

การลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวทีลิน เทเรฟทาเลต

นางสาวชญาณิศา แก้วเกตุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

COLOR CHANGE REDUCTION OF HIGH PRESSURE FORMING OF  
POLYCARBONATE-POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE FILMS

Miss Chayanisa Kaewkate

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการเปลี่ยนแปลงสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต
โดย	นางสาวชญานิศา แก้วเกตุ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วิจิรวณิช)

ชญาณิศา แก้วเกตุ : การลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต. (COLOR CHANGE REDUCTION OF HIGH PRESSURE FORMING OF POLYCARBONATE-POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE FILMS) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ปารเมศ ชูติมา, 127หน้า.

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ ค่ามาตรฐานของผลต่างสีแกน  $b^*$  ( $Db^*$ ) เท่ากับ  $\pm 1.5$  โดยการขึ้นรูปแบบเก่ามีค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  เฉลี่ยเท่ากับ -5.28 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป และระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ตัวแปรตอบสนองที่ศึกษา คือ ความเงา ความหยาบ และค่าผลต่างสีแกน  $b^*$

ทดลองเบื้องต้นด้วยแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  แบบเพิ่มจุดศูนย์กลาง ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูงไม่มีผลกระทบต่อความเงาและความหยาบ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ได้แก่ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป แบบจำลองที่ได้มีผลจากพจน์ควอดราติก จึงใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อทดลองหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ผลการทดลองพบว่าสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  มีค่าน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน 260 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 4 วินาที และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 110 บาร์ สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่ได้สามารถลดปัญหาการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตได้ 100% โดยไม่มีข้อร้องเรียนจากลูกค้า มีค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.356

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา....2554.....

# # 5371409421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : HIGH PRESSURE FORMING / POLYCARBONATE-POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE / EXPERIMENTAL DESIGN /  $2^k$  FACTORIAL DESIGN / BOX-BEHNKEN DESIGN

CHAYANISA KAEWKATE : COLOR CHANGE REDUCTION OF HIGH PRESSURE FORMING OF POLYCARBONATE-POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE FILMS. ADVISOR : ASSOC. PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 127 pp.

The objective of this research was to reduce color change of high pressure forming of polycarbonate-polybutylene terephthalate applying design of experimental. Specification of delta b\* (Db\*) is  $\pm 1.5$  while the average Db\* of old forming's condition was -5.28. The related factors influence color change after forming were mold temperature, heater temperature, heating time, high pressure and pressure time. The response variables were gloss, roughness and Db\*.

The  $2^k$  factorial design with center points was applied in preliminary experiment. The experimental results showed that high pressure forming process was not effect to gloss and roughness. The factors influencing Db\* were heater temperature, heating time and high pressure. Moreover, the model was found quadratic effect so Box-Behnken design was applied to evaluate suitable condition.

The results indicated that suitable condition to minimize Db\* were heater temperature of 260 °C, heating time of 4 second and high pressure of 110 bar. The suitable condition can reduce color change of high pressure forming of polycarbonate- polybutylene terephthalate 100% without customer complaint. The average Db\* of suitable condition is 0.356.

Department : .....Industrial Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Industrial Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัย การแก้ไขปัญหา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึง ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วิจิรวณิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นในการวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องจักร ตัวอย่างในการทดลอง และทรัพยากรต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนพนักงานที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทดลองจนงานวิจัยนี้เสร็จสิ้นไปด้วยดี

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา.....	2
1.1.1 ข้อมูลทั่วไป.....	2
1.1.2 ผลิตภัณฑ์.....	3
1.1.3 กระบวนการผลิต.....	5
1.1.3.1 กระบวนการผลิตฟิล์มเกรดการค้า.....	5
1.1.3.2 กระบวนการผลิตฟิล์มเกรดทดลอง.....	7
1.1.4 การควบคุมคุณภาพ.....	8
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2.1 สภาพปัญหาที่พบ.....	11
1.2.2 การวิเคราะห์และแนวทางแก้ไขปัญหา.....	18
1.2.2.1 Why-Why Analysis.....	18
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	21
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	21
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	22
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	23
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.1 พลาสติก.....	24
2.2 การขึ้นรูปด้วยความร้อน.....	26

2.3 ทฤษฎีสี.....	31
2.4 แผนผังกางปลา.....	32
2.5 การออกแบบการทดลอง.....	33
2.5.1 การทดลอง.....	33
2.5.2 หลักการพื้นฐาน.....	35
2.5.3 แนวทางการออกแบบการทดลอง.....	35
2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	36
2.6.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$ .....	38
2.6.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$ แบบมีจุด ศูนย์กลาง.....	40
2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $3^k$ .....	42
2.7 การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง.....	42
2.7.1 แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิต.....	43
2.7.2 แผนการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน.....	44
2.8 การวิเคราะห์การถดถอย.....	44
2.8.1 การสร้างแบบจำลองการถดถอย.....	45
2.8.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์.....	46
2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	46
2.10 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	47
2.11 การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย.....	48
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 การค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
3.2 การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.2.1 หลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.2.2 ปัจจัยที่ไม่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการทดลอง.....	58
3.2.3 ปัจจัยที่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการทดลอง.....	59



3.3 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์.....	60
3.4 การทดสอบก่อนขึ้นรูป.....	61
3.5 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง.....	63
3.6 การทดสอบหลังขึ้นรูป.....	65
3.7 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	65
3.8 การเลือกตัวแปรตอบสนอง.....	69
3.9 แผนการทดลองเบื้องต้น.....	69
3.10 แผนการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	73
บทที่ 4 การคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น.....	76
4.2 การกำหนดสมมติฐานการทดลองเบื้องต้น.....	80
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทดลองเบื้องต้น.....	80
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลต่างสีแกม $b^*$ บนพื้นดำเนินการ ทดลองเบื้องต้น.....	86
4.5 การทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	91
4.5.1 ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	91
4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์น เคน.....	94
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลต่างสีแกม $b^*$ บนพื้นดำเนินการ ทดลองตามแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์น เคน.....	99
4.8 การวิเคราะห์การถดถอย.....	102
4.9 การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	103
4.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	105
4.11 การทดสอบความเพียงพอของตัวอย่าง.....	110

	ญ
	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.1.1 สรุปการคัดเลือกปัจจัย.....	111
5.1.2 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น.....	112
5.1.3 สรุปผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	112
5.1.4 เปรียบเทียบผลการทดลอง.....	113
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ค่าตอบสนองของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตและฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิทีลิน เทรฟทาเลตที่สภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต.....	15
2.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^k$ .....	39
2.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ.....	47
3.1	คุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์.....	66
3.2	ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น.....	70
3.3	แผนการทดลองเบื้องต้น.....	70
3.4	ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	73
3.5	แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	74
4.1	ผลการทดลองจากแผนการทดลองเบื้องต้น.....	76
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสีแกน $b^*$ บนพื้นดำจากแผนการทดลอง เบื้องต้น.....	87
4.3	ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์- เบห์นเคน.....	92
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสีแกน $b^*$ ( $Db^*$ ) บนพื้นดำ.....	100
4.5	ผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างการขึ้นรูปแบบเก่ากับการขึ้นรูปแบบใหม่	108
4.6	ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสีระหว่างการขึ้นรูปแบบเก่ากับการขึ้นรูปแบบใหม่.....	109
5.1	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป.....	113
ก.1	ปริมาณการผลิตฟิล์มของสายการผลิตที่ 2 ปี 2552.....	122
ก.2	ปริมาณการผลิตฟิล์มของสายการผลิตที่ 2 ปี 2553.....	122
ก.3	ราคาฟิล์มปี 2553 จำแนกตามชนิดของฟิล์ม.....	123
ก.4	ข้อร้องเรียนจากลูกค้าปี 2553 จำแนกตามปัญหาด้านคุณภาพ.....	123
ข.1	ค่าผลต่างสีแกน $b^*$ ( $Db^*$ ) บนพื้นดำจากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่า.....	125
ข.2	ค่าผลต่างสีแกน $b^*$ ( $Db^*$ ) บนพื้นดำจากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่.....	126

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แผนผังองค์กรโรงงานกรณีศึกษา.....	3
1.2	กระบวนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนต.....	5
1.3	ขั้นตอนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนต.....	6
1.4	ขั้นตอนการผลิตฟิล์มเกรดทดลอง.....	7
1.5	ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพฟิล์ม.....	10
1.6	สัดส่วนการผลิตฟิล์มในปี 2552.....	11
1.7	สัดส่วนการผลิตฟิล์มในปี 2553.....	11
1.8	ปริมาณการผลิตฟิล์มในปี 2552 และปี 2553.....	12
1.9	ราคาฟิล์มปี 2553 แยกตามชนิดของฟิล์ม.....	13
1.10	ข้อร้องเรียนจากลูกค้าปี 2553 จำแนกตามปัญหาด้านคุณภาพ.....	14
1.11	การกระจายตัวแบบปกติของค่าผลต่างสีแกน $b^*$ ของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต- พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต.....	15
1.12	การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตหลังการขึ้นรูป.....	17
1.13	การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูป	17
1.14	การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why analysis.....	20
2.1	โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต.....	25
2.2	โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิคาร์บอเนต.....	25
2.3	การขึ้นรูปด้วยสุญญากาศแบบนูนขึ้น.....	27
2.4	การขึ้นรูปด้วยสุญญากาศแบบโพรง.....	27
2.5	การขึ้นรูปแบบอัดความดัน.....	28
2.6	การขึ้นรูปแบบเป่าลม.....	28
2.7	การขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่แบบ.....	29
2.8	การยืดแผ่นพลาสติก.....	29
2.9	การให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก.....	30
2.10	การขึ้นรูป.....	30
2.11	การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์.....	30

ภาพที่		หน้า
2.12	แกนสี CIELAB.....	32
2.13	เครื่องวัดสี.....	32
2.14	โครงสร้างแผนผังก้างปลา.....	33
2.15	รูปแบบทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ.....	34
2.16	การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีผลจากอันตรกิริยา.....	37
2.17	การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีผลจากอันตรกิริยา.....	37
2.18	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 <sup>2</sup> แบบเพิ่มจุดศูนย์กลาง.....	41
2.19	การออกแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตสำหรับ 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัย.....	43
2.20	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับ 3 ปัจจัย.....	44
3.1	แผนผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবি ทิลีน เทเรพทาเลตหลังการขึ้นรูป.....	55
3.2	หลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.3	การเตรียมแผ่นฟิล์มเพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง.....	61
3.4	การวัดความเงาของแผ่นฟิล์ม.....	61
3.5	การวัดความหยาบของแผ่นฟิล์ม.....	62
3.6	การวัดสีแผ่นฟิล์มบนพื้นขาว.....	62
3.7	การวัดสีแผ่นฟิล์มบนพื้นดำ.....	63
3.8	แผนควบคุมเครื่องจักร.....	63
3.9	เครื่องจักรขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม.....	63
3.10	แผ่นฟิล์มบนภาดใส่ชิ้นงาน.....	64
3.11	การให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มก่อนการขึ้นรูป.....	64
3.12	ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยแม่พิมพ์เรือนไมล์.....	64
3.13	แผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปแล้ว.....	65
4.1	การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างจากแผนการทดลองเบื้องต้น.....	81
4.2	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลจากแผนการ ทดลองเบื้องต้น.....	82
4.3	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย A จากแผนการทดลองเบื้องต้น	82
4.4	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B จากแผนการทดลองเบื้องต้น	83

ภาพที่		หน้า
4.5	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C จากแผนการทดลองเบื้องต้น	83
4.6	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D จากแผนการทดลองเบื้องต้น	84
4.7	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย E จากแผนการทดลองเบื้องต้น	85
4.8	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value จากแผนการทดลองเบื้องต้น.....	86
4.9	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ บนพื้นดำจากแผนการทดลองเบื้องต้น	88
4.10	อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ บนพื้นดำจากแผนการทดลองเบื้องต้น.....	89
4.11	การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	95
4.12	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	96
4.13	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	96
4.14	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	97
4.15	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	98
4.16	การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	99
4.17	กราฟโครงร่างระหว่างปัจจัยที่มีผลกับค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ บนพื้นดำ.....	101
4.18	พื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยที่มีผลกับค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ บนพื้นดำ.....	102
4.19	ค่าตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรม.....	104
4.20	ค่าตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ปรับค่าเป็นค่าจริงในทางปฏิบัติ.....	104
4.21	การกระจายตัวแบบปกติของค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ บนพื้นดำจากการขึ้นรูปแบบใหม่.....	106

ภาพที่		หน้า
4.22	ผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างการกรำขึ้นรูปแบบเก่ากับการกรำขึ้นรูปแบบใหม่.....	107
4.23	ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสี่ระหว่างการกรำขึ้นรูปแบบเก่ากับการกรำขึ้นรูปแบบใหม่.....	109

# บทที่ 1

## บทนำ

การผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตหรือพีซีฟิล์มเป็นอุตสาหกรรมใหม่ในกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยการนำเม็ดพลาสติกเชิงวิศวกรรมชั้นสูงที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวใสและทนต่อการเสียดสีจากความร้อนได้ดีมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าและต่อยอดการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์นานาชนิดที่ตอบสนองความต้องการทางการตลาด โดยฟิล์มพอลิคาร์บอเนตมีความต้องการอย่างสูงในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ การสื่อสาร อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ บัตร ป้ายและฉลาก รวมถึงบรรจุภัณฑ์ การใช้แผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตจึงเป็นไปอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากการขยายกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการทางการตลาดที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแล้ว การปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องทำควบคู่กันไป

นอกจากการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตธรรมดา โรงงานกรณีศึกษาได้วิจัยและพัฒนาเพื่อให้เกิดความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานเฉพาะด้านมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจุบันกำลังทดลองพัฒนาฟิล์มให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยนำพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) มาผสมเข้ากับพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ซึ่งเป็นพลาสติกวิศวกรรม เกิดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่เรียกว่าพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต (Polycarbonate-Polybutylene terephthalate, PC-PBT) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมต่อการขึ้นรูปขึ้นงานคอมพิวเตอรื อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนประกอบและอุปกรณ์รถยนต์ แม้ว่าฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตจะสามารถขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ดีแต่ก็มีข้อจำกัดด้านการผลิต โดยฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนสูง จึงเกิดเป็นของเสียจากกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่สามารถนำไปแก้ไขให้นำกลับมาใช้งานได้ใหม่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีและระดับที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรขึ้นรูป เพื่อให้ฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูปมีค่าความเงา ค่าความหยาบ และค่าสีอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง



## 1.1 ข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา

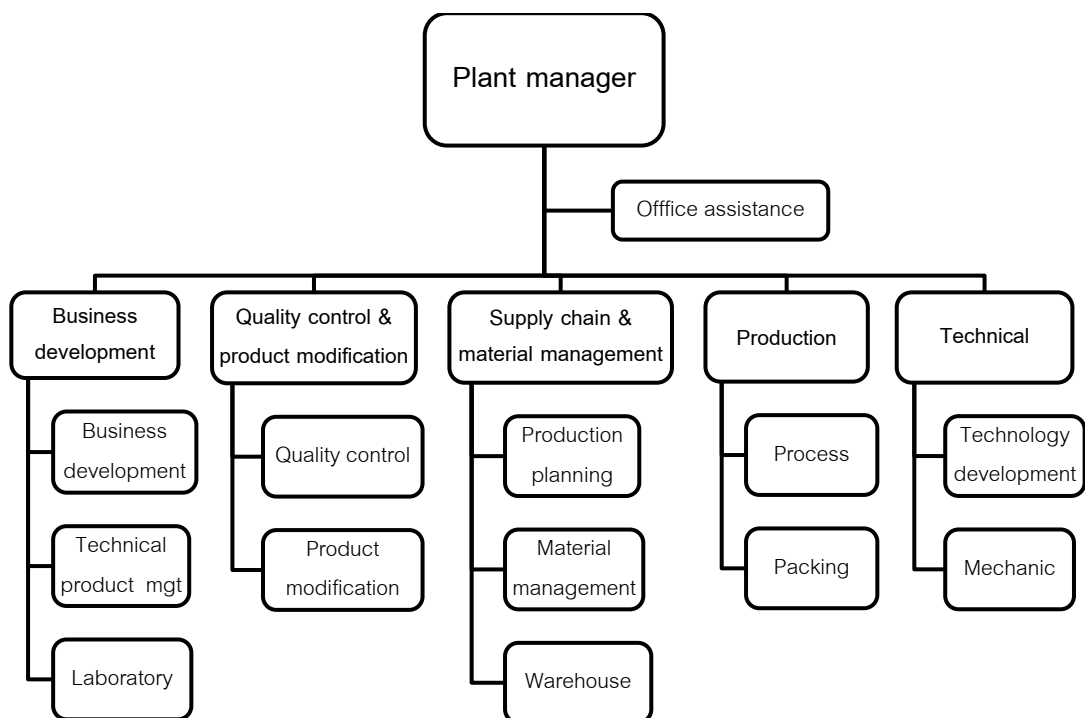
โรงงานกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจผลิตแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต โดยมีข้อมูลทั่วไป ข้อมูลผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต และการควบคุมคุณภาพ ดังนี้

### 1.1.1 ข้อมูลทั่วไป

โรงงานกรณีศึกษาก่อตั้งขึ้นในปี 2548 ทำการผลิตฟิล์มจากเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตทั้งในรูปแบบม้วน ตัดเป็นแผ่น และขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน มีลูกค้าทั้งภายในและต่างประเทศ ได้ขยายสายการผลิตเป็น 2 สาย ในปี 2552 เพื่อรองรับปริมาณการผลิตที่มากขึ้นและใช้สำหรับทดลองผลิตฟิล์มเกรดใหม่ๆ แบ่งการทำงานเป็น 4 กะ ทำการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง ปัจจุบันมีพนักงานประจำ 60 คน โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- สายการผลิตที่ 1 : ผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์
- สายการผลิตที่ 2 : ผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนต พอลิเมอร์ผสม และฟิล์มเกรดทดลองต่างๆ
- ปริมาณการผลิต : 900 ตัน /ปี (สายการผลิตที่ 2 )
- ความหนาฟิล์มที่ผลิตได้ : 0.075 – 1.0 มิลลิเมตร

การดำเนินงานของโรงงานกรณีศึกษาจะแบ่งออกเป็น 5 แผนกตามลักษณะงาน มีผู้จัดการแผนกรับผิดชอบงานในแต่ละแผนก ภายใต้การบริหารของผู้จัดการโรงงาน แผนผังองค์กรแสดงดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 แผนผังองค์กรโรงงานกรณีศึกษา

### 1.1.2 ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษาจะจำแนกตามลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม โดยจะมีผิวอยู่ 2 ด้าน เรียกว่าด้านหน้า (Top side) และด้านหลัง (Reverse side) ผิวฟิล์มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของลูกกลิ้งที่ใช้รีดพลาสติกเหลวให้เป็นแผ่นฟิล์ม โดยพื้นผิวแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. ฟิล์มผิวเงา-เงา (Gloss-Gloss films) คือ ฟิล์มที่มีผิวด้านหน้าและด้านหลังเป็นแบบเงา
2. ฟิล์มผิวเงา-หยาบ (Gloss-Texture films) คือ ฟิล์มที่มีผิวด้านหน้าเป็นแบบเงาและด้านหลังเป็นแบบหยาบ
3. ฟิล์มผิวหยาบ-หยาบ (Texture-Texture films) คือ ฟิล์มที่มีผิวด้านหน้าและด้านหลังเป็นแบบหยาบ

ฟิล์มที่ผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ฟิล์มเกรดการค้า (Commercial films) คือ ฟิล์มที่เป็นผลิตภัณฑ์หลัก โรงงานได้ผลิตมาช่วงระยะเวลาหนึ่งจนมีความชำนาญ สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี ฟิล์มมีคุณภาพคงที่และเป็นไปตามมาตรฐาน
2. ฟิล์มเกรดทดลอง (Trial run films) คือ ฟิล์มชนิดใหม่ที่ทางโรงงานได้คิดค้นขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานของลูกค้า ฟิล์มชนิดนี้ยังคงอยู่ในระยะทดลองเพื่อหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณภาพเป็นไปตามมาตรฐาน เมื่อผลิตได้สำเร็จฟิล์มตัวอย่างจะถูกส่งไปให้ลูกค้าเพื่อทดลองใช้ แล้วนำผลตอบรับที่ได้มาปรับปรุงคุณภาพ เมื่อสามารถผลิตจนมีความเชี่ยวชาญและควบคุมให้มีคุณภาพคงที่ได้แล้วฟิล์มชนิดนั้นก็จะถูกเปลี่ยนเป็นเกรดการค้า

ฟิล์มเกรดทดลองสามารถจำแนกตามชนิดของสารปรุงแต่งที่เติมเข้าไป โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

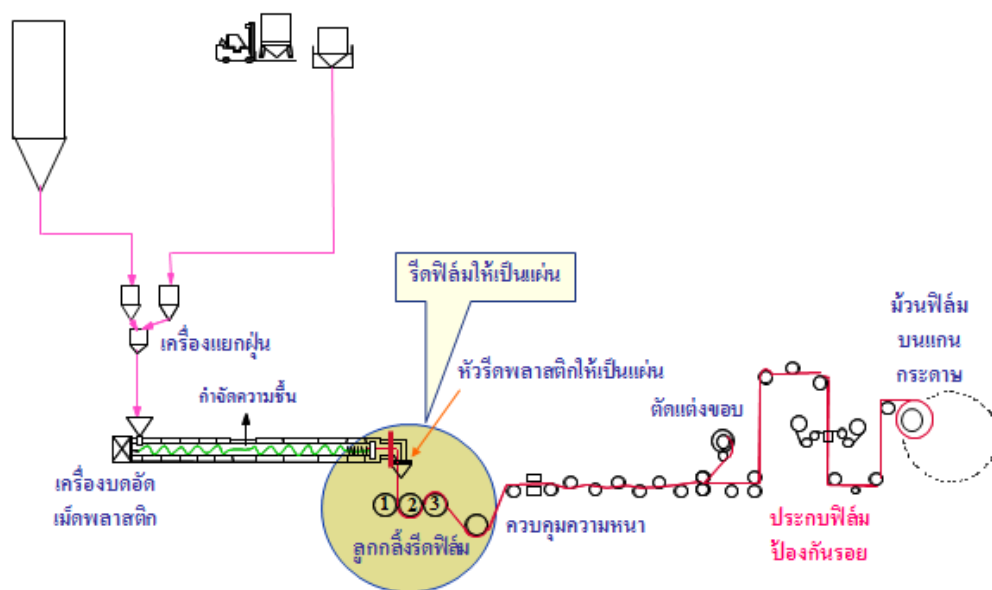
- 2.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend films) คือ ฟิล์มที่ผลิตจากการผสมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเด่นตรงตามที่ต้องการใช้งาน เช่น พอลิไวนิลิลีน เทเรฟทาเลต (PBT) พอลิเมทิล เมทาไครเลต (PMMA) เป็นต้น เข้ากับพอลิคาร์บอนเนตซึ่งเป็นพอลิเมอร์หลักที่ใช้ในการผลิต
- 2.2 เติมสารปรุงแต่ง (Additive films) คือ ฟิล์มที่มีการเติมสารปรุงแต่งต่างๆ เช่น สารป้องกันแสงแดด สารเรืองแสง เป็นต้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ
- 2.3 เติมสี (Color films) คือ ฟิล์มที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอนเนตที่มีสี (Master batch) หรือเติมสี (Pigment) ลงไป เช่น สีขาว สีดำ สีบรอนซ์เงิน สีบรอนซ์ทอง เป็นต้น เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสีตามที่ต้องการ

### 1.1.3 กระบวนการผลิต

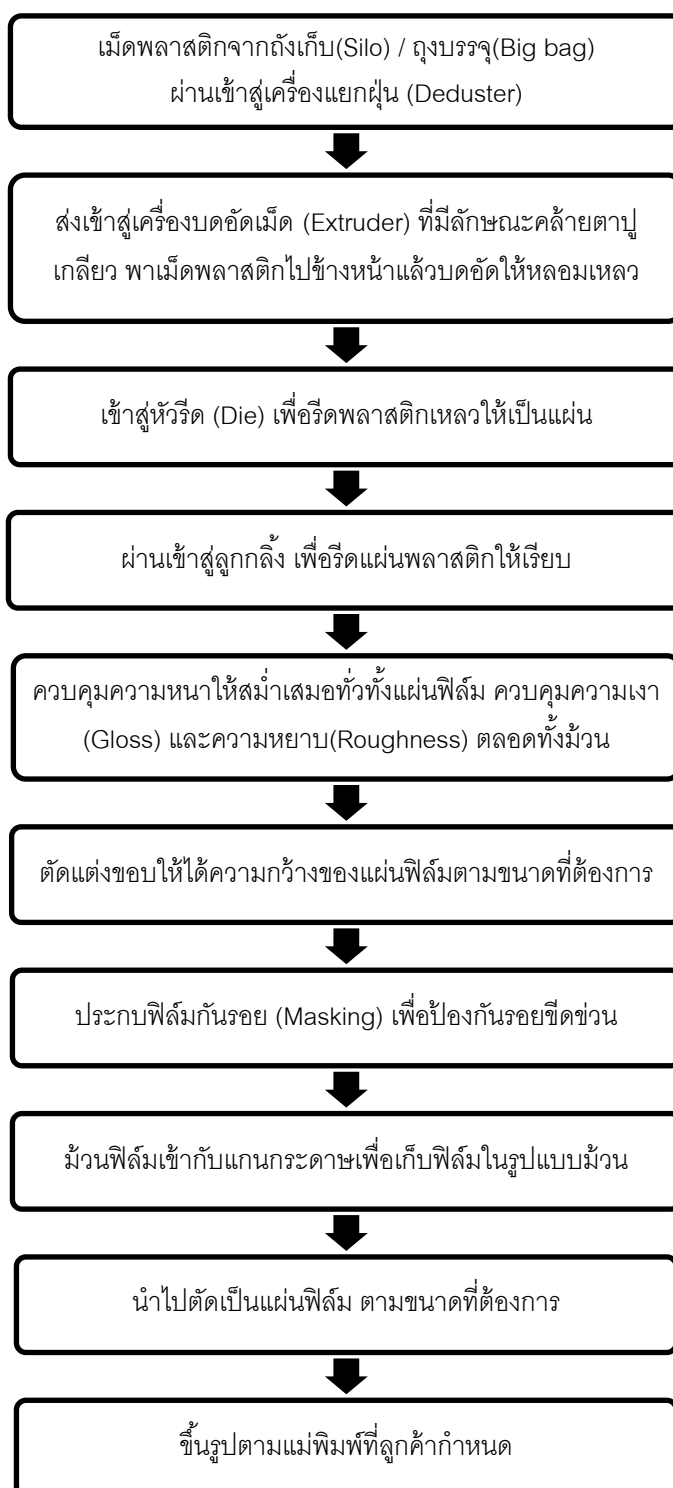
กระบวนการผลิตของฟิล์มเกรดการค้ำกับฟิล์มเกรดทดลองจะเหมือนกัน โดยแตกต่างกันเฉพาะขั้นตอนการดำเนินงานเท่านั้น โดยมีรายละเอียดแต่ละกระบวนการดังนี้

#### 1.1.3.1 กระบวนการผลิตฟิล์มเกรดการค้ำ

ฟิล์มพอลิคาร์บอเนตผลิตผ่านกระบวนการบดอัดเม็ดพลาสติก (Extrusion) แล้วรีดให้เรียบเป็นแผ่นฟิล์ม ตัดแต่งขอบจนสำเร็จเป็นฟิล์มในรูปแบบม้วน จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์ม และนำไปขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ที่ลูกค้ากำหนดเป็นกระบวนการสุดท้าย อธิบายได้ดังภาพที่ 1.2 และ 1.3



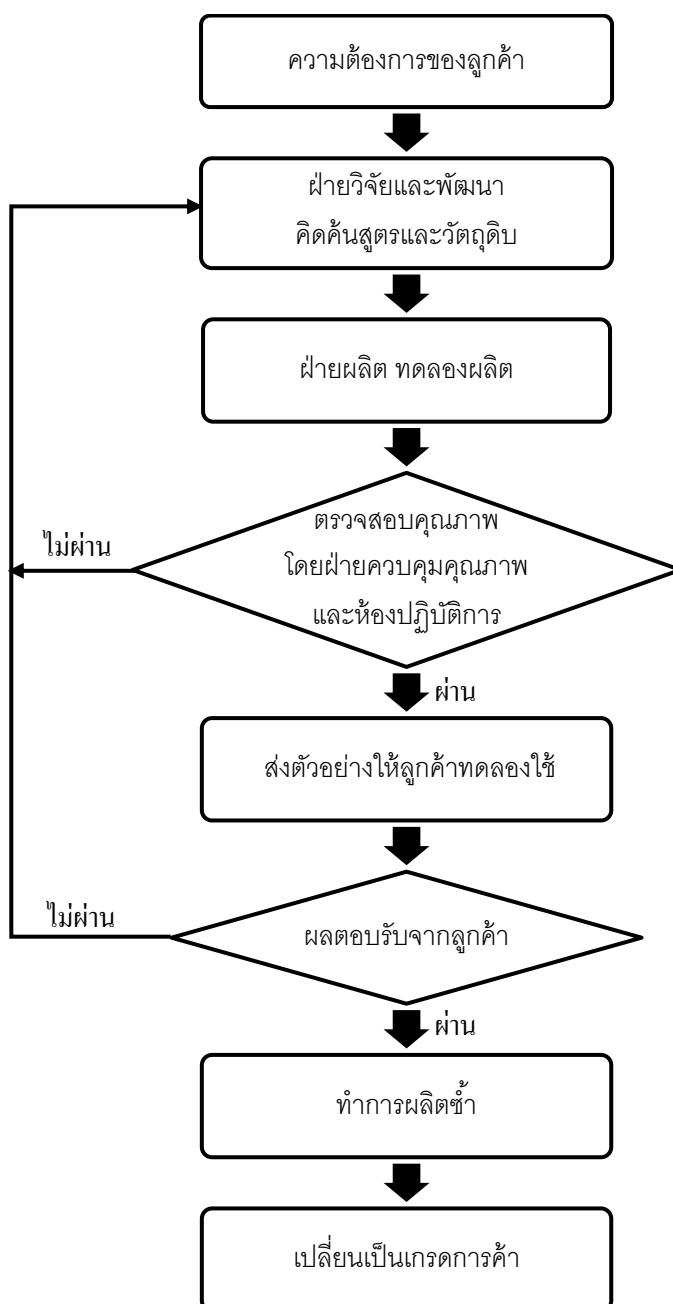
ภาพที่ 1.2 กระบวนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนต



