



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

รายงานการวิจัย
เรื่อง

การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสาร
**PARAMETER SETTING FOR SEAL PROCESS
OF THE RICE PACKAGING**

ชวลิต มณีศรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2553

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์ ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา ผู้ทรงคุณวุฒิ ในคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ พรหมพวก ผู้ช่วยวิจัยและบริษัท ข้าวแสนดี จำกัด ซึ่งสนับสนุนวัสดุและเครื่องจักรสำหรับการทดลอง จนสามารถสรุปผลการวิจัยนี้ได้ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงจะมีประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพการบรรจุข้าวถุงได้ดียิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ได้ให้โอกาสและเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

ชวลิต มณีศรี

มีนาคม 2556

หัวข้อวิจัย : การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสาร
ผู้วิจัย : นายชวลิต มณีสรี
หน่วยงาน : สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

ข้าวถือเป็นสินค้าเกษตรสำคัญของประเทศไทย มีการผลิตเพื่อจัดจำหน่ายในหลายรูปแบบ การผลิตข้าวสารบรรจุถุงขนาด 5 กิโลกรัมถือเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความนิยม โดยเฉพาะผู้บริโภคในประเทศซึ่งมีมูลค่าตลาดสูงถึง 20,000 ล้านบาท ผู้ผลิตหลายรายเพิ่มกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า อย่างไรก็ตามปัญหาคุณภาพของการบรรจุเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิต โดยพบว่าลักษณะของเสียของถุง 2 ชนิดคือ ถุงหนา $110 \pm 12 \mu\text{m}$ และถุงบาง $90 \pm 20 \mu\text{m}$ ได้แก่ รอยปิดผนึกขาด รอยปิดผนึกไม่ติด และรอยปิดผนึกพับ มีสัดส่วนของเสียสูงรวมร้อยละ 80.26 การแก้ไขปัญหาเริ่มจากศึกษากระบวนการทำงานพร้อมหาสาเหตุด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผล รวมทั้งทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกตามมาตรฐานวิธีการทดสอบสำหรับค่าความแข็งแรงของวัสดุ ASTM F88/F88M -06 เนื่องจากปัจจุบันทำการทดสอบด้วยการออกแรงดึงของพนักงาน ทำให้ไม่ทราบค่าที่แท้จริงและค่าที่เป็นเป็นมาตรฐานในการทำงาน จึงทำการคัดกรองปัจจัยด้วยวิธีระดมสมอง พบว่า ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยปิดผนึกคือ ความหนาของถุง เวลาความร้อน และเวลากดพร้อมเป่าลมเย็น และทำการออกแบบการทดลองด้วย 3^3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พบว่า อันตรกิริยาระหว่าง ความหนากับเวลาความร้อน ความหนากับเวลากดพร้อมเป่าลมเย็น เวลาความร้อนกับเวลากดพร้อมเป่าลมเย็น และความหนากับเวลาความร้อนกับเวลากดพร้อมเป่าลมเย็น มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและยืนยันผล พบว่า ไม่เกิดของเสีย และมีค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกในแต่ละจุดเฉลี่ย 9.53 9.11 4.22 และ 3.62 กิโลกรัมแรงต่อความกว้าง 25.4 มิลลิเมตร

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง การกำหนดค่าพารามิเตอร์ ความแข็งแรงของรอยผนึก

Research Title : Parameter Setting for Seal Process of the Rice Packaging
Name of Researcher : Mr. Chawalit Manisri
Name of Institution : Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University
Year of Publication : B. E. 2556

ABSTRACT

Rice is the main agricultural product of Thailand that has been produced for distributing in various formats. A 5-kilogram bag of rice is hugely popular in the consumer market, which is worth up to 20,000 million baht. Many manufacturers increased production to meet customer needs. However, the quality of the packaging is a major obstacle to productivity. It is found that defects of two types of rice bags, a thick bag with $110 \pm 12 \mu\text{m}$ and a slim bag with $90 \pm 20 \mu\text{m}$ are a torn seal, non bonding seal, and folded seal. This totally causes 80.26 percent of waste. The problem is, therefore solved by studying the production line and then writing in a cause and effect diagram to find out causes. F88/F88M -06 standard test method for seal strength of flexible barrier materials or ASTM is also used instead of the testing by human that cannot provide accurate value or standard value. In addition to factor screening by brainstorming, it shows that factors affecting the seal strength are the thickness of bags, heating time, and pressing time with blowing cold air. The experimental design is a 3^3 full factorial design and repeated three times for each level. The findings reveal interaction of thickness with heating time, thickness with pressing time and blowing cold air, heating time with pressing time and blowing cold air, and all three main factors significantly affect to the seal strength at the level of 0.05 ($\alpha = 0.05$). The appropriate parameters are set to test to confirm that there is no waste. The average seal strength at four testing points is 9.53, 9.11, 4.22, and 3.62 kgf/25.4 mm. width.

Keywords : Design of Experiment, Parameter Setting, Seal Strength

สารบัญ

บทที่

หน้า

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3	คำถามการวิจัย	4
1.4	สมมุติฐานการวิจัย	4
1.5	ขอบเขตการวิจัย	4
1.6	นิยามศัพท์	4
2	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1	เทคโนโลยีพลาสติก	5
2.2	แผนภูมิฟอเรโต	11
2.3	แผนภาพแสดงเหตุและผล	13
2.4	การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง	15
2.5	ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.6	สรุป	41
3	ระเบียบวิธีวิจัย	42
3.1	กระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุง	42
3.2	กระบวนการควบคุมคุณภาพ	54
3.3	การวิเคราะห์ปัญหา	57
3.4	การทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)	63
3.5	แนวทางในการออกแบบการทดลอง	65
3.6	แนวทางการวิเคราะห์ผลการทดลองและกำหนดค่าพารามิเตอร์	68
3.7	การดำเนินการใช้ค่าพารามิเตอร์	69

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	70
4.1	การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลอง สำหรับทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป	70
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวน	72
4.3	ผลดำเนินการใช้งานค่าพารามิเตอร์	79
5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	81
5.1	สรุปผลการวิจัย	81
5.2	อภิปรายผล	82
5.3	ข้อเสนอแนะ	82
	บรรณานุกรม	83
	ภาคผนวก	86
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยฉนวน (ปัจจุบัน)	87
	ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยฉนวนกึ่งหนา (ทดลอง)	90
	ภาคผนวก ค ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยฉนวนกึ่งบาง (ทดลอง)	95
	ภาคผนวก ง ผลการตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลอง สำหรับทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป	100
	ประวัติย่อผู้วิจัย	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	สัดส่วนข้าวสารบรรจุพิจารณาตามขนาดถุง
2	สัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม
3	รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
4	ค่าตัวแปรในการตั้งเครื่อง
5	สัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม (เครื่องจักรใหม่)
6	ค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)
7	ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยผนึกปากถุง (ถุงชนิดหนา)
8	ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยผนึกปากถุง (ถุงชนิดบาง)
9	ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยผนึกก้นถุง (ถุงชนิดหนา)
10	ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยผนึกก้นถุง (ถุงชนิดบาง)
11	การออกแบบการทดลองแบบ 3^3 Full Factorial Design
12	ผลการทดสอบสมมุติฐานของค่าความผิดพลาด
13	ค่าพารามิเตอร์สำหรับทดลองใช้งานและผลการทดลอง
14	ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้งาน
15	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)
16	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงหนา (ทดลอง) – ปากถุง
17	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงหนา (ทดลอง) – ก้นถุง
18	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงบาง (ทดลอง) – ปากถุง
19	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงบาง (ทดลอง) – ก้นถุง

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	ตัดส่วนข้าวสารบรรจุพิจารณาตามขนาดถุง	2
2	ตัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม	3
3	กระบวนการผลิตถุงพลาสติก	8
4	เทคนิคการยึดวัสดุในการทดสอบ Seal Strength (ASTM F88/F88M -06)	10
5	แผนภูมิพาเรโต	12
6	หลักการ “80-20”	12
7	แผนภาพแสดงเหตุและผล	14
8	แบบจำลองของระบบทั่วไป	16
9	จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้	18
10	ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	19
11	(a)-(c) กราฟค่าเฉลี่ยของ ร้อยละการคาร์บอน ความดัน และความเร็วเชิงเส้น, (d) กราฟผลกระทบร่วมระหว่างร้อยละการคาร์บอนกับความดัน	22
12	(a) การทดลองแฟกทอเรียลที่ไม่มีผลกระทบร่วม และ (b) การทดลองแฟกทอเรียลที่มีผลกระทบร่วม	24
13	Response และ Contour Plot กรณีที่ผลกระทบร่วมไม่ส่งผลหรือมีค่าน้อย	25
14	Response และ Contour Plot กรณีที่ผลกระทบร่วม	26
15	แบบจำลองของ 2^k Factorial Design	27
16	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^2 Factorial Design	30
17	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^k Factorial Design	31
18	โครงสร้างทางเรขาคณิต 3^3 Factorial Design	32
19	ภาพของพื้นที่ผิวผลตอบสนอง 3 มิติ	34
20	ภาพเส้นโครงร่างของพื้นที่ผิวผลตอบสนอง	34
21	ลำดับขั้นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวผลตอบสนอง	36
22	แผนผังกระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุง	43
23	ถังไซโลเก็บข้าวสาร	44
24	เครื่องทำความสะอาดข้าวสาร	44
25	เครื่องขัดมันข้าวสาร	45

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
26 เครื่องแยกสีของข้าวสาร	45
27 ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์หรือการบรรจุ	46
28 กระบวนการบรรจุข้าวสารบรรจุถุง	47
29 การตั้งถุงบรรจุผ่านตำแหน่งในเครื่องบรรจุ (เดิม)	48
30 การตัดถุง พิมพ์วันที่ผลิตและปิดผนึกปากถุง (หลังเครื่อง) (เดิม)	48
31 การจับปากถุงและบรรจุข้างลงถุง (เดิม)	48
32 การปิดผนึกก้นถุง (หน้าเครื่อง) (เดิม)	49
33 การลำเลียงไปยังพาเลท (เดิม)	49
34 การปรับตั้งค่าสำหรับปิดผนึกถุง (เดิม)	49
35 การปรับตั้งค่าน้ำหนักข้าว (เดิม)	50
36 ถุงบรรจุข้าวสารที่รอการใช้งาน	51
37 การติดตั้งถุงบรรจุข้าวสาร (เครื่องจักรใหม่)	52
38 การตัดถุงแยกออกจากกัน.....	52
39 การปิดผนึกปากถุง (ปิดผนึกหลังเครื่อง)	53
40 การลำเลียงถุงข้าวสาร	54
41 การตรวจสอบลักษณะภายนอกของถุงบรรจุ	55
42 การตรวจสอบความหนาของถุงบรรจุ	55
43 การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)	56
44 แผนภูมิพาเรโตของเสียของข้าวบรรจุถุง	58
45 ตัวอย่างรอยปิดผนึกขาด	58
46 ตัวอย่างรอยปิดผนึกไม่ติด	59
47 ตัวอย่างรอยปิดผนึกพับ	59
48 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกขาด)	60
49 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกไม่ติด)	61
50 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกพับ)	62
51 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของรอยผนึก ของถุงชนิดบางและหนา (ปากถุง)	64

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

52	ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของรอยผืนึก ของถุงชนิดบางและหนา (ก้นถุง)	65
53	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของรอยผืนึก	66
54	การป้อนข้อมูลในฟังก์ชัน Balance Analysis of Variance ของถุงหนา (ปากถุง)	73
55	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงหนา (ปากถุง)	73
56	กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยผืนึกของถุงหนา (ปากถุง)	74
57	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงหนา (ก้นถุง)	75
58	กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยผืนึกของถุงหนา (ปากถุง)	75
59	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงบาง (ปากถุง)	76
60	กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยผืนึกของถุงบาง (ปากถุง)	77
61	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงบาง (ก้นถุง)	78
62	กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยผืนึกของถุงบาง (ก้นถุง)	78
63	ผลการทดสอบ Multiple Comparison Method ของเวลาความร้อน ด้วยวิธี Dunnett	79
64	กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงหนา (ปากถุง)	101
65	กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงหนา (ก้นถุง)	101
66	กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงบาง (ปากถุง)	102
67	กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงบาง (ก้นถุง)	102
68	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ปากถุง) ..	103
69	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ก้นถุง)	103
70	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ปากถุง) ...	104
71	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ก้นถุง)	104
72	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ปากถุง) ..	105
73	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ก้นถุง)	105
74	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ปากถุง) ...	106
75	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ก้นถุง)	106
76	กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของถุงหนา (ปากถุง)	107

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
77 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	107
78 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของอุณหภูมิ (ปากถัง)	108
79 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	108
80 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาทดสอบและเป่าลมเย็น ของอุณหภูมิ (ปากถัง)	109
81 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของอุณหภูมิ (ปากถัง)	109
82 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของอุณหภูมิ (ปากถัง)	110
83 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาทดสอบและเป่าลมเย็น ของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	110
84 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	111
85 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	111
86 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาทดสอบและเป่าลมเย็น ของอุณหภูมิ (ปากถัง)	112
87 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของอุณหภูมิ (ปากถัง)	112
88 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของอุณหภูมิ (ปากถัง)	113
89 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาทดสอบและเป่าลมเย็น ของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	113
90 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	114
91 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของอุณหภูมิ (ก้นถัง)	114

บทที่ 1

บทนำ

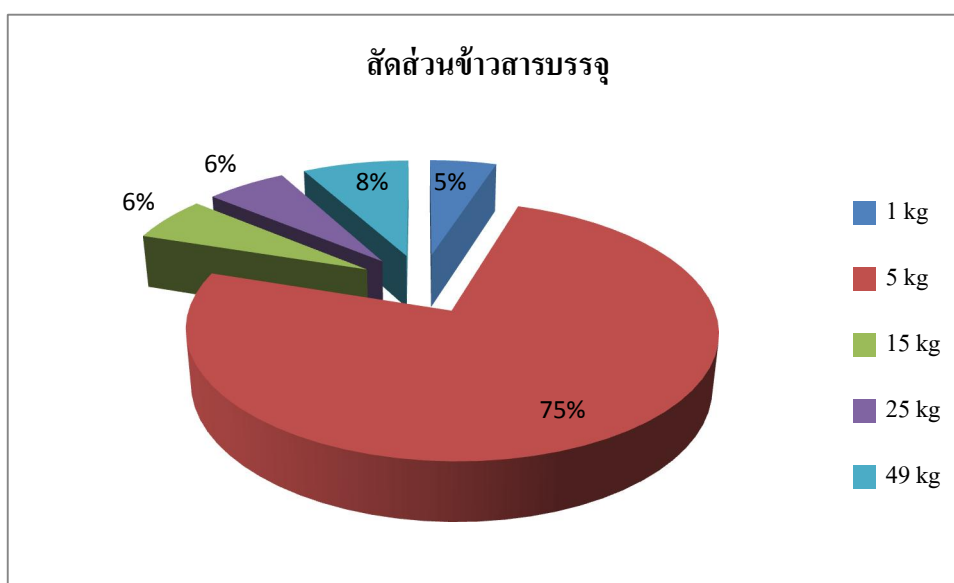
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตข้าวสำคัญของโลก จากข้อมูลของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture: USDA) ระบุว่า ไทยเป็นแหล่งผลิตข้าว อันดับ 6 ของโลก แต่เนื่องจากปริมาณการผลิตสูงกว่าความต้องการภายในประเทศ ไทยจึงเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก (ข้อมูล ณ ปี พ.ศ. 2554) สำหรับการบริโภคข้าวในประเทศนั้น ข้อมูลของบริษัท ปทุมไรซ์มิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) ระบุว่า ข้าวเป็นอาหารหลักที่คนไทยมากกว่าร้อยละ 80 นิยมบริโภค โดยมีคนไทยมีอัตราการบริโภคข้าวถึง 144 กิโลกรัมต่อคนต่อปี หลายปีที่ผ่านมาพฤติกรรมในการบริโภคข้าวของคนไทยมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพเศรษฐกิจและสังคม จากเดิมการหาซื้อข้าวสารที่อาจมีทั้งการซื้อแบบแบ่งขายจากกระสอบหรือจากถัง พัฒนามาเป็นการซื้อข้าวสารบรรจุถุงเพิ่มมากขึ้น โดยตลาดข้าวถุงในประเทศของมูลค่าสูงถึง 20,000 ล้านบาท จากมูลค่าตลาดข้าวถุงทั้งหมด 150,000 ล้านบาท ซึ่งพบว่ามีผู้บริโภคมากกว่าร้อยละ 70 นิยมซื้อข้าวสารบรรจุถุง เนื่องจากผู้บริโภคคำนึงถึงความสะดวก สะอาด คุณภาพที่ดี ความหลากหลายของชนิดข้าวและหาซื้อได้ง่าย จากความนิยมดังกล่าวจึงมีธุรกิจผลิตข้าวสารบรรจุถุงขึ้น โดยเฉพาะขนาด 5 กิโลกรัม เช่น ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม ข้าวขาวตาแห้ง และข้าวสาวไห เป็นต้น

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวสารบรรจุถุงมีมากกว่า 30 ปี กระบวนการผลิตเป็นระบบปิดเพื่อรักษาความสะอาดและคุณภาพของข้าวตั้งแต่เริ่มส่งข้าวบนสายพานไปจนถึงการบรรจุถุง เป็นการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ผลิตภัณฑ์อาจมีทั้งการจ้างผลิตข้าวสารบรรจุถุงแล้วติดราของลูกค้า และผลิตโดยเป็นผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตเอง ซึ่งวัตถุดิบสำคัญนอกเหนือจากข้าวคือถุงพลาสติก โดยแหล่งที่มา 2 ลักษณะคือลูกค้าจัดหาให้และผู้ผลิตจัดหาเอง จากลักษณะของถุงบรรจุที่มีมาจากหลายแหล่งและหลายรูปแบบ เช่น ความหนาของถุง และขนาดถุง ทำให้มีข้อเสียเกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุ ผู้วิจัยได้ใช้โรงงานตัวอย่างเป็นต้นแบบในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเป็นโรงงานที่เน้นการผลิตเพื่อตลาดในประเทศ โดยมีการผลิตเฉลี่ยปีละ 30,000 ตัน เป็นข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม จำนวน 22,500 ตัน หรือ 4,500,000 ถุง คิดเป็นร้อยละ 75 ของปริมาณข้าวที่ใช้ในการผลิตข้าวถุงดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพประกอบ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนข้าวสารบรรจุพิจารณาตามขนาดถุง

ขนาดน้ำหนักบรรจุถุง	สัดส่วนข้าวสารบรรจุ (%)
1 kg	5
5 kg	75
15 kg	6
25 kg	6
49 kg	8

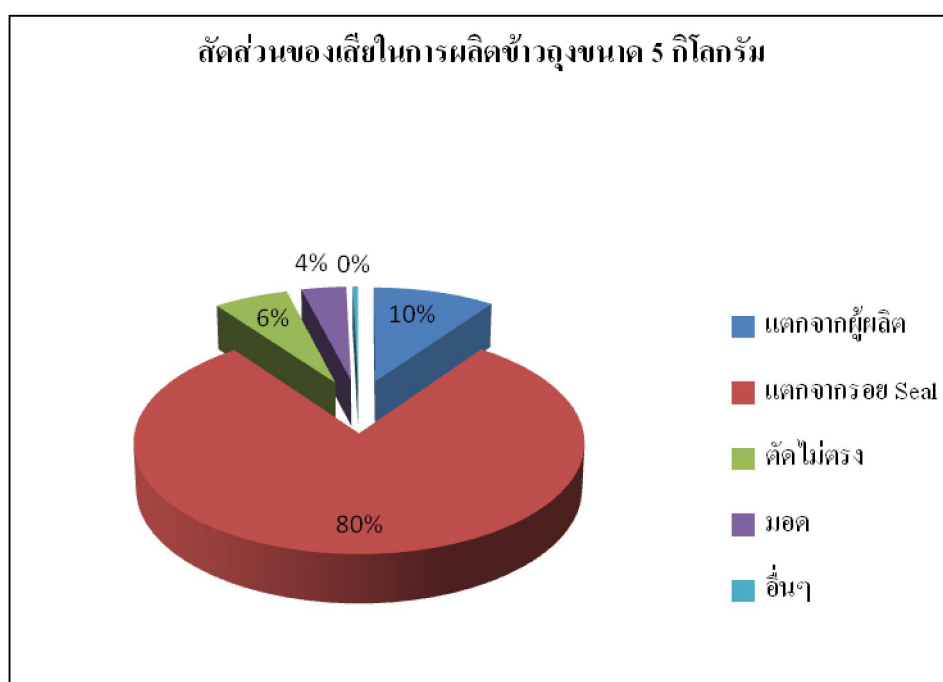


ภาพประกอบ 1 สัดส่วนข้าวสารบรรจุพิจารณาตามขนาดถุง

ข้อมูลของโรงงานตัวอย่างในปี 2554 (ข้อมูลจากเดือนมกราคม – ตุลาคม หลังจากนั้นโรงงานประสบปัญหาอุทกภัย) ในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม ด้วยถุงบรรจุที่มีความแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ชนิดหนา และชนิดบางตามข้อกำหนดของลูกค้า จำนวนทั้งหมด 3,375,000 ถุง มีของเสียเกิดขึ้น 12,971 ถุง ตารางที่ 2 และภาพประกอบ 2 คิดเป็นร้อยละ 0.38 ความสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากรอยฉีกที่ไม่สมบูรณ์ที่มีจำนวนถึง 10,381 ถุง หรือคิดเป็นร้อยละ 80 จากของเสียทั้งหมด มีผลต่อคุณภาพข้าวสารที่อาจต้องทิ้งไป ถุงบรรจุ พลังงานและต้นทุนการผลิตซึ่งเกิดจากการทวนซ้ำกระบวนการผลิตอีกครั้ง เป็นต้น เมื่อคำนวณเป็นมูลค่าความสูญเสีย โดยให้ราคาขายเฉลี่ยคือ 150 บาทต่อถุง แล้ว โรงงานตัวอย่างสูญเสียรายได้อย่างน้อยปีละ 1,500,000 บาท

ตารางที่ 2 สัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม

ชนิดของเสีย	จำนวนของเสีย (ถุง)
แตกจากผู้ผลิต	1,280
แตกจากรอย Seal	10,381
ตัดไม่ตรง	784
มอด	470
อื่นๆ	56



ภาพประกอบ 2 สัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม

ดังนั้นในการวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสาร ซึ่งจะทำให้สามารถลดปริมาณของเสีย และช่วยประหยัดทรัพยากรทั้งพลังงาน ถุงบรรจุ และข้าวสารได้ โดยการนำหลักการการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้มั่นใจว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความเหมาะสมที่สุดในแต่ละลักษณะการบรรจุถุงข้าวสาร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการปิดผนึกถุงข้าวสาร
- 1.2.2 เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการปิดผนึกถุงข้าวสาร

1.3 คำถามการวิจัย

- 1.3.1 ปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าแรงดึงของรอยปิดผนึกในกระบวนการปิดผนึกถุงข้าวสาร
- 1.3.2 ค่าพารามิเตอร์ใดที่เหมาะสมกับการบรรจุถุงชนิดบาง $90 \pm 20 \mu\text{m}$ และชนิดหนา $110 \pm 12 \mu\text{m}$

1.4 สมมุติฐานการวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของรอยปิดผนึก คือ ความหนาของถุงพลาสติก ความเร็วในการเคลื่อนถุง เวลาในการกดผนึก น้ำหนักบรรจุ เวลาเข้าถุง เวลาปล่อยข้าว อุณหภูมิ แรงดันลม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ความหนาของถุงพลาสติก ได้แก่ ชนิดบาง $90 \pm 20 \mu\text{m}$ และชนิดหนา $110 \pm 12 \mu\text{m}$
- 1.5.2 น้ำหนักบรรจุ 5 กิโลกรัมเท่านั้น

1.6 นิยามศัพท์

1.6.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) คือ การทดลองเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวนำเข้าไปในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหรือระบบนั้น

1.6.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter Setting) คือ ขั้นตอนหรือวิธีการที่ใช้ในการทำการกำหนดค่าเงื่อนไขในระบบหรือการออกแบบเป็นอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 นี้ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงความรู้ด้านเทคโนโลยีพลาสติก ตั้งแต่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกสำหรับบรรจุขวดสาร การผลิตพลาสติก การปิดผนึกพลาสติก การใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ความสำคัญของปัญหาและระบุปัจจัยเบื้องต้น ซึ่งได้แก่ แผนภูมิพาเรโต และแผนภาพแสดงเหตุและผล ซึ่งนำไปสู่การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์โดยสัมพันธ์กับการทดสอบค่าความแรงดึงของรอยผนึกสำหรับปิดผนึกถึงขวดสารต่อไป

2.1 เทคโนโลยีพลาสติก

โดยทั่วไปแล้วทฤษฎีด้านเทคโนโลยีพลาสติกส่วนใหญ่อธิบายถึงลักษณะเฉพาะของโพลิเมอร์ (Characteristics of Polymers) กระบวนการผลิต (Fabrication Processes) คุณสมบัติของพลาสติกและการทดสอบ (Plastics Properties and Testing) โพลิเมอร์อุตสาหกรรม (Industrial Polymers) โพลิเมอร์สำหรับการใช้งานพิเศษ (Polymers in Special Uses) การนำโพลิเมอร์กลับมาใช้ (Recycling of Polymers) และแนวโน้มในการใช้งานโพลิเมอร์ (Trends in Polymer Applications) เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องเท่านั้น โดยประกอบด้วย 4 ส่วนดังต่อไปนี้

2.1.1 วัตถุดิบในการผลิตพลาสติก

วัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกคือ เม็ดพลาสติก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปลายจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

เม็ดพลาสติกที่ใช้มากในประเทศไทยมีอยู่ 4 ประเภท คือ โพลีเอทิลีน (Polyethylene - PE) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene - PP) โพลีสไตรีน (Polystyrene - PS) และโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride - PVC) โดยเม็ดพลาสติกแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติการใช้และการบริโภค ซึ่งเม็ดพลาสติกที่ใช้ผลิตพลาสติกในงานวิจัยนี้คือ โพลีเอทิลีน

โพลีเอทิลีน (Polyethylene – PE) เป็นเม็ดพลาสติกที่มีคุณสมบัติแข็งแรง เหนียว ทนทาน ป้องกันความชื้นมิให้ผ่านเข้าออกได้ แต่ให้ก๊าซต่างๆ ซึมผ่านได้ ทนกรดและด่างอ่อน ไม่ทนน้ำมัน และไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันก๊าดและน้ำมันเบนซิน มีน้ำหนักเบา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.93 ใน

รูปแผ่นบาง สามารถพับงอได้ดี มีความยืดหยุ่นได้สูง ฉีกขาดยาก เป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก ไม่สามารถทนความร้อนสูง แต่ทนความเย็นได้ถึง -100 องศาฟาเรนไฮต์ เม็ดพลาสติก PE แบ่งได้ตามเกรดเป็น 3 ชนิดคือ

1. โพลีเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene - LDPE) ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และหีบห่อ เช่น กระจอบ ถุงเย็น ซองใส่ของ ตลอดจนเป็นวัตถุดิบผลิตของเล่นเด็ก พลาสติกและฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำวัสดุเคลือบผิว (Coating or Lamination) และใช้กับงานขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการเป่า (Blow Molding) เช่น ขวดพลาสติก คุณสมบัติเด่นของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดนี้คือ มีความเหนียว และคงทน

2. โพลีเอธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-density Polyethylene - HDPE) ใช้กับงานเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) โดยใช้ทำเป็นขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ ที่ต้องทนต่อแรงดันและต้องมีแรงต้านทานสูง นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านการฉีดขึ้นรูป (Injection) เช่น ผลิตของเล่นเด็ก และเครื่องใช้ต่างๆ ภายในบ้าน ตลอดจนใช้ทำแผ่นฟิล์ม เชือก ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อ และรางน้ำ ทั้งนี้ ท่อที่ทำจาก HDPE สามารถใช้แทนท่อที่ทำจากพีวีซี เนื่องจากมีความทนทานใกล้เคียงกัน แต่มีราคาถูกกว่า

3. โพลีเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-density Polyethylene - LLDPE) เป็นวัสดุใช้ผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับตัวผลิตภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทถุงและกระจอบพลาสติกในประเทศไทยใช้วัตถุดิบคือเม็ดพลาสติก LDPE และ PP โดยเม็ดพลาสติก PP นิยมทำเป็นกระจอบและถุงร้อนเนื่องจากมีความเหนียวและทนความร้อนได้ดี ส่วนเม็ดพลาสติก LDPE ใช้ผลิตเป็นถุงเย็นและกระจอบพลาสติก นอกจากนี้ ยังใช้พลาสติกเก่าของถุงร้อนและถุงเย็นที่ใช้แล้วมาหลอมละลายใหม่ ส่วนมากใช้ผลิตแผ่นพลาสติกแทนใบตองเพื่อรองอาหารทั่วไปที่ไม่มีความร้อน

2.1.2 การผลิตถุงพลาสติก

อุตสาหกรรมถุงพลาสติกมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน โดยใช้เครื่องจักรในเกือบทุกขั้นตอนการผลิต กระบวนการผลิตของถุงพลาสติกชนิดต่าง ๆ มีขั้นตอนที่เหมือนกัน ต่างกันเพียงวัตถุดิบเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการผลิตเท่านั้น

1. การเตรียมวัตถุดิบ เริ่มจากการนำเอาวัตถุดิบ ได้แก่ เม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ ตามความเหมาะสมของชนิดและปริมาณของถุงพลาสติกที่ต้องการมาผสมกับสีในอัตราส่วนที่เหมาะสม ถ้าต้องการถุงพลาสติกที่ไม่มีสี ก็ไม่ต้องผสมสี จากนั้นนำวัตถุดิบไปเทเข้าเครื่องเป่าถุง

2. **การเป่าถุง** เครื่องเป่าถุงจะทำการหล่อเม็ดพลาสติกโดยใช้ความร้อนในแม่แบบรีด โดยที่เกลียวรีดจะรีดหมุนอัดเม็ดพลาสติกผ่านเข้าไปในส่วนให้ความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิ 300-500 องศาฟาเรนไฮต์ เม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกอัดผ่านแม่แบบด้วยแรงอัด 500-600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นจะเป่าอากาศเข้าไปในช่องอากาศให้พลาสติกพองตัวตามขนาดที่ต้องการ ชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นหลอดพลาสติกขนาดใหญ่ ซึ่งจะถูกส่งผ่านลูกกลิ้งที่มีความเรียบสนิทอีกครั้งเพื่อรีดพลาสติกให้อยู่ในลักษณะแบน ตลอดจนป้องกันอากาศภายในไม่ให้ออกจากช่องพลาสติกได้ เพื่อให้อากาศที่อยู่ภายในมีปริมาณคงที่และจะได้ถุงพลาสติกขนาดเท่าเดิม ท้ายสุด ชิ้นงานที่ออกมาจะมีลักษณะแบนและม้วนไว้เพื่อรอการพิมพ์หรือตัดเย็บต่อไป

3. **การพับด้านข้างสำหรับถุงหิ้ว** สำหรับถุงหิ้วชนิดพับด้านข้าง หลังจากที่ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นหลอดพลาสติก ส่งผ่านลูกกลิ้งในครั้งแรกแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการพับด้านข้างโดยมีไม้ยันด้านข้างทั้งสองด้านไว้แล้วส่งชิ้นงานพลาสติกผ่านลูกกลิ้งอีกครั้งหนึ่งเพื่อเก็บไว้เป็นม้วนรอการพิมพ์หรือตัดเย็บต่อไป

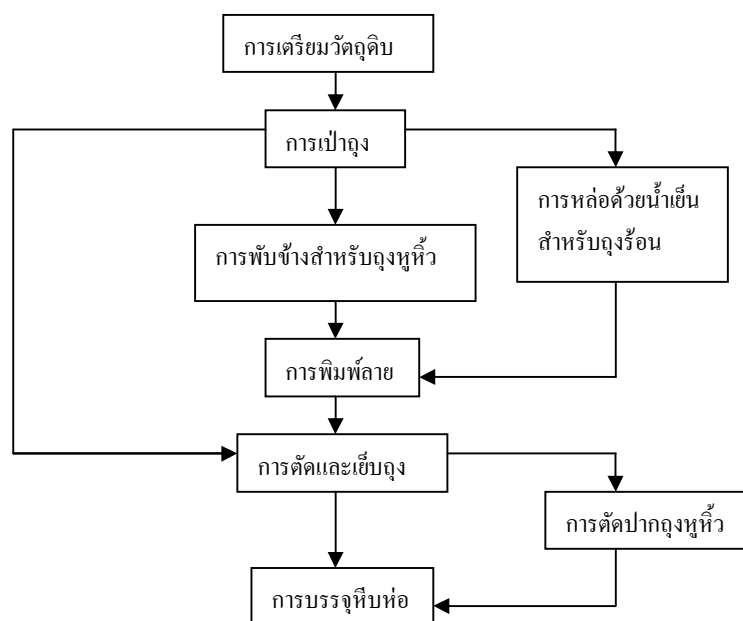
4. **การหล่อน้ำเย็นสำหรับถุงร้อน** ขั้นตอนนี้เป็นการผลิตถุงร้อนที่ใช้เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีนเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีจุดหลอมละลายสูงกว่าเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการผลิตถุงพลาสติกชนิดอื่น ชิ้นงานพลาสติกที่ได้จึงต้องผ่านการหล่อเย็นด้วยน้ำอีกครั้งหนึ่ง

5. **การพิมพ์ลายถุง** หลังจากที่ได้เครื่องเป่าทำการเป่าถุงพลาสติกออกมาเป็นม้วนแล้ว หากต้องการพิมพ์ลายถุงหรือยี่ห้อ ก็จะต้องทำการพิมพ์ถุงก่อนที่จะเข้าเครื่องตัดและเย็บถุง ม้วนพลาสติกจะถูกส่งผ่านแบบแม่พิมพ์ที่แกะเป็นลวดลายหรือยี่ห้อไว้ หากลวดลายหรือยี่ห้อนั้นมีหลายสี ก็จะต้องทำการพิมพ์ม้วนพลาสติกตามจำนวนสีที่ต้องการพิมพ์เป็นลำดับไป

6. **การตัดและเย็บถุง** ขั้นตอนนี้ทำโดยเครื่องตัดและเย็บถุง ซึ่งทำการตัดและเย็บถุงเสร็จภายในกระบวนการเดียวกัน ม้วนพลาสติกจะถูกส่งผ่านเข้าเครื่องเย็บด้วยความร้อนรีด จากนั้นจะผ่านไปเข้าขั้นตอนการตัดเพื่อให้ได้ขนาดและความยาวตามที่ต้องการ

7. **การตัดปากถุง** ถุงพลาสติกชนิดหูหิ้วที่ผ่านการเย็บเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาเข้าเครื่องตัดปากถุงเพื่อทำหูหิ้ว

8. **การบรรจุหีบห่อ** เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตเพื่อรอการขนส่งและจำหน่าย



ภาพประกอบ 3 กระบวนการผลิตถุงพลาสติก

การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกสำเร็จรูปในปัจจุบันใช้ระบบอัตโนมัติเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเครื่องจักรทำงานได้อัดทนและมีความแน่นอนแม่นยำสูง ประกอบกับอัตราค่าจ้างแรงงานในประเทศไทยที่สูงขึ้นมาก ทำให้เครื่องจักรอัตโนมัติถูกนำมาใช้มากขึ้น

เครื่องฉีด ปัจจุบันเป็นระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดค่าต่างๆ ในการฉีด เช่น อุณหภูมิ ความเร็วฉีด การอัดรีด ทำให้สามารถฉีดชิ้นงานที่ยากได้โดยมีการสูญเสียน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเครื่องฉีดใหม่ๆ ขึ้นอยู่ตลอดเวลาให้เหมาะสมกับลักษณะงานและผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายมากขึ้น

เครื่องเป่าฟิล์ม ส่วนใหญ่ยังคงใช้หลักการทำงานแบบเดิมทั้งการผลิตฟิล์มชั้นเดียวหรือหลายชั้น แต่เครื่องเป่าฟิล์มที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยยังจะต้องพัฒนาการควบคุมความหนาให้คงที่และแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ก็ยังมีพัฒนาระบบต่างๆ เพื่อสนับสนุนหรือชดเชย เช่น ระบบม้วนดึงและม้วนฟิล์ม (Rotating Hual-off / Winder Combination) ระบบเครื่องอัดฉีดและหัวคายหมุน (Rotating Extruder and Die) ระบบหมุนเฉพาะหัวคาย (Rotating or Revolving Hand-off Element)

