



การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

# มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

โดย  
นายไพโรจน์ จันทร์โสภณโน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

โดย

นายไพโรจน์ จันทร์โสภณโน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE STUDY OF SUITABLE FACTOR FOR WELDING ON FOOD CAN BY DESIGN OF  
EXPERIMENT METHOD**

**By**

**Paisan Chantasoponno**

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**MASTER OF ENGINEERING**

**Department of Industrial Engineering and Management**

**Graduate School**

**SILPAKORN UNIVERSITY**

**2010**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธีการออกแบบการทดลอง ” เสนอโดย นายไพโรจน์ จันทร์โสภณโน เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.กัญจนา ทองสนิท)

๑๕ / ๕ / ๕๕

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ สิริโอฬาร )

๑๕ / ๕ / ๕๕

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)

๑๕ / ๕ / ๕๕

52405317 : สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

คำสำคัญ: การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม/การออกแบบการทดลอง/การเชื่อม/อาหารกระป๋อง

ไพโรสัทธ์ จันทโสภณ โน : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจวบ กล่อมจิตร. 104 หน้า.

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมาทำการศึกษาปัจจัยถึงสี่ปัจจัยคือกระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง ขนาดของลวดทองแดง พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็กโดยทำการทดสอบลักษณะของรอยเชื่อม ลักษณะคือความแข็งแรงของรอยเชื่อม การประสานรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อม การยึดตัวของรอยเชื่อมและทำการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

การศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมและขนาดความหนาของรอยเชื่อมคือกระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง ขนาดของลวดทองแดง ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบการประสานรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อมและการยึดตัวของรอยเชื่อมคือกระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง ส่วนปัจจัยพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็กจะมีอิทธิพลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปัจจัยตัวอื่น จากการศึกษาครั้งนี้โดยอาศัยผลการทดสอบรอยเชื่อมทั้งสี่ลักษณะสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ดังนี้คือกระแสไฟฟ้า 55 แอมป์ แรงดันสปริง 60 daN. ขนาดลวด 2.10 มิลลิเมตรและพื้นที่การซ้อนทับของแผ่น 0.7 มิลลิเมตร

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

52405317 : MAJOR : ENGINEERING MANAGEMENT

KEY WORDS : THE STUDY OF SUITABLE FACTOR/DESIGN OF EXPERIMENT/WELDING /FOOD CAN

PAISAN CHANTASOPONNO : THE STUDY OF SUITABLE FACTOR FOR WELDING ON FOOD-CAN BY DESIGN OF EXPERIMENT METHOD.THESIS ADVISOR : ASST.PROF.PRACHUAB KLOMJIT.D.Eng.. 104 pp.

Design of experiment was applied in this research. The main factors included the electric current, a spring pressure, size of copper wire and overlap. By testing the response variable, welding strong, weld flexible, weld thickness, post weld overlap, then study aimed to use the proper conditions for high quality. The results indicated that electric current, a spring pressure, size of copper wire have an influence in welding strong and weld thickness. Electric current and spring pressure have an influence in welding, post weld overlap and weld flexible, overlap have few influence in other factors. Finally this study concluded that the best conditions were electric current 55 Amp., a spring pressure 60 daN., welding force 2.10 mm., and overlap 0.7 mm.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

---

Department of Industrial Engineering and Management Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2010

Student's signature .....

Thesis Advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณา แนะนำ ช่วยเหลือเป็นอย่างยิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร อาจารย์ ดร.กัญญา ทองสนิมและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ สิริโอพาร ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในข้อมูลต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายรังสรรค์ องค์กรรักษา ตำแหน่งที่ปรึกษาด้านเทคนิคและนาง นงนุช คั่นเมฆ ตำแหน่งหัวหน้าส่วนประกันคุณภาพ บริษัทยูนิเวอร์แซลแคน จำกัด ที่ได้กรุณาให้แนวคิด ข้อเสนอหลายประการ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและบริษัทยูนิเวอร์แซลแคน จำกัด ที่ใช้ในการทดลองและให้ข้อมูลอย่างเต็มที่อย่างเป็นกัลยาณมิตร ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จในเวลาอันรวดเร็ว และขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่านซึ่งไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้หมด

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนชี้แนะและเป็นกำลังให้ด้วยดีเสมอมา

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1     บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
สมมติฐานการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย .....	3
ขั้นตอนการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย .....	3
2     เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
หลักการทำงานของการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร .....	4
Spot Welding .....	4
ความต้านทาน .....	5
Roller Seam Welding .....	5
อิเลคโตรสในเครื่องเชื่อม .....	5
Tin Plate.....	6
คุณสมบัติการเชื่อม.....	7
การเลือกกระแสไฟเชื่อม .....	7
ความเร็วลวดและระยะของกระป๋อง .....	8
การบังคับการเชื่อมกระป๋อง .....	8
การออกแบบการทดลอง.....	8
วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง .....	9
หลักในการออกแบบการทดลอง.....	10
ลำดับขั้นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง .....	10



บทที่	หน้า
การเลือกตัวแปรตอบสนอง.....	10
ขั้นตอนการสรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	11
หลักสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	11
การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	11
การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ .....	12
การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	13
แผนการทดลองแบบแฟคโทเรียล .....	15
การประมาณการทดสอบเอฟ .....	20
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	22
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	28
คุณสมบัติของปัจจัยที่ทำการทดลอง .....	28
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย .....	31
การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา.....	32
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	33
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
ขั้นตอนการทดลอง .....	35
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม .....	41
การวิเคราะห์ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม .....	49
การวิเคราะห์ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม .....	56
การวิเคราะห์ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม.....	61
การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง .....	70
5 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	75
สรุปผลการวิจัย .....	75
ข้อเสนอแนะ .....	77
บรรณานุกรม .....	79
ภาคผนวก .....	81

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	82
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางด้านเทคนิค .....	98
ภาคผนวก ค ภาพประกอบการทดลอง.....	102
ประวัติผู้วิจัย .....	104

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย (ANOVA Table) .....	14
2	การกำหนดระดับปัจจัย .....	33
3	แสดงตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	34
4	ลำดับการทดลอง .....	38
5	เกณฑ์น้ำหนักการให้คะแนนของผลการทดลอง .....	39
6	ลำดับในการทดลองทั้ง 4 ปัจจัย .....	40
7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม .....	42
8	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง..	44
9	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ การซ้อนทับ .....	45
10	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของ ลวดเชื่อม .....	46
11	การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ	47
12	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับขนาดของ ลวดเชื่อม .....	47
13	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม .....	48
14	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม .....	50
15	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง.	52
16	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ การซ้อนทับ .....	53
17	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของ ลวดเชื่อม .....	54
18	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่ การซ้อนทับ .....	54
19	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับขนาดของ ลวดเชื่อม .....	55
20	ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม .....	56

ตารางที่	หน้า
21	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม ..... 57
22	ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง..... 60
23	ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม ..... 61
24	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ..... 62
25	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง..... 65
26	การทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ .... 66
27	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของ ลวดเชื่อม ..... 67
28	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ . 68
29	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างพื้นที่การซ้อนทับกับขนาดของ ลวดเชื่อม ..... 68
30	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ..... 69
31	การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง ..... 70
32	การประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ..... 71
33	การประเมินผลเปรียบเทียบกับสภาวะการเชื่อมกระป๋องในปัจจุบัน ..... 73
34	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ ..... 73
35	ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rip Weld Test) ..... 83
36	ผลการทดสอบการประสานรอยเชื่อม (Ball Weld Test) ..... 84
37	ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)..... 85
38	ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)..... 86
39	ผลค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)..... 87
40	ส่วนประกอบทางเคมีเป็นร้อยละของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก..... 101

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กราฟแสดงของเสียจากการผลิตจากปัญหาการเชื่อมไม่สมบูรณ์.....	2
2	ลักษณะการเชื่อม 4 แบบ .....	4
3	แสดงการเชื่อมแบบ โรลเลอร์ .....	5
4	แสดงลักษณะลวดเมื่อถูกกด .....	6
5	แสดงการวาง โรลตัวบนและตัวล่างไม่ขนานกัน .....	6
6	แสดงรายละเอียดของแผ่นเหล็ก Timplat .....	7
7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันสปริง .....	7
8	แสดงแบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ .....	9
9	แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	9
10	แสดงกราฟการกระจายของฟิชเชอร์ (Fisher).....	5
11	แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลและมีผล .....	15
12	แสดงการทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ $3^2$ .....	16
13	แสดงการทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ $3^3$ .....	17
14	แสดงลักษณะการตัดปากกระป๋อง .....	35
15	แสดงลักษณะการตัดแผ่นเหล็กกระป๋อง.....	36
16	การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม .....	43
17	ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความ แข็งแรงของรอยเชื่อม .....	43
18	ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม .....	44
19	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง.....	44
20	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ .....	45
21	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม .....	46

ภาพที่	หน้า
22	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อมทับ ..... 46
23	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อมทับ ..... 47
24	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม..... 48
25	การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ..... 51
26	ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความ ประสานของรอยเชื่อม ..... 51
27	ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม ..... 51
28	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง..... 52
29	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการเชื่อมทับ..... 53
30	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม..... 53
31	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อมทับ ..... 54
32	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อมทับ ..... 55
33	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม..... 55
34	การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม ..... 58
35	ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความกว้าง ของรอยเชื่อม ..... 59
36	ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม ..... 59
37	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง..... 60

ภาพที่		หน้า
38	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม .....	60
39	การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม .....	64
40	ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบการยึดตัว ของรอยเชื่อม .....	64
41	ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม .....	64
42	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง .....	65
43	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ .....	66
44	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ .....	67
45	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ .....	67
46	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ระหว่างแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม .....	68
47	กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม .....	69
48	เปอร์เซ็นต์เสียจากการผลิตหลังการนำค่าที่ได้จากการศึกษาไปควบคุมใช้งาน .....	74
49	แสดงอุปกรณ์สำหรับ Rip Test .....	103
50	แสดงอุปกรณ์สำหรับ Ball Test .....	103
51	แสดงอุปกรณ์สำหรับวัดความกว้างของรอยเชื่อม .....	103