ภาพที่ 1.3 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีน

### 1.1.3.2 กระบวนการผลิตฟิล์มเกรดทดลอง

ฟิล์มเกรดทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานเฉพาะด้านของลูกค้า โดยนำผลตอบรับที่ได้จากลูกค้ามาปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ จะอยู่ในระยะทดลองผลิตจนกระทั่งสามารถควบคุมคุณภาพให้คงที่ได้จึงเปลี่ยนเป็นเกรดการค้า ขั้นตอนการผลิตแสดงดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มเกรดทดลอง

#### 1.1.4 การควบคุมคุณภาพ

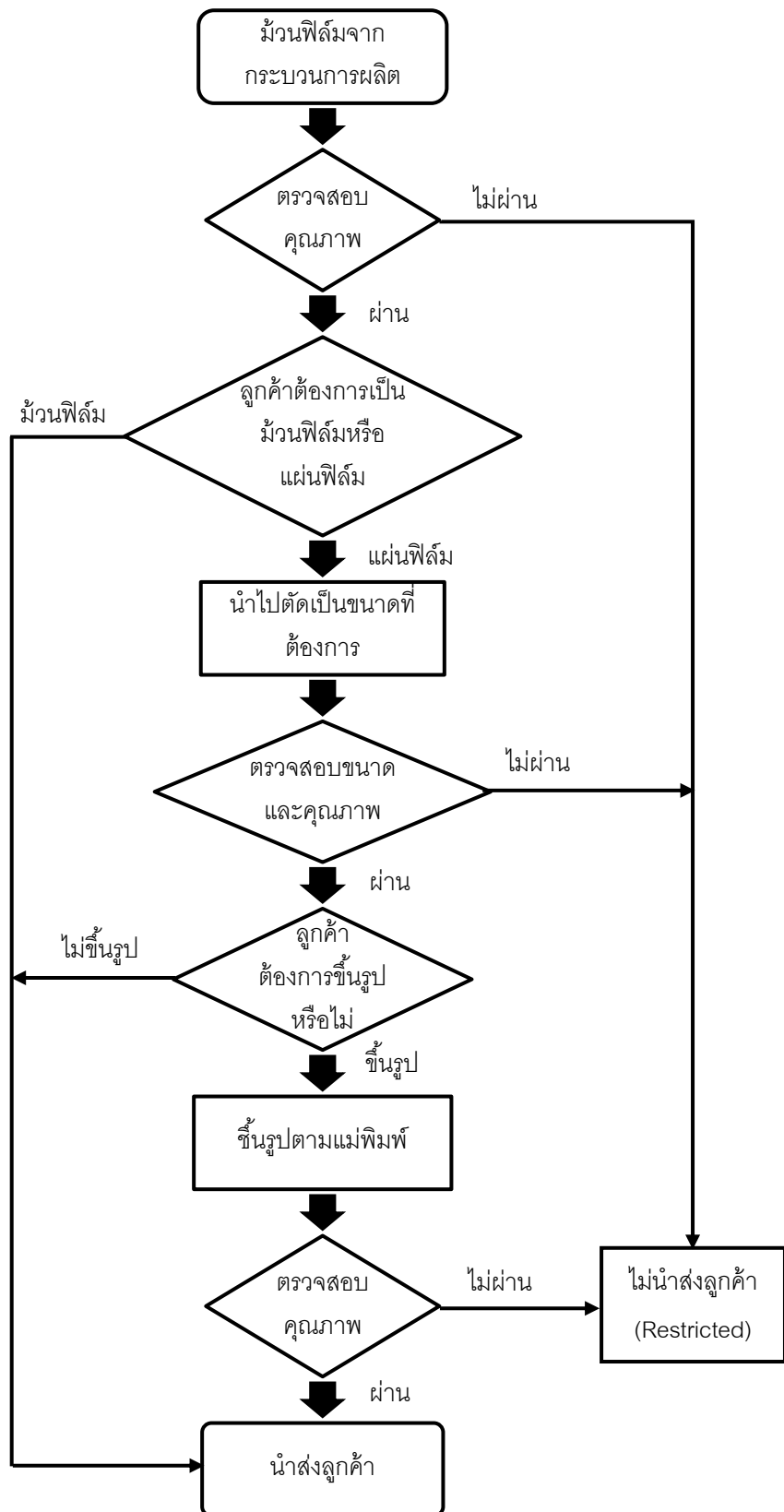
ในกระบวนการผลิตฟิล์มมีการควบคุมคุณภาพฟิล์ม ทั้งแบบควบคุมขณะทำการผลิต (Online) และการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบตามแผนการเก็บตัวอย่าง โดยค่าที่ควบคุมได้แก่

1. ความหนา (Thickness) มีการควบคุมความหนาของฟิล์มตลอดทั้งม้วนให้อยู่ค่ามาตรฐาน โดยมีเครื่องควบคุมความหนาขณะทำการผลิต เมื่อพบบริเวณที่มีความหนาต่างไปจากค่าที่กำหนดจะส่งสัญญาณกลับไปยังหัวรีดให้ปรับความหนาอัตโนมัติ ค่าความหนาของฟิล์มวัดอยู่ในหน่วยมิลลิเมตรหรือไมโครเมตร
2. ค่าความเงา (Gloss) การควบคุมความเงาหรือความมันวาวของผิวฟิล์มตรวจวัดโดยให้แสงทำมุมตกกระทบผิวฟิล์มแล้ววัดค่าแสงสะท้อนที่ออกมาในหน่วย Gloss unit (G.U.)
3. ความหยาบ (Roughness) เป็นคุณสมบัติของชิ้นงานซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการขัดหน้าวัสดุ ซึ่งก็คือพื้นผิวของลูกกลิ้งที่ใช้รีดแผ่นฟิล์มให้เรียบ ความหยาบของผิวฟิล์มในแต่ละพื้นผิวจึงแตกต่างกัน ค่าความหยาบวัดอยู่ในหน่วยไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )
4. ค่าสี (Color) ในฟิล์มที่มีสีจะมีการควบคุมเฉดสีของฟิล์ม โดยวัดสีเปรียบเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง (Reference sample) เพื่อควบคุมค่าความแตกต่างของสีให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด
5. การตรวจคุณภาพด้วยสายตา (Visual inspection) เป็นการประเมินคุณภาพพื้นผิวฟิล์ม เพื่อตรวจหาข้อบกพร่องที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการควบคุมคุณภาพ ทำการตรวจสอบโดยพนักงานควบคุมคุณภาพที่มีความชำนาญ

การตรวจสอบคุณภาพม้วนฟิล์มจะเก็บตัวอย่างฟิล์มจากกระบวนการผลิตตามแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติตามที่ได้กล่าวข้างต้น หากคุณภาพไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะไม่อนุญาตให้นำส่งลูกค้า ส่วนฟิล์มที่ผ่านการตรวจสอบ

สามารถนำส่งลูกค้าในรูปแบบม้วนได้เลย กรณีลูกค้าต้องการในรูปแบบแผ่นฟิล์มจะนำไปตัดเป็นแผ่นขนาดต่างๆก่อนส่งลูกค้าและตรวจสอบคุณภาพการตัดและขนาดแผ่นฟิล์มอีกครั้ง ในกรณีที่ลูกค้าต้องการขึ้นงานขึ้นรูป แผ่นฟิล์มจะถูกส่งไปขึ้นรูปตามแบบแม่พิมพ์ที่ลูกค้ากำหนด และตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำส่งลูกค้า โดยแผ่นฟิล์มในแต่ละขั้นตอนที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพจะไม่อนุญาตให้นำส่งลูกค้า สรุปขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพฟิล์มได้ดังภาพที่ 1.5





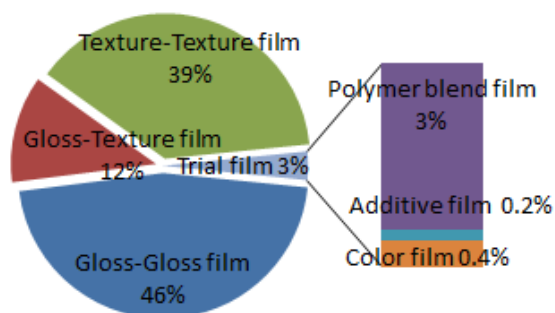
ภาพที่ 1.5 ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพฟิล์ม

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

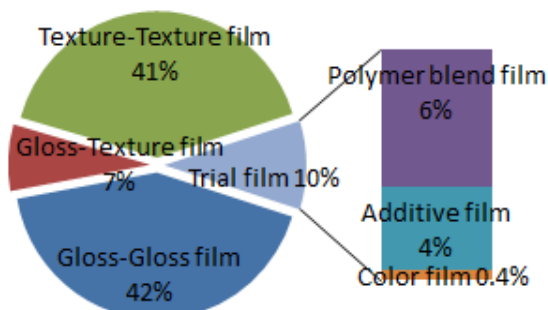
โรงงานกรณีศึกษาเผชิญปัญหาเกี่ยวกับการผลิตและคุณภาพฟิล์ม มีรายละเอียดดังนี้

### 1.2.1 สภาพปัญหาที่พบ

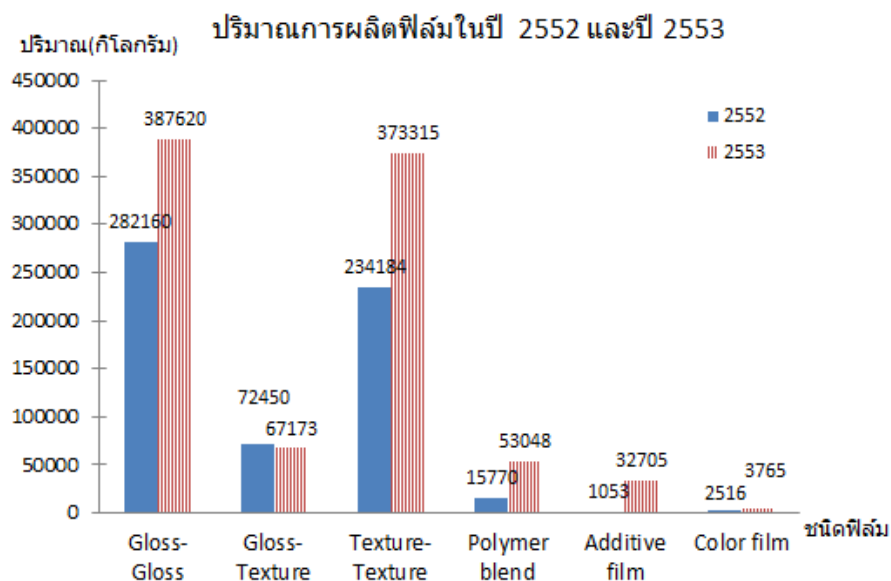
ฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดแรกที่ผลิตตั้งแต่เริ่มธุรกิจในปี 2548 ปัจจุบันสามารถผลิตได้จนมีความชำนาญ และประกอบกับมีผู้ผลิตรายอื่นที่สามารถผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตออกมาสู่ท้องตลาดได้เช่นเดียวกัน จึงทำให้โรงงานมีส่วนแบ่งทางการตลาดลดลง ภาพที่ 1.6 แสดงสัดส่วนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในปี 2552 เท่ากับ 97% และภาพที่ 1.7 แสดงสัดส่วนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในปี 2553 เท่ากับ 90% ในขณะที่ปริมาณการผลิตรวมยังคงเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.6 สัดส่วนการผลิตฟิล์มในปี 2552

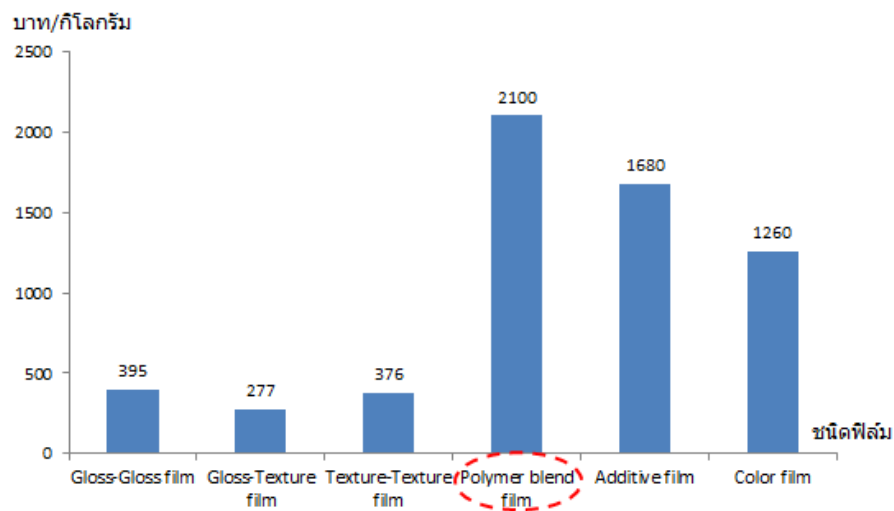


ภาพที่ 1.7 สัดส่วนการผลิตฟิล์มในปี 2553



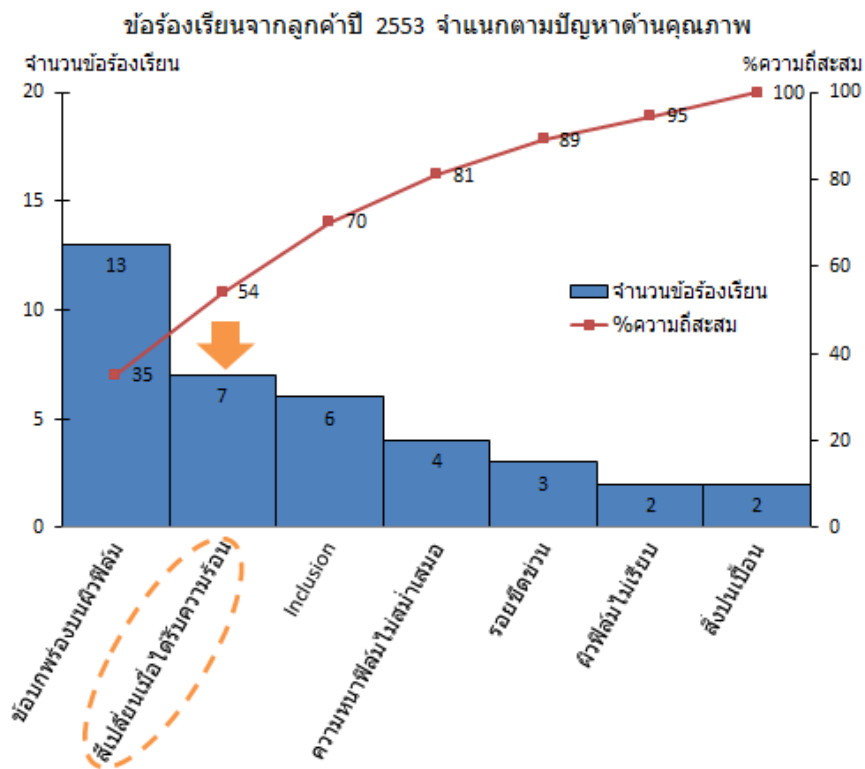
ภาพที่ 1.8 ปริมาณการผลิตฟิล์มในปี 2552 และปี 2553

ในขณะที่สัดส่วนการผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนตลดลง โรงงานกรณีศึกษาจึงพยายามขยายช่องทางการตลาดใหม่ โดยให้ความสำคัญกับการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีมูลค่าทางการตลาดที่สูงขึ้นมาทดแทน จะเห็นได้จากสัดส่วนการผลิตฟิล์มทดลองเพิ่มขึ้นจาก 3% ในปี 2552 เป็น 10% ในปี 2553 และเมื่อเปรียบเทียบมูลค่าทางการตลาดตามประเภทของฟิล์มจะพบว่าฟิล์มที่มีราคาสูงที่สุด คือ ฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเมอรัสม ดังภาพที่ 1.9 เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าฟิล์มพอลิคาร์บอเนตธรรมดา เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าทางธุรกิจสูงอย่าง อุตสาหกรรมยานยนต์ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น หากสามารถผลิตได้จนสามารถพัฒนาเป็นเกรดการค้าจะนำมาซึ่งผลกำไรทางธุรกิจอย่างมหาศาล



ภาพที่ 1.9 ราคาฟิล์มปี 2553 แยกตามชนิดของฟิล์ม

เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการก่อนนำไปใช้งาน โรงงานกรณีศึกษาจึงได้วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการทางตลาดด้านการขึ้นรูป โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ที่มีลักษณะเด่นตรงตามคุณสมบัติที่ต้องการ คือพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต และพอลิคาร์บอเนต ผสมเข้าด้วยกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่เรียกว่า พอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต มีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนทานต่อสารเคมี ช่วยให้ฟิล์มขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ และยังเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้ทนทานต่อการใช้งาน โรงงานกรณีศึกษาได้ผลิตฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต และส่งให้กับลูกค้าเพื่อทดลองใช้งาน ซึ่งแม้ว่าโรงงานกรณีศึกษาจะมีประสบการณ์ในการผลิตและดำเนินธุรกิจฟิล์ม แต่ก็ยังคงได้รับข้อร้องเรียนจากลูกค้าเกี่ยวกับคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 1.10



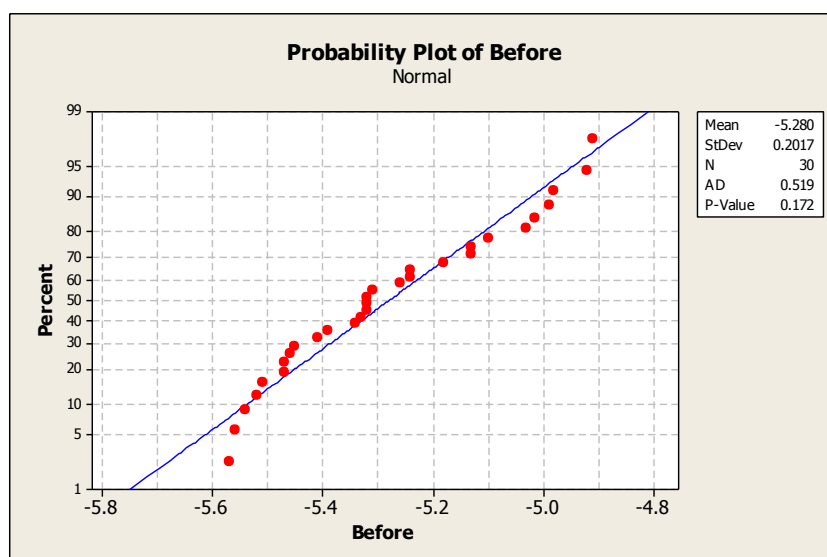
ภาพที่ 1.10 ข้อร้องเรียนจากลูกค้าปี 2553 จำแนกตามปัญหาด้านคุณภาพ

จากข้อร้องเรียนของลูกค้าเกี่ยวกับปัญหาด้านคุณภาพ พบว่าปัญหาอันดับหนึ่งคือ ข้อบกพร่องบนฉวฟิล์ม 35% ซึ่งพบได้ในฟิล์มทุกชนิด ส่วนปัญหาที่รองลงมาคือ ฟิล์มเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อน 19% ซึ่งพบเฉพาะในฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิเบทีลีน เทเรฟทาเลตเท่านั้น โดยเป็นข้อจำกัดของพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ โรงงานกรณีศึกษาจึงทำการพิสูจน์ข้อร้องเรียนของลูกค้าและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยทำการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิเบทีลีน เทเรฟทาเลตด้วยสภาวะการขึ้นรูปเดียวกันกับฟิล์มพอลิคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าตอบสนองของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตและฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลตที่สภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต

ชนิดฟิล์ม	วันผลิต	Db* ก่อนขึ้นรูป		Db* หลังขึ้นรูป		ความเงา (G.U.)		ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	
		พื้นขาว	พื้นดำ	พื้นขาว	พื้นดำ	ก่อนขึ้นรูป	หลังขึ้นรูป	ก่อนขึ้นรูป	หลังขึ้นรูป
PC	มาตรฐาน	$\pm 0.5$		$\pm 0.5$		$> 99.0$		$< 0.5$	
	ม.ค. 54	-0.06	-0.02	-0.04	0.01	104.5	103.3	0.0	0.0
	ก.พ. 54	-0.05	0.04	-0.05	0.10	104.7	103.6	0.0	0.0
	มี.ค. 54	-0.07	0.00	-0.07	-0.02	103.6	102.3	0.0	0.0
	เม.ย. 54	-0.05	0.04	-0.04	0.03	104.2	103.1	0.0	0.0
	พ.ค. 54	-0.05	0.02	-0.05	-0.03	104.7	103.8	0.0	0.0
มิ.ย. 54	-0.05	0.06	-0.04	0.02	104.1	103.3	0.0	0.0	
PC-PBT	มาตรฐาน	$\pm 1.5$		$\pm 1.5$		$> 99.0$		$< 0.5$	
	พ.ย. 53	0.04	0.68	0.15	-5.28	102.6	101.4	0.0	0.0

ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูปด้วยสภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตแสดงดังตาราง ข.1 โดยผลการทดลองที่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติดังภาพที่ 1.11



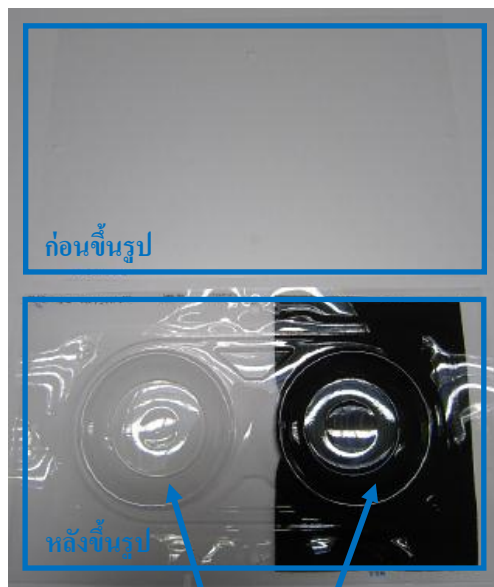
ภาพที่ 1.11 การกระจายตัวแบบปกติของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลตที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต

จากการทดสอบของ Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมี  
สมมติฐาน ดังนี้

- $H_0$  : ค่าผลต่างสีแกม  $b^*$  ที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตมี  
การแจกแจงแบบปกติ
- $H_1$  : ค่าผลต่างสีแกม  $b^*$  ที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตไม่  
มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 1.11 พบว่ามีค่า P-Value = 0.172 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  
0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าค่าผลต่างสีแกม  $b^*$  ที่ขึ้นรูปด้วย  
สภาวะของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต มีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง  
เชื่อถือได้

ผลการทดลองจากตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิคาร์บอเนตมีค่าสีแกม  
 $b^*$  ก่อนและหลังขึ้นรูป บนพื้นขาวและพื้นดำอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนด ชีงงานที่ได้มี  
คุณภาพดี ไม่มีข้อบกพร่อง และไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีหลังจากขึ้นรูป ดัง  
ภาพที่ 1.12 ส่วนฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตมีค่าสีแกม  $b^*$  ก่อนขึ้น  
รูปพื้นขาวและพื้นดำอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด แต่เมื่อนำไปขึ้นรูปพบว่าฟิล์มเกิดการ  
เปลี่ยนเฉดสีจากสีขาวโทนเหลืองเปลี่ยนเป็นสีขาวโทนฟ้า โดยค่าสีแกม  $b^*$  หลังขึ้นรูปบน  
พื้นขาวยังคงอยู่ในที่มาตรฐานที่กำหนด แต่ค่าสีแกม  $b^*$  บนพื้นดำมีค่าออกนอกมาตรฐาน  
ชีงงานที่ได้มีคุณภาพดีแต่สามารถสังเกตเห็นเฉดสีที่เปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า ดังภาพ  
ที่ 1.13 การเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์มหลังการขึ้นรูปนี้ก่อให้เกิดข้อเสียที่ไม่สามารถนำไป  
แก้ไขให้นำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ดังนั้นการลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความ  
ดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตจึงเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการ  
แปรรูปชีงงานก่อนนำส่งให้ลูกค้า และเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยพัฒนา ปรับปรุงคุณภาพ  
ชีงงาน และลดข้อเสียที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูป อีกทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย  
ด้านในการผลิตได้อีกทางหนึ่ง



ฟิล์มพอลิคาร์บอนेटที่ได้รับความร้อน ไม่เปลี่ยนสีทั้งพื้นขาวและพื้นดำ

ภาพที่ 1.12 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอนेटหลังการขึ้นรูป



ฟิล์มพอลิคาร์บอนेट-พอลิบิวทิลีน  
เทอร์ฟทาเลตไม่เปลี่ยนสีบนพื้นขาว เปลี่ยนเป็นเฉดสีฟ้าบนพื้นดำ

ภาพที่ 1.13 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอนेट-พอลิบิวทิลีน  
เทอร์ฟทาเลตหลังการขึ้นรูป



## 1.2.2 การวิเคราะห์และแนวทางแก้ไขปัญหา

เพื่อแก้ไขปัญหการเปลี่ยนสีของฟิล์มหลังการขึ้นรูป ได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นเพื่อระดมความคิดและร่วมตัดสินใจ ซึ่งประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านวัสดุศาสตร์และพอลิเมอร์ และผู้มีประสบการณ์ทำงานจากฝ่ายต่างๆ ดังนี้

- ผู้จัดการแผนกควบคุมคุณภาพและวิจัยและพัฒนา
- ตัวแทนจากฝ่ายควบคุมคุณภาพ
- ตัวแทนจากฝ่ายวิจัยและพัฒนา
- ตัวแทนจากห้องปฏิบัติการ
- ตัวแทนจากฝ่ายผลิต

### 1.2.2.1 Why-Why Analysis

จากปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้าเรื่องการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลตเมื่อได้รับความร้อนข้างต้น นำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why Analysis ซึ่งเป็นการถามย้อนกลับไปเรื่อยๆจนได้สาเหตุที่แท้จริงของปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

คำถาม 1 ทำไมจึงมีข้อร้องเรียนจากลูกค้า

คำตอบ 1 ฟิล์มที่ผลิตออกมามีปัญหาด้านคุณภาพ

คำถาม 2 ทำไมฟิล์มที่ผลิตออกมามีปัญหาด้านคุณภาพ

คำตอบ 2 ปัญหาอันดับหนึ่งเกิดจากข้อบกพร่องบนผิวฟิล์มซึ่งพบในฟิล์มหลายชนิด ปัญหารองลงมาคือปัญหาฟิล์มเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนซึ่งพบเฉพาะในฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลตเท่านั้น

คำถาม 3 ทำไมฟิล์มจึงเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อน

คำตอบ 3 ฟิล์มได้รับความร้อนที่สูงเกินไปขณะขึ้นรูปจึงเกิดการเปลี่ยนเฉดสีจากสีปกติไปเป็นเฉดสีฟ้า จนมีค่าสีออกนอกค่ามาตรฐาน

คำถาม 4 ทำไมฟิล์มได้รับความร้อนสูงเกินไปขณะขึ้นรูป

คำตอบ 4 นำสภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้  
อุณหภูมิสูง มาใช้กับฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟ  
ทาเลต

คำถาม 5 ทำไมจึงนำสภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต มาใช้กับ  
ฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต

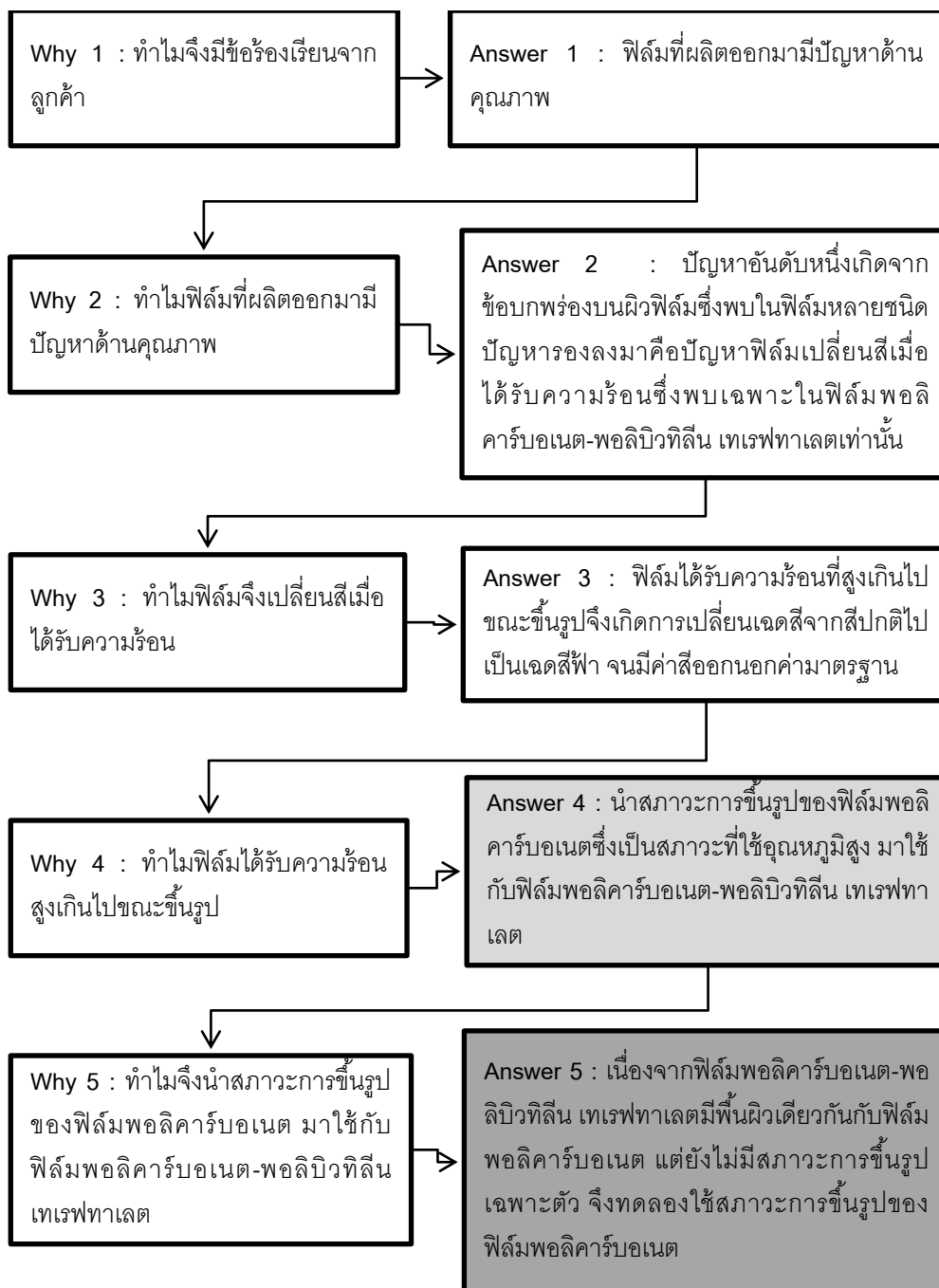
คำตอบ 5 เนื่องจากฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตมีพื้นผิว  
เดียวกันกับฟิล์มพอลิคาร์บอเนต แต่ยังไม่ีสภาวะการขึ้นรูป  
เฉพาะตัว จึงทดลองใช้สภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิ  
คาร์บอเนต

สรุปการวิเคราะห์สาเหตุการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิว  
ทิลีน เทเรฟทาเลตเมื่อได้รับความร้อนด้วย Why-Why Analysis ดังภาพที่ 1.14

จากการวิเคราะห์ Why-Why Analysis ได้คำตอบสุดท้ายที่เป็นสาเหตุที่  
ทำให้เกิดข้อร้องเรียนด้านคุณภาพ เรียงตามลำดับ ดังนี้

1. ไม่มีสภาวะการขึ้นรูปเฉพาะตัวสำหรับฟิล์มเกรดทดลองอย่างฟิล์มพอลิ  
คาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต
2. การนำสภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มพอลิคาร์บอเนตมาใช้กับฟิล์มพอลิ  
คาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนสี

สาเหตุที่ได้จาก Why-Why analysis นำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพล  
ต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยอาศัยความรู้และประสบการณ์ของคนทำงาน รวมถึง  
เอกสารที่เกี่ยวข้อง ผลการวิเคราะห์แสดงออกมาในรูปแบบผังก้างปลาซึ่งจะ  
กล่าวถึงในบทที่ 3



ภาพที่ 1.14 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why analysis

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1. อัตราส่วนพอลิคาร์บอเนต ต่อ พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ที่ใช้ผลิตฟิล์ม คือ 60% ต่อ 40%
2. ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ความหนา 0.375 มิลลิเมตร ชนิดผิวเงา-หยาบ โดยทำการศึกษาและวัดค่าเฉพาะพื้นผิวเงา
3. ศึกษาเฉพาะการขึ้นรูปที่โรงงานกรณีศึกษาเป็นผู้ขึ้นรูปให้แก่ลูกค้าเท่านั้น
4. ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง(High Pressure Forming) ด้วยเครื่องจักรรุ่น HDVF SAMK360
5. แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป คือ เรือนไมล์รถยนต์
6. ตัวแปรขาเข้าที่ศึกษา มี 5 ปัจจัย คือ
  - อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)
  - อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (Heater temperature)
  - ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Heating time)
  - ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (High pressure)
  - ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (Pressure time)
7. ตัวแปรตอบสนองที่ศึกษา คือ
  - ค่าสีและผลต่างสีแกน  $b^*$
  - ความเงาของผิวฟิล์ม
  - ความหยาบของผิวฟิล์ม
8. คำว่า “เหมาะสม” ในที่นี้หมายถึง ฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูปมีค่าความเงา ค่าความหยาบ และค่าสีอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้
9. งานวิจัยนี้ไม่พิจารณาปัจจัยด้านต้นทุน

## 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์ม
2. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต
3. วิเคราะห์และคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของการอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต
4. ศึกษาการออกแบบการทดลองและวางแผนการทดลอง
5. ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง
  - 5.1 ดำเนินการทดลองเบื้องต้น
  - 5.2 ดำเนินการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย
6. คำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักสถิติวิศวกรรม
  - 6.1 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
  - 6.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน
  - 6.3 วิเคราะห์การถดถอย
  - 6.4 หาระดับปัจจัยที่เหมาะสม
  - 6.5 ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลต
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสี เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับฟิล์มชนิดอื่น
3. สามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานขึ้นรูปให้อยู่ในระดับมาตรฐานและเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า
4. ลดของเสียจากกระบวนการขึ้นรูป รวมทั้งลดความสิ้นเปลืองในด้านต้นทุน วัตถุดิบ พลังงาน เครื่องจักรและอุปกรณ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยให้เป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจะมีการศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พลาสติก การขึ้นรูปพลาสติก ทฤษฎีสี แผนผังก้างปลา และการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 พลาสติก

Odian (1991) พอลิเมอร์ คือ โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของมอนอเมอร์ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ที่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมี ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์

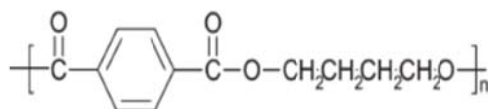
พลาสติก คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด เนื่องจากมีสมบัติอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนจึงสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้หลากหลาย สามารถแบ่งตามคุณสมบัติการทนความร้อนได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน และขึ้นรูปได้หลายครั้งโดยที่สมบัติของพลาสติกไม่เปลี่ยนแปลง จึงเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปรีชา พหลเทพ (2540) ตัวอย่างพลาสติกประเภทนี้ ได้แก่

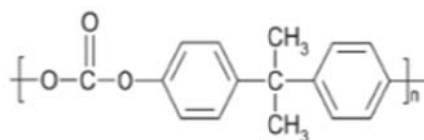
- 1.1 พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) เป็นพลาสติกในตระกูลพอลิเอสเตอร์ (Polyester) มีคุณสมบัติเด่น คือ เป็นฉนวนไฟฟ้า ภายใต้อุณหภูมิสูง และสามารถระบายความร้อนออกจากตัวได้ดีกว่าพลาสติกทั่วไป 3-5 เท่า ทนความร้อนสูงมาก มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 66 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลว 227 องศาเซลเซียส โครงสร้างของโมเลกุลมีระเบียบ ทำให้แกร่ง เหนียว ทนทานแรงกระแทกแตกได้สูง ทนสารเคมีเป็นเลิศ นิยมใช้ผสมกับสารเติมแต่งเพื่อให้สามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นและมีความแกร่งขึ้น ใช้ทำเปลือกหุ้มวงจรรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เครื่อง

กีฬา อุปกรณ์รถยนต์ เช่น เกียร์ กันชน โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต

- 1.2 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เป็นพอลิเมอร์ในตระกูลพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลว 270 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ โปร่งใส แข็ง ทนต่อความร้อนสูง ทนทานต่อกรดแต่ไม่ทนด่าง ทนแรงกระแทกได้ดี ใช้ทำขวดนมเด็ก ถ้วยชาม ส่วนประกอบรถยนต์ กระจกหน้าหมวกนักบิน แวนตานิรภัย เลนส์กล้องถ่ายภาพ หลังกาโปร่งแสง เครื่องป้องกันอัคคีภัย เครื่องกรองเลือด เครื่องแลกเปลี่ยนออกซิเจนในเลือด ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อน โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิคาร์บอเนต

- 1.3 พอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต (Polycarbonate-Polybutylene terephthalate, PC-PBT) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการนำพอลิคาร์บอเนตผสมเข้ากับพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

Birley และ Chen (2007) วิเคราะห์โครงสร้างและส่วนประกอบของพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ด้วยวิธีการทางกายภาพ (Physical method) พบว่ามีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลว 270 องศาเซลเซียส



Baron และ Rawlings (1977) ข้อดีของพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลต คือ มีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนทานต่อสารเคมี ช่วยให้ฟิล์มขึ้นรูปที่ซับซ้อนได้ มีความยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิต่ำ

Kleiner และคณะ (1985) ศึกษาการนำไปใช้งานส่วนมากจะผลิตเป็นแผ่นฟิล์ม โดยอัตราส่วนของพอลิคาร์บอเนตต่อพอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลตที่ผสมเข้าด้วยกันจะใช้พอลิคาร์บอเนต 50 – 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลต 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พลาสติกคงรูป เป็นพลาสติกที่ไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ขึ้นรูปได้เพียงครั้งเดียว มีความแข็งมาก ทนต่อความร้อนและความดัน เปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่ได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากจะแตก และไหม้เป็นถ่าน เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห เช่น เมลามีน พอลิยูรีเทน อีพอกซี เรซิน พอลิฟีนอล ฟอรัมาลดีไฮด์ และซิลิโคน เป็นต้น

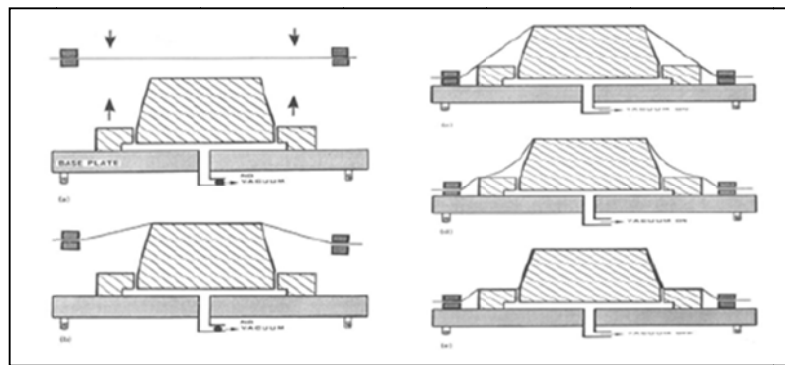
## 2.2 การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming)

จักรพันธ์ ต้นศรีวงษ์ (2553) กระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน เป็นเทคนิคการผลิตขึ้นงานลักษณะ 3 มิติจากแผ่นฟิล์ม การขึ้นรูปเกิดขึ้นในระยะเวลาที่พลาสติกมีสถานะยืดหยุ่นคล้ายยาง ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบการอัดรีดและฉีดพลาสติก ที่จะขึ้นรูปในระยะเวลาที่พลาสติกมีสถานะหลอมเหลว แผ่นพลาสติกก่อนนำไปขึ้นรูปต้องผ่านกระบวนการอัดรีดให้เป็นแผ่น เช่น กระบวนการรีดแผ่นฟิล์ม หลังจากนั้นจะให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มแล้วใช้ลมอัด หรือดูดด้วยสุญญากาศให้แนบกับแม่พิมพ์ ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่น แก้วน้ำประเภทใช้แล้วทิ้งสำหรับใส่น้ำอัดลม กล่องพลาสติกบรรจุขนมต่างๆ หรือใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น เรือนไมล์รถยนต์ แผงหน้าจอบริเวณ เป็นต้น

ชลิดา ชาญวิจิตร (2553) กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนที่นิยมใช้ มีดังนี้

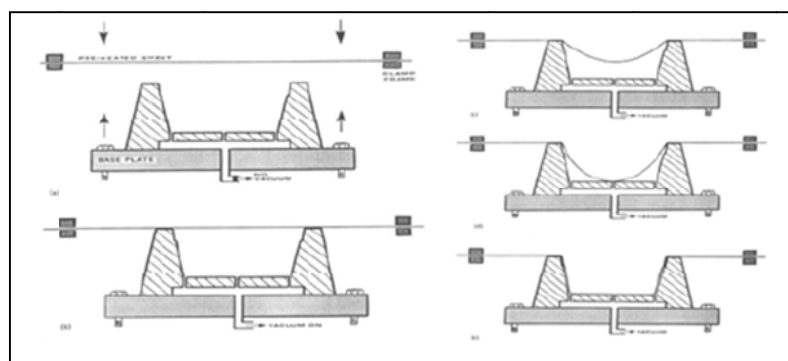
1. การขึ้นรูปแบบสูญญากาศ (Vacuum Forming) แบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ ดังนี้

1.1 การขึ้นรูปด้วยสูญญากาศแบบนูนขึ้น (Drape Vacuum Forming) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นแม่พิมพ์ตัวผู้ (Male Mold) มีขั้นตอนการขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.3



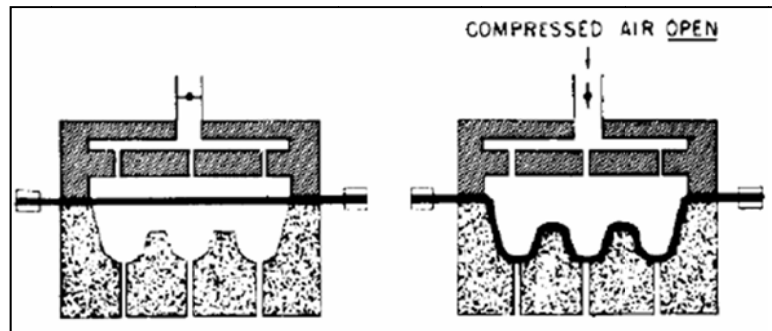
ภาพที่ 2.3 : การขึ้นรูปด้วยสูญญากาศแบบนูนขึ้น

1.2 การขึ้นรูปด้วยสูญญากาศแบบโพรง (Cavity Vacuum Forming) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวเมีย (Female Mold) มีขั้นตอนการขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การขึ้นรูปด้วยสูญญากาศแบบโพรง

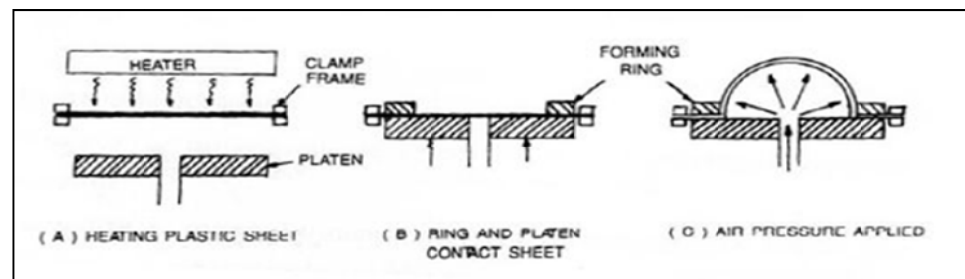
2. การขึ้นรูปแบบอัดความดัน (Pressure Forming) ใช้การอัดอากาศเข้าไปบนแผ่นพลาสติกที่ผ่านการให้ความร้อนจนอ่อนตัว อากาศจะดันแผ่นพลาสติกให้แนบติดกับแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การขึ้นรูปแบบอัดความดัน

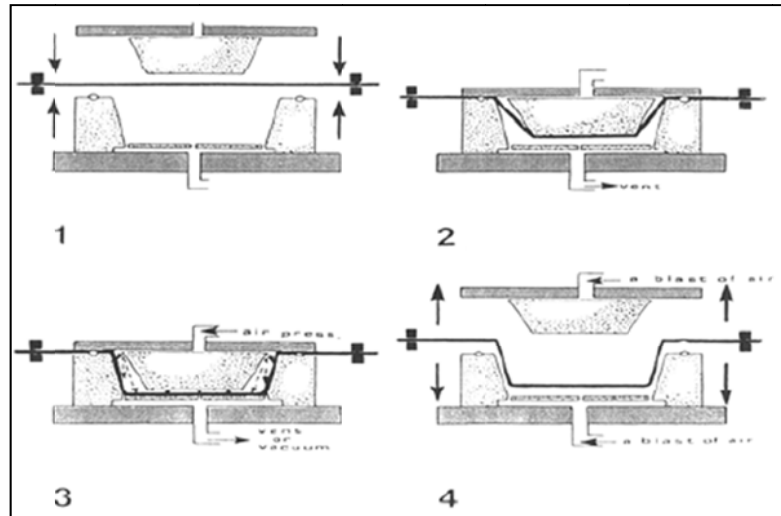
Scher (1973) ข้อดีของเทคนิคการอัดความดันสูง คือ ไม่ทำลายพื้นผิวของแผ่นฟิล์มประเภทเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากใช้ความร้อนต่ำและใช้ความดันสูงในการขึ้นรูป

3. การขึ้นรูปแบบเป่าลม (Free Blowing) การขึ้นรูปแบบนี้ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ โดยนำแผ่นพลาสติกที่ร้อนมายึดด้วยที่จับเป็นวงกลมหรือรูปแบบตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แล้วเป่าลมผ่านเข้าไปอย่างอิสระ ลมจะดันให้พลาสติกพองขึ้นมาลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การขึ้นรูปแบบเป่าลม

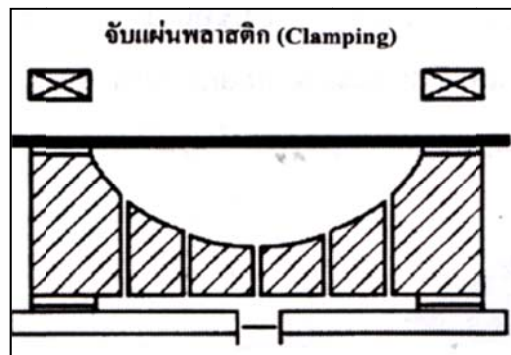
4. การขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่แบบ (Mechanical Stretch Forming) เป็นการขึ้นรูปที่เรียกว่า Plug Forming คือใช้ Mechanical Pressure เช่น Hydraulic Cylinder อัดแผ่นพลาสติกที่ร้อนลงในส่วนแม่พิมพ์ อาจใช้สุญญากาศหรือความดันช่วยด้วย ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่แบบ

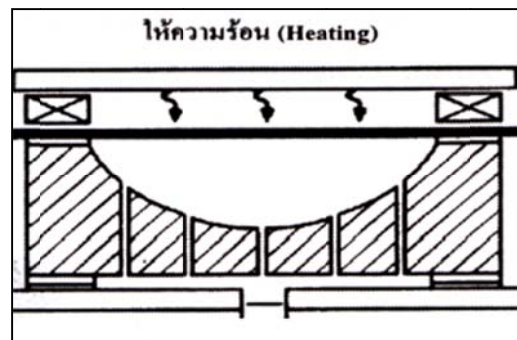
การขึ้นรูปด้วยความร้อน แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

1. การเตรียมแผ่นพลาสติก
2. การยึดแผ่นพลาสติก ใช้อุปกรณ์ยึดแผ่นพลาสติกไม่ให้เคลื่อนที่ในระหว่างขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2.8



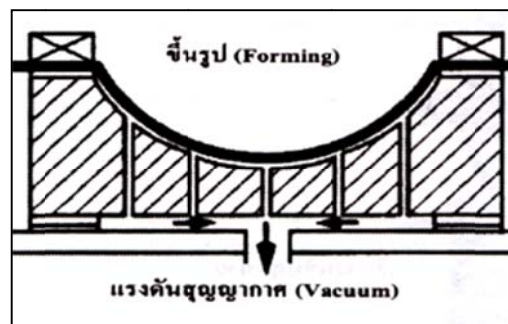
ภาพที่ 2.8 การยึดแผ่นพลาสติก

3. การให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก โดยจะให้ความร้อนจนกว่าแผ่นพลาสติกอ่อนตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.9



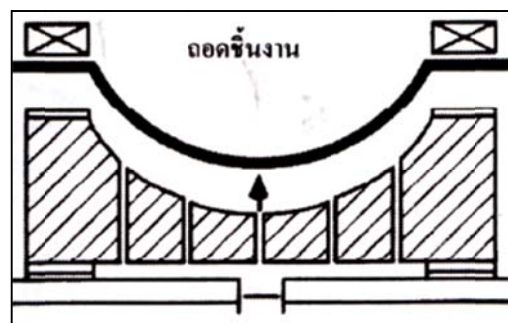
ภาพที่ 2.9 การให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก

4. การขึ้นรูปโดยการให้แรงดันสุญญากาศ ซึ่งแรงดันสุญญากาศจะดึงให้แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัว ยึดตัวประกบแม่พิมพ์ทำให้เกิดเป็นรูปทรง ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การขึ้นรูป

5. การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

## 2.3 ทฤษฎีสี

สี เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ โดยช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ ความยาวคลื่น 380 – 770 nm

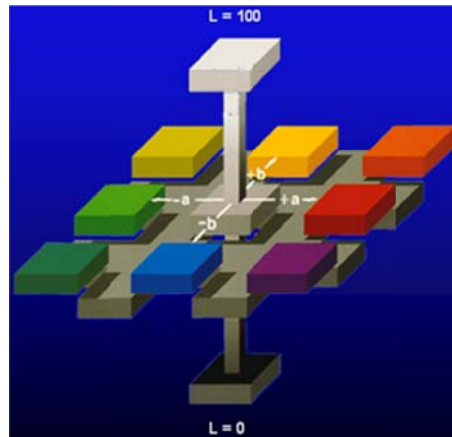
### ระบบการวัดสี

Box (2010) กล่าวถึง การวัดค่าของสีจะระบุค่าสีของวัตถุเป็น 3 ค่า ตามระบบ Hunter system ซึ่งเป็น Trichromatic system โดยมี Tristimulus values คือ ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ค่า Hunter values สามารถเปลี่ยนกลับได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณ

$$DE^* = \sqrt{(DL^*)^2 + (Da^*)^2 + (Db^*)^2}$$

- $DE^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง
- $L^*$  คือ ความสว่างและความมืดของสี มีค่าตั้งแต่ 0 – 100
- $L$  เท่ากับ 0 เป็นสีที่มืดที่สุด
  - $L$  เท่ากับ 100 เป็นสีสว่างมากที่สุด
- $DL^*$  คือ ค่าความแตกต่างความสว่างเมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง
- $DL^*$  เป็นบวก ชิ้นงานที่วัดมีความสว่างมากกว่าชิ้นงานอ้างอิง
  - $DL^*$  เป็นลบ ชิ้นงานที่วัดมีความมืดมากกว่าชิ้นงานอ้างอิง
- $a^*$  คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว
- $a^*$  เป็นบวก แสดงความเป็นสีแดง
  - $a^*$  เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว
- $Da^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง
- $b^*$  คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือความเป็นสีน้ำเงิน
- $b^*$  เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง
  - $b^*$  เป็นลบ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน
- $Db^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง

แกนสี CIELAB และเครื่องวัดสี แสดงดังภาพ 2.12 และ 2.13



ภาพที่ 2.12 แกนสี CIELAB

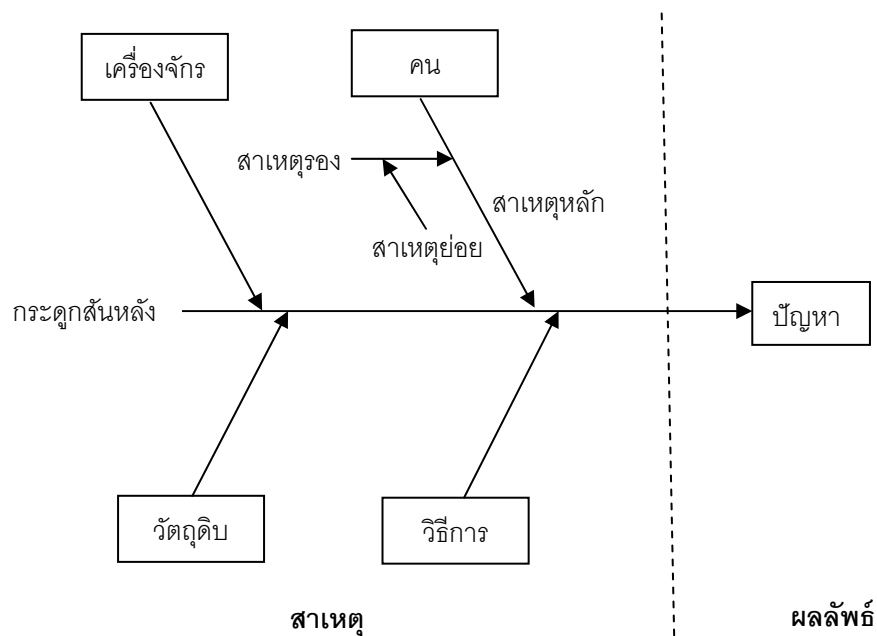


ภาพที่ 2.13 เครื่องวัดสี

#### 2.4 แผนผังก้างปลา (Fish bone diagram)

แผนผังก้างปลาเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ จะนำเสนอออกมาในรูปแผนผัง โดยเริ่มต้นจากการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของปัญหาตามหลัก 4M คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) โครงสร้างแผนผังก้างปลา แสดงดังภาพที่ 2.14 ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างแผนผังดังนี้

1. กำหนดให้สิ่งที่เป็นปัญหาอยู่ที่หัวปลา
2. เขียนสาเหตุหลักบนเส้นกระดูกสันหลังทั้งบนและล่างตามหลัก 4M
3. เขียนสาเหตุรองของแต่ละสาเหตุหลัก
4. เขียนสาเหตุย่อยของสาเหตุรองนั้นๆ



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างแผนผังก้างปลา

## 2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลองประกอบไปด้วยทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.5.1 การทดลอง

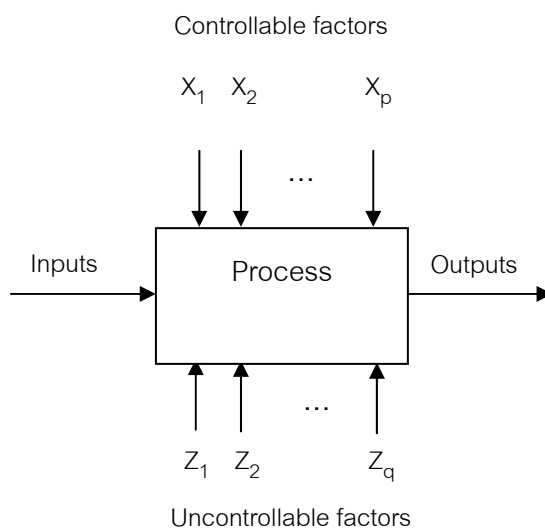
Montgomery (2009) การทดลอง คือ การทดสอบ โดยเปลี่ยนแปลงปัจจัยขาเข้าของระบบหรือกระบวนการ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยขาออกหรือผลลัพธ์ที่ได้

โดยทั่วไปการทดลองจะใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.15 โดยกระบวนการนั้นรวมถึงการทำงาน เครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ ซึ่งเปลี่ยนรูปมาจากปัจจัยขาเข้าโดยส่วนมากคือวัตถุดิบ ไปสู่ปัจจัยขาออกที่มีตัวแปรตอบสนองเดียวหรือมากกว่า ในบางกระบวนการตัวแปร  $x_1, x_2, \dots, x_p$



สามารถควบคุมได้ ขณะที่ตัวแปร  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  ไม่สามารถควบคุมได้ วัตถุประสงค์ของการทดลองจึงประกอบด้วย

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อตัวแปรตอบสนอง  $y$
2. หาวิธีตั้งค่าตัวแปร  $x$  เพื่อที่จะทำให้ตัวแปร  $y$  มีค่าใกล้เคียงค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีตั้งค่าตัวแปร  $x$  เพื่อที่จะทำให้ตัวแปร  $y$  มีค่าน้อย
4. หาวิธีตั้งค่าตัวแปร  $x$  เพื่อที่จะทำให้ผลกระทบจากตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  มีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 2.15 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

วิชาญ วรรณ (2545) ปัจจัยในกระบวนการหรือระบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนและควบคุมค่าในกระบวนการได้ ส่วนมากค่าที่สนใจศึกษาในการทดลองจะเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงค่าในกระบวนการได้ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของกระบวนการ หรือความสามารถของเครื่องจักรเอง ในการทดลองจึงพยายามเปลี่ยนแปลงปัจจัยนี้ให้เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ เพื่อที่จะศึกษาผลของปัจจัย

## 2.5.2 หลักการพื้นฐาน

ปารเมศ ชูติมา (2545) การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ

หลักการพื้นฐาน 3 ประการของการออกแบบการทดลอง ได้แก่

1. เพลกซัน (Replication) คือ การทดลองซ้ำ เพื่อให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลองได้ และมีการนำค่าเฉลี่ยมาใช้ประมาณผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ทำให้ผู้ทดลองได้ตัวประมาณค่าที่ถูกต้อง
2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) คือ การทดลองที่วัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่จะเกิดขึ้นกับการทดลอง
3. บล็อกกิง (Blocking) คือ การทดลองที่วัสดุที่ใช้ในการทดลองส่วนหนึ่งนั้นมีความเหมือนกันมากกว่าชุดวัสดุทั้งหมด จะช่วยทำให้การทดลองมีความเที่ยงตรง