เครื่องเป่า (Blow Moulding Machine) ส่วนใหญ่ยังเป็นเครื่องเป่าแบบ Extrusion Blow Moulding โดยใช้กระบวนการแบบเดิมคือ ระบบฉีด-ยืด-เป่า (Injection-Stretch-Blow Moulding:

ISBM) อาจเป็นระบบเบ็ดเสร็จในเครื่องเดียว เหมาะสำหรับการผลิตที่มีปริมาณการผลิตต่ำ แต่ในการผลิตปริมาณมากๆ มักใช้ระบบฉีด Preform ก่อนจะผ่านความร้อน ยืด แล้วเป่าอีกครั้งหนึ่ง

ระบบอัดฉีด (Extrusion Systems) เป็นระบบการขนส่งเม็ดพลาสติกและป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่กระบวนการขึ้นตอนอื่นๆ เพื่อขึ้นรูป

2.1.3 เครื่องปิดผนึกถุงพลาสติก (Seal Machine)

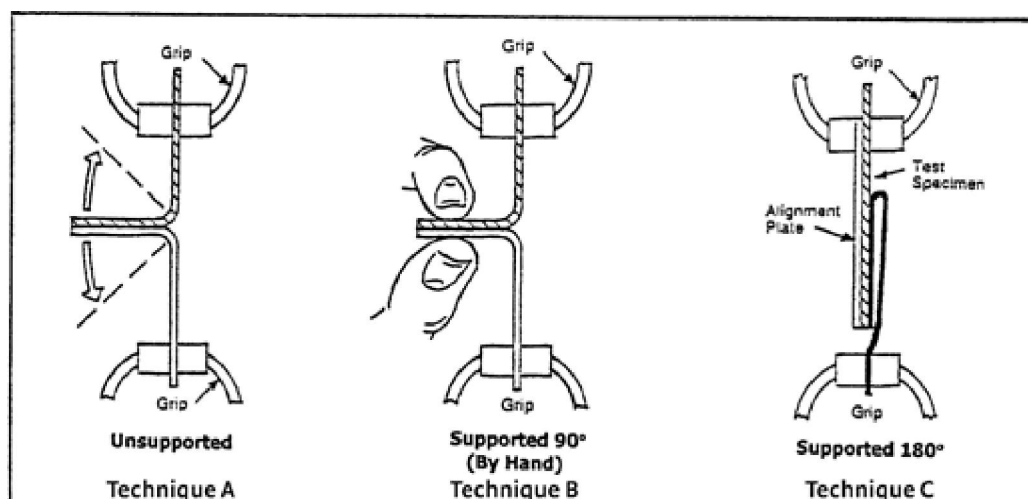
เครื่องปิดผนึกถุง หรือเครื่องซีลถุงในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิด เช่น

- เครื่องปิดผนึกถุงแบบม็อกกด เป็นเครื่องปิดผนึกถุงขนาดเล็กใช้ในการปิดผนึกถุงพลาสติกได้หลายชนิดเช่น PP PE เป็นต้น ข้อดีของเครื่องปิดผนึกถุงแบบม็อกกด คือ เป็นเครื่องปิดผนึกถุงที่มีราคาถูก สามารถปิดผนึกถุงพลาสติกหลายประเภท ส่วนข้อเสียของเครื่องปิดผนึกถุงแบบม็อกกด ก็คือ ต้องใช้คนกดเพื่อปิดผนึก รอยปิดผนึกมีความแน่นไม่เท่ากับเครื่องปิดผนึกถุงสายพาน
- เครื่องปิดผนึกถุงแบบใช้เท้าเหยียบ เป็นเครื่องปิดผนึกถุงที่ใช้แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมในครัวเรือน อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น สามารถใช้ในการปิดผนึกถุงพลาสติกได้หลายชนิด เช่น PP PE เป็นต้น ข้อดีของเครื่องปิดผนึกถุงแบบใช้เท้าเหยียบ คือ เป็นสามารถปิดผนึกได้รวดเร็วกว่าเครื่องปิดผนึกถุงแบบม็อกกดสามารถตั้งอุณหภูมิหรือตั้งเวลาในการปิดผนึกได้ ส่วนข้อเสียของเครื่องปิดผนึกถุงแบบใช้เท้าเหยียบก็คือ ต้องใช้คนในกระบวนการไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติ
- เครื่องปิดผนึกถุงแบบสายพาน เป็นเครื่องปิดผนึกถุงที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเพราะเป็นการปิดผนึกถุงโดยเครื่องจักรสามารถใช้ในการปิดผนึกถุงพลาสติกได้หลายชนิด เช่น PP PE เป็นต้น ข้อดีของเครื่องปิดผนึกถุงแบบสายพาน คือ เป็นสามารถปิดผนึกได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพแม่นยำเพราะมีให้เลือกใช้หลากหลายโดยจะเลือกใช้ เป็นระบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติก็ได้ สามารถตั้งอุณหภูมิหรือตั้งเวลาในการปิดผนึกได้ ส่วนข้อเสียของเครื่องปิดผนึกถุงแบบสายพาน ก็คือ มีราคาค่อนข้างสูงกว่าเครื่องปิดผนึกประเภทอื่นๆ

2.1.4 การหาค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (Seal Strength)

การหาค่าความแข็งแรงของรอยผนึกตามที่กล่าวไว้ใน มาตรฐาน ASTM F88/F88M -06 มาตรฐานวิธีการทดสอบสำหรับค่าความแข็งแรงของวัสดุปิดกั้นที่ยืดหยุ่น (Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Material) นั้นระบุว่า ความแข็งแรงของรอยผนึกเป็นการวัดเชิงปริมาณส่วนใหญ่ใช้หน่วย SI ซึ่งมีหน่วยเป็น “N/25.4 mm.” เพื่อใช้ในการตรวจสอบยืนยันความถูกต้องของกระบวนการ การควบคุมกระบวนการและความสามารถของกระบวนการ ความแข็งแรงของรอยผนึกไม่เพียงเกี่ยวข้องกับแรงในการเปิดและความสมบูรณ์ของบรรจุภัณฑ์ แต่ยังวัดถึงความสามารถของกระบวนการในการบรรจุภัณฑ์ที่ทำให้รอยผนึกมีความเหนียวแน่นเพียงพออีกด้วย ส่วนใหญ่ความแข็งแรงของรอยผนึกที่ระดับต่ำสุดเป็นข้อกำหนดที่จำเป็นของบรรจุภัณฑ์ และบางครั้งอาจมีการจำกัดค่าความแข็งแรงของรอยผนึกให้สะดวกต่อการเปิดใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงของรอยผนึกที่ระดับสูงสุดคือข้อมูลสำคัญด้วยเช่นกัน แต่สำหรับการใช้งานบางอย่าง แรงเฉื่อยในการเปิดผนึกอาจเป็นประโยชน์ต่อไป ดังนั้น ไม่ว่าจะเป็นค่าสูงสุด ต่ำสุด หรือค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของรอยผนึกล้วนแล้วแต่มีความสำคัญทั้งสิ้นในการนำไปใช้งานต่อซึ่งควรมีแสดงในรายงานการทดสอบ

สัดส่วนของแรงที่ถูกวัดในการทดสอบวัสดุอาจจะไม่ได้เกิดจากค่าความแข็งแรงของรอยผนึกเพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดจากการคัดส่วนประกอบด้วย ดังนั้นจึงมีจำนวนของการยึดและเทคนิคในการควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับแรงดึงในมุมต่างๆ เพื่อควบคุมแรงดัดดังกล่าว เนื่องจากจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อผลการทดสอบแตกต่างกัน โดยควรใช้เทคนิคหรือรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังแสดงในภาพประกอบ 4 ซึ่งประกอบด้วยเทคนิค 3 เทคนิคดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 4 เทคนิคการยึดวัสดุในการทดสอบ Seal Strength (ASTM F88/F88M -06)

2.1.5 เทคนิค A (Technique A) เป็นแบบที่ไม่มีการช่วยสนับสนุน โดยปลายของชิ้นงานแต่ละด้านจะถูกจับไว้ตรงข้ามกัน ในขณะที่รอยผนึกจะไม่มีการช่วยสนับสนุนการจับยึดในขณะดำเนินการทดสอบ

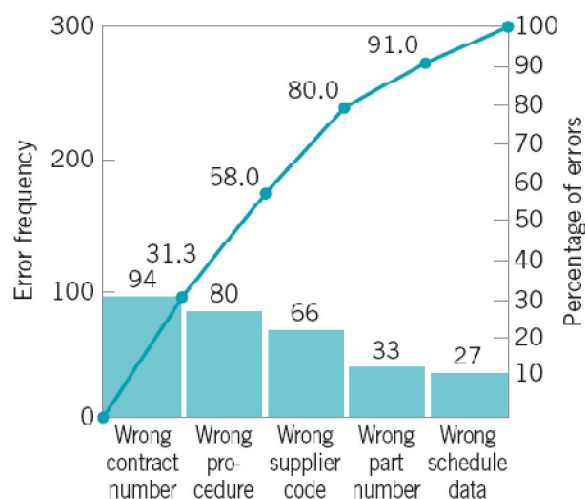
2.1.6 เทคนิค B (Technique B) เป็นแบบที่มีการช่วยสนับสนุนที่มุม 90 องศา (ด้วยมือจับ) เทคนิค B นี้ มีความคล้ายคลึงกับเทคนิค A คือ ปลายของชิ้นงานแต่ละด้านจะถูกจับไว้ตรงข้ามกัน แต่แตกต่างกันที่รอยผนึกจะมีการช่วยสนับสนุนการจับยึดด้วยมือที่มุม 90 องศาในขณะดำเนินการทดสอบ

2.1.7 เทคนิค C (Technique C) เป็นแบบที่มีการช่วยสนับสนุนที่มุม 180 องศา โดยปลายด้านหนึ่งจะได้รับการสนับสนุนด้วยแผ่นรองที่มีความคงตัวและจับไว้ด้วยกัน ขณะเดียวกันปลายอีกด้านหนึ่งจะถูกจับไว้ตรงข้ามกันด้วยมุม 180 องศา ในขณะดำเนินการทดสอบ

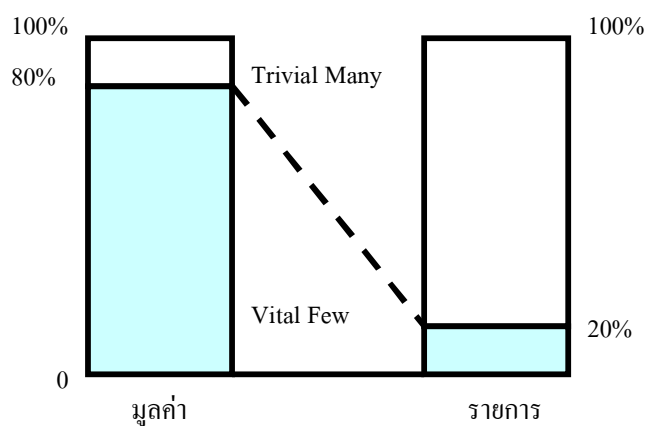
2.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart)

แผนภูมิพาเรโต ได้ เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาเหล่านั้นตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย และแสดงขนาดความถี่มากน้อยด้วยกราฟแท่งควบคู่ไปกับการแสดงค่าสะสมของความถี่ด้วยกราฟเส้น ซึ่งแกนนอนของกราฟเป็น ประเภทของปัญหา และแกนตั้งเป็นค่าร้อยละและความถี่ของปัญหาที่พบดังภาพประกอบ 5

แผนภูมิพาเรโตใช้เลือกปัญหาที่จะลงมือทำ เพราะปัญหาสำคัญในเรื่องคุณภาพมีอยู่ไม่กี่ประการ แต่สร้างข้อบกพร่องด้านคุณภาพจำนวนมาก ส่วนปัญหาปลีกย่อยมีอยู่มากมายแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพมากนัก ดังนั้นจึงควรเลือกแก้ไขปัญหาที่สำคัญซึ่งถ้าแก้ไขได้จะลดข้อบกพร่องด้านคุณภาพลงได้มาก โดย Juran พบว่า สิ่งที่มีความสำคัญจะมีค่าประมาณ 80% ของมูลค่าทั้งหมด จะมาจากรายการเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าประมาณ 20% (Vital Few) ของจำนวนรายการทั้งหมด จึงอาจเรียกหลักการพาเรโตว่า หลักการ “80-20” ดังแสดงในภาพประกอบ 6 หรืออาจยกตัวอย่างให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น เช่น การประยุกต์ใช้กับข้อมูลของเสีย ของเสียแต่ละชิ้นจะมีจุดบกพร่องที่ต่างกันออกไป และอาจมาจากสาเหตุ (Cause) จำนวนมากมายในสายการผลิตหนึ่งๆ แต่หากวิเคราะห์หลักลงไปเรากลับพบว่า จุดบกพร่องเพียงไม่กี่ชนิดทำให้เกิดความเสียหายมากมาย ขณะที่ความสูญเสียเล็กๆ น้อยๆ ที่เหลือนั้นมีสาเหตุจากจุดบกพร่องหลายชนิดมาก



ภาพประกอบ 5 แผนภูมิพารेटอ (Montgomery, 2008)



ภาพประกอบ 6 หลักการ “80-20”

อย่างไรก็ตามแผนภูมิพารेटอ ไม่ใช่แผนภูมิที่จะใช้ในการระบุความสำคัญของปัญหาได้ทันทีที่อาจจะต้องนำตัวแปรอื่นมาพิจารณาร่วมด้วย เช่น ต้นทุน หรือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัญหาแต่ละชนิดที่มีไม่เท่ากัน นอกจากนี้การนำแผนภูมิพารेटอไปใช้ควรมีสิ่งต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

1. **ไม่ใช่**แผนภูมิพารेटอในการแสดงผลข้อมูลว่าข้อมูลประเภทใดมีจำนวนมากน้อยต่างกัน แต่**ต้องใช้**แผนภูมิพารेटอในการวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมในการจำแนกประเภทของข้อมูล หรือการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูลโดยคำนึงถึงหลักการของพารेटอเสมอ

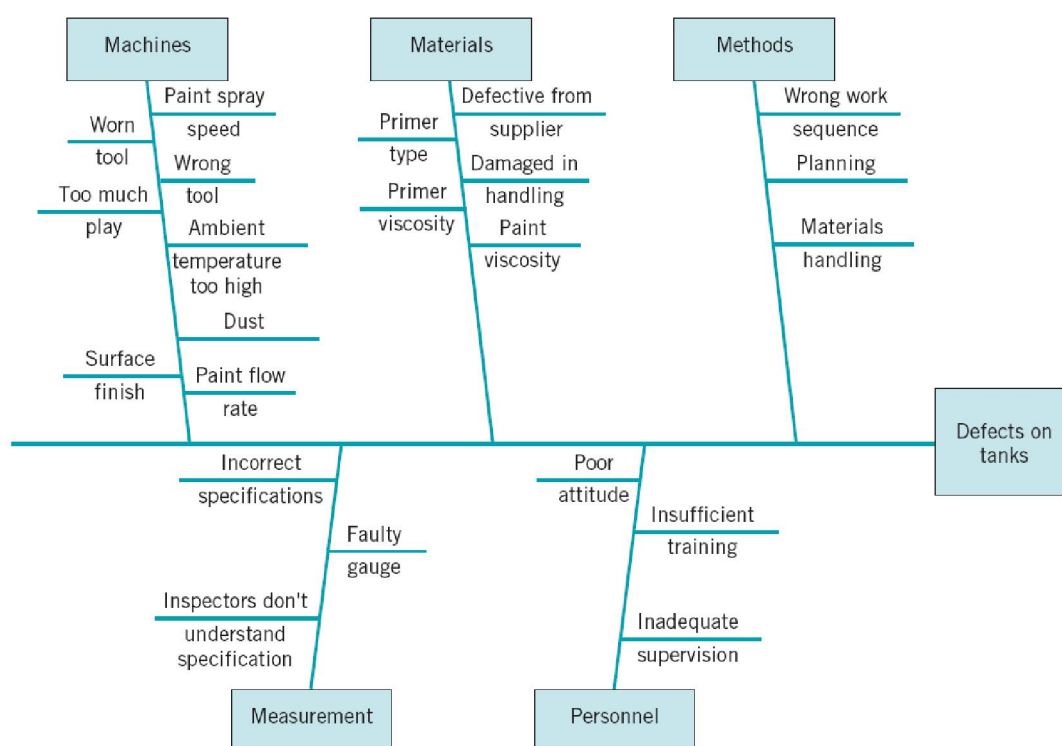
2. **ไม่ใช่**แผนภาพพาเรโตในการกำหนดความสำคัญหรือความรุนแรงของปัญหาเพราะว่าแผนภาพพาเรโตจะแสดงถึงโอกาสในการเกิดขึ้นของข้อมูลแต่ละประเภทเท่านั้น **จึงต้องใช้**แผนภาพพาเรโตในการคาดการณ์ถึงโอกาสในการเกิดขึ้นของข้อมูลแต่ละประเภท ถ้าหากจะเลือกหัวข้อปัญหาจะต้องคำนึงถึงความรุนแรงที่ปัญหามีต่อลูกค้าด้วย
3. **ไม่ใช่**เส้นโค้งสะสมของแผนภาพพาเรโตในการแสดงผลของข้อมูลโดยปราศจากการตีความหมายจากค่าสะสมดังกล่าว **แต่ต้องใช้**เส้นโค้งสะสมของแผนภาพพาเรโตในการตีความหมายว่าข้อมูลมีการแจกแจงตามหลักการพาเรโตหรือไม่
4. **ไม่ใช่**แผนภาพพาเรโตเพียงแค่แสดงว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกับหลักการของพาเรโต **แต่ต้องใช้**แผนภาพพาเรโตในการกำหนดประเด็นสำคัญของประเภทของข้อมูลที่มีความสอดคล้องกับหลักการของพาเรโตด้วย
5. **ไม่ใช่**แผนภาพพาเรโตในการวิเคราะห์ถึงควมมีเสถียรภาพของข้อมูล ถ้าหากข้อมูลนั้นมิได้รับการสะสมค่าตามเวลา **แต่ต้องใช้**แผนภาพพาเรโตในการวิเคราะห์การจำแนกประเภทของข้อมูล รวมถึงการคาดการณ์การเกิดขึ้น ถ้าข้อมูลนั้นได้รับการสะสมตามเวลา

2.3 แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause-and-Effect Diagram)

ในการแก้ไขปัญหาให้มีประสิทธิภาพ มีความจำเป็นอย่างย้งที่ต้องศึกษาให้ถึงรากเง้าของปัญหานั้น นั่นคือต้องวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่แท้จริงให้ได้ แผนภาพสาเหตุและผล หรือแผนภาพก้างปลา (Fishbone Diagram) เนื่องจากแผนภาพมีลักษณะคล้ายก้างปลา หรือบางครั้งเรียกชื่อโดยเป็นการให้เกียรติต่อผู้พัฒนาคือ Dr. Kaoru Ishikawa จึงเรียกแผนภาพนี้ว่า แผนภาพอิชิกาวา (Ishikawa Diagram)

การสร้างแผนภาพแสดงเหตุและผล เริ่มจากการเลือกปัญหาที่ได้การจากใช้แผนภูมิพาเรโตสร้างขึ้น จากนั้นนำปัญหาที่เลือกไว้มาระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาสาเหตุซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบและครบถ้วน เช่น 4M (Man / Machine / Method / Material), 4M1E (Man / Machine / Method / Material / Environment), 5M1E (Man, Machine, Method, Materials, Measurement, Environment) หรือกรณีใช้วิเคราะห์ด้านปัญหาการตลาดอาจกำหนดด้วยหลักการ 4P (Product / Price / Place / Promotion) และในกระบวนการบริการอาจมีความเหมาะสมกับองค์ประกอบของการบริการคือ 4P (Policy / Procedure / People / Place) เป็นต้น แต่ไม่ว่าจะเป็นแบบใด หลักการคือ ต้องการให้วิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบและครบถ้วนนั่นเอง สำหรับหมวดหมู่แต่ละหัวข้อจะเป็นก้างหลัก และมีก้างย่อยที่

เป็นสาเหตุในแต่ละหมวดนั้นๆ ลดหลั่นลงไป ส่วนหัวปลาจะเป็นประเด็นปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์
 ดังภาพประกอบ 7 สุดท้ายทำการประเมินความสำคัญของสาเหตุแต่ละสาเหตุเพื่อนำสาเหตุที่สำคัญ
 ที่สุดไปแก้ปัญหาต่อไป



ภาพประกอบ 7 แผนภาพแสดงเหตุและผล (Montgomery, 2008)

ข้อสังเกตเกี่ยวกับแผนภาพแสดงเหตุและผล มีดังนี้

1. ในการแยกแยะและเลือกสรร เพื่อหาปัจจัยอันเป็นสาเหตุแห่งปัญหานั้น ควรใช้การปรึกษาหารือในกลุ่มคนหลายๆ ความคิดร่วมกันเพราะการละเว้นหรือการมองข้ามปัจจัยบางอย่างไปจะก่อผลเสียภายหลังได้ (อาจทำให้การแก้ปัญหาผิดจุดก็ได้)
2. ในการเขียนข้อความที่แสดงตัวปัญหาในช่องหัวปลานั้น จะต้องเขียนอย่างระมัดระวัง และถูกหลักภาษา ชัดเจน กระชับ และจำเพาะเจาะจง พอสมควร จึงจะนำไปสู่การประมวลหาสาเหตุที่ช่วยให้เรานำไปแก้ไขได้
3. ควรแยกเขียนผังก้างปลาตามปัญหาแต่ละข้อ เพราะการรวมทุก ๆ สาเหตุไว้ในผังอันเดียวกันนั้น นอกจากจะเสียเวลาแล้วยังอาจทำให้ยากต่อการสรุปวิเคราะห์ว่า ปัจจัยที่แท้จริงของปัญหาคืออะไร ยกตัวอย่าง ความคลาดเคลื่อนในการชั่งน้ำหนักหรือในการวัดความยาวของ

ผลิตภัณฑ์อันเดียวกัน มักมีโครงสร้างของเหตุและผลแตกต่างกัน จึงควรแยกเขียนผังก้างปลาเป็นสองผัง เป็นต้น

4. ควรเลือกคุณลักษณะของปัญหาด้านคุณภาพ และปัจจัยสาเหตุในรูปของขนาดหรือปริมาณที่สามารถใส่หน่วยวัดลงไปได้ เพราะในที่สุดแล้วผลสรุปจากผังก้างปลาจะต้องนำไปแก้ไขปรับปรุงตัวแปรต่าง ๆ ในการผลิตซึ่งจะต้องมีหน่วยวัดที่ชัดเจน พอที่จะไปสั่งการให้ปรับแต่งได้ ผังก้างปลาแสดงสาเหตุแห่งความพ่ายแพ้ในเกมกีฬาในหัวข้อ การนอนหลับ ควรจะต้องระบุจำนวนชั่วโมงต่อวัน ว่าจะต้องเพิ่มมากขึ้นกี่ชั่วโมง หรือขาดหายไปกี่ชั่วโมง เป็นต้น และในหัวข้ออาหาร ต้องระบุเลยว่าบกพร่องในการได้รับแคลอรีต่อวัน ต่ำไปกี่แคลอรี

5. ควรใส่สาเหตุที่สามารถไปแตะต้องหรือแก้ไขได้ การเขียนสาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพในรูปของคำพูดกว้าง ๆ หรือข้อความที่ไม่อาจไปแตะต้องปรับปรุงแก้ไขได้ ก็จะไม่ประโยชน์ หากพบว่าสาเหตุอันนั้นเป็นสาเหตุจริง ๆ ของปัญหา ควรหาทางแยกสาเหตุใหญ่อันนั้นออกเป็นสาเหตุย่อย ๆ รูปของปัจจัยที่เราสามารถไปสัมผัสได้จะดีกว่า

6. ก่อนสรุปปัญหาควรใส่น้ำหนักหรือ คะแนนให้กับปัจจัยสาเหตุแต่ละตัวเพื่อจะได้ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา ก่อนนำไปปฏิบัติต่อไปควรอาศัยข้อมูลสถิติหรือตัวเลขในการพิจารณาใส่น้ำหนัก หรือให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยสาเหตุพยายามเลี่ยงการใช้ความรู้สึกของตนเอง (ยกเว้นกรณี ไม่มีข้อมูลสนับสนุนอาจอาศัยประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในเรื่องนั้นๆ ได้)

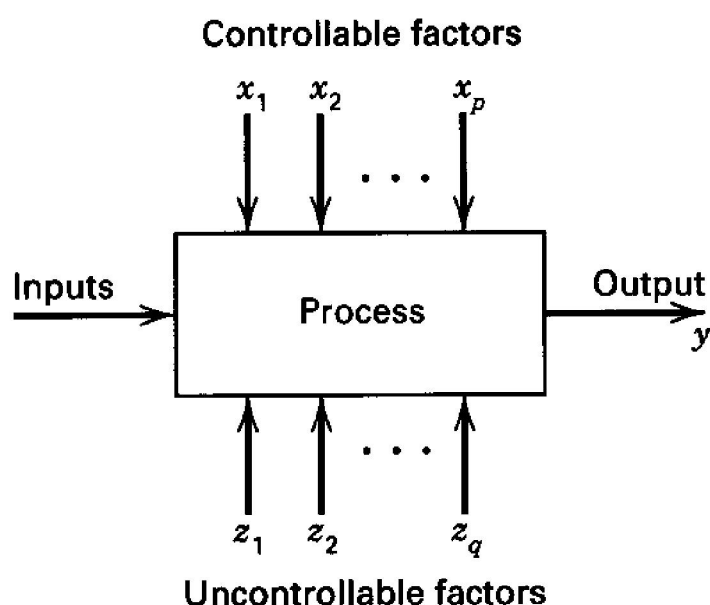
7. ขณะใช้ผังก้างปลาให้ทำการปรับปรุงแต่งเติมแก้ไขอย่างต่อเนื่องด้วยเพราะว่าผังก้างปลาที่เขียนขึ้นมาครั้งแรกอาจไม่สมบูรณ์ ต่อเมื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาแล้วระหว่างนั้นจะได้ข้อมูลและข้อเท็จจริงขึ้นมาอีกมาก และไปให้ห้กำลังใจความเข้าใจแต่เดิมของเราก็ได้ การปรับปรุงไปเรื่อย ๆ จึงเป็นการบันทึกผลการศึกษาค้นคว้าประกอบการแก้ไข ปัญหาในการผลิตที่ดีอีกด้วย

2.4 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment)

2.4.1 นิยาม

การออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments) คือการทดลองเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้บ่งสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร(หรือปัจจัย) ที่

ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factor) หรือตัวแปร(หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors)” และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร(หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ(Uncontrollable or Noise Variables)” ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แบบจำลองของระบบทั่วไป (Montgomery, 2008)

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้นั้น ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักการแล้ว การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน(Noise Variables) นั้น มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อหากเกิดชำรุดขึ้นมา อาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมากด้วยเช่นกัน ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็น “ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้”) อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น

2.4.2 ความเหมาะสมในการใช้การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นวิธีการหลักที่สำคัญในกิจกรรมการออกแบบวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พัฒนาขึ้น หรือการปรับปรุงของเดิมที่มีอยู่ก็ตาม ซึ่งการออกแบบการทดลองในงานด้านวิศวกรรมอาจรวมถึง

1. การประเมินและเปรียบเทียบการกำหนดค่าการออกแบบขั้นต้น
2. การประเมินทางเลือกด้านวัสดุ
3. การเลือกค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทำงานภายใต้สภาวะที่มีความแปรปรวนมาก หรือเรียกว่า ความคงทน (Robust)
4. การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของผลิตภัณฑ์
5. การกำหนดเกณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่

2.4.3 ประโยชน์ของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

ประโยชน์ของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ในการพัฒนากระบวนการผลิต
 - ช่วยเพิ่มผลผลิต (Yield)
 - ช่วยลดความแปรปรวน ทำให้ผลลัพธ์ได้ตามค่าที่ต้องการ
 - ช่วยลดเวลาในการพัฒนากระบวนการผลิต
 - ช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์
 - ช่วยลดต้นทุน
2. ประโยชน์ในการออกแบบเชิงวิศวกรรม
 - ช่วยในการวิเคราะห์เลือกรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม
 - ช่วยในการวิเคราะห์เลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม
 - ช่วยในการเลือกพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี
 - ช่วยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทำงานได้ดีที่สุด

2.4.4 กลยุทธ์ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2552) กล่าวว่า ก่อนที่จะกล่าวถึงกลยุทธ์ในการออกแบบแผนการทดลองนั้น ควรทราบคำศัพท์พื้นฐานดังนี้ คือ

- ตัวแปรตอบสนอง (Responses) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Outputs) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ที่ต้องการควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการ
- ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังที่กล่าวมาแล้ว คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

- ระดับปัจจัย (Levels of Factor) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง คือ 100 °C, 500 °C และ 900 °C นั่นคือ ปัจจัยอุณหภูมิที่ทำการศึกษาที่ 3 ระดับ
- วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นๆ เช่น ถ้าในการทดลองทำการศึกษปัจจัย A และปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับ จะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกันเท่ากับ $2 \times 3 = 6$ วิธี คือ ดังภาพประกอบ 9

วิธีปฏิบัติ	A	B	
1	1	1	← วิธีปฏิบัติที่ 1
2	1	2	
3	1	3	
4	2	1	← วิธีปฏิบัติที่ 1
5	2	2	
6	2	3	

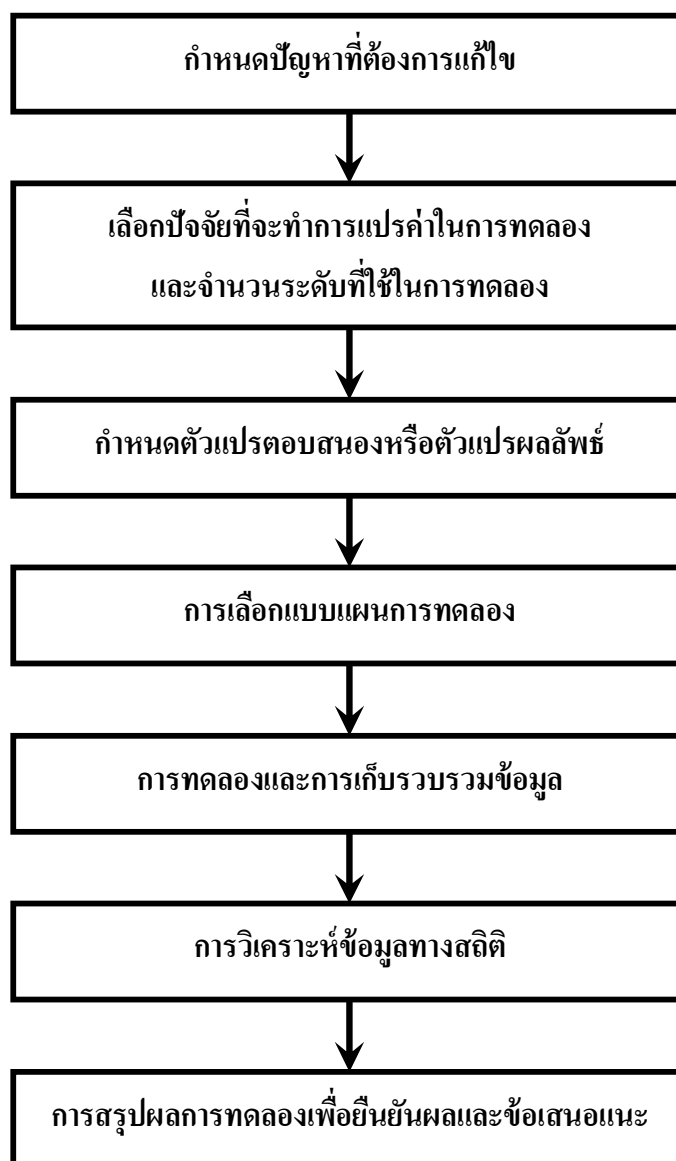
ภาพประกอบ 9 จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้

- จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs or Experimental Runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ (Replicates)

กลยุทธ์ในการออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Strategy) แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนโดยสรุปได้ดังนี้ คือ

1. รู้วัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. เข้าใจโดยชัดแจ้งว่า ปัจจัยอะไรคือปัจจัยที่จะศึกษาในการทดลอง
3. กำหนดจำนวนระดับของปัจจัยที่เลือกศึกษา
4. กำหนดค่าช่วงเริ่มต้นที่เหมาะสม (Initial Factor Settings) สำหรับปัจจัยที่จะทำการศึกษา ซึ่งโดยทั่วไปถ้าเป็นระดับที่ดำเนินการอยู่แล้วนั้น จะอ้างอิงจากเกณฑ์เดิม แต่ถ้าเป็นระบบใหม่จะอ้างอิงกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบนั้น

การใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจว่า เรากำลังศึกษาเรื่องอะไร เก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. **กำหนดปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข** ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการระบุวัตถุประสงค์ของการทดลอง ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในขั้นตอนนี้จำเป็นที่จะต้องระบุหัวข้อของปัญหาให้มีความชัดเจน และมีความครอบคลุมที่สุด

นอกจากนั้นยังเป็นขั้นตอนที่ทำให้ทุกคนมีส่วนร่วมในการออกความคิดเห็น และอาจมีการทำงานเป็นทีมเพื่อปรึกษาหารือ โดยการค้นคว้างานวิจัยที่มีส่วนร่วมในการออกแบบการทดลอง และสามารถกำหนดได้โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา

2. เลือกปัจจัยที่จะทำการแปรค่าในการทดลอง และจำนวนระดับที่ใช้ในการทดลอง ในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องใช้ความรู้ในกระบวนการของผู้ทดลอง หลักการทางทฤษฎี หรือประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้จากการทำงานในกระบวนการจริงและการทดลองในอดีต เพื่อที่จะพิจารณาว่าปัจจัยใดบ้างที่ควรนำมาพิจารณาใช้ในการทดลองและมีช่วงในการทดลองที่เท่าไร ส่วนการกำหนดระดับของปัจจัยขึ้นอยู่กับประสบการณ์ จากผลการทดลองที่ผ่านมาหรือขีดจำกัดช่วงของเครื่องมือในกรณีที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรหรือเครื่องมือ อย่างไรก็ตามในกรณีของการทดลองเกี่ยวกับปัญหาเชิงควบคุม มักใช้ระดับของปัจจัยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และกรณีที่ทำการทดลองเกี่ยวกับปัญหาเชิงปรับปรุงที่ต้องใช้ระดับของปัจจัยใหม่ในการทดลอง การกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง จะนิยมกำหนดให้เป็นช่วงกว้างๆไว้ก่อนและกำหนดเป็นระดับสูง ต่ำ ในกรณีที่มี 2 ระดับเป็นต้นไป ดังนั้น การกำหนดปัจจัยในการทดลองจึงใช้ร่วมกับเทคนิคด้านการควบคุมคุณภาพ คือ แผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause-and-Effect Diagram) นั่นเอง

3. การกำหนดตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรผลลัพธ์ ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่และควรจะระบุให้ตรงกับปัญหาหรือวัตถุประสงค์ที่ทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนองและจะวัดค่าตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนทำเริ่มดำเนินการทดลอง

4. การเลือกแบบแผนการทดลอง การเลือกแบบแผนการทดลองนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้ โดยควรพิจารณาถึงจำนวนตัวอย่าง (Sample size) การเลือกลำดับการทดลองที่เหมาะสม (Run Order) การเลือกจำนวนทำซ้ำ (Replication) ที่เหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการทำบล็อก (Blocking) นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ค่าใช้จ่ายในการทดลองรวมถึงผลกระทบหรือความเสี่ยงต่อกระบวนการ ซึ่งชนิดของรูปแบบการทดลองนั้นมีให้เลือกอยู่มาก แต่เราจำเป็นต้องเลือกมาเพียงแค่ 1-2 รูปแบบเท่านั้น เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ส่วนหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าเราควรที่จะเลือกรูปแบบการทดลองแบบไหนนั้น ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ดังนี้