## บทที่ 1

### บทนำ

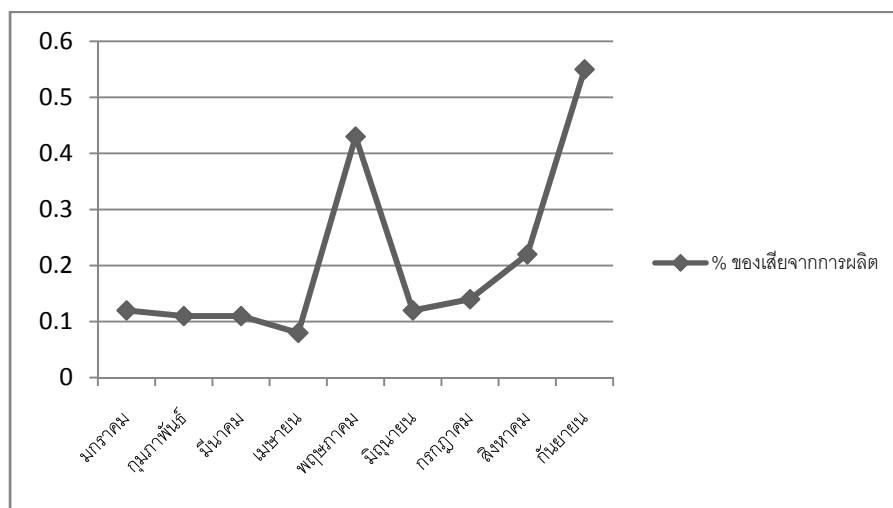
#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระป๋องบรรจุอาหารมีประโยชน์เพื่อการถนอมรักษาอาหาร ปัจจุบันการใช้กระป๋องบรรจุอาหารเป็นสิ่งจำเป็นและใช้กันโดยทั่วไป ในประเทศไทยมีการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารประมาณ 800 ล้านกระป๋องต่อปี อุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารและผลไม้มีการแข่งขันกันทางด้านคุณภาพและราคา โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาจำหน่ายต้องมีคุณภาพสูงตามมาตรฐานสากลและจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยและการควบคุมการผลิตที่ดี เพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าผลิตภัณฑ์จะบรรลุตามความต้องการของลูกค้า ประเทศไทยจัดเป็นประเทศหนึ่งในทวีปเอเชียที่ส่งอาหารกระป๋องไปสู่ทวีปต่างๆในโลก โดยมียอดการส่งออกสูงอยู่ในอันดับต้นๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ดังนั้นขั้นตอนสำคัญที่จะนำไปสู่การผลิตกระป๋องบรรจุอาหารที่มีคุณภาพ จะขึ้นอยู่กับสถานะของปัจจัย (Factor) ต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตกระป๋อง เช่น การเชื่อมกระป๋อง การเคลือบแลคเกอร์ที่ผิวกระป๋อง, กระบวนการพ่นเคลือบ Polyester-Powder บนแนวเชื่อมของกระป๋องและกระบวนการปิดผนึกฝากระป๋อง ถ้ามีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตใดแล้วก็จะส่งผลต่อคุณภาพอาหารที่บรรจุลงไปภาชนะกระป๋องนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ภาชนะกระป๋องบรรจุอาหารจะต้องมีคุณภาพที่ดีเพื่อที่จะสามารถเก็บอาหารได้เป็นเวลานาน โดยที่อาหารไม่เสื่อมสภาพลงเนื่องจากกระป๋องที่มีคุณภาพต่ำอาจมีผลกระทบต่อทางเลือกซื้อของผู้บริโภค การเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารนั้น ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพอย่างมาก เพราะจะเป็นตัวชี้บ่งถึงคุณภาพของตัวกระป๋อง ซึ่งมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเชื่อม ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปัจจัยเพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตที่มีความเชื่อถือได้ จากการศึกษาข้อมูลในขบวนการผลิตกระป๋องพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตใน Size 603\*700 มีของเสียมากที่สุดเกี่ยวกับการเชื่อมกระป๋อง ซึ่งลักษณะการเกิดปัญหา สามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 ประเภทคือ รอยเชื่อมแข็งเปราะ (Hot Weld), รอยเชื่อมคอด (Narrowed Weld), รอยเชื่อมอ่อนเปราะ (Cold Weld) การทดสอบลักษณะของรอยเชื่อม 4 มีลักษณะ คือ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม การประสานรอยเชื่อม การยึดตัวของรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อม โดยปัญหาทั้งหมดนี้เมื่อเกิดเป็นของเสียแล้วไม่สามารถนำมาแก้ไขเป็นของดีเพื่อย้อนสู่กระบวนการผลิตได้ หากแต่จะเป็น



ของเสียที่ต้องทำการทิ้งเพียงอย่างเดียว ที่มีคุณค่าได้อย่างเดียวคือซังขายเป็นเศษเหล็ก ทั้งนี้ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เพราะเหล็กจะเป็นวัตถุดิบต้นทุนที่มีราคาสูงที่สุดในกระบวนการผลิต



ภาพที่ 1 กราฟแสดงของเสียจากการผลิตจากปัญหาการเชื่อมไม่สมบูรณ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สาขาวิศวกรรมศาสตร์

จากการศึกษากระบวนการการเชื่อมกระป๋อง พบว่ามีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดังนี้

- ปริมาณกระแสไฟฟ้า
- แรงดันสปริง
- พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก
- ขนาดของลวดเชื่อม

ด้วยเหตุนี้เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิต จึงเป็นมูลเหตุที่ทำให้ผู้วิจัยเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเชื่อมของกระป๋อง โดยให้นำข้อมูลจากโรงงานตัวอย่างมาทำการศึกษ เพื่อทำการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการ การเชื่อมของกระป๋องให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมกระป๋องคือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็กและความหนาของลวดเชื่อม

2.2 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองที่ทำให้การเชื่อมกระป๋องที่ได้มีคุณภาพที่ดีเหมาะสมต่อการใช้งาน

### 3. สมมติฐานการวิจัย

ปริมาณปัญหาที่เกิดจากการเชื่อมกระป๋องพบว่ามีจำนวนมากถ้ามีการปรับค่าของปัจจัยต่างๆให้เหมาะสมจะทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่เป็นของดีเพิ่มมากขึ้น

### 4. ขอบเขตการวิจัย

- 4.1 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมกระป๋อง ใน Size 603 x 700
- 4.2 ทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยเทคนิคการออกแบบทดลองเชิงสถิติ
- 4.3 ทำการออกแบบและวิเคราะห์สรุปผลเชิงสถิติวิศวกรรม
- 4.4 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง

### 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

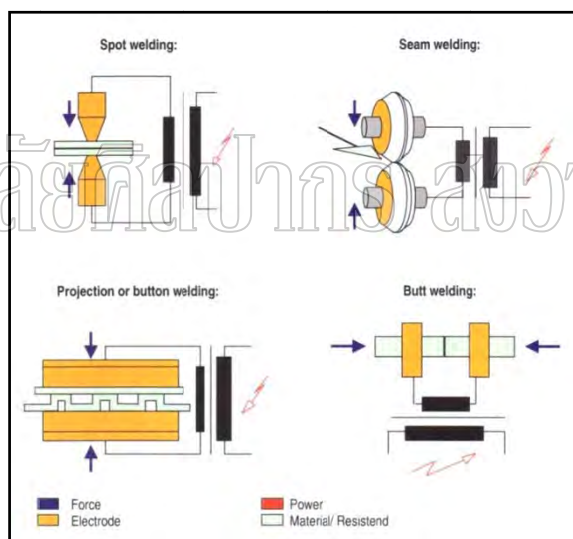
- 5.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมกระป๋อง
- 5.2 ทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตการเชื่อมกระป๋อง
- 5.3 ลดความเสี่ยงจากการผลิตในกระบวนการเชื่อมกระป๋อง
- 5.4 เป็นแนวทางเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานและวิจัยสำหรับอุตสาหกรรมที่มีความ

ใกล้เคียง

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการทำงานของเครื่องเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร

กระบวนการเชื่อมคือกระบวนการขึ้นรูปเชื่อมต่อกันระหว่างโลหะโดยเป็นการกดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านความร้อนจะถูกสร้างด้วยกระแสไฟฟ้าโดยจะปรากฏลงแผ่นโลหะ โดยกระแสไฟฟ้าผ่านอิมัลชันกระจายความร้อนสู่แผ่นเหล็ก การต้านความร้อนของแผ่นเหล็กจะสูงกว่าอิมัลชันความร้อนกระจายจะปรากฏให้เห็นในการเชื่อมปกติ กล่าวคือ ลักษณะการเชื่อมแบ่งออกได้ 4 แบบคือ



ภาพที่ 2 ลักษณะการเชื่อม 4 แบบ

#### 1.1 Spot Welding

ขั้วไฟฟ้า E1 และ E2 จะกำหนด I (ปริมาณ) ความร้อนที่ต้องการและสามารถปรับกำลังการเชื่อม กฎของจูลส์เรื่องจุดความร้อน ปริมาณของความร้อน Q จะสมมูลกับการทำงานของ W เมื่อกระแสไฟฟ้าเชื่อม กำลังการเชื่อม และเวลาเชื่อมถูกตั้งค่าอย่างถูกต้องความร้อนจะเป็นตัวนำโลหะมาเชื่อมกัน โดย ความร้อนจะถูกกระจาย และความร้อนบางส่วนหายไปเมื่อถูกน้ำหล่อเย็น

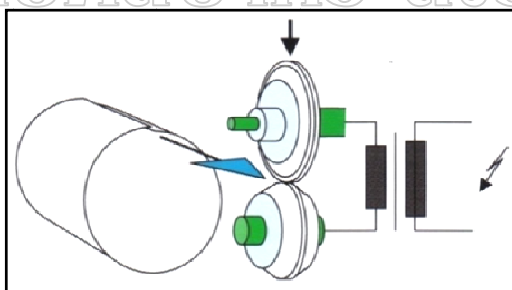
## 1.2 ความต้านทานความหมายของการต้านในกระบวนการเชื่อม จะประกอบด้วย

