ่จนเกินไป จะทำให้ชิ้นงานเกิดการย่นได้ ถ้ารัศมีแม่พิมพ์เล็กมาก ๆ จะทำให้เกิด necking ที่รัศมีแม่พิมพ์ตัวผู้ นอกจากนี้รูปร่างของแม่พิมพ์ก็มีผลต่อขีดจำกัดอัตราการขึ้นรูปและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปอีกด้วย ส่วนรัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้จะไม่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมากนัก แต่จะทำให้ความหนาของชิ้นงานบริเวณรัศมีกันด้วยและผนังด้วยมีความหนาลดลง

### 2.3.1 แม่พิมพ์ตัวเมีย

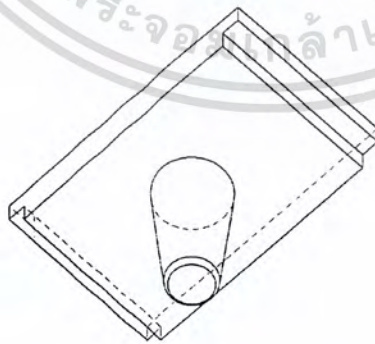
แม่พิมพ์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นหลุมลึกลงไป ดังรูปที่ 2.3 สามารถจะผลิตชิ้นงานที่มีความรายละเอียดทางด้านนอกของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าแม่พิมพ์ตัวผู้ และสะดวกในการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แต่มีข้อเสียคือจะผลิตชิ้นงานที่ส่วนฐานล่างมีความบาง



รูปที่ 2.3 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัวเมีย

### 2.3.2 แม่พิมพ์ตัวผู้

ลักษณะของแม่พิมพ์ประเภทนี้จะมีส่วนของแบบยื่นออกมาจากรูปร่างของแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 2.4 ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความลึกได้มากกว่าแม่พิมพ์ตัวเมีย แต่มีข้อเสียคือถอดชิ้นงานได้ยากกว่าแม่พิมพ์ตัวเมีย



รูปที่ 2.4 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัวผู้

### 2.3.3 วัสดุทำแม่พิมพ์

อลูมิเนียมผสมที่ใช้ทำแม่พิมพ์ส่วนใหญ่จะเป็นเกรด A7079-61 ข้อดีของการนำอลูมิเนียมมาทำแม่พิมพ์คือ มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี มีน้ำหนักเบา คือน้ำหนักประมาณ 1 ใน 3 ของเหล็ก จึงมักนิยมทำพันธ์โซลเดอร์ หรือ คายโซลเดอร์ นอกจากนี้ อลูมิเนียมยังเป็นโลหะที่สามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกลได้ง่ายกว่าเหล็กมาก จึงสามารถประหยัดเวลาในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ได้มาก อลูมิเนียมผสมที่ใช้ทำแม่พิมพ์มักจะเป็นเกรด A7079 และชนิดที่คล้าย ๆ กัน คุณสมบัติของอลูมิเนียมเกรดนี้ จะใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S 50 C สามารถใช้ทำแม่พิมพ์พลาสติก ทั้งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และแม่พิมพ์เป่าพลาสติก ที่มีจำนวนการผลิตไม่มากนัก และยังสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี

### 2.3.4 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปร้อน [4]

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยนั้นต้องมีลักษณะที่เป็นแผ่นซึ่งต้องมีความหนาไม่มากนักเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันที่ต่ำ นิยมใช้พลาสติกในกลุ่มที่ไม่มีผลึก มากกว่ากลุ่มกึ่งผลึก เนื่องจากพลาสติกในกลุ่มที่ไม่มีผลึกมีช่วงอุณหภูมิในการแปรรูปที่กว้าง จึงทำให้มีความสะดวกในการแปรรูป ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการแปรรูป มีดังนี้

- พอลิสไตรีนที่อยู่ในรูปของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทก (high impact polystyrene, HIPS) ของพอลิสไตรีน นิยมใช้ในการทำเทอร์โมฟอร์มมาก เนื่องจากมีราคาไม่แพง ความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ได้ชิ้นงานที่เบา ชิ้นงานมีความแข็งแรงปานกลาง ใช้ทำผลิตภัณฑ์เช่น บรรจุภัณฑ์ที่มีความคงตัว (dimensionally stable packaging) บรรจุภัณฑ์ของบอร์คคอมพิวเตอร์ และ ใช้บรรจุสินค้าที่ต้องการโชว์ให้เห็นตัวสินค้าภายใน (point-of-purchase displays) เป็นต้น HIPS มีอุณหภูมิในการขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส
- พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนและสไตรีน (ABS) ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดี เช่น ส่วนประกอบภายในตู้ทำความเย็นและเครื่องทำน้ำแข็ง ทำส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์และอุปกรณ์ตกแต่งภายในบ้าน และอุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น
- พอลิเอทิลีน (HDPE) เป็นวัสดุที่มีราคาถูกใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทกล่องต่างๆ ถาดใส่ของ แผ่นปูรองกระเบื้องรถยนต์ ทนต่อแรงกระแทกดีมากและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMW-HDPE) มีสมบัติโดยทั่วไปคล้ายกับ HDPE แต่มีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิได้ดีกว่า นิยมใช้ทำถาดในทางการแพทย์ และถาดใส่ของต่างๆ เป็นต้น
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ผลิตภัณฑ์จากวัสดุนี้มีสมบัติเด่น คือ ทนแรงกระแทกสูง แข็ง มีความเงาสวย ทนต่อสารเคมี ทนไฟและทนต่อสภาวะอากาศภายนอก จึงเหมาะแก่การผลิตประตูห้องน้ำ อุปกรณ์ใส่สารเคมี กล่องบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้ภายนอกบ้าน เป็นต้น
- พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก จึงต้องควบคุมอุณหภูมิในการแปรรูปอย่างละเอียด เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิของการอ่อนตัวแคบ ชนิดที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปร้อนมากที่สุด คือ PP ที่ผสมด้วยดินขาว (Clay) เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนแรงกระแทกได้ดีมากนอกจากนี้ยังผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายและมีอุณหภูมิการอ่อนตัว (Heat distortion temperature) สูง นิยมใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

- โพลีเอทิลีนเทอเรฟทาเรท (PET) นิยมใช้อย่างมากในการทำบรรจุภัณฑ์อาหารและอุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการความใส สมบัติเด่นของวัสดุชนิดนี้คือ มีความใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

ในงานวิจัยนี้จะใช้พอลิสไตรีน ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในกระบวนการขึ้นรูปรี้อนมากที่สุด เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปรี้อนทำได้ง่าย มีช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่กว้าง นอกจากนี้แล้วยังมีราคาถูก ใส ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิสไตรีนส่วนใหญ่ ได้แก่ แก้วน้ำที่ใช้แล้วทิ้ง บรรจุภัณฑ์ต่างๆ พอลิสไตรีนแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1) พอลิสไตรีนเพื่อการใช้งานทั่วไป (General purpose polystyrene, GPPS) สมบัติเด่น คือมีความใสมาก มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ในช่วงระหว่าง 74-105 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง
- 2) พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High impact polystyrene, HIPS) เตรียมได้จากอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนในพอลิบิวทาไดอีน มีสมบัติเด่น คือ มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูง นิยมใช้ในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ
- 3) โฟมพอลิสไตรีน (Expandable polystyrene, EPS) ผลิตจากเม็ดพอลิสไตรีนและก๊าซไฮโดรคาร์บอนหรือสารช่วยพองตัว เช่น บิวเทน เพนเทน เป็นต้น ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ใส่อาหาร

## 2.4 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์พลาสติกสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย

### 2.4.1 อัตราส่วนการขึ้นรูป (Draw ratio) [3]

อัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นการวัดความสามารถของการขึ้นรูปแบบ Thermoform หรือความลึกของการขึ้นรูป ซึ่งมี 3 วิธี คือ

- อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่,  $R_s$
- อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้น,  $R_L$
- $H : D$  หรือ  $H : d$

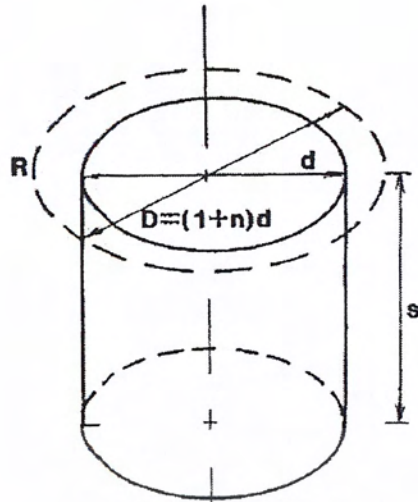
### 2.4.2 อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ (Areal Draw Ratio) [4]

โดยไม่คำนึงถึงกระบวนการขยายตัวที่เคยใช้ในการขึ้นรูปร่างต่างๆ แผ่นพลาสติกจะมีพื้นที่เริ่มต้น  $A_0$  และมีความหนาเริ่มต้น  $t_0$  เป็นการขยายตัวของส่วนผิวหน้าพื้นที่  $A$  และความหนาเฉลี่ย  $t$  ค่าปริมาตรของพลาสติกคงที่

$$V = t_0 A_0 = \int t dA = t_0 A \quad (2.7)$$

อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ในการขยายตัว  $R_s = A/A_0$  โดยที่  $R_s$  เป็นส่วนกลับของอัตราส่วนความหนา  $R_s = (t/t_0)^{-1}$  อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่เป็นการกำหนดทิศทาง 2 ทิศทางบนแผ่นพลาสติก อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ของชิ้นงานตัวเมียรูปทรงระบอ กังรูป ที่ 2.5 เป็นดังสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้












รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปของชิ้นงานตัวเมียรูปทรงกระบอก [3]

$$R_A = \frac{A_{\text{sidewall}} + A_{\text{bottom}}}{A_0} = \frac{\pi ds + \pi d^2/4}{\pi d^2/4} = \frac{4s}{d} + 1 \quad (2.8)$$

โดยที่  $s$  เป็นความสูง และ  $d$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง บางครั้งอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่เป็น  $R_a^* = R_a - 1$   
 โดยอัตราส่วนเชิงพื้นที่มีชื่อเรียกหลายชื่อ คือ

- Stretch ratio
- Stretching ratio
- Stretch factor
- Areal elongation

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนเชิงพื้นที่สำหรับรูปเรขาคณิตต่างๆ [3]

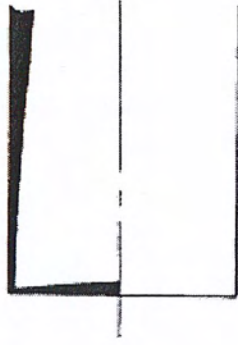
Shape	Figure	Area	Areal draw ratio, Ra
Hemisphere		$2\pi R^2$	2
Right cylinder		$\pi R^2 + 2\pi R h$	$1 + (2h/R)$
Right cone		$\pi R(R^2 + h^2)^{1/2}$	$[1 + (h/R)^2]^{1/2}$
Truncated cone		$\pi r^2 +$ $\pi(R+r) \cdot [(R-r)^2 + h^2]^{1/2}$	$(r/R)^2 +$ $(1 + r/R) \cdot [(1 - r/R)^2 + (h/R)^2]^{1/2}$
Square, a = side		5a	5
Right rectangle $a \times b \times h^1$		$2ah + 2bh + 2ab$	$2(1 + h/b + h/a)^{1/2}$
Wedge $a \times b \times h$		$2h + 2b[h^2 + (a/2)^2]^{1/2}$	$(h/b) + [1 + (2h/a)^2]^{1/2}$
Right pyramid $a \times b \times h$		$(ab/2)[1 + (2h/b)^2]^{1/2} +$ $(ab/2)[1 + (2h/a)^2]^{1/2}$	$(1/2)[1 + (2h/b)^2]^{1/2} +$ $(1/2)[1 + (2h/a)^2]^{1/2}$
Truncated right pyramid $a \times b \times h$ and $a \times b$		$1/2(ab - ab)[1 + (2h/b)^2]^{1/2} +$ $1/2(ab - ab)[1 + (2h/a)^2]^{1/2} +$ $ab$	$1/2[1 - (ab/ab)][1 + (2h/b)^2]^{1/2} +$ $1/2[1 - (ab/ab)][1 + (2h/a)^2]^{1/2} +$ $(ab/ab)$

<sup>1</sup> h is the perpendicular height for the right rectangle, wedge, right pyramid and the truncated right pyramid

จากรูปที่ 2.6 พิจารณาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ที่รอบกันทรงกระบอกกับรัศมีของมุม โดยที่  $r = a \cdot d$  และกันทรงกระบอกที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส  $r = 0$  พื้นที่รอบกันกระบอกเป็น

$$\begin{aligned}
 A_{round} &= Area_{bottom} + Area_{side} + Area_{torus}/4 \\
 &= \frac{\pi(d^2 - r^2)}{4} + \pi d(s - r) + \frac{4\pi^2 dr}{4 \cdot 2}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

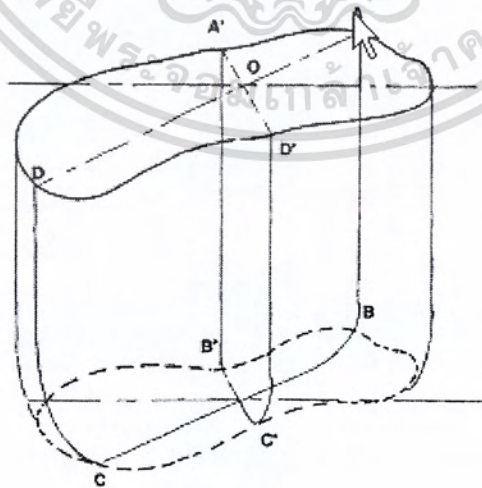


รูปที่ 2.6 การขึ้นรูป (บน) ทรงกระบอกมุมตรง (ล่าง) ทรงกระบอกมีรัศมีตรงมุม  $r' = d/8$  [3]

2.4.3 อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้น (Linear Draw Ratio)

เป็นอัตราส่วนของความยาวที่ยื่นออกไปบนผิวหน้าของชิ้นงานถึงความยาวบนแผ่นพลาสติกที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป

ดังรูปที่ 2.7 ซึ่ง  $R_{L1} = ABCD/AOD$  และ  $R_{L2} = A'B'C'D'/AOD$



รูปที่ 2.7 สำหรับการขึ้นรูปที่มีรูปร่างไม่เรียบ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

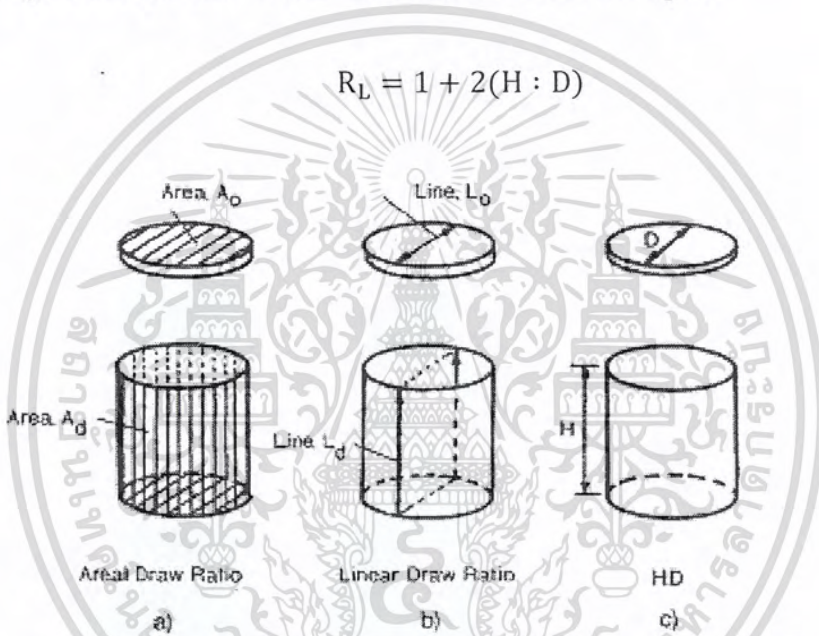
การกำหนดอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้นสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตร  $R_L$  จะมีผลต่อความเครียดและความเค้นของพอลิเมอร์ อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้นสำหรับทรงกระบอกเป็น

$$R_L = \frac{2s+d}{d} = \frac{2s+1}{d} \quad (2.10)$$

$R_L$  เรียกว่า อัตราส่วนความลึกของการขึ้นรูป  $R_L$  ที่ลดลงบางครั้งจะถูกนำมาใช้ ซึ่งสามารถเขียนเป็น  $R^*_L = R_L - 1$  ยกเว้นกรณีรูปเรขาคณิตต่างๆที่ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงพื้นที่และอัตราส่วนเชิงเส้น 2.3.4 H : D ดังรูปที่ 2.8 (a),(b) และ (c)

จากที่  $R_L$  เป็นอัตราส่วนความลึกของการขึ้นรูปถึงขอบแม่พิมพ์ที่เปิดอยู่ สามารถเขียนเป็น H:D หรือ H: d ได้ รูปร่างสำหรับชิ้นงานรูปทรงกระบอก สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง H : D และ  $R_L$  คือ

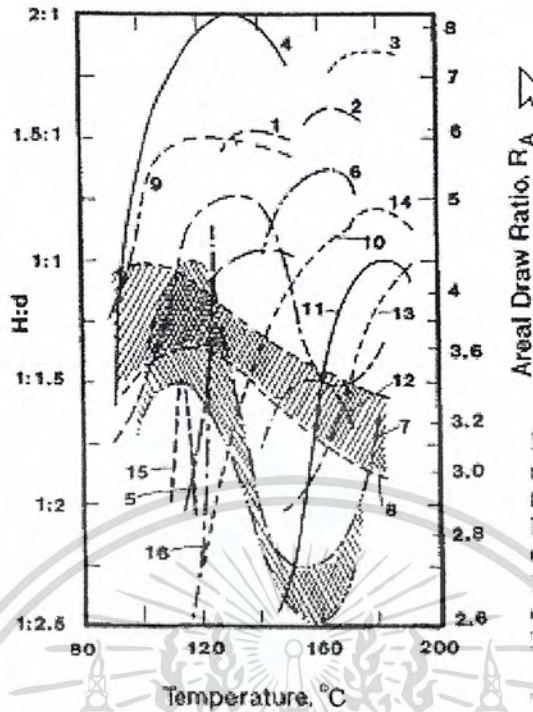
$$R_L = 1 + 2(H : D) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.8 (a) อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่,  $R_A$  (b) อัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงเส้น,  $R_L$  และ (c) H : D หรือ H : d [3]

#### 2.4 ประโยชน์ของอัตราส่วนการขึ้นรูป

อัตราส่วนการขึ้นรูปเฉลี่ยจะใช้ในการพิจารณาเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้จริงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน H : D สำหรับพอลิเมอร์หลายๆชนิดและความหนาเริ่มต้นของแผ่นพลาสติกมากมายสำหรับการขึ้นรูปด้วยสูญญากาศที่แม่พิมพ์ตัวเมียรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.9

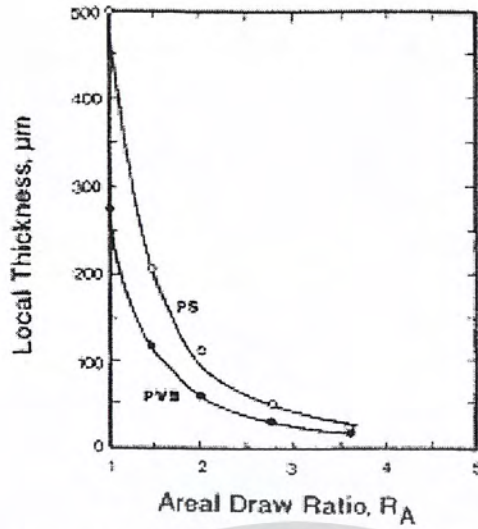


รูปที่ 2.9 อุณหภูมิขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่และ H: D [3]

ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ในรูปที่ 2.9 ได้แก่ 1. 0.4 mm LDPE; 2. 0.5 mm HDPE; 3. 0.4 mm PP; 4. 0.3 mm HIPS; 5. 0.25 mm OPS; 6. 0.5 mm ABS; 7. 0.3 mm RPVC; 8. 0.3 mm FPVC; 9. 0.5 mm PVC; 10. 0.3 mm cellulose acetate; 11. 0.2 mm PC; 12. 0.3 mm PMMA; 13. 0.5 mm CAB; 14. 0.5 mm CAP; 15. 0.5 mm Hostalit Z; 16. 0.5 mm PS foam

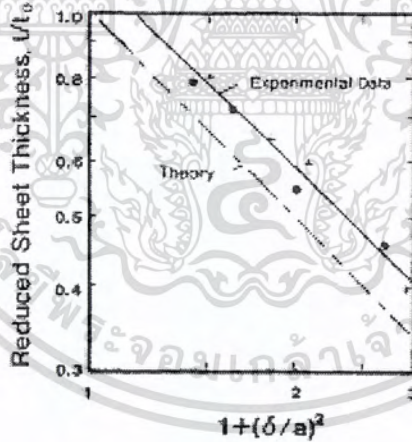
#### 2.4.5 การขยายตัว (Inflation)

จากรูปที่ 2.10 เป็นการทดลองการขึ้นรูปสำหรับแผ่นพลาสติกไปยังบริเวณก้นของรูปกรวยที่ตัด โคน อัตราส่วนความหนาของแผ่นพลาสติกเป็น  $h/h_0$  ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงส่วนกลับของอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นพลาสติกกับอัตราส่วนการขึ้นรูปเชิงพื้นที่ โดยใช้ PS และ PVB [3]

สำหรับการขยายตัวของแผ่นพลาสติกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน การทดลองได้แสดงให้เห็นว่าความหนาของแผ่นพลาสติกจากบริเวณขอบเป็นปัจจัยเดียวเท่านั้นในการขยายตัวของความสูง  $y$  ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งรูปวงกลมสีดำแทน polymethyl ,PMMA เครื่องหมายกากบาท แทน polystyrene , PS ซึ่ง PMMA เป็นข้อมูลที่เหมาะสมที่สุด และเส้นประแทนทฤษฎีของการขยายตัวความหนาของฟองกลม



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎีของการขยายตัวความหนา [3]

สำหรับอัตราส่วนการขยายตัวที่มาก ๆ มากกว่าครึ่งวงกลม ความหนาของแผ่นพลาสติกจะมีค่าคงที่เฉพาะบริเวณตรงกลางเท่านั้น ถ้าพอลิเมอร์ในรูปทรงถ้วยมีความหนาเท่ากันทั้งหมด