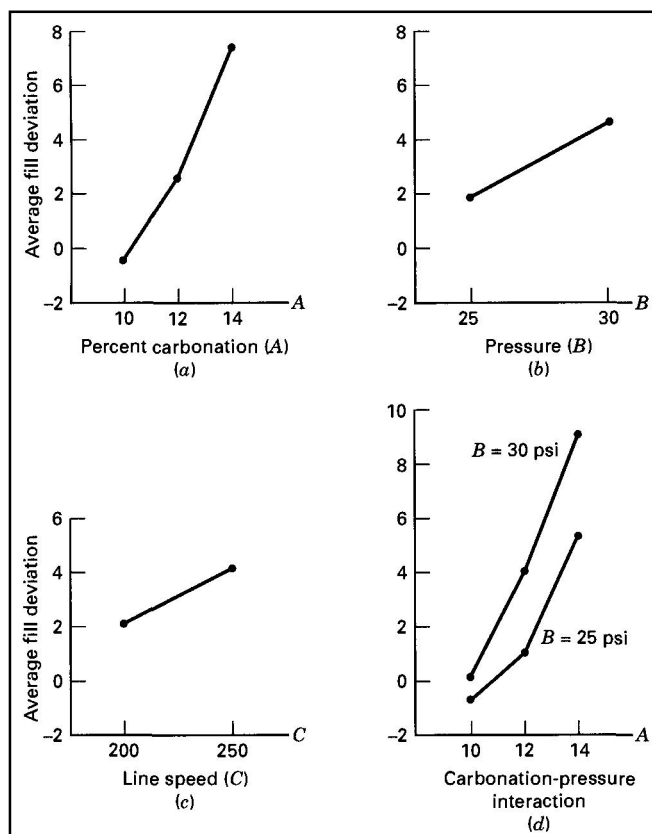
- เวลาที่มีให้เพื่อการวิเคราะห์
- ระดับความถูกต้องในการวิเคราะห์
- งบประมาณที่มีให้ในการออกแบบการทดลอง เป็นต้น

5. การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล การดำเนินการทดลองนั้น จะต้องทำภายใต้เมตริกซ์ที่ออกแบบไว้ (Design Matrix) คือ ต้องมีการสุ่ม การทำซ้ำ และต้องพยายามสังเกตกระบวนการทดลองอย่างเฝ้าระวัง เพื่อความถูกต้องของการทดลอง นอกจากนี้ข้อควรระวังในการทำการทดลอง คือความถูกต้องของกระบวนการ การวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อที่จะให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด เพราะว่าความผิดพลาดในขั้นตอนนี้จะทำลายความถูกต้องของการทดลอง

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ในขั้นตอนนี้จะเน้นหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์ด้วยกราฟค่าเฉลี่ย (Mean Plot) และผลกระทบร่วมของปัจจัย (Interaction Plot) ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติอยู่มากมาย เช่น SPSS, Minitab, Statistic, SAS, Stat graphics และอื่นๆ ซึ่งผู้ทดลองจะต้องมีความเข้าใจทางทฤษฎีเพียงพอจึงจะมีความสามารถในการตีความผลลัพธ์ทางสถิติในระดับหนึ่ง และเลือกใช้คำสั่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์นั้นๆตามต้องการ

สำหรับกราฟค่าเฉลี่ย เป็นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนองในกรณีที่มีปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย, แกนนอน: ปัจจัยที่สนใจ) โดยใช้กราฟนี้พิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ (Main Effect) ดังแสดงในภาพประกอบ 11 ส่วนกราฟผลกระทบร่วม เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย, แกนนอน: ปัจจัยที่ 1, ค่าLabel ในกราฟจะชี้ถึงระดับของปัจจัยที่ 2) และใช้ในการกำหนดจุดที่เหมาะสมสำหรับอันตรกิริยา หรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเท่านั้น (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพฑูริย์, 2552)

7. การสรุปผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและข้อเสนอแนะ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล(Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 11 (a)-(c) กราฟค่าเฉลี่ยของ ร้อยละการคาร์บอนเต ความดัน และความเร็วเชิงเส้น, (d) กราฟผลกระทบร่วมระหว่างร้อยละการคาร์บอนเตกับความดัน (Montgomery, 2008)

2.4.5 หลักพื้นฐานของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

หลักการพื้นฐาน (Basic principles) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบ การวางแผนและออกแบบการทดลองที่ดีแสดงถึงการได้รับข้อมูลจากการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นผลให้การวิเคราะห์และการสรุปผลมีความแม่นยำและข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถเป็นตัวแทนข้อมูลของประชากรทั้งหมดได้ หลักการพื้นฐานมี 3 หลักการ คือ การสุ่ม (Randomization), การทำการทดลองซ้ำ (Replication) และการจัดกลุ่ม (Blocking)

1. การสุ่ม (Randomization) ในการทดลองทุกรูปแบบ ต้องทำการสุ่มลำดับการทดลอง โดยคำนึงถึงทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง มีความน่าจะเป็นเดียวกันที่จะหยิบขึ้นมาทำการทดลอง นอกจากนี้ ควรหลีกเลี่ยงการเรียงลำดับทดลองและการทำการทดลองอย่างลำเอียง (Systemic bias) ซึ่งจะส่งผลให้การทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้

2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออก การทดลองซ้ำ มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองได้
- ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

3. การจัดกลุ่ม (Blocking) หมายถึง การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงๆ เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้กับการทดลอง แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการทำเสมอไป

การออกแบบการทดลองมีรูปแบบที่หลากหลายซึ่ง ชีรเดช เรืองศรี (2550) ได้จัดทำสรุปรูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยมีหลักในการเปรียบเทียบคือ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความถูกต้องในการวิเคราะห์ และงบประมาณที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 3 ไว้ว่พอสังเขปดังนี้

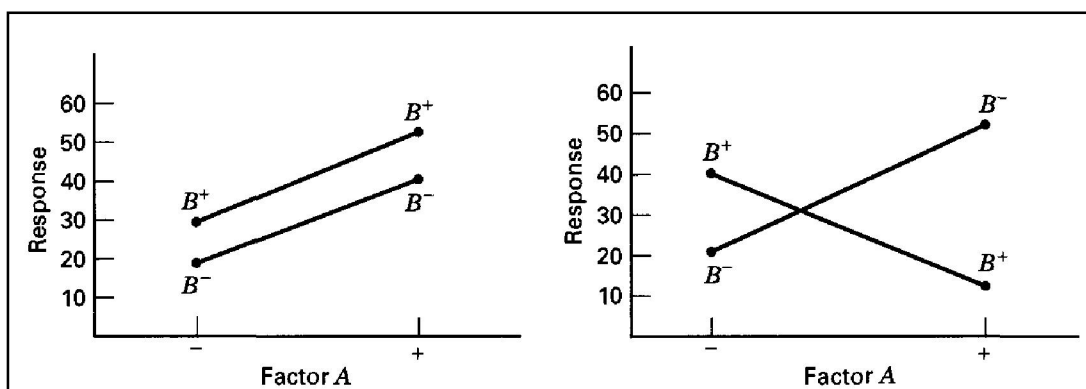
ตารางที่ 3 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Factor	การทดลองสำหรับ 1 ปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงสุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่า 1 ปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2^k Design	การทดลองที่มีมากกว่า 1 ปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ แต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2^{k-p} Design	การทดลองที่มีมากกว่า 1 ปัจจัย แต่ไม่ทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	ปานกลาง	ปานกลาง

2.4.6 การออกแบบวิธีเชิงแฟกทอเรียล (The Factorial Design)

การออกแบบวิธีเชิงแฟกทอเรียลเป็นรูปแบบที่เป็นที่นิยมแพร่หลายในกรณีที่มีปัจจัยจำนวนมากว่า 1 ปัจจัยมาเกี่ยวข้องกับเรื่องที่ต้องการศึกษาเพื่อดูผลตอบสนองที่เกิดขึ้น การทดลองวิธีเชิงแฟกทอเรียลทุกชนิดจะต้องทำการทดลองซ้ำ (Replicate) ในแต่ละปัจจัยและแต่ละระดับตั้งแต่ 2 ครั้งขึ้นไป ($n \geq 2$) ซึ่งจะทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระทบร่วม (Interactions) ที่อาจเกิดขึ้นได้ในตัวแบบ การออกแบบวิธีเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ เช่น กรณีปัจจัย A ทดลอง a ระดับ และปัจจัย B ทดลอง b ระดับ ดังนั้นถ้ามีการทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง การทดลองทั้งหมดจะประกอบไปด้วยจำนวน ab ครั้ง ซึ่งเมื่อทำการทดลองตามวิธีแฟกทอเรียลแล้วปัจจัยทั้งหมดจะมีการไขว้ (Cross) ซึ่งกันและกัน

ผลของปัจจัย ถูกอธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า ผลกระทบหลัก (Main Effect) ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลักในการทดลองนั้น และในบางครั้งอาจพบว่า ผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งอาจไม่เท่ากับผลตอบสนองของอีกปัจจัยหนึ่งในทุกระดับซึ่งอาจเรียกว่า ผลกระทบร่วม (Interactions) ระหว่างปัจจัย สำหรับการทดลอง 2 ปัจจัย 2 ระดับอาจแสดงผลของปัจจัยที่ไม่เกิดหรือเกิดผลกระทบร่วมได้ ดังภาพประกอบ 12



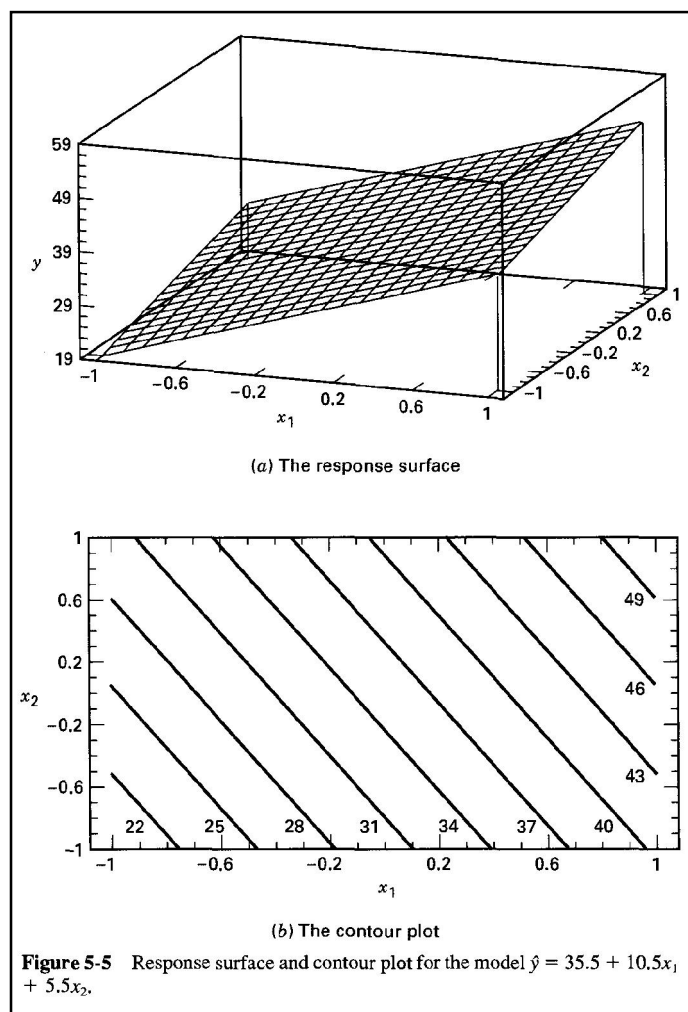
ภาพประกอบ 12 (a) การทดลองแฟกทอเรียลที่ไม่มีผลกระทบร่วม และ

(b) การทดลองแฟกทอเรียลที่มีผลกระทบร่วม (Montgomery, 2008)

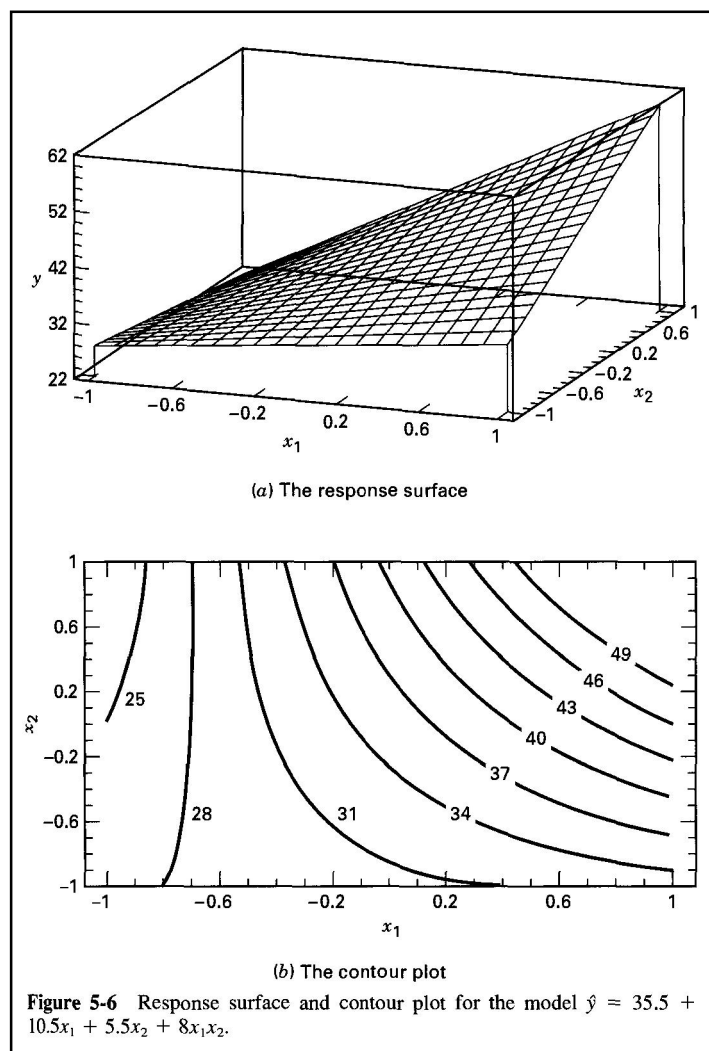
นอกจากการแสดงผลกระทบร่วมด้วยวิธีข้างต้นแล้ว เราสามารถที่จะทำการแสดงในรูปแบบอื่นได้เช่นกัน ซึ่งปัจจัยทั้งคู่จะต้องเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ แรงดัน และเวลา เป็นต้น โดยจากการทดลองแฟกทอเรียลสามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 1

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ y แทนผลตอบสนอง, β แทนค่าพารามิเตอร์ที่ถูกคำนวณ, x_1 แทนตัวแปรของปัจจัย A, x_2 แทนตัวแปรของปัจจัย B และ ϵ คือความผิดพลาดแบบสุ่ม ซึ่ง x_1 และ x_2 สามารถกำหนดโดยใช้เลข -1 ถึง +1 ได้ (แสดงถึงระดับต่ำและสูงของปัจจัย และ $x_1 x_2$ แทนผลกระทบริ่วมระหว่าง x_1 และ x_2 จากสมการดังกล่าวถ้าผลของการทดลองไม่เกิดผลกระทบริ่วมหรือค่า β_{12} มีค่าน้อยมากภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) และภาพคอนทัวร์ (Contour Plot) จะมีลักษณะดังภาพประกอบ 13 ซึ่งภาพจะเป็นเส้นตรงและเป็นระนาบเดียว ขณะเดียวกันถ้าเกิดผลกระทบริ่วมขึ้นและค่า β_{12} มีค่ามากจะส่งผลให้เกิดภาพพื้นที่ผิวตอบสนองที่เริ่มบิดระนาบและภาพคอนทัวร์ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 13 Response และ Contour Plot กรณีที่ผลกระทบริ่วมไม่ส่งผลหรือมีค่าน้อย (Montgomery, 2008)



ภาพประกอบ 14 Response และ Contour Plot กรณีที่ผลกระทบริ่วม
(Montgomery, 2008)

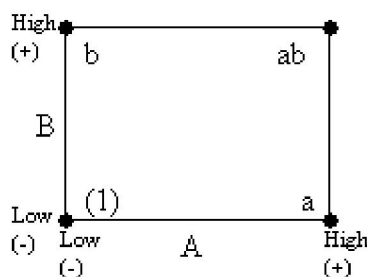
2.4.7 การออกแบบวิธีเชิงแฟกทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (The 2^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟกทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) รูปแบบหนึ่ง ในการใช้งานของ 2^k Factorial Design จะมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการออกแบบการทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยที่ต้องการศึกษาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ทำให้เกิดการทดลองเป็นจำนวนน้อยโดยศึกษาถึงผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ 2^k Factorial Design มักถูกใช้ในการทดลองเพื่อคัดปัจจัยออก (Screening Experiment) หรือทำเพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์

เชิงเส้นตรง (Linear Model) ซึ่งเช่นเดียวกับคำกล่าวที่ว่า “มีจุด 2 จุด สร้างสมการเส้นตรงได้” (ประไพศรี สุทัศน ญ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2552)

การออกแบบการทดลองรูปแบบนี้จะกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษาทุกปัจจัยเป็น 2 ระดับเท่านั้น คือ สูงกับต่ำ (High – Low) ดังนั้นวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ คือ 2^k เช่น มีปัจจัยที่ต้องศึกษา 3 ปัจจัย ดังนั้นจะมีวิธีปฏิบัติทั้งหมด 2^3 วิธี หรือ 8 วิธีนั่นเอง โดยต้องออกแบบ 2^k ภายใต้สมมติฐานที่ว่าปัจจัยทั้งหมดมีผลกระทบต่อผลตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นตลอดย่านของค่าต่ำสุดถึงสูงสุดที่ออกแบบไว้และเพื่อให้เห็นภาพของการออกแบบด้วย 2^k Factorial Design ชัดเจนขึ้น ว่าแต่ละปัจจัยมีค่าอย่างไร วิธีปฏิบัติทั้งหมดมีอะไรบ้าง จึงสมมุติปัจจัยในการทดลองครั้งนี้ คือ A และ B ดังภาพประกอบ 15 โดยเป็นการออกแบบการทดลอง 2 ปัจจัย ดังนั้นในภาพดังกล่าว จึงมีวิธีปฏิบัติ 4 วิธี ดังนี้

- วิธี (1) เป็นกรณีที่ปัจจัย A และ B มีค่าต่ำ วิธี a
- วิธี a เป็นกรณีที่ปัจจัย A มีค่าสูง และ B มีค่าต่ำ
- วิธี b เป็นกรณีที่ปัจจัย A มีค่าต่ำ และ B มีค่าสูง
- วิธี ab เป็นกรณีที่ปัจจัย A และ B มีค่าสูง



Treatment	A	B
(1)	-	-
a	+	-
b	-	+
ab	+	+

ภาพประกอบ 15 แบบจำลองของ 2^k Factorial Design

จากการออกแบบด้วยวิธี 2^2 จะพบว่าผลเฉลี่ยของปัจจัยหนึ่งคือความเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ที่ถูกนำมาเฉลี่ยกับปัจจัยอื่นๆ วิธีปฏิบัติต่างๆ ที่แทนด้วยสัญลักษณ์ (1), a, b, และ ab ในภาพที่ 23 คือ ผลรวมของการทดลองซ้ำ n ครั้งของการทดลองร่วมของปัจจัยนั้นๆ ในแต่ละระดับแต่ละปัจจัย เช่น ผลของ A ที่ระดับต่ำของ B คือ $[a - (1)]/n$ และผลของ A ที่ระดับสูงของ B คือ $[ab - b]/n$ โดยนำค่าทั้งคู่มารวมเฉลี่ยจะได้ผลหลักของปัจจัย A ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2n} \{[a - (1)] + [ab - b]\} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + a - (1) - b]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

สำหรับผลหลักของปัจจัย B ก็เช่นเดียวกัน โดยที่ผลของผลของ B ที่ระดับต่ำของ A คือ $[b - (1)]/n$ และผลของ B ที่ระดับสูงของ A คือ $[ab - a]/n$ โดยนำค่าทั้งคู่มานเฉลี่ยจะได้ผลหลักของปัจจัย B ดังสมการที่ 3

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{2n} \{[b - (1)] + [ab - a]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - (1) - a] \end{aligned} \quad (3)$$

ผลกระทบร่วมของ AB อาจหาได้จาก 2 วิธี แต่ทั้ง 2 วิธีจะให้คำตอบที่เหมือนกัน โดยวิธีแรกคำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ A ที่ B ระดับสูง กับผลของ A ที่ B ระดับต่ำ หรือวิธีที่สองซึ่งคำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ B ที่ A ระดับสูง กับผลของ B ที่ A ระดับต่ำ ดังสมการที่ 4 และ 5

$$\begin{aligned} AB &= \frac{1}{2n} \{[ab - b] - [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - b - a] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} AB &= \frac{1}{2n} \{[ab - a] - [b - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - b - a] \end{aligned} \quad (5)$$

การทดลองด้วย 2^k Factorial Design มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยเพื่อที่จะหาว่าตัวแปรน่าจะส่งให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อยืนยันข้อสรุปดังกล่าว

สำหรับการคำนวณหาผลรวมกำลังสอง (Sums of Squares) สำหรับ A, B, และ AB ดังที่อธิบายไว้ในสมการที่ 1 ซึ่งใช้คอนทราสต์ในการประมาณค่า A ดังสมการที่ 6 ดังนี้

$$Contrast_A = ab + a - b - (1) \quad (6)$$

จากสมการที่ 2 และ 3 Contrast สามารถใช้ในการประมาณค่า B และ AB ได้อีกด้วย ยิ่งกว่านั้น Contrast ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของ Contrast ใดๆ สามารถหาได้จาก Contrast ยกกำลังสอง หากด้วยผลคูณของจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่มีอยู่ใน Contrast นั้น กับผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของ Contrast ดังนั้นผลรวมของกำลังสองของ A, B และ C จึงสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 7-9 โดยผลรวมทั้งหมดของกำลังสองหาได้ดังสมการที่ 10

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (7)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (8)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (9)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \quad (10)$$

โดยปกติแล้ว SS_T จะมีองศาเสรี คือ $4n-1$ และค่าความผิดพลาดของผลรวมกำลังสอง (SS_E) จะมีองศาเสรี $4(n-1)$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (11)$$

นอกจากสมการข้างต้นตั้งแต่สมการที่ 7-10 แล้ว การหาผลรวมกำลังสองเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^2 Factorial Design ดังภาพประกอบ 16 อาจหาได้จากสมการที่ 12-16 โดยที่ การหาค่าของ SS_E สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับสมการที่ 11

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (12)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (13)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (14)$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (15)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B \quad (16)$$

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A treatments	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

ภาพประกอบ 16 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^2 Factorial Design
(Montgomery, 2008)

วิธีโดยทั่วไปในการออกแบบด้วย 2^k Factorial Design สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ประมาณผลกระทบจากปัจจัย (Estimate Factor Effects) เป็นขั้นตอนในการประมาณผล และตรวจสอบเครื่องหมายและผลกระทบที่เกิดขึ้น ทำให้ทราบว่าปัจจัยใดมีอิทธิพล และปัจจัยเหล่านี้ควรปรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อปรับปรุงผลตอบ
2. สร้างแบบจำลองเบื้องต้น (Form Initial Model) ควรเลือกจำลองเต็มรูปแบบเพื่อที่จะได้ทดลองผลหลักและผลอันตรกิริยา
3. ทดสอบยืนยันทางสถิติ (Perform Statistic Testing) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา (Interaction) ดังแสดงในภาพประกอบ 17
4. จัดเกลแบบจำลอง (Refine Model) การดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ

5. วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Analysis Residual) เพื่อตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจมีการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ก่อนการขัดเกลาระบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ และสมมติฐานไม่ถูกต้องอย่างมาก

6. ผลการตีความ (Interpret Result) เป็นการวิเคราะห์ด้วยกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น

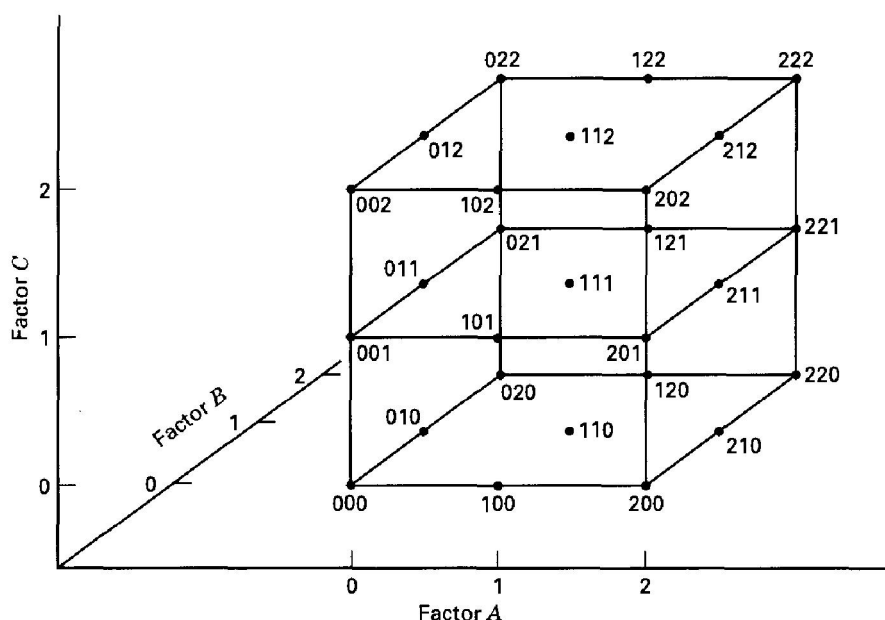
Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
JK	SS_{JK}	1
$\binom{k}{3}$ three-factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
IJK	SS_{IJK}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\binom{k}{k} = 1$ k -factor interaction		
$ABC \cdots K$	$SS_{ABC \cdots K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n - 1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1$

ภาพประกอบ 17 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 2^k Factorial Design

(Montgomery, 2008)

2.4.8 การออกแบบวิธีเชิงแฟกทอเรียล k ปัจจัยชนิดสามระดับ (The 3^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟกทอเรียล k ปัจจัยชนิดสามระดับ (3^k Factorial Design) เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) รูปแบบหนึ่ง ที่แต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ คือ สูง กลาง และต่ำ หรือ 2, 1, และ 0 โดยมีโครงสร้างทางเรขาคณิตกรณี 3^3 Factorial Design ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 โครงสร้างทางเรขาคณิต 3^3 Factorial Design (Montgomery, 2008)

จากลักษณะของ 3^k Factorial Design ที่มีค่าสูงกลางต่ำ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยของของผลตอบที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย เช่น กรณี 3^2 Factorial Design ($k=2$) โดยกำหนดให้ x_1 แทนปัจจัย A, x_2 แทนปัจจัย B ซึ่งแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง y , x_1 และ x_2 ได้ดังสมการ 17

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (17)$$

จากระดับที่ 3 ของปัจจัยที่เพิ่มขึ้นมาในแบบจำลอง ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยในลักษณะที่เป็นสมการควอดราติก (Quadratic) ซึ่ง 3^k Factorial Design จะเหมาะสมกับการที่ผลตอบสนองมีโอกาสเป็นส่วนโค้ง อย่างไรก็ตาม 3^k Factorial Design

ไม่ได้เป็นวิธีที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีพื้นที่ผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methods) ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปจะให้ผลที่ดีกว่า

2.4.9 วิธีพื้นที่ผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methods)

วิธีการพื้นที่ผิวผลตอบสนอง หรือ RSM เป็นการรวมเอาเทคนิคทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายตัว และต้องการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองเหล่านี้ เช่น มีวิศวกรเคมีคนหนึ่ง มีความต้องการที่จะหาระดับของเวลาในการให้อุณหภูมิ (x_1) และแรงดัน (x_2) ที่จะส่งผลให้เหล็กมีความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของเวลาในการให้อุณหภูมิ และแรงดันกล่าวคือ

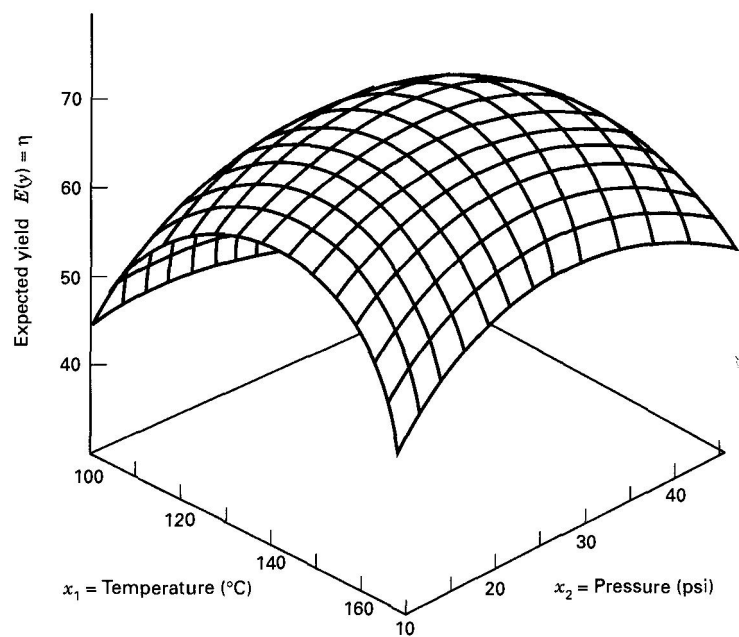
$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (18)$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง ซึ่งเป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้ดังนี้

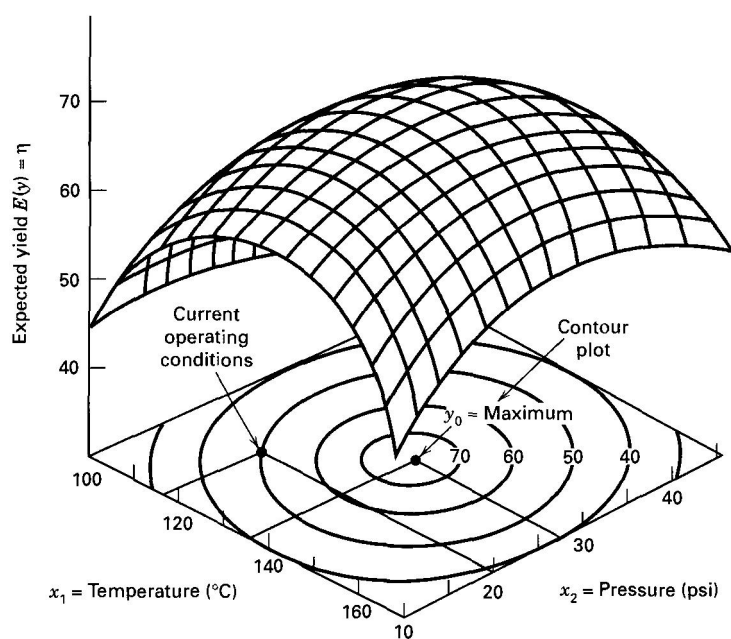
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (19)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) ส่วนใหญ่แล้วจะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟดังภาพประกอบ 19 โดยที่ η จะถูก Plot กับระดับของ x_1 และ x_2 นอกจากนี้เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นแล้ว จะต้องทำการ Plot เป็นเส้นโครงร่าง (Contour Line) ของพื้นผิวผลตอบสนอง ดังภาพที่ 21 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง ในปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (20)$$



ภาพประกอบ 19 ภาพของพื้นที่ผิวผลตอบสนอง 3 มิติ (Montgomery, 2008)



ภาพประกอบ 20 ภาพเส้นโครงร่างของพื้นที่ผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2008)

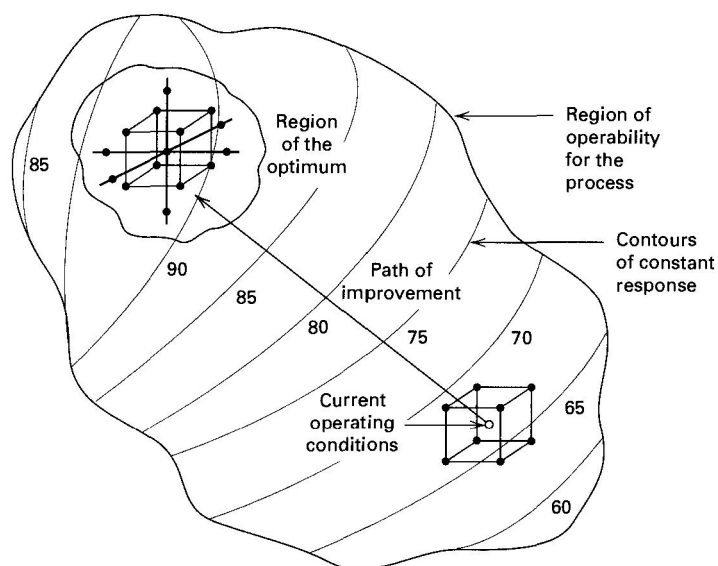
อย่างไรก็ตามเมื่อมีส่วนโค้งมาเกี่ยวข้องจะทำให้ใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 21

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (21)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลอง 1 ใน 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามดังกล่าวเหล่านี้ จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้วแบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ดังกล่าวไว้ในทฤษฎีของการสร้างแบบจำลองการถดถอย (Fitting Regression Models) แล้ว จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีเพียงพอ ดังนั้น การวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เงื่อนไขการทำงานปัจจุบัน ดังภาพที่ 29 ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ คือ การนำการทดลองไปใช้เป็นแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากภาพประกอบ 21 จะพบว่ากราฟวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุดในที่นี้ จะคิดเสมือนการเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา วัตถุประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



ภาพประกอบ 21 ลำดับขั้นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2008)

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังสมการที่ 21

จากตัวแบบดังกล่าวผู้ทดลองสามารถสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวผลตอบสนองนี้จำเป็นจะต้องมีระดับที่ 3 ของปัจจัย โดยนอกเหนือจาก 3^k Factorial Design ยังมีวิธีอื่นๆ อีก เช่น การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD) การออกแบบ Box-Behnken Design การออกแบบ Face-Centered Central Composite (หรือ Face Central Cube) ซึ่งการออกแบบการทดลองเหล่านี้สามารถลดค่าใช้จ่าย หรือลดการทดลองที่ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านกายภาพของกระบวนการ แต่ยังคงสามารถวิเคราะห์ผลและสามารถสรุปผลได้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบทางสถิติ

2.5 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยพร วงศ์พิศาล และคณะ (2547) การประยุกต์ใช้ออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการบรรจุและปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในการผลิตซอสผลไม้ (The Experimental Design Application for Quality Improvement on a Filling and Packaging Seal Process of a Fruit

Sauce Production) สรุปว่า งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^4 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3^3 และการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยผนึกขอผลไม้มัน ทำให้ทราบว่าควรกำหนดค่าอุณหภูมิแกนกดแวนนอน 142 องศาเซลเซียส ความเร็วในการป้อนฟิล์ม 18 รอบต่อนาที และอุณหภูมิขอสถานะบรรจุ 79 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเพิ่มขึ้น 24.06% หรือเพิ่มเป็น 56.75 นิวตัน ลดต้นทุนได้ 690,150 บาทต่อปี

ธีรเดช เรืองศรี (2550) การพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อลดความสูญเสีย กรณีศึกษา: โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ (Development the Printing Control Process on Packaging for Waste Reduction Case Study: Packaging Product Factory) สรุปว่า วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อแก้ไขปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเดิมไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานในการทำงาน จากการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟคทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) กับปัจจัย 5 ปัจจัย คือจำนวนกระดาษซ้อนสีก่อนพิมพ์ ค่า pH ของน้ำยาฟาว์เทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทน ระยะห่างแม่พิมพ์และความเร็วการพิมพ์ พบว่า มีเพียง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเสีย ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมแล้ว ได้ค่าที่ควรใช้งานดังนี้ น้ำยาฟาว์เทนมีค่า pH เท่ากับ 4.5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนเท่ากับ 25% และระยะห่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.075 มม. ซึ่งทำให้ลดต้นทุนได้ 180,198 บาทต่อปี

ปรพล ชินวงศ์สกุล และคณะ (2553) การกำหนดสภาวะในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพลาสติกพอลิโพรไพลีนผสมเศษขี้เลื่อย ขี้กบ โดยใช้การออกแบบการทดลอง (Determination of Suitable Processing Conditions in Injection Molding and Properties of Plastic Blend Between Polypropylene, Saw Dust and Wood Shaving Using Design of Experiments) สรุปว่า งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาการใช้ประโยชน์ของเศษขี้เลื่อย และขี้กบที่เดิมไม่มีการใช้ประโยชน์ ให้สามารถผสมกับพลาสติกได้อย่างเหมาะสม โดยประยุกต์ใช้วิธีแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและทาคุชิ (Taguchi) ($L_8 2^7$) มาช่วยในการออกแบบการทดลองและกำหนดแผนการทดลอง ทำให้ค่าที่เหมาะสมคือ ปริมาณขี้เลื่อย 20% by v/v ปริมาณขี้กบ 5% by v/v และปริมาณสารมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride) 0% by v/v และสภาวะในการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ ที่เวลาเย็นตัว 33 วินาที อุณหภูมิหลอมเหลว 190 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีด 47% และความดันแม่พิมพ์ 50 bar

พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ และนภคณ ธีงทอง (2550) การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดรูรีมเมอร์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง สรุปว่า งานวิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ ของเหล็ก 2 ชนิดและน้ำหล่อเย็น 2 ชนิด ซึ่งพิจารณาจากปัจจัย 3 ปัจจัย คือ อัตราการป้อนของดอกรีมเมอร์ ความเร็วรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนคว้านรูเรียบ โดยใช้วิธี OVAT (One Variable At the Time) และวิธีเชิงแฟกทอเรียล 2^k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) ในการกำหนดระดับปัจจัย จากนั้นทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งวิธีเชิงแฟกทอเรียลชนิดสองระดับ และวิธีสเตียเพสเดสเซนส์ (Steepest Descent) ซึ่งให้ผลตอบแทนที่ดีกับทั้งชนิดของเหล็กและสารหล่อเย็นในการปรับปรุงครั้งแรกเท่านั้น