1.2.1 ด้านวัตถุคือ การต้านจากวัตถุโดยตรงหมายถึงแผ่นเคลือบผิว โดยจะพบได้จากลักษณะทั่วไปของแผ่นเหล็ก ที่เกิดโดยลักษณะทางกายภาพของแผ่นเหล็ก ขนาดกระแสไฟในการเชื่อม และอุณหภูมิในการเชื่อม

1.2.2 การเชื่อมต่อหรือการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองตัวนำซึ่งผ่านจากตัวนำไปที่อื่นๆ ตัวเชื่อมจะกดโลหะทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยจุดที่อยู่อีกด้านหนึ่ง เข้ามาต่อกัน การเปลี่ยนรูปร่างขึ้นอยู่กับตัวเลขที่ตั้งไว้และขนาดของตัวเชื่อม กระบวนการขึ้นรูปแต่ละจุดอาจมีการเปลี่ยนรูปร่างหรือมีระยะที่เปลี่ยนแปลง ส่วน contact A0 เป็นส่วนหนึ่งที่ต้องพิจารณาแต่น้อยกว่า appearance contact surface A0 จุดประสงค์เพื่อหากระแสไฟเพิ่มที่ดีที่สุด ตามด้วยสัดส่วนที่ลดลง ในบริเวณสัมผัส กระแสไฟเชื่อมมีความเชื่อมโยงกับระดับความร้อนที่สัมผัส ในทางกลับกันความร้อนที่บริเวณสัมผัสอาจไม่พอต่อการต้านกระแสไฟฟ้า

## 1.3 Roller seam welding

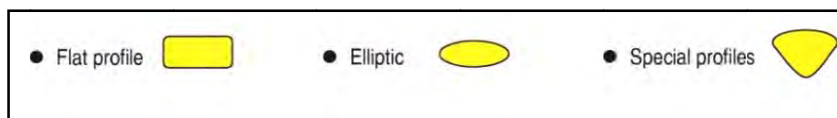
กระบวนการเชื่อมต่อแผ่นกลมจุดที่ขั้วไฟฟ้าสร้างขึ้น โดย roller อิเล็กโตรส เทียบกับ rod อิเล็กโตรส roll เคลื่อนย้ายชิ้นงานเช่นเดียวกับการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาควบคุมอิเล็กโตรส



ภาพที่ 3 แสดงการเชื่อมแบบโรลเลอร์

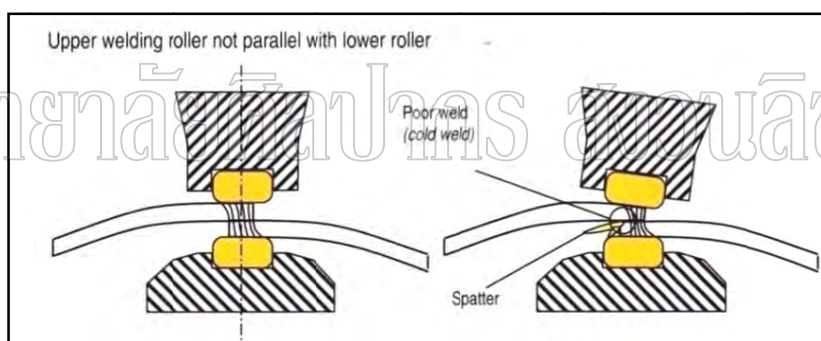
## 1.4 อิเล็กโตรสในเครื่องเชื่อมของ Soudronic

แผ่นเหล็กเคลือบผิวถูกเชื่อมด้วยลวดทองแดงซึ่งผ่านไปยังแนวเชื่อมที่แผ่นเหล็กละลายที่อุณหภูมิ 230 องศา และลวดถูกละลายป้องกันการปนเปื้อนที่ใช้โรลเชื่อม ลวดทองแดงที่ร่องโรล ต้องสะอาดและหยุดตรวจสอบเป็นระยะ จุดสำคัญความแข็งของลวดมีผลกับลักษณะการเชื่อมดังนั้น ลวดควรมีคุณภาพสูงผ่านการทดสอบอย่างละเอียด รูปแบบลวดมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในกรณีที่มีการพัฒนาเครื่องจักร ปัจจุบันมี 3 อย่างคือ



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะลวดเมื่อถูกกด

ซึ่งจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของกระแสไฟที่ไหลลงไปสัมผัสจากลวดสู่แผ่นเหล็ก เมื่อโรลตัวบนและล่างไม่ขนานกัน หน้าสัมผัสและส่วนที่เกี่ยวข้องมีผลต่อกระแสไฟฟ้าบนแผ่นเหล็ก เพียงข้างเดียวก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของความร้อน นั่นหมายถึงแม้การตั้งค่าอื่นๆเป็นปกติ ความร้อนเกิดขึ้นที่จุดที่มีการไหลเวียนมากกว่า สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน

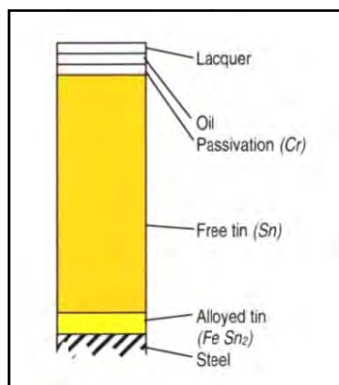


ภาพที่ 5 แสดงการวางโรลตัวบนและตัวล่างไม่ขนานกัน

ความร้อนกระจายรอบๆแต่ละจุดเชื่อม (Nugget) โดยจุดแรกและจุดสุดท้ายจะใช้ความร้อนเป็นพิเศษ และใช้ความเร็วต่ำ (มากกว่า 12 เมตรต่อนาที) ซึ่งทำให้ความร้อนมากที่จุดเชื่อมจุดสุดท้าย ความร้อนช่วงก่อนหน้าไม่สามารถเชื่อมแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ จะส่งผลในกรณีบริเวณรอยเชื่อมเมื่อปิดฝา กระแสเชื่อมจะลดลงเมื่อสิ้นสุดการเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดสิ่งเหล่านี้ขึ้น

### 1.5 Tinplate

Tinplate คือแผ่นเหล็กบาง ( ความหนา 0.49 มิลลิเมตรขึ้นไป) และมีดีบุกเคลือบป้องกันเป็นชั้นๆ



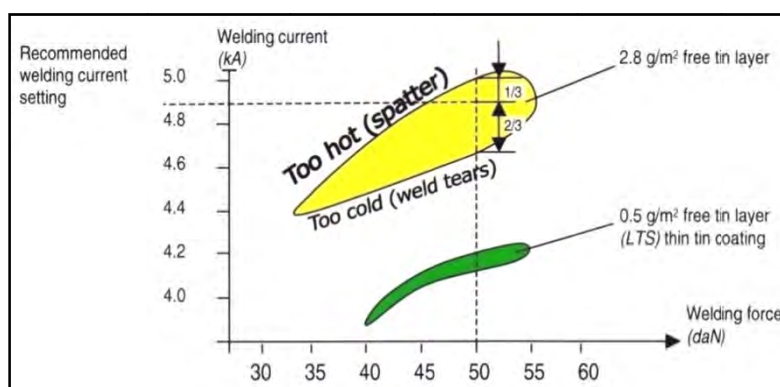
ภาพที่ 6 แสดงรายละเอียดของแผ่นเหล็ก Tinplate

ส่วนประกอบอันดับแรกของเหล็ก Tinplate มีดังนี้ แลคเกอร์เคลือบผิวมีผลเพิ่มการต้านของกระแสไฟฟ้าหากมีมากเกินไปอาจทำให้ลวดไม่เชื่อมได้ น้ำมัน ป้องกันการกัดกร่อน สังกะสีได้ แต่ไม่มีผลต่อการเชื่อม Free Tin มีผลโดยตรงต่อการเชื่อม ชั้นนี้เป็นเนื้อเหล็กทั้งหมดอยู่ชั้นบนของชั้นโลหะผสม Alloyed tin ได้มาจากกรรมวิธีทางเคมีกับแผ่นเหล็ก

#### 1.6 คุณสมบัติการเชื่อม

คุณสมบัติการเชื่อมในที่นี้หมายถึงการเชื่อมที่ดีและบรรจุเป้าหมาย คุณสมบัติอันดับแรกโดยความหนาของชั้น free tin และกระแสไฟเชื่อม โดยทั่วไปการตั้งค่ากระแสไฟเชื่อมที่ดีจะมีความเป็นไปได้สูง และทำเมื่อไรก็ได้ แผ่นเหล็กเคลือบดีบุกที่ถูกซื้อควรมีค่า free tin หนาที่ 0.5 g/m<sup>2</sup> ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าเชื่อมปราศจากเม็ดโลหะถ้าค่า free tin ในแผ่นมีค่าน้อยกว่า 0.5 g/m<sup>2</sup>

#### 1.7 การเลือกกระแสไฟเชื่อม



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันสปริง

เงื่อนไข ตามความเหมาะสม หรือที่เรียกว่า การช้อนทับที่ต้องการ

- ความหนาแน่นหลังจากการปิด
- การปรับเข้าและออก
- หากกระแสไฟฟ้าที่มีความเป็นไปได้อันมากที่สุด การวัดกระแสไฟฟ้านี้อยู่บนพื้นฐาน

ของ จำนวนสูงสุดของ เม็ดโลหะ โดยจำกัด โดย spec ของบริษัท หรือ spec ความหนากระป๋อง หากระแสไฟที่มีความเป็นไปได้อันต่ำสุด หรือกระแสไฟที่ปิดฝาแล้วไม่ฉีกเมื่อทดสอบ ระยะการเชื่อมระหว่าง 2 ค่าทางผู้ขายแนะนำ ให้ตั้งที่ 2/3 ของค่าน้อยสุดสำหรับการผลิต ระดับของกระแสไฟเชื่อมขึ้นอยู่กับความหนาของดีบุก ดีบุกมาก ต้องการกระแสไฟมาก ซึ่งอาจมีผลกับความแข็งของดีบุกและขนาดของผิวสัมผัส

### 1.8 ความเร็วลวดและระยะของกระป๋อง

การขับเคลื่อนของมอเตอร์ทั้งสองตัว ผลักดันให้ลวดทองแดงเข้าไปในเครื่องจักร ความเร็วของลวดขึ้นอยู่กับความสูงของกระป๋อง ความสามารถในการผลิตกระป๋องต่อนาที การดึงลวดและระยะเพื่อของลวดประมาณ 1 มิลลิเมตร