## 2.5.3 แนวทางการออกแบบการทดลอง

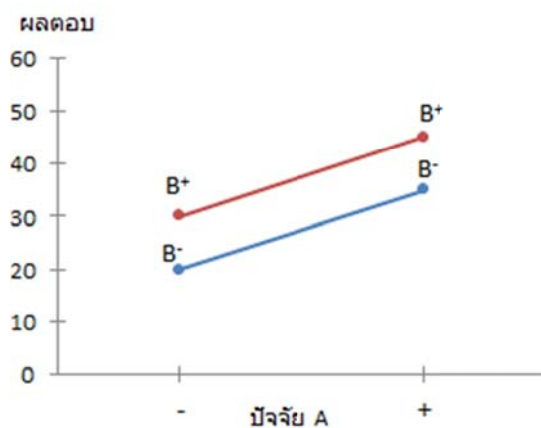
ปารเมศ ชูติมา (2545) วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง จะใช้เป็นแนวทางในการระบุปัญหา การเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจปัญหา ขั้นตอนนี้ต้องรวบรวมข้อมูลจากคณะทำงานหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เข้าใจสภาพปัญหาจริงและสรุปเป็นประเด็นปัญหาที่ชัดเจน
2. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ต้องเลือกปัจจัยที่จะศึกษา แล้วกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้กว้างเพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้มากที่สุด แต่ควรกำหนดระดับของปัจจัยให้มีจำนวนน้อยๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องออก ทั้งนี้ผู้ทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการเป็นอย่างดี

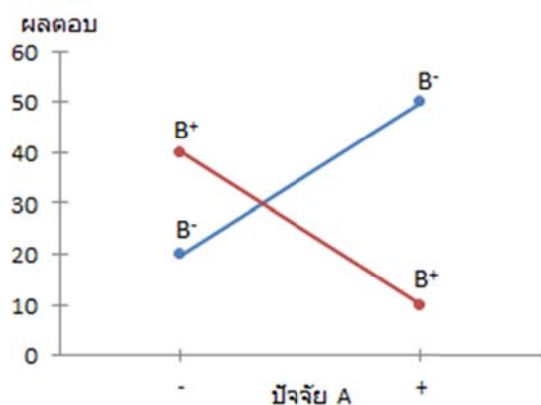
3. การเลือกตัวแปรผลตอบ ให้เลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่ต้องการวัดจากกระบวนการได้ และศึกษาวิธีการวัดค่าตัวแปรนั้นก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง โดยในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองมากกว่าหนึ่งตัว
4. การออกแบบของการทดลอง ขั้นตอนนี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง การเลือกลำดับการทดลอง และการเลือกใช้วิธีการบล็อกหรือเรพลิเคชันโดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นหลัก
5. การทดลอง ต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง และติดตามผลเพื่อให้แน่ใจว่าดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน และไม่มีข้อผิดพลาด
6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ใช้วิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้ความรู้ทางวิศวกรรมกระบวนการ และสามัญสำนึกประกอบจะทำให้ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและน่าเชื่อถือ
7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น โดยเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย และทำการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุป

## 2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)

ปารเมศ ชูติมา (2545) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลทั้งหมดที่เป็นไปได้ของระดับปัจจัยทั้งหมดในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต จะประกอบด้วย  $a \times b$  การทดลอง โดยค่าตอบสนองที่เกิดขึ้นนั้นมีผลมาจากปัจจัยหลัก (Main effect) ซึ่งก็คือผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ หรือมีผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Interaction) ซึ่งหมายความว่าค่าตอบสนองของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น อธิบายผลของอันตรกิริยาได้ดังภาพที่ 2.16 และ 2.17



ภาพที่ 2.16 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีผลจากอันตรกิริยา



ภาพที่ 2.17 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีผลจากอันตรกิริยา

จากภาพที่ 2.16 เป็นกราฟระหว่างค่าตอบสนองของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นกราฟของ B<sup>-</sup> และ B<sup>+</sup> ขนานกันแสดงว่าไม่มีผลจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ส่วนภาพที่ 2.17 จะเห็นว่าเส้นกราฟของ B<sup>-</sup> และ B<sup>+</sup> ไม่ขนานกันแสดงให้เห็นมีผลจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B

ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล

1. เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองที่ละปัจจัย สามารถศึกษาผลของอันตรกิริยาได้ หลีกเลียงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้
2. สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆของปัจจัยอื่นได้ ทำให้ได้ข้อสรุปที่สมเหตุสมผล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่นิยมใช้ ได้แก่

### 2.6.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$ ( $2^k$ Factorial Design)

หมายถึงการออกแบบที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+1) และระดับต่ำ (-1) ใน 1 เพลทที่สมบูรณ์ประกอบด้วย  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล โดยมีสมมติฐานว่าปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว การออกแบบเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ และสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับ

แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ  $2^k$  จะประกอบด้วยผลหลัก  $k$  ชนิด ( $\binom{k}{2}$ ) คืออันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย ( $\binom{k}{3}$ ) คืออันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ... และ 1 อันตรกิริยาของ  $k$  ปัจจัย โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น
2. สร้างแบบจำลองเบื้องต้นแบบเต็มรูปแบบ
3. วิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา รูปแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงตารางที่ 2.1
4. คัดเกลาแบบจำลอง โดยดึงเอาปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ
5. วิเคราะห์ส่วนตกค้าง เพื่อตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น
6. วิเคราะห์ด้วยกราฟของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ  $2^k$ 

Source of variation	Sum of square	Degree of freedom
K main effect		
A	$SS_A$	1
B	$SS_B$	1
•	•	•
•	•	•
•	•	•
K	$SS_K$	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	$SS_{AB}$	1
AC	$SS_{AC}$	1
•	•	•
•	•	•
•	•	•
$\binom{k}{3}$ three-factor interactions		
ABC	$SS_{ABC}$	1
ABD	$SS_{ABD}$	1
•	•	•
•	•	•
•	•	•
IJK	$SS_{IJK}$	1
•	•	•
•	•	•
•	•	•
$\binom{k}{k} = 1$ - k-factor interactions		
ABC ... K	$SS_{ABC \dots K}$	1
Error	$SS_E$	$2^k(n-1)$
Total	$SS_T$	$n2^k-1$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากสำหรับการทดลองในช่วงแรก เนื่องจากมีจำนวนการทดลองน้อยแต่สามารถศึกษาผลของปัจจัยได้ครบทั้ง  $k$  ชนิด สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้น้อยลง แต่เนื่องจากแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ จึงสมมติให้ค่าตอบสนองที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง

## 2.6.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$ แบบมีจุดศูนย์กลาง ( $2^k$ Factorial Design with center point)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  จะมีสมมติฐานว่าค่าตอบสนองของตัวแปรที่ศึกษามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง การเติมพจน์ของอันตรกิริยาเข้าไปในแบบจำลองชั้นที่หนึ่ง (First-order model) ดังสมการ

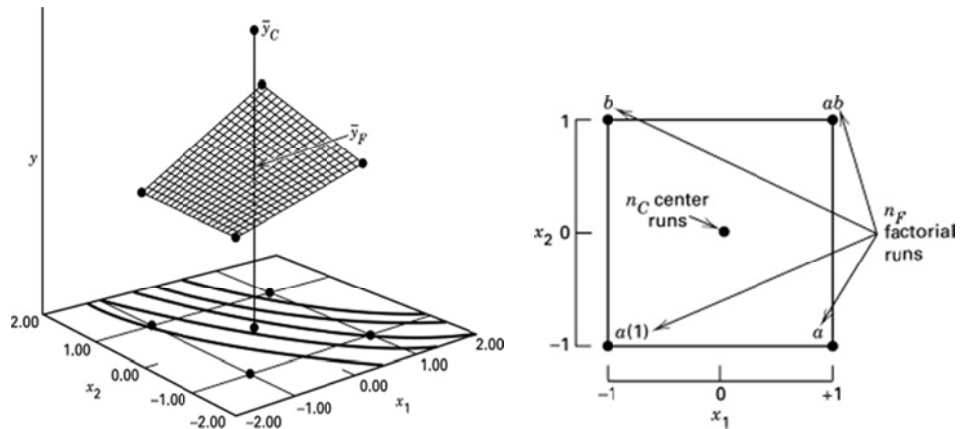
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

แบบจำลองชั้นที่หนึ่งสามารถแสดงได้เฉพาะส่วนโค้งบางประการของค่าตอบสนอง แต่ยังไม่เพียงพอต่อการอธิบายความสัมพันธ์พื้นผิว จึงต้องใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่า ดังสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon$$

โดย  $\beta_{ij}$  จะแสดงถึงผลขั้นที่สอง (Second-order effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic effect) และเรียกสมการนี้ว่า แบบจำลองพื้นผิวตอบสนองขั้นที่สอง (Second-order response surface model)

การทดสอบพื้นผิวโค้งของบริเวณที่ศึกษาทำได้โดยการเติมจุดศูนย์กลางให้กับ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  และทำการทดลองซ้ำบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางของระนาบ จุดศูนย์กลางที่เติมเข้าไปนี้ไม่ได้ส่งผลต่อการประมาณค่าตามปกติของการออกแบบ  $2^k$  แต่อย่างไร อธิบายได้ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^2$  แบบเพิ่มจุดศูนย์กลาง

จากภาพที่ 2.18 พิจารณาการออกแบบ  $2^2$  ที่มีข้อมูล 1 ตัว ที่แต่ละจุดของแฟคทอเรียล (-,-), (+,-), (-,+) และ (+,+) มีข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง (0,0) อยู่  $n_c$  ตัว กำหนดให้  $\bar{y}_F$  เป็นค่าเฉลี่ยของมุมทั้งสิ้น และ  $\bar{y}_C$  เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $n_c$  ที่จุดกึ่งกลาง ถ้าผลต่างระหว่าง  $\bar{y}_F - \bar{y}_C$  มีค่าน้อยแสดงว่าจุดศูนย์กลางนี้จะอยู่บนหรือใกล้กับระนาบที่ผ่านจุดของแฟคทอเรียล และไม่มีส่วนโค้งแบบควอดราติก ส่วนการทดสอบส่วนโค้งควอดราติกบริสุทธิ์เมื่อเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ  $2^k$  ก็คือการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ

$$H_0 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} = 0$$

$$H_1 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \neq 0$$

ประโยชน์ของการออกแบบ  $2^k$  แบบมีจุดศูนย์กลาง

1. สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดได้
2. สามารถตรวจสอบอันตรกิริยาในแบบจำลอง
3. สามารถตรวจสอบผลของควอดราติกได้



### 2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $3^k$ ( $3^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $3^k$  หมายถึงการออกแบบที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ปานกลาง (0) และสูง (+1) ตัวอย่างเช่น ในกรณีการออกแบบ  $3^2$  จะแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \varepsilon$$

ในแบบจำลองจะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามา ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้ การออกแบบ  $3^k$  จึงเหมาะสำหรับค่าตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง แต่ยังไม่ใช้การออกแบบที่ดีที่สุดเนื่องจากการออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีความเหมาะสมสำหรับความสัมพันธ์แบบควอดราติกมากกว่า

## 2.7 การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา และสร้างแบบจำลอง เพื่อหาระดับปัจจัยที่ดีที่สุดของค่าตอบสนอง โดยค่าตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร พื้นผิวตอบสนองจะแสดงในรูปแบบกราฟฟิกเพื่อให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ตัวประมาณค่าที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและตัวแปรอิสระในกรณีที่เป็นเชิงเส้นจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการ

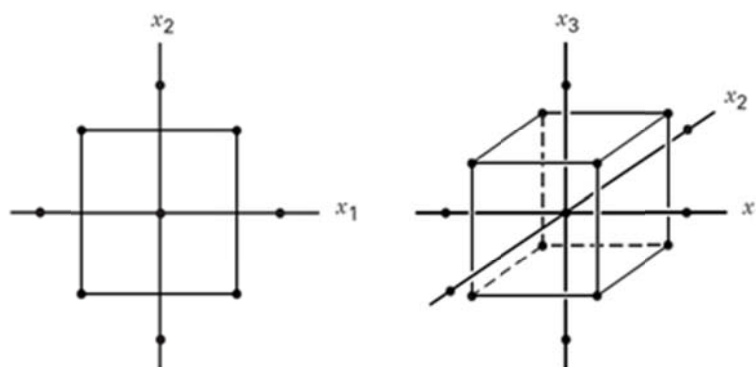
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon$$

การประมาณค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลองพหุนามจะใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง ตัวแปรต่างๆของแบบจำลองจะถูกประมาณได้เป็นอย่างดีถ้าเราออกแบบการทดลองเพื่อที่เก็บให้ค่าได้อย่างเหมาะสม

การออกแบบพื้นผิวดอปสองที่นิยมใช้ ได้แก่ แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิต และแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

### 2.7.1 แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิต (Central composite design)

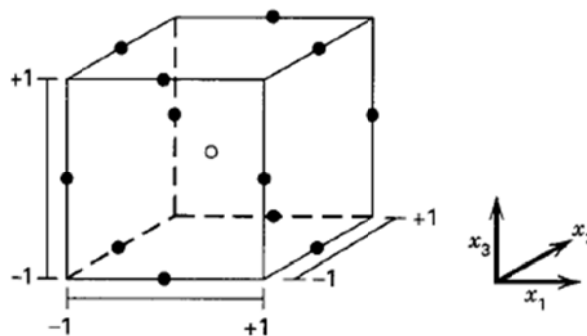
แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตเป็นการออกแบบที่ใช้ในการฟิตแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองอันดับที่สอง เกิดขึ้นจากการใช้การออกแบบ  $2^k$  กับแบบจำลองอันดับที่หนึ่งแล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับข้อมูล จึงมีการทำการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ ดังภาพที่ 2.19 การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง และมีความสามารถในการหมุน



ภาพที่ 2.19 การออกแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตสำหรับ 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัย

### 2.7.2 แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design)

แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบ 3 ระดับ สำหรับพีตพื้นผิวตอบสนอง เกิดมาจากการรวมเอาการออกแบบ  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์เข้าด้วยกัน ทำให้มีจำนวนการทดลองที่น้อยและมีความสามารถในการหมุน ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับ 3 ปัจจัย

จากภาพที่ 2.20 พบว่าการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงวงกลม ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  ไม่ได้รวมเอาจุดยอดของลูกบาศก์ซึ่งมาจากขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของแต่ละตัวแปร มีประโยชน์ในกรณีที่จุดมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมของระดับปัจจัยที่มีค่าใช้จ่ายสูง หรือไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการ

## 2.8 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองซึ่งเขียนแทนด้วย  $Y$  กับตัวแปรอิสระซึ่งเขียนแทนด้วย  $X$  ที่อาจจะมากกว่าหนึ่งตัว เพื่อที่จะประมาณค่าหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองจากตัวแปรอิสระที่ทราบค่าหรือมีค่าคงที่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

### 2.8.1 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

ในกรณีที่ต้องการประมาณค่าตัวแปรเพียงตัวเดียวจะใช้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) แต่ถ้ามีตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปจำเป็นต้องใช้สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของการทดลองแบบปัจจัยเดียว โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระเป็นแบบเส้นตรง มีรูปแบบสมการดังนี้

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

โดยที่	$y_i$	คือ ค่าสังเกตที่ $i$ ของตัวแปรตอบสนอง
	$\beta_j$	คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยลำดับที่ $j$
	$x_i$	คือ ค่าสังเกตที่ $i$ ของตัวแปรอิสระ
	$\varepsilon_i$	คือ ค่าที่ $i$ ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม
	$i$	เท่ากับ 1, 2, 3, ..., $n$
	$j$	เท่ากับ 1, 2, 3, ..., $n$
	$n$	คือ จำนวนข้อมูล

#### 2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของการทดลองที่มีหลายปัจจัย โดยมีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไปเดียว มีรูปแบบสมการดังนี้

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

โดยที่	$y_i$	คือ ค่าสังเกตที่ $i$ ของตัวแปรตอบสนอง
	$\beta_j$	คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยลำดับที่ $j$
	$x_i$	คือ ค่าสังเกตที่ $i$ ของตัวแปรอิสระ $j$

$\varepsilon_i$	คือ ค่าที่ $i$ ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม
$i$	เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, n$
$j$	เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, n$ โดยที่ $X_{0i} = 1$
$k$	คือ จำนวนตัวแปรอิสระ
$n$	คือ จำนวนข้อมูล

## 2.8.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์

จากแบบจำลองการถดถอยที่ได้ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ จะประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square) ได้ค่าประมาณเป็น  $b_j$  ซึ่งเป็นค่าความแปรปรวนต่ำที่สุด มีรูปแบบสมการดังนี้

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1x_{1i} + \dots + b_kx_{ki}$$

โดยที่	$\hat{Y}_i$	คือ ค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของ $Y_i [E(Y_i)]$
	$x_{ij}$	คือ ค่าสังเกตที่ $i$ ของตัวแปรอิสระที่ $j$
	$b_j$	แทน ค่าประมาณของ $\beta_j$
	$i$	เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, n$
	$j$	เท่ากับ $0, 1, 2, 3, \dots, k$

## 2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง ( $Y$ ) กับเซตของตัวแปรอิสระ ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) หรือการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 2.2 โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{มีอย่างน้อยหนึ่ง } \beta_j \neq 0 \quad \text{โดยที่ } j = 0, 1, 2, \dots, k$$

สถิติสำหรับทดสอบคือ

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $F > F_{\alpha, k, n-k-1}$  โดย  $k$  คือจำนวนพารามิเตอร์

ถ้ายอมรับ  $H_0$  แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระ

ถ้าปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่ามีความสัมพันธ์ตัวแปรอิสระ  $X_j$  อย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง สมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการพยากรณ์ตัวแปรตาม

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F
Regression	SSR	k	MSR = SSR / k	F = MSR / MSE
Error	SSE	n-k-1	MSE = SSE / (n-k-1)	
Total	SST	n-1		

## 2.10 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The Coefficient of Determination ; $R^2$ )

$R^2$  เป็นตัววัดของค่าที่ลดลงในความผันแปรของ  $Y$  เมื่อใช้ตัวถดถอย  $x_1, x_2, \dots, x_k$  ในแบบจำลอง เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าตัวแปรอิสระ โดยคำนวณจาก

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

การเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้  $R^2$  มีค่าเพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไบนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ จึงมีการปรับค่าและเรียกว่า  $R^2_{adj}$  ( Adjusted  $R^2$  ) โดยคำนวณได้จากสูตร

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST} = 1 - \left[ \frac{SSE/(n - k - 1)}{SST/(n - 1)} \right]$$

ถ้า  $R^2$  และ  $R^2_{adj}$  มีค่าต่างกันมาก แสดงว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญถูกเติมเข้าไปในแบบจำลอง

## 2.11 การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย (Model Adequacy)

การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลว่ามีลักษณะตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ศูนย์ และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ทำการตรวจสอบ 4 ขั้นตอน ดังนี้

### 1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่เรียงลำดับจากน้อยไปหามากถ้ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

### 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent)

เป็นการตรวจสอบความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ถ้าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

### 3. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง

พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เพื่อตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง ถ้าพบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมี

การกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกร้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์

#### 4. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกร้างเทียบกับ Fitted Value ถ้าพบว่าความแปรปรวนของส่วนตกร้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

จากทั้ง 4 ขั้นตอน ถ้าพบว่ารูปแบบการกระจายตัวของส่วนตกร้างที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ทุกประการ สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองมีความถูกต้อง เชื่อถือได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไปได้

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะทำให้ทราบถึงแนวทางการดำเนินงานวิจัยในปัญหาประเภทเดียวกัน เข้าใจขั้นตอนตั้งแต่การค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การทดลองเบื้องต้น การทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม การคำนวณและวิเคราะห์ผล จนถึงการสรุปผล ทำให้สามารถดำเนินการทดลองไปตามแนวทางที่ถูกต้อง และเลือกการออกแบบที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาและข้อมูล

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นขึ้นจากการค้นหาและคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเนื่องจากต้องนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการทดลอง จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพช่วยในการค้นหาเพื่อให้ได้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่แท้จริง ปาริชาติ นาทะสัน (2553) ได้ออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก โดยเบื้องต้นใช้การระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง อ้างอิงหลักการทางวิศวกรรม และพิจารณาข้อมูลจากการทดลองในอดีตที่ผ่านมา เพื่อระบุปัจจัยที่เป็นไปได้ที่มีผลกระทบต่อระยะร่องกาวที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนด เครื่องมือที่นำมาประยุกต์ใช้ คือ แผนภาพสาเหตุและผล โดยใช้หลักการ 4M 1E เป็นแนวทางในการพิจารณารายละเอียดของปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป ณิชชา พลศิลป์ (2553) เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่ออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ : กรณีศึกษาโรงงานประกอบรถยนต์ โดยใช้ข้อมูลในอดีตและการระดมความคิดจาก



ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องเพื่อค้นหาสาเหตุให้ครอบคลุมมากที่สุด และวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องผ่านแผนภาพสาเหตุและผล แล้วทำการกำหนดปัจจัยในเบื้องต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติต่อไป ส่วนงานวิจัยของชัยยา ฉุยฉาย (2552) ทำการออกแบบการทดลองแก้ไขปัญหาคาการฉีดขึ้นงานพลาสติกในงานผลิตชิ้นส่วนจักรยานยนต์ ใช้แผนภูมิพาเรโต้แสดงลำดับและเปอร์เซ็นต์ของลักษณะอาการเสียของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ เพื่อเลือกปัญหาที่มีความถี่สูงสุดมาแก้ไข จากนั้นจึงวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลา ในงานวิจัยต่างประเทศก็มีการใช้แผนภาพสาเหตุและผลเช่นกัน ในงานวิจัยของ Bharti (2010) Recent Method for Optimization of Plastic Injection Molding-a Retrospective and Review ใช้แผนภาพสาเหตุและผลในการวิเคราะห์สาเหตุของข้อบกพร่องในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยแบ่งแหล่งสาเหตุออกเป็น รูปแบบของแม่พิมพ์ พารามิเตอร์ในกระบวนการ เครื่องจักร พนักงาน และวัตถุดิบ ตามหลักการ 4M

นอกจากแผนภาพสาเหตุและผลแล้วยังมีเครื่องมืออื่นที่สามารถใช้ค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้เช่นกัน ดังเช่น วิชาญ วรธนา (2545) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งต่อเนื่อง โดยวิธีออกแบบการทดลอง ได้จัดทำแบบสอบถามเพื่อให้วิศวกรและผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องทำประเมินปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยแบบประเมินอิทธิพลของปัจจัยแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ให้ประเมินโดยใช้ประสบการณ์จากการทำงาน แล้วรวบรวมคะแนนเพื่อคัดเลือกปัจจัย จะนำปัจจัยที่มีอิทธิพลอยู่ในระดับ 4 ขึ้นไปมาทำการทดลอง ส่วนปัจจัยที่มีอิทธิพลอยู่ในระดับต่ำจะไม่นำมาพิจารณา

ก่อนที่จะถึงขั้นตอนการออกแบบการทดลองจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โชติวิเศษ ชมเกษร และคณะ (2554) ได้ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์เพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับการขึ้นรูปหน้าปิดเรือนไมล์ด้วยกรรมวิธีลมอัดความดันสูง โดยทดลองขึ้นรูปแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 110 – 130 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตัวให้ความร้อนเท่ากับ 260 – 280 องศาเซลเซียส เวลาที่ได้รับความร้อนก่อนขึ้นรูป 25 วินาที ความดันที่ใช้ขึ้นรูปเท่ากับ 100 - 120 บาร์ หากให้ความร้อนเกินช่วงที่เหมาะสมจะทำให้เกิดตำหนิบนชิ้นงาน อีกรงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ ภูมิพัฒน์ กิ่งแก้ว และคณะ (2554) การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์เทอร์โมฟอร์มมิ่งสำหรับขึ้นรูปโมเดลรถยนต์ด้วยระบบ CAD/CAM/CAE กล่าวถึงอุณหภูมิจากตัวให้ความร้อนที่ส่งมาถึงแผ่นฟิล์มจะมีค่าเท่ากับ 80 – 85 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุดของอุณหภูมิตัวให้ความร้อน เช่น ถ้าตั้งอุณหภูมิตัวให้ความร้อนเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่แท้จริงที่แผ่นฟิล์มได้รับจะอยู่ในช่วง 224 – 238 องศาเซลเซียส เป็นต้น

เมื่อคัดเลือกงานได้ปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบการทดลอง โดยจะแบ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การออกแบบการทดลองเบื้องต้น และการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม การออกแบบการทดลองจะพิจารณาจำนวนปัจจัยเข้าที่ใช้ในการทดลอง ข้อจำกัดในการวิจัย ความเป็นไปได้ทางด้านเวลาและวัตถุดิบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ปารีชาติ นาทะสัน (2553) ออกแบบการทดลองเบื้องต้นที่ใช้สำหรับคัดกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ เทคนิคดังกล่าวมีจำนวนการทดลองน้อยกว่าแผนการทดลองแบบอื่น ๆ สามารถทดสอบหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกันได้ โดยมีวิธีการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก จึงใช้ทดสอบสมมติฐานว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าระยะห่างร่องขาวของปัจจัยหลักได้ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้แยกปัจจัยรบกวนออกมา เนื่องจากปัจจัยรบกวนนั้นยากต่อการควบคุม จึงใช้วิธีสุ่มแบบสมบูรณณ์ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ และเพื่อให้การทดลองมีโอกาสความน่าจะเป็นที่จะได้รับผลกระทบจากปัจจัยรบกวนเท่าๆกัน ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

พิจารณางานวิจัยเกี่ยวกับพลาสติก บางงานวิจัยมีข้อจำกัดด้านวัสดุในการทดลองไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ เช่น ชลิดา ชาญวิจิตร (2553) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูประบบ สูญญากาศสำหรับผลิตพลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาเรื่องรูปทรงและความหนาของชิ้นงาน 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนพลาสติก ช่วงเวลาในการให้ความร้อน ช่วงเวลาในการให้สุญญากาศ ช่วงเวลาในการให้ลมเป่า และช่วงเวลาในการให้ลมเย็น ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^5$  ทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากมีวัสดุที่ใช้ในการทดลองจำกัด ค่าตอบสนองของงานวิจัยนี้คือ ความหนาของพลาสติกหลังการขึ้นรูป เช่นเดียวกับงานวิจัยของจักรพันธ์ ต้นศรีวงษ์ (2553) ที่ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน สำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสุญญากาศโดยวิธีออกแบบการทดลอง มีสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องรูปทรงและความหนาของชิ้นงาน 6 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก ช่วงเวลาในการให้ความร้อน ช่วงเวลาในการให้สุญญากาศ ช่วงเวลาในการให้ลมเป่า ลักษณะของแม่พิมพ์ และทิศทางในการวางแบบแม่พิมพ์ ประยุกต์ใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน สามารถลดจำนวนการทดลองจากเดิม 64 การทดลองเหลือเพียง 32 การทดลอง โดยทดลองเพียง 1 ซ้ำ เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ในงานวิจัยที่มีวัสดุและทรัพยากรเพียงพอจะมีการทดลองซ้ำเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง ดังเช่นงานวิจัยของศรีสัจจา บุญฤทธิ์ (2542) อิทธิพลปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล โดยศึกษาการขึ้นรูปพอลิพรอพิลีน มีปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่

ศึกษา 5 ปัจจัย คือ แรงดันรักษาชิ้นงานให้อยู่ในแม่พิมพ์ แรงดันการฉีด ความเร็วการฉีด อุณหภูมิ หัวฉีด และความเร็วรอบสกรู ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^5$  แบบเต็มจำนวน ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่ม

ในงานวิจัยที่มีระดับของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ระดับจะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $3^k$  ดังเช่น ประเสริฐ ชุมปัญญา (2552) การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน กรณีศึกษาในสาขาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ทดลองขึ้นรูปพอลิพรอพิลีนด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $3^2$  โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพียง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการให้ความร้อน และระยะเวลาในการให้ความร้อน รวมถึงงานวิจัยของโสภิตา ท่วมมี (2550) การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก ทดลองเบื้องต้นด้วยแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^3$  ไม่ได้จัดลำดับการทดลองให้เป็นแบบสุ่มเนื่องจากข้อจำกัดในการปรับระดับของปัจจัย จึงทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อลดอคติของการทดลองที่อาจจะเกิดขึ้น จากนั้นนำปัจจัยที่ได้จากการกรองไปทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $3^2$  จนได้แบบจำลองที่เหมาะสมเป็นแบบควอดราติก

กรณีที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นเป็นแบบเส้นโค้งควอดราติกจะต้องใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง ดังเช่น ปฐมพงศ์ พันธุ์พิบูลย์ (2552) การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกมา ในขั้นตอนของกระบวนการวัดได้นำเอาหลักการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design) มาใช้ในการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาความหนาของฟิล์มที่ทดสอบในสภาวะต่างๆ และสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่าง อีกรงานวิจัยที่มีการใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง คือ รัตนพันธุ์ นพแก้ว (2553) การหาค่าพารามิเตอร์ในการเคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรต์ด้วยกระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา ใช้การออกแบบการทดลอง  $2_{III}^{7-4}$  เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาโดยไม่สนใจผลของอันตรกิริยา ทำการทดลองซ้ำเดียวเพื่อให้กระทบต่อการผลิตน้อยที่สุด แล้ววิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นโดยการออกแบบการทดลอง  $2_{III}^6$  แบบ เพิ่มจุดกึ่งกลางพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น จึงหาตัวแบบความสัมพันธ์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยเลือกใช้การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม แต่เนื่องด้วยสภาวะการสร้างฟิล์มที่ใช้อยู่ในปัจจุบันดีกว่าเงื่อนไขที่พบจากการทดลอง จึงทำให้ไม่มีการปรับกระบวนการผลิตแต่อย่างใด

ในบางงานวิจัยเลือกใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนองแบบบอซ-เบห์นเคน ดังเช่น ณิชชา พลศิลป์ (2553) หลังจากทดลองเบื้องต้นด้วยการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล  $2^4$  แบบมีจุดศูนย์กลาง เพื่อทดสอบความเป็นเชิงเส้นของค่าความสว่างของเจดสีบรอนซ์เงินในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ พบว่ามีผลของส่วนโค้งขั้นที่สองเกิดขึ้นในขอบเขตที่ศึกษา จึงต้องใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองแบบบอซ-เบห์นเคนเพื่อหาระดับที่เหมาะสม จากนั้นจึงวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ ในงานวิจัยต่างประเทศที่ใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง ได้แก่ Hua (2010) Semi-Continuous Emulsion Copolymerization of Styrene-Butyl Acrylate with Methacrylic Acid : Box-Behnken Design of Experiments ที่มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วน St/BA ปริมาณ MAA และค่า pH จึงใช้การออกแบบบอซ-เบห์นเคน 3 ปัจจัย 3 ระดับ อีกหนึ่งงานวิจัยคือ Srinivasa (2004) Process Development of Biodegradable Chitosan Based Films and their Suitability for Food Packaging มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และสถานะจัดเก็บ เลือกใช้การออกแบบบอซ-เบห์นเคน เนื่องจากว่ามีจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $3^3$  และสามารถวิเคราะห์ผลของส่วนโค้งควอดราติก

จากการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมจะได้แบบจำลองที่สำหรับใช้พยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองจากระดับของตัวแปรอิสระ และทราบระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการจริง โดยมีผลจากการประยุกต์ใช้ ดังนี้ ณิชชา พลศิลป์ (2553) เมื่อนำปัจจัยและระดับที่เหมาะสมไปใช้ในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ ทำให้ค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ดีขึ้นจาก 0.05 เพิ่มขึ้นเป็น 1.26 ในบางงานวิจัยสามารถวัดมูลค่าของการปรับปรุงออกมาเป็นตัวเงินได้ เช่น วิชาญ วรธนา (2545) จากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลักสามารถลดของเสียจากการผลิตเหล็กปลายสั้นคิดเป็นมูลค่า 236,196 บาทต่อปี จะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองนั้นช่วยปรับปรุงให้กระบวนการมีประสิทธิภาพดีขึ้น และแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต

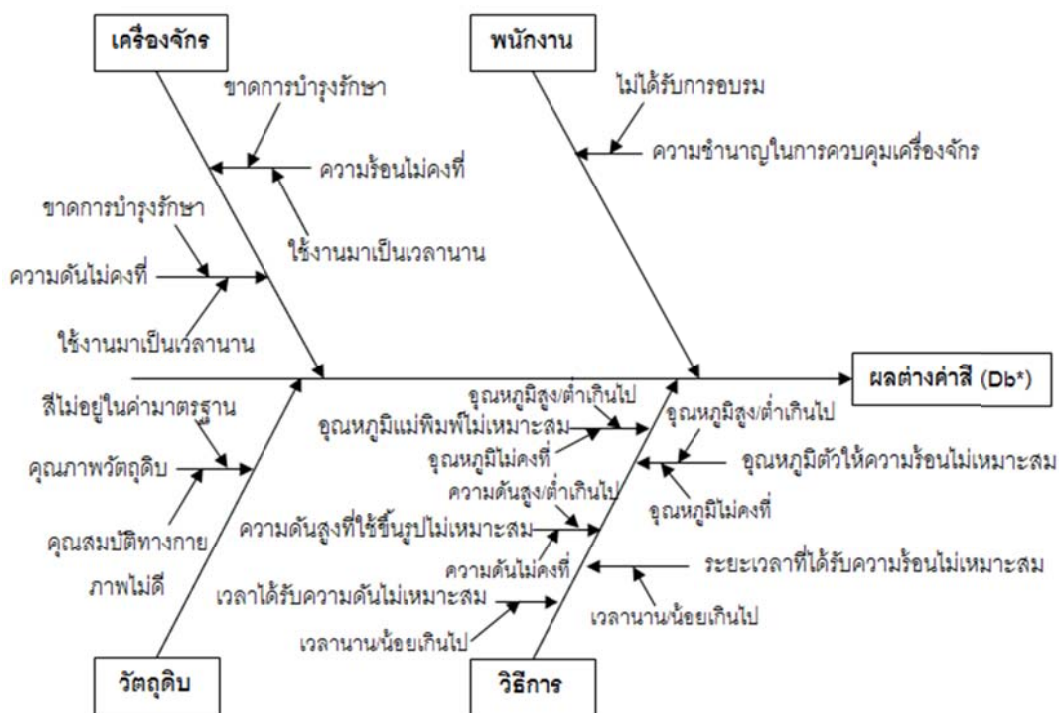
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต นำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา กำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัย การเลือกตัวแปรตอบสนอง และแผนการทดลองที่เหมาะสม

#### 3.1 การค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต โดยใช้การระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ คณะทำงานที่มีประสบการณ์ อ้างอิงหลักการทางพอลิเมอร์และวิศวกรรม รวมถึงข้อมูลผลการทดลองในอดีตและข้อจำกัดในทางปฏิบัติ เพื่อระบุปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่มีผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้แผนผังก้างปลา วิเคราะห์ตามหลักการ 4M ซึ่งประกอบด้วย คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุ (Material) และวิธีการ (Method) ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุการเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูป

### 3.2 การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการระดมสมองทำให้ได้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์มหลายปัจจัยด้วยกัน นำมาพิจารณาเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 หลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

คัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองโดยใช้หลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 จำแนกปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท ตามความสามารถในการควบคุม ได้แก่

- ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) (พิจารณาต่อในขั้นที่ 2)
- ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) (พิจารณาต่อในขั้นที่ 4)

ขั้นที่ 2 จำแนกปัจจัยที่ควบคุมได้ ออกเป็น 2 ประเภท ตามการปรับเปลี่ยนค่า ได้แก่

- ปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายในแต่ละสภาวะการทดลอง (พิจารณาต่อในขั้นที่ 3)
- มีความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนค่าในแต่ละสภาวะการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดทางเทคโนโลยี และต้นทุนในการควบคุม จึงควบคุมปัจจัยนี้ให้คงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งตลอดการทดลอง

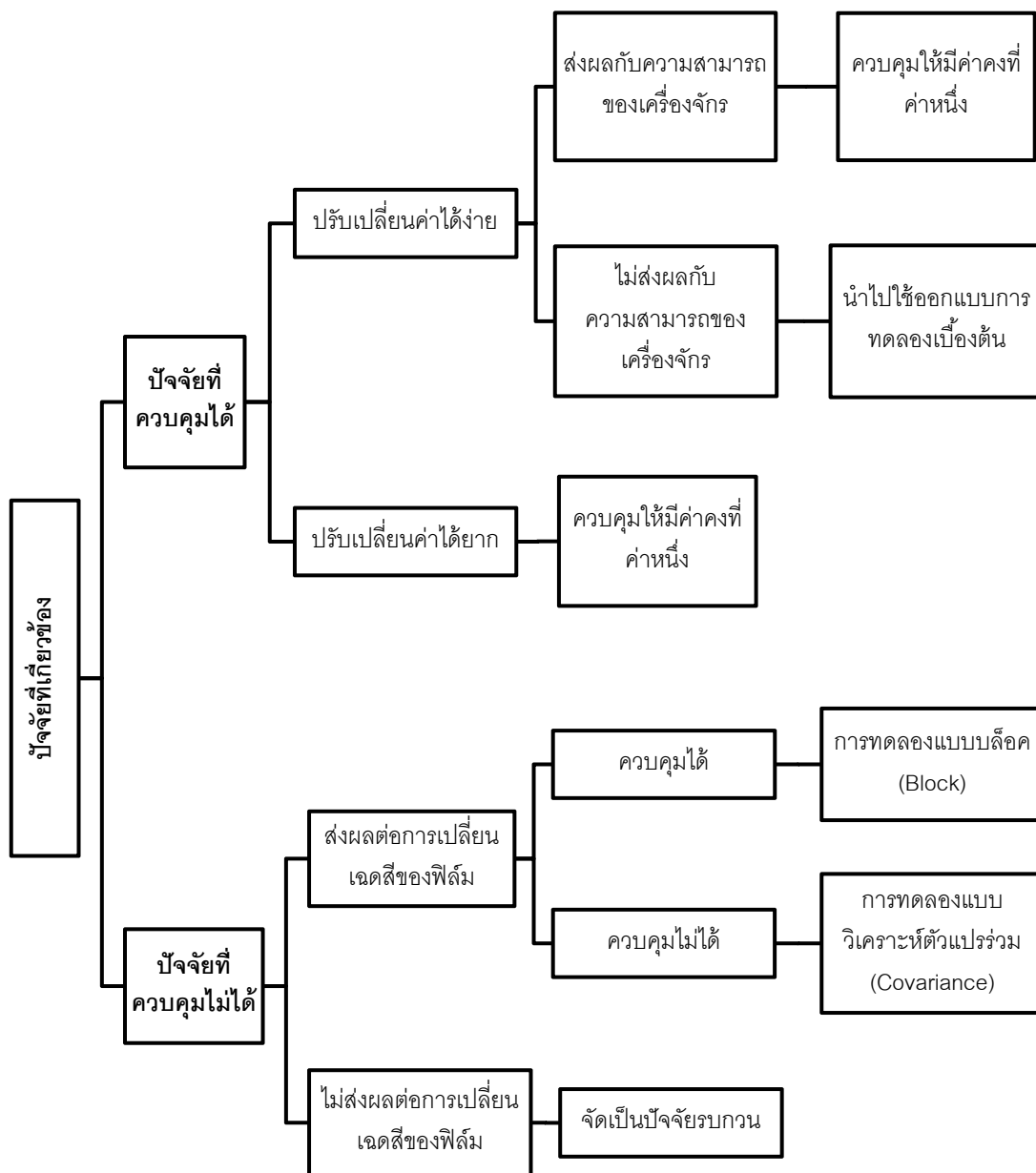
ขั้นที่ 3 จำแนกปัจจัยควบคุมได้ที่ปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายออกเป็น 2 ประเภท ตามผลกระทบต่อเครื่องจักร ได้แก่

- ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถของเครื่องจักร จะควบคุมปัจจัยนี้ให้คงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งตลอดการทดลอง
- ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถของเครื่องจักร นำไปใช้ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม

ขั้นที่ 4 จำแนกปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ออกเป็น 2 ประเภท ตามผลกระทบต่อ การเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์ม ได้แก่

- ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์ม โดยพิจารณาความสามารถในการควบคุม
  - สามารถควบคุมได้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อก (Block)
  - ไม่สามารถควบคุมได้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบวิเคราะห์ตัวแปรร่วม (Covariance)
- ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์ม ให้จัดเป็นปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยแต่ไม่สามารถควบคุมได้

สามารถสรุปหลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 หลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง



### 3.2.2 ปัจจัยที่ไม่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการทดลอง

จากหลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองข้างต้น ปัจจัยที่ไม่ถูกนำไปใช้ในการทดลอง ได้แก่

#### 1. ปัจจัยด้านวัตถุดิบ

วัตถุดิบ คือ แผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลตจากกระบวนการผลิต

- คุณภาพวัตถุดิบ เนื่องจาก
  - คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี
  - ค่าสีไม่อยู่ในช่วงมาตรฐาน

วัตถุดิบเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ ในงานวิจัยนี้ควบคุมให้คงที่โดยฟิล์มที่นำมาใช้ขึ้นรูปผลิตจากเม็ดพลาสติกก้อนเดียวกัน ดำเนินการผลิตในช่วงเวลาเดียวกัน จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนา ค่าความเงา ความหยابค่าสี และคุณภาพผิวที่เหมือนกัน คุณภาพของฟิล์มก่อนการขึ้นรูปเป็นไปตามค่ามาตรฐาน

#### 2. ปัจจัยด้านเครื่องจักร

เครื่องจักรที่ใช้ คือ เครื่องขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง

- ความร้อนไม่คงที่ เนื่องจาก
  - เนื่องจากใช้งานมาเป็นเวลานาน
  - เนื่องจากขาดการบำรุงรักษา
- ความดันไม่คงที่ เนื่องจาก
  - เนื่องจากใช้งานมาเป็นเวลานาน
  - เนื่องจากขาดการบำรุงรักษา

เครื่องจักรเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ งานวิจัยนี้ควบคุมให้คงที่โดยใช้เครื่องจักรขึ้นรูปเครื่องเดียว ควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถปรับตั้งอุณหภูมิ ความดัน และเวลา โดยใส่ค่าปัจจัยที่ต้องการ แล้วตรวจสอบค่าที่แท้จริงได้จากหน้าจอแสดงผล หากระดับอุณหภูมิและความดันของเครื่องจักรไม่เท่ากับค่าตั้งไว้เครื่องก็จะไม่อนุญาตให้ทำการขึ้นรูปได้ จึงมั่นใจได้ว่าอุณหภูมิและความดันของเครื่องจักรคงที่และถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้

### 3. ปัจจัยด้านคน

คน หมายถึง พนักงานที่ทำหน้าที่ควบคุมเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูป

- ความชำนาญในการควบคุมเครื่องจักร เนื่องจาก
  - ไม่ได้รับการฝึกอบรม

พนักงานเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ โดยเลือกใช้พนักงานที่มีความชำนาญในการควบคุมเครื่องจักร และเนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ พนักงานจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมเครื่องจักรในส่วนของการทำงานใส่ค่าปัจจัยที่ต้องการ หลังจากนั้นเครื่องจักรจะทำงานเองอัตโนมัติ จึงมีความเกี่ยวข้องกับพนักงานน้อยมาก

#### 3.2.3 ปัจจัยที่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการทดลอง

จากหลักเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองข้างต้น ปัจจัยที่ถูกนำไปใช้ในการทดลอง ได้แก่

##### ปัจจัยด้านวิธีการ

วิธีการในการขึ้นรูป หมายถึง สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่

- อุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม เนื่องจาก
  - อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป
  - อุณหภูมิไม่คงที่
- อุณหภูมิตัวให้ความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจาก
  - อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป
  - อุณหภูมิไม่คงที่
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจาก
  - ระยะเวลาสั้นหรือน้อยเกินไป
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูปไม่เหมาะสม เนื่องจาก
  - ความดันสูงหรือต่ำเกินไป
  - ความดันไม่คงที่
- ระยะเวลาที่ได้รับความดันไม่เหมาะสม เนื่องจาก
  - ระยะเวลาสั้นหรือน้อยเกินไป

วิธีการหรือสภาวะการขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถของเครื่องจักร จากประสบการณ์ของคณะทำงานและข้อมูลผลการทดลองในอดีตแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงปัจจัยทางด้านสภาวะการขึ้นรูปนั้นมีผลต่อคุณภาพ ความสมบูรณ์ของชิ้นงาน และมีผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์ม โดยสภาวะการขึ้นรูปที่ควบคุมได้ ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (Heater temperature) ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Heating time) ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (High pressure) และระยะเวลาที่ได้รับความดัน (Pressure time) จึงนำปัจจัยเหล่านี้มาทำการทดลองเบื้องต้น เพื่อกรองหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ อันจะนำไปสู่ไปการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอัดความดันสูงต่อไป

### 3.3 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ คือ แผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต จากกระบวนการผลิตกำหนดอัตราส่วนพอลิคาร์บอเนต ต่อ พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต เท่ากับ 60% ต่อ 40% เป็นฟิล์มชนิดผิวเงา-หยาบ ความหนาฟิล์ม 0.375 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาและวัดค่าเฉพาะพื้นผิวเงาเท่านั้น มีขั้นตอนการเตรียมวัสดุ ดังนี้

#### เตรียมแผ่นฟิล์ม

จากแผนการสุ่มตัวอย่างฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต คัดเลือกแผ่นฟิล์มรุ่นที่มีคุณภาพอยู่ในมาตรฐานมาทำการวิจัย แล้วเตรียมแผ่นฟิล์ม ดังนี้

- ตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาดเท่ากับขนาดของแม่พิมพ์ คือ กว้าง 180 มิลลิเมตร และยาว 297 มิลลิเมตร
- พิมพ์หมึกดำบนด้านหยาบ โดยพิมพ์หมึกครึ่งหนึ่งของแผ่นฟิล์ม เป็นการปิดพื้นหลังไม่ให้แสงทะลุผ่านสำหรับการวัดความเงาบนด้านเงา และใช้สำหรับการวัดสีบนพื้นหลังสีดำ

การเตรียมแผ่นฟิล์มเพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูงแสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มเพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง

### 3.4 การทดสอบก่อนขึ้นรูป

ทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มก่อนนำไปขึ้นรูป เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองหลังจากขึ้นรูปแล้ว ดังนี้

1. วัดความเงาก่อนการขึ้นรูปบนด้านเงา โดยใช้เครื่อง Gloss meter ให้มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน คือ มากกว่า 99.0 Gloss unit (G.U.) ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การวัดความเงาของแผ่นฟิล์ม

2. วัดความหยาบก่อนการขึ้นรูปบนด้านเงา โดยใช้เครื่อง Roughness meter ให้มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน คือ น้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การวัดความหยาบของแผ่นฟิล์ม

3. วัดค่าสีแกน  $b^*$  ก่อนการขึ้นรูปบนด้านเงาเทียบกับชิ้นงานอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับจากลูกค้า ทั้งพื้นหลังสีขาวและพื้นหลังสีดำ ด้วยโหมดวัดแสงสะท้อน (Reflection mode) โดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab ให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ( $\text{Db}^*$ ) อยู่ในช่วงมาตรฐาน คือ  $\pm 1.5$  ทั้งพื้นขาวและพื้นดำ ดังภาพที่ 3.6 และ 3.7 โดยอ้างอิงคู่มือการทำงานเรื่องการวัดสีซึ่งกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดสีมีค่าเท่ากับ 0.1



ภาพที่ 3.6 การวัดสีแผ่นฟิล์มบนพื้นขาว



ภาพที่ 3.7 การวัดสีแผ่นฟิล์มบนพื้นดำ

### 3.5 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง

นำแผ่นฟิล์มที่ได้จากการเตรียมมาขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องจักร และสวิตช์ควบคุมความดัน รูปเครื่องจักรแสดงดังภาพที่ 3.8 และ 3.9



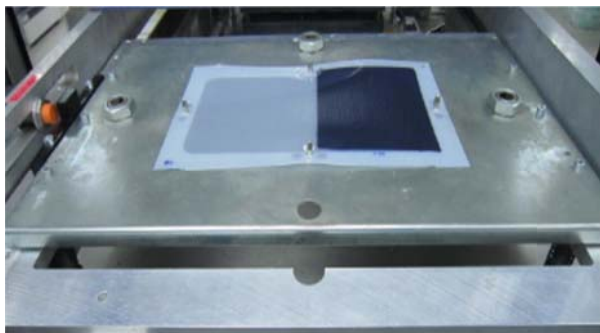
ภาพที่ 3.8 แผงควบคุมเครื่องจักร



ภาพที่ 3.9 เครื่องจักรขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

2. ปรับตั้งค่าระดับปัจจัยที่ต้องการทดลอง แล้วตรวจสอบค่าที่แท้จริงของเครื่องจักรจากหน้าจอแสดงผล เมื่อค่าถึงระดับที่ตั้งไว้หลอดไฟจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียวจึงจะสามารถทำการขึ้นรูปได้

3. เจาะรูที่ขอบทั้ง 4 ด้านของแผ่นฟิล์ม เพื่อให้ยึดไม่ให้แผ่นฟิล์มขยับขณะขึ้นรูปแล้ววางแผ่นฟิล์มลงบนถาดใส่ชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผ่นฟิล์มบนถาดใส่ชิ้นงาน

4. เมื่อกดปุ่มให้เครื่องทำงาน เครื่องจักรจะดึงแผ่นฟิล์มเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อนด้วยแสงเซรามิก ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มก่อนการขึ้นรูป

5. ส่งเข้าสู่ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูง โดยใช้แม่พิมพ์รูปทรงเรือนไมล์ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยแม่พิมพ์เรือนไมล์

6. เมื่อขึ้นรูปเสร็จ ภาตใส่ชิ้นงานจะถูกส่งกลับออกมา พร้อมกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปแล้ว

### 3.6 การทดสอบหลังขึ้นรูป

ทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มหลังจากขึ้นรูปอีกครั้ง โดยทำการทดสอบเหมือนกับก่อนขึ้นรูป ดังนี้

1. วัดความเงาหลังการขึ้นรูปบนด้านเงา
2. วัดความหยาบหลังการขึ้นรูปบนด้านเงา
3. วัดค่าสีแกน  $b^*$  หลังการขึ้นรูปบนด้านเงาเทียบกับชิ้นงานอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับจากลูกค้า จะได้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$

### 3.7 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากปัจจัยที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการทดลองทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B) ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C) ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D) และระยะเวลาที่ได้รับความดัน (E) ทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลอง โดยศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal properties) ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature ;  $T_m$ ) เป็นต้น ดังตารางที่ 3.1



ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

Polymer	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)
Polycarbonate	150	270
Polybutylene terephthalate	66	227

นอกจากนี้ได้พิจารณาสภาวะการขึ้นรูปในปัจจุบันที่ใช้สำหรับขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต และข้อมูลผลการทดลองในอดีต รวมถึงอาศัยประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ จึงสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแต่ละปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

1. **อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)** แม่พิมพ์ทำหน้าที่เป็นแม่แบบในการขึ้นรูปชิ้นงาน ใช้วิธีอัดความดันสูงให้แผ่นฟิล์มแนบติดกับแม่พิมพ์ แผ่นฟิล์มจะได้รับความดันในระยะเวลาสั้นๆ โดยที่อุณหภูมิแม่พิมพ์จะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์นั้นๆ กรณีชิ้นงานที่ต้องการผิวหน้ามันเงาจะต้องขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง เช่น 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเย็น เกิดตำหนิเป็นจุดด้านบนชิ้นงาน รายละเอียดรูปทรงไม่ชัดเจน แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนเฉดสีจากขาวโทนเหลืองเป็นขาวโทนน้ำเงิน ปัจจุบันใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ส่วนพอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลตมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 66 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงกำหนดระดับอุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลตให้อยู่ในช่วง 100 - 120 องศาเซลเซียส แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 2 อุณหภูมิแม่พิมพ์ 110 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 3 อุณหภูมิแม่พิมพ์ 120 องศาเซลเซียส

2. **อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (Heater temperature)** ตัวให้ความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์ม เพื่อเตรียมแผ่นฟิล์มให้มีความยืดหยุ่นก่อนนำไปขึ้นรูป ตัวให้ความร้อนมีลักษณะเป็นแผงเซรามิก 2 ชุด ประกบอยู่เหนือแผ่นฟิล์ม 1 ชุด และอยู่ใต้แผ่นฟิล์ม 1 ชุด แผงเซรามิกแต่ละชุดอยู่ห่างจากแผ่นฟิล์ม 15 เซนติเมตร ทำหน้าที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เช่น 260 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มในระยะเวลาสั้นๆ ความร้อนที่แผ่นฟิล์มได้รับจะเท่ากับ 80 - 85 เปอร์เซ็นต์ของอุณหภูมิตัวให้ความร้อนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ได้รับความร้อนด้วย โดยฟิล์มที่จะนำไปขึ้นรูปต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์นั้นๆ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของโมเลกุล ผลจากความร้อนจะทำให้ฟิล์มอ่อนตัวลง มีสภาพยืดหยุ่นคล้ายยาง ขึ้นรูปได้ง่าย การให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้ฟิล์มไม่อ่อนตัว และขึ้นรูปได้ยาก ส่วนความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะทำให้ฟิล์มยืดจนเสียรูป และทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนเฉดสีจากขาวโทนเหลืองเป็นขาวโทนน้ำเงิน ปัจจุบันใช้อุณหภูมิตัวให้ความร้อนสำหรับฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิลดลงเหลือเท่ากับ 270 องศาเซลเซียส ส่วนพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 66 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิลดลงเหลือเท่ากับ 227 องศาเซลเซียส จึงกำหนดระดับอุณหภูมิตัวให้ความร้อนฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตอยู่ในช่วง 240 - 260 องศาเซลเซียส แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 อุณหภูมิตัวให้ความร้อน 240 องศาเซลเซียส  
 ระดับที่ 2 อุณหภูมิตัวให้ความร้อน 250 องศาเซลเซียส  
 ระดับที่ 3 อุณหภูมิตัวให้ความร้อน 260 องศาเซลเซียส

3. **ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Heating time)** ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนคือระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มก่อนส่งเข้าสู่ขั้นตอนขึ้นรูป ระยะเวลาที่มีผลต่อการอ่อนตัวของแผ่นฟิล์ม หากระยะเวลาที่ได้รับความร้อนน้อยเกินไปจะทำให้แผ่นฟิล์มอ่อนตัวไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูป และถ้าระยะเวลาที่ได้รับความร้อนนานเกินไปจะทำให้แผ่นฟิล์มอ่อนตัวจนเสียรูปร่าง หรือเกิดการเปลี่ยนเฉดสี ปัจจุบันระยะเวลาที่ได้รับความร้อนในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 15 วินาที แต่จากการทดลองในอดีตพบว่าหากให้ความร้อนแก่ฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลตนาน 15 วินาที

แล้วนำไปขึ้นรูปจะพบว่าแผ่นฟิล์มมีการเปลี่ยนเฉดสีจากเฉดสีเหลืองเป็นเฉดสีฟ้า จึงกำหนดระยะเวลาที่ได้รับความร้อนสำหรับฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลตอยู่ในช่วง 4 -12 วินาที แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 4 วินาที

ระดับที่ 2 ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 8 วินาที

ระดับที่ 3 ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 12 วินาที

4. **ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (High pressure)** งานวิจัยนี้ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีอัดความดันสูง โดยใช้อากาศอัดแผ่นฟิล์มให้แนบติดกับแม่พิมพ์โดยใช้ระยะเวลาสั้นๆ เพื่อให้ได้รูปทรงตามแม่พิมพ์ การใช้ความดันสูงๆทำให้สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ที่อุณหภูมิต่ำและประหยัดเวลาในการให้ความร้อน ระดับความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูปส่งผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ถ้าใช้ความดันต่ำเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างไม่สมบูรณ์ รายละเอียดไม่ชัดเจน ซึ่งจะพบปัญหาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ปัจจุบันใช้ความดันสูงสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 100 บาร์ จึงกำหนดความดันสูงที่ใช้สำหรับขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลตอยู่ในช่วง 90 – 110 บาร์ แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 90 บาร์

ระดับที่ 2 ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 100 บาร์

ระดับที่ 3 ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 110 บาร์

5 **ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (Pressure time)** ในขั้นตอนขึ้นรูปนั้นแผ่นฟิล์มจะถูกอัดด้วยความดันสูงชั่วระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้แผ่นฟิล์มแนบติดกับแม่พิมพ์จนได้รูปทรงที่ต้องการแล้วจึงลดความดันลง ปัจจุบันกำหนดระยะเวลาที่ได้รับความดันของการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนตเท่ากับ 3.5 วินาที และจากข้อมูลการทดลองในอดีตพบว่าระยะเวลาที่ได้รับความดันที่ระดับต่างๆกัน จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน จึงกำหนดระยะเวลาที่ได้รับความดันขณะขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลตให้ใกล้เคียงค่าเดิมอยู่ในช่วง 3 - 5 วินาที แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ระยะเวลาที่ได้รับความดัน 3 วินาที

ระดับที่ 2 ระยะเวลาที่ได้รับความดัน 4 วินาที

ระดับที่ 3 ระยะเวลาที่ได้รับความดัน 5 วินาที

### 3.8 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

จากการกำหนดปัญหาและคัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนสีหลังจากขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลต จึงกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ใช้วัดผล 3 ตัวแปร ดังนี้

1. ความเงา
2. ความหยาบ
3. ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ระหว่างก่อนและหลังขึ้นรูป

### 3.9 แผนการทดลองเบื้องต้น

จากปัจจัยที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการทดลองทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป และระยะเวลาที่ได้รับความดัน นำปัจจัยทั้งหมดมาทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกรองเอาปัจจัยที่ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองออก ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ  $2^5$  แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง โดยกำหนดปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) ซึ่งจุดศูนย์กลางที่เดิมเข้าไปไม่ได้ส่งผลต่อการประมาณค่าผลปกติของการออกแบบ  $2^5$  แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 3.2 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 66 การทดลอง ลำดับการทดลองเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ แผนการทดลองเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
		-1	+1	จุดศูนย์กลาง	
A	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)	100	120	110	องศาเซลเซียส
B	อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (Heater temperature)	240	260	250	องศาเซลเซียส
C	ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Heating time)	4	12	8	วินาที
D	ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (High pressure)	90	110	100	บาร์
E	ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (Pressure time)	3	5	4	วินาที

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองเบื้องต้น

Run	ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย				
		A	B	C	D	E
1	24	100	240	4	90	3
2	63	120	240	4	90	3
3	62	100	260	4	90	3
4	14	120	260	4	90	3
5	37	100	240	12	90	3
6	23	120	240	12	90	3
7	4	100	260	12	90	3
8	9	120	260	12	90	3
9	65	100	240	4	110	3
10	59	120	240	4	110	3
11	43	100	260	4	110	3
12	28	120	260	4	110	3
13	13	100	240	12	110	3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

Run	ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย				
		A	B	C	D	E
14	17	120	240	12	110	3
15	10	100	260	12	110	3
16	60	120	260	12	110	3
17	27	100	240	4	90	5
18	3	120	240	4	90	5
19	25	100	260	4	90	5
20	33	120	260	4	90	5
21	66	100	240	12	90	5
22	61	120	240	12	90	5
23	16	100	260	12	90	5
24	54	120	260	12	90	5
25	50	100	240	4	110	5
26	38	120	240	4	110	5
27	6	100	260	4	110	5
28	15	120	260	4	110	5
29	45	100	240	12	110	5
30	64	120	240	12	110	5
31	19	100	260	12	110	5
32	48	120	260	12	110	5
33	34	100	240	4	90	3
34	22	120	240	4	90	3
35	40	100	260	4	90	3
36	57	120	260	4	90	3
37	41	100	240	12	90	3
38	20	120	240	12	90	3
39	26	100	260	12	90	3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