พิทักษ์ พนาวัน และสมเกียรติ จงประสิทธิ์พร (2550) การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์กาวที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นรองสินค้าที่อัดจากฟางข้าวและใยมะพร้าว (Design of Experiment to Fine out the Percentage of Suitable of Glue Used in Pallet Which Produced From the fiber of Coconut and Straw) สรุปว่า โครงการปัญหาพิเศษนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์กาวและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นรองสินค้าจากฟางข้าวและใยมะพร้าวซึ่งมีสัดส่วน 50:50 ซึ่งมีผลต่อการทนต่อแรงดึงและการทนต่อแรงกระแทกของแผ่นรองสินค้า โดยควบคุมอุณหภูมิอัดร้อนที่ 150-160 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอัด 4 นาที รวมถึงใช้วิธี Duncan 's Multiple Range Test ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นรองสินค้าตามปริมาณกาวที่เปลี่ยนไป ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณกาวเพิ่มขึ้นมีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นรองสินค้าที่ดีขึ้นตามไปด้วย

รัตนพันธุ์ นพเก้า และคณะ (2553) การหาค่าพารามิเตอร์ในการเคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Parameter Finding in Silicon Nitride Thin Film Deposition by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) Process) สรุปว่า งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์วัดแรงดันเลือดในหัวใจ ที่พบว่าไม่สามารถกันความชื้นได้เมื่อต้องอยู่กับของเหลว

กรวิษณุ จุฬะวนะพันธุ์ และ วิชัย รุ่งเรืองอนันต์ (2555) การลดความสูญเสียจากกระบวนการตัดและปิดผนึกถุงพลาสติก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิต

อุณพลสถิตบรรจักษ์ สรุปรว่า งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3 ระดับ (3^k Factorial Design) มาวิเคราะห์ปัจจัยของปัญหาการรอยปิดผนึกกันถุงยัด 2 ปัจจัย คือ ความเร็วในการป้อนแผ่นพลาสติก และอุณหภูมิของบาร์กด์ ผลจากการศึกษาพบว่า ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมคือ ความเร็วในการป้อนแผ่นพลาสติกอยู่ที่ระดับ 35 ขึ้นต่อนาทีและอุณหภูมิของบาร์กด์เท่ากับ 255 °F สามารถลดสัดส่วนของเสียลงได้ 3.5% และคิดเป็นเงินที่สามารถลดของเสียลงได้ประมาณ 55,000 บาทต่อเดือน

Orapun Olaric และ Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya (2002) Design of Experiment for Die Coating on Automotive Device สรุปรว่า งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นชิ้นส่วนด้านความปลอดภัย โดยมีข้อกำหนดที่เข้มงวดในระยะห่าง (Clearances) ซึ่งมีผลต่อรูปทรงของ Glob-top ดังนั้นจึงทำการหาปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานดังกล่าวและระดับที่เหมาะสมด้วยวิธีแฟคทอเรียลเต็มรูป โดยมีปัจจัย 3 ปัจจัยที่มีผลและระดับที่เหมาะสม คือ ความเร็ว (Speed) 0.15 นิ้วต่อวินาที ขนาดช็อต (Shotsize) 800 ms และรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Chanpen Anurattananon และ Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya (2008) Generalized Linear Models for Jewelry-Bodied Casting งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการในการหล่อโครงของเครื่องประดับ โดยศึกษาปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัย คือ มุมทางเข้า (Ingate) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิในการเท ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งสุดท้ายแล้วทำให้ได้แบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้สำหรับวัสดุผสม 3 ชิ้นที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม

Chanpen Anurattananon และ Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya, 2008: Optimization Using Response Surface Methodology in Jewelry-Bodied Casting งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัย คือ มุมทางเข้า (Ingate) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิในการเท ที่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยใช้ 2^3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป Central composite design (CCD) และ A small composite design (SCD) ซึ่งพบว่าผลที่ได้จาก SCD มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายของความหนาแน่นชิ้นงานที่กำหนดไว้ที่ 10.50 กรัม มากกว่าผลจาก CCD

Lazim (2008) An Optimization of Tin Plating Process Using Design of Experiment วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการลดความแปรปรวนของน้ำหนักรในการชุบตีบ ซึ่งปัจจัยที่ทดลอง 4 ปัจจัย คือ ความเร็ว อุณหภูมิ โซเดียมเพอโรไซไนด์ $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ และสัดส่วนโมลของฟลูออไรด์ใน

ดีบุกทั้งหมด ใช้ 2^4 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งทำให้ได้สมการคณิตศาสตร์ที่มีตัวแปรตอบสนองคือ น้ำหนักของการซบ ที่นำไปสู่แนวทางปฏิบัติที่ทำให้คุณภาพการผลิตดีขึ้น

Mays (2008) Seal Strength Models for Medical Device Trays คุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาหาแบบจำลองของตำแหน่งในการปริและลอก และเปรียบเทียบแรงปริและแรงลอกของถาดเครื่องมือแพทย์ โดยทดลองปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงลอก ปัจจัยละ 3 ระดับ คือ แรงกดในการพ่น, เวลาในการกด และอุณหภูมิในการพ่น โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F88-07 ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงปริ คือ ช่องว่างของแผ่นควมคุม และปริมาตรของถาด ความสูง อัตราส่วนของความยาวและความกว้าง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F2054-00

Olsson, Lundström และ Olofsson (2008) Process Study on Compression Moulding of SMC using Factorial Design งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ 2^4 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบในการลดการเสื่อมสภาพของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ SMC (Sheet Moulding Compound) ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย 4 ปัจจัย คือ Vacuum แรงดัน ความเร็ว และอุณหภูมิ ผลการทดลองทำให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสม โดยมีตัวแปรตอบสนองคือค่าความเป็นฉนวน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิและค่าสูญญากาศ (Vacuum) ที่มีค่าสูงส่งผลทำให้ค่าความเป็นฉนวนต่ำลง

Mangaraj และ Singh (2011) Optimization of Machine Parameters for Milling of Pigeon Pea Using RSM งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมในการกัดชิ้นงาน Pigeon Pea ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงที่สุด หลังจากการทดลองทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้ ความเร็วของม้วน 9.6 m/s, ขนาดของผงขัด 1 mm, และอัตราการป้อน 111 kg/hr ทำให้มีประสิทธิภาพการกัดเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 80

Bajic, Jozic และ Podrug (2010) Design of Experiment's Application in the Optimization of Milling Process งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึง อิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดที่มีต่อความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็ก การทดลอง ได้ดำเนินการตามการออกแบบการทดลอง (DOE) สมการสำหรับความขรุขระพื้นผิว คือ พารามิเตอร์การตัดของเครื่องซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์การถดถอย อย่างไรก็ตาม เพื่อค่าความขรุขระของพื้นผิวที่น้อยที่สุดจึงเพิ่มประสิทธิภาพด้วยอนุพันธ์ย่อยและระบบการแก้ไขสมการ นอกจากนี้ยังใช้วิธีทางสถิติด้วยการใช้ Orthogonal Arrays และอัตราส่วนสัญญาณรบกวนในการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดต่างๆ บนพื้นผิวขรุขระ และเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ในการตัด สุดท้ายได้เปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง กับวิธี

ทาคุชิ โดยพบว่าในแง่ของสมมติศาสตร์วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่าและมีช่วงการทดลองที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามวิธีทาคุชิมีข้อดีในด้านความน่าเชื่อถือและจำนวนการทดลองที่น้อยกว่า และช่วยควบคุมระดับของปัจจัยได้

Nabil, Aissa, และ Aguida (2010) Effectiveness of Different Solutions to Reduce Plastic Shrinkage in Hot Climate Concreting งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึง การแก้ปัญหาทางหล่อคอนกรีตในสภาวะอากาศร้อนซึ่งมีผลทำให้ความชื้นระเหยอย่างรวดเร็วทำให้ปูนแตกร้าว ประเด็นที่ทำให้เกิดการแตกร้าวนั้นส่งผลมาจากการหดตัวของพลาสติกที่ใช้คลุมผิวคอนกรีต การทดลองได้ประยุกต์ใช้ 2^{k-2} การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน ในการลดจำนวนปัจจัยที่ทดลอง ซึ่งประกอบด้วยแผ่นปิดพลาสติก ส่วนประกอบการบ่ม ไฟเบอร์โพลีโพรพิลีน น้ำหล่อเย็น อุณหภูมิ และความเร็วลม ผลการทดสอบปรากฏว่า การใช้ แผ่นปิดพลาสติก และส่วนประกอบการบ่ม ช่วยลดการหดตัวได้ดีที่สุด ขณะที่น้ำหล่อเย็นช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการอัดได้ดีที่สุด

2.6 สรุป

โดยสรุปในบทที่ 2 นี้ ได้แบ่งเนื้อหาจากงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การค้นหาสาเหตุด้วยการใช้เครื่องมือในการคุณภาพ 7 ชนิด ซึ่งทำให้ผู้วิจัยสามารถมุ่งเน้นไปยังปัญหาหลักที่มีความสำคัญได้อย่างถูกต้อง ในส่วนที่สองได้กล่าวถึงการออกแบบการทดลองโดยเป็นการเชื่อมโยงจากส่วนแรกมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบและค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาจากส่วนแรก และสุดท้ายการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วผู้วิจัยจะทำการค้นหาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ด้วยเครื่องมือตามที่กล่าวไว้ในส่วนแรก จากนั้นจะเริ่มออกแบบการทดลองโดยเพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยฉีกงูขี้นในปัจจุบัน พร้อมทั้งทำการระดมสมองวิเคราะห์หาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าตอบสนองดังกล่าว จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองอีกครั้งด้วยวิธีแฟคทอเรียลเต็มรูป 3^k หรือวิธีอื่นๆ ตามที่กล่าวมาแล้ว เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการปิดผนึก ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำความรู้ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสารต่อไป

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทที่ 3 นี้ผู้วิจัยขอกล่าวถึงแนวทางในการดำเนินงานวิจัยในภาพรวม ที่นำไปสู่การบรรลุวัตถุประสงค์ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสาร ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

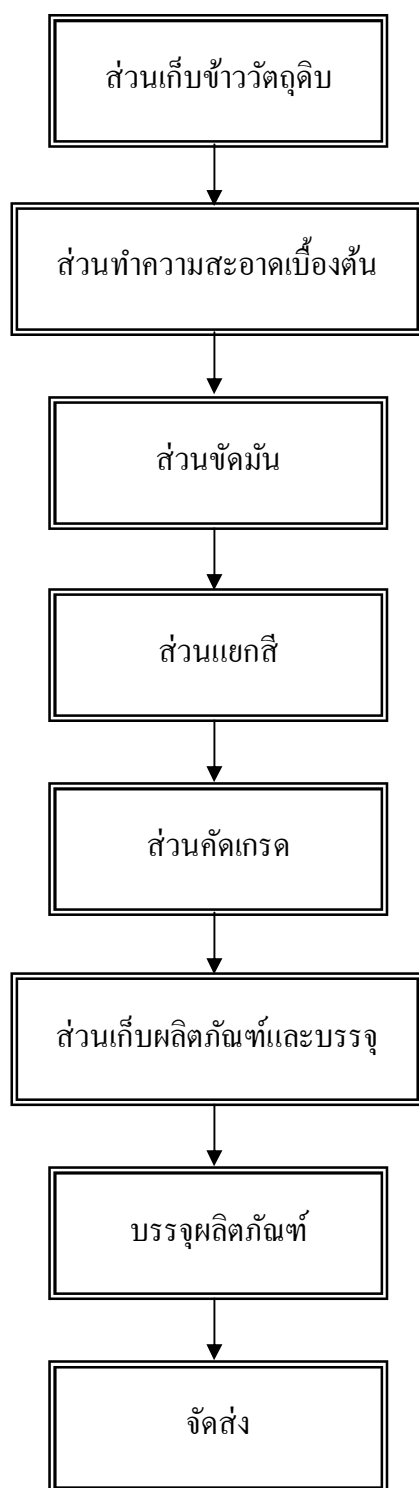
1. กระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุง
2. กระบวนการควบคุมคุณภาพ
3. การวิเคราะห์ปัญหา
4. การทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)
5. แนวทางในการออกแบบการทดลอง
6. แนวทางการวิเคราะห์ผลการทดลองและกำหนดค่าพารามิเตอร์
7. การดำเนินการใช้ค่าพารามิเตอร์

3.1 กระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุง

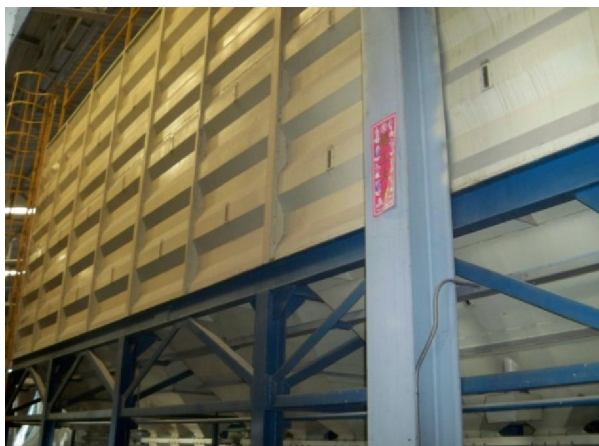
กระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุงเริ่มจากการนำข้าวจะพื้นที่เก็บข้าวที่นำมาเป็นวัตถุดิบที่ผ่านการสีมาแล้ว มาแยกสิ่งแปลกปลอม คัดเมล็ด คัดเกรด จัดเก็บเพื่อรอบรรจุให้ลูกค้า ดังภาพประกอบ 22 ซึ่งผู้วิจัยจะอธิบายในแต่ละขั้นตอนที่จะทำให้เห็นภาพรวมของกระบวนการทั้งหมดได้อย่างชัดเจน และนำไปสู่การวิเคราะห์สิ่งที่มีผลต่อคุณภาพการผลิตข้าวสารบรรจุถุงต่อไป โดยเฉพาะคุณภาพในส่วนของการบรรจุข้าวสารลงถุงขนาด 5 กิโลกรัม

3.1.1 ส่วนเก็บข้าววัตถุดิบ

การจัดเก็บข้าวสารเพื่อรอการเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ของกระบวนการบรรจุข้าวสาร ทางบริษัทได้จัดเก็บไว้ในถังไซโลขนาดใหญ่เพื่อจัดเก็บข้าวสารในแต่ละชนิดข้าว และควบคุมป้องกันนกหรือแมลงเข้ามากินข้าวสารที่รอการบรรจุ ดังภาพประกอบ 23 โดยให้ความสำคัญเกี่ยวกับความสะอาดและเชื้อโรคที่อาจติดมากับสัตว์ที่มากินข้าวสารภายในบริษัท



ภาพประกอบ 22 แผนผังกระบวนการผลิตข้าวสารบรรจุถุง



ภาพประกอบ 23 ถังไซโลเก็บข้าวสาร

3.1.2 ส่วนทำความสะอาด

เป็นขั้นตอนส่วนต้นของกระบวนการบรรจุข้าวสาร ซึ่งเมื่อมีความต้องการผลิตข้าวสารจะถูกปล่อยจากไซโล โดยการทำความสะอาดจะทำการแยกมีสิ่งที่ไม่เจือปนมาที่อยู่ภายในข้าวสาร โดยอาศัยแรงลมและแรงโน้มถ่วงในการคัดแยก เช่น เศษไม้ เศษวัชพืช และอื่นๆ ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 เครื่องทำความสะอาดข้าวสาร

3.1.3 ส่วนขัดมันข้าวสาร

กระบวนการขัดมันก่อนบรรจุข้าวสาร โดยขั้นตอนนี้จะทำให้มีผิวของเมล็ดข้าวสารมีความเรียบ แยกออกเป็นเมล็ดไม่ติดกัน ลักษณะของเมล็ดข้าวจะใสผิวเนียน และเข้าสู่กระบวนการต่อไป ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 เครื่องขัดมันข้าวสาร

3.1.4 ส่วนแยกสีของข้าวสาร

โดยขั้นตอนนี้จะแยกสีเมล็ดข้าวสารใช้อุปกรณ์แรงลมเข้ามาเกี่ยวข้องใช้หลักการของแรงดันลมเป่าเมล็ดข้าวสารที่ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ได้แก่ สีของเมล็ดข้าวสาร เมล็ดแตก ก่อนและหลังกระบวนการผลิต เป็นต้น ดังภาพประกอบ 26



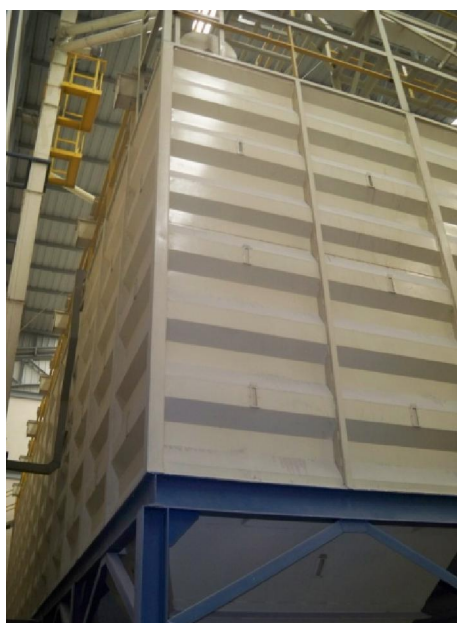
ภาพประกอบ 26 เครื่องแยกสีของข้าวสาร

3.1.5 ส่วนคัดเกรดข้าวสาร

หลังจากผ่านกระบวนการขัดมันข้าวสารและแยกสีของข้าวสารก็จะมาเข้าสู่การคัดขนาดข้าวสาร เนื่องจากข้าวสารมีหลายที่ส่งมายังบริษัท สถานที่แหล่งเพาะปลูกอาจจะไม่เหมือนกัน สภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวต่างกัน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและขนาดเมล็ดข้าว จึงจำเป็นต้องคัดเกรดของเมล็ดข้าว

3.1.6 ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์และบรรจุ

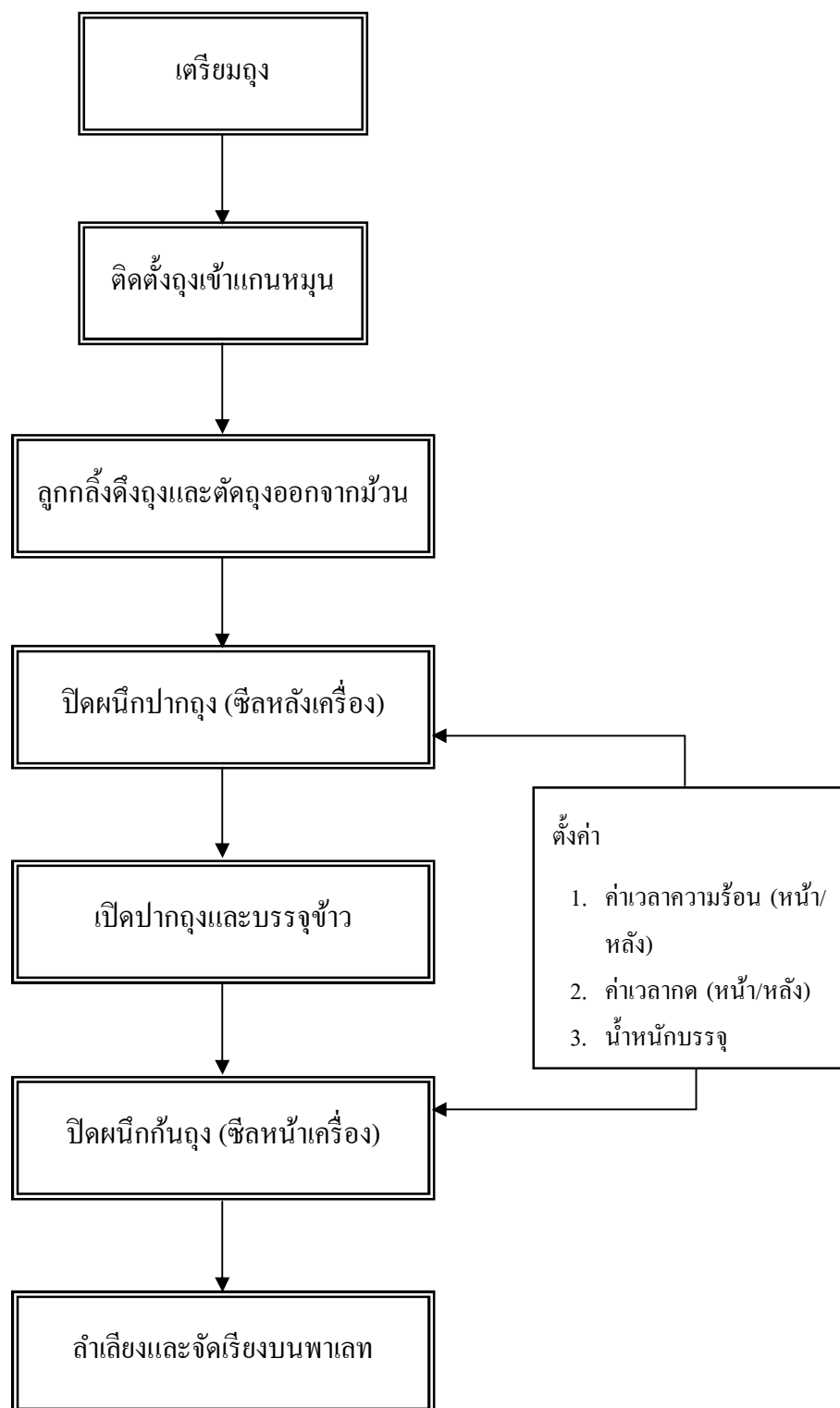
ในบางช่วงของความต้องการของผู้บริโภคน้อย บางครั้งก็อาจจะมีการจัดเก็บไว้เพื่อรอความต้องการของผู้บริโภค จึงมีการจัดเก็บไว้แต่ข้าวสารที่จัดเก็บนั้นได้ผ่านกระบวนการแปรรูปทุกขั้นตอนแล้วเพียงแค่รอการบรรจุใส่ถุงเท่านั้น



ภาพประกอบ 27 ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์รอการบรรจุ

3.1.7 บรรจุผลิตภัณฑ์

ก่อนเริ่มบรรจุผลิตภัณฑ์ พนักงานจะเบิกขนาดถุงของผลิตภัณฑ์ที่สั่งผลิตมาติดตั้งที่แกนส่งถุง ตั้งวันที่และหมายเลขผลิต ตั้งค่าที่ใช้ในการพ่นึกถุง (ผู้วิจัยขอกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อการวิเคราะห์ปัญหา) เช่น ค่าเวลาความร้อน ค่าเวลากด และน้ำหนักข้าว เป็นต้น โดยมีขั้นตอนในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 กระบวนการบรรจุข้าวสารบรรจุถุง

ในกระบวนการบรรจุเป็นส่วนที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการปิดผนึกถุงซึ่งเป็นปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยข้อมูลที่เสนอในบทที่ 1 เป็นข้อมูลของเครื่องจักรเดิมก่อนที่โรงงานกรณีศึกษาจะได้รับผลกระทบจากอุทกภัยช่วงปลายปี 2554 ซึ่งมีลักษณะของเครื่องจักร กระบวนการ ดังภาพประกอบ 29 – 33 และค่าที่ใช้ในการตั้งเครื่องดังภาพประกอบ 34 - 35



ภาพประกอบ 29 การดึงถุงบรรจุผ่านตำแหน่งในเครื่องบรรจุ (เดิม)



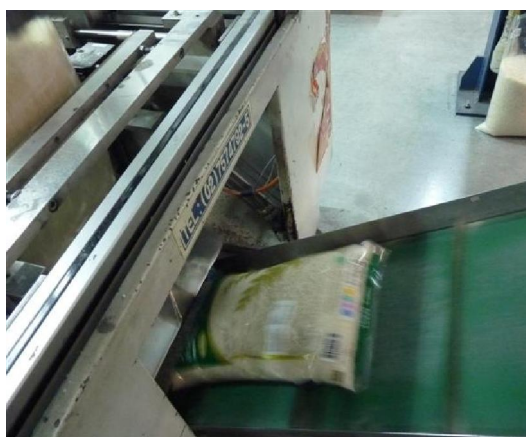
ภาพประกอบ 30 การตัดถุง พิมพ์วันที่ผลิตและปิดผนึกปากถุง (หลังเครื่อง) (เดิม)



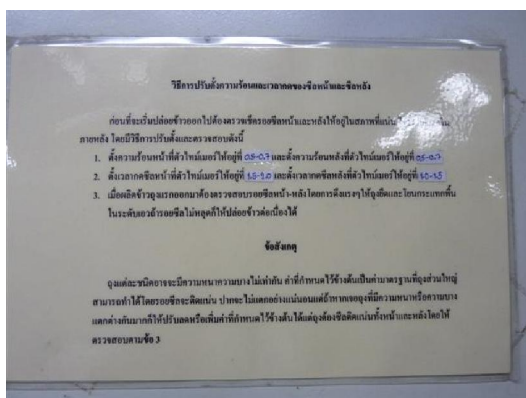
ภาพประกอบ 31 การจับปากถุงและบรรจุข้างลงถุง (เดิม)



ภาพประกอบ 32 การปิดผนึกกันถุง (หน้าเครื่อง) (เดิม)



ภาพประกอบ 33 การลำเลียงไปยังพาเลท (เดิม)



ภาพประกอบ 34 การปรับตั้งค่าสำหรับปิดผนึกกันถุง (เดิม)



ภาพประกอบ 35 การปรับตั้งค่าน้ำหนักข้าว (เดิม)

อย่างไรก็ตามภายหลังจากอุทกภัยในเดือนตุลาคม 2554 โรงงานกรณีศึกษาได้ดำเนินการติดตั้งเครื่องจักรชนิดใหม่ในเดือนมิถุนายน 2555 ซึ่งใช้ระบบดิจิทัลในการตั้งค่าในกระบวนการบรรจุทั้งหมด แทนระบบอนาล็อกของเครื่องจักรชนิดเดิม โดยกระบวนการบรรจุคงลักษณะเดิมแต่ค่าที่ใช้ในการตั้งค่าเครื่องจักรได้เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรในการตั้งเครื่อง

ระบบอนาล็อก (เดิม)	ระบบดิจิทัล (ใหม่)
เวลากดปิดผนึกหลัง	เวลากดปิดผนึกหลังพร้อมเป่าลม
เวลาเป่าลมหลัง	
เวลากดปิดผนึกหน้า	เวลากดปิดผนึกหน้าพร้อมเป่าลม
เวลาเป่าลมหน้า	
เวลาความร้อนหน้า	เวลาความร้อนหน้า
เวลาความร้อนหลัง	เวลาความร้อนหลัง
แรงดันลม	แรงดันลม
น้ำหนักบรรจุ	น้ำหนักบรรจุ

*เวลาเข้าถุงกับเวลาปล่อยข้าวไม่ได้ใช้เนื่องจากใช้น้ำหนักบรรจุเป็นค่าควบคุม

จากข้อมูลในตารางที่ 4 พบว่า ตัวแปรที่ใช้ในการตั้งเครื่องลดลงทำให้สามารถตั้งค่าได้ง่ายขึ้น รวมทั้งเครื่องจักรระบบดิจิทัลได้เปรียบเครื่องจักรระบบอนาล็อกในด้านความแม่นยำและความเสถียร โดยกระบวนการบรรจุข้าวสารบรรจุถุงโดยละเอียดเป็นดังนี้ (ภาพบางส่วนไม่สามารถนำมาแสดงได้เนื่องจาก ไม่ต้องการเปิดเผยรายละเอียดของเครื่องจักรใหม่)

1. เตรียมถุง

ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตได้มีการจัดเตรียมถุงข้าวสารและติดตั้งเครื่องบรรจุข้าวสาร โดยจะขอกกล่าวถุงที่นำมาใช้ จำนวนปริมาณถุงต่อม้วนเฉลี่ยประมาณ 1024 ใบ มีผู้ผลิตจำหน่ายถุงให้แก่ทางบริษัทจำนวน 3 บริษัทที่มีขนาดความหนาและลักษณะของสีถุงต่างกัน ได้แก่ ถุงสีใสและถุงสีขุน รวมทั้งแบ่งความหนาตามข้อกำหนดเป็น 2 ขนาด คือ ชนิดบาง $90 \pm 20 \mu\text{m}$ และชนิดหนา $110 \pm 12 \mu\text{m}$ ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 ถุงบรรจุข้าวสารที่รอการใช้งาน

2. ติดตั้งถุงบรรจุข้าวสาร

นำถุงม้วนไปติดตั้งที่ตัวเครื่อง Packing บรรจุข้าวสาร ตามช่วงการผลิตแล้วล๊อคตัวสกรูที่ตำแหน่งกันเลื่อนไถลของแกนม้วน ดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 การติดตั้งถุงบรรจุข้าวสาร (เครื่องจักรใหม่)

3. ลูกกลิ้งดึงถุง

ลูกกลิ้งจะหมุนดึงถุงเข้าไปสู่เครื่องจักร พร้อมทำการพิมพ์หมายเลขรุ่นที่ผลิตและวันที่

ผลิต



ภาพประกอบ 38 การตัดถุงแยกออกจากกัน

4. การปิดผนึกปากถุง

ทำการปิดผนึกถุงพลาสติกจากกระบวนการให้ความร้อนด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดที่ประกอบไว้ในแท่งโลหะบนล่าง โดยมีถุงพลาสติกอยู่ระหว่างกลางและมีการเป่าลมเพื่อให้รอยผนึกยื่นตัวลงระหว่างที่มีการประกบ ซึ่งเป็นการปิดผนึกแนวนอน ดังภาพประกอบ 39 การตั้งค่าความร้อน การตั้งค่าเวลาการกดและเวลาเป่าลม จะทำให้รอยผนึกมีความแข็งแรง จากนั้นเครื่องจักรทำการตัดแยกถุงออกจากม้วน โดยจะมีเซ็นเซอร์สีเป็นตัวกำหนดระยะการตัดและแนวตัดของถุง



ภาพประกอบ 39 การปิดผนึกปากถุง (ปิดผนึกหลังเครื่อง)

5. การเทข้าวใส่ถุงข้าวสาร

จากนั้นข้าวสารก็จะไหลลงมาเข้าถุง โดยมีการกำหนดปริมาณข้าวสารภายในถุงด้วยอุปกรณ์ Load Cell เช่นเดียวกับเครื่องจักรเดิม

6. การปิดผนึกก้นถุงข้าวสาร

ทำการผนึกถุงพลาสติกจากกระบวนการให้ความร้อนและความดันแบบเดียวกับการปากถุง แต่ข้อแตกต่างของระบบการปิดผนึกก้นถุงจะมีกระบวนการและอุปกรณ์แม่กเนตริกมากกว่าปิดผนึกปากถุง รวมทั้งเป็นการปิดผนึกในแนวตั้งขณะที่การปิดผนึกปากถุงเป็นการปิดผนึกแนวนอน

7. การลำเลียงถุงข้าวสาร

เมื่อปิดผนึกกันถุงแล้ว ถุงข้าวสารที่ผ่านกระบวนการแล้วจะถูกลำเลียงตามรางเลื่อนลงสู่พื้นที่จัดเก็บด้านล่าง (ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องจักรใหม่อยู่สูงกว่าจุดเดิมประมาณ 2 เมตร) เพื่อทำการตรวจสอบของ QC และจัดเตรียมการจัดส่งต่อไป



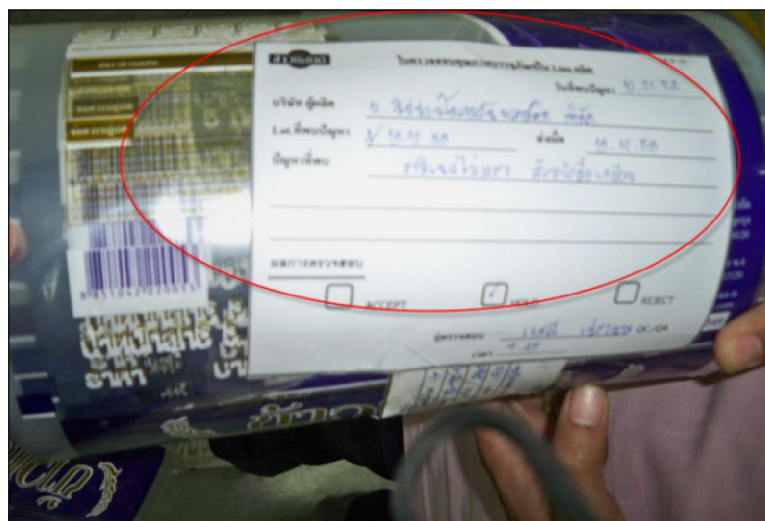
ภาพประกอบ 40 การลำเลียงถุงข้าวสาร

3.2 กระบวนการควบคุมคุณภาพ

เมื่อพิจารณาจากปัญหาคุณภาพของรอยผนึก กระบวนการควบคุมคุณภาพของโรงงาน ตัวอย่างที่เกี่ยวข้องมี 3 ส่วน คือ

3.2.1 การตรวจสอบวัตถุดิบถุงบรรจุ

เมื่อรับวัตถุดิบจากผู้ผลิต พนักงานควบคุมคุณภาพจะทำการตรวจสอบลักษณะภายนอกและความหนาของถุงบรรจุ ส่วนรายละเอียดทางด้านคุณสมบัติอื่นจะมีใบรับรองการทดสอบมาจากผู้ผลิตถุงบรรจุประกอบการส่งมอบ โดยมีลักษณะการตรวจสอบดังภาพประกอบ 41 และ 42



ภาพประกอบ 41 การตรวจสอบลักษณะภายนอกของถุงบรรจุ



ภาพประกอบ 42 การตรวจสอบความหนาของถุงบรรจุ

3.2.2 การทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึก

การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกทางโรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดให้พนักงานทำการปล่อยถุงข้าวที่มีการบรรจุและผนึกเรียบร้อยแล้วลงสู่พื้น (Drop Test) โดยทิ้งในแนวดิ่งที่ความสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร กรณีที่การตั้งค่าเครื่องจักรเหมาะสมถุงรอยปิดผนึกจะไม่แตกออกจากกัน ดังภาพประกอบ 43 รวมทั้งพนักงานอาจเพิ่มการทดสอบด้วยการดึงรอยปิดผนึกด้วยตนเอง



ภาพประกอบ 43 การทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (ปัจจุบัน)

3.2.3 การตรวจสอบการรั่วซึม

การตรวจสอบจาก QC ของทางบริษัทกรณีศึกษา โดยการสังเกตรอยปิดผนึกของถุง โดยอาศัยประสบการณ์ของฝ่าย QC นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบโดยอาศัยการสัมผัสและใช้มือตีบนถุงข้าวสาร พร้อมทั้งสังเกตแรงดันภายในถุง ถ้าหากแรงลมออกจากถุงได้น้อยแสดงว่ารอยปิดผนึกอยู่ในสภาพดี (ข้าวสารบรรจุถุงจะมีการเจาะรูขนาดเล็กไว้ประมาณ 2-4 รู)