การคำนวณความเร็วลวด

$V_s$  (เมตร/ นาที) = (ความสูงของกระป๋อง + ระยะเพื่อ 1 มิลลิเมตร) x ความเร็วในการผลิต (กระป๋อง/นาที) วิธีการตรวจสอบความเร็วลวด รายละเอียดดังตัวอย่างเป็นวิธีการวัดระยะห่างกระป๋อง ดีบุกทางด้านซ้ายเป็นตัวชี้ระยะกระป๋องได้เป็นอย่างดี ระยะห่างระหว่างกระป๋องใบแรกและใบที่สอง โดยปกติจะมีระยะสั้นกว่าระยะห่างของกระป๋องใบถัดไป กระป๋องใบแรกจะมีการด้านของลวดทองแดง เพราะการร่นเวลามากกว่าปกติ

### 1.9 การบังคับการเชื่อมกระป๋อง

ในการปรับตั้งการเชื่อมกระป๋องมีส่วนสำคัญอยู่สองส่วน คือมั่นใจว่ากระป๋องถูกส่งเข้ากระบวนการเชื่อมแล้ว การลดการสัมผัสขณะอยู่ในระหว่างกระบวนการเชื่อม กระบวนการเชื่อมจะถูกตั้งค่าตามคุณภาพของแผ่นเหล็ก (ความแข็ง, ความหนา) และ เส้นผ่านศูนย์กลางของการเชื่อม ตามกฎแสดงให้เห็นว่า เส้นผ่านศูนย์กลางการเชื่อมควรอยู่ที่ 45-73 มิลลิเมตร จึงเป็นลักษณะการเชื่อมที่ดี เพราะ กระป๋องตั้งค่าเชื่อมไว้ที่ 45-70 daN

## 2. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

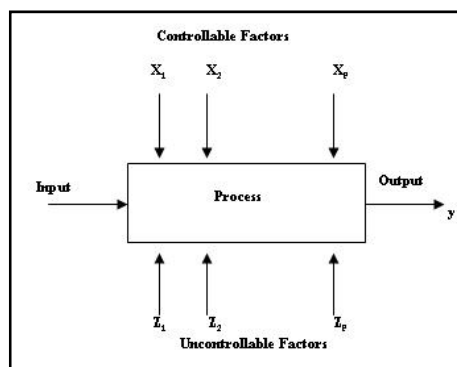
เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่า ปัจจัย(Factor) ใดหรือตัวแปร(Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งๆ ที่ให้ความสำคัญ ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response)

ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น

- ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถ

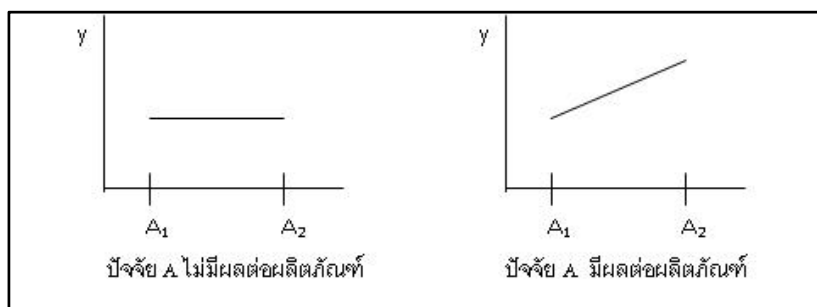
กำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

- ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิตอันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอและต้นทุนที่ใช้ในการควบคุมสูง



ภาพที่ 8 แสดงแบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ยกตัวอย่างเช่น ให้  $y$  เป็นค่าของความหนา และ  $A$  เป็นค่าของแรงกด ซึ่งจะสรุปผลได้ดังกราฟตัวอย่าง ดังนี้



ภาพที่ 9 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

## 2.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

2.1.1 เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือการพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์



2.1.2 เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์

## 2.2 หลักในการออกแบบการทดลอง

2.2.1 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่าๆกัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ให้กับทุกระดับที่ศึกษาให้เท่าๆกัน การทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 3 วิธีดังนี้ การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomization) , การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization) , การทำสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomization with in block)

2.2.2 การทำซ้ำ (Replication) คือการทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูล เพื่อจำกัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ออก

## 2.3 ลำดับขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่า ความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้ จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง การเลือกปัจจัยที่มีผล และระดับปัจจัยที่มีผลเป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่า มีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน แบบสุ่ม (Random level) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

2.4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้น จะต้องแม่นยำ รวมทั้งความถูกต้องของเครื่องวัดด้วย

2.4.1 การเลือกแบบการทดลอง จะต้องพิจารณาถึงจำนวนข้อมูลที่ทำการซ้ำในการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยง และต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

2.4.2 ทำการทดลอง ในขณะที่ทำการทดลอง จะต้องปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือต้องมีการสุ่ม การทำซ้ำ ข้อควรระวังขณะในการทำการทดลอง คือความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้ความผิดพลาด (Error) ที่ออกมา มีน้อยที่สุด

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติ เข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะตีความข้อมูล วิธีทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดมีผล (Effect) เท่าใดได้แน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผล

2.5 ขั้นตอนการสรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ ซึ่งอาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อปรับปรุงขบวนการผลิตให้ดีขึ้น

## 2.6 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.6.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้งานในการทดลอง มีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีความแปรผันที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายได้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100\%}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}}$$

ถ้าค่าของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ต่ำ สามารถแก้ไขโดย

2.6.2 เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

2.6.3 ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่

2.6.4 ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (noise factor) มีมาก ต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

## 2.7 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking)

$$\text{จากสมการ } Y_{ij} = \mu + \Gamma_i + \epsilon_{ij}$$

ซึ่ง  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ย

$\Gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

$\epsilon$  คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากการที่  $y$  (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) ดังนั้น  $y$  จะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้  $\epsilon$  มีการแจกแจงแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$

การตรวจสอบ  $\epsilon_{ij}$  มี 3 ขั้นตอนคือ

- การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้

- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่

- การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (megaphone) แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

2.8 การตั้งสมมุติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing) จากที่กล่าวมาแล้วในลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลองว่า ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีทางสถิติ นั้น จะมีความเสี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องอยู่ภายใต้ความเสี่ยงดังกล่าว

การตั้งสมมุติฐานในการตรวจสอบ จะตั้งสมมุติฐานใน 2 ทางเลือกคือ

$H_0$ : ระดับของปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

$H_1$ : ระดับของปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

ทั้งนี้ภายใต้ความเสี่ยง 2 ตัวคือ  $\alpha$  และ  $\beta$

$\alpha$  หมายถึง ความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมุติฐานหลัก (Null Hypotheses) ทั้งที่สมมุติฐานหลักเป็นจริง

$\beta$  หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมุติฐานหลัก ทั้งที่สมมุติฐานหลักไม่เป็นจริง และจากความเสี่ยงของทั้ง 2 แบบนี้เอง จึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้มีความเชื่อมั่น หรือมีความเสี่ยงตามที่กำหนดไว้ และในการทำการวิเคราะห์ ก็มักจะให้ค่าของ  $\alpha$  คงที่ และให้ค่า  $\beta$  น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

การตั้งสมมุติฐานแบ่งออกเป็น 2 กรณี

2.8.1. กรณีของรูปแบบกำหนด (Fixed Model) จะเป็นการตรวจสอบว่าปัจจัยมีผลต่อกระบวนการหรือไม่ ดังนั้นสมมุติฐานที่ตั้ง คือ

$H_0$ : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการการผลิต

$H_1$ : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

หรือเขียนในรูปสัญลักษณ์ เมื่อ  $\Gamma$  คืออิทธิพลของปัจจัย คือ

$$H_0: \Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots \Gamma_a = 0$$

$$H_1: \Gamma_i \neq 0; \text{ อย่างน้อยที่สุดหนึ่ง } i$$

2.8.2 กรณีของรูปแบบสุ่ม (Random Model) จะเป็นการตรวจสอบว่าความแปรปรวน ( $\sigma^2$ ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (effect) ที่เกิดขึ้นแน่นอนได้ ดังนั้นสมมติฐาน คือ

$$H_0: \sigma^2 = 0$$

$$H_1: \sigma^2 \neq 0$$

## 2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

วิธีการนี้จากหลักการที่ว่า ในการหาปัจจัยใดที่มีผล ให้วิเคราะห์ที่ความแตกต่าง โดยการวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของความแปรปรวน (Variance) แล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่า แสดงว่า ปัจจัย หรือระดับของปัจจัย ที่ทำให้เกิดความแตกต่างนั้น มีผลต่อตัวที่ต้องการคุณสมบัติและตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square (MS)) ซึ่ง

$$MS = SS / df$$

เมื่อ SS คือผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) และ df คือ ชั้นของความอิสระ (degree of freedom) จากนั้นจะเปรียบเทียบค่าความแปรปรวน โดยที่

$$F = \text{Var}(\text{tr}) / \text{Var}(E)$$

Var (tr) คือ ความแปรปรวนของทริตเมนต์

Var (E) คือ ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนและจากการต้องใช้การกระจายแบบแจกแจงเอฟ (F-distribution) เป็นตัวทดสอบ ดังนั้น  $E_{ij}$  จึงต้องมีรูปแบบเป็น NID ( $0, \sigma^2$ ) เท่านั้น

ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการวิเคราะห์ ปัจจัย 2 ปัจจัย

$$\text{ตัวแบบ} : Y_{ijk} = \mu + \Gamma_i + \beta_j + (\Gamma\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

โดยที่

$$i = 1, 2, \dots, a \text{ (ระดับของปัจจัย A)}$$

$$j = 1, 2, \dots, b \text{ (ระดับของปัจจัย B)}$$

$$k = 1, 2, \dots, n \text{ (จำนวนซ้ำ)}$$

y = คือค่าของตัวแปรตอบสนอง

$\mu$  = คือค่าเฉลี่ย

$\Gamma$  = คืออิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

$\beta$  = คืออิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

$\Gamma\beta$  = คืออิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของ  $\Gamma$  กับ  $\beta$

$\epsilon$  = คือความคลาดเคลื่อน

A คือปัจจัย A

B คือปัจจัย B

AB คือปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย A กับ B

$MS_A$   $MS_B$   $MS_{AB}$  คือกำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย A , B และ ABตามลำดับ