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1}{1 + (\frac{y}{a})^2} = \frac{1}{R_A} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแผ่นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของความสูง, y และการขยายตัวของความดัน, P เป็น

$$\frac{P_a}{2h_0E} = \ln \left[ 1 + \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right] \cdot \frac{\left[ 2 \left( \frac{y}{a} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right]^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ E เป็นค่ามอดูลัสที่ได้จากสมการความเค้น-ความเครียดของพลาสติก  $\sigma = E$

จากรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาและ y/a ของ HIPS และ PMMA ซึ่งสามารถประมาณได้เป็น

$$\frac{h}{h_0} \approx \frac{\left( \frac{5}{6} \right)}{1 + \left( \frac{y}{a} \right)^2} \quad (2.14)$$

ผลลัพธ์ที่ได้บริเวณขอบของพลาสติกจะมีความหนาที่น้อยกว่าบริเวณอื่นมาก สำหรับการขยายตัวด้วยค่าความดันอากาศสำหรับพอลิเมอร์ชนิดต่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การขยายตัวโดยใช้ความดันอากาศของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [3]

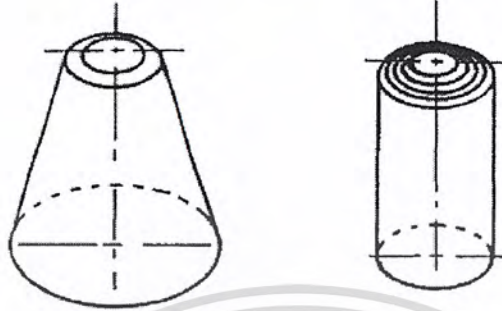
Polymer	Temperature range		Pressure range above atmospheric	
	(°C)	(°F)	(kPa)	(lb <sub>f</sub> /m <sup>2</sup> )
PS	135-150	275-300	14-28	2-4
PS - foam			NR	NR
ABS	140-150	280-300	10-28	1.5-4
HIPS	135-150	275-300	14-28	2-4
CA	140-155	280-310	7-21	1-3
PMMA	160-180	325-360	48-70	7-10
PMMA/PVC	155-170	310-340	35-48	5-7
PC	175-190	350-375	41-70	6-10
FEP			NR	NR
PET	135-160	275-300	14-28	2-4
HDPE	130-150	270-300	7-21	1-3
LDPE	125-145	260-290	7-21	1-3
PP	150-165	300-330	7-14	1-2
10% talc - PP	150-165	300-330	55-70	8-10
20% talc - PP	150-190	300-380	55-70	8-10
PSO <sub>2</sub>	215-250	420-480	41-55	6-8
RPVC	115-140	240-280	10-21	1.5-3
FPVC	115-140	240-280	7-21	1-3
PVC - foam			NR	NR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

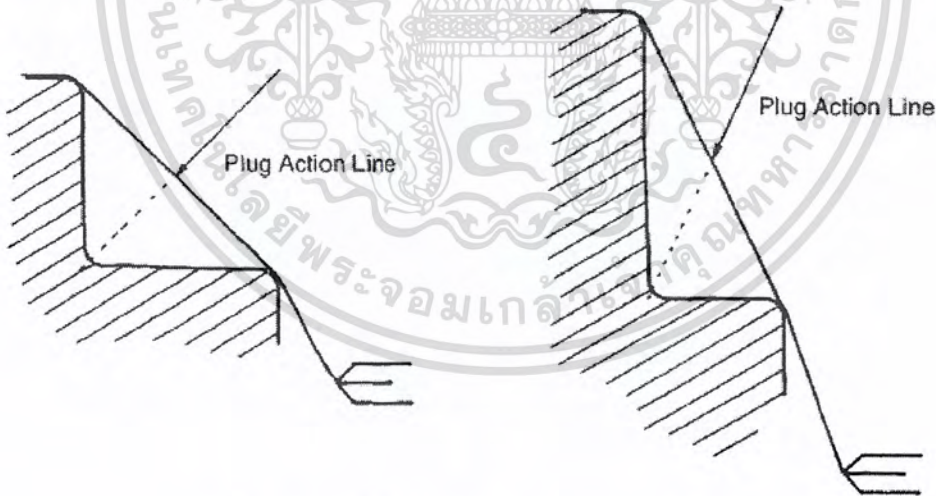
### 2.5 หลักการออกแบบแท่งช่วยกด [4]

รูปร่างของ plug สำหรับชิ้นงานที่สมมาตร เช่น ถ้วย หรือรูปทรงกระบอกหรือรูปกรวยที่ตัดโค้นที่มีรัศมีขอบมาก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 plug สำหรับชิ้นงานที่สมมาตร (ซ้าย) รูปกรวยที่ตัดโค้น และ (ขวา) รูปทรงกระบอก[3]

โดยทั่วไป plug ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งและ plug mark สำหรับการออกแบบชิ้นงานที่ไม่สมมาตร จะไม่คำนึงถึงรูปร่างของ plug เริ่มต้น แต่รูปร่างสุดท้ายของ plug จะต้องมึรัศมีของมุมมากพอและมีรูปโค้นที่ค่อนข้างจะมีพื้นผิวแบน สำหรับแม่พิมพ์ตัวเมีย plug จะเคลื่อนที่ไปยังแกนกลางของแม่พิมพ์ แต่สำหรับแม่พิมพ์ตัวผู้ plug จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตัดขวางเฉียงมุม ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของ plug สำหรับแม่พิมพ์ตัวผู้[3]

พิจารณา plug ที่มีรัศมี  $b$  และความลึก  $\delta$  และรัศมีการขยายตัวของแผ่นพลาสติก  $a$  อัตราส่วนความหนาของแผ่นพลาสติกเป็น

$$\frac{t}{t_0} = \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{r \ln \frac{a}{b}} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $r$  เป็นรัศมีของแผ่นพลาสติก  $b < r < a$  ความหนาของแผ่นชิ้นงานบนผิวหน้าของ plug เป็น  $t_0$  ค่าของ  $\frac{\delta}{a}$  ต้องมากกว่า 0.4 อัตราส่วนความหนาจาก  $b$  ถึง  $a$  ต้องเท่ากับอัตราส่วนรัศมี  $\frac{b}{a}$  ปริมาตรเริ่มต้นของแผ่นพลาสติกเป็น  $V = \pi a^2 t_0$  โดยแผ่นพลาสติกจะไม่ขยายตัวไปทางด้านบนของ plug และเป็นการขยายตัวในรูปกรวยตัดโคณ ด้านล่างระหว่างขอบของ plug และ ขอบของแม่พิมพ์ ปริมาตรของพลาสติกบนผิวหน้าของ plug เป็น  $V_p = \pi b^2 t_0$  ปริมาตรของพอลิเมอร์ในการขยายตัวของแผ่นพลาสติกเป็น

$$V_s = \int_b^a \delta \cdot t(r) \cdot 2\pi dr \quad (2.16)$$

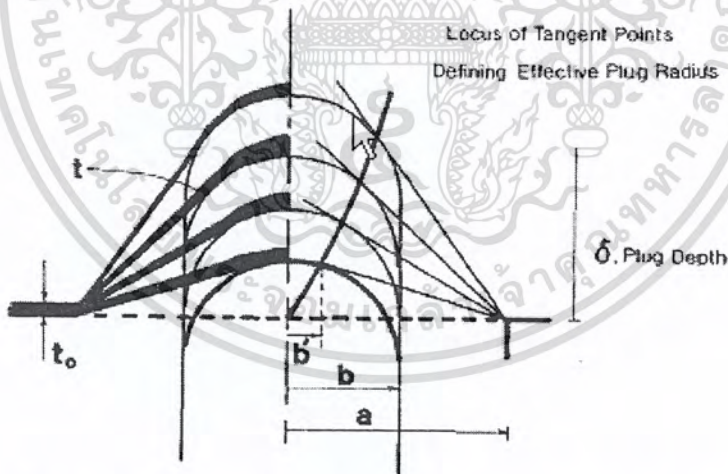
ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ

$$V_s \approx \delta \cdot t_{avg} \cdot 2\pi(a+b)/2 \quad (2.17)$$

เนื่องจาก  $V = V_p + V_s$  อัตราส่วนความหนาเฉลี่ยเป็น

$$\frac{t_{avg}}{t_0} = \frac{1-b/a}{\delta/a} \quad (2.18)$$

ผลกระทบของความโค้งผิวหน้าของ plug จะใกล้เคียงกับผลกระทบของค่า  $b$  ซึ่งเป็นรัศมีของ plug พิจารณา plug ที่ตรงปลายเป็นรูปทรงกลม ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เส้นสัมผัสของแผ่นพลาสติกสัมผัสกับ plug ระหว่างการขยายตัว[3]

ซึ่งรัศมีตรงปลายของ plug เป็น  $b$ , รัศมีของแผ่นพลาสติกที่ทะลุได้เป็น  $a$  โดยที่  $b'$  เป็นตัวทำให้เกิดรัศมี plug เมื่อปลายสุดของ plug สัมผัสกับแผ่นพลาสติก  $b' = 0$  เมื่อ plug สามารถดันทะลุได้ความลึก  $\delta = b$  แผ่นพลาสติกจะสัมผัสที่  $\frac{b'}{a} = \left(\frac{b}{a}\right)^2$  และเมื่อดันทะลุได้ความลึก  $\delta = 2a$  จะส่งผลให้รัศมีลดลงเป็น  $\frac{b'}{a} = 1 - \cos 2\alpha$  เมื่อ  $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a}\right)^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การวิเคราะห์กรณีใช้แท่งช่วยกด (plug)

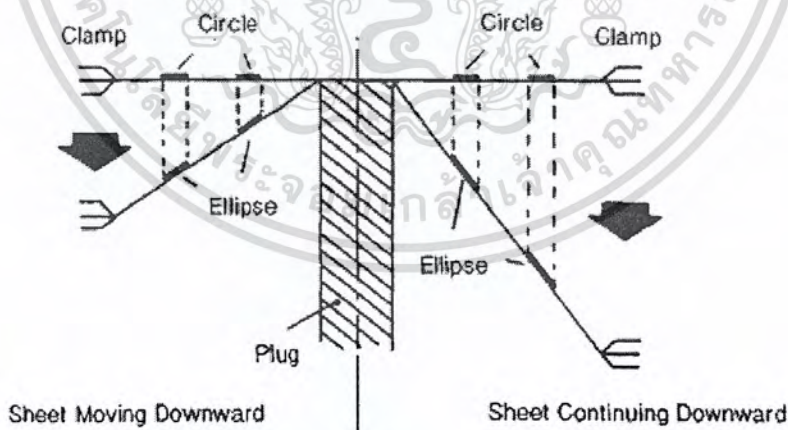
แรงที่ต้องการในการขยายตัวของแผ่นพลาสติกให้มีความลึก  $\delta$  โดยใช้ plug ช่วย

$$F = \frac{2\pi\delta\epsilon(T)t_0}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $E(T)$  เป็นค่า neo-Hookean modulus สำหรับแบบจำลองที่มีความเค้นมากๆ แรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลึกที่ทะลุได้และความหนาเริ่มต้นของแผ่นพลาสติก ค่าความดันที่ต้องใช้ในการดัน plug

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.20)$$

ขอบเขตการขยายตัวของแผ่นพลาสติกที่ปลายสุดของ plug เป็นการประมาณจากแรงสมดุลที่ใช้ในการขึ้นรูป อัตราส่วนความหนาที่เหมาะสมจะสัมพันธ์กับการขยายตัวที่ทางโค้งปลายสุดของ plug ส่วนแรงที่ไม่สมดุลจะเป็นส่งผลกระทบต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของ plug แรงของแผ่นพลาสติกจะต่อต้าน plug เพิ่มขึ้นถ้ามีความแหลมคมมากขึ้น แรงที่ใช้ในการขยายตัวหรือการไหลของชิ้นงานบนปลายสุดของ plug ลดลง ถ้า plug มีความแหลมคมมากขึ้น ดังนั้นในการขยายตัวของแผ่นพลาสติกที่สัมผัสกับ plug มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นเมื่อ plug มีความแหลมคม ในทางปฏิบัติการขยายตัวของแผ่นพลาสติกจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ plug การขยายตัวอย่างต่อเนื่องจะเป็นการที่แผ่นพลาสติกยึดตัวในแนวความเค้นแนวราบ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อ plug ดังรูปที่ 2.15

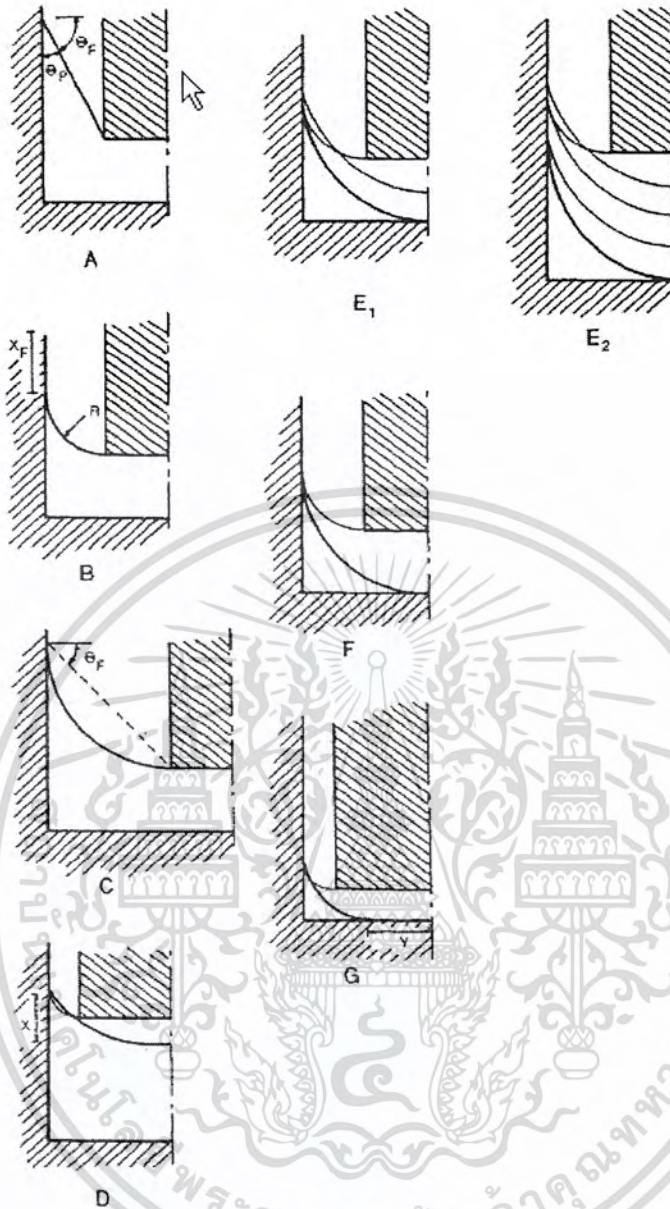


รูปที่ 2.15 การเสีรูปร่างของแผ่นพลาสติก[3]

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

รูปแบบการขยายตัวได้แสดงเป็นลำดับขั้นคอน ดังรูปที่ 2.16

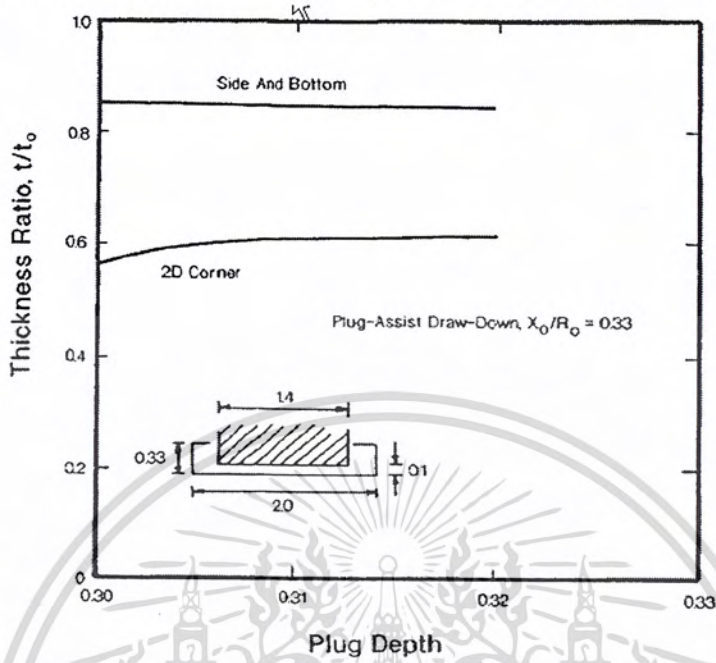
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



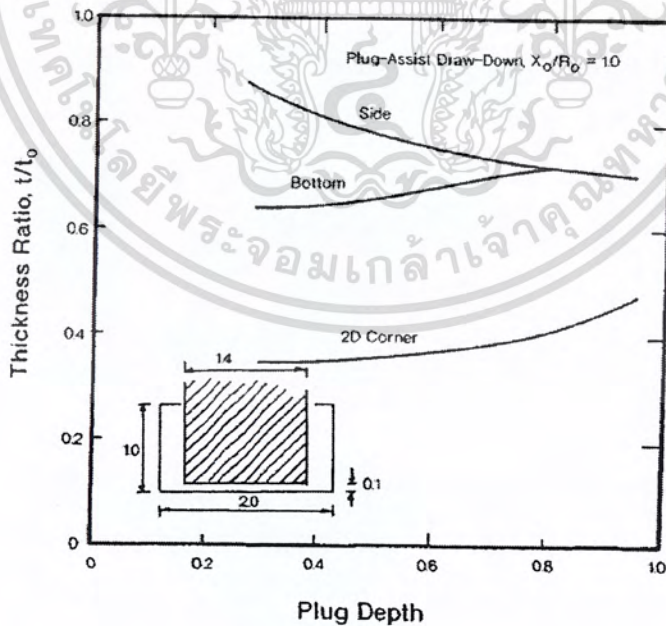
รูปที่ 2.16 ลำดับการถอดแผ่นพลาสติกจาก plug และการวางแผ่นพลาสติกลงบนผิวหน้าแม่พิมพ์ [3]

การใช้ plug ช่วยมีประโยชน์ต่อการขยายตัวของแผ่นพลาสติกในแนวนอนที่มีมุมมากกว่า  $\pi/4$  หรือ  $45^\circ$  (รูปที่ 2.15 A) เมื่อ plug เคลื่อนที่ลงไปมากที่สุดแล้ว แผ่นพลาสติกจะถอดจาก plug (รูปที่ 2.15 B) รูปที่ 2.15 A และรูปที่ 2.15 B เป็นการเคลื่อนที่ลงในทิศทางเดียว เมื่อแผ่นพลาสติกเป็นเส้นแนวนอนสัมผัสกับผิวหน้าของ plug แผ่นพลาสติกจะถอดจาก plug (รูปที่ 2.15 C, รูปที่ 2.15 E<sub>1</sub>, หรือ รูปที่ 2.15 E<sub>2</sub>) ถ้า plug อยู่ใกล้บริเวณก้นแม่พิมพ์ แผ่นพลาสติกจะวางลงบนผิวหน้าของแม่พิมพ์โดยปราศจากการขยายตัว ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นมากที่สุด ถ้าแผ่นพลาสติกอยู่ไม่ใกล้บริเวณก้นของแม่พิมพ์ แผ่นพลาสติกจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องในรูปร่างครึ่งวงกลมหรือครึ่งทรงกลมจนกระทั่งสัมผัสกับบริเวณก้นของแม่พิมพ์ เมื่อแผ่นพลาสติกอยู่บริเวณก้นของแม่พิมพ์แล้ว การขยายตัวจะเกิดขึ้นโดย

การเคลื่อนที่ลงในทิศทางเดียวจนกระทั่งมุมระหว่างส่วนที่ตัดฉากและส่วนแนวอนของแผ่นพลาสติกมีค่า  $\pi/4$  หรือ  $45^\circ$  หลังจากนั้นแผ่นพลาสติกจะขยายตัวไปจนถึง 2D จากรูปที่ 2.17, 2.18 และ 2.19

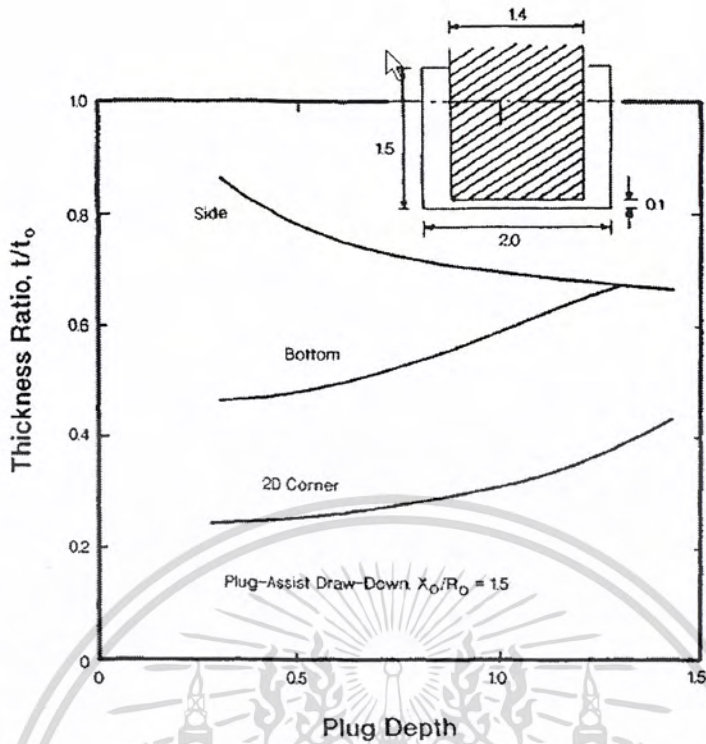


รูปที่ 2.17 ความลึกของ plug มีผลความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D [3] เมื่อ  $X_0 / R_0 = 0.33$



รูปที่ 2.18 ความลึกของ plug มีผลความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D เมื่อ  $X_0 / R_0 = 1.0$  [3]