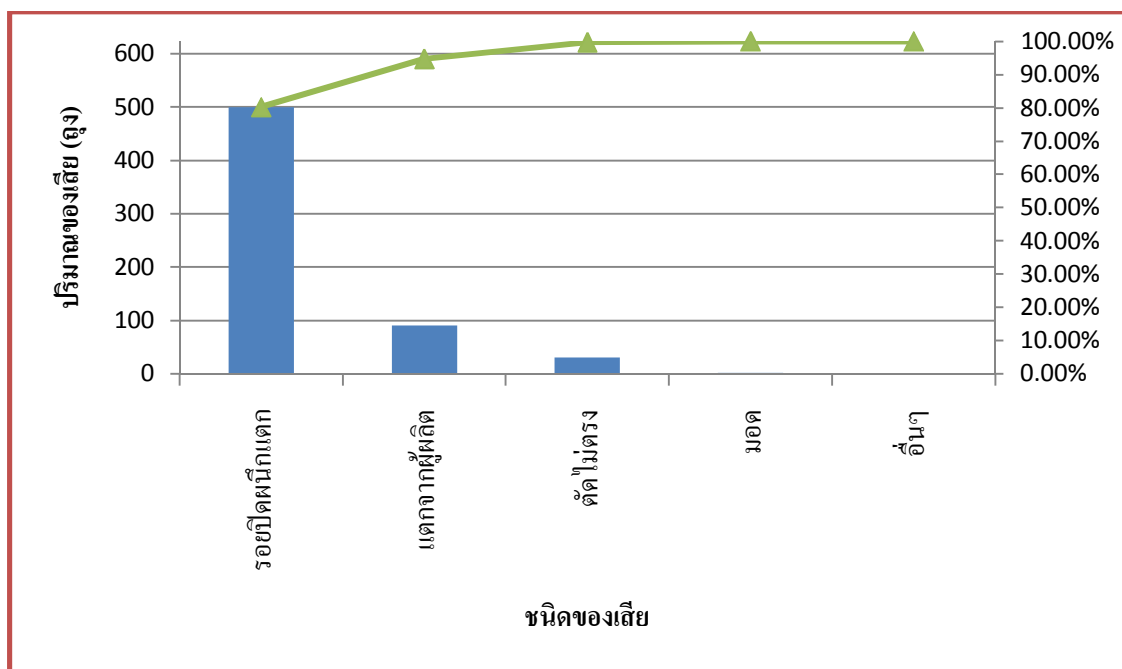
3.3 การวิเคราะห์ปัญหา

แม้ว่ากระบวนการผลิตข้าวบรรจุถุงยังเหมือนก่อนเกิดปัญหาอุทกภัย แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรจึงควรเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันปัญหาว่ายังคงเดิมหรือไม่ โดยผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียที่เกิดจากการผลิตระยะเวลา 1 เดือนในเดือนสิงหาคม 2555 ซึ่งมียอดการผลิตทั้งหมด 27,500 ถุง ภายหลังจากที่โรงงานกรณีศึกษาได้ติดตั้งเครื่องจักรและทดสอบความพร้อมของเครื่องจักรจนกระทั่งเริ่มผลิตจริงมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการกำหนดค่า ซึ่งข้อมูลที่แสดงดังตารางที่ 5 ทำให้เห็นว่า คุณภาพการปิดผนึกถุงข้าวสารยังคงเป็นปัญหาสำคัญ และชัดเจนมากขึ้นจากการใช้งานเครื่องจักรใหม่ที่พนักงานยังไม่คุ้นเคยกับการปรับค่าตั้งเครื่อง

ตารางที่ 5 สัดส่วนของเสียในการผลิตข้าวถุงขนาด 5 กิโลกรัม (เครื่องจักรใหม่)

ลำดับที่	ชนิดของเสีย	ปริมาณของเสีย (ถุง)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)	เปอร์เซ็นต์สะสม (%)
1	รอยปิดผนึกแตก	500	80.26	80.26
2	แตกจากผู้ผลิต	90	14.45	94.71
3	ตัดไม่ตรง	31	4.97	99.68
4	มอด	2	0.32	100.00
5	อื่นๆ	0	0.00	100.00
รวม		623	100	-

ข้อมูลในตารางที่ 5 สามารถนำมาสร้างแผนภูมิพาร์โต้เพื่อชี้บ่งปัญหาหลักของของเสียให้มีความชัดเจนขึ้นดังภาพประกอบ 44 ซึ่งพบว่า กว่าร้อยละ 80 ของจำนวนของเสียทั้งหมดเกิดจากปัญหารอยปิดผนึกแตก โดยตามหลักการแล้วการแก้ปัญหาคควรเริ่มต้นจากปัญหาที่มีจำนวนมากก่อน สำหรับปัญหารอยปิดผนึกแตก แยกออกเป็น 3 ปัญหาย่อยได้คือ รอยปิดผนึกขาด รอยปิดผนึกไม่ติด และรอยปิดผนึกพับ ดังภาพประกอบ 45-47 โดยมีจำนวนของเสีย 219, 187 และ 94 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 44 แผนภูมิฟาร์โตของเสียของข้าวบรรจุถุง



ภาพประกอบ 45 ตัวอย่างรอยปิดผนึกขาด

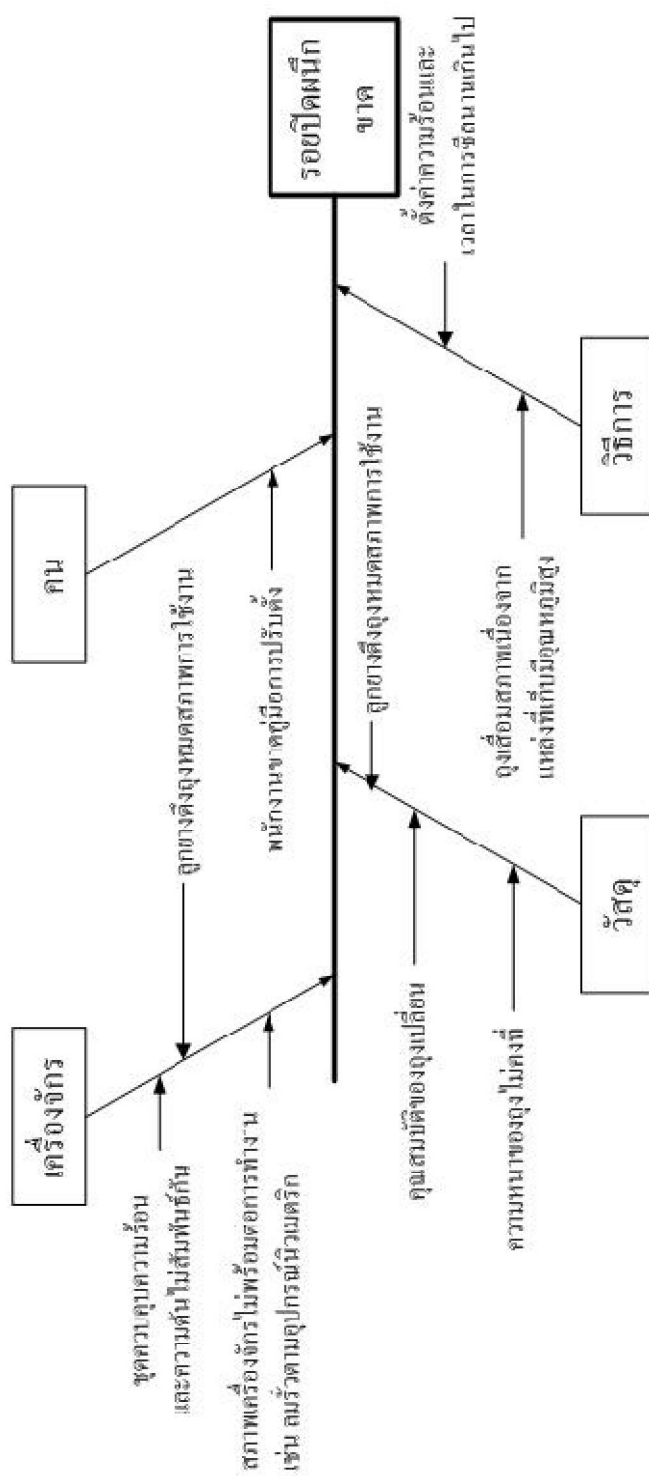


ภาพประกอบ 46 ตัวอย่างรอยปิดผนึกไม่ติด

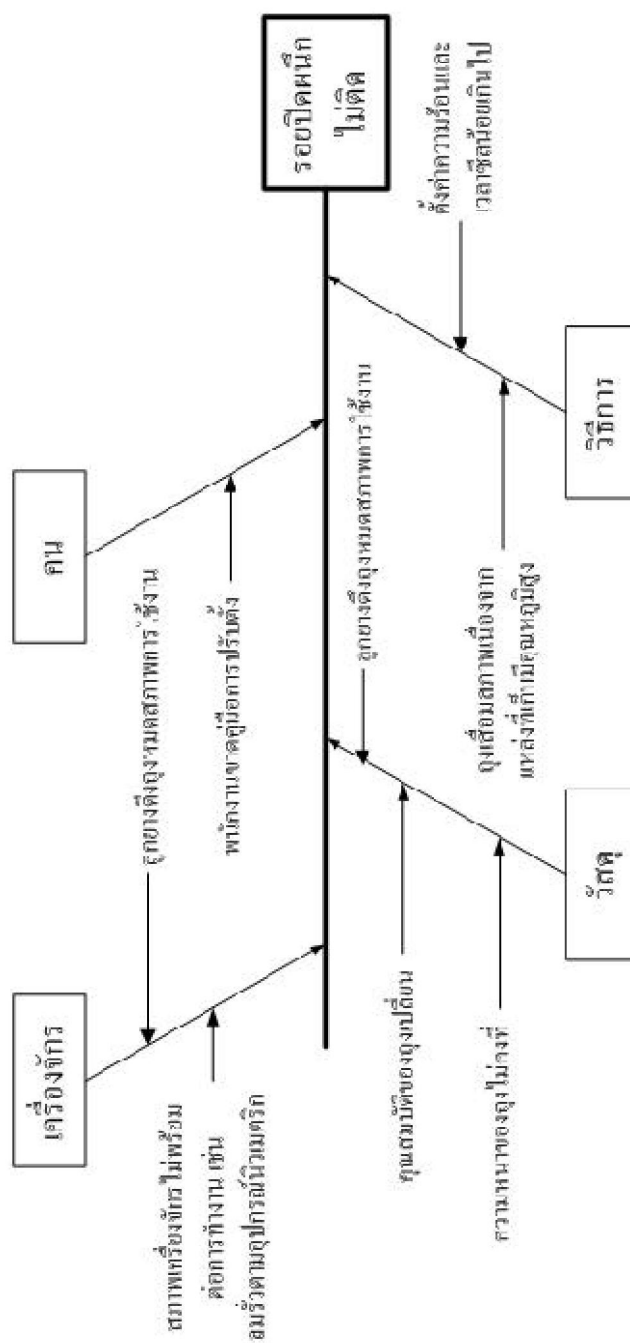


ภาพประกอบ 47 ตัวอย่างรอยปิดผนึกพับ

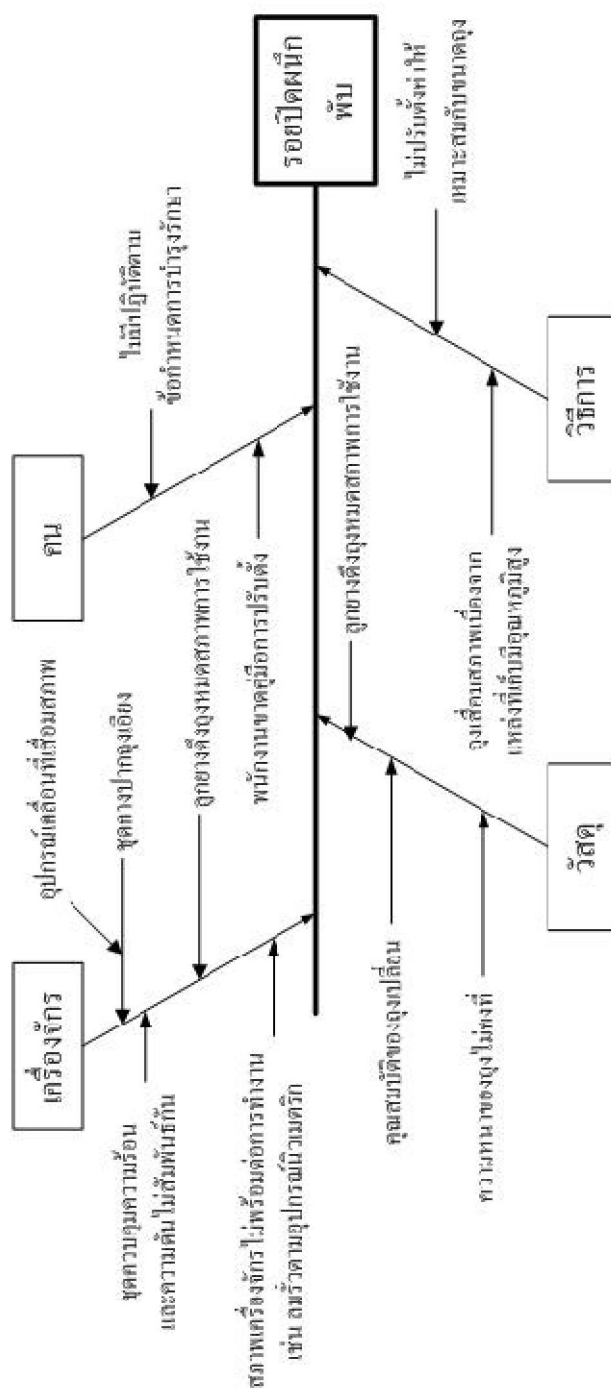
ปัญหาคุณภาพของรอยปิดผนึกสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุได้จากแผนภาพแสดงเหตุและผล (Cause-and-Effect Diagram) โดยทำการวิเคราะห์หาสาเหตุแยกเป็น 4 กลุ่ม (4M) คือ สาเหตุจากคน (Man) สาเหตุจากวิธีการ (Method) สาเหตุจากเครื่องจักร (Method) และสาเหตุจากวัสดุ (Materials) ซึ่งวิเคราะห์ได้ดังภาพประกอบ 48 - 50



ภาพประกอบ 48 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกขาด)



ภาพประกอบ 49 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกไม่ติด)



ภาพประกอบ 50 แผนภาพแสดงเหตุและผล (รอยปิดผนึกพับ)

ปัญหาคุณภาพรอยปิดผนึกทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์ร่วมกันผู้เกี่ยวข้องของโรงงานกรณีศึกษาแล้ว พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวคือ การกำหนดค่าในการตั้งเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสมกับความหนาของถุง เนื่องจากความหนาของถุงที่ได้รับจากผู้ผลิตมีความแตกต่างกันในแต่ละม้วนถึงแม้ว่าขนาดจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แต่เมื่อตั้งค่าเครื่องจักรเท่าเดิมย่อมทำให้รอยผนึกมีความแข็งแรงแตกต่างกัน

3.4 การทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (ปัจจุบัน)

ปัญหาคุณภาพของรอยปิดผนึกส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการควบคุมคุณภาพประกอบไม่มีข้อกำหนดที่ชัดเจนในการทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึกดังที่กล่าวแล้วในส่วนที่ 3.2 โดยทดสอบด้วยพนักงานด้วยการปล่อยถุงข้าวที่ผ่านกระบวนการบรรจุแล้วในแนวดิ่ง (Drop Test) และการใช้แรงดึงด้วยมือ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความไม่แน่นอนทั้งระยะในการปล่อย แรงดึง และองศาการดึง เป็นวิธีการที่ไม่สามารถยืนยันได้ว่ารอยผนึกมีความแข็งแรงทนทานเพียงพอ

ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของรอยผนึกจึงต้องทำการศึกษาเพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (Seal Strength) ที่ได้จากระบวนการผลิตในปัจจุบันเสียก่อน โดยเก็บตัวอย่างถุงบรรจุข้าวซึ่งผ่านกระบวนการปิดผนึกเรียบร้อยแล้ว (ไม่ได้บรรจุข้าว) จำนวน 30 ตัวอย่างต่อขนาดความหนา ทดสอบที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย (ศบท.) ตามมาตรฐาน ASTM F88/F88M -06 มาตรฐานวิธีการทดสอบสำหรับค่าความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งกล่าวแล้วในส่วนที่ 2.1.4 ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 6 (ทดสอบ 2 จุดต่อตัวอย่าง รวม 60 จุด) โดยมีภาวะการทดสอบ และหน่วยวัดดังนี้

วิธีทดสอบ/วิเคราะห์: -

ASTM F 88-06 Seal Strength of Flexible Barrier Materials

ภาวการณ์ทดสอบ: -

อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 2 %

ระยะห่างระหว่างปากจับ 10 มิลลิเมตร

อัตราเร็วในการดึง 275 มิลลิเมตรต่อนาที

หน่วยวัด: -

กิโลกรัมแรงต่อความกว้าง 25.4 มิลลิเมตร (kgf/25.4 mm. width)

ตารางที่ 6 ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (ปัจจุบัน)

ชนิดถุง	ตำแหน่งรอยปิดผนึก	ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (kgf/25.4 mm. width)			
		ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
บาง (90±20 µm)	ปากถุง	4.66	3.93	2.54	0.35
	ก้นถุง	4.99	4.21	3.50	0.37
หนา (100±12 µm)	ปากถุง	8.97	7.99	6.38	0.68
	ก้นถุง	8.81	6.61	2.18	1.50

*ข้อมูลการทดสอบทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก

จากตารางที่ 6 ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกภายหลังปรับปรุงควรสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ทดสอบได้ในครั้งนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานว่า ถุงบรรจุที่มีความหนาแตกต่างกันมีค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้รูปแบบการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน (Hypothesis Testing for Two Independent Samples) ประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab R15 ซึ่งผลเป็นไปดังภาพประกอบ 51 - 52 สรุปว่า ถุงบรรจุที่มีความหนาแตกต่างกันมีค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกแตกต่างกัน เนื่องจาก P-value = 0.00 ของทั้ง 2 การทดสอบ มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ (α) 0.05 ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงแยกถุงทั้ง 2 ประเภทออกจากกัน

Two-Sample T-Test and CI: Slim Top, Thick Top

Two-sample T for Slim Top vs Thick Top

	N	Mean	StDev	SE Mean
Slim Top	60	3.930	0.350	0.045
Thick Top	60	7.992	0.683	0.088

Difference = mu (Slim Top) - mu (Thick Top)

Estimate for difference: -4.0622

95% CI for difference: (-4.2590, -3.8653)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -41.02 P-Value = 0.000 DF = 87

ภาพประกอบ 51 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก
ของถุงชนิดบางและหนา (ปากถุง)

Two-Sample T-Test and CI: Slim Bottom, Thick Bottom

Two-sample T for Slim Bottom vs Thick Bottom

	N	Mean	StDev	SE Mean
Slim Bottom	60	4.206	0.371	0.048
Thick Bottom	60	6.61	1.50	0.19

Difference = μ (Slim Bottom) - μ (Thick Bottom)

Estimate for difference: -2.406

95% CI for difference: (-2.806, -2.007)

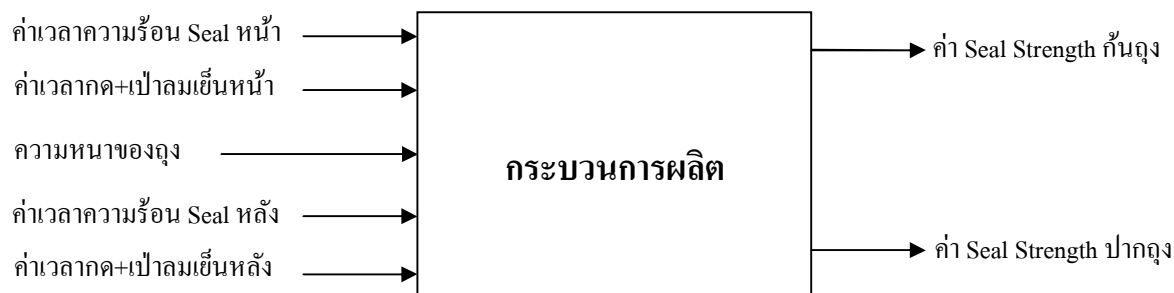
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -12.03 P-Value = 0.000 DF = 66

ภาพประกอบ 52 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก
ของถุงชนิดบางและหนา (ก้นถุง)

3.5 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

เมื่อพิจารณาข้อมูลทางเทคนิคประกอบแผนภาพแสดงเหตุและผลร่วมกับผู้ที่เกี่ยวข้องพบว่า ปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของกระบวนการปิดผนึกถุงข้าวสาร แสดงดังภาพประกอบ 53 ซึ่งสามารถสรุปประเด็นปัจจัยที่นำมาทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผนึกถุงข้าวสาร ได้ดังนี้

- แรงดันลมเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการปิดผนึก แต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ต้องควบคุมไว้ที่ค่าคงที่ตามข้อมูลทางเทคนิค
- ปัจจัยในการตั้งค่าเครื่องจักรเพื่อปิดผนึกถุงข้าวสารระหว่างปากถุงและก้นถุงเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำงานแยกจากกันอย่างชัดเจน



ภาพประกอบ 53 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก

ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนอง (Responses) ทำให้สามารถวางแผนการทดลองโดยใช้ 3^3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (3^3 Full Factorial Design) และในแต่ละวิธีปฏิบัติ (Treatment) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replication) กับถุงบรรจุ 2 ชนิด คือ ชนิดบาง และชนิดหนา รวมทั้งหมด 324 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือและเหมาะสมกับค่าใช้จ่ายในการทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึก โดยระดับในการทดลองของแต่ละปัจจัยมีหลักในการเลือกคือ ค่ากลางเป็นค่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ส่วนค่าสูงและต่ำพิจารณาความเหมาะสมทางด้านเทคนิค ซึ่งพิจารณาร่วมกับเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตได้ดังนี้

1. ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกปากถุง

- ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง 3 ระดับ (Heat Time)
- ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหลัง 3 ระดับ (Press Time)
- ความหนาของถุง 3 ระดับต่อชนิด (เหมือนกับระดับปัจจัยของก้นถุง) (Thickness)

ตารางที่ 7 ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยปิดผนึกปากถุง (ถุงชนิดหนา)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ระดับความหนา (μm)	110+10	110+12	110+15
ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (วินาที)	0.6	0.7	0.8
ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหลัง (วินาที)	0.4	0.5	0.6

ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยปิดผนึกปากถุง (ถุงชนิดบาง)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ระดับความหนา (μm)	90+10	90+15	90+20
ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (วินาที)	0.35	0.45	0.55
ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหลัง (วินาที)	0.45	0.55	0.65

2. ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกก้นถุง

- ค่าเวลาความร้อน Seal หน้า 3 ระดับ
- ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหน้า 3 ระดับ
- ความหนาของถุง 3 ระดับต่อชนิด (เหมือนกับระดับปัจจัยของปากถุง)

ตารางที่ 9 ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยปิดผนึกกันถุง (ถุงชนิดหนา)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ระดับความหนา (μm)	110+10	110+12	110+15
ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (วินาที)	0.55	0.65	0.75
ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหลัง (วินาที)	0.4	0.5	0.6

ตารางที่ 10 ระดับของปัจจัยในการทดลองหาค่าความแข็งแรงรอยผนึกปิดกันถุง (ถุงชนิดบาง)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ระดับความหนา (μm)	90+10	90+15	90+20
ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (วินาที)	0.32	0.42	0.52
ค่าเวลากด+เป่าลมเย็นหลัง(วินาที)	0.67	0.87	0.99*

*ค่าที่เครื่องตั้งได้สูงสุด

จากแผนการทดลองดังตารางที่ 7-10 ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงรอยรอยปิดผนึก มีรูปแบบดังตารางที่ 11 ซึ่งผลการทดสอบและการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตั้งค่าเครื่องจักรได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 11 การออกแบบการทดลองแบบ 3^3 Full Factorial Design

Run	Thickness	Heat Time	Press Time	Seal Strength		
				Rep#1	Rep#2	Rep#3
1	-1	-1	-1			
2	-1	-1	0			
3	-1	-1	1			
4	-1	0	-1			
5	-1	0	0			
6	-1	0	1			
7	-1	1	-1			
8	-1	1	0			
9	-1	1	1			

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Run	Thickness	Heat Time	Press Time	Seal Strength		
				Rep#1	Rep#2	Rep#3
10	0	-1	-1			
11	0	-1	0			
12	0	-1	1			
13	0	0	-1			
14	0	0	0			
15	0	0	1			
16	0	1	-1			
17	0	1	0			
18	0	1	1			
19	1	-1	-1			
20	1	-1	0			
21	1	-1	1			
22	1	0	-1			
23	1	0	0			
24	1	0	1			
25	1	1	-1			
26	1	1	0			
27	1	1	1			

3.6 แนวทางวิเคราะห์ผลการทดลองและกำหนดค่าพารามิเตอร์

ภายหลังจากที่ได้รับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกแล้ว ต้องการทำวิเคราะห์ใน 2 ส่วนคือ

1. การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองสำหรับทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อยืนยันว่าการทดลองดังกล่าวเป็นไปตามสมมุติฐาน คือ ค่าความผิดพลาดหรือค่าความคาด

เคลื่อนมีการกระจายแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า จึงจะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไปได้

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก และนำไปสู่การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับตั้งเครื่องจักรในการผลิตข้าวบรรจุถุงด้วยกราฟผลกระทบหลักหรือกราฟค่าเฉลี่ย และกราฟอันตรกิริยาของปัจจัยหลัก

3.7 การดำเนินการใช้ค่าพารามิเตอร์

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดลองใช้ตั้งค่าเครื่องจักร พร้อมกับเก็บข้อมูลสัดส่วนของเสียเพื่อเปรียบเทียบกับที่ตั้งค่าเครื่องจักรแบบเดิม

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทที่ 4 ผู้วิจัยขอกล่าวถึงแนวทางในดำเนินงานกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยป็นิก เพื่อนำผลไปกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับป็นิกถุงบรรจุข้าวสารต่อไปดังนี้

1. การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองสำหรับทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน
3. ผลดำเนินการใช้งานค่าพารามิเตอร์

4.1 การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองสำหรับทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยป็นิกจากศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย (สบท.) ตามมาตรฐาน ASTM F88/F88M -06 มาตรฐานวิธีการทดสอบสำหรับค่าความแข็งแรงของวัสดุ ที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ดังตารางในภาคผนวก ข จำเป็นต้องทดสอบสมมุติฐาน 4 ข้อก่อนเสมอ ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้ โดยสมมุติฐานคือ การทดลองอาจมีความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อน (Residual) ได้ ดังนั้นจึงต้องทดสอบสมมุติฐาน โดยผลการทดสอบสมมุติฐานและวิเคราะห์เป็นไปตามหัวข้อที่ 4.1.1 – 4.1.4 และสรุปภาพรวมได้ตามตารางที่ 12 ดังนี้

4.1.1 ค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบปกติ

กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ของค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยป็นิกของปากถุง (ถุงหนา), ก้นถุง (ถุงหนา), ปากถุง (ถุงบาง) และก้นถุง (ถุงบาง) ในภาคผนวก ง ภาพประกอบ 64-67 พบว่า กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่า P-value > 0.05 ทั้งหมด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยป็นิกมีการแจกแจงปกติและข้อมูลนั้นเชื่อถือได้

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาด

ข้อสมมติฐานของค่าความผิดพลาด	ถุงหนา		ถุงบาง	
	ปากถุง	ก้นถุง	ปากถุง	ก้นถุง
ค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบปกติ	✓ (P-Value = 0.244)	✓ (P-Value = 0.114)	✓ (P-Value = 0.051)	✓ (P-Value = 0.074)
ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์	✓	✓	✓	✓
ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน	✓	✓	✓	✓
ค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า	✓	✓	✓	✓

✓ หมายถึง เป็นไปตามข้อสมมติฐาน

*ภาพประกอบการทดสอบสมมติฐานแสดงในภาคผนวก ง

4.1.2 ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

กราฟการกระจายของค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของปากถุง (ถุงหนา), ก้นถุง (ถุงหนา), ปากถุง (ถุงบาง) และก้นถุง (ถุงบาง) ในภาคผนวก ง ภาพประกอบ 68 – 71 พบว่า การกระจายของค่า Residual ในทุกภาพมีการกระจายค่ารอบเส้นศูนย์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

4.1.3 ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน

กราฟการกระจายของค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเทียบกับ Observation Order ของปากถุง (ถุงหนา), ก้นถุง (ถุงหนา), ปากถุง (ถุงบาง) และก้นถุง (ถุงบาง) ในภาคผนวก ง ภาพประกอบ 72 – 75 พบว่า การกระจายของค่า Residual ในทุกภาพไม่สามารถทำนายรูปแบบที่แน่นอนได้ หรือไม่แสดงถึงแนวโน้ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.1.4 ค่าความผิดพลาดมีค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า

กราฟการกระจายของค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเทียบกับ Fitted Value ของปากถุง (ถุงหนา), ก้นถุง (ถุงหนา), ปากถุง (ถุงบาง) และก้นถุง (ถุงบาง) ในภาคผนวก ง ภาพประกอบ 76-79 พบว่า การกระจายของค่า Residual ในทุกภาพจากแนวเส้นศูนย์มีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่าความแปรปรวนคงที่

ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเทียบกับปัจจัยหลัก คือ เวลากดและเป่าลมเย็น (Press Time) เวลาความร้อน (Heat Time) และความหนา (Thickness) แล้ว พบว่า มีความกว้างของแถบคงที่แสดงว่าค่า Residual ของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่าความแปรปรวนคงที่ โดยพิจารณาได้จากการกระจายตัวบริเวณบนเส้นและใต้เส้น รวมทั้งระยะห่างระหว่างระดับของปัจจัยมีค่าใกล้เคียงกันหรือความกว้างของแถบคงที่ ดังภาคผนวก ง ภาพประกอบ 80 – 91

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

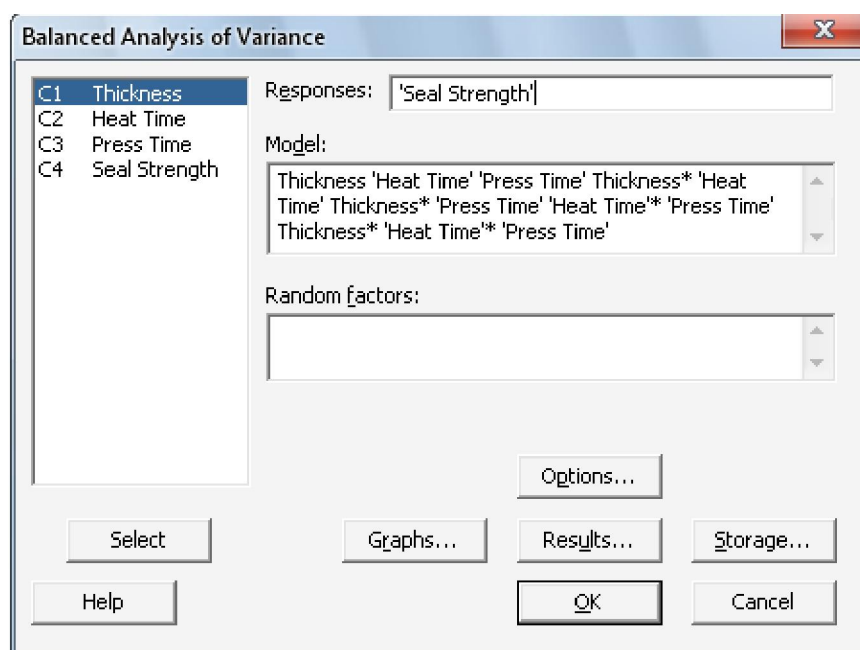
เมื่อพิจารณาสมมุติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนทั้ง 4 ประเด็นในหัวข้อ 4.1 แล้ว สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือเพียงพอและสามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน - ถุงหนา (ปากถุง)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงหนา (ปากถุง) โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ในฟังก์ชัน Balanced Analysis of Variance ดังภาพประกอบ 54 ให้ผลดังภาพประกอบ 55 ซึ่งสรุปได้ว่า ปัจจัยหลัก (ความหนา และเวลาความร้อน) และ ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (ความหนากับเวลาความร้อน, ความหนากับเวลากดและเป่าลมเย็น) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก เนื่องจากมีค่า P-Value < 0.05 อย่างไรก็ตามเมื่อผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญจะไม่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบร่วมนั้น

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนากับเวลาความร้อน และ ความหนากับเวลากดและเป่าลมเย็น ซึ่งต้องวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plot) ดังภาพประกอบ 56 โดยพบว่า ค่าระดับปัจจัยความหนา 120

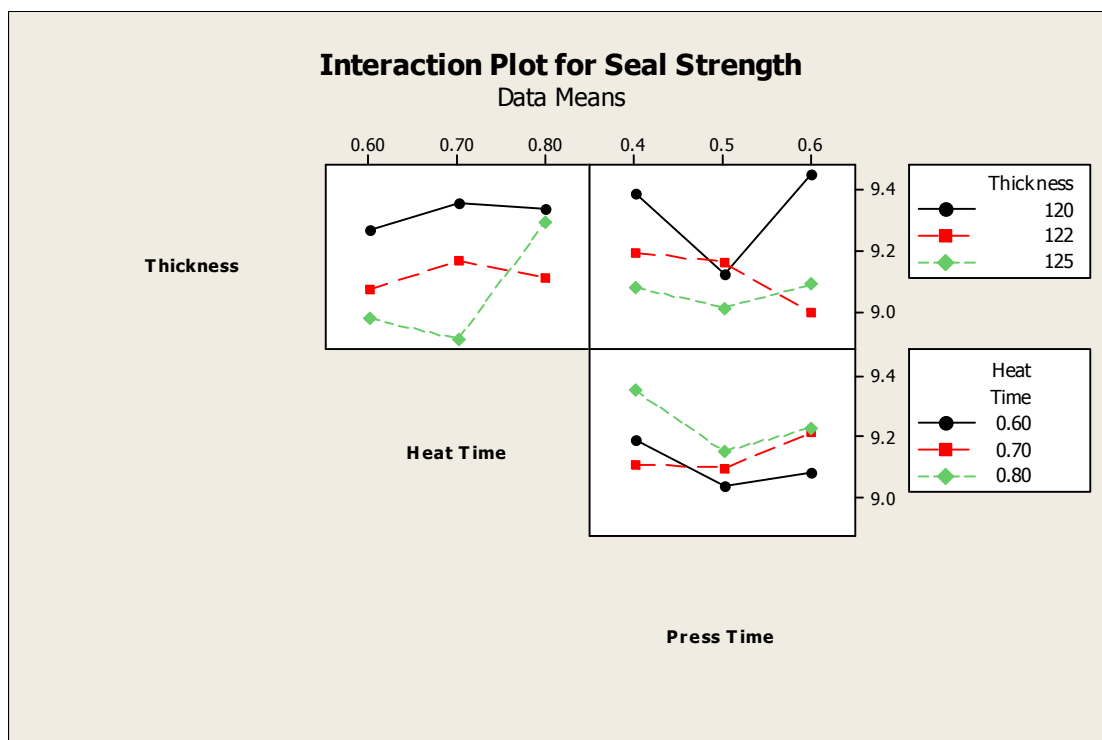
(110+10) μm เวลากดและเป่าลมเย็น 0.6 วินาที และเวลาความร้อน 0.7 วินาที ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่ามากที่สุด



ภาพประกอบ 54 การป้อนข้อมูลในฟังก์ชัน Balance Analysis of Variance ของถุงหนา (ปากถุง)

ANOVA: Seal Strength versus Thickness, Heat Time, Press Time						
Factor	Type	Levels	Values			
Thickness	fixed	3	120, 122, 125			
Heat Time	fixed	3	0.6, 0.7, 0.8			
Press Time	fixed	3	0.4, 0.5, 0.6			
Analysis of Variance for Seal Strength						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Thickness	2	1.00323	0.50162	12.25	0.000	
Heat Time	2	0.28904	0.14452	3.53	0.036	
Press Time	2	0.20919	0.10459	2.55	0.087	
Thickness*Heat Time	4	0.54898	0.13724	3.35	0.016	
Thickness*Press Time	4	0.58029	0.14507	3.54	0.012	
Heat Time*Press Time	4	0.16231	0.04058	0.99	0.420	
Thickness*Heat Time*Press Time	8	0.66957	0.08370	2.04	0.058	
Error	54	2.21073	0.04094			
Total	80	5.67334				
S = 0.202335 R-Sq = 61.03% R-Sq(adj) = 42.27%						

ภาพประกอบ 55 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงหนา (ปากถุง)



ภาพประกอบ 56 กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงหนา (ปากถุง)

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน - ถุงหนา (ก้นถุง)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงหนา (ก้นถุง) โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ในฟังก์ชัน Balanced Analysis of Variance ให้ผลดังภาพประกอบ 57 ซึ่งสรุปได้ว่า ปัจจัยหลัก (ความหนา และเวลาความร้อน) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก เนื่องจากมีค่า P-Value < 0.05 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ค่าความเชื่อมั่น 90% พบว่า ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (ความหนากับเวลาความร้อน) อาจมีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก เนื่องจากมีค่า P-Value < 0.10 ดังนั้นเมื่อผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญจะไม่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบร่วมนั้น

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนากับเวลาความร้อน ซึ่งต้องวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plot) ดังภาพประกอบ 58 โดยพบว่า ค่าระดับปัจจัยความหนา 120 (110+10) μm เวลากดและเป่าลมเย็น 0.5 วินาที และเวลาความร้อน 0.65 วินาที ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่ามากที่สุด