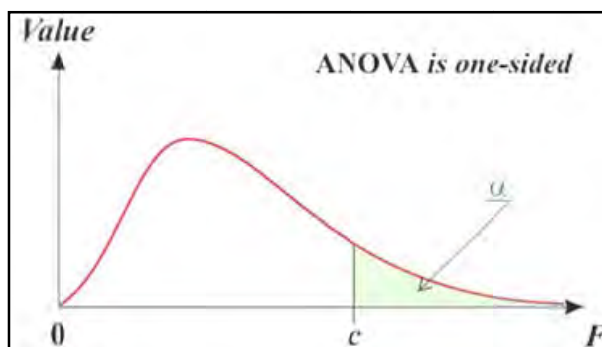
$MSF$  คือกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน

$SS_A$   $SS_B$   $SS_{AB}$  คือผลรวมกำลังสองของ A,B และ AB ตามลำดับ

$SSE$  คือผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย (ANOVA Table)

แหล่ง	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ชั้นของความอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลัง สอง (MS)	ตัวทดสอบ ( $F_0$ )
A	$\sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2 \dots}{bn}$	a-1	$MS_A$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	$\sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2 \dots}{an}$	b-1	$MS_B$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AxB	$\frac{\sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a y_{ji}^2}{n} - \frac{y^2}{abn} - SS_A - SS_B$	(a-1)(b-1)	$MS_{AB}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
ความคลาด เคลื่อน	$SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	(abn-1)-(a+1)- (b+1)-(a-1)(b-1)		
ทั้งหมด	$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abn}$	abn - 1		

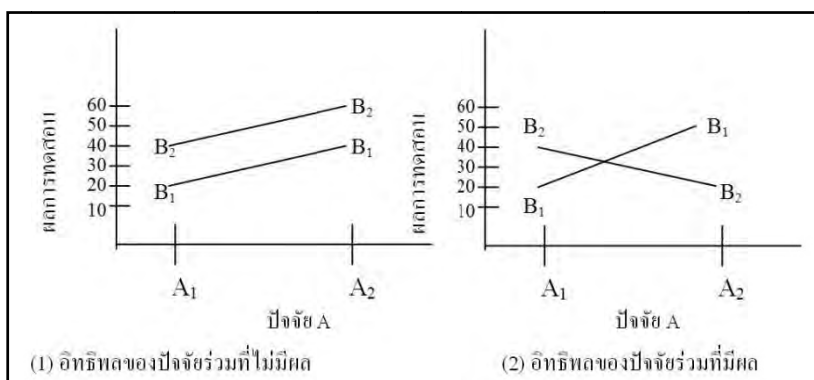


ภาพที่ 10 แสดงกราฟการกระจายของฟิชเชอร์ (Fisher)

สมมติให้  $\alpha = 0.05$  หากค่า  $F_0$  ที่ได้  $\leq F_{0.05, V_1, V_2}$  แล้วถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล คือ สามารถยอมรับสมมติฐาน แต่ถ้า ค่าของ  $F_0 > F_{0.05, V_1, V_2}$  ถือว่าไม่สามารถยอมรับสมมติฐานหลักได้ (reject  $H_0$ ) นั่นคือ ปัจจัยมีผล

#### 2.10 แผนการทดลองแบบแฟคโทเรียล (Factorial Design)

ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple factor experiment) และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่สนใจแล้ว ยังเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ได้ด้วย อิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย ดัง ตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ แสดงได้ดังรูป 2.6 ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดัง (1) และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดัง (2) โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



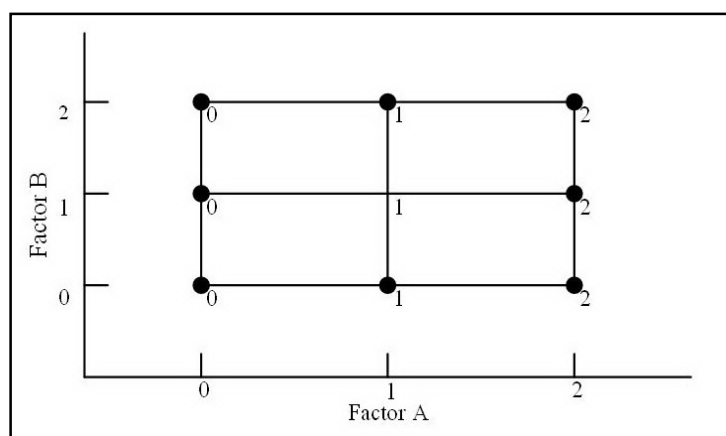
ภาพที่ 11 แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลและมีผล

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไป (Factorial Design) มีรูปแบบต่างๆไป คือ  $A \times B \times C \times \dots$  แฟคทอเรียล เช่น  $3 \times 2 \times 2$  แฟคทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญได้แก่

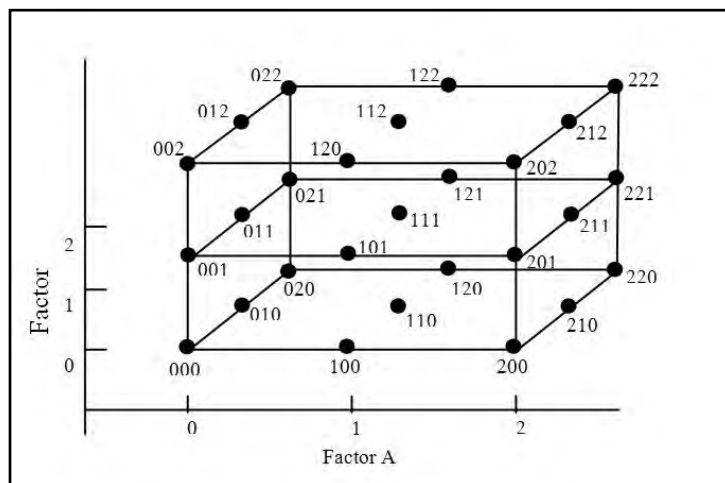
2.10.1 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด  $k$  ปัจจัย  $2^2$  แฟคทอเรียล,  $2^3$  แฟคทอเรียล เป็นต้น

2.10.2 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล  $3^k$

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล  $3^k$  หมายถึง การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจใช้แทนด้วยตัวเลข  $k$  ตัว 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง), และ 2 (สูง) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ  $3^k$  จะแทนด้วยตัวเลข  $k$  ตัว โดยที่ตัวเลขแรกแทนระดับของปัจจัย  $k$  ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบ  $3^2$  ตัวเลข 00 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยซึ่งทั้ง A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ 01 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A อยู่ที่ระดับต่ำ และ B อยู่ที่ระดับปานกลาง รูปที่ 4.4-2 แสดงโครงสร้างเรขาคณิตของการออกแบบ  $3^2$  และ  $3^3$  ตามลำดับ



ภาพที่ 12 แสดงการทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ  $3^2$



ภาพที่ 13 แสดงการทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ  $3^3$

ระบบสัญลักษณ์เช่นนี้เราอาจจะใช้กับการออกแบบ  $2^k$  ได้เช่นกัน โดยใช้ 0 และ 1 แทนเครื่องหมาย + และ - ที่เคยใช้อยู่ แต่ทว่าในการออกแบบ  $2^k$  นั้น เรานิยมใช้สัญลักษณ์  $\pm 1$  มากกว่า เนื่องจากจะทำให้โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบดูง่ายกว่า และยังสามารถใช้กับแบบจำลองการถดถอยการบดล็อก และเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลได้โดยตรง

ในการออกแบบ  $3^k$  เมื่อปัจจัยมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ เราจะแทนระดับ ต่ำ, ปานกลาง และสูง ด้วย -1, 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งมีการใช้สัญลักษณ์ เช่นนี้จะทำให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองการถดถอยของผลตอบที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย ตัวอย่างเช่น การออกแบบ  $3^2$  ในรูปที่ 10-1 ให้  $X_1$  แทนปัจจัย A และ  $X_2$  แทนปัจจัย B แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ  $X_1$  และ  $X_2$  สามารถแสดงได้โดย

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \varepsilon$$

สังเกตว่าจะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติก (Quadratic) การออกแบบที่ง่ายที่สุดในระบบ  $3^k$  คือการออกแบบ  $3^2$  ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากการทดลองนี้มีการทดลองร่วมปัจจัย  $3^2 = 9$  การทดลอง ดังนั้นระดับขั้นความเสรีของการทดลองร่วมปัจจัยจะมีค่าเท่ากับ 8 ผลหลัก A และ B จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 และอันตรกิริยา AB จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 4 ถ้าจำนวนของการเรพลิเคตเท่ากับ n ค่าของระดับความเสรีทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ  $n3^2 - 1$  และค่าผิดพลาดของระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $3^2 (n - 1)$



ค่าผลรวมกำลังสองสำหรับ  $A$  ,  $B$  และ  $AB$  สามารถหาได้จากวิธีปกติเหมือนการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับผลหลักอาจจะถูกแบ่งออกเป็น ส่วนเชิงเส้นและส่วนควอดราติก ซึ่งแต่ละส่วนมีระดับความเสรีเท่ากับ 1 โดยใช้ค่าคงตัวคอนแทรสต์เชิงตั้งฉาก ซึ่งวิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อปัจจัยทั้งหมดเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีระยะห่างเท่ากัน

สมมติว่ามีปัจจัยอยู่ 3 ปัจจัย ( $A$  ,  $B$  และ  $C$ ) ที่อยู่ในความสนใจ แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปแบบของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล การออกแบบในกรณีนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^3$  โครงสร้างของการทดลองและสัญลักษณ์ของการทดลองร่วมปัจจัยต่างๆ แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.6 ในการทดลองนี้จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยจำนวน 27 การทดลอง ดังนั้นจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 26 ผลหลักแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 อันตรกิริยา แบบสองปัจจัยแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 4 1 และอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 8 ถ้าทำการทดลองทั้งสิ้น  $n$  เรพลิต จะจะมีระดับขั้นความเสรีผลรวมเท่ากับ  $n3^2 - 1$  และมีค่าผิดพลาดของระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $3^2(n - 1)$