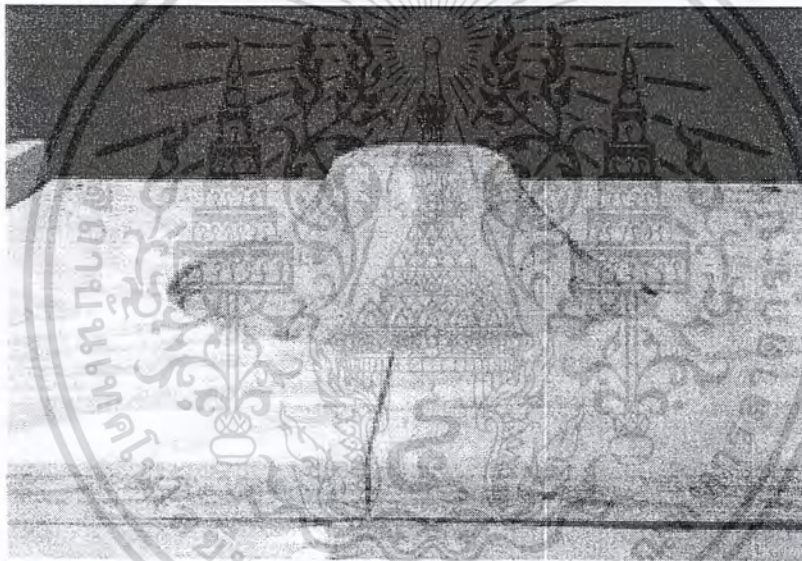
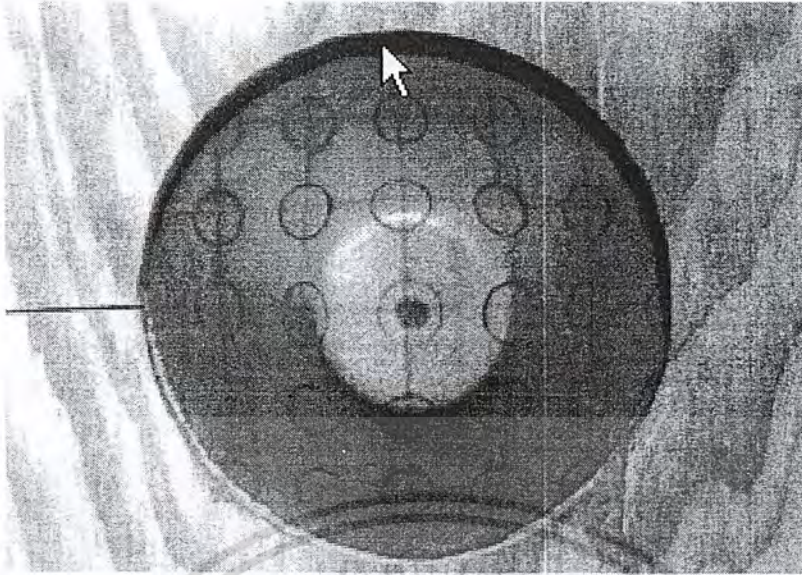
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ความลึกของ plug มีผลต่อความหนาของแผ่นพลาสติกด้านข้าง, ด้านล่าง และมุม 2D เมื่อ  $X_0 / R_0 = 1.5$  [3]

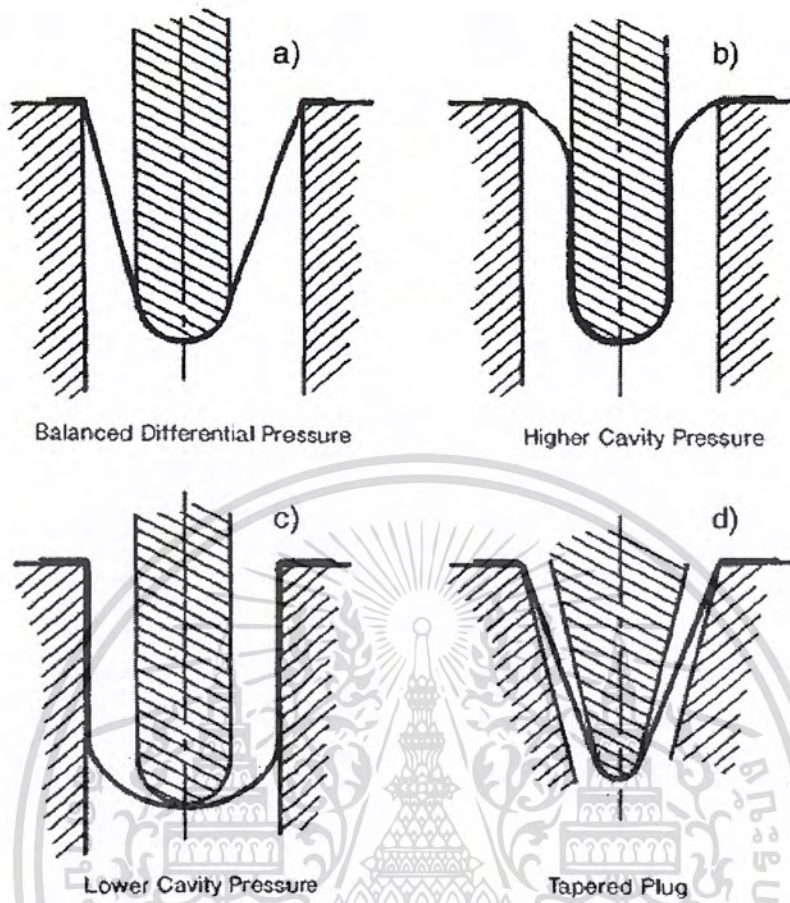
เป็นการแสดงถึงความลึกของ plug ที่มีผลต่อความหนาของแผ่นพลาสติก ในกรณีทั้งหมดนี้  $b/a = 0.7$  แต่ความลึกของ plug เป็น  $\delta/a$  มีหลายค่า จะเห็นได้ว่าความลึกของ plug เพิ่มขึ้น ค่าความหนามุม 2D ก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่ามากที่สุดและความหนาตรงบริเวณก้นก็มากขึ้นด้วย เหตุผลสำหรับผลกระทบระยะหลังคือ แผ่นพลาสติกเมื่อสัมผัสกับ plug จะถูกเคลื่อนที่ลงไปยังบริเวณก้นโดยปราศจากการขยายตัว plug จะเคลื่อนที่ต่อไปยังช่องว่างบริเวณก้น การขยายตัวเกิดขึ้นน้อยก่อนที่แผ่นพลาสติกจะสัมผัสกับช่องว่างบริเวณก้น

การขยายตัวของแผ่นพลาสติกจะเป็นการเสียรูปด้วยความเค้น องค์ประกอบทั้งหมดของผิวหน้าแผ่นพลาสติกจะไม่มี การเสียรูป เมื่อพิจารณาในทิศทาง การขยายตัว โดยไม่คำนึงถึงขอบเขตของการเสียรูป รูปที่ 2.20 แสดงการขยายตัวของแผ่นพลาสติกเมื่อใช้ plug กด โดยสังเกตจากการเปลี่ยนรูปของวงกลม



รูปที่ 2.20 การใช้ plug กดและแผ่นพลาสติกขยายตัวด้วยความเค้น (บน) แสดงขีดจำกัดการเสีรูปของวงกลม (ล่าง) แสดงการเสีรูปอย่างสมบูรณ์ของวงกลม[3]

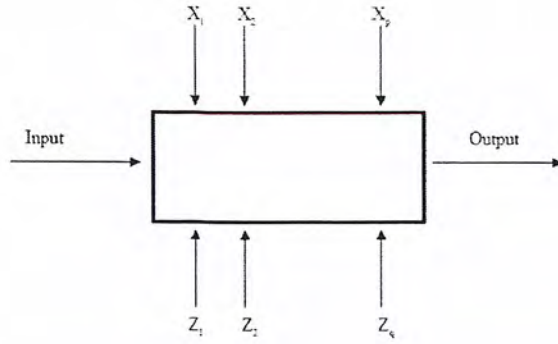
ถ้าแผ่นพลาสติกมีการขยายตัวระหว่างปลายของ plug กับขอบของแม่พิมพ์ ความดันบนด้านข้างของแผ่นพลาสติกจะต้องมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.21a. ถ้าความดันในช่องว่างมีมาก จะทำให้แผ่นพลาสติกมีแรงต่อต้านด้านข้างของ plug จะส่งผลให้การขึ้นรูปของชิ้นงานบริเวณพื้นที่ด้านข้างจะบาง ดังรูปที่ 2.21 b. ถ้าความดันในช่องว่างน้อย แผ่นพลาสติกจะมีแรงต่อต้านด้านข้างของแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 2.21 c. ทำให้ประสิทธิภาพของ plug ลดลงและชิ้นงานที่ได้ออกมาจะมีบริเวณมุมบาง ซึ่งการควบคุมตำแหน่งของชิ้นงานให้มีค่า  $b/a$  เข้าใกล้ 1 นั้นค่อนข้างยาก สำหรับแผ่นพลาสติกที่ใช้ plug รูปร่างเรียวยแหลมกด แผ่นพลาสติกจะขยายตัวไปยังแม่พิมพ์และมีผนังด้านข้างที่เรียวยาวเท่ากัน ดังรูปที่ 2.21 d.



รูปที่ 2.21 ผลกระทบของความดันที่แตกต่างกันในการขึ้นรูประหว่างใช้ plug กดช่วย[3]

## 2.6 หลักการออกแบบการทดลอง [5]

การทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะมีผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรมการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ



รูปที่ 2.22 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ [5]

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System) รูปที่ 2.22 แสดงรูปของกระบวนการของระบบส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ และเมื่อมีสิ่งที่มีป้อนเข้า (Input) สู่วกระบวนการ กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง

จากรูป 2.22 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ  $X_1, X_2, \dots, X_p$  และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$

### 2.6.1 ปัจจัยในการผลิต

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

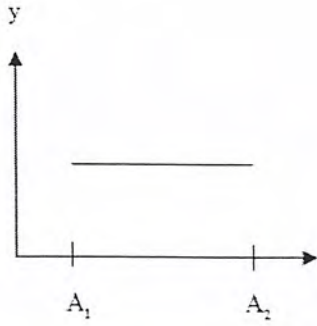
#### 2.6.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่เราสนใจ

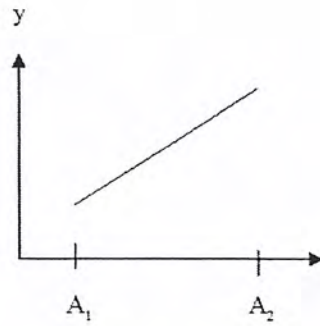
#### 2.6.1.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก ผู้ทดลองควรกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้ออกมาเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อปัจจัยได้หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลองจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้  $y$  เป็นค่าความหายากของชิ้นงาน A เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.23



ปัจจัย A ไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์



ปัจจัย A มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2.23 อิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์ [5]

## 2.6.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  มากที่สุด
2. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  สมการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
4. กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีผลน้อยที่สุด

## 2.6.3 คำจำกัดความ

### 2.6.3.1 อิทธิพลหรือผล

อิทธิพลหรือผล (Factor) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม

### 2.6.3.2 ปัจจัย

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่เราคิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์

### 2.6.3.3 ระดับของปัจจัย

ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

### 2.6.3.4 ปัจจัยรบกวน

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กๆ น้อยๆ และไม่สามารถควบคุมได้

## 2.6.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักการในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.6.4.1 การทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Replication) คือ การทดลองซ้ำ ในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้น ให้มีความมั่นใจมากขึ้น

#### 2.6.4.2 การทำแบบสุ่ม

การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆ กันการทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
3. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Block)

#### 2.6.4.3 การบล็อก

การบล็อก (Blocking) คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลในหน่วยทดลองที่มีลักษณะหรือคุณสมบัติเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน คือในหน่วยทดลองหรือบล็อกเดียวกันจะมีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะที่หน่วยทดลองที่ต่างบล็อกกันก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันด้วยมากที่สุดด้วย เป็นการขยายขอบเขตของการทดลองกรณีที่เกิดสถานที่ในการทดลองแต่ละหน่วยห่างไกลกัน และยังลดระยะเวลาในการตั้งค่าอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในกรณีที่มีการตั้งค่าที่ใช้ระยะเวลานาน การบล็อก (Blocking) แบ่งออกได้ 2 วิธีดังนี้

1. บล็อกสมบูรณ์ (Complete Block) คือแต่ละบล็อกมีจำนวนสิ่งทดลองที่เท่ากัน
2. บล็อกไม่สมบูรณ์ (Incomplete Block) คือแต่ละบล็อกมีจำนวนสิ่งทดลองที่ไม่เท่ากัน

#### 2.6.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีในการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

##### 2.3.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา คือการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิตซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

##### 2.3.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย คือ การใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่ว่าจะมีผลต่อการทดลอง และแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายเป็นการระบุที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels), แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

1. แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดได้แน่นอน
2. แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือกำหนดค่าของปัจจัยได้

แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

#### 2.6.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้ทำการทดลองต้องมีความมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

#### 2.6.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับที่ใช้ในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็นทั้งนี้ต้องนำความเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

#### 2.6.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

#### 2.6.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการที่ถูกนำมาใช้อย่างได้ผล คือกราฟอย่างง่ายซึ่งช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของ โมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้อย่างแน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

#### 2.6.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรที่จะมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

### 2.6.6 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

#### 2.6.6.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว

แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) จะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีตเมนต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวสามารถแบ่งออกเป็นสองปัจจัยใหญ่ๆ คือ

1. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวแต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัยที่มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อยและไม่มีการควบคุม โดยการทดลองจะใช้หลักการทำแบบสุ่มและการทำซ้ำ

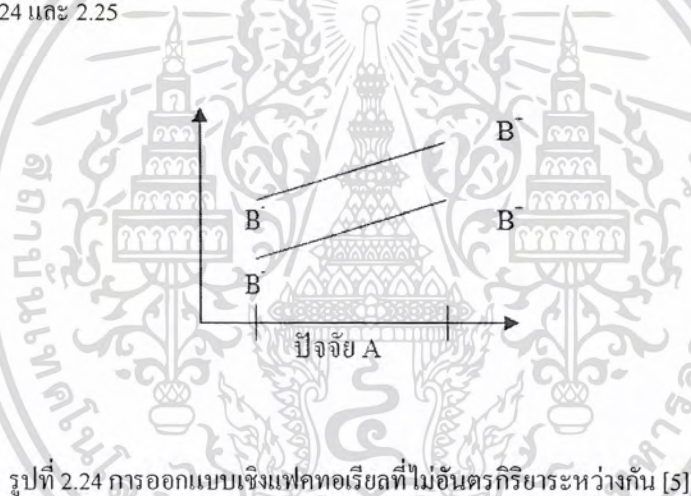
2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองและต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้งบางครั้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและสามารถควบคุมได้จึงต้องใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนนั้นออกไป

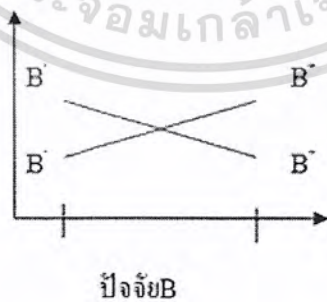
### 2.6.6.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 2 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 2 ระดับและปัจจัย C ประกอบด้วย 2 ระดับในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะประกอบด้วย การทดลองทั้ง  $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ค่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.24 และ 2.25



รูปที่ 2.24 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน [5]



รูปที่ 2.25 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน [5]

จากรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าเส้นของ B' และ B จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสองในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าเส้นของ B' เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $B^-$  ไม่ขนานกันและสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีก ดังต่อไปนี้

#### 1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ ( $2^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์  $-1$  หรือ  $(-)$  และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์  $1$  หรือ  $(+)$  การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยหลายๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่ละเอียดต่อไป

#### 2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $3^k$ ( $3^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $3^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์  $-1$  หรือ  $(-)$  ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์  $0$  หรือ  $(0)$  และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์  $1$  หรือ  $(+)$  การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

#### 3. การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการออกแบบที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

#### 2.6.6.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ มีดังนี้

1. แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
2. แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เด็ค (Nested Design)
3. แผนการออกแบบการทดลองสปีทพล็อต (Split-Plot Design)
4. แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

#### 2.6.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล} \quad (2.21)$$

สมการ 2.21 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยที่ทำ

ให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีแค่เพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่ เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลในแต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปร โดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E \quad (2.22)$$

โดยที่

$SS_T$  คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

$SS_{Tr}$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

$SS_E$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS/DF \quad (2.23)$$

เมื่อ

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความผันแปรคือ

$$F = MS_{Tr} / MS_E \quad (2.24)$$

เมื่อ

$MS_{Tr}$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

$MS_E$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบกับสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า  $F_{\alpha \cdot v_1 \cdot v_2}$

$$\text{ถ้า } F \geq F_{\alpha \cdot v_1 \cdot v_2} \text{ ปฏิเสธ } H_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ถ้า } F \leq F_{\alpha, v_1, v_2} \text{ ยอมรับ } H_0$$

เมื่อ

$\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

$V_1$  คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

$V_2$  คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

### 2.6.7.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้นด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.25)$$

โดยที่

$i = 1, 2, 3, \dots, a$  (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$  (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$  (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$  (จำนวนซ้ำ)

และ

$y_{ijkl}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย A

$\beta_j$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย B

$\gamma_k$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{ik}$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{jk}$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกริยาของปัจจัย A, B และ C

$\epsilon_{ijkl}$  คือ ค่าที่เกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากการทดลอง

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณแล้วใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน[4]

Source variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a - 1	SS <sub>A</sub> /DF	MS <sub>A</sub> /MS <sub>E</sub>
B	SS <sub>B</sub>	b - 1	SS <sub>B</sub> /DF	MS <sub>B</sub> /MS <sub>E</sub>
C	SS <sub>C</sub>	c - 1	SS <sub>C</sub> /DF	MS <sub>C</sub> /MS <sub>E</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub> /DF	MS <sub>AB</sub> /MS <sub>E</sub>
AC	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	SS <sub>AC</sub> /DF	MS <sub>AC</sub> /MS <sub>E</sub>
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	SS <sub>BC</sub> /DF	MS <sub>BC</sub> /MS <sub>E</sub>
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	SS <sub>ABC</sub> /DF	MS <sub>ABC</sub> /MS <sub>E</sub>
Error	SS <sub>E</sub>	abc(n-1)	SS <sub>E</sub> /DF	
Total	SS <sub>T</sub>	Abcn-1		

โดยที่ ค่า Sum Square คือ

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{k\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk\dots\dots}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijkl}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2\dots\dots}{abcn}$$

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ (F - Distribution) โดยกำหนดค่า  $\alpha$  ก่อน หากค่า  $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น  $(1 - \alpha)\%$  แต่ถ้าหาก  $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น

2.6.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \tag{2.26}$$

โดยที่

$Y_{ij}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย

$\varepsilon_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ดังนี้  $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต  $j$  ของระดับที่ 1 ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \tag{2.27}$$

โดยที่

$\hat{y}_{ij}$  คือ ค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \hat{y} + (\hat{y}_i - \hat{y}) \\ &= \hat{y}_i \end{aligned}$$

จากสมการค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่  $i$  ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประการ คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

- การทดสอบแบบไคร้สแควร์ ( $\chi^2$  - Goodness of Fit Test)
- การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ - สมิร์นอฟ (Kolmogorov - Simirnov Test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วคุณลักษณะของข้อมูลว่าการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

3. การตรวจสอบความเสถียรของการแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน หรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

## 2.6.8. แบบจำลองการถดถอย

### 2.6.8.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Single Linear Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (2.28)$$

### 2.6.8.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Linear Regression Model) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_{1,x_1} + \varepsilon \quad (2.29)$$

### 2.6.8.3 แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น

แบบจำลองการถดถอยอย่างอื่น (Other Regression Model) ได้แก่

1. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งเอกโปเนนเชียล (Exponential) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1} + \varepsilon \quad (2.30)$$

2. แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งไฮเพอโบลิก (Hyperbolic) ที่มี 1 ตัวแปรอิสระ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1/x + \varepsilon \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบจำลองการถดถอยเส้น โคลง โพลี โนเมียล (Polynomial) ดีกรี n ที่มี 1 ตัวแปรอิสระซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon \quad (2.32)$$

วิธีการหาแบบจำลองการถดถอย ทำได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปของเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นตรงได้แล้ว จึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรไปอยู่รูปเดิม

เมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R - Square) แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม ดังนั้น R - Square จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า R - Square มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่น R - Square = 0.1 แสดงว่า 10% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 90% ที่เหลืออาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ถ้า R - Square มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น R - Square = 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลืออาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

ถ้า R - Square มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า R - Square มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

### 2.6.9 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานทางด้านวิศวกรรมสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

- การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ
- การลดความผันแปรของกระบวนการและกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ
- การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา
- การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรมทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรมจะรวมถึงสิ่งดังต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อ

#### ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

## 2.7 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab

การทำกรทดลองแบบแฟคทอเรียลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนที่จะทำการใช้ Minitab ในการออกแบบการทดลอง จะต้องมีการทำการทดลองเบื้องต้นมาก่อนเพื่อการวางแผน เช่น จะต้องทำการหาปัจจัยที่คาดว่ามอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง (ดูเรื่องภาพรวมการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล)
2. ใน Minitab สามารถใช้เพื่อสร้างตัวแบบการทดลองใหม่หรือใช้กับเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว
  - 1) ใช้คำสั่ง Create Factorial Design เพื่อสร้างตัวแบบ Full หรือ Fraction Factorial และ Plackett-Burman
  - 2) ใช้คำสั่ง Define Custom Factorial Design เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบกรณีที่มีเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว ซึ่งคุณสามารถที่จะปรับเปลี่ยนและกำหนดคอลลัมน์ของปัจจัยและค่าต่างๆ เพื่อให้เหมาะกับตัวแบบและการวิเคราะห์ต่อไป
3. ใช้คำสั่ง Modify Design เพื่อทำการแก้ไขข้อปัจจัย เปลี่ยนค่าระดับปัจจัย การสร้างค่าซ้ำ (Replicate) การทำการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) สำหรับ Two-Level Design สามารถใช้สร้าง Fold Design เพิ่มรันที่จุด Axial Points และเพิ่มรันที่ Center Point
4. ใช้คำสั่ง Display Design เพื่อทำการเปลี่ยนลำดับการทดลองของแต่ละรันและหน่วย ทั้งแบบที่เป็นค่าจริง (Uncoded) หรือค่ารหัส (Code) ซึ่ง Minitab ได้แสดงค่าไว้ของแต่ละปัจจัยในเวิร์คชีท
5. ทำการทดลองและเก็บค่าข้อมูล จากนั้นใส่ค่าข้อมูลในเวิร์คชีทของ Minitab
6. ใช้คำสั่ง Analyze Factorial Design เพื่อวิเคราะห์ค่าตอบสนอง (Response) ใช้คำสั่ง Analyze Variability เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สำหรับกรณีที่มีการทำซ้ำ
7. ในกรณีที่จะทำการพล็อตกราฟเพื่อดูอิทธิพล (Effects) ใช้คำสั่ง Factorial Plots เพื่อทำการสร้างกราฟที่แสดงได้ทั้งอิทธิพลหลัก (Main Effects) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effects) และ Cube Plot สำหรับตัวแบบ Two-Level สามารถใช้คำสั่ง Contour/Surface Plots เพื่อแสดงกราฟ Contour และ Surface
8. ถ้าต้องการทำการหาค่าที่ดีที่สุดของค่าตอบสนอง ใช้คำสั่ง Response Optimizer หรือคำสั่ง Overlaid Contour Plot เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุดโดยทำทั้งแบบตัวเลขและพิจารณาจากกราฟ