ANOVA: Seal Strength versus Thickness, Heat Time, Press Time

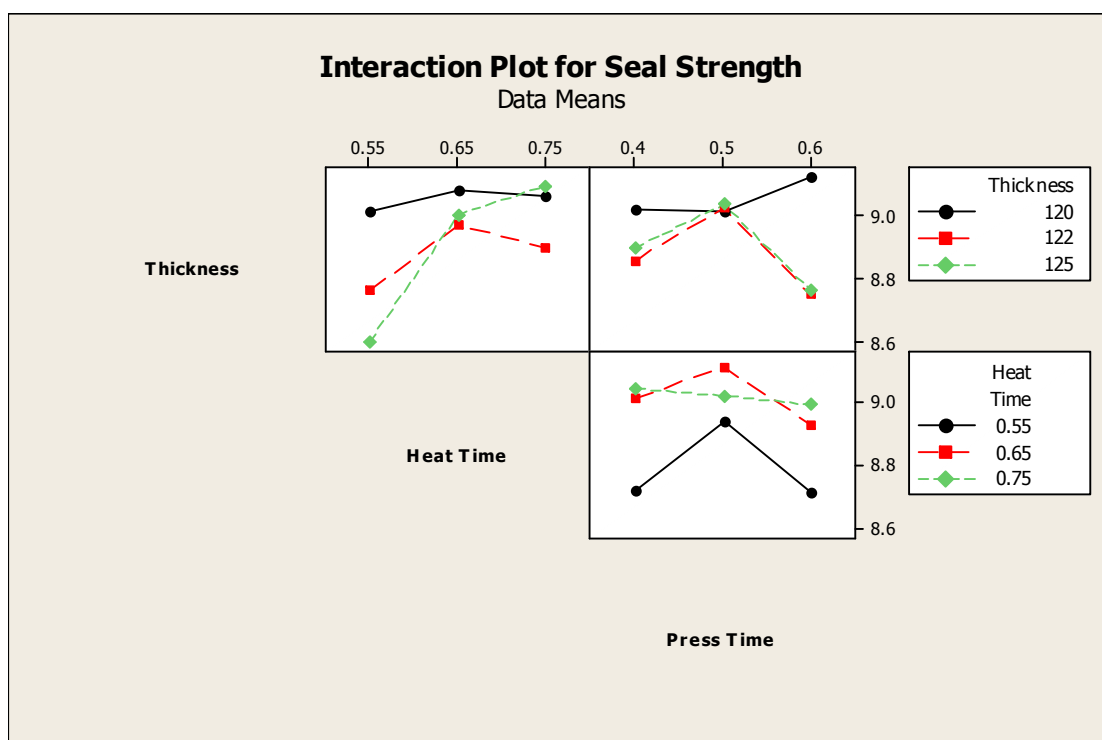
Factor	Type	Levels	Values
Thickness	fixed	3	120, 122, 125
Heat Time	fixed	3	0.55, 0.65, 0.75
Press Time	fixed	3	0.4, 0.5, 0.6

Analysis of Variance for Seal Strength

Source	DF	SS	MS	F	P
Thickness	2	0.48687	0.24343	3.79	0.029
Heat Time	2	0.92936	0.46468	7.24	0.002
Press Time	2	0.30121	0.15060	2.34	0.106
Thickness*Heat Time	4	0.54098	0.13524	2.11	0.093
Thickness*Press Time	4	0.44666	0.11166	1.74	0.155
Heat Time*Press Time	4	0.15939	0.03985	0.62	0.650
Thickness*Heat Time*Press Time	8	0.41310	0.05164	0.80	0.602
Error	54	3.46807	0.06422		
Total	80	6.74562			

S = 0.253423 R-Sq = 48.59% R-Sq(adj) = 23.83%

ภาพประกอบ 57 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงหนา (ก้นถุง)



ภาพประกอบ 58 กราฟผลกระทบหลักสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงหนา (ก้นถุง)

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน - อุบบาง (ปากถุง)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของอุบบาง (ปากถุง) โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ในฟังก์ชัน Balanced Analysis of Variance ให้ผลดังภาพประกอบ 59 ซึ่งสรุปได้ว่า ปัจจัยหลัก (ความหนา และเวลาความร้อน) ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (ความหนากับเวลาความร้อน ความหนากับเวลากดและเป่าลมเย็น เวลาความร้อนกับเวลากดและเป่าลมเย็น) และผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (ความหนากับเวลาความร้อนกับเวลากดและเป่าลมเย็น) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก เนื่องจากมีค่า P-Value < 0.05 อย่างไรก็ตามเมื่อผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญจะไม่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบร่วมนั้น

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนากับเวลาความร้อน ความหนากับเวลากดและเป่าลมเย็น เวลาความร้อนกับเวลากดและเป่าลมเย็น และความหนากับเวลาความร้อนกับเวลากดและเป่าลมเย็น ซึ่งต้องวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plot) ดังภาพประกอบ 60 โดยพบว่า ค่าระดับปัจจัยความหนา 110 (90+20) μm เวลากดและเป่าลมเย็น 0.55 วินาที และเวลาความร้อน 0.35 วินาที ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกมีค่ามากที่สุด

ANOVA: Seal Strength versus Thickness, Heat Time, Press Time

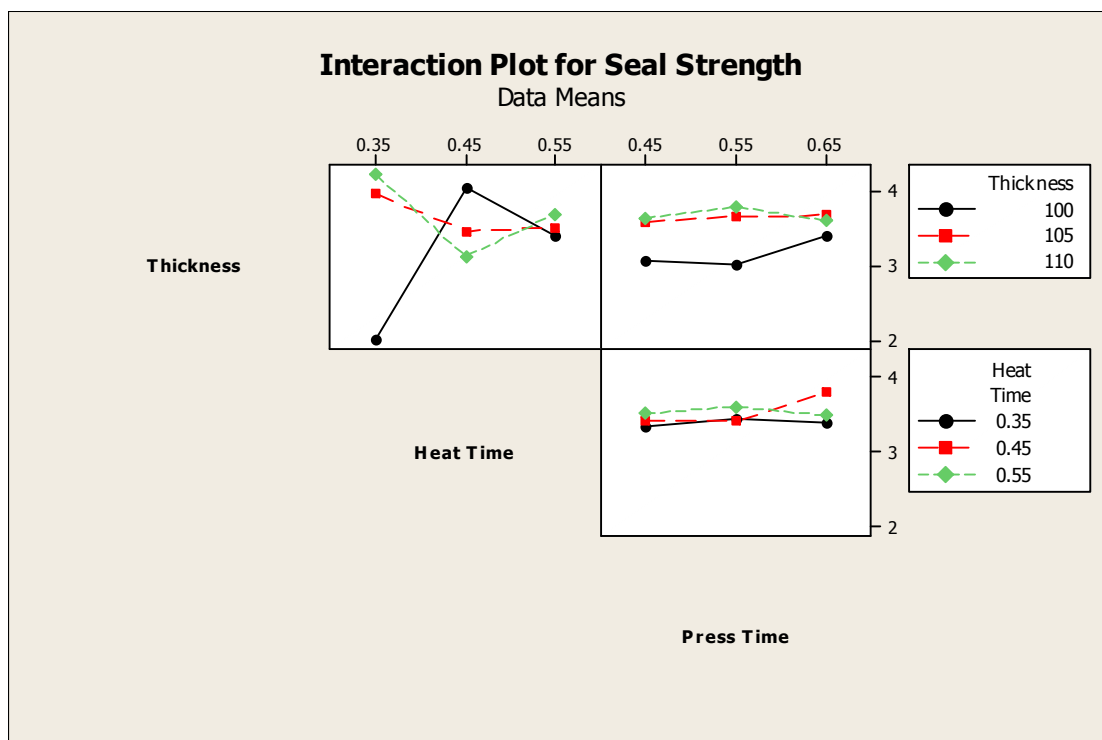
Factor	Type	Levels	Values
Thickness	fixed	3	100, 105, 110
Heat Time	fixed	3	0.35, 0.45, 0.55
Press Time	fixed	3	0.45, 0.55, 0.65

Analysis of Variance for Seal Strength

Source	DF	SS	MS	F	P
Thickness	2	4.5618	2.2809	54.15	0.000
Heat Time	2	0.3725	0.1862	4.42	0.017
Press Time	2	0.2261	0.1130	2.68	0.077
Thickness*Heat Time	4	25.9421	6.4855	153.96	0.000
Thickness*Press Time	4	0.8258	0.2064	4.90	0.002
Heat Time*Press Time	4	0.7619	0.1905	4.52	0.003
Thickness*Heat Time*Press Time	8	1.1764	0.1470	3.49	0.003
Error	54	2.2747	0.0421		
Total	80	36.1412			

S = 0.205243 R-Sq = 93.71% R-Sq(adj) = 90.68%

ภาพประกอบ 59 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุบบาง (ปากถุง)



ภาพประกอบ 60 กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงบาง (ปากถุง)

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน - ถุงบาง (ก้นถุง)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงบาง (ก้นถุง) โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ในฟังก์ชัน Balanced Analysis of Variance ให้ผลดังภาพประกอบ 61 สรุปว่า ปัจจัยหลัก (ความหนาและเวลาความร้อน) และผลกระทบรวม 2 ปัจจัย (ความหนากับเวลาความร้อน) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึก เนื่องจากมีค่า P-Value < 0.05 เมื่อผลกระทบรวมมีนัยสำคัญจะไม่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบรวมนั้น

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนากับเวลาความร้อน ซึ่งวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plot) ดังภาพประกอบ 62 พบว่า ค่าระดับปัจจัยความหนา 110 (90+20) μm เวลากดและเป่าลมเย็น 0.67 วินาที และเวลาความร้อน อาจเลือกใช้ ค่า 0.42 หรือ 0.52 วินาที ค่าใดค่าหนึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยผนึกมีค่ามากที่สุด จากการทดสอบ Multiple Comparison Method ของเวลาความร้อนด้วยวิธี Dunnett ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในกรณีที่เมื่อเปรียบที่กับการควบคุมปัจจัย (ในที่นี้ควบคุมปัจจัยเวลาความร้อน 0.42 วินาที) โดยในภาพประกอบ 63 พบว่า เวลาความร้อน 0.52 วินาทีมีค่าตกอยู่ในช่วง 0.00 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกสำหรับเวลาความร้อน 0.42 และ 0.52 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95%

ANOVA: Seal Strength versus Thickness, Heat Time, Press Time

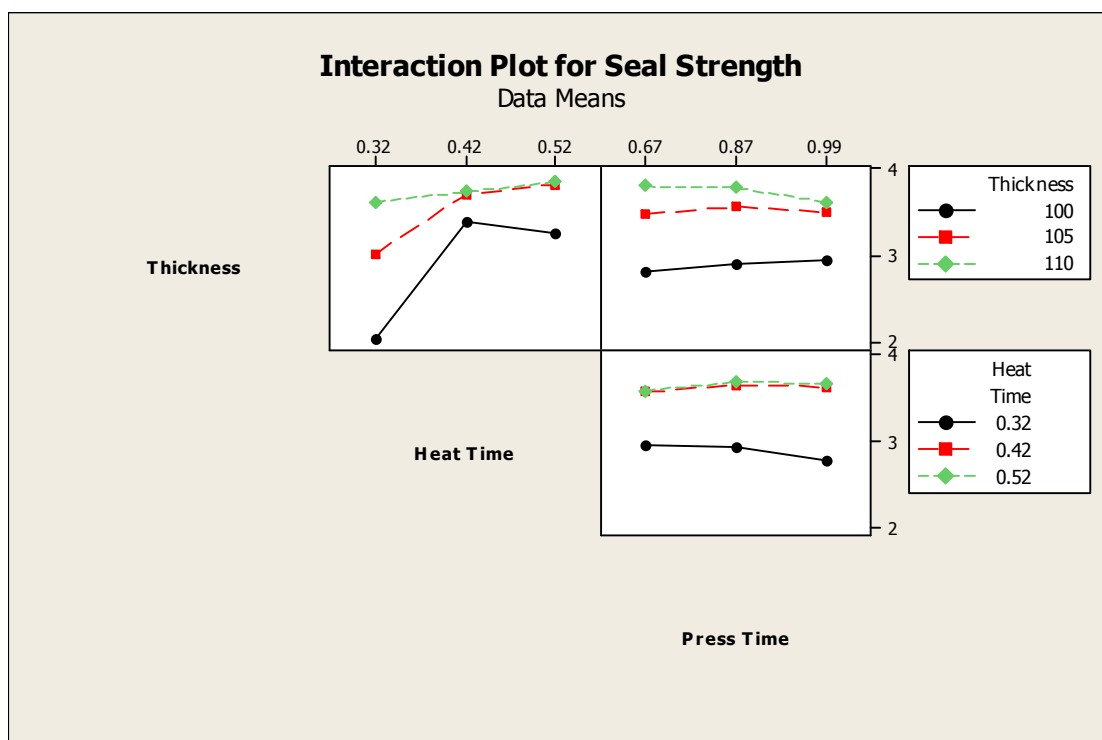
Factor	Type	Levels	Values
Thickness	fixed	3	100, 105, 110
Heat Time	fixed	3	0.32, 0.42, 0.52
Press Time	fixed	3	0.67, 0.87, 0.99

Analysis of Variance for Seal Strength

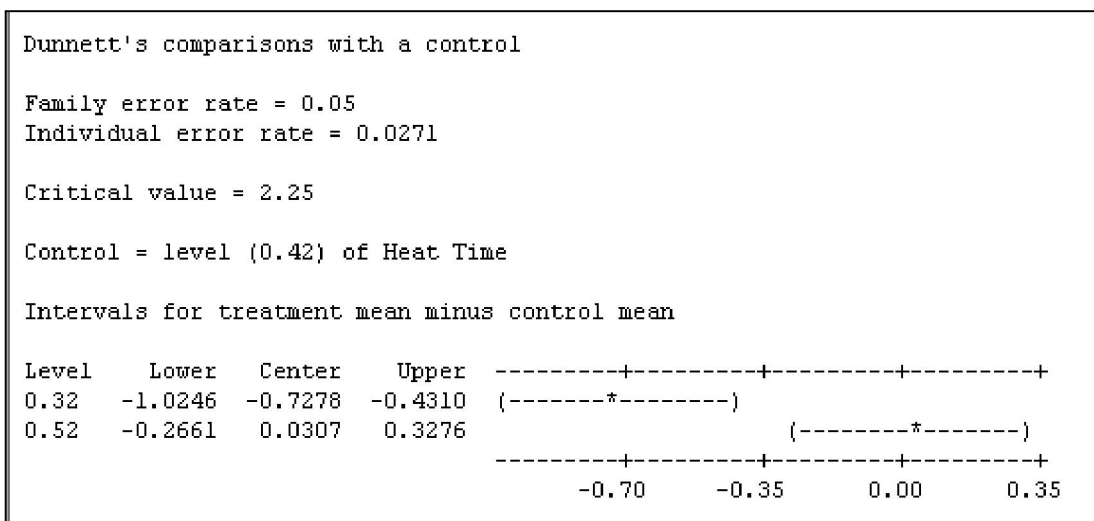
Source	DF	SS	MS	F	P
Thickness	2	10.45722	5.22861	96.21	0.000
Heat Time	2	9.95360	4.97680	91.58	0.000
Press Time	2	0.06587	0.03293	0.61	0.549
Thickness*Heat Time	4	3.91353	0.97838	18.00	0.000
Thickness*Press Time	4	0.24558	0.06139	1.13	0.352
Heat Time*Press Time	4	0.17941	0.04485	0.83	0.515
Thickness*Heat Time*Press Time	8	0.48225	0.06028	1.11	0.372
Error	54	2.93467	0.05435		
Total	80	28.23213			

S = 0.233122 R-Sq = 89.61% R-Sq(adj) = 84.60%

ภาพประกอบ 61 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของถุงบาง (ก้นถุง)



ภาพประกอบ 62 กราฟอันตรกิริยาสำหรับค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของถุงบาง (ก้นถุง)



ภาพประกอบ 63 ผลการทดสอบ Multiple Comparison Method ของเวลาความร้อนด้วยวิธี Dunnett

4.3 ผลดำเนินการใช้งานค่าพารามิเตอร์

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในหัวข้อ 4.2 ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทดลองใช้งานในการผลิตข้าวสารบรรจุถุงโดยมีค่าดังตารางที่ 13 ซึ่งรหัสทดลองที่ 2 และ 3 แตกต่างกันที่เวลาความร้อนของการปิดผนึกกันถุง หรือมีค่าเวลาความร้อน 0.52 และ 0.42 วินาที ตามลำดับ เนื่องจากได้ทดสอบ Multiple Comparison Method ของเวลาความร้อนด้วยวิธี Dunnett ในหัวข้อ 4.2.4 ที่ควบคุมปัจจัยเวลาความร้อน 0.42 วินาที พบว่า เวลาความร้อน 0.52 วินาทีมีค่าตกอยู่ในช่วง 0.00 หรือมีค่าล่าง (Lower) คือ -0.2661 และค่าบน (Upper) คือ 0.3276 ซึ่งมีค่าครอบคลุมค่าศูนย์ ดังภาพประกอบ 63 สรุปได้ว่า ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกสำหรับเวลาความร้อน 0.42 และ 0.52 วินาที ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดของเสียหรือไม่อย่างไร

ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์สำหรับทดลองใช้งานและผลการทดลอง

รหัส ทดลอง	ปัจจัย					จำนวน ของ เสีย (ถุง)
	ความหนา Thickness (μm)	เวลาความร้อน หลัง (ปากถุง) Heat Time (วินาที)	เวลาคดหลัง พร้อมเป่าลม (ปากถุง) Press Time (วินาที)	เวลาความร้อน หน้า (ก้นถุง) Heat Time (วินาที)	เวลาคดหน้า พร้อมเป่าลม (ก้นถุง) Press Time (วินาที)	
1	110+10	0.70	0.60	0.65	0.50	-
2	90+20	0.35	0.55	0.52	0.67	-
3	90+20	0.35	0.55	0.42	0.67	-

ภายหลังการทดลองใช้งาน โดยสุ่มทำการทดสอบ 10 ตัวอย่างในแต่ละชุดค่าพารามิเตอร์พบว่า ไม่เกิดความบกพร่องที่รอยผนึกในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง คือ รอยปิดผนึกขาด รอยปิดผนึกไม่ติด และรอยปิดผนึกพับ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ค่าพารามิเตอร์ที่ทดลองใช้เป็นค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้รอยปิดผนึกมีความแข็งแรง
2. ค่าพารามิเตอร์ของถุงบางขนาด 90+20 μm ที่กำหนดเวลาความร้อนของก้นถุง 0.42 และ 0.52 วินาที ให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน ทั้งค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกดังภาพประกอบที่ 63 และจำนวนของเสียที่เกิดจากการทดลองในตารางที่ 13 ดังนั้นจึงควรใช้เวลาความร้อน 0.42 วินาที เพื่อประหยัดพลังงานในการผลิต

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสาร” เป็นงานวิจัยที่มุ่งลดความสูญเสียในการผลิตข้าวสารบรรจุถุงที่เกิดจากคุณภาพของรอยปิดผนึกซึ่งประกอบด้วย รอยปิดผนึกขาด รอยปิดผนึกไม่ติด และรอยปิดผนึกพับ ในผลิตภัณฑ์ข้าวสารบรรจุถุงขนาด 5 กิโลกรัม ในถุงที่มีความหนา 2 ชนิด คือ ถุงหนา $110\pm 12\text{ }\mu\text{m}$ และถุงบาง $90\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ ด้วยการวางแผนการทดลองโดยใช้ 3^3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และทดลองซ้ำ 3 ในแต่ละระดับของปัจจัย ผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของรอยปิดผนึกในกระบวนการปิดผนึกถุงข้าวสาร คือ ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ได้แก่ ความหนากับเวลาความร้อน ความหนากับเวลากดและเป่าลมเย็น ความหนากับเวลาความร้อน รวมทั้งผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย ได้แก่ ความหนากับเวลาความร้อนกับเวลากดและเป่าลมเย็น

5.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการบรรจุถุงชนิดบาง $90\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ และชนิดหนา $110\pm 12\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งทำให้รอยปิดผนึกมีความแข็งแรงและมีคุณภาพดีที่สุด เป็นดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้งาน

ลำดับ	ปัจจัย					ค่าความแข็งแรงของ รอยปิดผนึก	
	ความหนา (μm)	เวลาความร้อน หลัง (ปากถุง) (วินาที)	เวลากดหลัง พร้อมเป่าลม (ปากถุง) (วินาที)	เวลาความร้อน หน้า (ก้นถุง) (วินาที)	เวลากดหน้า พร้อมเป่าลม (ก้นถุง) (วินาที)	ปากถุง (kgf/25. 4 mm. width)	ก้นถุง (kgf/25. 4 mm. width)
1	110+10	0.70	0.60	0.65	0.50	9.53	9.11
2	90+20	0.35	0.55	0.42	0.67	4.22	3.62

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การศึกษาเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับปิดผนึกถุงบรรจุข้าวสารด้วย 3rd การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยปิดผนึกที่จะต้องควบคุมให้การตั้งค่าก่อนการผลิตเป็นไปตามที่กำหนด และทำให้มีค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเฉลี่ยถุงหนาบริเวณปากถุงและก้นถุง คือ 9.53 และ 9.11 kgf/25.4 mm. width และทำให้มีค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเฉลี่ยถุงบางบริเวณปากถุงและก้นถุง คือ 4.22 และ 3.62 kgf/25.4 mm. width

5.2.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้งาน อยู่ภายใต้เงื่อนไขของความสมบูรณ์ของเครื่องจักร ซึ่งทำให้ความแข็งแรงและคุณภาพของรอยปิดผนึกมีความเสถียร สามารถเชื่อมั่นได้ว่าเป็นค่าที่ทำให้รอยปิดผนึกมีความแข็งแรงสูงสุด และมีความเฉลี่ยของความแข็งแรงสูงกว่าค่าที่ใช้ในปัจจุบัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ

5.3.2 ควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่ไม่ได้ทดลองในงานวิจัยนี้ เช่น แรงดันลม และระยะเวลาในการทำงานของเครื่องจักร

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2552. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป.
- กรวิชัย จุฬะวะนะพันธ์ และ วิชัย รุ่งเรืองอนันต์. 2555. “การลดความสูญเสียจากกระบวนการตัดและปิดผนึกถุงพลาสติก โดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตถุงพลาสติกบรรจุภัณฑ์.” *หนังสือรวมบทความวิชาการการประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 21 พ.ศ.2555*: 944-950.
- ชัยพร วงศ์พิศาล และคณะ. 2547. “การประยุกต์ใช้ออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการบรรจุและปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในการผลิตซอสผลไม้.” *หนังสือรวมบทความวิชาการการประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 13 พ.ศ.2547*: 1141-1148.
- พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ และนภดล นิ่งทอง. 2550. “การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดรูรีเมอร์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง.” *หนังสือรวมบทความวิชาการการประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2550*: 231-242.
- พิทักษ์ พนาวัน และสมเกียรติ จงประสิทธิ์พร. 2550. “การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นรองดินค้ำที่อัดจากฟางข้าวและใยมะพร้าว.” *หนังสือรวมบทความวิชาการการประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 16 พ.ศ. 2550*: 1499-1504.
- รัตนพันธุ์ นพเก้า และคณะ. 2553. “การหาค่าพารามิเตอร์ในการเคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 20, ฉบับที่ 2 พ.ค.-ส.ค. 2553*: 332 – 342.
- ธีรเดช เรืองศรี. 2550. “การพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อลดความสูญเสีย กรณีศึกษา: โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*.
- ปรพล ชินวงศ์สกุล และคณะ. 2553. “การกำหนดสภาวะในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพลาสติก Polypropylene ผสมเศษชี้เลี้ยง จี๊กบ โดยใช้การออกแบบการทดลอง”, รายงานสรุปโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IRPUS). (เอกสารไม่ตีพิมพ์).

- ASTM International. 2006. **F88/F88M-06 Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials**. USA.
- Montgomery, Douglas C. 2008. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th Edition. USA: Wiley.
- Montgomery, Douglas C. 2004. **Design and Analysis of Experiments**. 6th Edition. USA: Wiley.
- Nabil, Bella, Aissa, Assroun, and Aguida, Bella Ilham. 2010. "Effectiveness of Different Solutions to Reduce Plastic Shrinkage in Hot Climate Concreting." **Proceeding of 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**.
- Chanpen Anurattananon and Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya. 2008. "Generalized Linear Models for Jewelry-Bodied Casting." **Proceedings of The 9th Asia Pasific Industrial Engineering & Management Systems Conference (APIEMS 2008)**: 197-203.
- Chanpen Anurattananon and Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya. 2008. "Optimization Using Response Surface Methodology in Jewelry-Bodied Casting." **The 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008)**: 663-668.
- Olsson, N.E.J., Lundström, T.S., and Olofsson, K. 2008. "Process Study on Compression Moulding of SMC using Factorial Design." **Proceeding of The 19th International Symposium on Transport Phenomena**.
- Bajic, D., Jozic, S., and Podrug, S. 2010. "Design of Experiment's Application in the Optimization of Milling Process." **Journal Metalurgija** 49 (2010), 2: 123-126.
- Mangaraj, S., and Singh, K. P., 2011. "Optimization of Machine Parameters for Milling of Pigeon Pea Using RSM." **Food and Bioprocess Technology**, July 2011, Volume 4, Issue 5: 762-769.
- Lazim, Azrina BT. 2008. "An Optimization of Tin Plating Process Using Design of Experiment." Master's Thesis, Universiti Teknologi, Malaysia.
- Orapun Olaric and Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya. 2002. "Design of Experiment for Die Coating on Automotive Device." Master's Thesis, Kasetsart University, Thailand.
- Pratricia Mays. 2008. "Seal Strength Models for Medical Device Trays", Doctoral Dissertation, Industrial Engineering, Texas A&M University, USA.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยพนัก (ปัจจุบัน)

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึก (ปัจจุบัน)

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

Run	อุ้งหนา (ปากอุ้ง)		อุ้งหนา (ก้นอุ้ง)		อุ้งบาง (ปากอุ้ง)		อุ้งบาง (ก้นอุ้ง)	
	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2
1	8.37	8.27	7.50	8.09	3.69	4.21	4.99	4.57
2	7.76	8.68	7.83	7.46	4.28	4.66	4.00	4.16
3	8.01	8.15	8.13	6.90	3.89	3.38	4.19	4.31
4	8.66	8.49	8.81	8.11	4.37	3.54	4.88	4.27
5	8.13	8.17	8.31	8.43	3.79	3.62	4.67	4.36
6	8.07	8.61	8.46	7.58	3.25	4.20	4.49	4.89
7	7.81	8.19	8.26	7.59	2.54	4.21	3.75	4.34
8	8.20	8.33	6.76	8.46	4.40	3.71	4.54	4.23
9	7.75	8.13	8.52	8.18	3.69	4.15	4.81	3.89
10	8.51	8.49	7.96	7.49	4.35	4.33	4.61	3.80
11	8.29	7.03	6.04	7.07	3.95	3.58	3.94	4.84
12	8.38	7.57	5.97	4.23	3.94	3.96	3.57	3.80
13	8.60	6.69	7.12	5.61	4.11	3.83	3.83	3.91
14	8.16	7.23	6.59	5.04	3.75	3.77	3.80	4.26
15	8.28	6.84	7.20	6.72	4.51	3.74	3.98	4.56
16	8.35	7.45	6.93	7.23	4.06	3.92	3.61	4.44
17	8.32	6.80	6.70	7.73	3.97	4.17	4.62	3.77
18	8.53	7.98	6.51	6.65	3.69	4.06	4.57	4.46
19	8.00	7.21	6.64	8.19	4.01	3.94	3.90	4.36
20	8.12	6.66	5.67	8.04	4.51	4.27	3.71	4.53
21	6.40	8.28	5.18	4.04	3.76	3.77	4.20	4.47
22	7.54	8.54	7.10	3.30	3.98	3.57	4.08	3.98
23	6.96	8.78	6.26	2.36	4.09	3.42	4.32	3.50
24	8.13	8.76	5.81	4.71	4.16	3.84	4.39	3.85
25	8.49	8.45	7.07	6.73	3.82	3.68	4.11	3.58

ตารางที่ 15 (ต่อ)

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

Run	ถุงหนา (ปากถุง)		ถุงหนา (ก้นถุง)		ถุงบาง (ปากถุง)		ถุงบาง (ก้นถุง)	
	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2	Rep#1	Rep#2
26	6.38	8.91	5.88	5.11	4.07	3.79	4.22	4.11
27	8.19	8.91	5.94	5.30	4.15	3.90	4.32	3.62
28	7.98	8.97	6.13	5.63	3.98	4.04	3.96	4.17
29	7.44	8.81	6.48	2.18	3.95	3.38	4.22	4.33
30	6.39	7.94	6.72	4.10	4.32	4.12	4.07	4.65

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยพนักงูหนา (ทดลอง)

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงหนา (ทดลอง) – ปากถุง

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Top)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (sec)	ค่าเวลาดกหลัง พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
1	110+12	0.6	0.4	9.18	9.25	9.40
2			0.5	8.73	8.85	9.23
3			0.6	9.19	8.94	8.90
4		0.7	0.4	9.17	9.08	8.81
5			0.50	9.60	9.15	9.29
6			0.6	9.09	9.08	9.23
7		0.8	0.4	9.36	9.24	9.27
8			0.5	9.35	9.01	9.25
9			0.6	8.79	8.99	8.74
10	110+15	0.6	0.4	8.97	9.00	9.32
11			0.5	8.82	8.91	9.23
12			0.6	8.79	8.88	8.89
13		0.7	0.4	9.10	8.80	8.71
14			0.5	8.90	8.78	8.93
15			0.6	8.66	9.07	9.23
16		0.8	0.4	9.24	9.51	9.08
17			0.5	9.07	9.00	9.46
18			0.6	9.45	9.25	9.59

ตารางที่ 16 (ต่อ)

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Top)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (sec)	ค่าเวลาดกหลัง พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
19	110+10	0.6	0.4	9.06	9.42	9.15
20			0.5	9.07	9.01	9.51
21			0.6	9.54	9.15	9.49
22		0.7	0.4	9.13	9.60	9.62
23			0.5	8.89	8.96	9.40
24			0.6	9.57	9.33	9.70
25		0.8	0.4	9.54	9.68	9.28
26			0.5	9.04	9.10	9.12
27			0.6	9.06	9.69	9.53

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงหนา (ทดลอง) – ก้นถุง

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Bottom)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หน้า (sec)	ค่าเวลาดกหน้า พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
1	110+12	0.55	0.4	8.76	8.88	8.82
2			0.5	8.97	8.91	8.91
3			0.6	8.79	8.31	8.53
4		0.65	0.4	8.53	9.09	9.09
5			0.5	8.89	9.34	9.00
6			0.6	8.82	9.42	8.57
7		0.75	0.4	8.47	9.18	8.92
8			0.5	9.21	8.98	9.03
9			0.6	8.54	8.92	8.86
10	110+15	0.55	0.4	8.19	9.32	8.20
11			0.5	8.77	9.03	8.64
12			0.6	8.19	8.57	8.51
13		0.65	0.4	8.81	9.32	8.96
14			0.5	9.32	9.23	8.92
15			0.6	9.02	8.56	8.91
16		0.75	0.4	9.08	9.19	9.04
17			0.5	8.94	9.45	9.04
18			0.6	9.05	9.11	8.97

ตารางที่ 17 (ต่อ)

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Bottom)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หน้า (sec)	ค่าเวลาดกหน้า พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
19	110+10	0.55	0.4	9.07	8.58	8.69
20			0.5	9.04	9.04	9.16
21			0.6	9.26	8.78	9.50
22		0.65	0.4	9.19	8.83	9.30
23			0.5	9.09	8.95	9.30
24			0.6	9.14	9.09	8.85
25		0.75	0.4	9.20	9.29	9.04
26			0.5	8.98	8.85	8.73
27			0.6	9.00	9.18	9.32

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยพนักถุงบาง (ปัจจุบัน)

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงบาง (ทดลอง) – ปากถุง

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Top)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (sec)	ค่าเวลาดกหลัง พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
1	90+10	0.35	0.45	1.88	1.91	1.87
2			0.55	1.58	2.11	2.64
3			0.65	2.29	2.07	1.84
4		0.45	0.45	3.75	3.73	3.84
5			0.55	3.51	3.61	3.77
6			0.65	4.73	4.62	4.95
7		0.55	0.45	3.83	3.57	3.19
8			0.55	3.22	3.25	3.50
9			0.65	3.25	3.41	3.57
10	90+15	0.35	0.45	4.15	3.86	3.63
11			0.55	3.95	4.27	3.90
12			0.65	4.04	3.97	3.92
13		0.45	0.45	3.23	3.6	3.38
14			0.55	3.39	3.33	3.44
15			0.65	3.55	3.66	3.68
16		0.55	0.45	3.53	3.64	3.38
17			0.55	3.78	3.66	3.36
18			0.65	3.73	3.02	3.56

ตารางที่ 18 (ต่อ)

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Top)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หลัง (sec)	ค่าเวลากดหลัง พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
19	90+20	0.35	0.45	4.18	4.37	4.36
20			0.55	4.27	4.20	4.19
21			0.65	4.05	4.05	4.40
22		0.45	0.45	3.26	3.16	2.94
23			0.55	3.06	3.39	3.28
24			0.65	2.94	3.18	2.95
25		0.55	0.45	3.47	3.42	3.71
26			0.55	3.96	3.78	4.04
27			0.65	3.39	3.94	3.57

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยผนึกถุงบาง (ทดลอง) – ก้นถุง

หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Bottom)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หน้า (sec)	ค่าเวลาดกหน้า พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
1	90+10	0.32	0.67	2.18	2.14	1.97
2			0.87	1.96	2.16	2.03
3			0.99	1.84	1.86	2.05
4		0.42	0.67	3.61	2.66	3.49
5			0.87	3.54	3.23	3.38
6			0.99	3.64	3.47	3.43
7		0.52	0.67	2.90	3.40	2.93
8			0.87	3.94	2.95	2.96
9			0.99	3.94	3.37	2.87
10	90+15	0.32	0.67	2.89	2.94	2.90
11			0.87	3.07	3.11	3.13
12			0.99	3.00	2.98	3.07
13		0.42	0.67	3.76	3.81	3.85
14			0.87	3.70	3.51	3.73
15			0.99	3.77	3.64	3.60
16		0.52	0.67	3.89	3.61	3.58
17			0.87	3.98	3.91	3.93
18			0.99	4.07	3.49	3.90

ตารางที่ 19 (ต่อ)

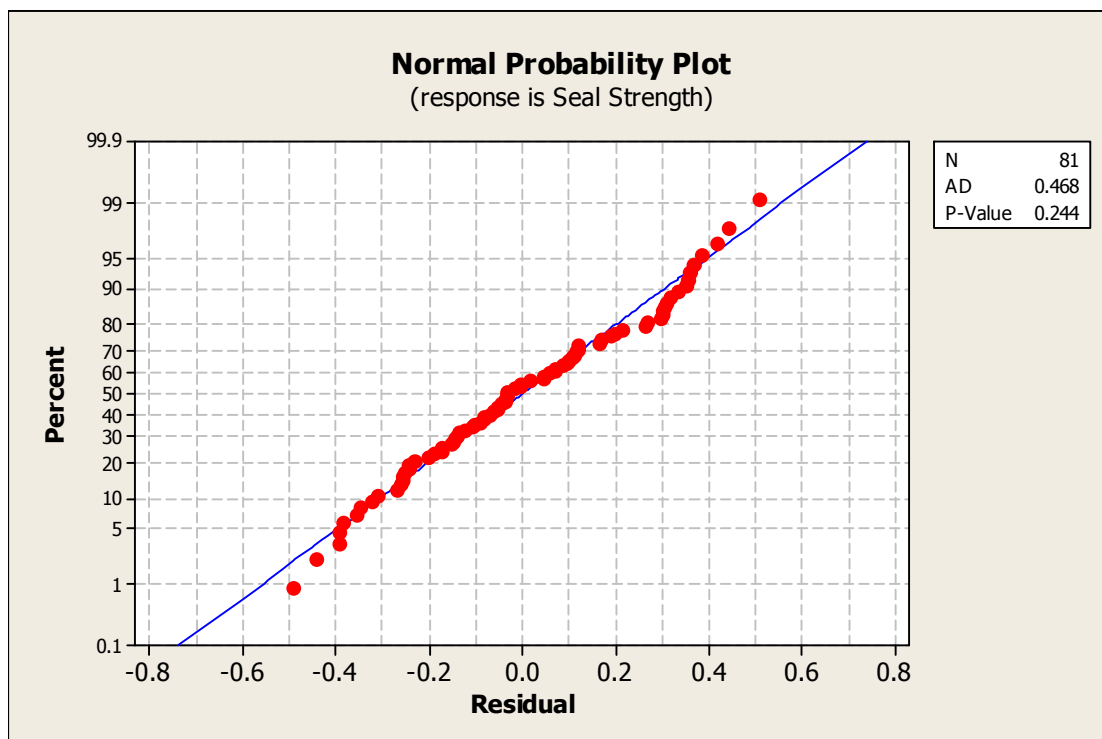
หน่วย: kgf/25.4 mm. width

รหัส ชุดทดลอง	ปัจจัย			Seal Strength (Bottom)		
	ความหนา	ค่าเวลาความร้อน Seal หน้า (sec)	ค่าเวลาดกหน้า พร้อมเป่าลม (sec)	1	2	3
19	90+20	0.32	0.67	3.81	3.76	3.89
20			0.87	3.64	3.71	3.55
21			0.99	3.28	3.48	3.40
22		0.42	0.67	3.43	3.56	3.88
23			0.87	3.89	3.92	3.90
24			0.99	3.60	3.64	3.81
25		0.52	0.67	4.43	3.91	3.55
26			0.87	3.85	3.75	3.83
27			0.99	3.76	3.72	3.86