ค่าผลรวมกำลังสองสามารถที่จะคำนวณได้จากการวิธีการมาตรฐานของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ยิ่งกว่านั้น ถ้าปัจจัยเป็นแบบเชิงปริมาณและมีระยะห่างเท่ากันแล้ว เราอาจจะแยกผลหลักออกเป็น ส่วนที่เป็นเชิงเส้นและส่วนที่เป็นควอดราติกได้ อันตรกิริยาแบบสองปัจจัยอาจจะถูกแยกออกเป็น ผลแบบเชิงเส้น  $x$  เชิงเส้น , เชิงเส้น  $x$  ควอดราติก , ควอดราติก  $x$  เชิงเส้น และควอดราติก  $x$  ควอดราติก สุดท้ายก็คืออันตรกิริยาแบบสามปัจจัย  $ABC$  ซึ่งสามารถที่จะแยกออกเป็น ส่วนที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 จำนวนทั้งสิ้น 8 ตัว คือ เชิงเส้น  $x$  เชิงเส้น  $x$  เชิงเส้น , เชิงเส้น  $x$  เชิงเส้น  $x$  ควอดราติก ต่อไปนี้เช่นนี้เรื่อยๆ จนครบ แต่การแยกอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยเช่นนี้ ส่วนมากแล้วจะไม่มีประโยชน์แต่ประการใด

เป็นไปได้ที่จะแยกอันตรกิริยาออกเป็น ส่วน  $I$  และ  $J$  ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นส่วนของ  $AB$  ,  $AB^2$  ,  $AC$  ,  $AC^2$  ,  $BC$  และ  $BC^2$  ซึ่งแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 และเหมือนกับการออกแบบ  $3^2$  ส่วนประกอบเหล่านี้ไม่มีผลในทางกายภาพแต่ประการใด

อันตรกิริยาแบบสามปัจจัย  $ABC$  อาจจะแยกออกเป็น ส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉากที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 ได้จำนวน 4 ตัว ซึ่งจะเรียกส่วนประกอบเหล่านี้ว่า  $W$  ,  $X$  ,  $Y$  และ  $Z$  ของอันตรกิริยาเราจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า  $AB^2C^2$  ,  $AB^2C$  ,  $ABC^2$  และ  $ABC$  ของอันตรกิริยา  $ABC$  ดังนั้น สัญลักษณ์ 2 แบบที่สามารถใช้ทดแทนกันได้คือ

$$W(ABC) = AB^2C^2$$

$$X(ABC) = AB^2C$$

$$Y(ABC) = ABC^2$$

$$Z(ABC) = ABC$$

สังเกตว่าไม่มีตัวอักษรตัวแรกตัวใดที่มีเลขยกกำลังเป็นค่าอื่นนอกเหนือจาก 1 เหมือนกับส่วนประกอบ I และ J ที่มีส่วนประกอบ W , X , Y และ Z ไม่มีความหมายใดๆ ในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม ส่วนประกอบเหล่านี้จะมีประโยชน์ในการสร้างการออกแบบที่ซับซ้อน แนวความคิดของการออกแบบ  $3^2$  และ  $3^3$  สามารถขยายไปสู่กรณีของปัจจัย  $k$  ตัว แต่ละตัวประกอบด้วย 3 ระดับ นั่นคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $3^k$  สัญลักษณ์แบบดิจิทัลถูกนำมาใช้แทนการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น เช่น 0120 หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ  $3^4$  ที่มี A และ D อยู่ที่ระดับต่ำ B อยู่ที่ระดับกลางและ C อยู่ที่ระดับสูง การออกแบบ  $3^k$  นี้จะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น  $3^k$  การทดลอง และมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ  $3^k - 1$  จากการทดลองร่วมปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดผลรวมของกำลังของผลหลัก  $k$  ตัว ที่แต่ละตัวมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2 ; อันตรกิริยาแบบสองปัจจัยจำนวน  $C_2^k$  ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 4 ; .....; และอันตรกิริยาแบบ  $k$  ปัจจัยซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ  $2^k$  ถ้ามีการทดลองทั้งสิ้น  $n$  เรพลีเคต จะทำให้เกิดระดับชั้นความเสรีทั้งหมดเท่ากับ  $n3^k - 1$  และค่าผิดพลาดของระดับชั้นความเสรีเท่ากับ  $3^{k(n-1)}$

ค่าผลรวมกำลังสองสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการตามปกติของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ธรรมดาแล้วอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยและสูงกว่าจะไม่ถูกแยกอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม อันตรกิริยาแบบ  $h$  ปัจจัยจะมีส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉากจำนวน  $2^{h-1}$  ตัว ซึ่งแบบเชิงตั้งฉาก จำนวน  $2^{4-1} = 8$  ตัว ซึ่งเขียนได้ว่า  $ABCD^2$ ,  $ABC^2D$ ,  $AB^2CD$ ,  $ABCD$ ,  $ABC^2D^2$ ,  $AB^2C^2D$ ,  $AB^2CD^2$  และ  $AB^2C^2D^2$  ในการเขียนส่วนประกอบเหล่านี้ สังเกตว่าตัวเลขยกกำลังของตัวอักษรแรกจะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ถ้าตัวเลขยกกำลังนี้ไม่เท่ากับ 1 แล้ว ให้นำพจน์นี้มายกกำลังสองและตัวเลขยกกำลังจะลดลงโดยใช้มอดุลัส 3 ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$A^2BCD = (A^2BCD)^2 = A^4B^2C^2D^2 = AB^2C^2D^2$$

อันตรกิริยาของส่วนประกอบเหล่านี้ไม่มีความหมายในทางกายภาพแต่ประการใด และจะมีประโยชน์ในการสร้างการออกแบบที่ซับซ้อน

จะเห็นได้ว่าขนาดของการออกแบบจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของ  $k$  ตัวอย่างเช่น การออกแบบ  $3^3$  จะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 27 ตัว ต่อหนึ่งเรพลีเคต , การออกแบบ  $3^4$  จะมี 81 ตัว , การออกแบบ  $3^5$  จะมี 243 ตัว ..... เช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นบ่อยครั้งที่เราจะทำการทดลองแบบ  $3^k$  เพียง 1 เรพลีเคตเท่านั้น และนำอันตรกิริยาขั้นสูงมารวมกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณของค่าความผิดพลาด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ถ้าอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัยหรือมากกว่า



$$\begin{array}{ll}
\Gamma & \sigma^2 + cn\sigma^2_{\Gamma\beta} + bn\sigma^2_{\Gamma\gamma} + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + bcn\sigma^2_{\Gamma} \\
\beta & \sigma^2 + cn\sigma^2_{\Gamma\beta} + an\sigma^2_{\beta\gamma} + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + acn\sigma^2_{\beta} \\
\gamma_k & \sigma^2 + bn\sigma^2_{\Gamma\gamma} + an\sigma^2_{\beta\gamma} + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + abn\sigma^2_{\gamma} \\
(\Gamma\beta)_{ij} & \sigma^2 + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + cn\sigma^2_{\Gamma\beta} \\
(\Gamma\beta)_{ik} & \sigma^2 + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + bn\sigma^2_{\Gamma\gamma} \\
(\beta\gamma)_{ik} & \sigma^2 + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} + an\sigma^2_{\beta\gamma} \\
(\Gamma\beta\gamma)_{ijk} & \sigma^2 + n\sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} \\
\varepsilon & \sigma^2
\end{array}$$

จากการตรวจสอบค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ยกำลังสอง พบว่า ในอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) หรือ อิทธิพลของปัจจัย A ไม่สามารถที่จะทดสอบได้อย่างถูกต้องโดยที่ ถ้าต้องการที่จะทดสอบสมมติฐาน  $\sigma^2_{\Gamma} = 0$  ; จะไม่สามารถสร้างเศษส่วนของค่าเฉลี่ยกำลังสอง 2 ค่าที่มีเพียงเทอม  $bcn\sigma^2_{\Gamma}$  อยู่ในเทอมของเศษ นอกเหนือจากนั้นอยู่ในเทอมของส่วน เช่นลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับอิทธิพลของปัจจัยหลัก B และ C ด้วย ซึ่งในการทดลองส่วนใหญ่ ผู้ทำการทดลองจะสนใจและให้ความสำคัญกับอิทธิพลปัจจัยหลัก ฉะนั้นหากทำการละเลยอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ของ 2 ปัจจัย หรือกำหนดให้  $\sigma^2_{\Gamma\beta} = \sigma^2_{\beta\gamma} = \sigma^2_{\Gamma\gamma} = 0$  ก็จะทำให้การทดสอบอิทธิพลของปัจจัยหลักมีความถูกต้องมากขึ้น

ถึงแม้ว่า การวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะน่าสนใจและเป็นไปได้ แต่ในการที่จะละเลยอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์นั้น ต้องอาศัยความรู้และข้อมูลในอดีต อย่างมากพอ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะทำการวิเคราะห์โดยทำการรวมค่าเฉลี่ยกำลังสอง(MS) และประมาณความคลาดเคลื่อนด้วยขั้นของความอิสระ(df) ที่มากขึ้น ดังในตัวอย่าง ถ้าหากตัวทดสอบ  $F = MS_{ABC} / MS_E$  ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานหลัก  $H: \sigma^2_{\Gamma\beta\gamma} = 0$  จึงประมาณความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ( $\sigma^2$ ) จากค่าเฉลี่ยกำลังของทริตเมนต์ ABC ( $MS_{ABC}$ ) และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนใหม่ ( $MS_E$ ) ทำได้โดย

$$MS_E = \frac{[abc(n-1)MSE + (a-1)(b-1)(c-1)MS_{ABC}]}{abc(n-1) + (a-1)(b-1)(c-1)}$$

$$E(MS_E) = \sigma^2$$

$E(MS_E)$  คือค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

สังเกตได้ว่า ขั้นความอิสระของค่าเฉลี่ยกำลังสองจะเพิ่มขึ้น ข้อควรระวังคือ ถ้าหากทริตเมนต์นั้นมีอิทธิพลกับค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ได้ใหม่มีขนาด

เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้การตรวจพบอิทธิพลของปัจจัยต่างๆเป็นไปได้ยากขึ้น แต่ในอีกแง่หนึ่ง หากค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนแต่เดิมมีขึ้นของความอิสระน้อย การเพิ่มเติมโดยการรวมจะสามารถช่วยเพิ่มความละเอียดของการทดสอบได้