หมายเหตุ: ในแต่ละการทดลอง อาจจะมีลำดับของขั้นตอนต่างกัน หรืออาจจะมีการทำซ้ำที่ขั้นตอนใดเพิ่ม หรือบางขั้นตอนอาจจะไม่ต้องทำ

# บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทำกรทดลองเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย ทำให้ทราบถึงหลักการการทำงานของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย เครื่องมือวัดค่าความหนาของผนังชิ้นงานและยังรู้ถึงกรรมวิธีในการทดลอง วัสดุต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ส่วนการทดลองนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย สามารถแบ่งอุปกรณ์และวิธีการทดลองได้ดังต่อไปนี้

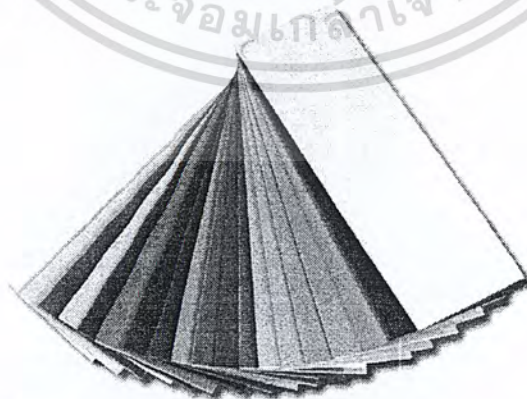
1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. หลักการออกแบบการทดลอง
4. ขั้นตอนการทดลอง

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

#### 3.1.1 ชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงานทดลองคือแผ่นพลาสติกพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดี ทนทานต่อความร้อน มีค่าความเหนียวและค่าความแข็งแรงสูง ง่ายต่อการขึ้นรูป และมีคุณภาพของพื้นผิวภายนอกชิ้นงานที่ดี ขนาดที่ใช้คือ 1.8x2.5 m หนา 1 mm แสดงดังรูปที่ 3.1(คุณสมบัติพลาสติก HIPSแสดงในภาคผนวก ข )

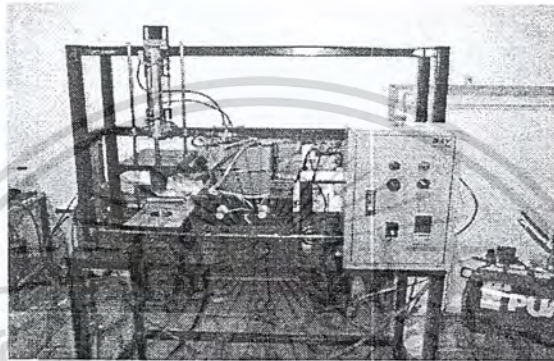


รูปที่ 3.1 แผ่นพลาสติกพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง [4]

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย

เป็นเครื่องขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการทำเทอร์โมฟอร์ม โดยการผสมผสาน ของเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (straight vacuum forming) และเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้เข้ด้นแผ่นพลาสติกก่อนแล้วใช้แรงดันสุญญากาศ (vacuum drape forming) ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความลึก และถอดชิ้นงานออกจากเข้ได้ง่ายขึ้น เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ ทำงานโดยการตั้งค่าอุณหภูมิที่จะให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิถึงที่กำหนด ผู้ใช้จะกดปุ่มเพื่อสั่งการ PLC ให้เครื่องทำงานอย่างเป็นขั้นตอน



รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย

ทางด้านขวามือประกอบด้วยตู้แผงวงจรทำหน้าที่สั่งการทำงาน PLC และตั้งค่าการทำงานของเครื่องให้ความร้อน

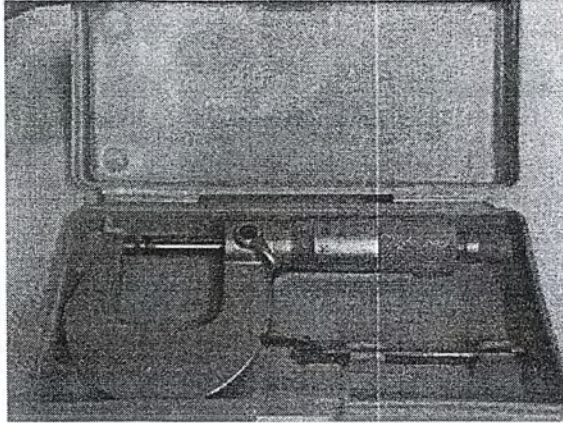
ส่วนกลางเครื่องประกอบด้วยเครื่องให้ความร้อน เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด และเริ่มสั่งการทำงาน เครื่องให้ความร้อนจะเลื่อนมาทางซ้ายมือเพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก

ทางด้านซ้ายมือประกอบด้วยตะแกรงเพื่อวางแผ่นพลาสติก สายดูดอากาศ และส่วนของแม่พิมพ์ ตัวช่วยกด เมื่อแผ่นพลาสติกอ่อนตัวถึงระยะเวลาในการขึ้นรูป เครื่องให้ความร้อนจะเลื่อนกลับตำแหน่งเดิม ส่วนของแม่พิมพ์ ตัวช่วยกดและตัวดูดอากาศจะเริ่มทำงาน เมื่อขึ้นรูปได้แล้วนั้น ตะแกรงจะยกตัวสูงขึ้นเพื่อถอดชิ้นงานจากแม่พิมพ์

การทำงานทั้งหมดถูกควบคุมโดย PLC ใช้แรงลมและกระบอกลมในการเคลื่อนไหวให้เป็นไปตามตำแหน่งที่กำหนด เช่นการเคลื่อนไหวของตัวช่วยกด ตะแกรง และเครื่องให้ความร้อน

#### 3.2.2 ไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาผิวของชิ้นงาน

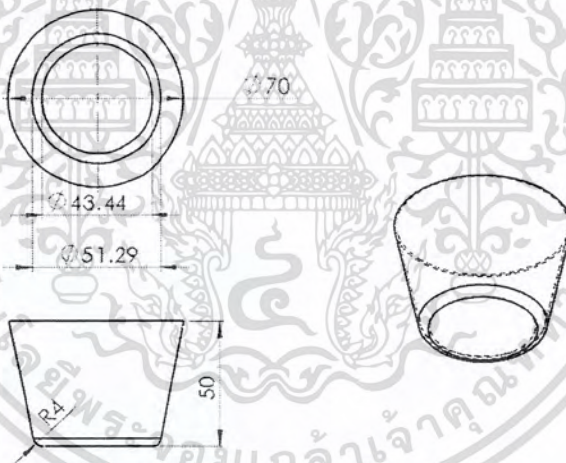
ไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาของผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้วัดค่าความหนาของผนังชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย เป็นไมโครมิเตอร์ยี่ห้อ Mitutoyo สามารถวัดความหนาได้ขนาด 0-25 mm ละเอียดถึง 0.01 mm ซึ่งลักษณะของไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาผิวของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไมโครมิเตอร์วัดค่าความหนาของชิ้นงาน

### 3.3 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์

3.3.1. รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน กำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป โดยกำหนดรูปร่างเป็นรูป แก้วน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากแก้ว 70 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้นแก้ว 43 มิลลิเมตร และมีความสูง แก้ว 50 มิลลิเมตร โดยที่ขอบก้นแก้วจะมีลักษณะโค้งเพื่อป้องกันการไหลของพลาสติก จึงทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน

### 3.3.2. ออกแบบแม่พิมพ์

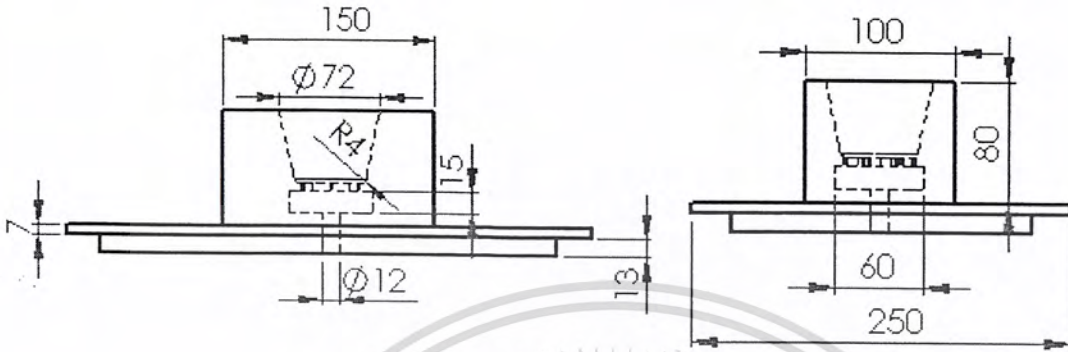
#### 3.3.2.1 ออกแบบฐานรองแม่พิมพ์

ออกแบบฐานรองแม่พิมพ์ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 250 x 370 x 20 มิลลิเมตร จากนั้นทำการกัดบริเวณ ฐานด้านล่างให้เป็นบ่ามีขนาด 185 x 305 x 13 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการติดตั้งตัวแม่พิมพ์เข้ากับโต๊ะ ซึ่งตัวโต๊ะ ได้ถูก ออกแบบไว้ให้เป็นช่อง ดังนั้นชิ้นบนจะเหลือความหนาแค่ 7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5

#### 3.3.2.2 ออกแบบเขี้ยวแม่พิมพ์

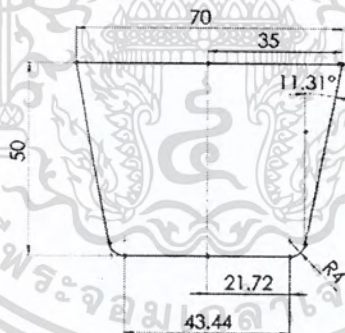
เขี้ยวแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์ตัวเมียในการทดลองนี้ออกแบบเป็นรูปถ้วย เพื่อประโยชน์ในการศึกษาความ แตกต่างของความหนาของผนังเมื่อขึ้นรูปด้วยปัจจัยการขึ้นรูปต่าง ๆ กัน และง่ายในการจัดสร้าง ส่วนของแม่พิมพ์เป็น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 150 x 70 มิลลิเมตร เนื่องจากความสูงของ Heater สูงจากพื้นโต๊ะวางแม่พิมพ์ 100 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร ดังนั้นจึงออกแบบแม่พิมพ์ให้มีความสูง 70 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการชนของ Heater กับแม่พิมพ์ ในขณะที่ Heater เคลื่อนที่มาให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก โดยทำการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีแค่เบ้าเดียว เพื่อป้องกันการแตกหักของแม่พิมพ์เมื่อเกิดการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.5

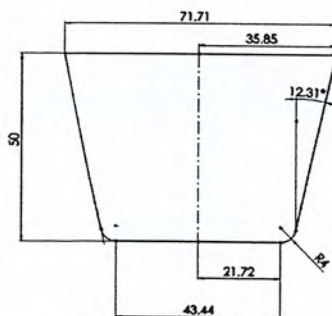


รูปที่ 3.5 รูปร่างและขนาดของแม่พิมพ์

มุมเอียงของผนังเบ้าแม่พิมพ์ที่ตัวเมียจะต้องมากกว่ามุมเอียงของชิ้นงานที่ต้องการจริงประมาณ  $0^{\circ}$ - $2^{\circ}$  หรือค่าเฉลี่ยประมาณ  $1^{\circ}$  โดยชิ้นงานจริงที่ต้องการขึ้นรูปมีมุมเอียงของผนังชิ้นงาน  $11.31^{\circ}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จึงออกแบบแม่พิมพ์ให้มีมุมเอียงของผนังแม่พิมพ์มากกว่าอยู่  $1^{\circ}$  ซึ่งจะได้เป็น  $12.31^{\circ}$  ดังรูปที่ 3.7 ดังนั้นแม่พิมพ์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากแก้ว 72 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้นแก้ว 43 มิลลิเมตร มีความสูง 50 มิลลิเมตร เท่ากับชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 ขนาดมุมเอียงของผนังชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 ขนาดมุมเอียงของผนังเบ้าแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีส่วนโค้งของแม่พิมพ์จะต้องมีค่ามากกว่าความหนาแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป แต่ค่าที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปสุญญากาศที่ดีที่สุด ควรจะเป็น 4 เท่าของความหนาแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งในที่นี้ความหนาแผ่นพลาสติก 1 มิลลิเมตร ดังนั้นรัศมีส่วนโค้งของแม่พิมพ์จะมีขนาด 4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รัศมีส่วนโค้งของแม่พิมพ์

3.3.2.3 ออกแบบการเจาะรูเพื่อดูดสุญญากาศ

เจาะรูที่บริเวณก้นเบ้า เพื่อเป็นช่องที่มีไว้สำหรับอากาศที่ถูกดูด โดยท่อดูดสุญญากาศจากถัง vacuum มายังบริเวณภายในเบ้าของแม่พิมพ์ โดยรูที่เจาะนั้นจะเจาะเป็นรูขนาดเล็ก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และทำการเจาะบริเวณขอบกันแก้วที่มีลักษณะโค้งเป็นวงกลม

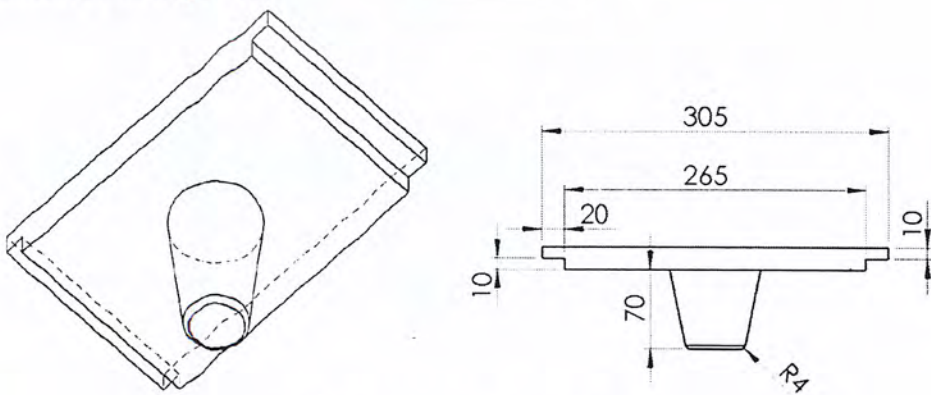
3.3.2.4 ส่วนช่องกระจายลมดูดสุญญากาศ

ส่วนด้านล่างของแม่พิมพ์ที่อยู่ระหว่างช่องที่ใช้ต่อสายจากถังดูดอากาศกับรูขนาดเล็ก vent hole บริเวณก้นเบ้า จะทำการเจาะช่องขนาด  $60 \times 60 \times 15$  มิลลิเมตร เพื่อเป็นช่องในการกระจายสุญญากาศจากสาย vacuum ผ่านเข้าไปยัง vent hole ของเบ้า ซึ่งช่องดังกล่าวจะช่วยในการกระจายสุญญากาศจากสาย vacuum ให้กระจายไปยัง vent hole ของเบ้า ได้อย่างทั่วถึง

3.3.3 ออกแบบตัวช่วยกด

3.3.3.1 ออกแบบฐานยึดตัวช่วยกด

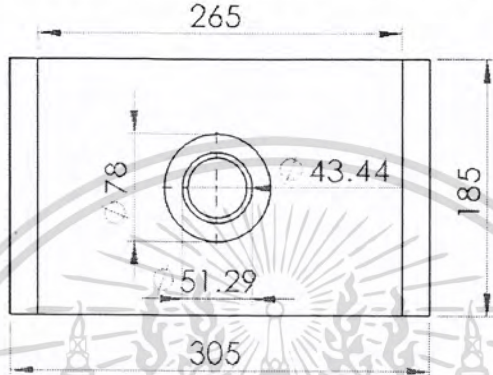
ออกแบบตัวยึดติดกับตัวช่วยกด เป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด  $185 \times 305 \times 20$  มิลลิเมตร จากนั้นทำการกัดบริเวณด้านข้างให้เป็นบ่ามีขนาด  $185 \times 20 \times 10$  มิลลิเมตร ทั้งสองข้างทั้งซ้ายและขวา เพื่อใช้เป็นบริเวณยึดกับแท่นสำหรับยึดติดกับตัวช่วยกด ดังรูปที่ 3.9



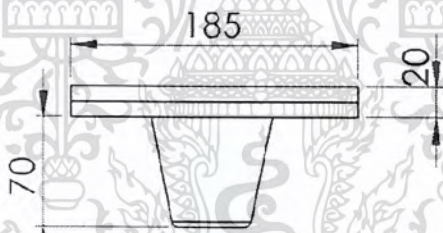
รูปที่ 3.9 ขนาดและลักษณะของตัวกด

### 3.3.3.2 ออกแบบตัวช่วยกด

ตัวช่วยกดหรือแม่พิมพ์ตัวผู้ เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการศึกษาการทำงานของเครื่องในระบบสุญญากาศแบบใช้ตัวช่วยกด ซึ่งตัวช่วยกดในการทดลองนี้ทำจากวัสดุชนิดเดียวกับแม่พิมพ์เนื่องจากเหตุผลเดียวกัน ลักษณะของตัวช่วยกดมีรูปร่างคล้ายกับแม่พิมพ์ โดยทำการออกแบบตัวช่วยกด ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากแก้ว ด้านที่ติดกับฐานยึดติดตัวช่วยกดเท่ากับ 70 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปลายสุดของตัวช่วยกด 43 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 เนื่องจากกระบอกลมสามารถเคลื่อนตัวลงมาได้สูงสุด 20 เซนติเมตร จึงทำการออกแบบให้ ตัวช่วยกด มีขนาดความสูง 70 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.11 ตัวช่วยกดจะสามารถกดแผ่นพลาสติกให้มีความลึก 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกด



รูปที่ 3.11 ความสูงของตัวกด

### 3.4 หลักการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง จะต้องทำตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้เตรียมเอาไว้แล้ว และนำค่าความหนาของผิวชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสุญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยมาหาความสม่ำเสมอของผนังชิ้นงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรว่าตัวแปรใดมีผลต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานมากน้อยเพียงใด เนื่องจากว่ามีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกันอยู่หลายระดับที่ต้องทำการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีด้วยกัน 2 ระดับ คือ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูป ประกอบด้วยระดับต่ำ  $110^{\circ}\text{C}$  และระดับสูง  $130^{\circ}\text{C}$  ปัจจัยที่ 2 คือ ลำดับการใช้แท่งกดและตัวดูดสุญญากาศในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นรูป ประกอบด้วย ระดับต่ำ ใช้แท่งกวดก่อนตัวดูดสูญญากาศ ระดับสูง ใช้ตัวดูดสูญญากาศก่อนแท่งกวด ปัจจัยที่ 3 คือ ความเร็วของแท่งกวดที่ใช้ในการขั้นรูป ประกอบด้วย ระดับต่ำ 0.235 m/s ระดับสูง 0.341 m/s ทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะ ประกอบด้วยปัจจัยละ 2 ระดับ กล่าวคือเมื่อทำการจัดทรีตเมนต์ (Treatment) ในการทดลอง จะเรียกผลการจัดทรีตเมนต์ เหล่านี้ว่า Treatment Combination เช่น การทดลองมี 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นจะเรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด  $3 \times 2^2$  ดังนั้น Combination ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 24 ดังนั้นหลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

### 3.4.1 แนวทางการวิเคราะห์ปัญหา

หาแนวความคิดที่เกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่า ความสม่ำเสมอของผนัง ชิ้นงานที่ผ่านการขั้นรูปด้วยเครื่องขั้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกวดช่วย โดยปัจจัยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

#### 3.4.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราต้องหาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลองเพื่อป้องกันความผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขั้นรูป, ลำดับการใช้แท่งกวดและตัวดูดสูญญากาศในการขั้นรูป, ความเร็วของแท่งกวดที่ใช้ในการขั้นรูป และขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง เป็นต้น ในการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขั้นรูป, ลำดับการใช้แท่งกวดและตัวดูดสูญญากาศในการขั้นรูป และ ความเร็วของแท่งกวดที่ใช้ในการขั้นรูป โดยทั้ง 3 ปัจจัยนี้สามารถปรับเปลี่ยนระดับตามที่ได้กำหนดได้อย่างแม่นยำ

#### 3.4.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วนั้นจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ทำให้ผลการทดลองผิดพลาดไปและสร้างความไม่น่าเชื่อถือในกับรูปแบบ (Model) ของการทดลอง โดยปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความผิดพลาดของเครื่องขั้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกวดช่วย และความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง

### 3.4.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกมาทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ หรือ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขั้นรูป, ลำดับการใช้แท่งกวดและตัวดูดสูญญากาศในการขั้นรูป, ความเร็วของแท่งกวดที่ใช้ในการขั้นรูป แล้วทำการกำหนดของระดับพารามิเตอร์ ซึ่งในการกำหนดระดับของพารามิเตอร์นี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ว่าควรจะมีค่าเป็นเท่าไร โดยกำหนดค่าจากการคำนวณ จากคู่มือในการขั้นรูปพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์ม คุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง และคู่มือของเครื่องขั้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกวดช่วย โดยนำค่าต่างๆนี้มาเปรียบเทียบกันแล้วเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดและเป็นค่าที่ไม่เกิดอันตรายต่อผู้ทดลองในระหว่างทำการทดลอง และรักษาอายุการใช้งานของเครื่องขั้นรูปเครื่องนี้อีกด้วย

### 3.4.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  โดยที่ 2 หมายถึง ระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ส่วน k หมายถึงจำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้ มีด้วยกันทั้งหมด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ปัจจัยและจะทำการตัดสินใจว่าจะทำการบล็อกกิง (Blocking) หรือทำการสุ่ม (Randomization) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง และจะทดลองซ้ำ (Replication) 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลอง ดังนั้นจำนวนครั้งในการทดลองครั้งนี้มีทั้งหมดเท่ากับ  $3 \times 2^3 = 24$  ครั้ง 8 แบบทดลอง

#### 1.4.4 แผนการทดลอง

การทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้วโดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.1 ขั้นตอนแรกเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้จำนวนครั้ง 24 ครั้งตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว นำมาเก็บค่าความหนาของผนังชิ้นงาน โดยแบ่งเป็น 4 บริเวณ คือ บริเวณขอบด้วยด้านบน บริเวณกึ่งกลางด้วยบริเวณด้านล่าง และบริเวณก้นด้วย