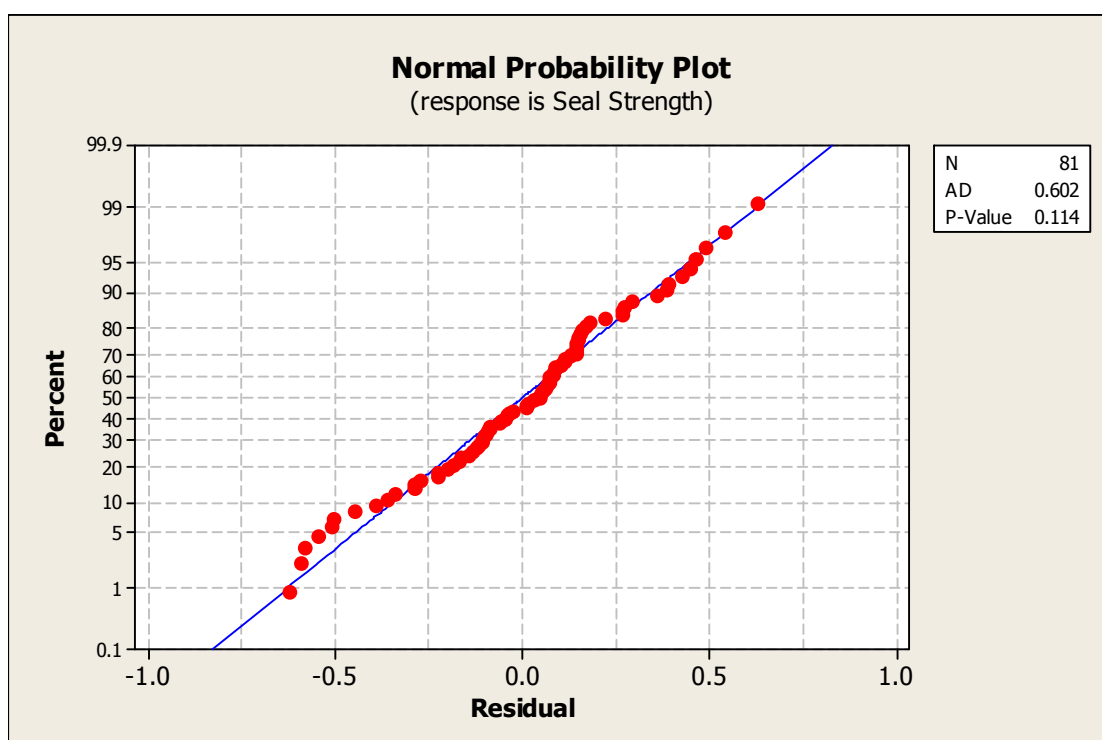
ภาคผนวก ง

ผลการตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลอง
สำหรับทดลองเฟคทอเรียลเต็มรูป

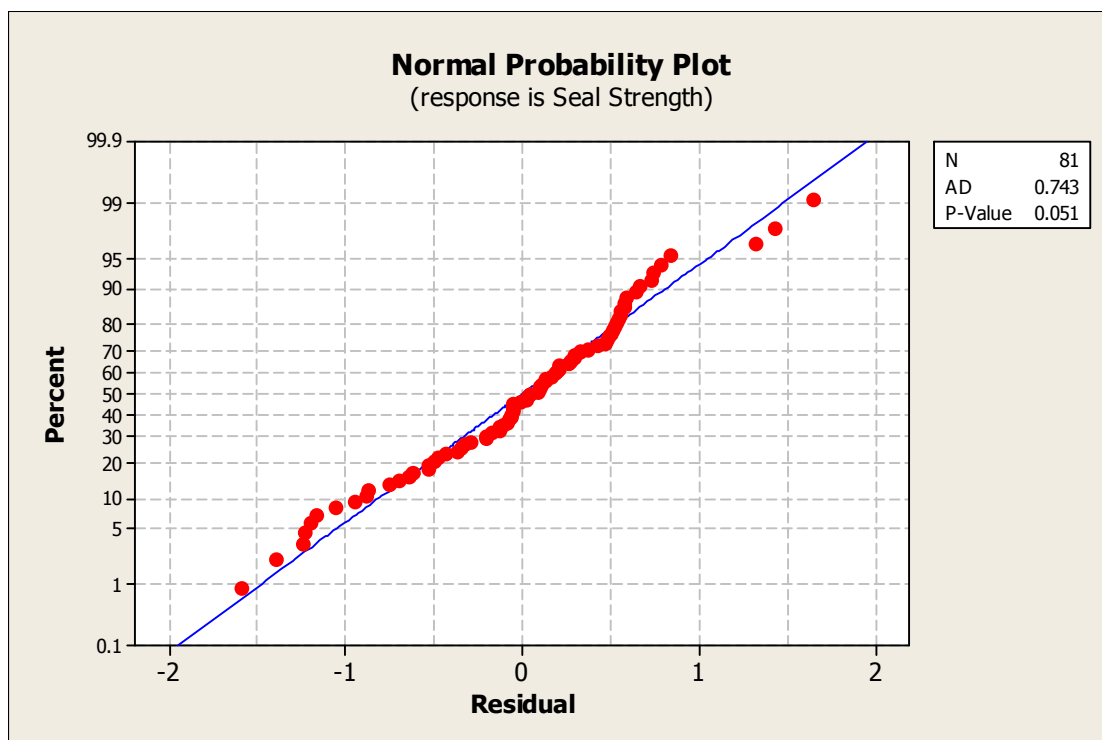
1. ผลการทดสอบค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบปกติ



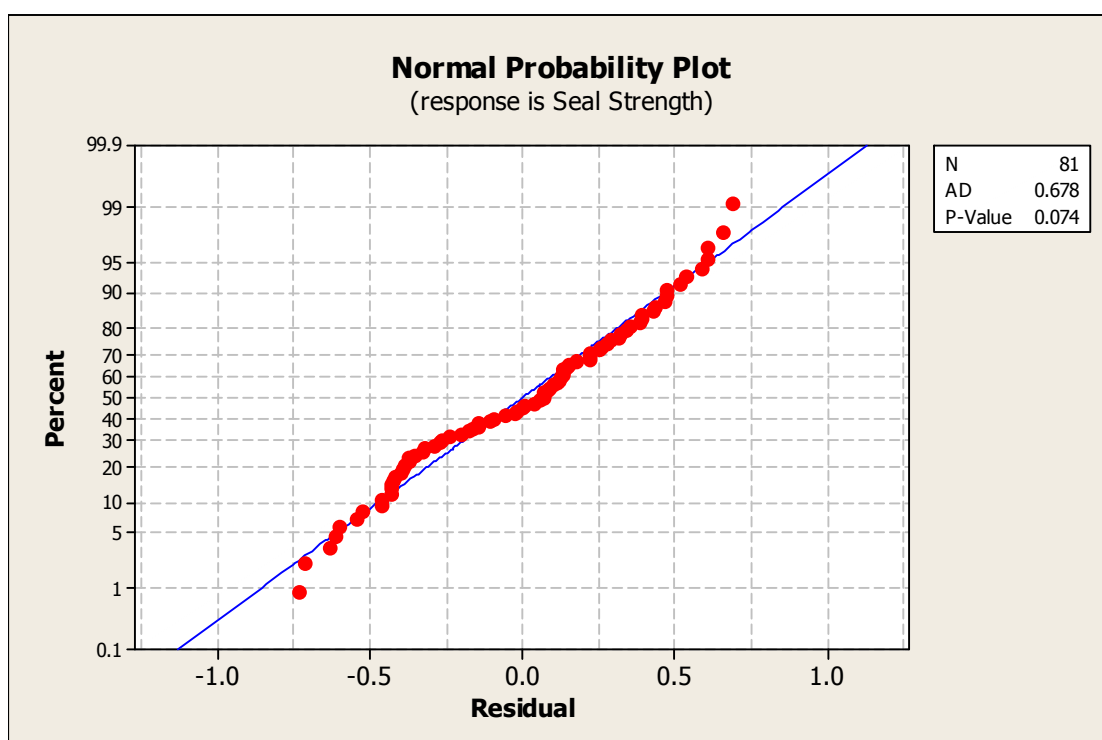
ภาพประกอบ 64 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงหนา (ปากถุง)



ภาพประกอบ 65 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงหนา (ก้นถุง)

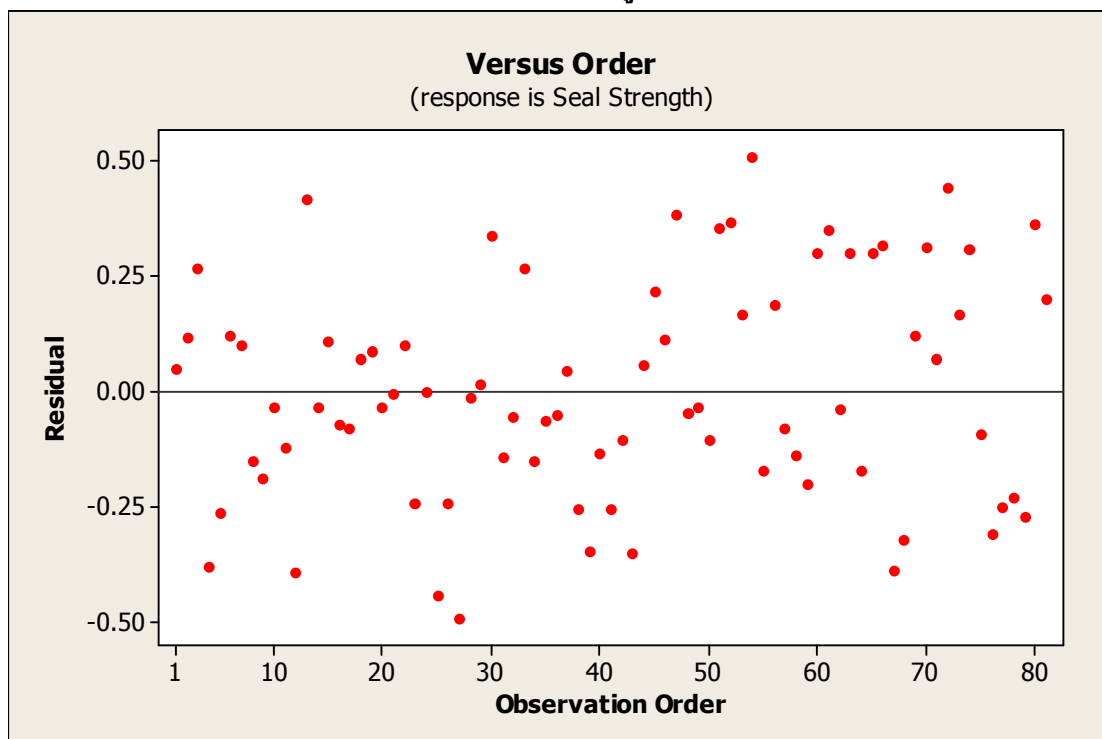


ภาพประกอบ 66 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงบาง (ปากถุง)

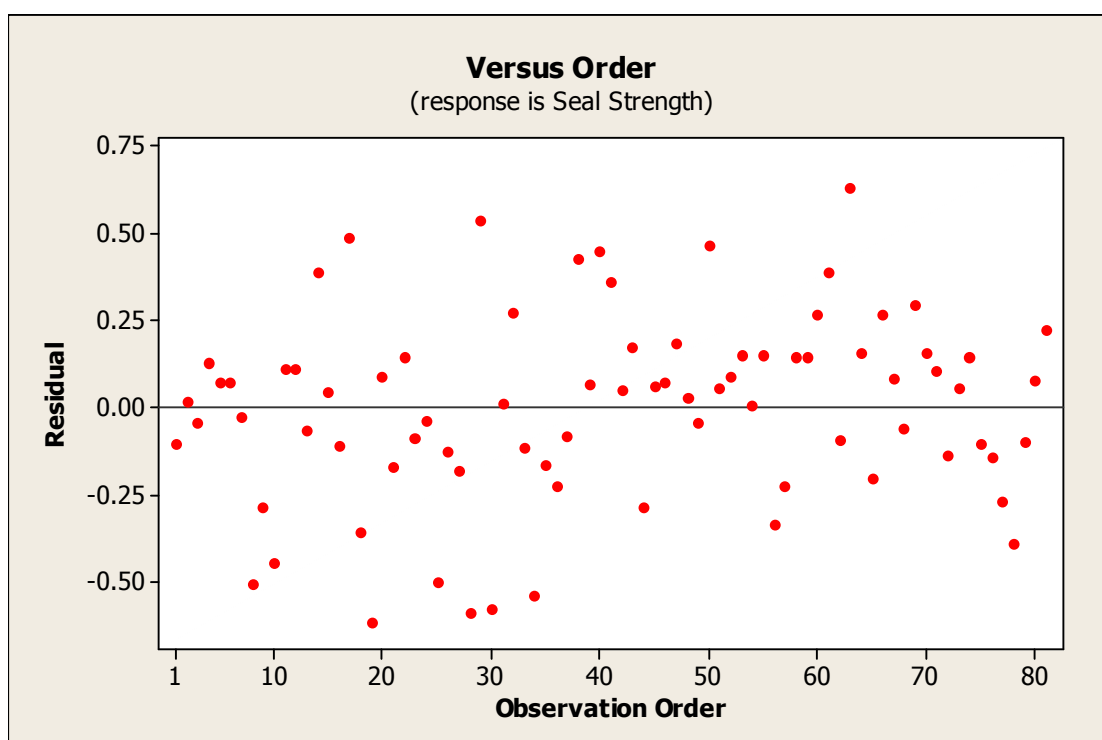


ภาพประกอบ 67 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ ของ Residual ของถุงบาง (ก้นถุง)

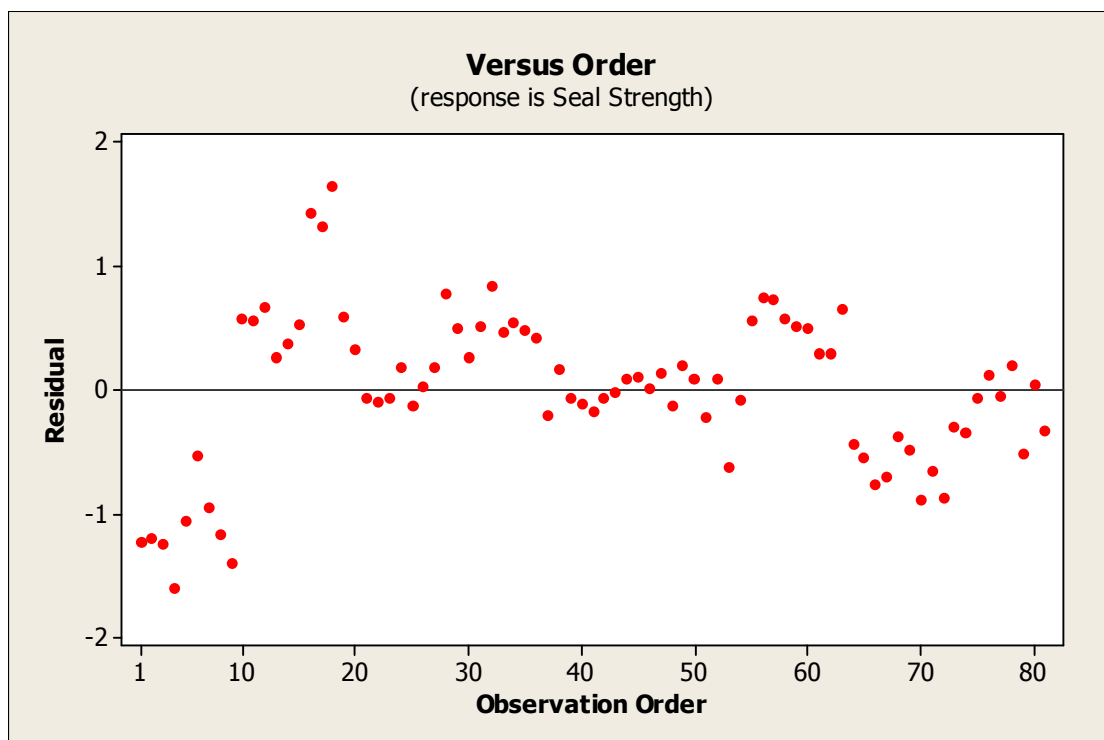
2. ผลการทดสอบค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์



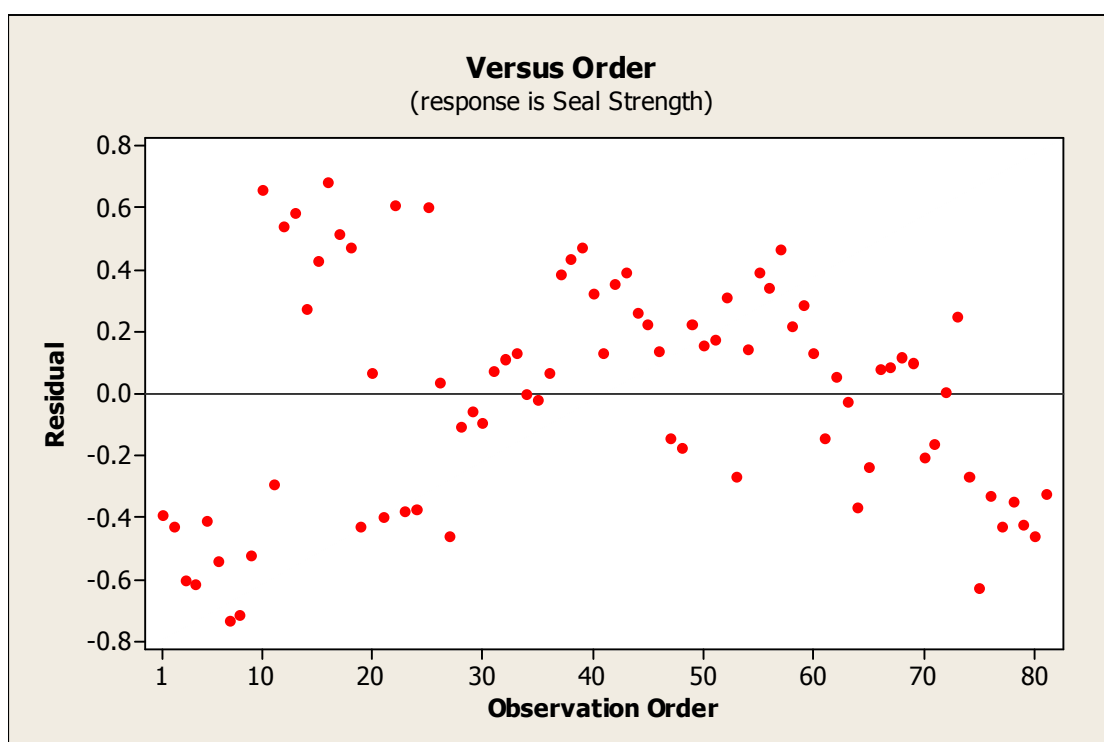
ภาพประกอบ 68 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ปากถุง)



ภาพประกอบ 69 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ก้นถุง)

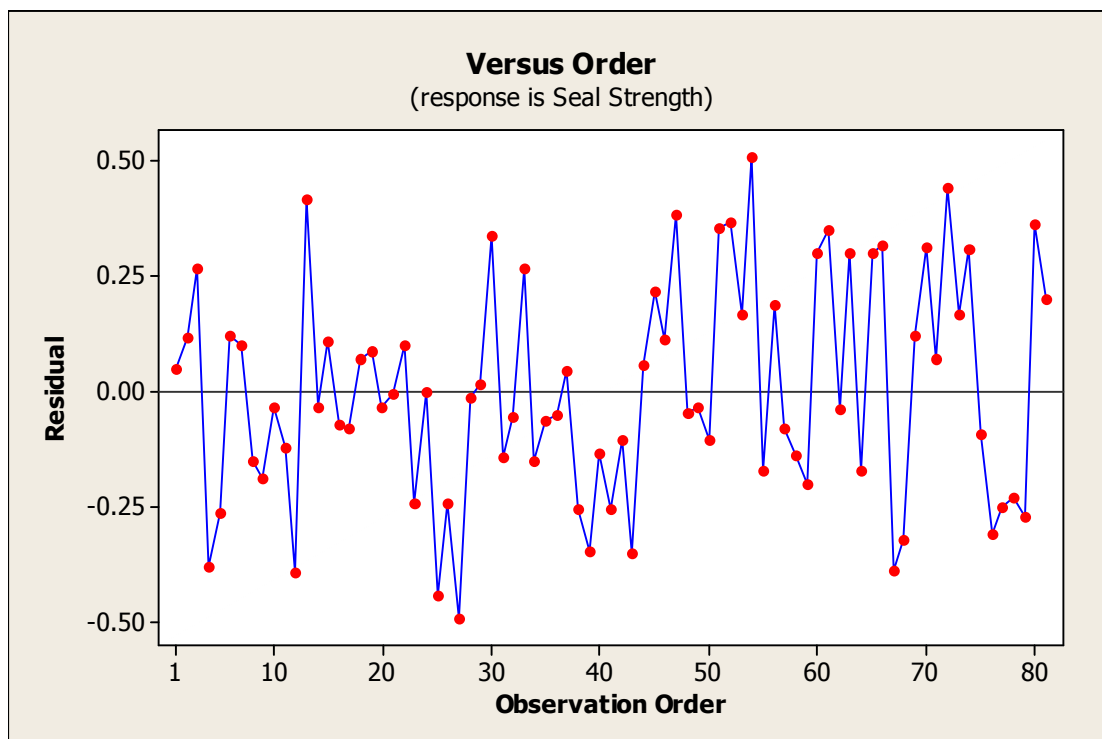


ภาพประกอบ 70 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ปากถุง)

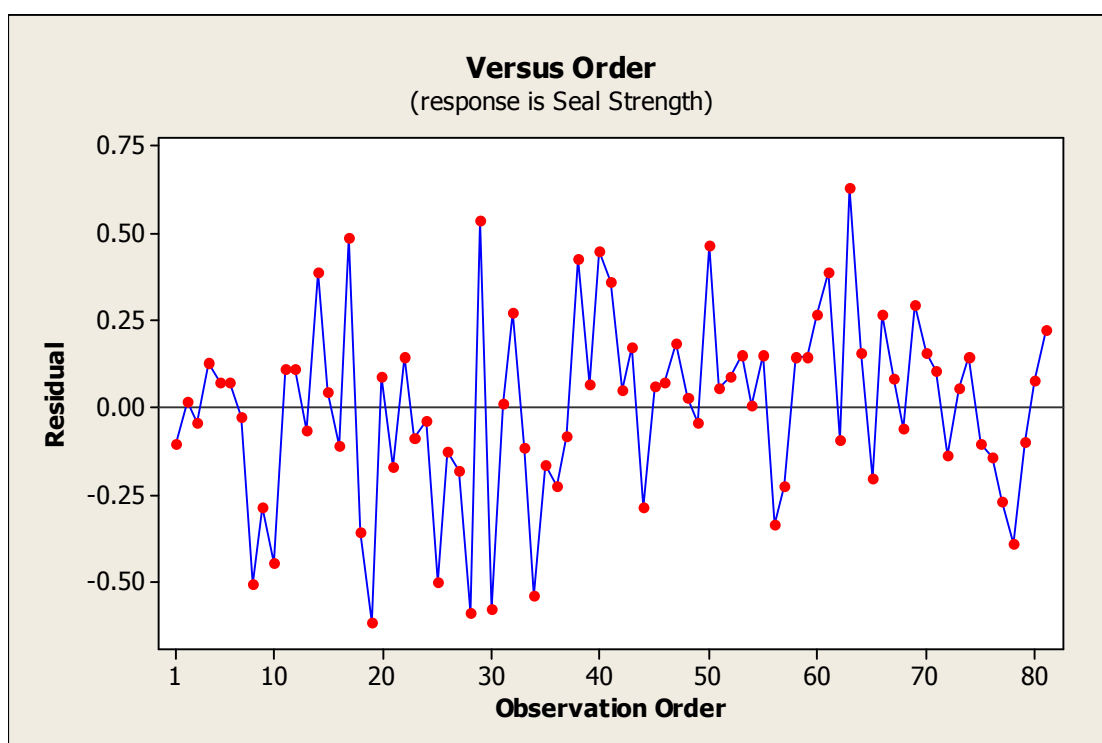


ภาพประกอบ 71 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ก้นถุง)

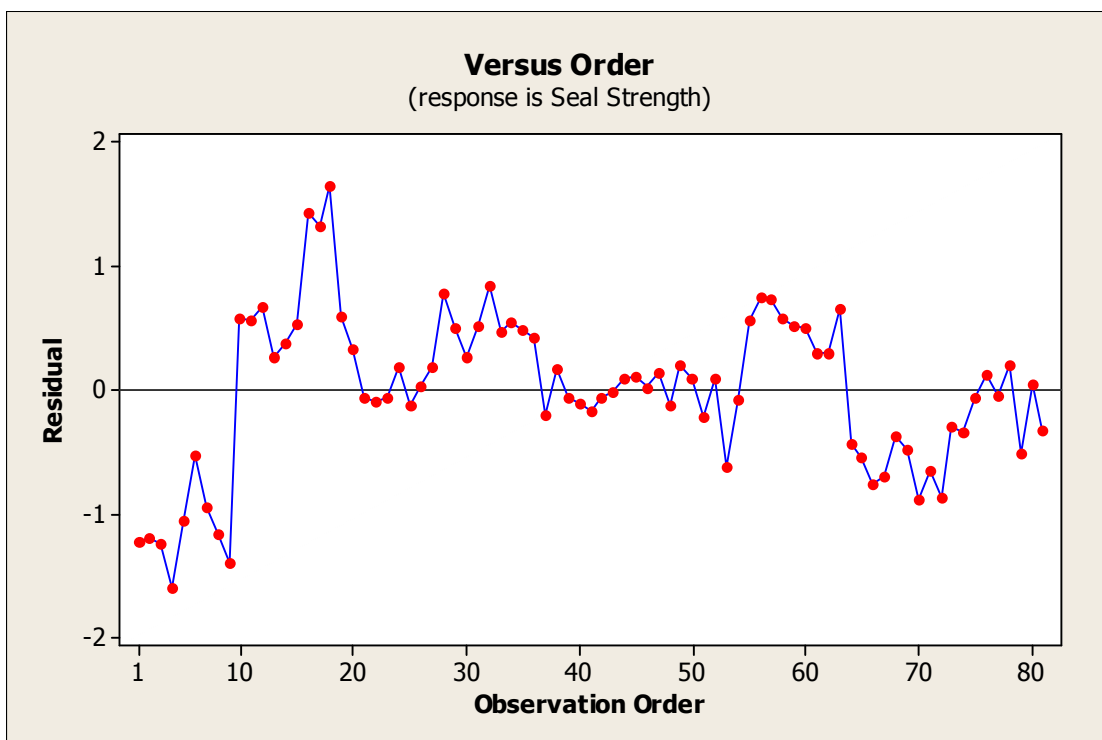
3. ผลการทดสอบค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน



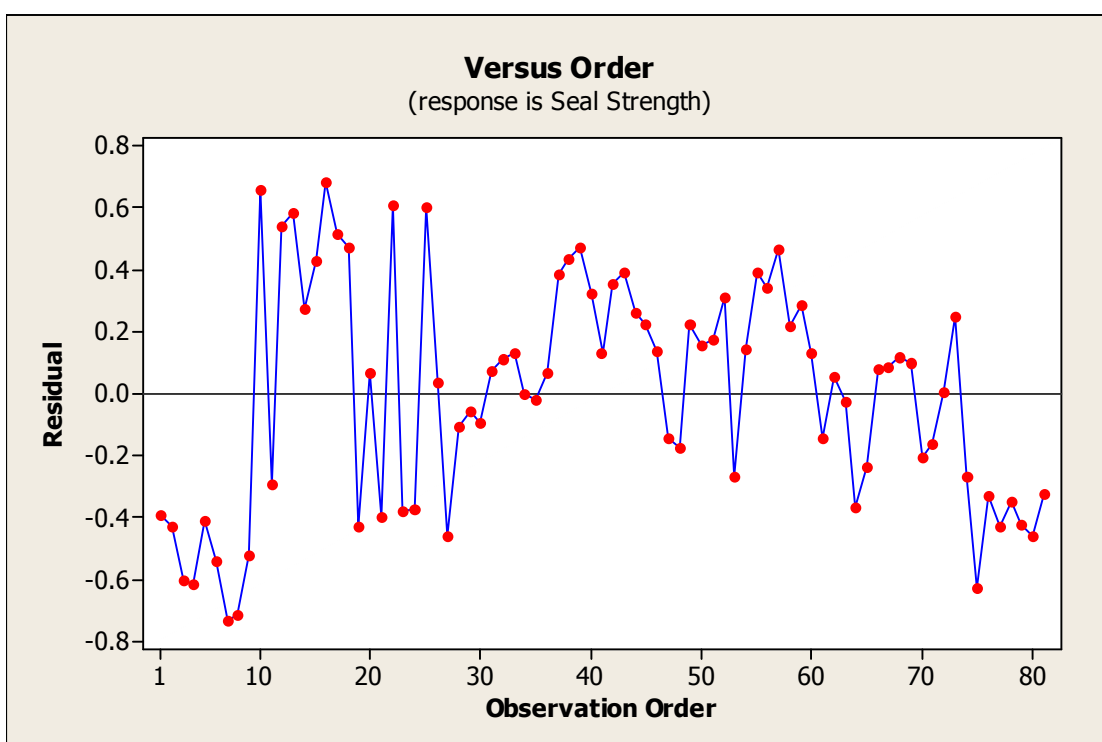
ภาพประกอบ 72 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ปากถุง)



ภาพประกอบ 73 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงหนา (ก้นถุง)

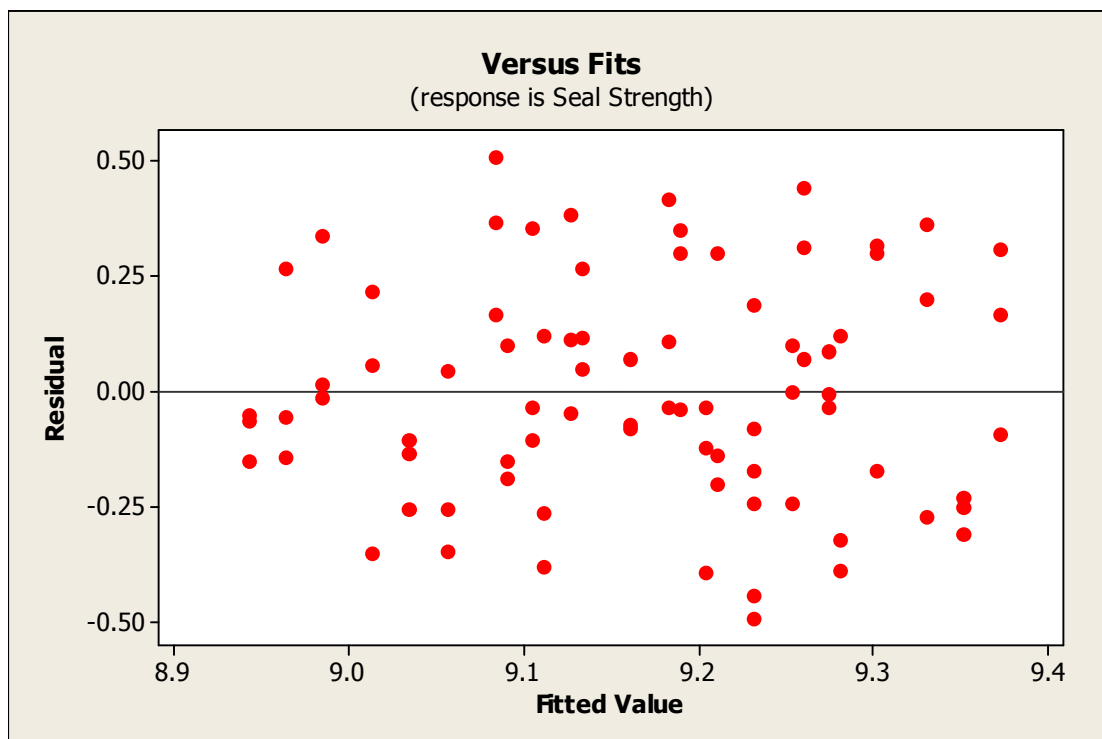


ภาพประกอบ 74 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ปากถุง)

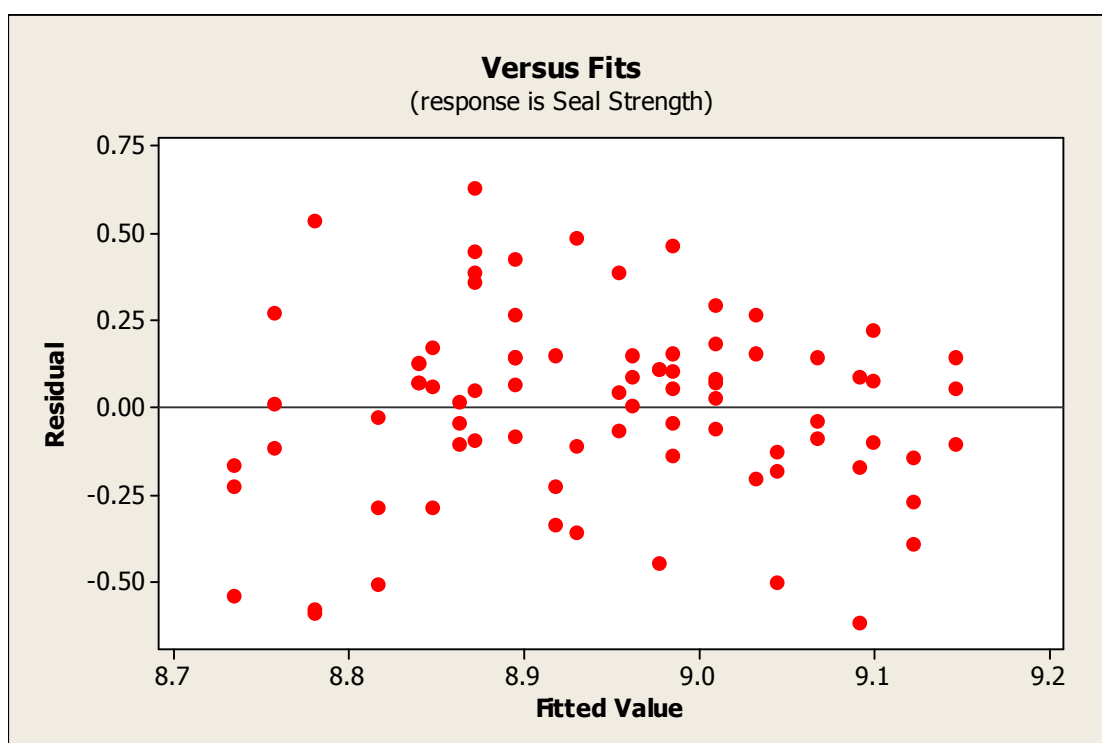


ภาพประกอบ 75 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Observation Order ของถุงบาง (ก้นถุง)

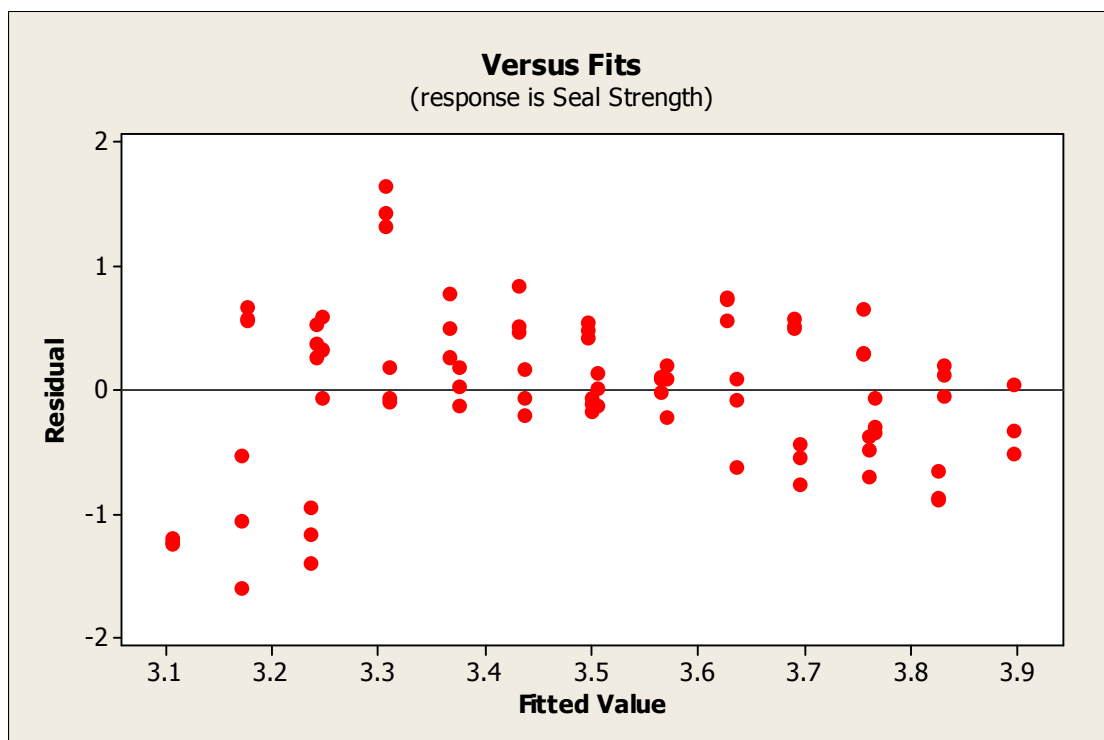
4. ผลการทดสอบค่าความผิดพลาดมีค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า