ทศพล เกียรติเจริญพล (2537) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก และเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองที่ทำการเคลือบแลกเกอร์ที่ได้มีคุณภาพดีเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองมาทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือชนิดแลกเกอร์ น้ำหนักแลกเกอร์ต่อพื้นที่ อุณหภูมิบ่ม เวลาที่ใช้ในการบ่มโยทำการทดสอบลักษณะของผิวเคลือบแลกเกอร์ 6 ลักษณะ คือการทดสอบความยืดหยุ่น การทดสอบต่อ การขีดข่วน การทดสอบการทนต่อการขีดถู การทดสอบการทนต่อการแทรกซึมของไอน้ำ การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างแลกเกอร์กับเนื้อเหล็ก และการทดสอบการหลุดลอกของแลกเกอร์จากการต้มฆ่าเชื้อ ผลการทดสอบลักษณะผิวเคลือบแลกเกอร์ทั้ง 6 ด้าน สรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ดังนี้คือ แลกเกอร์ชนิด Z น้ำหนักแลกเกอร์ต่อพื้นที่ 8-9 กรัมต่อตารางเมตร อุณหภูมิบ่ม 250 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการบ่ม 13 นาที

ทรงพล พิเชษฐ์วัฒนา (2541) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Flexure ของหัวอ่านและเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านและเขียนข้อมูลดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขที่เป็นจริง โดยปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบ และชนิดของน้ำหนักกด การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงดึง และปัจจัยใดบ้างที่มีอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างกัน จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยเพียง 3 ชนิดเท่านั้นที่มีผลต่อแรงดึง กล่าวคือ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบและเวลาในการอบ การทดลองแบบแฟคทอเรียลถูกนำมาใช้อีกครั้งหนึ่ง โดยที่มีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละปัจจัยเพิ่มขึ้นเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดโดยไม่ขัดกับเงื่อนไขทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านและเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปณัญญกรณ์ อังกรานันท์ (2544) ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทนแรงดึงในแนวตะเข็บในกระบวนการผลิตถุงหิ้วรูปถ้วยจากพลาสติก Polyethylene (PE) ในการศึกษานี้ได้อาศัยวิธีการออกแบบการทดลองเลือกปัจจัยภายในเครื่องจักรที่ใช้ในการปิดพลิก ทดสอบหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการทนทานแรงดึง โดยนำปัจจัยทั้งหมดนำมาทำการทดลองเบื้องต้นด้วย  $2^k$  แฟคทอเรียล ดีไซน์ และหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยจากการทดลอง  $3^k$  แฟคทอเรียล ซึ่งพบว่าอุณหภูมิและปฏิกริยาสัมพันธของอุณหภูมิและระยะกคมีผลตอบสนองแบบ Quadratic จึงอาศัยกราฟ

Estimated Respond Surface ประมาณการปัจจัยที่เหมาะสม จากผลการศึกษสามารถทำให้ค่า การทนแรงดึงของแนวตะเข็บมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 50.67% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง 52.12% และค่าดัชนีความสามารถในการผลิต เพิ่มขึ้น 101.41% สามารถลดของเสียได้ 6.78% คิดเป็นเงิน 1,880,064 บาทต่อปี

สุทธิวัฒน์ มหัทธพรณ์ (2544) ได้ศึกษาปัจจัยของกรรมวิธีการเชื่อมแบบ TIG ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมสำหรับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด SUS 436L โดยการทดลองเชื่อมตามปัจจัย คือการกระแสไฟฟ้าเชื่อม แรงดันไฟเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม พร้อมทั้งกำหนดค่าของปัจจัยที่ระดับสูงและระดับต่ำลงในเงื่อนไขการทดลองจำนวน 8 เงื่อนไข เพื่อทำการทดลองเชื่อม โดยการใช้ค่าของปัจจัยตามที่กำหนดไว้ นำท่อที่ได้จากการทดลองเชื่อม มาทำการทดสอบทางกล วัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของตะเข็บเชื่อม และเส้นผ่าศูนย์กลางขยายของชิ้นงานทดสอบการบานท่อ ประกอบกับการดูภาพโครงทางโลหะบริเวณแนวเชื่อม จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์พร้อมโครงทางโลหะบริเวณแนวเชื่อม จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์พร้อมกับนำค่าของปัจจัยไปลองใช้งาน

สถาพร พิมสาร(2547)ได้ทำการศึกษาระบบการผลิตกระป๋องสำหรับบรรจุอาหาร การพันเคลือบผงโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมด้านใน พบว่า การพันเคลือบผงโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋องเป็นขั้นตอนที่มีจุดบกพร่องมากที่สุด ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคือความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋อง มักมีความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากไม่ทราบค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ภายในกระบวนการพันเคลือบผงโพลีเอสเตอร์ โดยเป็นปัญหาสำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีองค์ประกอบที่จะเป็นต่อการผลิต คือ แรงดันลมจ่ายผล โพลีเอสเตอร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงดันลมชะลอการไหลผลโพลีเอสเตอร์ และแรงดันลมดูดกลับผงโพลีเอสเตอร์ ในการทดลองโดยใช้ Factorial Design ( $3^4$ ) ออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าแรงดันลมจ่ายผงโพลีเอสเตอร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำแรงดันลมชะลอการไหลผลโพลีเอสเตอร์ และแรงดันลมดูดกลับผลโพลีเอสเตอร์ มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  ได้สมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋องคือ  $Y = 90.97 + 18.25A - 0.37B - 5.93C - 1.13D - 10.74A^2 - 3.06B^2 - 3.32C^2 + 1.58D^2 + 3.96AB - 1.05AC - 1.78AD$  โดยได้คำตอบของสภาวะเหมาะสมที่ทำให้ความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋องอยู่ที่ 95  $\mu\text{m}$  โดยปรับแรงดันลมจ่ายผลโพลีเอสเตอร์(A) ที่ 0.95 Bar กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (B) ที่ 91% (81.9 Volt) แรงดันลมชะลอการไหลผลโพลีเอสเตอร์ (C) ที่ 5 Bar และแรงดันลมดูดกลับผงโพลีเอสเตอร์ (D) ที่ 1 Bar

มิกา สุวรรณมณี(2548)ได้ทำการศึกษาสภาพปัญหาในแผนกทำสีของกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ พบว่ามีของเสียที่เกิดจากการพ่นสีที่ไม่ได้มาตรฐานเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัญหาของเสียที่พบมากที่สุดคือ ปัญหาสีเป็นผิวส้ม ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการพ่นสีที่ทำให้เกิดของเสียสีเป็นผิวส้มน้อยที่สุดโดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเมื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่ามีปัจจัย 5 ปัจจัย คือ ความสูงหัวปืนพ่นสี (ระยะห่างระหว่างงานกับหัวปืนพ่นสี) ความเร็วของหัวปืนพ่นสี ความเร็วของสายพานแรงดันลม และความหนืดสี ที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจึงนำปัจจัยดังกล่าวมาออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองของทากูชิ พบว่า ความหนืดสี และแรงดันลม มีอิทธิพลต่อการปัญหาสี เป็นผิวส้มอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ระดับ  $\alpha = 0.05$  ส่วนความสูงของหัวปืนพ่นสี ความเร็วของหัวปืนพ่นสี และความเร็วของสายพาน ตามมาตรฐานการทำงานปัจจุบันไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดปัญหานี้ และเมื่อนำปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดลองมาทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ระดับ เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวดอกบสนอง พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของความหนืดสี คือ 10-10.5 วินาที และค่าแรงดันลมที่เหมาะสม คือ 4 บาร์ และจากการนำผลการวิจัยไปใช้ในการทำงานจริง พบว่าจำนวนของเสียสีเป็นผิวส้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมมีงานเสียเฉลี่ย 532 ชิ้น/เดือน ลดลงเหลือ 210 ชิ้น/เดือน จากปริมาณการผลิตประมาณ 10,000 ชิ้น/เดือน คิดเป็นจำนวนงานเสียลดลง 60.49% และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานจากเดิม 306,432 บาท/ปี เหลือเพียง 120,960 บาท/ปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 185,472 บาท/ปี หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานลดลง 60.53%

อุทุมพร พงษ์อุดม(2552)ทำการศึกษาปัญหาในโรงงานผลิตหม้อน้ำรถยนต์ พบว่ามีหลายปัญหาที่จำเป็นต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วนแต่ปริมาณของเสียเป็นปัญหาหนึ่งซึ่งมีผลกระทบต่อต้นทุน จากการศึกษาข้อมูลของโรงงานตัวอย่างพบว่าของเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมท่ออลูมิเนียมจากกระบวนการรีดขึ้นรูปเพื่อทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตหม้อน้ำรถยนต์ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาพบว่าปัญหาหลักของการเกิดของเสียมีอยู่สองประการคือ วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการรีดขึ้นรูป และปัจจัยการตั้งค่าของเครื่องเชื่อม ปัญหาแรกเกิดจาก วัตถุดิบไม่ตรงตามข้อกำหนด ขนาดของตัวขึ้นรูปของแผ่นอลูมิเนียม (ล้อขึ้นรูป) และมาตรวัดการปรับค่าของเครื่องจักรอ่านค่าได้ไม่แน่นอนเนื่องจากสเกลหายบเินไป ซึ่งสาเหตุดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้แก้ไขด้วยการจัดทำคู่มือในการปฏิบัติงานงานเพื่อเป็นมาตรฐานให้แก่พนักงาน ส่วนปัญหาที่สองได้ทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed) และกำลังไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding voltage) เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดของเสีย โดยได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3 ระดับ 2 ปัจจัย ( $3^2$  Factorial Design) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมมาเป็นมาตรฐานในการตั้งค่า

เครื่องจักร จากการทดลองใช้คู่มือในการปฏิบัติงานและการตั้งค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมเท่ากับ 106.1 m/min และกำลังไฟฟ้าในการเชื่อมเท่ากับ 268 Voltage พบว่าสามารถลดจำนวนของเสียจาก 9.62 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 2.71 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำให้โรงงานตัวอย่างมีมาตรฐานในการปฏิบัติงานมากขึ้น