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ	สูง
อุณหภูมิที่ให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูป (°C)	130	150
ลำดับการทำงานของแม่พิมพ์ (แท่งกดและตัวดูดสูญญากาศ)	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	ใช้แท่งกดกดก่อน
ความเร็วของแท่งกด (วินาที)	0.235 m/s	0.341 s

#### 3.4.4.1 การทดลองเพื่อหาตัวแปรตอบสนอง

ในขั้นตอนการทดลองเพื่อหาตัวแปรตอบสนองนี้ จะแสดงถึงค่าพารามิเตอร์และระดับขั้นตอนการออกแบบการทดลอง โดยที่ค่าของพารามิเตอร์จะใช้หมายเลขเป็นตัวกำหนดระดับ คือ ระดับสูงแทนด้วย (+) ระดับต่ำแทนด้วย (-) โดยการออกแบบการทดลองจะมีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง ดังแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เมตริกการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ $2^3$						
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยของผนังชิ้นงาน		
	A	B	C	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	+	+	+			
2	+	+	-			
3	+	-	+			
4	+	-	-			
5	-	+	+			
6	-	+	-			
7	-	-	+			
8	-	-	-			

ในการทำการทดลองแต่ละครั้งต้องมีการสุ่มลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อไม่เป็นการลำเอียงของระดับปัจจัย โดยการสุ่มของลำดับขั้นของการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การสุ่มอย่างสมบูรณ์

ลำดับการทดลอง	หมายเลขลำดับที่		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1.	8	23	19
2.	13	1	9
3.	4	14	17
4.	6	10	2
5.	11	15	18
6.	20	22	24
7.	16	3	12
8.	7	21	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ง่ายขึ้น ในการเก็บค่าจากผลการทดลองจึงจำเป็นต้องสร้างตารางบันทึกผลการทดลองขึ้นมาโดยแสดง ดังตารางที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละครั้งจะวัดค่าความหนาของผนังขึ้น โดยแบ่งเป็น 4 บริเวณในส่วนของแก้วน้ำ แล้วนำค่าที่ได้ จากการวัดมาบันทึกในตาราง

ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดลองอย่างง่าย

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 <sup>3</sup>							
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยของผนังขึ้นงาน			
	อุณหภูมิ (°C)	ลำดับการทำงานของแม่พิมพ์	ความเร็วของแท่งกด (วินาที)	ด้านบน	กึ่งกลาง	ด้านล่าง	กันถ้วย
1.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				
2.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
3.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
4.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
5.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
6.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
7.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
8.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
9.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				
10.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
11.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
12.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
13.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				
14.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
15.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
16.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
17.	150	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.341 m/s				
18.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
19.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
20.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				
21.	130	ใช้ตัวดูดดูดก่อน	0.235 m/s				
22.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				
23.	150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s				
24.	130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อที่จะให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ และในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ให้เหมือนกันในทุกขั้นตอน ทุกอุปกรณ์ โดยรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

#### 3.5.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

##### 3.5.1.1 เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก่อนการทดลองต้องเตรียมวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ขนาดตามกำหนดของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย โดยจะตัดขนาดแผ่นพลาสติกพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง ความหนา 1mm. ให้มีขนาด 280 x 350mm เพื่อความละเอียดของการขึ้นรูปชิ้นงาน

#### 3.5.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

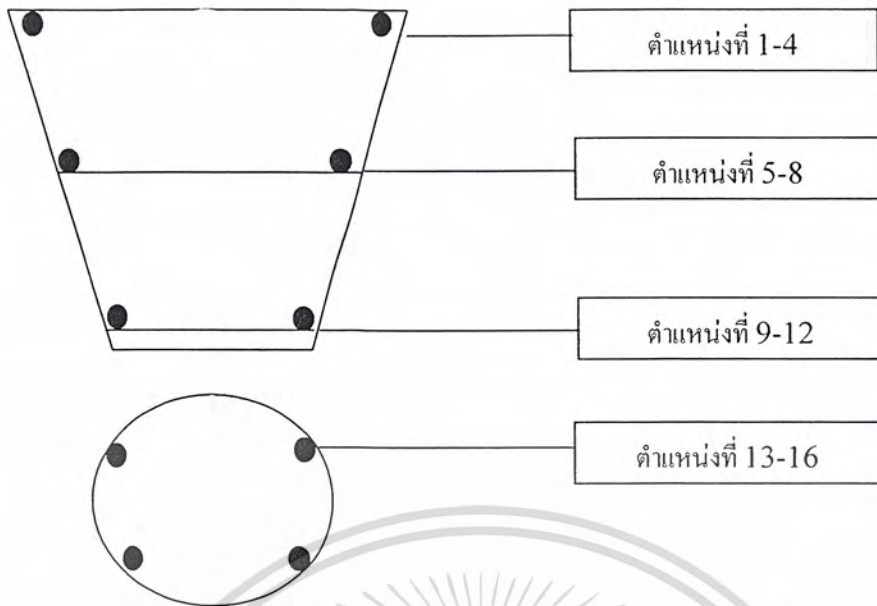
1. ทำการเตรียมแผ่นพลาสติกให้ได้ขนาดที่กำหนด
2. ทำความสะอาดแผ่นพลาสติกที่ได้ขนาด และนำมาใส่ที่ตะแกรงจับยึดชิ้นงานของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
3. ตั้งค่าตามระดับต่างๆที่กำหนดของแต่ละปัจจัยที่เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย
4. ทำการขึ้นรูปพลาสติก
5. นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาวัดเพื่อหาค่าการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานนี้

#### 3.5.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

การวัดค่าการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วยหลังการทดลองมีวิธีดังนี้

##### 3.5.3.1 การวัดค่าความหนาของผนังชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาทดสอบความหนาของผนัง โดยใช้ไมโครมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการวัด โดยบริเวณทดสอบแบ่งเป็น 4 บริเวณ คือ บริเวณขอบด้วยด้านบน บริเวณกึ่งกลางด้วย บริเวณด้านล่าง และบริเวณก้นด้วย โดยวัดค่าระดับละ 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งต่างๆ ในการทดสอบการกระจายตัวของความหนา



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน จึงทำการวัดค่าความหนาผนังของแก้วพลาสติก ณ ตำแหน่งต่างๆกัน เพื่อหาการกระจายความหนาของผนังชิ้นงาน และเป็นการกำหนดตำแหน่งที่คงที่เพื่อความแม่นยำของค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเก็บค่าความหนาผนังชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ

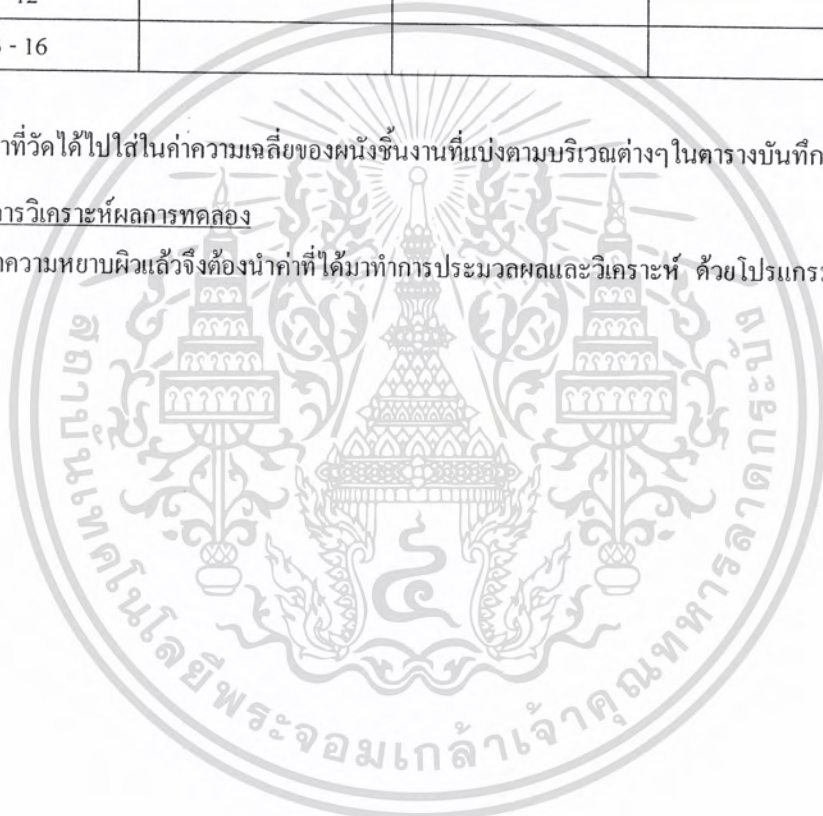
ตำแหน่งที่	ลำดับการทดลอง โดยมีปัจจัยต่างๆเป็นตัวกำหนด		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 - 4			
5 - 8			
9 - 12			
13 - 16			

แล้วนำค่าที่วัดได้ไปใส่ในค่าความเฉลี่ยของผนังชิ้นงานที่แบ่งตามบริเวณต่างๆ ในตารางบันทึกผลการทดลอง

### 3.5.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าความหนาผิวแล้วจึงต้องนำค่าที่ได้มาทำการประมวลผลและวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม minitab 15

for windows



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับผลการทดลอง การวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้ว คือ ใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล แบบ  $2^k$  ซึ่งมี 3 ปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิก่อนการขึ้นรูป ลำดับการใช้แท่งกด และความเร็วของแท่งกด โดยเลือกวิธีการทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง และจะทดลองซ้ำ (Replication) 3 ครั้ง ดังนั้นจำนวนครั้งในการทดลองครั้งนี้ทั้งหมดเท่ากับ  $3 \times 2^3 = 24$  ครั้ง 8 แบบทดลองและได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล ดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองทุกการทดลองเป็นที่เสร็จสิ้นแล้ว ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

อุณหภูมิ	ลำดับการทำงาน	ความเร็ว	ด้านบน	กึ่งกลาง	ด้านล่าง	กันด้วย
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.778	0.128	0.578	0.518
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.848	0.100	0.600	0.683
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.733	0.125	0.580	0.505
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.590	0.145	0.475	0.443
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.753	0.123	0.575	0.493
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.580	0.138	0.458	0.430
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.598	0.140	0.483	0.410
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.845	0.103	0.635	0.700
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.858	0.135	0.655	0.680
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.800	0.135	0.655	0.643
150	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.341 m/s	0.770	0.098	0.633	0.663
130	ใช้แท่งกดกดก่อน	0.235 m/s	0.923	0.145	0.673	0.648

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง (ต่อ)

150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.980	0.355	0.068	0.015
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.953	0.340	0.083	0.045
150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.850	0.350	0.063	0.028
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.938	0.298	0.068	0.025
150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.998	0.373	0.075	0.015
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.915	0.313	0.075	0.023
150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.980	0.358	0.073	0.018
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.915	0.343	0.085	0.050
150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.885	0.335	0.065	0.028
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.915	0.343	0.080	0.055
150	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.341 m/s	0.890	0.350	0.060	0.020
130	ใช้ตัวคูดูดก่อน	0.235 m/s	0.853	0.313	0.068	0.028

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

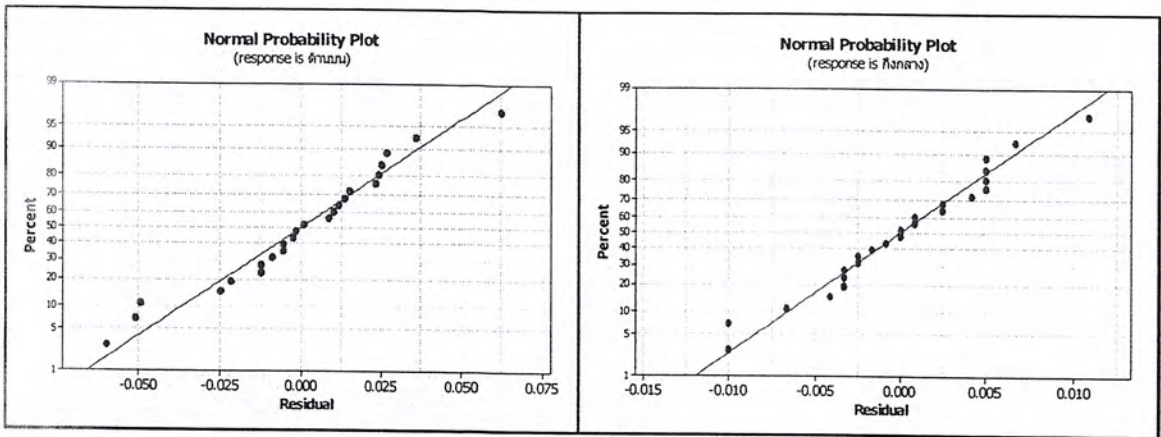
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการเก็บค่าความหนาผนังชิ้นงาน จากนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติจะใช้โปรแกรม MINITAB ดังนี้

##### 4.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนประกอบไปด้วย การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความหนาผนังชิ้นงาน และการตรวจสอบความแปรปรวนของความหนาผนังชิ้นงานมีค่าคงที่ ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานสามารถพิจารณาได้จากกราฟ ดังนี้

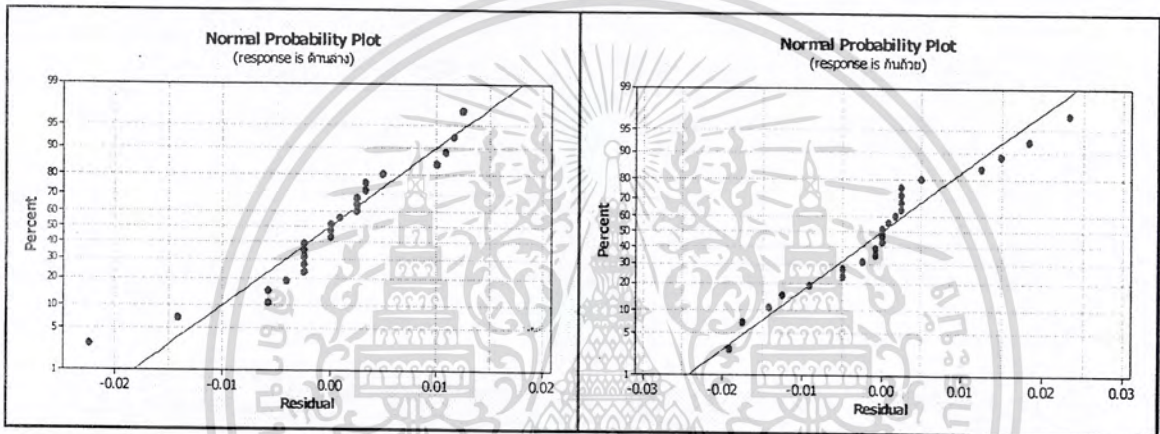
##### 1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความหนาผนังชิ้นงาน

การตรวจสอบความหนาผนังชิ้นงานว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ พิจารณาได้จากกราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน หากข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งจากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของความหนาผนังชิ้นงานบริเวณต่างๆที่มีการแจกแจงแบบปกติ พบว่ามีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นความหนาผนังชิ้นงานจึงมีการแจกแจงแบบปกติ



ก. ด้าบน

ข. กึ่งกลาง



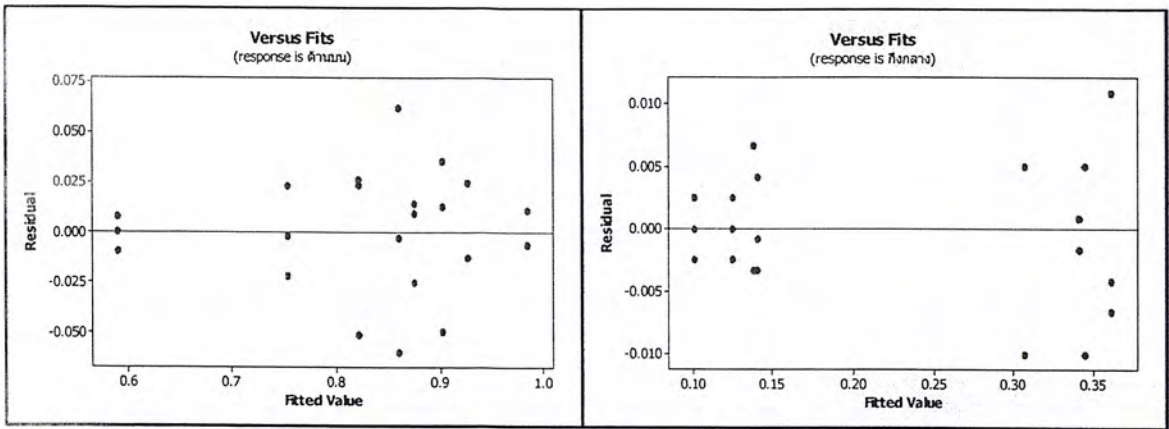
ค. ด้าล่าง

ง. กึ่งล่าง

รูปที่ 4.1 ความน่าจะเป็นของความหนาผนังชิ้นงานที่มีการแจกแจงแบบปกติ

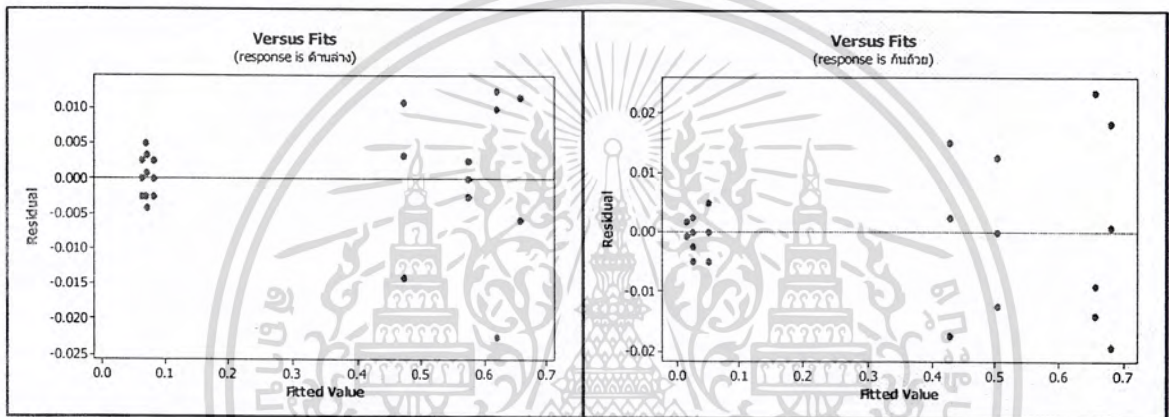
2. การตรวจสอบความแปรปรวนของความหนาผนังชิ้นงานมีค่าคงที่

พิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนายจากสมการ ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ ลักษณะของกราฟจะต้องไม่ปรากฏรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งจากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผนังชิ้นงานบริเวณต่างๆ พบว่าลักษณะของกราฟมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ความแปรปรวนของความหนาผนังชิ้นงานจึงมีค่าคงที่



ก. ด้านบน

ข. กึ่งกลาง



ค. ด้านล่าง

ง. ก้นถ้วย

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผนังชิ้นงานบริเวณต่างๆที่มีค่าคงที่

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์และทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน และการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลที่ได้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสม (Model Adequacy Checking) ผ่านการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual Analysis) ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าไม่มีการละเมิดสมมติฐาน

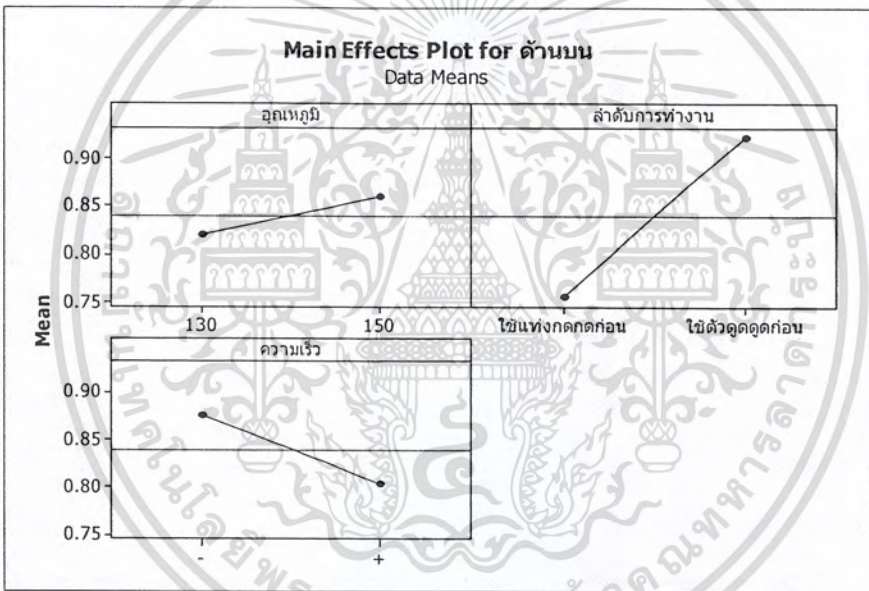
##### 4.2.2.1 พิจารณาระยะด้านบน

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน คือ ปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ( $P\text{-Value} < \alpha$ )

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB

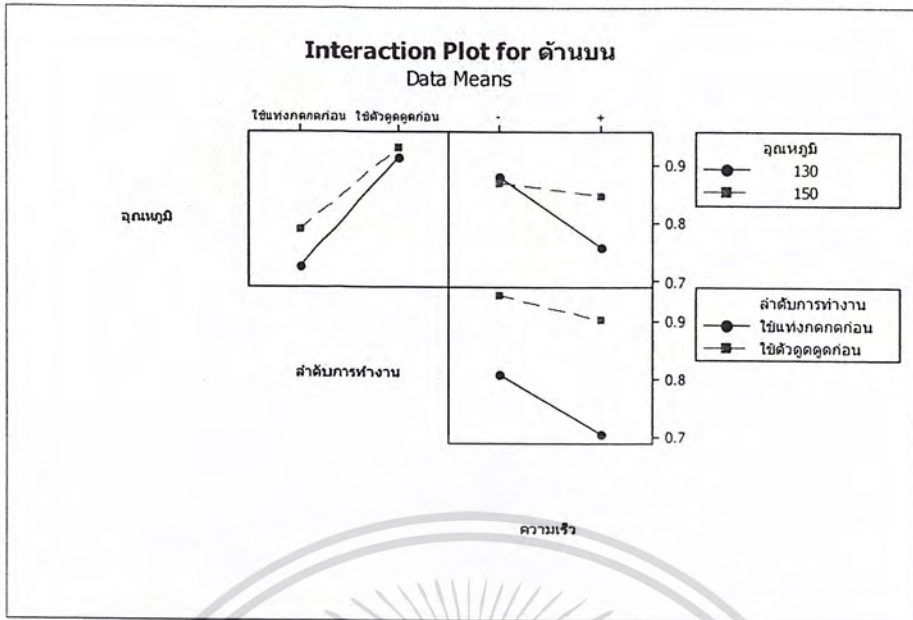
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.20691	0.20691	0.068970	59.54	0.000
2-Way Interactions	3	0.02378	0.02378	0.007925	6.84	0.004
3-Way Interactions	1	0.08431	0.08431	0.084313	72.79	0.000
Residual Error	16	0.01853	0.01853	0.001158		
Pure Error	16	0.01853	0.01853	0.001158		
Total	23	0.33353				