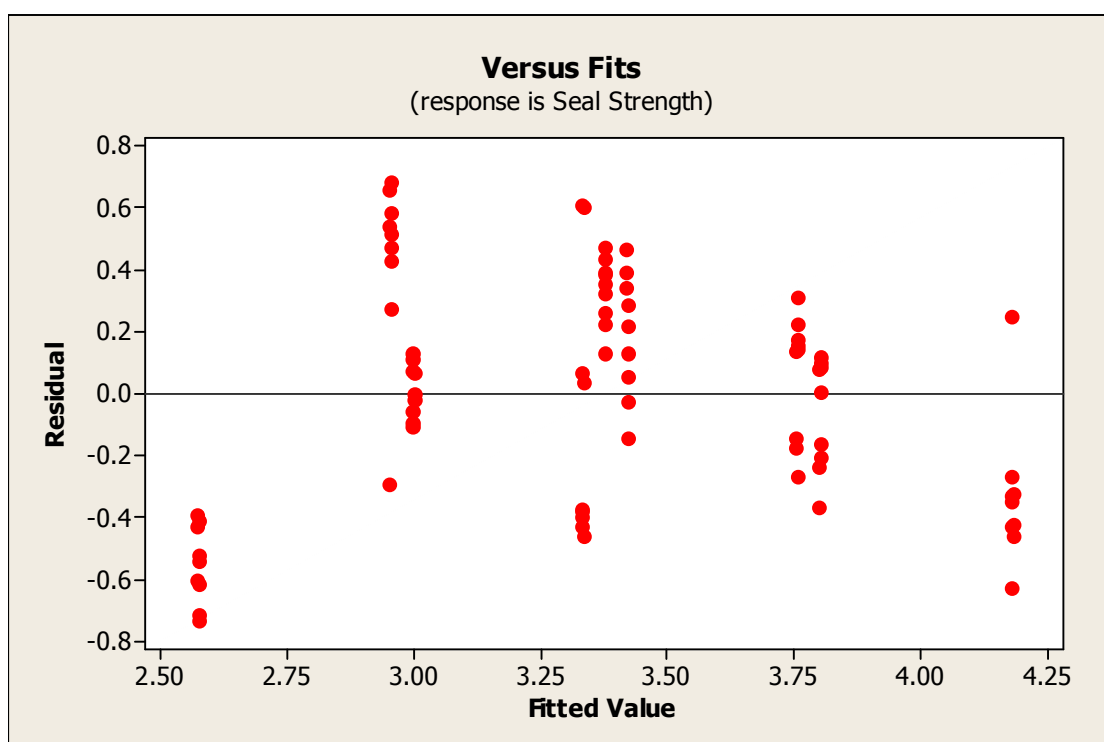
ภาพประกอบ 76 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของถุงหนา (ปากถุง)



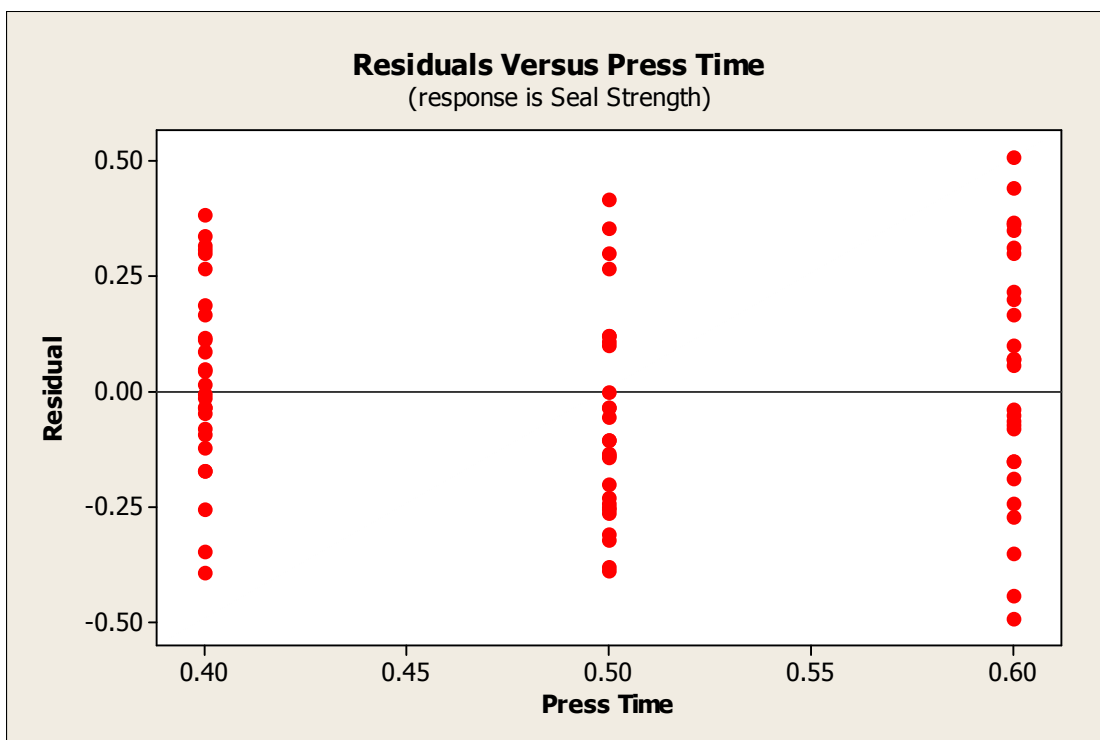
ภาพประกอบ 77 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของถุงหนา (ก้นถุง)



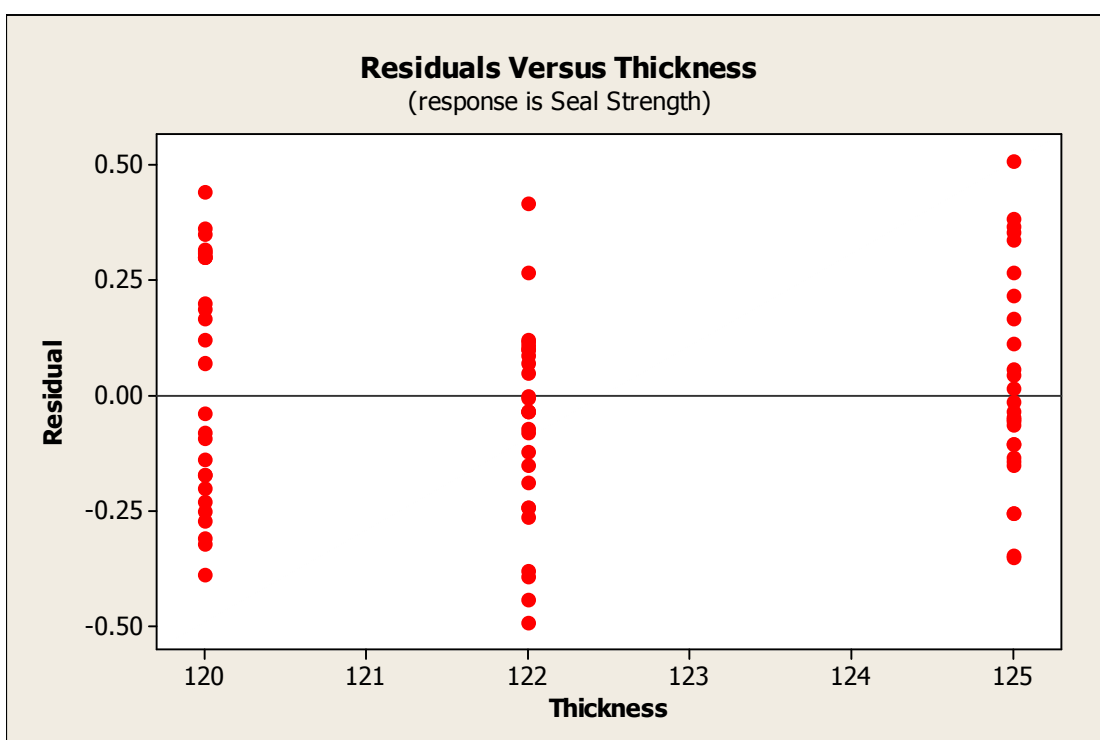
ภาพประกอบ 78 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของถุงบาง (ปากถุง)



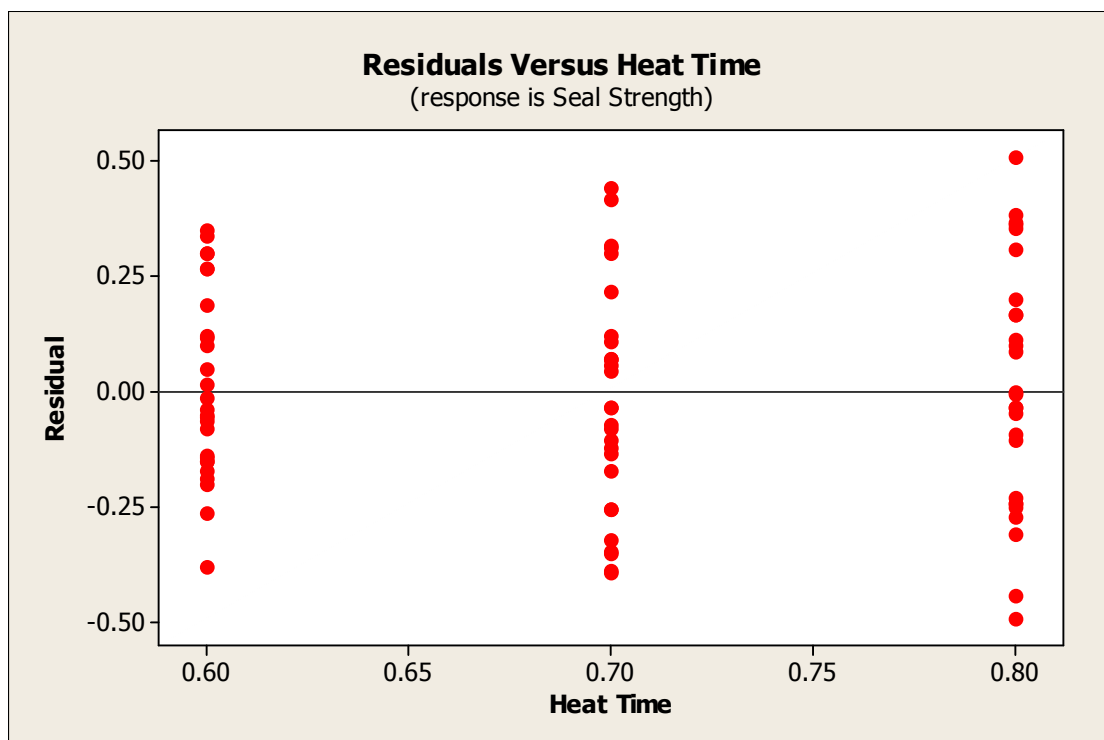
ภาพประกอบ 79 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับ Fitted Value ของถุงบาง (ก้นถุง)



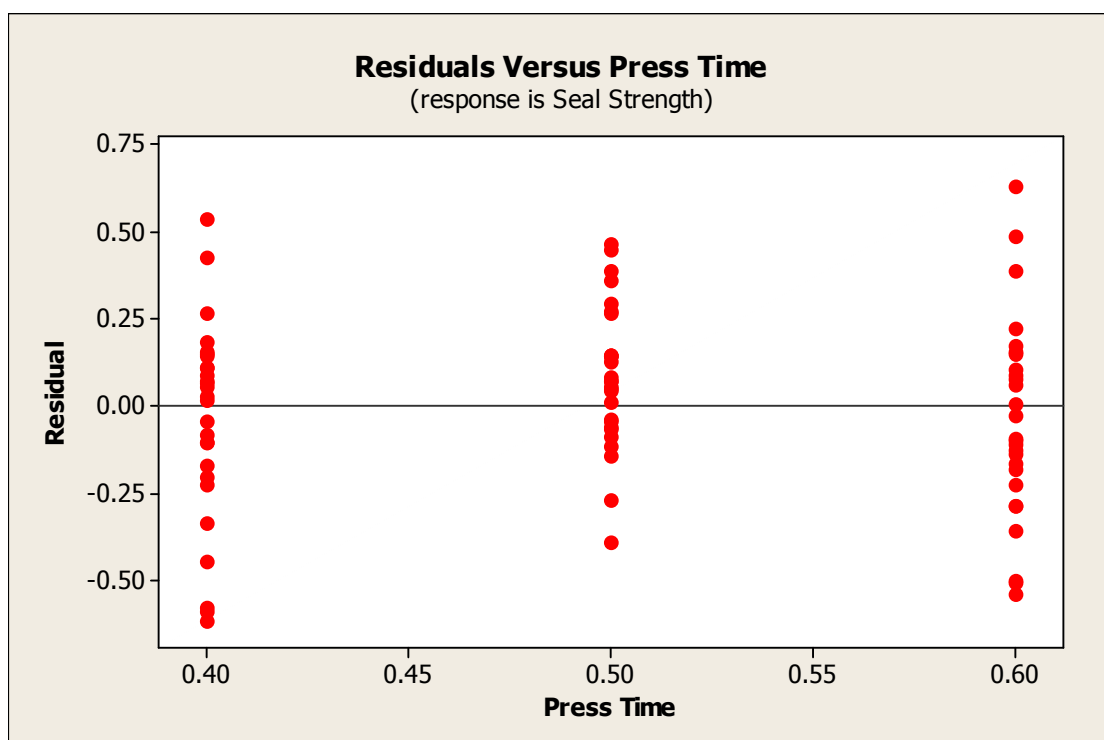
ภาพประกอบ 80 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลากดและเป่าลมเย็นของถุงหนา (ปากถุง)



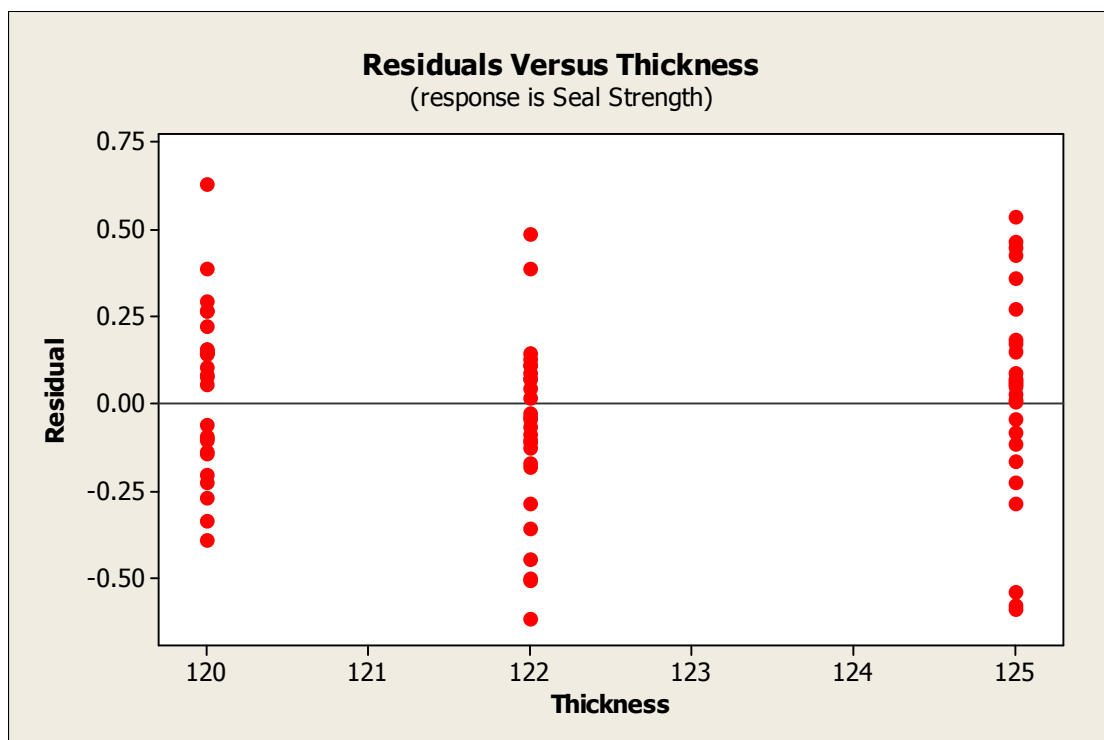
ภาพประกอบ 81 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของถุงหนา (ปากถุง)



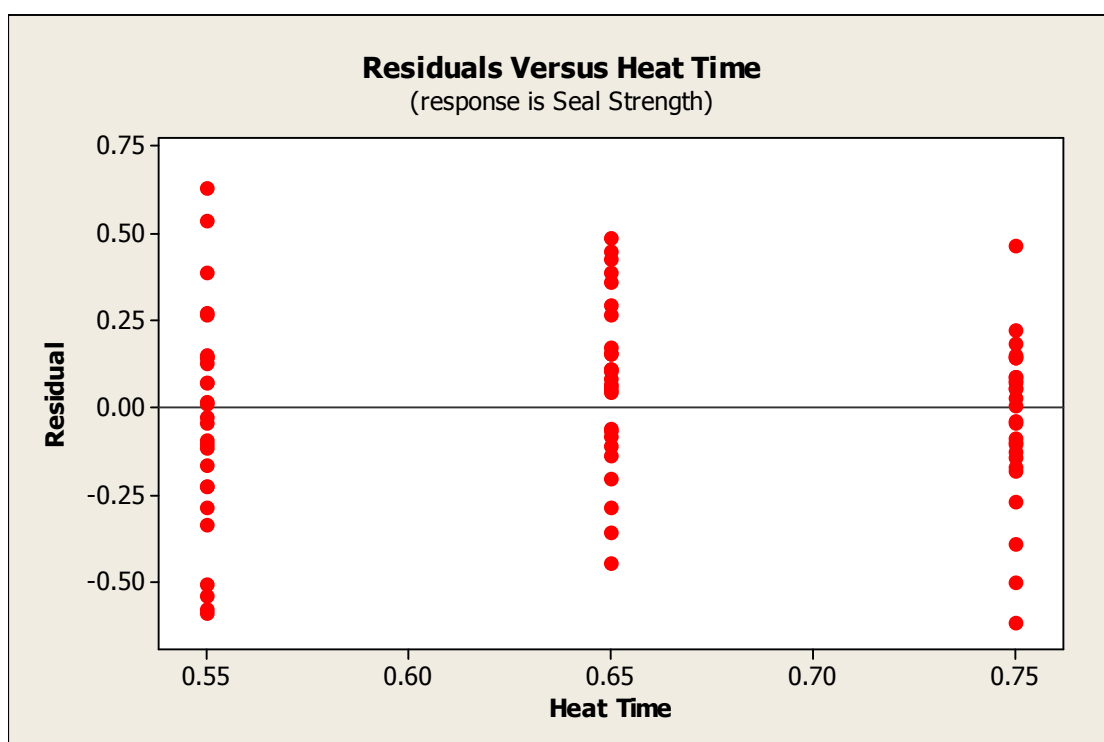
ภาพประกอบ 82 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของถุงหนา (ปากถุง)



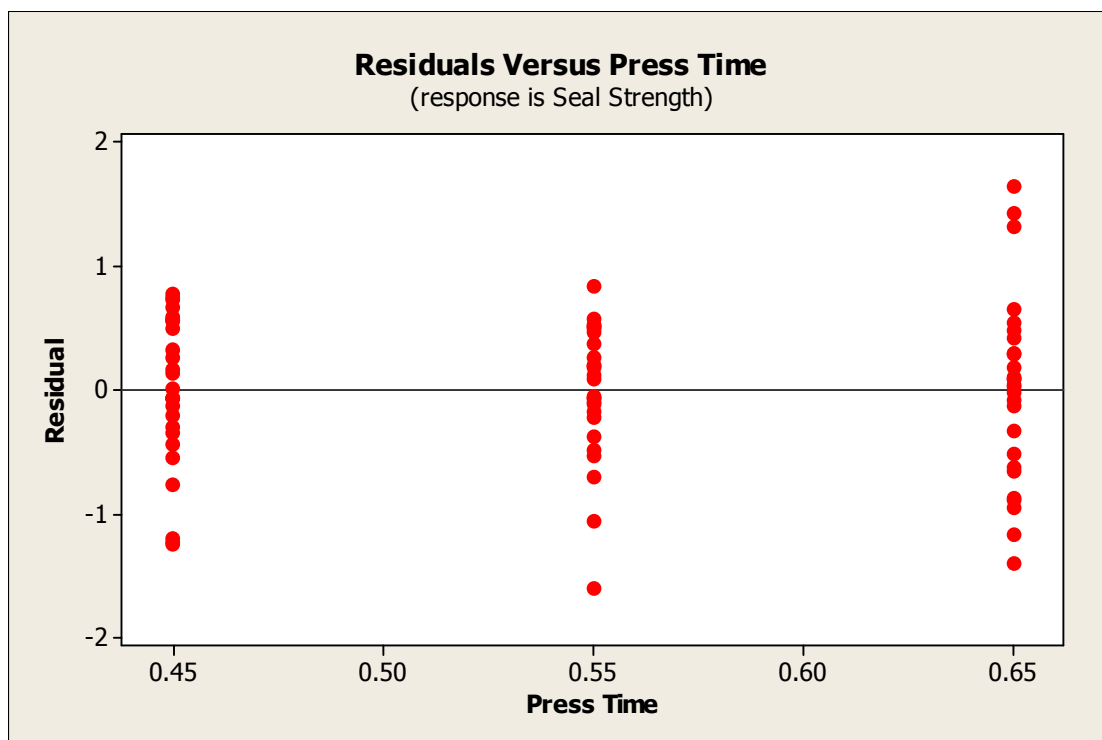
ภาพประกอบ 83 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลากดและเป่าลมเย็นของถุงหนา
(ก้นถุง)



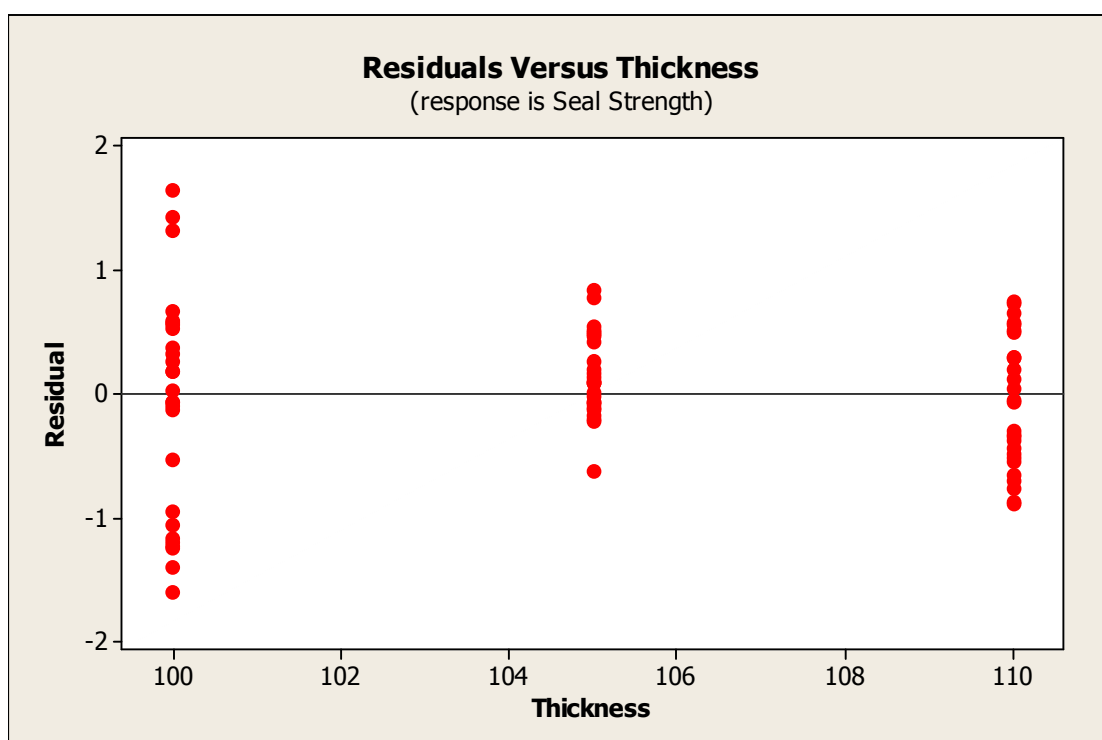
ภาพประกอบ 84 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของถุงหนา (ก้นถุง)



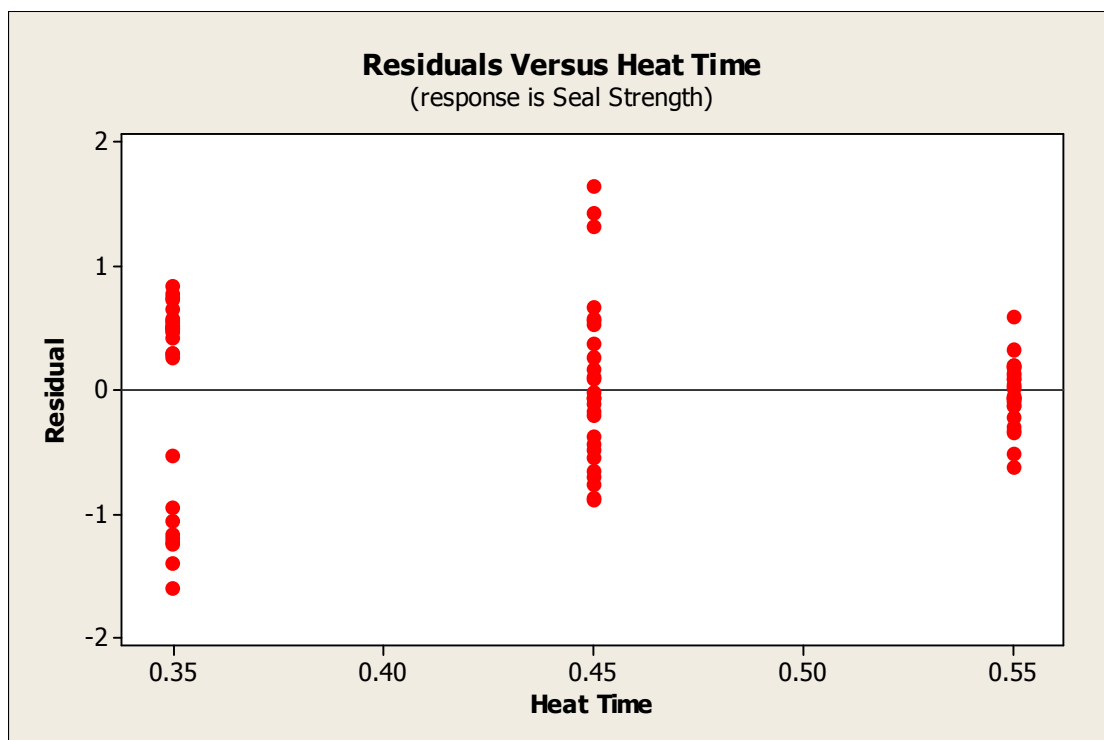
ภาพประกอบ 85 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของถุงหนา (ก้นถุง)



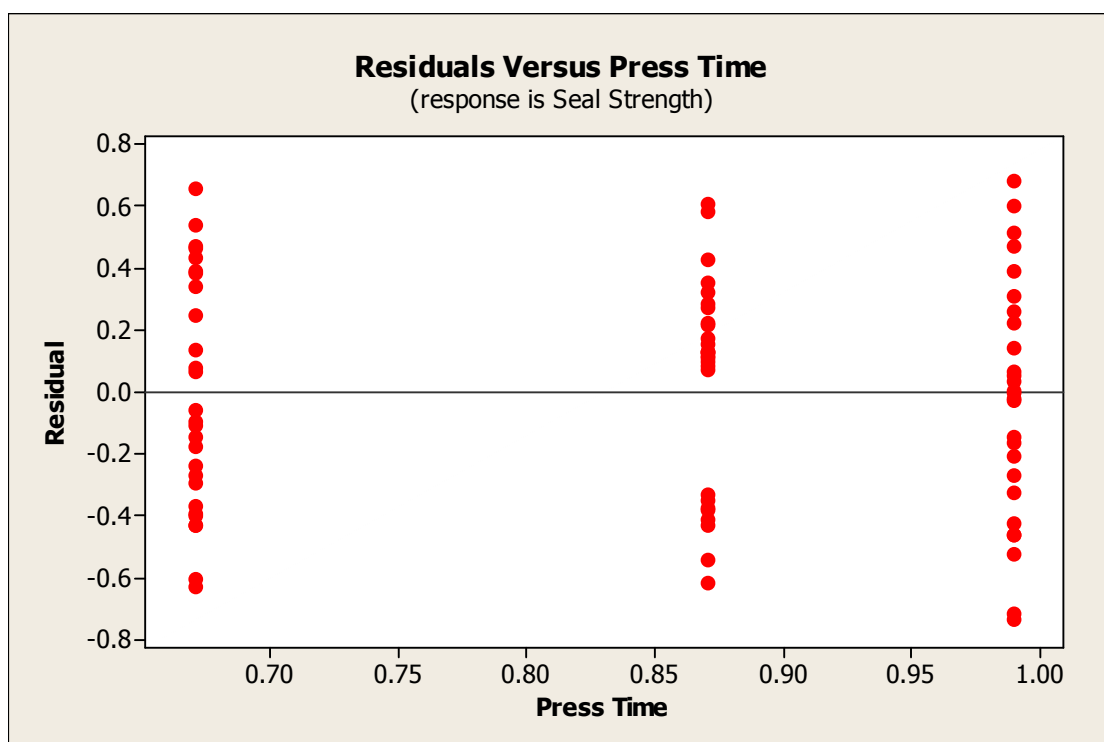
ภาพประกอบ 86 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลากดและเป่าลมเย็นของถุงบาง (ปากถุง)



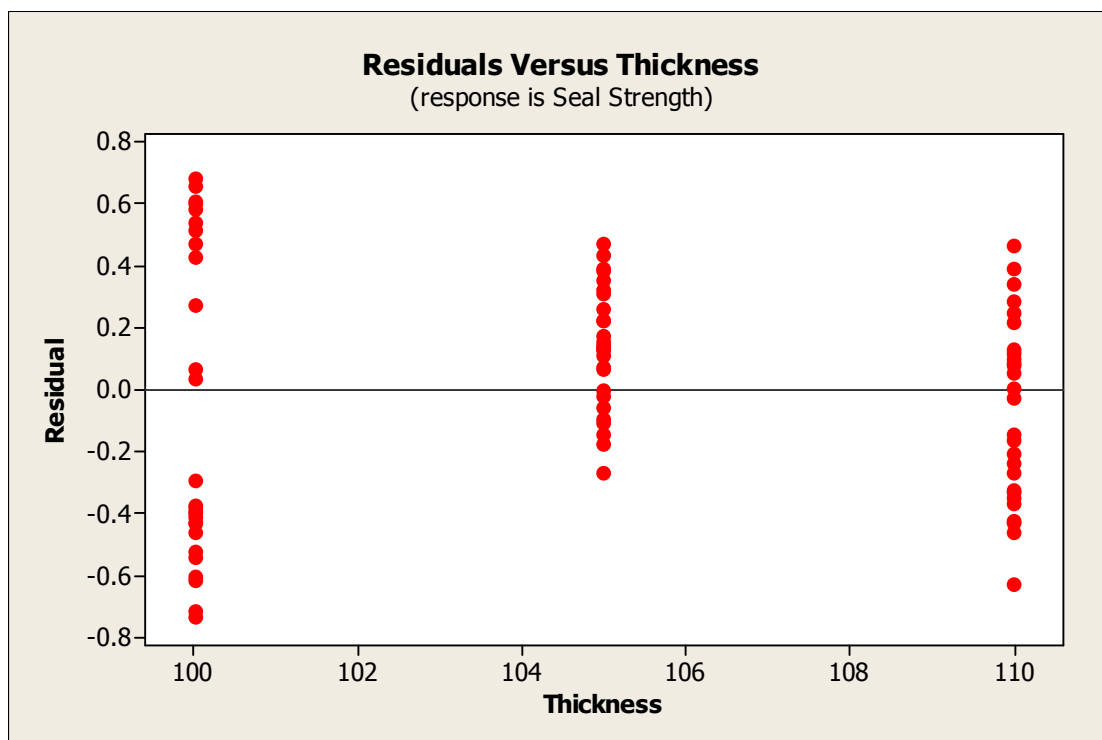
ภาพประกอบ 87 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของถุงบาง (ปากถุง)



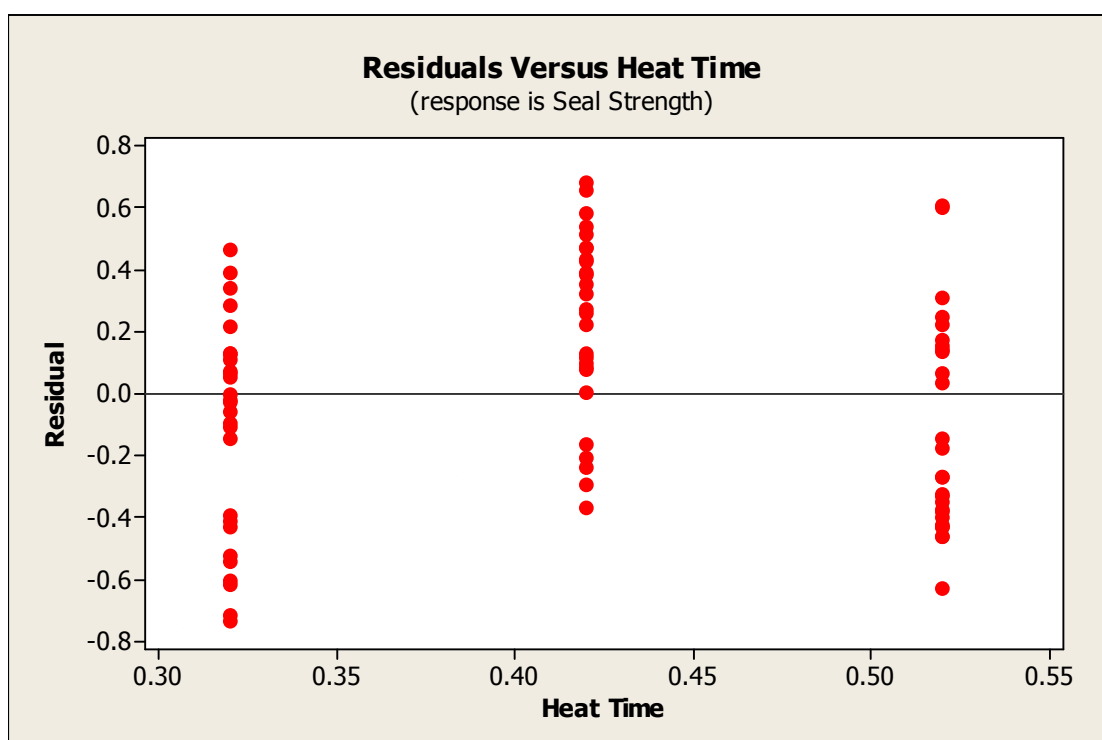
ภาพประกอบ 88 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของถุงบาง (ปากถุง)



ภาพประกอบ 89 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลากดและเป่าลมเย็นของถุงบาง (ก้นถุง)



ภาพประกอบ 90 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับความหนาของถุงบาง (ก้นถุง)



ภาพประกอบ 91 กราฟการกระจายของ Residual เทียบกับเวลาความร้อนของถุงบาง (ก้นถุง)

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายชวลิต มณีสรี
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤศจิกายน 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	11/62 (หมู่บ้านนราวัลย์) ซอยสายไหม 56/1 แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220 โทรศัพท์ 0-2990-5942
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ประจำ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2542 วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ) จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2546 วศ.ม. (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