Run	ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย				
		A	B	C	D	E
40	35	120	260	12	90	3
41	56	100	240	4	110	3
42	31	120	240	4	110	3
43	30	100	260	4	110	3
44	42	120	260	4	110	3
45	55	100	240	12	110	3
46	7	120	240	12	110	3
47	52	100	260	12	110	3
48	21	120	260	12	110	3
49	46	100	240	4	90	5
50	2	120	240	4	90	5
51	5	100	260	4	90	5
52	36	120	260	4	90	5
53	49	100	240	12	90	5
54	53	120	240	12	90	5
55	51	100	260	12	90	5
56	44	120	260	12	90	5
57	18	100	240	4	110	5
58	47	120	240	4	110	5
59	12	100	260	4	110	5
60	58	120	260	4	110	5
61	11	100	240	12	110	5
62	8	120	240	12	110	5
63	29	100	260	12	110	5
64	32	120	260	12	110	5
65	39	110	250	8	100	4
66	1	110	250	8	100	4

### 3.10 แผนการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

นำปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลองแบบ  $2^5$  แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางมาดำเนินการทดลองต่อเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม ใช้การออกแบบแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ใช้ปัจจัยในการทดลอง 3 ระดับ โดยเพิ่มค่ากลางระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้น คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแสดงดังตารางที่ 3.4 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ลำดับการทดลองเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
		-1	0	+1	
B	อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (Heater temperature)	240	250	260	องศาเซลเซียส
C	ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Heating time)	4	8	12	วินาที
D	ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (High pressure)	90	100	110	บาร์

จากการทดลองเบื้องต้นได้ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B) ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C) และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D) จึงนำปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ปัจจัยที่ไม่มีผลมีค่าคงที่ ดังนี้

- **อุณหภูมิแม่พิมพ์ (A)** : กำหนดให้มีค่าคงที่ที่ระดับต่ำสุด คือ 100 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดพลังงานและเวลาในการให้ความร้อน
- **ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (D)** : กำหนดให้มีค่าคงที่ที่ระดับต่ำสุด คือ 3 วินาที เพื่อประหยัดเวลาในการขึ้นรูป



ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Run	ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย		
		B	C	D
1	22	240	4	100
2	11	260	4	100
3	29	240	12	100
4	28	260	12	100
5	2	240	8	90
6	14	260	8	90
7	19	240	8	110
8	1	260	8	110
9	23	250	4	90
10	25	250	12	90
11	9	250	4	110
12	15	250	12	110
13	26	250	8	100
14	18	250	8	100
15	6	250	8	100
16	7	240	4	100
17	24	260	4	100
18	21	240	12	100
19	3	260	12	100
20	4	240	8	90
21	10	260	8	90
22	27	240	8	110
23	13	260	8	110
24	30	250	4	90
25	16	250	12	90
26	12	250	4	110
27	8	250	12	110
28	17	250	8	100
29	5	250	8	100
30	20	250	8	100

จากการศึกษาถึงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น และแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้ดำเนินการวิจัย จะนำแผนการทดลองที่ได้ไปดำเนินการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลองต่อในบทที่ 4

## บทที่ 4

### การคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการนำปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนชนิดสีของฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিว ทิลีน เทเรฟทาเลตมาดำเนินการวิจัยตามแผนการออกแบบการทดลองในบทที่ 3 นำผลการทดลองที่ได้มาพิสูจน์สมมติฐานโดยวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรสนองอันจะนำไปสู่แผนออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป

#### 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

ดำเนินการทดลองเบื้องต้นตามแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>5</sup> แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง โดยศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผล 5 ปัจจัย มีตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร คือ ความเงา ความหยاب และผลต่างสีแกน b\* ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 66 การทดลอง ลำดับการทดลองเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ตามแผนการทดลองเบื้องต้นในตารางที่ 3.3 ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจากแผนการทดลองเบื้องต้น

Run	db*		ความเงา (G.U.)		ความหยاب (μm)	
	พื้นดำ	พื้นขาว	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป
Specification	± 1.5		>99.0		<0.5	
1	0.52	0.13	102.2	101.3	<0.5	<0.5
2	0.40	0.16	102.3	101.1	<0.5	<0.5
3	0.16	0.10	102.8	101.5	<0.5	<0.5
4	0.32	0.14	102.5	101.4	<0.5	<0.5
5	0.61	0.19	102.5	101.3	<0.5	<0.5
6	0.63	0.16	102.2	101.4	<0.5	<0.5
7	0.26	0.13	102.4	101.4	<0.5	<0.5
8	0.19	0.12	102.3	101.3	<0.5	<0.5
9	0.23	0.20	102.4	101.3	<0.5	<0.5
10	0.20	0.17	102.5	101.3	<0.5	<0.5
11	0.27	0.15	102.9	101.3	<0.5	<0.5

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจากแผนการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

Run	db*		ความเงา (G.U.)		ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	
	พื้นดำ	พื้นขาว	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป
Specification	$\pm 1.5$		>99.0		<0.5	
12	0.32	0.14	102.1	101.7	<0.5	<0.5
13	0.92	0.19	102.8	102.0	<0.5	<0.5
14	0.82	0.20	102.7	101.4	<0.5	<0.5
15	0.67	0.14	102.1	101.0	<0.5	<0.5
16	0.90	0.13	102.1	101.1	<0.5	<0.5
17	0.35	0.15	102.9	102.0	<0.5	<0.5
18	0.26	0.13	102.1	101.2	<0.5	<0.5
19	0.22	0.13	102.6	101.2	<0.5	<0.5
20	0.28	0.12	102.5	101.2	<0.5	<0.5
21	0.68	0.17	102.3	101.5	<0.5	<0.5
22	0.53	0.16	102.6	101.4	<0.5	<0.5
23	0.26	0.17	102.9	101.6	<0.5	<0.5
24	0.12	0.11	102.4	101.6	<0.5	<0.5
25	0.44	0.12	102.6	101.1	<0.5	<0.5
26	0.24	0.16	102.4	101.6	<0.5	<0.5
27	0.26	0.14	102.9	101.6	<0.5	<0.5
28	0.38	0.18	102.1	101.2	<0.5	<0.5
29	0.81	0.11	102.3	101.2	<0.5	<0.5
30	0.68	0.17	102.5	101.4	<0.5	<0.5
31	0.57	0.14	102.3	101.5	<0.5	<0.5
32	0.85	0.16	102.8	101.6	<0.5	<0.5
33	0.69	0.14	102.5	101.7	<0.5	<0.5
34	0.30	0.13	102.7	101.8	<0.5	<0.5
35	0.33	0.11	102.9	101.4	<0.5	<0.5
36	0.32	0.12	102.5	101.6	<0.5	<0.5
37	0.55	0.11	102.3	101.3	<0.5	<0.5
38	0.52	0.10	102.3	101.3	<0.5	<0.5
39	0.40	0.16	102.1	101.2	<0.5	<0.5

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจากแผนการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

Run	db*		ความเงา (G.U.)		ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	
	พื้นดำ	พื้นขาว	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป	ก่อน ขึ้นรูป	หลัง ขึ้นรูป
Specification	$\pm 1.5$		>99.0		<0.5	
40	0.35	0.15	102.6	101.5	<0.5	<0.5
41	0.49	0.12	102.9	101.6	<0.5	<0.5
42	0.38	0.14	102.0	100.8	<0.5	<0.5
43	0.46	0.10	102.3	101.1	<0.5	<0.5
44	0.26	0.12	102.3	101.3	<0.5	<0.5
45	0.80	0.13	102.6	101.6	<0.5	<0.5
46	0.77	0.16	102.4	101.5	<0.5	<0.5
47	0.90	0.13	102.6	101.8	<0.5	<0.5
48	0.87	0.15	103.1	101.8	<0.5	<0.5
49	0.38	0.14	102.5	101.4	<0.5	<0.5
50	0.47	0.11	102.0	101.2	<0.5	<0.5
51	0.21	0.13	102.5	101.7	<0.5	<0.5
52	0.16	0.12	103.0	101.8	<0.5	<0.5
53	0.62	0.14	102.4	101.6	<0.5	<0.5
54	0.71	0.10	102.1	101.6	<0.5	<0.5
55	0.16	0.15	102.6	101.8	<0.5	<0.5
56	0.32	0.13	102.3	101.4	<0.5	<0.5
57	0.38	0.15	102.9	101.6	<0.5	<0.5
58	0.48	0.16	102.6	101.7	<0.5	<0.5
59	0.53	0.13	102.7	101.6	<0.5	<0.5
60	0.29	0.12	102.4	101.2	<0.5	<0.5
61	0.70	0.14	102.9	101.5	<0.5	<0.5
62	0.84	0.12	103.0	102.1	<0.5	<0.5
63	0.83	0.11	102.3	101.1	<0.5	<0.5
64	0.73	0.10	102.7	101.2	<0.5	<0.5
65	0.86	0.12	102.4	101.5	<0.5	<0.5
66	0.77	0.14	102.6	101.8	<0.5	<0.5

จากผลการทดลองเบื้องต้นตามแผนการออกแบบการทดลองแบบ  $2^5$  แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง พบว่า ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองที่แต่ละระดับของปัจจัยมีคุณภาพดี มีค่าความเงา ความหยาบ และค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวอยู่ในช่วงมาตรฐาน ดังนี้

- **คุณภาพชิ้นงาน** : ชิ้นงานมีคุณภาพดี โดยชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ รูปทรงชัดเจน ไม่พบข้อบกพร่องจากการขึ้นรูป
- **ความเงา** : फिल्मพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูปมีความเงาลดลงเล็กน้อยในช่วง 0.4 – 1.6 G.U. โดยทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปมีความเงามากกว่า 99.0 G.U. เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
- **ความหยาบ** : फिल्मพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูปมีความหยาบไม่เปลี่ยนแปลง โดยทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปมีความหยาบน้อยกว่า  $0.5\mu\text{m}$  เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
- **ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ( $Db^*$ )** : จากการขึ้นรูปที่ระดับปัจจัยต่างๆพบว่า फिल्मพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวทิลีน เทเรฟทาเลตทุกชิ้นงานมีค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 – 0.2 เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด มีเพียงค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำเท่านั้นที่มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละระดับปัจจัย

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นจึงนำเฉพาะตัวแปรตอบสนองที่เป็นค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำมาพิจารณาเท่านั้น โดยกำหนดว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูงไม่มีผลต่อความเงา ความหยาบของผิวฟิล์ม และยังคงทำให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด

## 4.2 การกำหนดสมมติฐานการทดลองเบื้องต้น

กำหนดสมมติฐานเพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนี้

### 1. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

$H_0$  : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลต

$H_1$  : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลต

### 2. การทดสอบสมมติฐานของอันตรกิริยา

$H_0$  : อันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลต

$H_1$  : อันตรกิริยามีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลต

### 3. การทดสอบสมมติฐานความเป็นส่วนโค้งแบบควอดราติก

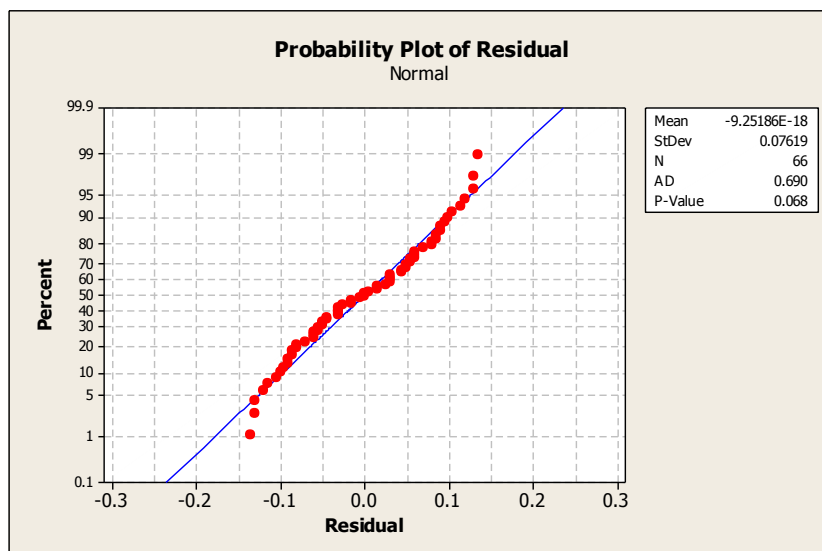
$H_0$  : แบบจำลองไม่มีผลจากพจน์ควอดราติก

$H_1$  : แบบจำลองมีผลจากพจน์ควอดราติก

## 4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทดลองเบื้องต้น

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ศูนย์และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) จากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่เรียงลำดับจากน้อยไปหามากพบว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างจากแผนการทดลองเบื้องต้น

จากการทดสอบของ Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

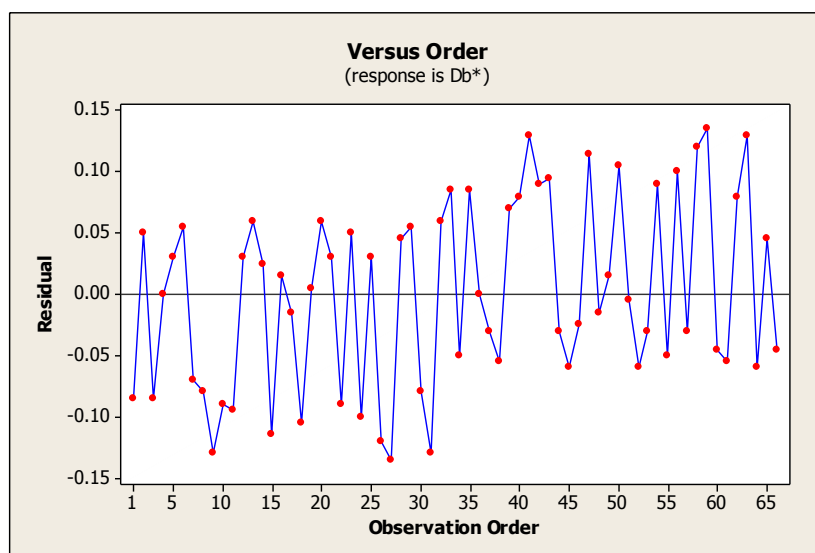
$H_0$  : ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$  : ส่วนตกค้างไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 4.1 พบว่ามีค่า P-Value = 0.068 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

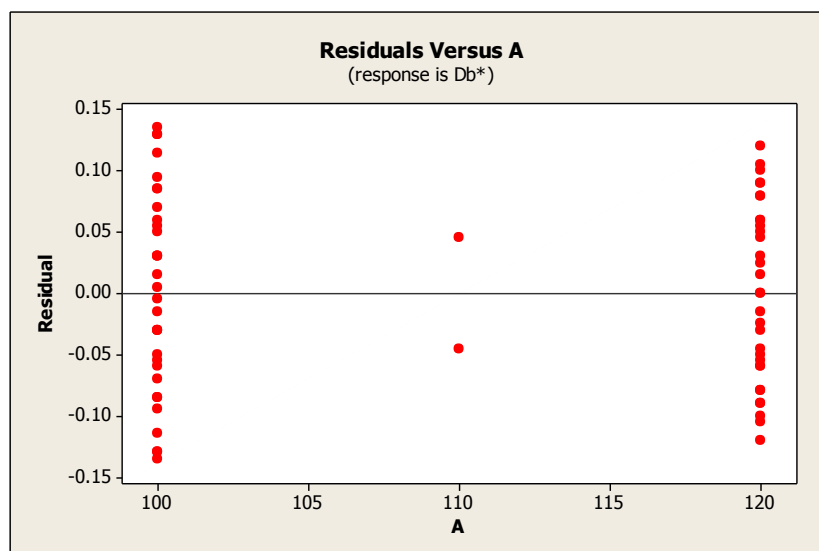


2. **การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent)** การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ดังภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



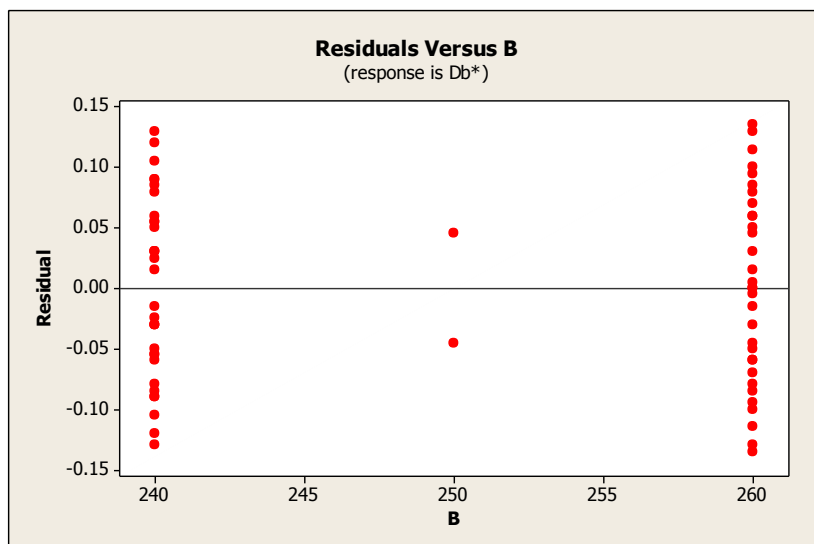
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากแผนการทดลองเบื้องต้น

3. **การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง** พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เพื่อตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังภาพที่ 4.3 – 4.7



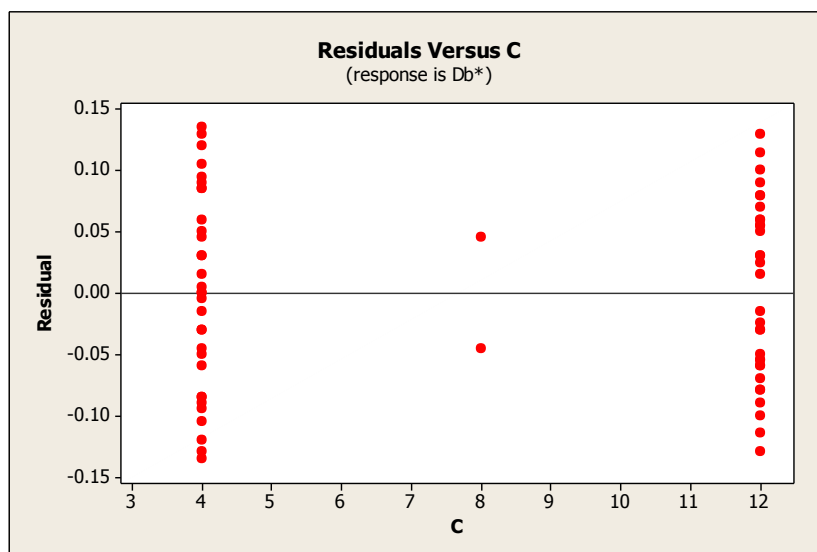
ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย A จากแผนการทดลองเบื้องต้น

จากภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย A คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำ และระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับ ศูนย์



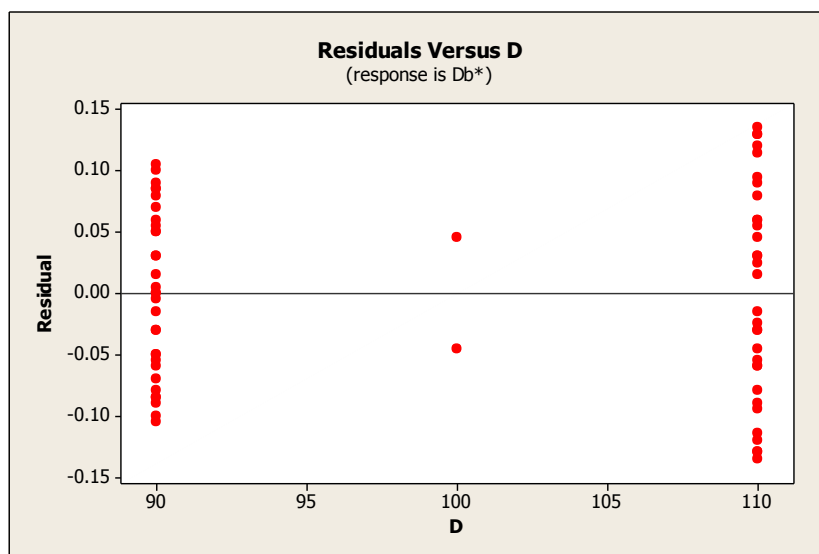
ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B จากแผนการทดลองเบื้องต้น

จากภาพที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์



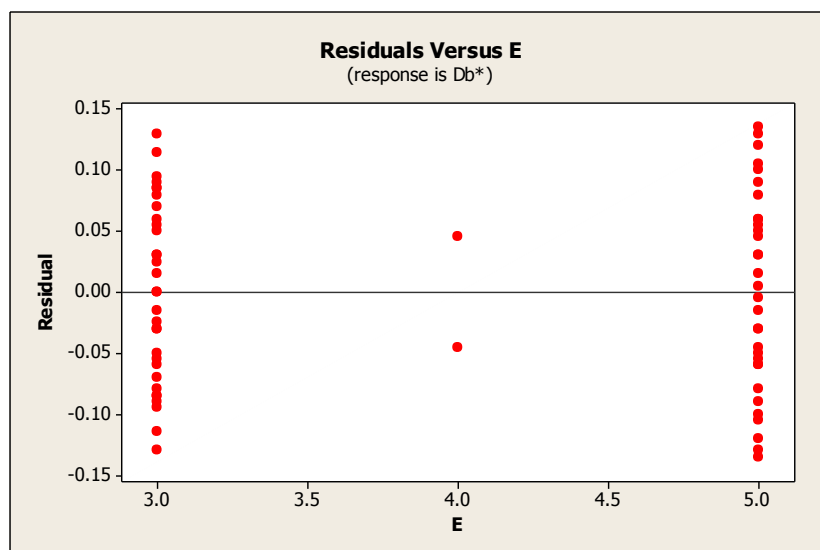
ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C จากแผนการทดลองเบื้องต้น

จากภาพที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C คือ ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D จากแผนการทดลองเบื้องต้น

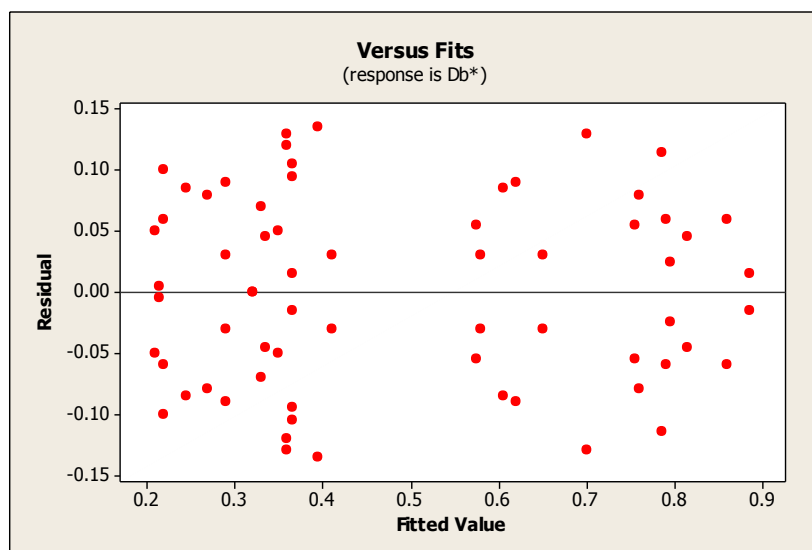
จากภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D คือ ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 4.7 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย E จากแผนการทดลองเบื้องต้น

จากภาพที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย E คือ ระยะเวลาที่ได้รับความดัน พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์

4. การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังภาพที่ 4.8 พบว่า  $\sigma^2$  ของส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value  
จากแผนการทดลองเบื้องต้น

ตั้งแต่ภาพที่ 4.1 - 4.8 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ทุกประการ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้

#### 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าผลต่างสีแทน $b^*$ บนพื้นดำในการทดลองเบื้องต้น

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95.0 เปอร์เซ็นต์ ( $\alpha = 0.05$ ) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสีแทน b\* บนพื้นดำ  
จากแผนการทดลองเบื้องต้น

Analysis of Variance for Db*						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Main Effects</b>	5	2.02295	2.02295	0.40459	35.39	0.000
A	1	0.00926	0.00926	0.00926	0.81	0.375
B	1	0.28223	0.28223	0.28223	24.68	0.000
C	1	1.15294	1.15294	1.15294	100.84	0.000
D	1	0.56063	0.56063	0.56063	49.03	0.000
E	1	0.01789	0.01789	0.01789	1.56	0.220
<b>2-Way Interactions</b>	10	0.81632	0.81632	0.08163	7.14	0.000
A*B	1	0.01925	0.01925	0.01925	1.68	0.203
A*C	1	0.01410	0.01410	0.01410	1.23	0.275
A*D	1	0.00114	0.00114	0.00114	0.10	0.754
A*E	1	0.00660	0.00660	0.00660	0.58	0.453
B*C	1	0.02933	0.02933	0.02933	2.57	0.119
B*D	1	0.25883	0.25883	0.25883	22.64	0.000
B*E	1	0.00473	0.00473	0.00473	0.41	0.525
C*D	1	0.47438	0.47438	0.47438	41.49	0.000
C*E	1	0.00289	0.00289	0.00289	0.25	0.619
D*E	1	0.00508	0.00508	0.00508	0.44	0.510
<b>3-Way Interactions</b>	10	0.09927	0.09927	0.00993	0.87	0.571
A*B*C	1	0.00045	0.00045	0.00045	0.04	0.844
A*B*D	1	0.00045	0.00045	0.00045	0.04	0.844
A*C*D	1	0.00544	0.00544	0.00544	0.48	0.495
A*B*E	1	0.00620	0.00620	0.00620	0.54	0.467
A*C*E	1	0.00083	0.00083	0.00083	0.07	0.790
A*D*E	1	0.00114	0.00114	0.00114	0.10	0.754
B*C*D	1	0.03376	0.03376	0.03376	2.95	0.095
B*C*E	1	0.00879	0.00879	0.00879	0.77	0.387
B*D*E	1	0.00069	0.00069	0.00069	0.06	0.808
C*D*E	1	0.04151	0.04151	0.04151	3.63	0.065
<b>4-Way Interactions</b>	5	0.04336	0.04336	0.00867	0.76	0.586
A*B*C*D	1	0.02364	0.02364	0.02364	2.07	0.160
A*B*C*E	1	0.00744	0.00744	0.00744	0.65	0.426
A*B*D*E	1	0.00131	0.00131	0.00131	0.11	0.737
A*C*D*E	1	0.00170	0.00170	0.00170	0.15	0.702
B*C*D*E	1	0.00926	0.00926	0.00926	0.81	0.375
<b>5-Way Interactions</b>	1	0.01531	0.01531	0.01531	1.34	0.255
A*B*C*D*E	1	0.01531	0.01531	0.01531	1.34	0.255
Curvature	1	0.22111	0.22111	0.22111	19.34	0.000
<b>Residual Error</b>	33	0.37730	0.37730	0.01143		
Pure Error	33	0.37730	0.37730	0.01143		
<b>Total</b>	65	3.59561				

S = 0.106927  
R-Sq = 89.51%    R-Sq(adj) = 79.33%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำในการทดลองเบื้องต้น พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่

1. ปัจจัยหลัก คือ

- อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B)
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C)
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D)

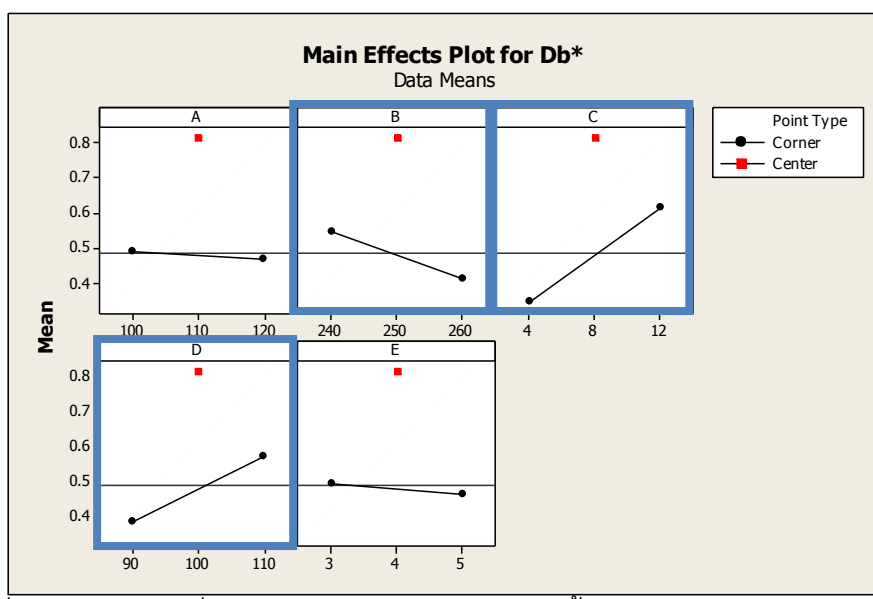
กราฟปัจจัยหลักแสดงดังภาพที่ 4.9

2. อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย คือ

- อุณหภูมิตัวให้ความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $B^*D$ )
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $C^*D$ )

กราฟอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย แสดงในภาพที่ 4.10

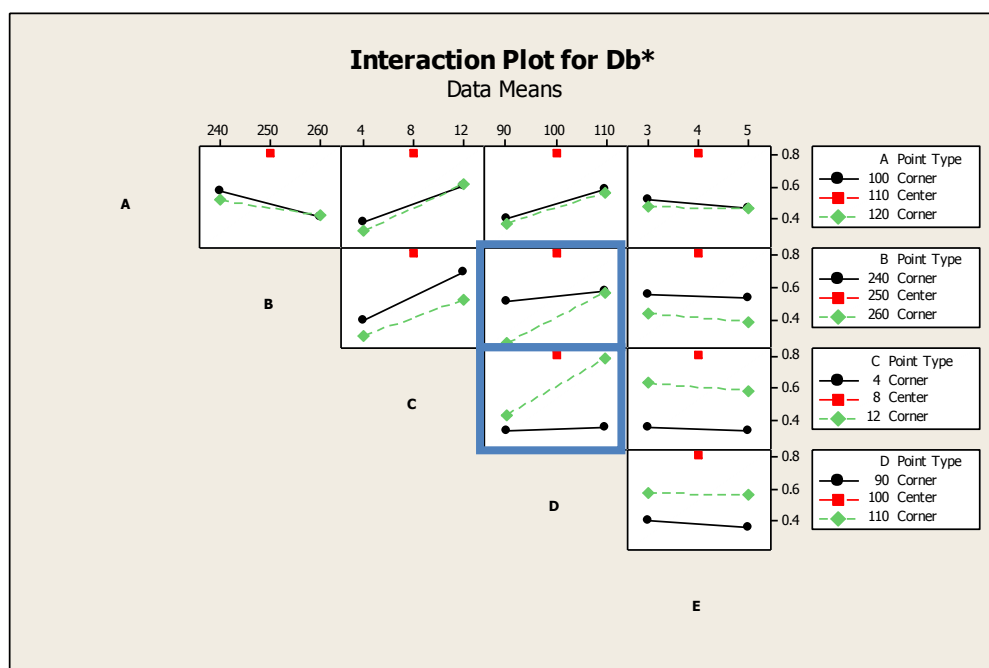
นอกจากนี้พบว่ามีผลกระทบจากจุดศูนย์กลาง (Curvature) โดยค่าความแปรปรวนของข้อมูลจุดศูนย์กลางและข้อมูลที่มีมุมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือมีผลของส่วนโค้งขั้นที่สองในตัวแปรตอบสนองเกิดขึ้นภายใต้ขอบเขตที่กำลังศึกษา กล่าวคือแบบจำลองมีผลจากพจน์ควอดราติก (Quadratic) จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองขั้นแรกที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เหมาะสม



ภาพที่ 4.9 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากแผนการทดลองเบื้องต้น

พิจารณาปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ จากภาพที่ 4.9 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักกับค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ได้ดังนี้ เมื่ออุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B) เพิ่มขึ้นค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  จะลดลง แต่เมื่อระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C) นานขึ้นค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  จะเพิ่มขึ้น และเมื่อความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D) เพิ่มขึ้นค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เนื่องจากเครื่องจักรขึ้นรูปที่ใช้ในการวิจัยมีข้อจำกัดในการปรับตั้งค่า จึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาออกนอกช่วงความสามารถของเครื่องจักรได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยหลักภายใต้ขอบเขตความสามารถของเครื่องจักรเท่านั้น โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) ในช่วงระดับปัจจัย 100 - 120 องศาเซลเซียส ไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ ส่วนปัจจัยหลักด้านระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (E) เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ได้รับความร้อนในช่วง 3 - 5 วินาที พบว่าไม่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำเช่นกัน



ภาพที่ 4.10 อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ จากแผนการทดลองเบื้องต้น

พิจารณาอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  ( $Db^*$ ) บนพื้นดำ จากภาพที่ 4.10 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยกับค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  ได้ดังนี้



- อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิตัวให้ความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $B^*D$ ) เมื่ออุณหภูมิตัวให้ความร้อนอยู่ในระดับต่ำและมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำ จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ อยู่ในระดับปานกลาง เมื่อปรับอุณหภูมิตัวให้ความร้อนอยู่ในระดับต่ำและให้ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับปานกลางเช่นเดียวกัน แต่ถ้ามีการปรับอุณหภูมิตัวให้ความร้อนอยู่ในระดับสูงและให้ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำ จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  อยู่ในระดับต่ำ และเมื่อปรับอุณหภูมิตัวให้ความร้อนอยู่ในระดับสูงและให้ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ อยู่ในระดับปานกลาง
- อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาที่ได้รับความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $C^*D$ ) เมื่อระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำและมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำ จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ อยู่ในระดับต่ำ เมื่อปรับระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำและมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำดั้งเดิม แต่ถ้าปรับระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูงและมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับต่ำ จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำ และเมื่อปรับระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูงและมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนอยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ อยู่ในระดับสูง

การออกแบบการทดลองแบบ  $2^5$  แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำออก แล้วนำเฉพาะปัจจัยที่มีผลไปทำการทดลองต่อเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่จะทำให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  มีค่าน้อยที่สุด

#### 4.5 การทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากการทดลองเบื้องต้นทำให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ ได้แก่ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B) ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C) และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D) อีกทั้งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรตอบสนองมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear Effect) จึงจำเป็นต้องใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิวิติลีน เทเรฟทาเลต ซึ่งได้แก่ แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิต แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และแผนการทดลองแฟคทอเรียลแบบสามระดับ เนื่องจากสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยหลัก อันตรกิริยา และความสัมพันธ์ของพจน์กำลังสองได้

เมื่อพิจารณาแผนการทดลองแต่ละแผนจะพบว่า แผนการทดลองแฟคทอเรียลแบบสามระดับมีจำนวนการทดลองค่อนข้างมากทำให้ใช้เวลาทำการทดลองนาน ส่วนแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมพอสิตเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันและทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่การทดลองบริเวณที่เป็นแฟคเซ็นเตอร์ (Face Center) เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เพราะจะต้องปรับตั้งค่าระดับของปัจจัยออกนอกขอบเขตที่ทางโรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้ แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นการออกแบบที่คล้ายกับเซ็นทรัลคอมพอสิตแต่ต่างกันที่จุดบนแกนจะอยู่ในระนาบเดียวกับจุดที่เป็นแฟคทอเรียล และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง จึงเป็นแผนการทดลองที่เหมาะสมต่อการหาพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

##### 4.5.1 ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

ดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 3 ปัจจัย มีตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร คือ ความเงา ความหยاب และความแตกต่างสีแกน  $b^*$  ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ลำดับการทดลองเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ตามแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนตามตารางที่ 3.5 โดยกำหนดให้ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้มีค่าคงที่ ดังนี้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) คงที่ที่ระดับต่ำสุด 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ได้รับความดัน (D) คงที่ที่ระดับต่ำสุด 3 วินาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบิร์ตเคน

Run	db*		ความเงา (G.U.)		ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	
	พื้นดำ	พื้นขาว	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Specification	$\pm 1.5$		>99.0		<0.5	
1	0.45	0.12	102.3	101.5	<0.5	<0.5
2	0.12	0.17	102.6	101.7	<0.5	<0.5
3	0.42	0.19	102.5	101.6	<0.5	<0.5
4	0.30	0.11	102.2	101.7	<0.5	<0.5
5	0.78	0.15	102.8	101.4	<0.5	<0.5
6	0.53	0.13	102.7	101.5	<0.5	<0.5
7	0.51	0.10	102.3	101.5	<0.5	<0.5
8	0.47	0.16	102.4	101.7	<0.5	<0.5
9	0.54	0.16	102.7	101.3	<0.5	<0.5
10	0.67	0.13	102.2	101.6	<0.5	<0.5
11	0.05	0.15	102.8	101.6	<0.5	<0.5
12	0.64	0.11	102.4	101.5	<0.5	<0.5
13	0.94	0.18	102.3	101.7	<0.5	<0.5
14	1.01	0.12	102.3	101.5	<0.5	<0.5
15	0.37	0.14	102.4	101.6	<0.5	<0.5
16	0.31	0.16	102.1	101.6	<0.5	<0.5
17	0.61	0.13	102.6	101.6	<0.5	<0.5
18	0.49	0.14	102.4	101.6	<0.5	<0.5
19	0.66	0.13	102.6	101.4	<0.5	<0.5
20	0.33	0.11	102.8	101.5	<0.5	<0.5
21	0.43	0.15	102.2	101.2	<0.5	<0.5
22	0.66	0.16	102.3	101.2	<0.5	<0.5
23	0.57	0.13	102.0	101.1	<0.5	<0.5

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน(ต่อ)

Run	db*		ความเงา (G.U.)		ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	
	พื้นดำ	พื้นขาว	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Specification	$\pm 1.5$		>99.0		<0.5	
24	0.59	0.10	102.5	101.4	<0.5	<0.5
25	0.06	0.14	102.1	101.3	<0.5	<0.5
26	0.70	0.17	102.4	101.3	<0.5	<0.5
27	0.75	0.15	102.3	101.2	<0.5	<0.5
28	1.07	0.12	102.7	101.3	<0.5	<0.5
29	0.89	0.13	102.3	101.1	<0.5	<0.5
30	1.00	0.17	102.6	101.6	<0.5	<0.5

จากผลการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมตามแผนการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่า ชี้นงานที่ได้จากการทดลองที่แต่ละระดับของปัจจัยมีคุณภาพดี มีค่าความเงา ความหยาบ และค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวอยู่ในช่วงมาตรฐาน เช่นเดียวกับผลการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

- **คุณภาพชี้นงาน** : ชี้นงานมีคุณภาพดี โดยชี้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ รูปทรงชัดเจน ไม่พบข้อบกพร่องจากการขึ้นรูป
- **ความเงา** : फिल्मพอลิคาร์บอนเนต-พอลิเบวิทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูปมีความเงาลดลงเล็กน้อยในช่วง 0.5 – 1.4 G.U. โดยทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปมีความเงามากกว่า 99.0 G.U. เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
- **ความหยาบ** : फिल्मพอลิคาร์บอนเนต-พอลิเบวิทิลีน เทเรฟทาเลตหลังการขึ้นรูปมีความหยาบไม่เปลี่ยนแปลง โดยทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปมีความหยาบน้อยกว่า 0.5 $\mu\text{m}$  เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
- **ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  ( $Db^*$ )** : จากการขึ้นรูปที่ระดับปัจจัยต่างๆพบว่า फिल्मพอลิคาร์บอนเนต-พอลิเบวิทิลีน เทเรฟทาเลตทุกชี้นงานมีค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 – 0.2 เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด มี

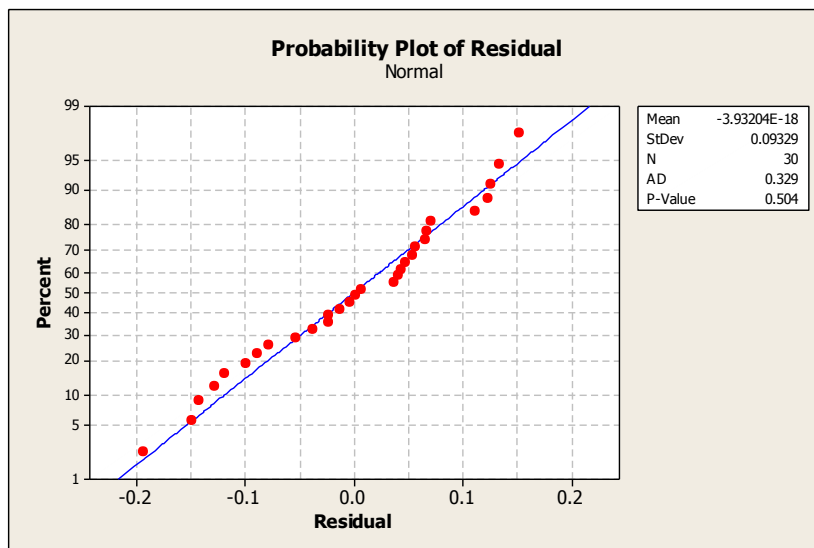
เพียงค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำเท่านั้นที่มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละระดับปัจจัย

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ผลการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจึงนำเฉพาะตัวแปรตอบสนองที่เป็นค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำเท่านั้นมาพิจารณา โดยกำหนดว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดความดันสูงไม่มีผลต่อความเงาและความหยابของผิวฟิล์ม และยังคงทำให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นขาวอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด

#### 4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล ตรวจสอบว่าข้อมูลมีลักษณะตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ศูนย์และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ทำการตรวจสอบ 4 ขั้นตอน เช่นเดียวกับการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

1. **การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ** จากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่เรียงลำดับจากน้อยไปหามากพบว่ามี การกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างจากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

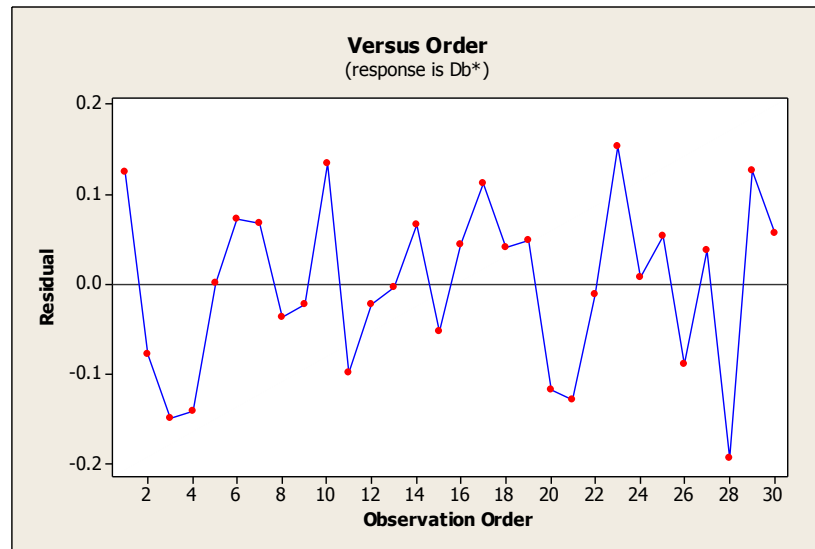
จากการทดสอบของ Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

$H_0$  : ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$  : ส่วนตกค้างไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

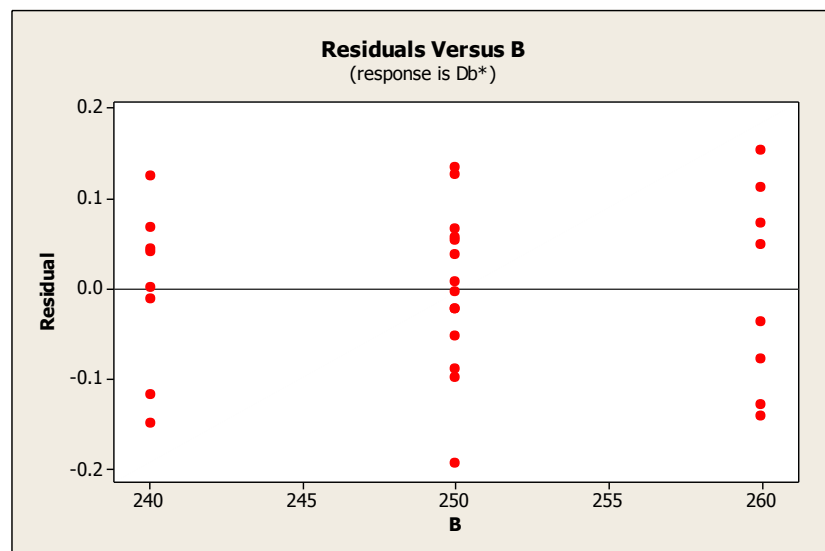
จากภาพที่ 4.11 พบว่ามีค่า P-Value = 0.504 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

2. **การตรวจสอบความเป็นอิสระ** การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง เป็นการตรวจสอบความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ดังภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



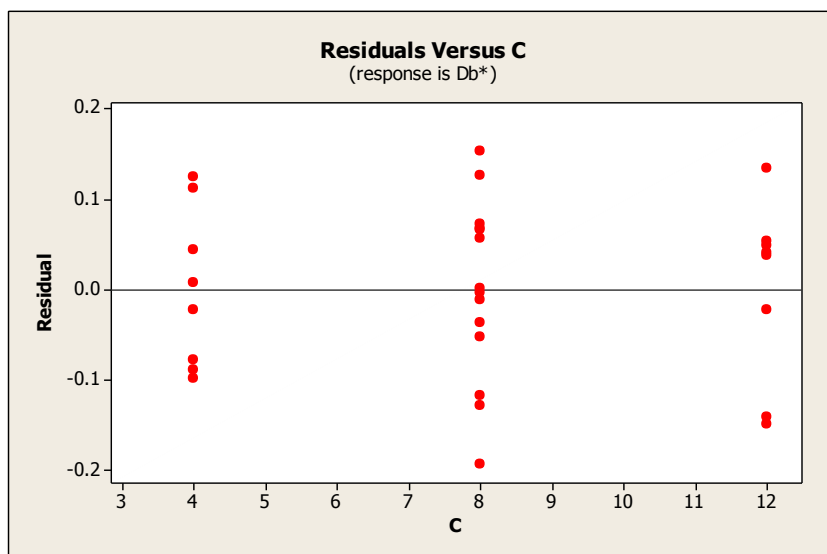
ภาพที่ 4.12 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล  
จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

3. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เพื่อตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังภาพที่ 4.13 – 4.15



ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

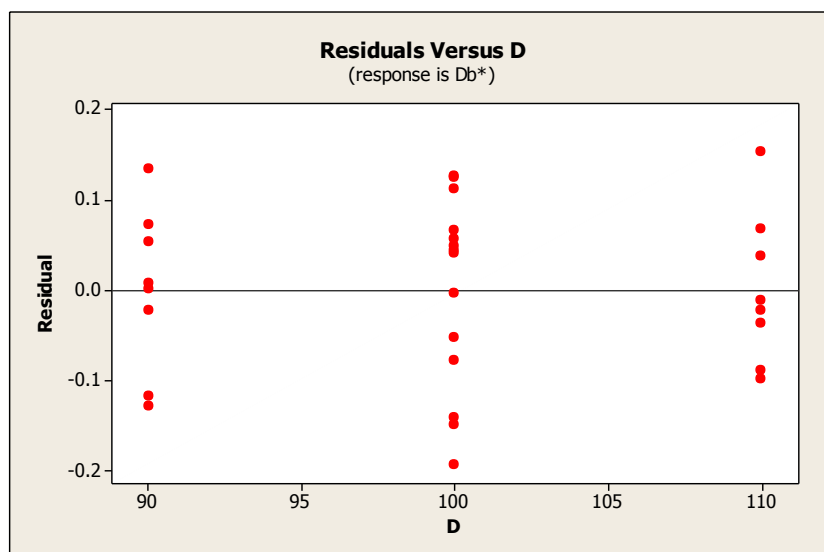
จากภาพที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย B คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

จากภาพที่ 4.14 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย C คือ ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำและระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์

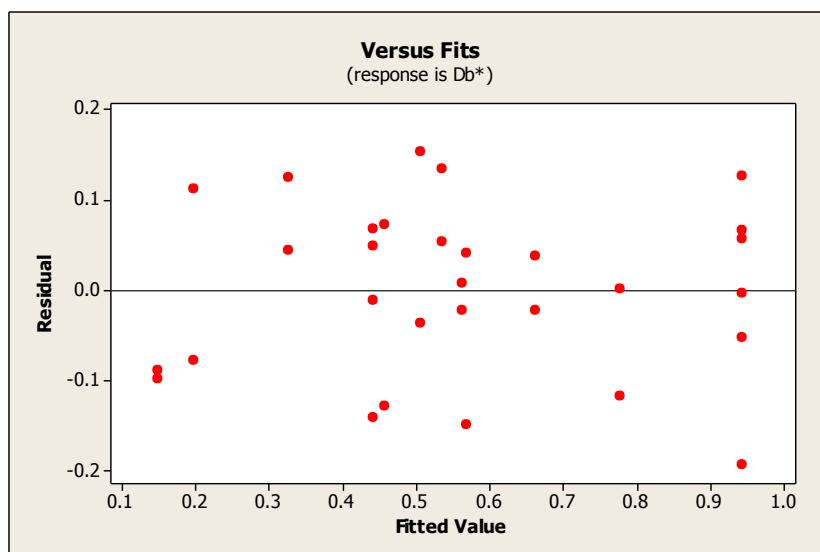




ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

จากภาพที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับปัจจัย D คือ ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป พบว่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยมีการกระจายตัวในระดับต่ำ และระดับสูงสมดุลกัน จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์

4. การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังภาพที่ 4.16 พบว่า  $\sigma^2$  ของส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ตั้งแต่ภาพที่ 4.13 - 4.16 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ทุกประการ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้

#### 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าผลต่างสีแทน $b^*$ บนพื้นดำในการทดลองตามแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดำ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95.0 เปอร์เซ็นต์ ( $\alpha = 0.05$ ) ได้ผลการวิเคราะห์ที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลองออกแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสี่แกน b\* (Db\*) บนพื้นดำ

Analysis of Variance for Db*						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	1.79091	1.79091	0.22386	18.63	0.000
Linear	3	0.38534	0.38534	0.12845	10.69	0.000
B	1	0.06503	0.06502	0.06502	5.41	0.030
C	1	0.23766	0.23766	0.23766	19.77	0.000
D	1	0.08266	0.08266	0.08266	6.88	0.016
Square	3	1.18566	1.18566	0.39522	32.88	0.000
B*B	1	0.33603	0.44477	0.44477	37.00	0.000
C*C	1	0.67976	0.72887	0.72887	60.64	0.000
D*D	1	0.16987	0.16987	0.16987	14.13	0.001
Interaction	2	0.21991	0.21991	0.10996	9.15	0.001
B*D	1	0.07411	0.07411	0.07411	6.17	0.022
C*D	1	0.14580	0.14580	0.14580	12.13	0.002
Residual Error	21	0.25241	0.25241	0.01202		
Lack-of-Fit	4	0.07718	0.07718	0.01929	1.87	0.162
Pure Error	17	0.17523	0.17523	0.01031		
Total	29	2.04332				

S = 0.109633  
R-Sq = 87.65% R-Sq(adj) = 82.94%

Estimated Regression Coefficients for Db\* using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-140.034
B	1.12446
C	0.00713542
D	0.0285208
B*B	-0.00245417
C*C	-0.0196354
D*D	-0.00151667
B*D	0.000962500
C*D	0.00337500

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลต่างสี่แกน b\* บนพื้นดำตามแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสี่แกน b\* บนพื้นดำ ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่

1. ปัจจัยหลัก คือ

- อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B)
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C)
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D)

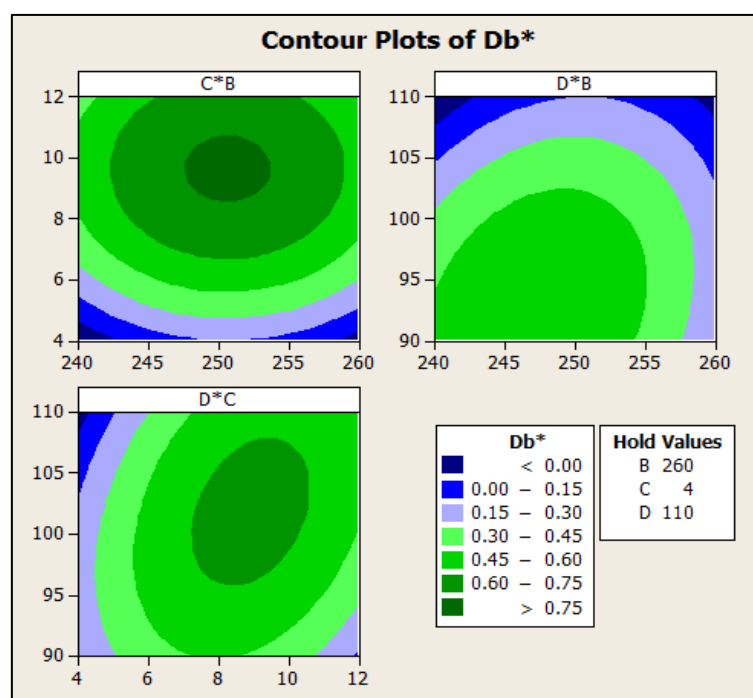
2. พจน์กำลังสอง คือ

- อุณหภูมิตัวให้ความร้อน ( $B^*B$ )
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ( $C^*C$ )
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $D^*D$ )

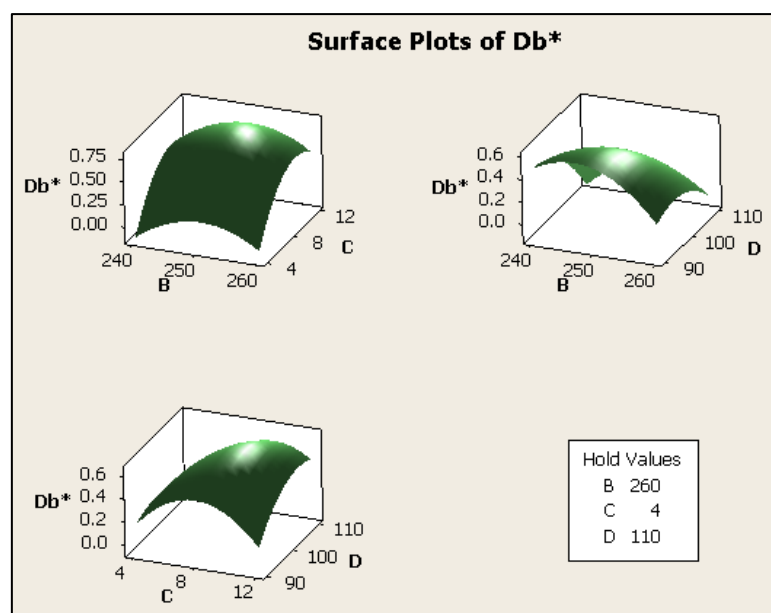
3. อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย คือ

- อุณหภูมิตัวให้ความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $B^*D$ )
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนและความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป ( $C^*D$ )

จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนซึ่งเป็นทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำได้ดังภาพที่ 4.17 และ 4.18



ภาพที่ 4.17 กราฟโครงร่างระหว่างปัจจัยที่มีผลกับค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ



ภาพที่ 4.18 พื้นผิวตอบสนองของระหว่างปัจจัยที่มีผลกับค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.17 และ 4.18 พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำกับปัจจัยที่มีผลนั้นมีลักษณะเป็นพาราโบลา สามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำได้เป็นช่วงเท่านั้น จึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำที่ต้องการ

#### 4.8 การวิเคราะห์การถดถอย

นำปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำที่ได้จากแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมาทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ โดยลดรูปปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลองออก

##### 1. สมการถดถอย

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำในตารางที่ 4.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ และปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำอย่างมีนัยสำคัญ ได้ดังสมการ

$$Y = -140.034 + 1.12446B + 0.00713542C + 0.0285208D - 0.00245417B*B \\ - 0.0196354C*C - 0.00151667D*D + 0.000962500B*D + 0.00337500C*D$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R(adj) เท่ากับ 82.94% ซึ่งหมายความว่าในความผันแปรของค่าผลต่างสีแทน b\* บนพื้นดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้อง 82.94%

## 2. ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย

จากสมการถดถอยที่ได้ทำการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

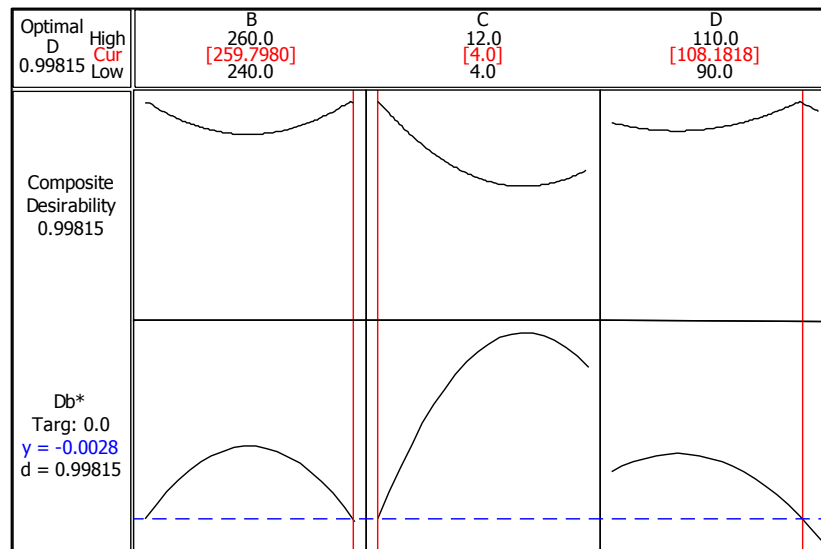
$H_0$  : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

$H_1$  : รูปแบบการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าผลต่างสีแทน b\* บนพื้นดำในตารางที่ 4.3 โดยพิจารณาค่า lack of fit ซึ่งเป็นค่าการทดสอบความเหมาะสมของสมการ พบว่า ค่า P-Value ของ lack of fit เท่ากับ 0.162 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

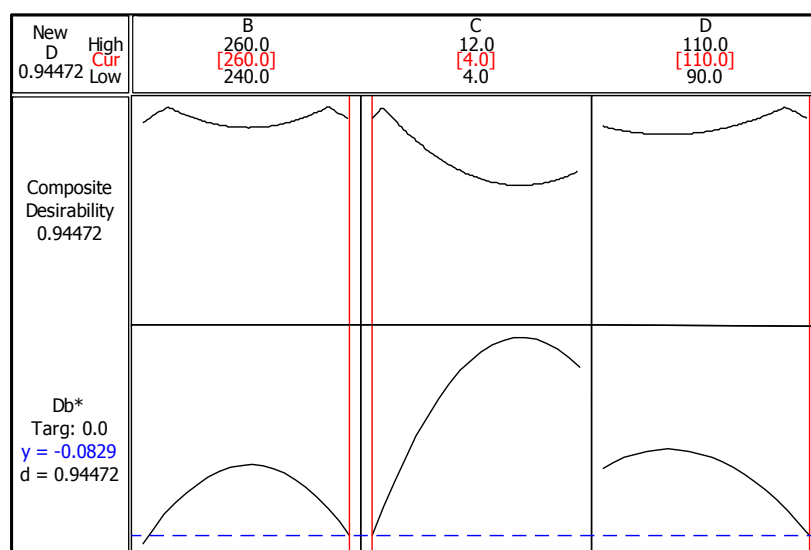
## 4.9 การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าผลต่างสีแทน b\* บนพื้นดำมีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าที่ยอมรับได้ของค่าผลต่างสีแทน b\* บนพื้นดำให้อยู่ในช่วง  $\pm 1.5$  จึงหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต โดยใช้ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยกำหนดให้ระดับของอุณหภูมิตัวให้ความร้อน (A) เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ได้รับแรงดัน (E) เท่ากับ 3 วินาที ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ค่าตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรม

จากภาพที่ 4.19 พบว่า ถ้าต้องการให้ค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดามีค่าน้อยที่สุดจะต้องใช้อุณหภูมิให้ความร้อนเท่ากับ 259.798 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนเท่ากับ 4 วินาที และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูปเท่ากับ 108.1818 บาร์ จึงจะได้ค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  บนพื้นดามีค่าน้อยที่สุดที่เหมาะสม คือ -0.0028 แต่ในทางปฏิบัติมีข้อจำกัดด้านความละเอียดของเครื่องจักร ทำให้ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้ตรงตามระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม ผู้วิจัยจึงปรับระดับของปัจจัยที่เหมาะสมให้เป็นค่าที่สามารถปรับตั้งค่าได้จริงแล้ววิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 อีกครั้ง ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ค่าตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ปรับค่าเป็นค่าจริงในทางปฏิบัติ

จากภาพที่ 4.20 พบว่า เมื่อขึ้นรูปอัดความดันสูงโดยใช้อุณหภูมิตัวให้ความร้อนเท่ากับ 260 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ได้รับความร้อนเท่ากับ 4 วินาที และความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูปเท่ากับ 110 บาร์ จะได้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำที่เหมาะสม คือ -0.0829 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนด คือ  $\pm 1.5$

ดังนั้น จึงกำหนดสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিທີลิน เทเรฟทาเลต เพื่อให้ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำมีค่าน้อยที่สุด ดังนี้

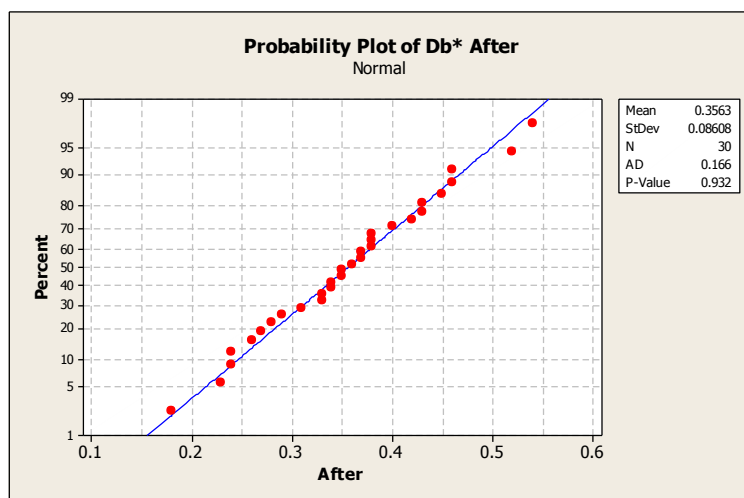
- อุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิตัวให้ความร้อน (B) เท่ากับ 260 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C) เท่ากับ 4 วินาที
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D) เท่ากับ 110 บาร์
- ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (E) เท่ากับ 3 วินาที

#### 4.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดลองซ้ำ เพื่อตรวจสอบค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมแบบใหม่ เปรียบเทียบกับค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่า ทำการทดลองที่สภาพปฏิบัติงานจริงของกระบวนการผลิต โดยทำการทดลองจำนวน 30 ตัวอย่าง จากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่ได้ค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำเท่ากับ 0.356 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.086 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.2

1. **การทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ** จากการกระจายตัวของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากการขึ้นรูปด้วยสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมแบบใหม่ พบว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังภาพที่ 4.21





ภาพที่ 4.21 การกระจายตัวแบบปกติของค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากการขึ้นรูปแบบใหม่

จากการทดสอบของ Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

$H_0$  : ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากการขึ้นรูปแบบใหม่มีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$  : ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากการขึ้นรูปแบบใหม่ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 4.21 พบว่ามีค่า P-Value = 0.932 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำจากการขึ้นรูปแบบใหม่มีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

2. การทดสอบความแปรปรวน ทดสอบความแตกต่างระหว่างความแปรปรวนของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบเก่าและการขึ้นรูปแบบใหม่

โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

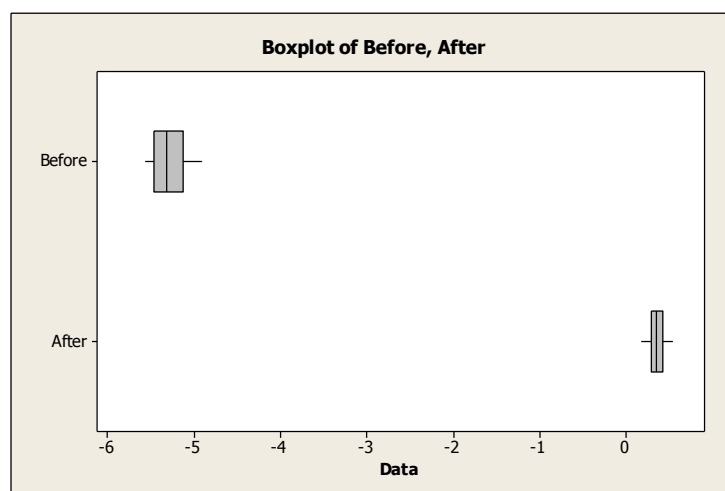
$$H_1 : \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

เมื่อ

$\sigma_1^2$  คือ ความแปรปรวนของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำของการ  
ขึ้นรูปแบบเก่า

$\sigma_2^2$  คือ ความแปรปรวนของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำของการ  
ขึ้นรูปแบบใหม่

นำผลการทดลองจากตารางที่ ข.1 และ ข.2 มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า  
ผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่  
4.22 และตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.22 ผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างการการขึ้นรูป  
แบบเก่ากับการขึ้นรูปแบบใหม่

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างการขึ้นรูปแบบเก่า  
กับการขึ้นรูปแบบใหม่

Statistics				
Variable	N	StDev	Variance	
Before	30	0.202	0.041	
After	30	0.086	0.007	
Ratio of standard deviations = 2.343				
Ratio of variances = 5.490				
95% One-Sided Confidence Intervals				
Distribution of Data	Lower Bound for StDev	Lower Bound for Variance	Ratio	Ratio
Normal	1.718	2.950		
Continuous	1.749	3.057		
Tests				
Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	29	29	5.49	0.000
Levene's Test (any continuous)	1	58	16.07	0.000

จากผลการทดสอบความแปรปรวนดังภาพที่ 4.22 พบว่าค่าผลต่างของสี่แกน b\* บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบเก่าและการขึ้นรูปแบบใหม่ไม่มีข้อมูลที่ผิดปกติ และจากตารางที่ 4.4 พบว่าการทดสอบด้วย F-Test และ Levene's Test มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยสรุปว่าความแปรปรวนของค่าผลต่างของสี่แกน b\* บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบเก่ามากกว่าการขึ้นรูปแบบใหม่อย่างมีนัยสำคัญ

3. **การทดสอบค่าเฉลี่ย** ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างของสี่แกน b\* บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบเก่าและการขึ้นรูปแบบใหม่

โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

เมื่อ

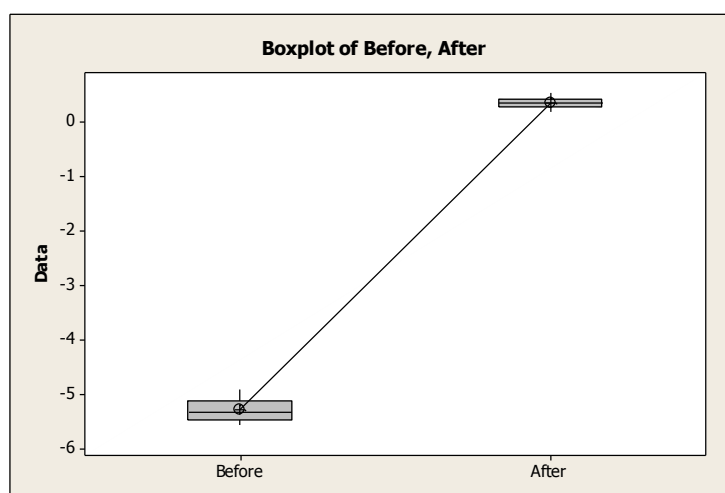
$\mu_1$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบ

เก่า

$\mu_2$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำของการขึ้นรูปแบบ

ใหม่

นำผลการทดลองจากตารางที่ ข.1 และ ข.2 มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลต่างของสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.23 และตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสีระหว่างการขึ้นรูปแบบเก่ากับการขึ้นรูปแบบใหม่

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยสีระหว่างการขึ้นรูปแบบเก่ากับการขึ้นรูปแบบใหม่

Two-sample T for Before vs After				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Before	30	-5.280	0.202	0.037
After	30	0.3563	0.0861	0.016

Difference = mu (Before) - mu (After)  
 Estimate for difference: -5.6368  
 95% CI for difference: (-5.7178, -5.5558)

T-Test of difference = 0 (vs not =):  
 T-Value = -140.79  
 P-Value = 0.000 DF = 39

จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 4.23 พบว่าค่าผลต่างของสี่แกน  $b^*$  บนพื้น  
 ดำของการขึ้นรูปแบบเก่าและการขึ้นรูปแบบใหม่ไม่มีข้อมูลที่ผิดปกติ และจากตารางที่  
 4.5 พบว่าการทดสอบด้วย T-Test มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับ  
 นัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยสรุปว่าค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างของสี่แกน  $b^*$   
 บนพื้นดำของการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่าและการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่แตกต่าง  
 กันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.11 การทดสอบความเพียงพอของตัวอย่าง

จากสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองนำไปทดลองปฏิบัติ ผลการทดลองแสดง  
 ดังตารางที่ ข.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดอ้างอิงตามคู่มือการทำงานเรื่องการวัดสี่ของ  
 โรงงานกรณีศึกษาซึ่งกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดสี่มีค่าเท่ากับ 0.1 นำข้อมูลที่ได้มา  
 ทดสอบความเพียงพอของตัวอย่างการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95.0% โดยคำนวณความเพียงพอ  
 ของตัวอย่างได้จากสูตร

$$n = \left[ \frac{Z_{\alpha} \times S}{\frac{e}{2}} \right]^2$$

เมื่อ

- n คือ จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม
- $\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05
- S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- e คือ ความคลาดเคลื่อนของการวัด กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1

จะได้ว่า

$$n = \left[ \frac{1.96 \times 0.0861}{0.1} \right]^2$$

$$n = 2.44 \approx 3 \text{ ตัวอย่าง}$$

ดังนั้น จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลในการขึ้นรูป  
 ด้วยสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ 3 ตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง  
 ทั้งสิ้นจำนวน 30 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างที่ใช้จึงมีความเพียงพอ

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

หลังจากดำเนินการวิจัยตามแผนการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ด้วยวิธีทางสถิติวิศวกรรม สามารถหาระดับที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลตได้ โดยมีบทสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม อันเนื่องมาจากข้อร้องเรียนจากลูกค้าเกี่ยวกับการเปลี่ยนสีของชิ้นงานขึ้นรูปบนพื้นหลังสีดำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนสีของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিทิลีน เทเรฟทาเลต โดยวิเคราะห์ผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีตัวแปรตอบสนองที่ศึกษา คือ

- ความเงา
- ความหยาบ
- ค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ

สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 สรุปการคัดเลือกปัจจัย

จากการระดมสมองของคณะทำงานที่ประกอบด้วยผู้มีประสบการณ์ในการทำงานและผู้เชี่ยวชาญทางด้านวัสดุศาสตร์และพอลิเมอร์ ทำการค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ตามหลัก 4M คัดเลือกเอาปัจจัยควบคุมได้ที่ปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายโดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถของเครื่องจักรไปใช้ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่อการเปลี่ยนเฉดสีของฟิล์ม ได้แก่ ปัจจัยด้านวิธีการ ซึ่งในงานวิจัยนี้หมายถึงสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป ประกอบด้วย 5 ปัจจัยย่อย ดังนี้

- คุณหมุมิแม่พิมพ์ (A)
- คุณหมุมิตัวให้ความร้อน (B)
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C)
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D)
- ระยะเวลาที่ได้รับความดัน (E)

### 5.1.2 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น

นำปัจจัยที่ถูกคัดเลือกทั้ง 5 ปัจจัย มาทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกรองเอาปัจจัยที่ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองออก ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ  $2^5$  แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง โดยกำหนดปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 66 การทดลอง ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลต่างสีแกน  $b^*$  บนพื้นดำ ดังนี้

- คุณหมุมิตัวให้ความร้อน (B)
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (C)
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป (D)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าข้อมูลที่จุดศูนย์กลางและข้อมูลที่มีมุมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่ามีผลกระทบจากจุดศูนย์กลาง (Curvature) ดังนั้นแบบจำลองขั้นแรกที่ได้จึงเป็นแบบจำลองที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากมีผลจากพจน์ ควอดราติก (Quadratic)

### 5.1.3 สรุปผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าตัวแปรตอบสนองมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear Effect) จึงต้องใช้ในการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยเลือกใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน นำปัจจัยที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย B, C และ D มาเพิ่มค่ากลาง คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 30 การทดลอง กำหนดให้ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ปัจจัย A และ E ให้มีค่าคงที่ที่ระดับต่ำสุด ได้สมการถดถอย ดังนี้

$$Y = -140.034 + 1.12446B + 0.00713542C + 0.0285208D \\ - 0.00245417B*B - 0.0196354C*C - 0.00151667D*D \\ + 0.000962500B*D + 0.00337500C*D$$

สมการถดถอยที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  (adj) เท่ากับ 82.94% และจากการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 ได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลต ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	หน่วย
A	อุณหภูมิแม่พิมพ์	100	องศาเซลเซียส
B	อุณหภูมิตัวให้ความร้อน	260	องศาเซลเซียส
C	ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน	4	วินาที
D	ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป	110	บาร์
E	ระยะเวลาที่ได้รับแรงดัน	3	วินาที

จากการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นแผนการทดลองแบบ Fixed effect model อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการปรับตั้งเครื่องจักรขึ้นรูปที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าออกนอกขอบเขตความสามารถของเครื่องจักรได้ ดังนั้นระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยนี้ จึงเป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ขอบเขตที่ศึกษาเท่านั้น

#### 5.1.4 เปรียบเทียบผลการทดลอง

จากสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้นำไปทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดสอบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.2 สามารถเปรียบเทียบค่าตอบสนองของการขึ้นรูปด้วยสภาวะการขึ้นรูปแบบเก่ากับการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่ได้ ดังตารางที่ 5.2



ตารางที่ 5.2 ค่าตอบสนองของการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่าและแบบใหม่

ค่าตอบสนอง	เกณฑ์มาตรฐาน	ขึ้นรูปแบบเก่า	ขึ้นรูปแบบใหม่
ค่าเฉลี่ยผลต่างสีแกน b* บนพื้นดำ	$\pm 1.5$	-5.28	0.356
ความเงา (GU)	> 99	> 99	> 99
ความหยาบ ( $\mu\text{m}$ )	< 0.5	< 0.5	< 0.5
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	n/a	0.202	0.086
ช่วงความเชื่อมั่นค่าเฉลี่ยผลต่างสีแกน b* ที่ 95%	n/a	(-5.356) - (-5.205)	0.324 - 0.388

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่ทำให้ค่าเฉลี่ยผลต่างสีแกน b\* บนพื้นดำลดลงจาก -5.28 เป็น 0.356 ใกล้เคียงค่ามาตรฐานที่กำหนดมากกว่าการขึ้นรูปแบบเก่า มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 0.202 เป็น 0.086 ต่ำกว่าการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่า โดยที่ความเงา และความหยาบยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

สภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการแปรรูปขึ้นงานก่อนนำส่งให้ลูกค้า โดยก่อนการปรับปรุงกระบวนการพบว่าขึ้นงานทั้งหมดที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะการขึ้นรูปแบบเก่าที่ส่งให้ลูกค้าได้รับการร้องเรียนว่ามีค่าผลต่างสีแกน b\* บนพื้นดำออกนอกค่ามาตรฐาน แต่เมื่อขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยสภาวะแบบใหม่ที่ได้จากการวิจัย พบว่าขึ้นงานทั้งหมด 100% มีค่าผลต่างสีแกน b\* บนพื้นดำอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดและมีค่าใกล้เคียงค่ามาตรฐานมากกว่าการขึ้นรูปแบบเก่า สรุปได้ว่า การขึ้นรูปด้วยสภาวะการขึ้นรูปแบบใหม่ที่ได้จากการวิจัยสามารถแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนบนพื้นดำได้จริง โดยไม่มีข้อร้องเรียนจากลูกค้าหลังจากนำไปใช้งาน สภาวะที่เหมาะสมของการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลตที่ได้จากการวิจัยนี้จะนำไปจัดทำเป็นคู่มือการปฏิบัติงาน เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการปฏิบัติงานของโรงงานกรณีศึกษาสำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชนิดนี้ต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีขอบเขตศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิবিวิทิลีน เทเรฟทาเลต ความหนา 0.375 มิลลิเมตร ชนิดผิวเงา-หยาบ โดยศึกษาและวัดค่าเฉพาะพื้นผิวเงาเท่านั้น จึงมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทดลองต่อไปในอนาคต ดังนี้

1. **ความหนา** : งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มที่มีความหนา 0.375 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาสูงสุดที่สามารถผลิตได้สำหรับฟิล์มประเภทนี้ แต่ยังคงมีความหนาอื่นอีก เช่น 0.125, 0.175 และ 0.250 มิลลิเมตร ในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรศึกษาให้ครอบคลุมทุกความหนา เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม
2. **พื้นผิวฟิล์ม** : งานวิจัยนี้ศึกษาฟิล์มชนิดผิวเงา-หยาบ ศึกษาและวัดค่าเฉพาะพื้นผิวเงาเท่านั้นเนื่องจากเป็นพื้นผิวที่ลูกค้านำไปใช้งาน โดยเกณฑ์มาตรฐานสำหรับพื้นผิวเงานั้นกำหนดเฉพาะค่าขั้นต่ำ เช่น ความเงามากกว่า 99.0 GU และความหยابน้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร มีเฉพาะค่าสีเท่านั้นที่มีเกณฑ์มาตรฐานเป็นช่วงตัวเลข การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบนด้านเงาจึงไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพฟิล์มมากนักเนื่องจากค่ายังคงอยู่เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด หากมีการศึกษาต่อไปในอนาคตจึงควรนำสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้กับฟิล์มชนิดผิวเงา-หยาบไปทดลองใช้กับฟิล์มพื้นผิวอื่น เช่น ผิวหยาบ-หยาบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม
3. **ตัวแปรตอบสนอง** : งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเงา ความหยาบ และค่าสีแกน  $b^*$  ซึ่งสามารถวัดค่าได้ง่ายและมีวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก แต่ยังมีตัวแปรตอบสนองอื่นที่สามารถบอกคุณสมบัติภายในชิ้นงานได้ เช่น ความเครียดในชิ้นงาน (Retardation) โดยกระบวนการขึ้นรูปอาจก่อให้เกิดความเครียดแก่ชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่มีความเครียดสูงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้บิดเบี้ยวเสียรูปทรง ในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรศึกษาคุณสมบัติความเครียดภายในชิ้นงานก่อนและหลังขึ้นรูปด้วย เพื่อให้ได้สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้กับการขึ้นรูปอัดความดันสูงฟิล์มพอลิคาร์บอเนต-พอลิบิวทิลีน เทเรพทาเลต เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า ช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งเป็นของเสียประเภทที่ไม่สามารถนำไปแก้ไขเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นการลดความสิ้นเปลืองในด้านต้นทุน วัสดุดิบ พลังงาน เครื่องจักรและอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถนำสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ไปเป็นแนวทางสำหรับประยุกต์ใช้กับฟิล์มชนิดอื่นได้ด้วย

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จักรพันธ์ ต้นศรีวงษ์. การศึกษานาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน สำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสูญญากาศโดยวิธีออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.

ชลิดา ชาญวิจิตร. การออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูประบบสูญญากาศสำหรับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.

ชัยยา ฉุยฉาย. การออกแบบการทดลองแก้ไขปัญหาการขีดขึ้นงานพลาสติกในงานผลิตชิ้นส่วนจักรยานยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2552.

โชติวิชญ์ ชมเกษร, จิรัฐติ เต็งสุทธิวัฒน์, ชชาติชาย ส่งจิตต์สวัสดิ์ และธนวัฒน์ ช่วยเจริญ. ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปหน้าปัดเรือนไมล์ด้วยกรรมวิธีใช้ลมอัดความดันสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.

ณัชชา พลศิลป์. การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ : กรณีศึกษาโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.

ปฐุมพงษ์ พันธุ์พิบูลย์. การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยการใช้วิธีการซิกซ์ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552.

ประเสริฐ ชุมปัญญา. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน  
กรณีศึกษาในสาขาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชา  
วิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ, 2552.

ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง,  
2540.

ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ปาริชาติ นาทะสัน. การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษ  
ลูกฟูก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภูมิพัฒน์ กิ่งแก้ว, ธีระวัฒน์ วงศ์สุวรรณ, วันชัย กรรณานุกุลชัย และสุธิพงษ์ สุดโต . การออกแบบ  
และสร้างแม่พิมพ์ เทอร์โมฟอร์มมิ่ง สำหรับขึ้นรูปโมเดลรถยนต์ ด้วยระบบ  
CAD/CAM/CAE. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.

รัตนพันธุ์ นพแก้ว. การหาค่าพารามิเตอร์ในการเคลือบฟิล์มชนิดซิลิกอนไนไตรต์ด้วยกระบวนการ  
เคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุต  
สาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.

โสภิตา ท่วมมี. การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การ  
ออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก. วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

วิชาญ วรรณนา. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่ง  
แบบต่อเนื่อง โดยวิธีออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชา  
วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ศรีสัจจา บุญฤทธิ์. อิทธิพลปัจจัยขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์,  
2542

## ภาษาอังกฤษ

- Baron, A., L., and Rawlings, H., L. High Impact Strength Blends of Polybutylene terephthalate. United States Patent (August 1977) : Patent no. 4,044,073.
- Birley, A., W., and Chen, X., Y. Studies of Polycarbonate-Poly (butylene terephthalate) Blends. Polymer International 16 (February 2007) : 77-82
- Bharti, P., K. Recent Methods for Optimization of Plastic Injection Molding Process-A Retrospective and Literature Review. International Journal of Engineering Science and Technology 2 (2010) : 4540-4554.
- Box, H., C. Set Lighting Technician's Handbook : Film Lighting Equipment, Practice, and Electrical Distribution. 4. United States of America : Elsevier, 2010.
- Hua, H. Semi-Continuous Emulsion Copolymerization of Styrene-Butyl Acrylate with Methacrylic Acid : Box-Behnken Design of Experiments. Chemical Engineering & Technology 33 (November 2010) : 1931-1942.
- Kleiner, F., et al. Polycarbonate/polybutylene terephthalate. United States Patent (May 1985) : Patent no. 4,515,925.
- Montgomery, D., C. Design and Analysis of Experimental. 6<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley and Son, 2009.
- Odian, G. Principle of Polymerization. 3<sup>rd</sup> ed. New York : John Wiley and Son, 1991.
- Srinivasa, P., C. Process Development of Biodegradable Chitosan-Based Films and their Suitability for Food Packaging. Doctoral Dissertation. Department of Biochemistry and Nutrition Central Food Technological Research Institute University of Mysore, 2004.
- Ungar, I., S., and Scher, H., I. Texturizing Film for The Manufacture of High Pressure Laminates. United States Patent (September 1973) : Patent no. 3,761,338.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่มาและความสำคัญของปัญหา



ตารางที่ ก.1 ปริมาณการผลิตฟิล์มของสายการผลิตที่ 2 ปี 2552

ชนิดฟิล์ม	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total	%
Gloss-Gloss film	6380	0	9400	9180	20646	7274	25683	34803	44093	42313	19921	62466	282160	46.4
Gloss-Texture film	0	1065	2571	2241	12833	7889	14048	5671	389	17760	7982	0	72450	11.9
Texture-Texture film	7657	13816	20358	23815	10937	10380	49144	18937	18945	26361	33834	0	234184	38.5
Polymer blend film	0	0	0	651	425	316	0	3040	0	11339	0	0	15770	2.6
Additive film	0	0	0	257	0	6	0	0	790	0	0	0	1053	0.2
Color film	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2516	0	0	2516	0.4
รวม (kg)													608135	100.0

ตารางที่ ก.2 ปริมาณการผลิตฟิล์มของสายการผลิตที่ 2 ปี 2553

ชนิดฟิล์ม	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total	%
Gloss-Gloss film	0	444	89389	83906	64889	52086	0	47482	0	0	14974	34451	387620	42.2
Gloss-Texture film	0	14390	2867	26543	0	0	0	5974	418	16768	212	0	67173	7.3
Texture-Texture film	23938	59186	42632	34449	86039	10967	4306	5062	22065	31406	23456	29808	373315	40.7
Polymer blend film	0	0	0	0	0	0	3139	0	6535	17900	15354	10120	53048	5.8
Additive film	0	318	805	0	2170	0	4935	1437	4902	912	239	16988	32705	3.6
Color film	0	0	0	0	0	0	0	870	506	401	0	1988	3765	0.4
รวม (kg)													917626	100.0

ตารางที่ ก.3 ราคาฟิล์มปี 2553 จำแนกตามชนิดของฟิล์ม

ชนิดฟิล์ม	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
Gloss-Gloss film	395
Gloss-Texture film	277
Texture-Texture film	376
Polymer blend film	2100
Additive film	1680
Color film	1260

ตารางที่ ก.4 ข้อร้องเรียนจากลูกค้าปี 2553 จำแนกตามปัญหาด้านคุณภาพ

ปัญหา	จำนวนข้อร้องเรียน	%	%ความถี่สะสม
ข้อบกพร่องบนผิวฟิล์ม	13	35.14	35.14
สีเปลี่ยนเมื่อได้รับความร้อน	7	18.92	54.05
Inclusion	6	16.22	70.27
ความหนาฟิล์มไม่สม่ำเสมอ	4	10.81	81.08
รอยขีดข่วน	3	8.11	89.19
ผิวฟิล์มไม่เรียบ	2	5.41	94.59
สิ่งปนเปื้อน	2	5.41	100.00
รวม	37	100	100

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการยืนยันผลการวิเคราะห์

ตารางที่ ข.1 ค่าผลต่างสี่แกน  $b^*$  ( $Db^*$ ) บนพื้นดำจากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบเก่า

- อุณหภูมิแม่พิมพ์ 110 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิตัวให้ความร้อน 280 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 15 วินาที
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 100 บาร์
- ระยะเวลาที่ได้รับความดัน 3.5 วินาที

ลำดับการ ทดลอง	ค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ ( $Db^*$ )	ลำดับการ ทดลอง	ค่าผลต่างสี่แกน $b^*$ ( $Db^*$ )
1	-5.45	16	-5.33
2	-5.31	17	-5.24
3	-5.24	18	-5.56
4	-5.03	19	-5.13
5	-5.39	20	-4.92
6	-5.18	21	-5.32
7	-5.34	22	-5.57
8	-4.91	23	-5.41
9	-5.51	24	-5.32
10	-5.32	25	-5.46
11	-5.10	26	-4.99
12	-5.26	27	-5.01
13	-5.47	28	-5.52
14	-4.98	29	-5.47
15	-5.54	30	-5.13
ค่าเฉลี่ย			-5.280
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.202

ตารางที่ ข.2 ค่าผลต่างสีแทน  $b^*$  ( $Db^*$ ) บนพื้นดำจากการขึ้นรูปด้วยสภาวะแบบใหม่

- คุณหม่อมแม่พิมพ์ 100 องศาเซลเซียส
- คุณหม้อมีตัวให้ความร้อน 260 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน 4 วินาที
- ความดันสูงที่ใช้ขึ้นรูป 110 บาร์
- ระยะเวลาที่ได้รับความดัน 3 วินาที

ลำดับการทดลอง	ค่าผลต่างสีแทน $b^*$ ( $Db^*$ )	ลำดับการทดลอง	ค่าผลต่างสีแทน $b^*$ ( $Db^*$ )
1	0.40	16	0.38
2	0.29	17	0.26
3	0.35	18	0.45
4	0.18	19	0.28
5	0.46	20	0.36
6	0.38	21	0.33
7	0.43	22	0.24
8	0.37	23	0.52
9	0.54	24	0.38
10	0.23	25	0.33
11	0.34	26	0.46
12	0.37	27	0.34
13	0.42	28	0.27
14	0.24	29	0.43
15	0.35	30	0.31
ค่าเฉลี่ย			0.356
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.086

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชญาณิศา แก้วเกตุ เกิดวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะสาธารณสุขศาสตร์ วิชาเอก อาชีวอนามัยและความปลอดภัย จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ในปีการศึกษา 2551 เข้าร่วมงานกับบริษัทไทย ซาคาเอะ เลข จำกัด ในปี 2548 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งพนักงานควบคุมคุณภาพและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัทไบเออร์ไทย จำกัด และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553