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยหลักของบริเวณด้านบน พบว่าอุณหภูมิจะแปรผันตรงกับความหนาผนังชิ้นงาน ลำดับการทำงานจะแปรผันตรงกับความหนาผนังชิ้นงานเช่นเดียวกัน และความเร็วจะแปรผกผันกับความหนาผนังชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการทำงาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการทำงานกับความเร็ว ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์มีผลกระทบร่วมทุกปัจจัย



รูปที่ 4.4 ผลกระทบร่วมระหว่างลูกหนูมีกับลำดับการใช้งาน ลูกหนูมีกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้นในตารางที่ 4.3 พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 94.44% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ( $R^2_{adj}$ ) เท่ากับ 92.01% เมื่อพิจารณาจากค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นชิ้นงาน ได้แก่ ลูกหนูมี ลำดับการทำงาน ความเร็ว ลูกหนูมีและความเร็ว ลำดับการทำงานและความเร็ว ลูกหนูมีและลำดับการทำงานและความเร็ว ซึ่งปัจจัยร่วมระหว่างลูกหนูมีและลำดับการทำงานไม่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน เพราะว่าเนื่องจากไม่มีความสำคัญทางสถิติ คือ P-value มีค่ามากกว่า  $\alpha$

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.83927	0.006947	120.81	0.000
ลูกหนูมี	0.03938	0.01969	0.006947	2.83	0.012
ลำดับการทำงาน	0.1646	0.08323	0.006947	11.98	0.000
ความเร็ว	0.07229	-0.03615	0.006947	-5.20	0.000
ลูกหนูมี*ลำดับการทำงาน	-0.02354	-0.01177	0.006947	-1.69	0.110
ลูกหนูมี*ความเร็ว	0.05021	0.02510	0.006947	3.61	0.002
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.02979	0.01490	0.006947	2.14	0.048
ลูกหนูมี*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.11854	-0.05927	0.006947	-8.53	0.000

พิจารณาตารางที่ 4.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการต้นแบบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = 0.56365 + 0.00197A + 0.24802B - 0.38760C + 0.00251AC + 0.84469BC - 0.00593 \quad (4.1)$$

กำหนดให้ y คือ ความหนาของผนังชิ้นงาน

A คือ อุณหภูมิ

B คือ ลำดับการทำงาน

C คือ ความเร็ว

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น

Term	Coef
Constant	0.563646
อุณหภูมิ	0.00196875
ลำดับการทำงาน	0.248021
ความเร็ว	-0.387604
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00117708
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.00251042
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.844688
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00592708

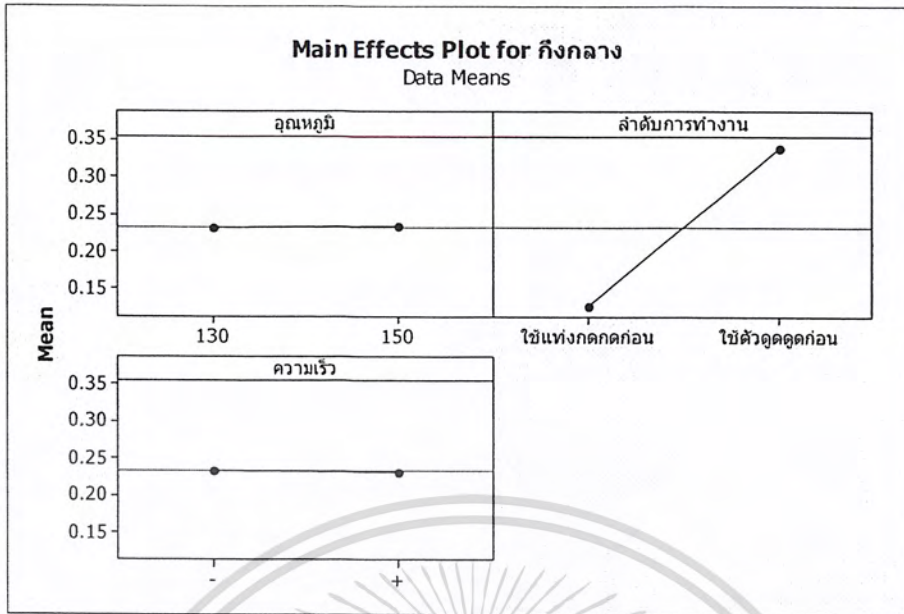
#### 4.2.2.2 พิจารณาบริเวณกึ่งกลาง

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน คือ ปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ( $P\text{-Value} < \alpha$ )

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จาก โปรแกรม MINITAB

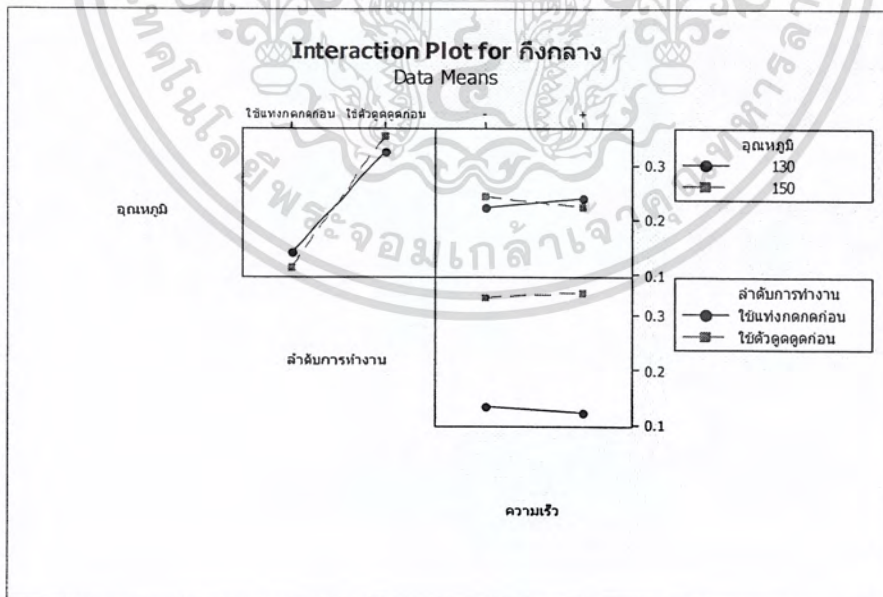
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.272015	0.272015	0.0906715	2401.23	0.000
2-Way Interactions	3	0.007577	0.007577	0.0025257	66.89	0.000
3-Way Interactions	1	0.000204	0.000204	0.0002042	5.41	0.034
Residual Error	16	0.000604	0.000604	0.0000378		
Pure Error	16	0.000604	0.000604	0.0000378		
Total	23	0.280400				

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยหลักของบริเวณกึ่งกลาง พบว่าอุณหภูมิและความเร็วไม่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน ลำดับการทำงานจะแปรผันตรงกับความหนาผนังชิ้นงาน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์มีผลกระทบร่วมทุกปัจจัย



รูปที่ 4.6 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการ ใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการ ใช้งานกับความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น ในตารางที่ 4.6 พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 99.78% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ( $R^2_{adj}$ ) เท่ากับ 99.69% เมื่อพิจารณาจากค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน ได้แก่ ลำดับการทำงาน อุณหภูมิและลำดับการทำงาน อุณหภูมิและความเร็ว ลำดับการทำงานและความเร็ว อุณหภูมิและลำดับการทำงานและความเร็ว ซึ่งปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิและความเร็ว ไม่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน เพราะฉะนั้นเนื่องจากไม่มีความสำคัญทางสถิติ คือ P-value มีค่ามากกว่า  $\alpha$

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.232500	0.001254	185.36	0.000
อุณหภูมิ	0.000833	0.000417	0.001254	0.33	0.744
ลำดับการทำงาน	0.212917	0.106458	0.001254	84.87	0.000
ความเร็ว	-0.001250	-0.000625	0.001254	-0.50	0.625
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	0.027917	0.013958	0.001254	11.13	0.000
อุณหภูมิ*ความเร็ว	-0.019583	-0.009792	0.001254	-7.81	0.000
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.010000	0.005000	0.001254	3.99	0.001
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.005833	-0.002917	0.001254	-2.33	0.034

พิจารณาตารางที่ 4.7 จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการต้นแบบได้ดังนี้

$$y = 0.22667 - 0.08896B + 0.00140AB - 9.79167 \times 10^{-4}AC + 0.04583BC - 2.91667 \times 10^{-4}ABC \quad (4.2)$$

กำหนดให้ y คือ ความหนาของผนังชิ้นงาน

A คือ อุณหภูมิ

B คือ ลำดับการทำงาน

C คือ ความเร็ว

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น

Term	Coef
Constant	0.226667
อุณหภูมิ	0.000041667
ลำดับการทำงาน	-0.0889583
ความเร็ว	0.136458
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	0.00139583
อุณหภูมิ*ความเร็ว	-9.79167E-04
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0458333
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-2.91667E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

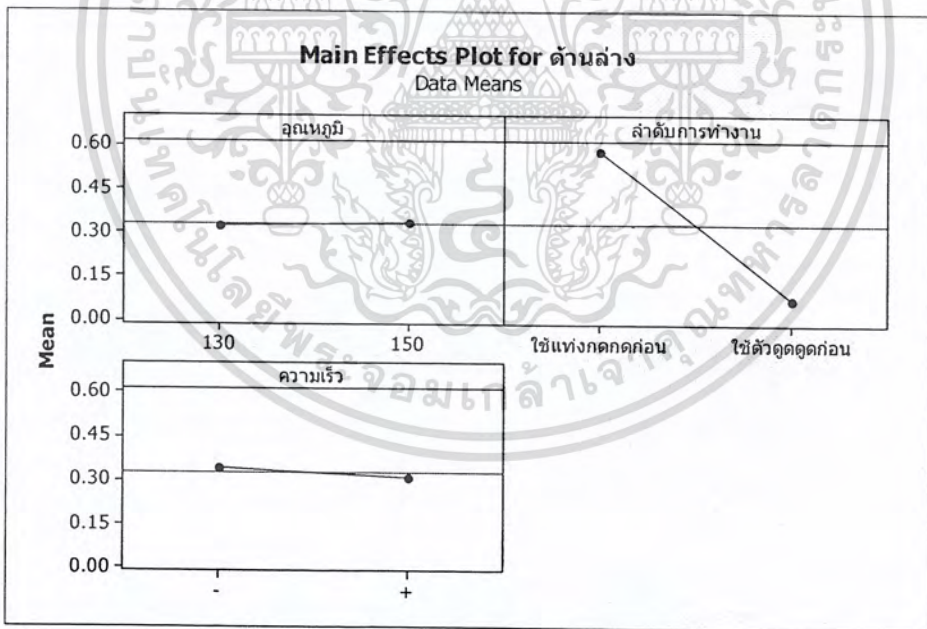
4.2.2.3 พิจารณาบริเวณด้านล่าง

จากตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน คือ ปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ( $P\text{-Value} < \alpha$ )

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB

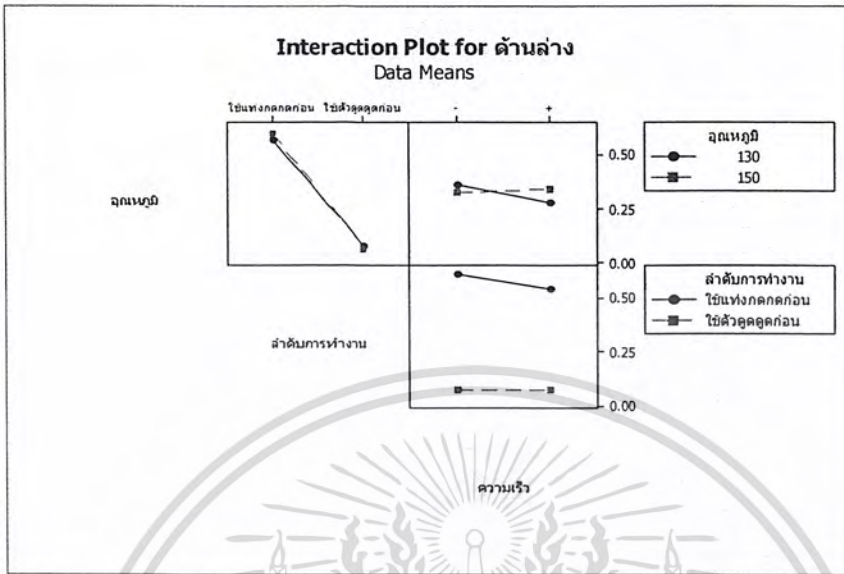
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.57788	1.57788	0.525961	6010.98	0.000
2-Way Interactions	3	0.02785	0.02785	0.009285	106.11	0.000
3-Way Interactions	1	0.02454	0.02454	0.024544	280.50	0.000
Residual Error	16	0.00140	0.00140	0.000088		
Pure Error	16	0.00140	0.00140	0.000088		
Total	23	1.63168				

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยหลักของบริเวณด้านล่าง พบว่าอุณหภูมิแปรผันตรงกับ ความหนาผนังชิ้นงาน ลำดับการทำงานจะแปรผกผันกับความหนาผนังชิ้นงาน และความเร็วจะแปรผกผันกับความ หนาผนัง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์มีผลกระทบร่วมทุกปัจจัย



รูปที่ 4.8 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น ในตารางที่ 4.9 พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 99.91% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ( $R_{adj}^2$ ) เท่ากับ 99.88% เมื่อพิจารณาจากค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ลำดับการทำงาน ความเร็ว อุณหภูมิและลำดับการทำงาน อุณหภูมิและความเร็ว ลำดับการทำงานและความเร็ว อุณหภูมิและลำดับการทำงานและความเร็ว

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น

Estimated Effects and Coefficients for ด้านล่าง (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.3274	0.001909	171.46	0.000
อุณหภูมิ	0.0123	0.0061	0.001909	3.22	0.005
ลำดับการทำงาน	-0.5115	-0.2557	0.001909	-133.93	0.000
ความเร็ว	-0.0352	-0.0176	0.001909	-9.22	0.000
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.0215	-0.0107	0.001909	-5.62	0.000
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.0531	0.0266	0.001909	13.91	0.000
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0369	0.0184	0.001909	9.66	0.000
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.0640	-0.0320	0.001909	-16.75	0.000

พิจารณาตารางที่ 4.10 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการค้นแบบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = 0.24135 + 0.00061A - 0.10552B - 0.38948C - 0.00107AB + 0.00266AC + 0.46615BC - 0.00320ABC \quad (4.3)$$

กำหนดให้ y คือ ความหนาของผนังชิ้นงาน

A คือ อุณหภูมิ

B คือ ลำดับการทำงาน

C คือ ความเร็ว

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น

Term	Coef
Constant	0.241354
อุณหภูมิ	0.000614583
ลำดับการทำงาน	-0.105521
ความเร็ว	-0.389479
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00107292
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.00265625
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.466146
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00319792

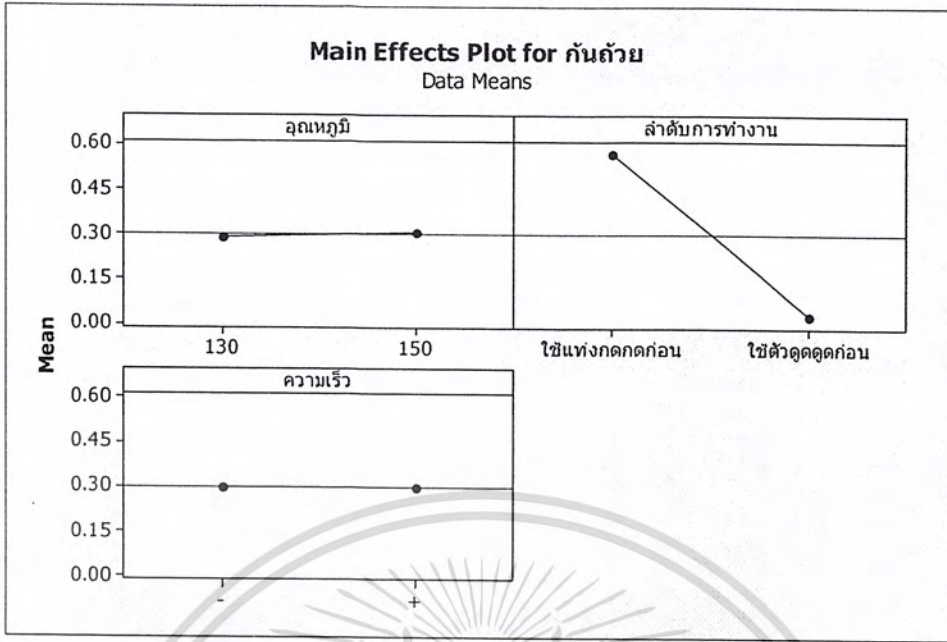
#### 4.2.3.4 พิจารณาบริเวณก้นด้วย

จากตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน คือ ปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัย เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ( $P\text{-Value} < \alpha$ )

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB

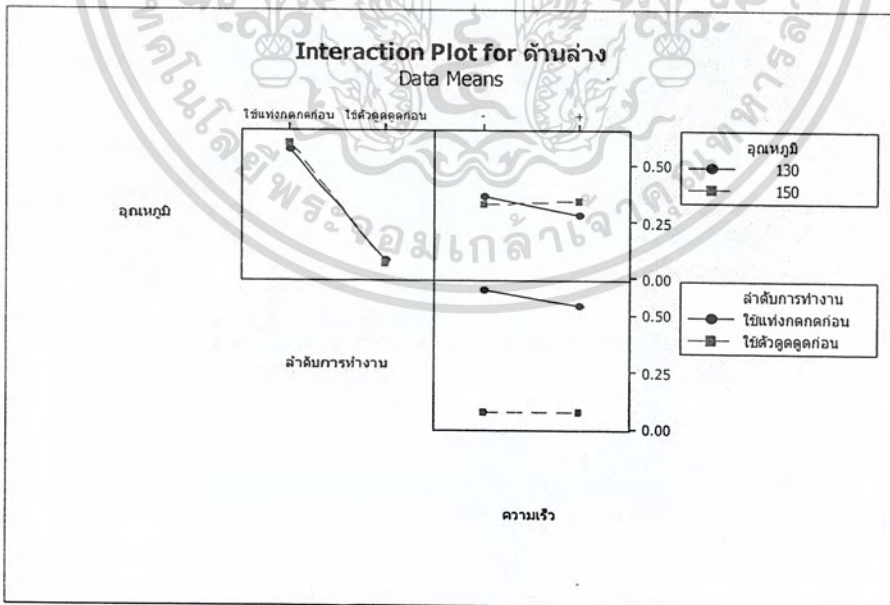
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.74339	1.74339	0.581129	3737.91	0.000
2-Way Interactions	3	0.06686	0.06686	0.022286	143.35	0.000
3-Way Interactions	1	0.06668	0.06668	0.066676	428.87	0.000
Residual Error	16	0.00249	0.00249	0.000155		
Pure Error	16	0.00249	0.00249	0.000155		
Total	23	1.87941				

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยหลักของบริเวณก้นด้วย พบว่าอุณหภูมิแปรผันตรงกับ ความหนาผนังชิ้นงาน ลำดับการทำงานจะแปรผกผันกับความหนาผนังชิ้นงาน และความเร็วไม่มีผลต่อความหนาผนังชิ้นงาน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการทำงาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการทำงานกับความเร็ว ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์มีผลกระทบร่วมทุกปัจจัย



รูปที่ 4.10 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการทำงาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการทำงานกับความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น ในตารางที่ 4.12 พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 99.87% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ( $R^2_{adj}$ ) เท่ากับ 99.81% เมื่อพิจารณาจากค่า P- value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ลำดับการทำงาน อุณหภูมิและลำดับการทำงาน อุณหภูมิและความเร็ว ลำดับการทำงานและความเร็ว อุณหภูมิและลำดับการทำงานและความเร็ว ซึ่งปัจจัยหลักคือ ความเร็ว ไม่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน เพราะว่าเนื่องจากไม่มีความสำคัญทางสถิติ คือ P-value มีค่ามากกว่า  $\alpha$

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.2983	0.002545	117.22	0.000
อุณหภูมิ	0.0171	0.0085	0.002545	3.36	0.004
ลำดับการทำงาน	-0.5388	-0.2694	0.002545	-105.84	0.000
ความเร็ว	-0.0046	-0.0023	0.002545	-0.90	0.381
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.0342	-0.0171	0.002545	-6.71	0.000
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.0975	0.0488	0.002545	19.15	0.000
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0217	0.0108	0.002545	4.26	0.001
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.1054	-0.0527	0.002545	-20.71	0.000

พิจารณาตารางที่ 4.13 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการต้นแบบได้ดังนี้

$$y = 0.17875 + 0.00085A - 0.03020B - 0.00171AB + 0.00488AC + 0.74875BC - 0.00527ABC \quad (4.4)$$

กำหนดให้ y คือ ความหนาของผนังชิ้นงาน

A คือ อุณหภูมิ

B คือ ลำดับการทำงาน

C คือ ความเร็ว

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น

Term	Coef
Constant	0.178750
อุณหภูมิ	0.000854167
ลำดับการทำงาน	-0.0302083
ความเร็ว	-0.684792
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00170833
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.00487500
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.748750
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00527083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ว่า ถ้าพิจารณาบริเวณด้านบนปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิต่ำและลำดับการทำงาน จะไม่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน บริเวณกึ่งกลางปัจจัยหลักซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความเร็ว จะไม่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน บริเวณด้านล่างพบว่าปัจจัยทุกปัจจัยมีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน และบริเวณก้นด้วยพบว่าความเร็วเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน ซึ่งในแต่ละบริเวณมีความหนาที่แตกต่างกันไปเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆของปัจจัยนั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศแบบมีแท่งกดช่วย โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล  $2^k$  เพื่อศึกษาปัจจัยต่างที่มีผลต่อความหนาแน่นชิ้นงานและเพื่อนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบในแต่ละบริเวณของผนังชิ้นงาน เพื่อช่วยให้ทราบถึงสาเหตุของผนังชิ้นงานที่ได้ในแต่ละบริเวณไม่เท่ากันเพื่อศึกษาและแก้ไขต่อไป ซึ่งจากการออกแบบการทดลอง ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผล

จากผลการทดลองจะได้ว่าลำดับการใช้แท่งกดกดก่อนที่จะดูดสูญญากาศ จะทำให้ผนังชิ้นงานในแต่ละส่วนค่อนข้างใกล้เคียงกันซึ่งดีกว่าแบบดูดสูญญากาศแล้วค่อยใช้แท่งกด จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นชิ้นงานแต่ละบริเวณมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบแตกต่างกันไป ในส่วนบริเวณด้านบน ด้านล่าง และก้นถ้วย ความหนาแน่นชิ้นงานจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และจะแปรผกผันกับความเร็ว เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและอยู่ในช่วงที่ขึ้นรูปได้ แผ่นพลาสติกจะมีการยืดตัวที่ดีขึ้น ทำให้การกระจายตัวของความหนาแน่นทำได้ดีขึ้น โดยในบริเวณด้านบนจะมีความหนาแน่นมากกว่าส่วนอื่นมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการยืดตัวน้อยที่สุด ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากพฤติกรรมการยืดตัวของพลาสติกที่เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะเกิดการยืดตัวได้โดยง่าย เมื่อมีแรงดึงมากกระทำจึงทำให้พลาสติกยืดออกได้อย่างรวดเร็วในส่วนล่าง ในขณะที่ส่วนบนยังมีความหนาแน่นเยอะกว่า จึงส่งผลให้ส่วนบนมีความหนาแน่นมากกว่าส่วนอื่น

ในส่วนบริเวณกึ่งกลาง ความหนาแน่นชิ้นงานจะขึ้นกับลำดับการใช้แท่งกด ถ้าใช้แท่งกดกดก่อนแล้วใช้ดูดสูญญากาศทีหลัง จะส่งผลให้ความหนาแน่นชิ้นงานบางกว่าอีกกรณี เนื่องจากส่วนที่ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกกระจายความร้อนแค่บริเวณตรงกลางแผ่นเท่านั้น ไม่สามารถกระจายความร้อนได้ทั้งแผ่น ซึ่งมีผลต่อการยืดตัวของแผ่นพลาสติก และกรณีที่ใช้แท่งช่วยกดทำมาจากโลหะนั้น จะมีคุณสมบัติดูดความร้อนได้ง่าย เมื่อกดมายังแผ่นพลาสติกจึงดูดความร้อนแผ่นพลาสติกไป จึงมีผลต่อการยืดตัวของพลาสติก ทางแก้ไขคืออาจจะต้องให้ความร้อนแก่ตัวแท่งช่วยกดด้วย เพื่อรักษาอุณหภูมิของแท่งช่วยกดให้สม่ำเสมอ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถได้สมการค้นแบบ 4 สมการซึ่งไว้ใช้พยากรณ์หาค่าความหนาแน่นของผนังชิ้นงานเฉลี่ยต่อไป

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาและออกแบบส่วนจับยึดและโต๊ะวางแม่พิมพ์เพื่อลดปริมาณของเศษเหลือจากการขึ้นรูป เนื่องจากส่วนจับยึดและโต๊ะวางแม่พิมพ์เดิม มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น
2. พัฒนาระบบตรวจวัดความดันลมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ทำการออกแบบแก้ไขส่วนให้ความร้อนให้สามารถกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอตลอดทั่วแผ่นพลาสติก
4. มีการปรับปรุงถึงสูญญากาศให้มีประสิทธิภาพในการดูดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] เจริญ นาคะสรรค์. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพฯ: นิติธรรม. 2542.
- [2] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [3] R.J. Crawford, *Plastics Engineering*, third edition 1998  
<http://books.google.co.th/books?id=gHer87pMVEC&lpg=PA311&ots=oiw1li39DA&dq=Fig.%204.55%20Analysis%20of%20thermo%20forming&pg=PP1#v=onepage&q=&f=false>
- [4] คุณสมบัติแผ่นพลาสติกพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง  
<http://www.cityplastics.com.au/pdf/styrene%20data.pdf>  
[http://www.pmit.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=228:2010-04-28-03-50-41](http://www.pmit.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=228:2010-04-28-03-50-41)  
<http://www.partwell.com/products/business-unit-3/sheet-plastic/hips-high-impact-polystyrene-product.html>
- [5] ปารเมศ ชูติมา, 2545 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [6] Dominick V. Rosato, Nick R. Schott, Donald V. Rosato, *Plastics engineering. Manufacturing and Data Handbook volume 1, Fundamental processes*
- [7] Harper, C.A. *Modern Plastics Handbook*, New York : McGraw-Hill. 1994.
- [8] M. Keuerleber, B. Hegemann, A. Kech and P. Eyerer, PPS-12, Montreal, Canada, 2001
- [9] ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา หิรัญวัฒน์, 2551. การควบคุมอัตโนมัติและการควบคุมที่แอลซีเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น
- [10] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ, 2539. การออกแบบแม่พิมพ์พลาสติก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์เม็ดทรายพรินต์ติ้ง
- [11] อัมพัน เมธนาวิน, 2544. การวิเคราะห์เชิงสถิติ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ส.เอเชียเพลส
- [12] บริษัท โซลูชั่นเซ็นเตอร์ จำกัด. คู่มือการใช้ Minitab หัวข้อ "Design of Experiments". ม.ป.ป.
- [13] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องขึ้นรูป

ขนาดเครื่องขึ้นรูปร้อน	600 x 1,100 x 1,500 มิลลิเมตร
กำลังมอเตอร์	3 แรงม้า
กำลังส่วนให้ความร้อน	1.6 กิโลวัตต์
อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถผลิตได้	400 องศาเซลเซียส
ความลึกของชิ้นงานสูงสุดที่สามารถผลิตได้	70 มิลลิเมตร
ขนาดแผ่นพลาสติก	290 x 410 มิลลิเมตร
ความหนาแผ่นพลาสติก	0.03 – 1 มิลลิเมตร
พื้นที่ขึ้นรูป	100 x 100 มิลลิเมตร
ชนิดของแผ่นพลาสติก	พอลิโพรไพลีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS)
กำลังการผลิต	30 – 46 รอบต่อชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกล		
Quantity	Value	Unit
Young's modulus	1800 - 2500	MPa
Shear modulus	730 - 1050	MPa
Tensile strength	26 - 48	MPa
Elongation	25 - 60	%
Compressive strength	27.5 - 62	MPa
Fatigue	4 - 20	MPa
Bending strength	42 - 95	MPa
Impact strength	0.27 - 5	J/cm
คุณสมบัติทางกายภาพ		
Quantity	Value	Unit
Thermal expansion	34 - 70	e-6/K
Thermal conductivity	0.12 - 0.18	W/m.K
Specific heat	1340 - 1465	J/kg.K
Forming Temperature	130 - 150	°C
Service temperature	-40 - 75	°C
Density	1040 - 1050	kg/m <sup>3</sup>
Resistivity	1e+17 - 0	Ohm.mm <sup>2</sup> /m
Breakdown potential	40 - 100	kV/mm
Dielectric loss factor	0.0004 - 0.002	
Shrinkage	0.4 - 0.7	%
Water absorption	0.05 - 0.6	%
ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อม		
Quantity	Value	Unit
Eco indicator 95	2.803	mPt
EPS	1200	mELU
Ex (in) / Ex (out)	3.78494623655914	MJ/MJ
GER	100.5	MJ
Raw materials input	201.712063	Kg
Solid	0.03776	Kg
Eco indicator 99	0.488	Pt

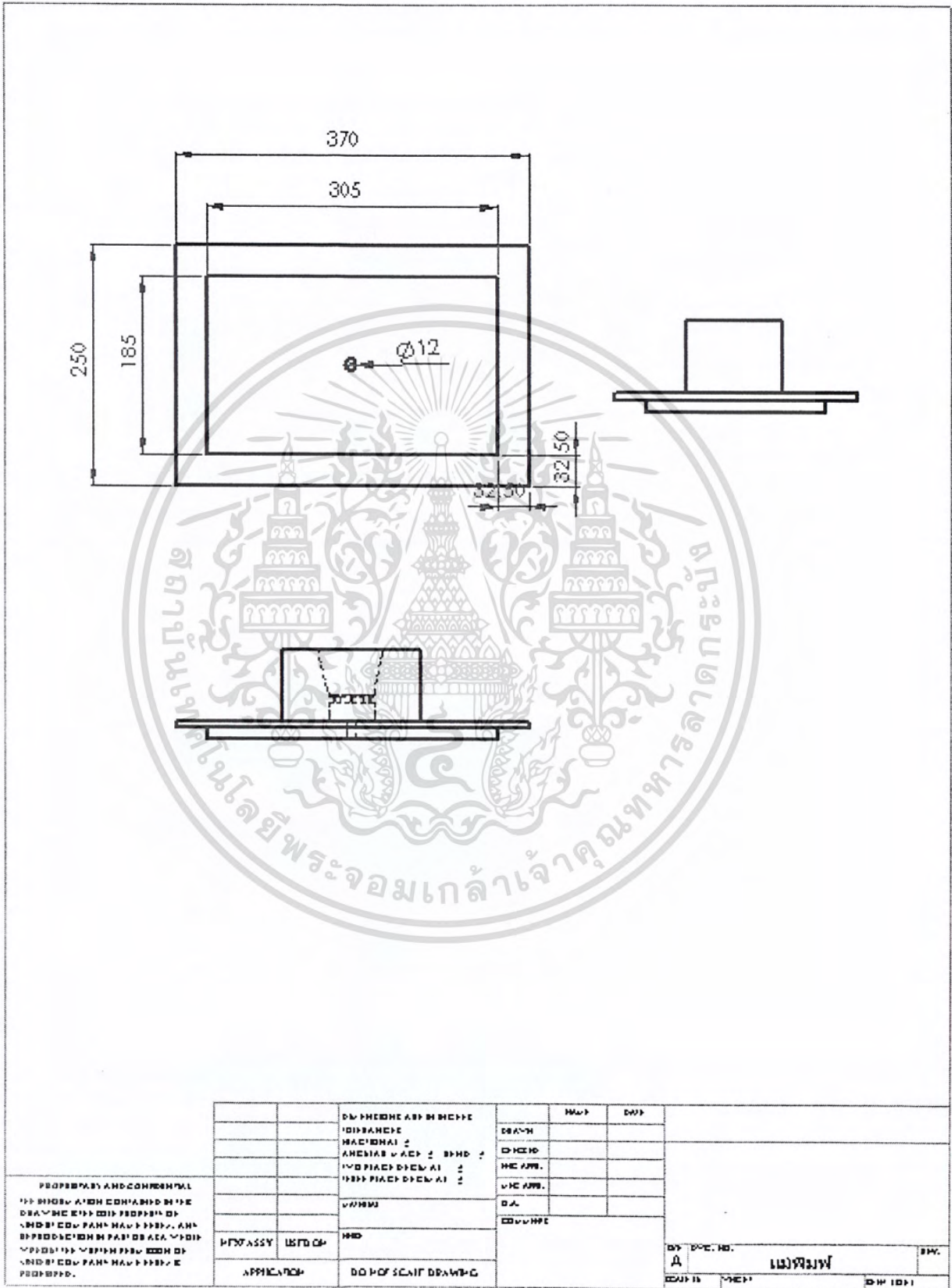
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา พจน.2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ค-1 แบบแม่พิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา พ.ร.บ. 2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ง-1 Ladder การทำงานของ PLC

ปรับเปลี่ยนวงจรควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง (PLC)

Sequence : A+ delay / A- {C+ delay} D+ delay / C- D- B+ delay B-

A = กระบอกลมที่เลื่อนส่วนให้ความร้อน

B = กระบอกลมสไลด์

C = กระบอกลมตัวปั้ม

D = ปืนสูญญากาศ

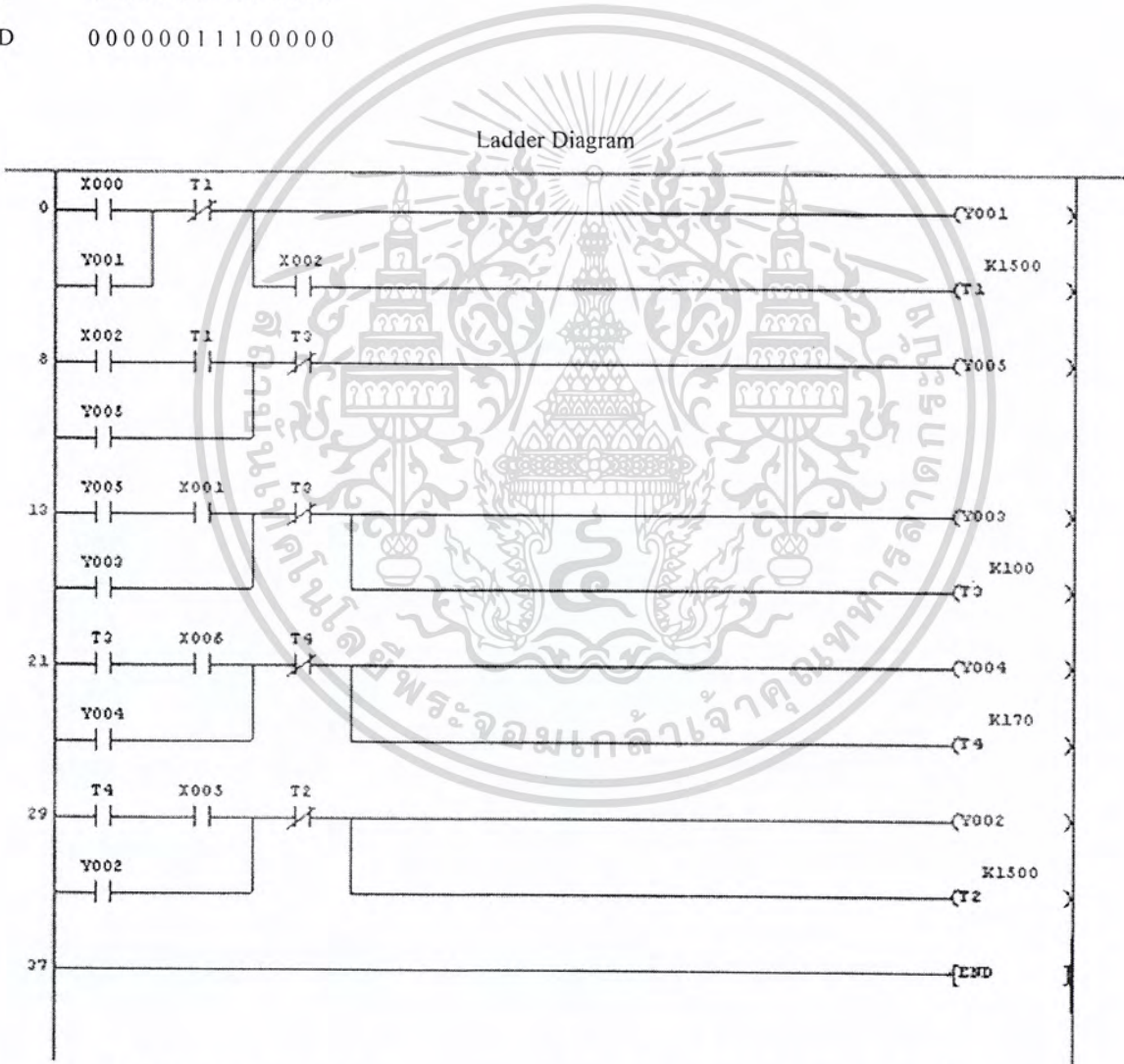
ลำดับการทำงานของเครื่อง (0 = เครื่องไม่ทำงาน , 1 = เครื่องทำงาน)

A 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

B 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0

C 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0

D 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0



Y<sub>1</sub> = โซลินอยควบคุมกระบอก A

X<sub>1,2</sub> = sensor ระบุตำแหน่งกระบอกลม A

Y<sub>2</sub> = โซลินอยควบคุมกระบอก B

X<sub>3,4</sub> = sensor ระบุตำแหน่งกระบอกลม B

Y<sub>3</sub> = โซลินอยควบคุมกระบอก C

X<sub>5,6</sub> = sensor ระบุตำแหน่งกระบอกลม C

Y<sub>4</sub> = โซลินอยควบคุมปืนสูญญากาศ

T<sub>1,2,3,4</sub> = Timer หน่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา พจน 2 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

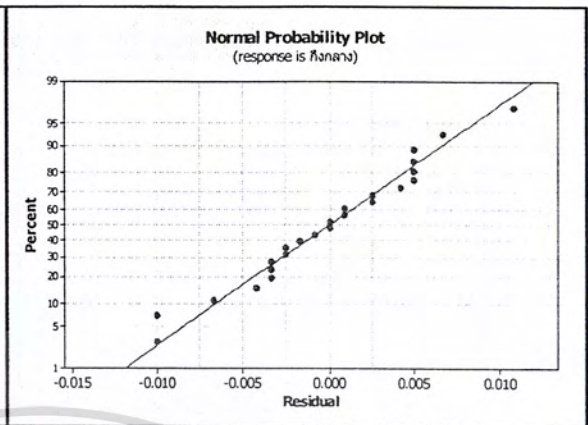
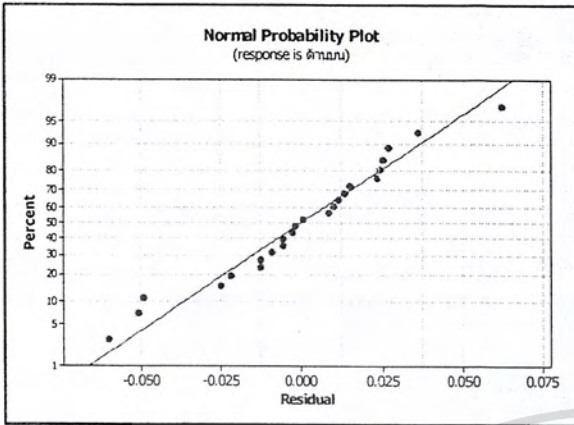
รูป จ-1 ตารางการทดลอง

อุณหภูมิ	ลำดับการทำงาน	ความเร็ว	ด้านบน	กึ่งกลาง	ด้านล่าง	กันด้วย
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.778	0.128	0.578	0.518
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.848	0.100	0.600	0.683
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.733	0.125	0.580	0.505
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.590	0.145	0.475	0.443
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.753	0.123	0.575	0.493
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.580	0.138	0.458	0.430
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.598	0.140	0.483	0.410
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.845	0.103	0.635	0.700
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.858	0.135	0.655	0.680
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.800	0.135	0.655	0.643
150	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.341 m/s	0.770	0.098	0.633	0.663
130	ใช้แท่งกดกวดก่อน	0.235 m/s	0.923	0.145	0.673	0.648
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.980	0.355	0.068	0.015
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.953	0.340	0.083	0.045
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.850	0.350	0.063	0.028
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.938	0.298	0.068	0.025
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.998	0.373	0.075	0.015
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.915	0.313	0.075	0.023
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.980	0.358	0.073	0.018
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.915	0.343	0.085	0.050
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.885	0.335	0.065	0.028
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.915	0.343	0.080	0.055
150	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.341 m/s	0.890	0.350	0.060	0.020
130	ใช้ตัวคูดคูดก่อน	0.235 m/s	0.853	0.313	0.068	0.028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

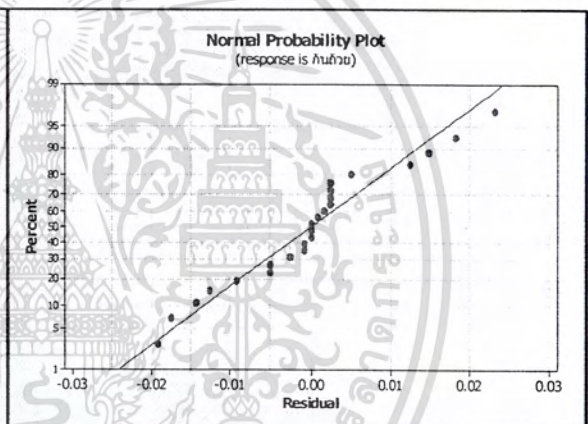
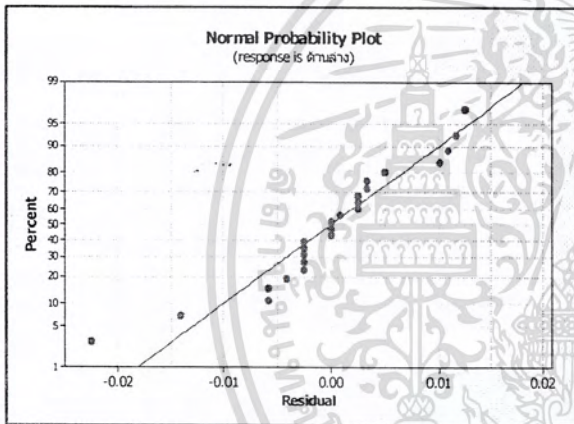


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ด้านบน

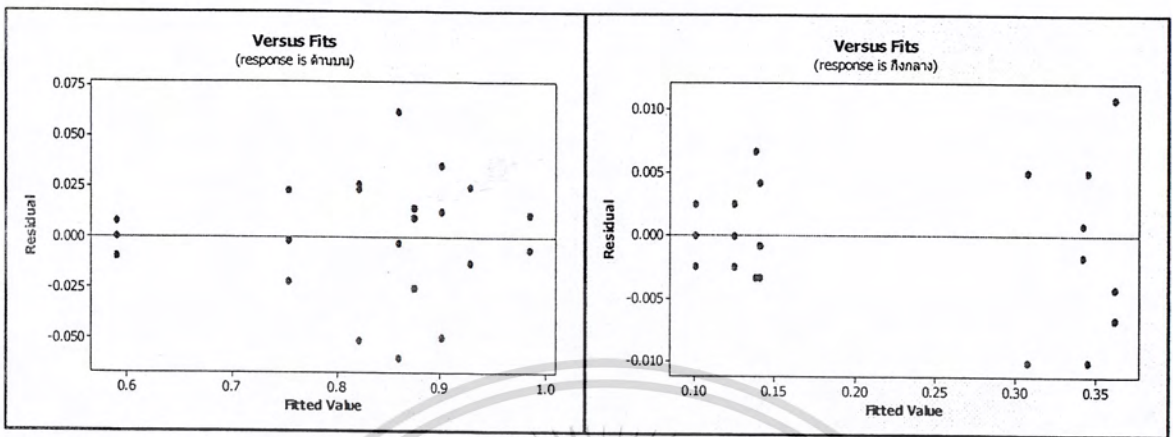
ข. ด้านกลาง



ค. ด้านล่าง

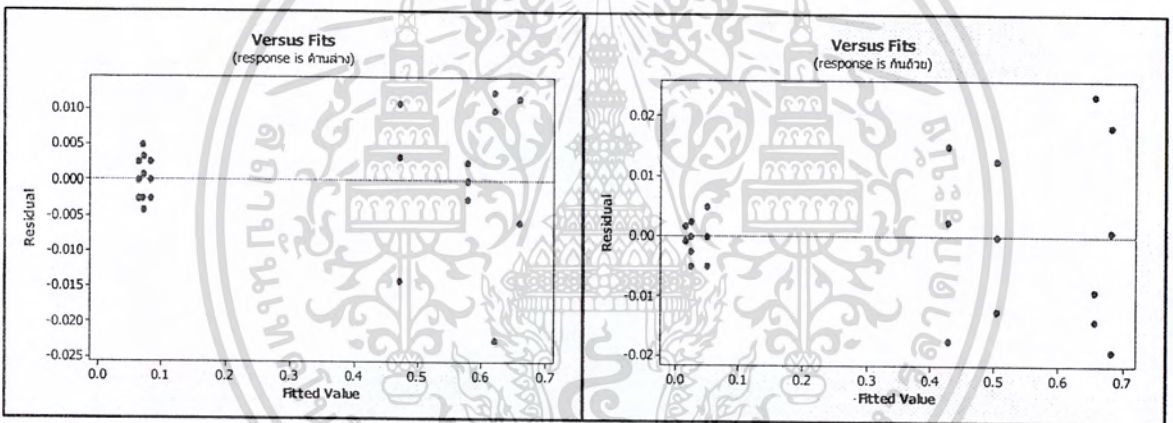
ง. ด้านซ้าย

รูป จ-1 ความน่าจะเป็นของความหนาผนังชิ้นงานที่มีการแจกแจงแบบปกติ



ก. ด้านบน

ข. ด้านล่าง



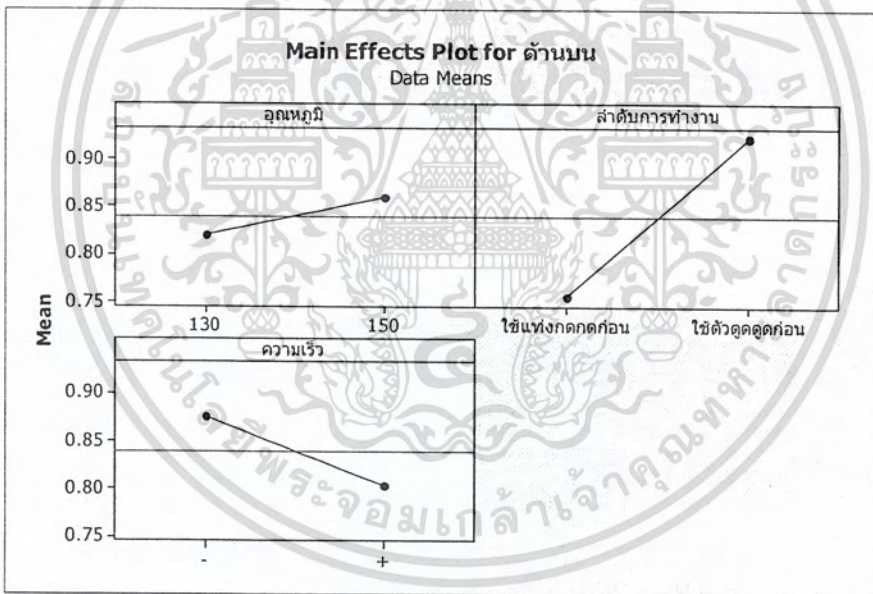
ก. ด้านล่าง

ข. ด้านบน

รูป จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นชั้นงานบริเวณต่างๆที่มีค่าคงที่

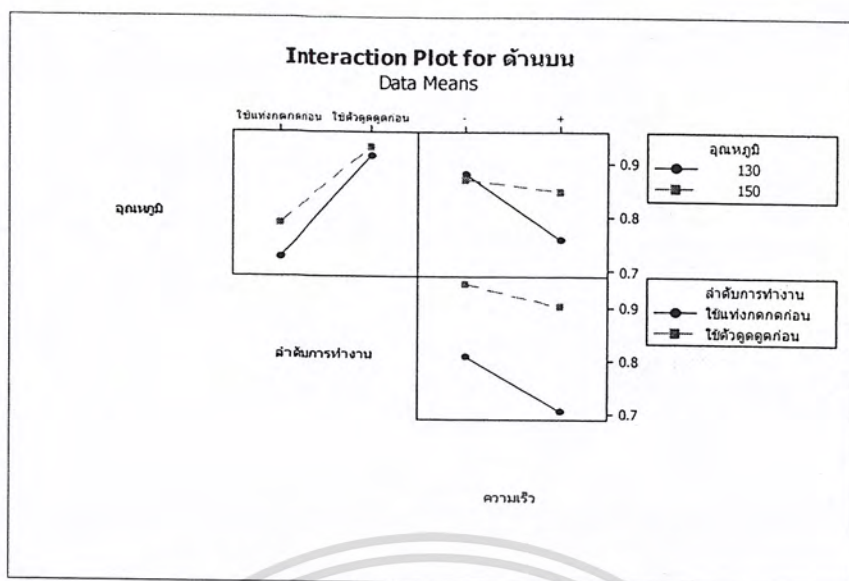
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.20691	0.20691	0.068970	59.54	0.000
2-Way Interactions	3	0.02378	0.02378	0.007925	6.84	0.004
3-Way Interactions	1	0.08431	0.08431	0.084313	72.79	0.000
Residual Error	16	0.01853	0.01853	0.001158		
Pure Error	16	0.01853	0.01853	0.001158		
Total	23	0.33353				

ตาราง จ-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ด้านบน)



รูป จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว (ด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป จ-4 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็วและลำดับการใช้งานกับความเร็ว (ด้านบน)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.83927	0.006947	120.81	0.000
อุณหภูมิ	0.03938	-0.01969	0.006947	2.83	0.012
ลำดับการทำงาน	0.1646	0.08323	0.006947	11.98	0.000
ความเร็ว	0.07229	-0.03615	0.006947	-5.20	0.000
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.02354	-0.01177	0.006947	-1.69	0.110
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.05021	0.02510	0.006947	3.61	0.002
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.02979	0.01490	0.006947	2.14	0.048
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.11854	-0.05927	0.006947	-8.53	0.000

ตาราง จ-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (ด้านบน)

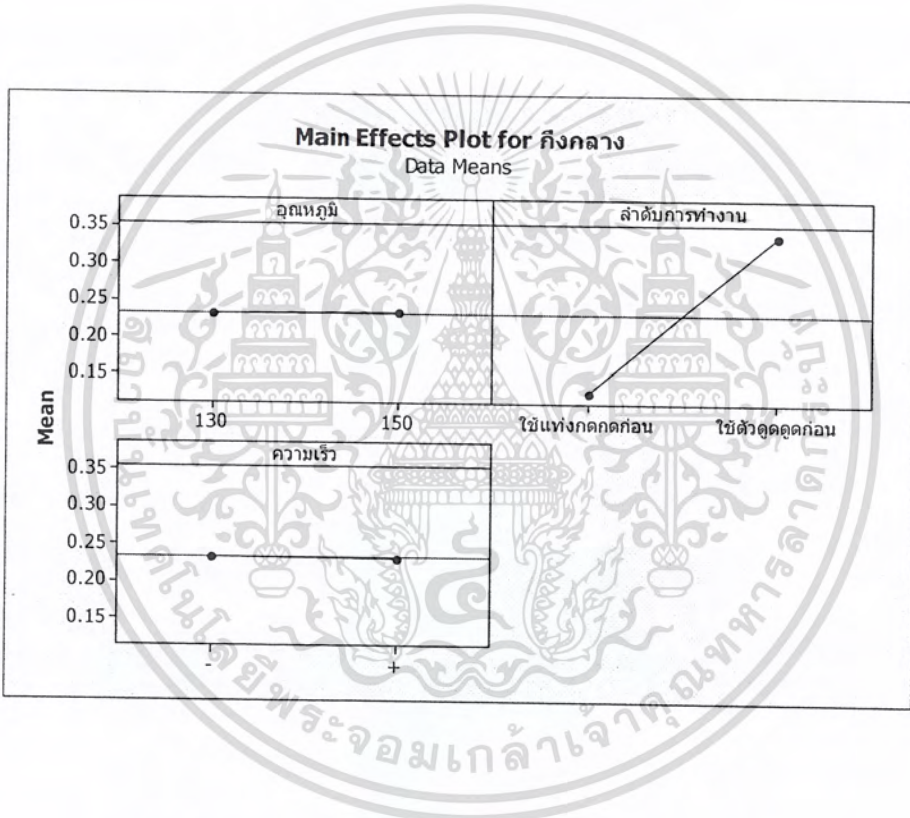
Term	Coef
Constant	0.563646
อุณหภูมิ	0.00196875
ลำดับการทำงาน	0.248021
ความเร็ว	-0.387604
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00117708
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.00251042
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.844688
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00592708

ตาราง จ-3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (ด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

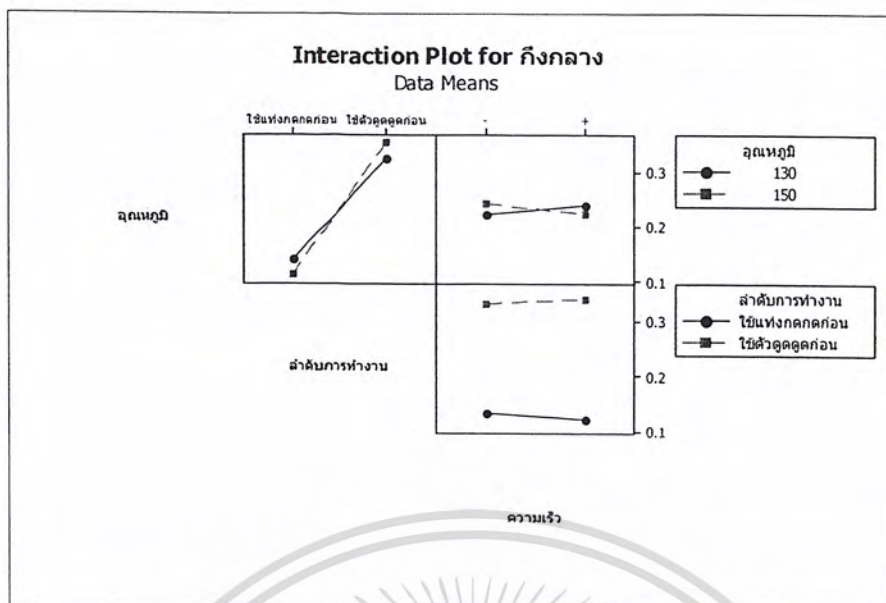
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.272015	0.272015	0.0906715	2401.23	0.000
2-Way Interactions	3	0.007577	0.007577	0.0025257	66.89	0.000
3-Way Interactions	1	0.000204	0.000204	0.0002042	5.41	0.034
Residual Error	16	0.000604	0.000604	0.0000378		
Pure Error	16	0.000604	0.000604	0.0000378		
Total	23	0.280400				

ตาราง จ-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (กึ่งกลาง)



รูป จ-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว (กึ่งกลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ฉ-6 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว (กิ่งกลาง)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.232500	0.001254	185.36	0.000
อุณหภูมิ	0.000833	0.000417	0.001254	0.33	0.744
ลำดับการทำงาน	0.212917	0.106458	0.001254	84.87	0.000
ความเร็ว	-0.001250	-0.000625	0.001254	-0.50	0.625
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	0.027917	0.013958	0.001254	11.13	0.000
อุณหภูมิ*ความเร็ว	-0.019583	-0.009792	0.001254	-7.81	0.000
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.010000	0.005000	0.001254	3.99	0.001
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.005833	-0.002917	0.001254	-2.33	0.034

ตาราง ฉ-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (กิ่งกลาง)

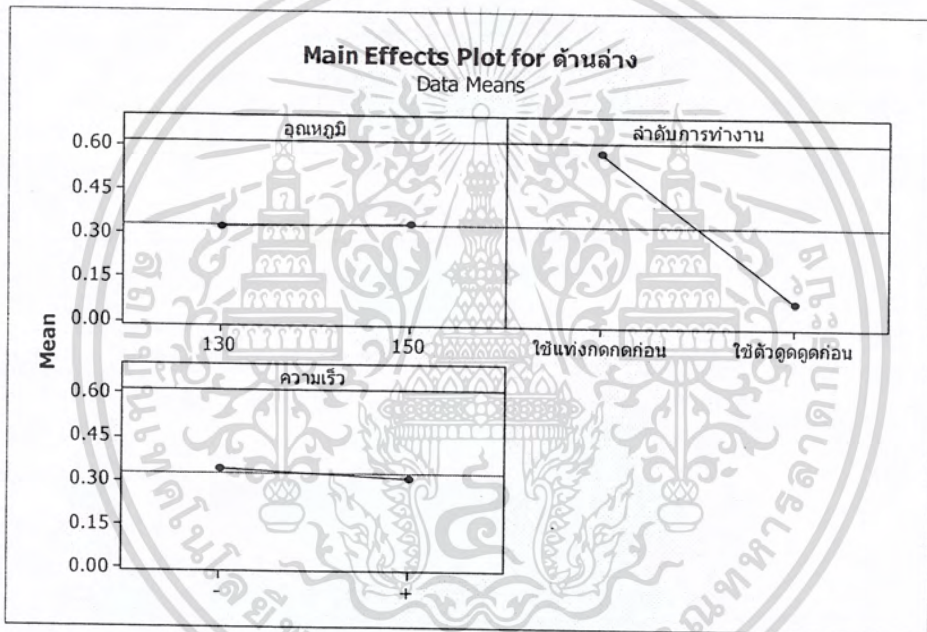
Term	Coef
Constant	0.226667
อุณหภูมิ	0.000041667
ลำดับการทำงาน	-0.0889583
ความเร็ว	0.136458
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	0.00139583
อุณหภูมิ*ความเร็ว	-9.79167E-04
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0458333
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-2.91667E-04

ตาราง ฉ-6 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (กิ่งกลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ฅ๗ 7  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

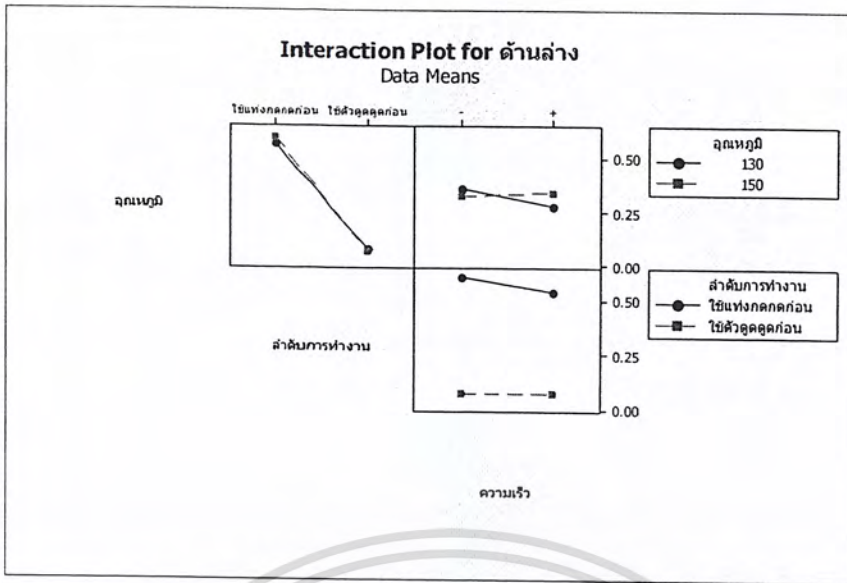
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.57788	1.57788	0.525961	6010.98	0.000
2-Way Interactions	3	0.02785	0.02785	0.009285	106.11	0.000
3-Way Interactions	1	0.02454	0.02454	0.024544	280.50	0.000
Residual Error	16	0.00140	0.00140	0.000088		
Pure Error	16	0.00140	0.00140	0.000088		
Total	23	1.63168				

ตาราง จ-7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ด้านล่าง)



รูป จ-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาผนังชิ้นงานกับอุณหภูมิ ลำดับการทำงานและความเร็ว (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ผน 8  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ๘-8 ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับลำดับการใช้งาน อุณหภูมิกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว (ด้านล่าง)

Estimated Effects and Coefficients for ด้านล่าง (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.3274	0.001909	171.46	0.000	
อุณหภูมิ	0.0123	0.0061	0.001909	3.22	0.005	
ลำดับการทำงาน	-0.05115	-0.2557	0.001909	-133.93	0.000	
ความเร็ว	-0.0352	-0.0176	0.001909	-9.22	0.000	
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.0215	-0.017	0.001909	-5.62	0.000	
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.0531	0.0266	0.001909	13.91	0.000	
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0369	0.0184	0.001909	9.66	0.000	
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.0640	-0.0320	0.001909	-16.75	0.000	

ตาราง ๘-8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (ด้านล่าง)

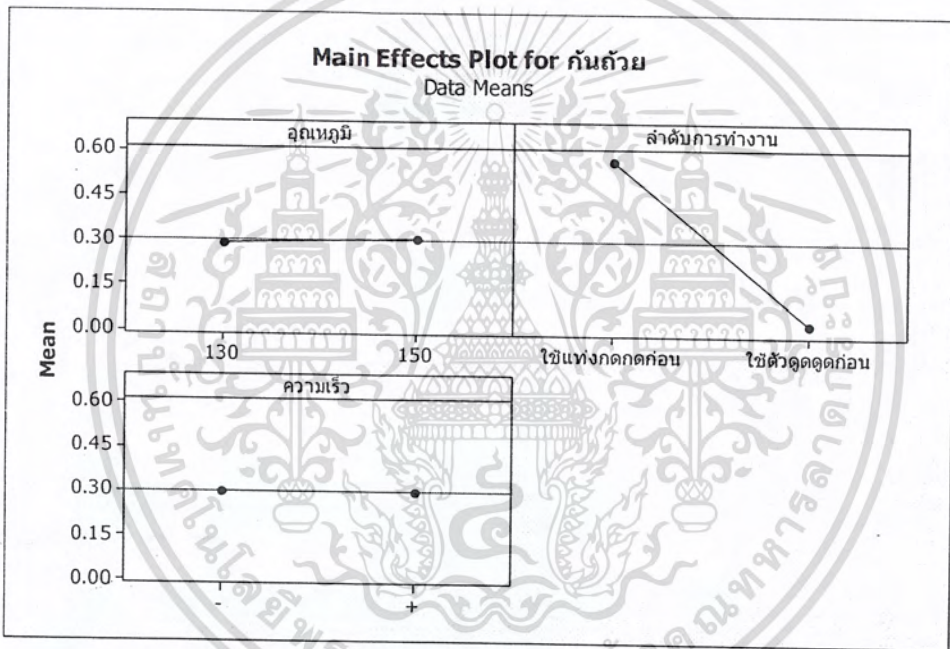
Term	Coef
Constant	0.241354
อุณหภูมิ	0.000614583
ลำดับการทำงาน	-0.105521
ความเร็ว	-0.389479
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00107292
อุณหภูมิ*ความเร็ว	0.00265625
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.466146
อุณหภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00319792

ตาราง ๘-9 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (ด้านล่าง)

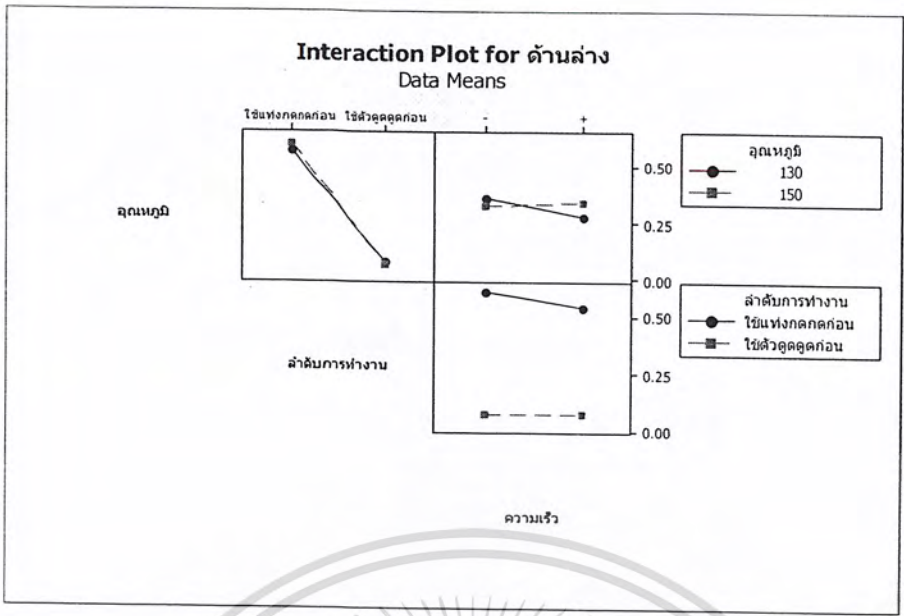
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ฅน 9  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.74339	1.74339	0.581129	3737.91	0.000
2-Way Interactions	3	0.06686	0.06686	0.022286	143.35	0.000
3-Way Interactions	1	0.06668	0.06668	0.066676	428.87	0.000
Residual Error	16	0.00249	0.00249	0.000155		
Pure Error	16	0.00249	0.00249	0.000155		
Total	23	1.87941				

ตาราง จ-10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB (ก้นถ้วย)



รูปที่ จ-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นชิ้นงานกับลมหมุน ลำดับการทำงานและความเร็ว (ก้นถ้วย)



รูป จ-10 ผลกระทบร่วมระหว่างลมนอกภูมิกับลำดับการใช้งาน ลมนอกภูมิกับความเร็ว และลำดับการใช้งานกับความเร็ว (กันด้วย)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.2983	0.002545	117.22	0.000
ลมนอกภูมิ	0.0171	0.0085	0.002545	3.36	0.004
ลำดับการทำงาน	-0.5388	-0.2694	0.002545	-105.84	0.000
ความเร็ว	-0.0046	-0.0023	0.002545	-0.90	0.381
ลมนอกภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.0342	-0.0171	0.002545	-6.71	0.000
ลมนอกภูมิ*ความเร็ว	0.0975	0.0488	0.002545	19.15	0.000
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.0217	0.0108	0.002545	4.26	0.001
ลมนอกภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.1054	-0.0527	0.002545	-20.71	0.000

ตาราง จ-11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเชิงเส้น (กันด้วย)

Term	Coef
Constant	0.178750
ลมนอกภูมิ	0.000854167
ลำดับการทำงาน	-0.0302083
ความเร็ว	-0.684792
ลมนอกภูมิ*ลำดับการทำงาน	-0.00170833
ลมนอกภูมิ*ความเร็ว	0.00487500
ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	0.748750
ลมนอกภูมิ*ลำดับการทำงาน*ความเร็ว	-0.00527083

ตาราง จ-12 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบเชิงเส้น (กันด้วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้