เสาวภา แซ่ซุ่น(2549)ได้ทำการศึกษาปัญหาของเสียในโรงงานกรณีศึกษา พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการพิมพ์มีมากแต่ที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ การเกิดสกัม อันเนื่องมาจากการปรับตั้งองค์ประกอบการพิมพ์ซึ่งมีหลายสาเหตุ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment) เพื่อศึกษาสถานะของพารามิเตอร์ของเครื่องพิมพ์ระบบออฟเซต ที่จะทำให้เกิดปัญหาสกัมน้อยที่สุด โดยการใช้ Fraction Factorial Design ( $2^{6-1}$ ) จากปัจจัยที่นำมาศึกษาทั้ง 6 ปัจจัย ได้ค่าที่เหมาะสมในการตั้งเครื่องพิมพ์ คือ ความเร็วในการพิมพ์ที่ 6,300 – 6,500 แผ่นต่อชั่วโมง ค่าเปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่ 5% - 15 % ระยะเส้นเบียดลูกน้ำที่ 4-6 เซนติเมตร ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำยาฟาว์นเทนที่ Ph 4.5-5.5 อุณหภูมิของน้ำยาฟาว์นเทนที่ 10-16 องศาเซลเซียส และระยะห่างของลูกกลิ้งน้ำกับแม่พิมพ์ที่ 4-6 มิลลิเมตร จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปัญหาสกัมที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบเหลือเพียง 2 ปัจจัยคือ ความเร็วในการพิมพ์และอุณหภูมิของน้ำยาฟาว์นเทน ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองในปัจจัยละ 3 ระดับ เป็นแบบการทดลอง  $3^2$  Factorial Design และพบว่าการตั้งค่าความเร็วในการพิมพ์จึงเครื่องพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ที่ทำให้เกิดของเสียจากปัญหาสกัมน้อยที่สุดอยู่ที่ 6,300 แผ่นต่อชั่วโมง และอุณหภูมิของน้ำยาฟาว์นเทนที่ 15.6 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า จำนวนของเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมเฉลี่ย 21,209 แผ่น เหลือเพียง 468 แผ่น ซึ่งจากการผลิตเฉลี่ย 900,000 แผ่น/เดือน คิดเป็นของเสียที่ลดลงได้ 76.49% และสามารถลดค่าใช้จ่ายจากเดิม 293,603.16 บาท/ปี เหลือเพียง 69,020.64 บาท/ปี คิดเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 224,582.52 บาท/ปี

เยาวภา เลาหทวีโชค(2544)ได้ศึกษาการทำอะโนไซต์อลูมิเนียมคือ การทำผิวของอลูมิเนียมให้เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่มีลักษณะคล้ายฟิล์ม และสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของผู้ผลิตจะต้องควบคุมให้ได้คือ ความหนาของผิวอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจะต้องเป็นไปตามที่ลูกค้ากำหนด ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผิว  $Al_2O_3$  เพื่อหาความเหมาะสมในกระบวนการทำอะโนไซต์วิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผิว  $Al_2O_3$  โดยขั้นตอนการวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่แรก เป็นการศึกษาปัจจัยภายนอกได้แก่ความแตกต่างของวัสดุ และลักษณะรูปร่างชิ้นงาน รวมถึงการศึกษาความไม่



สม่าเสมอของผิว  $Al_2O_3$  ส่วนที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการทำอะโนไดซ์ ซึ่งได้ทำการทดลองวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) จากการทดลองพบว่า วัสดุและลักษณะรูปร่างชิ้นงานไม่ส่งผลต่อความหนาผิว  $Al_2O_3$  และในการทดสอบความสม่าเสมอพบว่า การยึดชิ้นงานตามแนวนอนจะส่งผลให้ความหนาผิว  $Al_2O_3$  ของชิ้นงานแต่ละเส้นไม่เท่ากัน สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้ไขโดยเปลี่ยนทิศทางการยึดชิ้นงานให้อยู่ในแนวตั้ง สำหรับการทดสอบปัจจัยภายในพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาผิว  $Al_2O_3$  มากที่สุดคือ ระยะเวลาในการชุบ รองลงมาคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ จากผลวิจัยสามารถกำหนดและปรับตั้งปัจจัยต่างๆ ให้สมดุลได้โดย การควบคุม  $H_2SO_4$  ที่ 130-170 กรัม/ลิตร อุณหภูมิที่ 18-22°C พร้อมปรับตั้งกระแสไฟและเวลาการชุบดังนี้

1.ถ้าใช้กระแสไฟ 110 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 12-16 นาที ถ้าใช้กระแสไฟ 130 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 11-14 นาที ถ้าใช้กระแสไฟ 150 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 10-12 นาที จะได้ผิว  $Al_2O_3$  มีความหนา 5 ไมครอน

2.ถ้าใช้กระแสไฟ 110 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 27- 32 นาที ถ้าใช้กระแสไฟ 130 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 24 - 28 นาที ถ้าใช้กระแสไฟ 150 A/m<sup>2</sup> ให้ชุบ 21-25 นาที จะได้ผิว  $Al_2O_3$  มีความหนา 10 ไมครอน

ธานี ศรีวงศ์ชัย(2540)ได้ทำการการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงอับละออกเกอร์ข้าวบาร์เลย์ โดยใช้ข้าวบาร์เลย์พันธุ์ P11-16 , BRB9 และ SB27 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีการตอบสนองต่อการเพาะเลี้ยงสูง ปานกลาง และต่ำ ตามลำดับ พบว่า อับละออกเกอร์ของข้าวบาร์เลย์สามารถพัฒนาเป็นต้น ได้ดีเมื่อปลูกข้าวบาร์เลย์ในห้องควบคุมสภาพแวดล้อมเก็บช่อดอกที่ระยะห่างระหว่างหุใบตรงกับหุใบที่อยู่ถัดลงมาห่างกัน 5 เซนติเมตรมาไว้ในที่มีที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 5-6 สัปดาห์ แล้วนำอับละออกเกอร์มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร FW ที่มีสารควบคุมการเจริญเติบโต BA และ IAA อย่างละ 0.6 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ วางอับละออกเกอร์ให้ด้านใดด้านหนึ่งสัมผัสกับอาหารเพื่อชักนำให้ละออกเกอร์พัฒนาเป็นแคลลัสหรือเอมบริอยด์ ซึ่งใช้ระยะเวลา 4-5 สัปดาห์ จากนั้น ย้ายกลุ่มแคลลัสหรือเอมบริอยด์ที่ได้เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร FWR ที่มี BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อชักนำให้เกิดต้น โดยใช้ระยะเวลา 4-5 สัปดาห์เช่นกัน และนำปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาใช้ในการเพาะเลี้ยงอับละออกเกอร์ข้าวบาร์เลย์ลูกผสมชั่วที่ 1 โดยเพาะเลี้ยงอับละออกเกอร์ของลูกผสมจำนวน 4 กลุ่มผสมได้แก่ BRB9 x F<sub>5</sub>90#63 , BRB9 x MONA , BRB9 x BRB2 และ BRB9 x P11-16 และลูกผสมสลับจำนวน 2 กลุ่มผสมได้แก่ F<sub>5</sub>90#63 x BRB9 และ MONA x BRB9 เปรียบเทียบกับพันธุ์พ่อและพันธุ์แม่ พบว่ามีอิทธิพลจากการผสมสลับเกิดขึ้นในกลุ่มผสม 1 คู่จาก 2 คู่ผสม ที่ศึกษาในเปอร์เซ็นต์อับละออกเกอร์ที่พัฒนาเป็นแคลลัสหรือเอมบริอยด์ และค่าที่ได้ของลูกผสมทั้งหมดอยู่ระหว่างพันธุ์พ่อและ

พันธุ์แม่ ส่วนในเปอร์เซ็นต์การเกิดต้นเขียวพบว่า มีแนวโน้มของอิทธิพลจากการผสมสลับในกลุ่มผสมทั้ง 2 และในกลุ่มผสมชั่วที่ 1 ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่างพันธุ์พ่อและพันธุ์แม่ ยกเว้นในกลุ่มผสมระหว่างพันธุ์ BRB9 กับ MONA ที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดต้นเขียวสูงกว่าพันธุ์พ่อและพันธุ์แม่ เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเกิดต้นเขียวของลูกผสมที่ศึกษา มีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.33 และ 6.52 ในลูกผสม BRB9 x BRB2 และ BRB9 x MONA ตามลำดับ

ดวงกมล เรืองธุระกิจ(2545) ได้ทำการศึกษา ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานตัวอย่างของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้าคือ คุณภาพของแผ่นยางที่ผลิตขึ้นมีการเกิดรูพรุนและความแข็งไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากการผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้าต้องเริ่มจากการผสมวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วย แป้ง เศษยาง สี เม็ดพลาสติก ความร้อนและสารเคมีที่จะทำให้เกิดการพองตัวของยาง การผสมวัตถุดิบมีความสำคัญมากเพราะถ้าผสมไม่สม่ำเสมอ หรือการเติมวัตถุดิบไม่ถูกต้องผิดขั้นตอน ความร้อนที่ใช้ในการผสมไม่เหมาะสมก็จะก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว การแก้ปัญหาจะต้องมีขั้นตอนหลัก ๆ คือ ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบก่อนการผลิตจริงด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบค่าองค์ประกอบที่เหมาะสมและตรวจสอบผลจากการผลิตในกระบวนการจริง การทดสอบก่อนการผลิตถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณลักษณะและคุณภาพของแผ่นยางพื้นรองเท้าเพราะว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบจะสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้หรือไม่และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการด้วยหรือไม่ ในขั้นตอนการทดลองนี้จำเป็นต้องใช้การออกแบบการทดลองเพื่อออกแบบและกำหนดปัจจัยที่จำเป็นต่อการผลิต ด้วยเหตุนี้จึงใช้การออกแบบการทดลองในการทำวิจัยครั้งนี้ จนกระทั่งพบว่าผลการวิจัยนี้สามารถช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากรูพรุนของแผ่นยางพื้นรองเท้าซึ่งเป็นปัญหาหลักลงได้ 4.25% หรือคิดเป็นจำนวนเงินที่สามารถประหยัดได้ประมาณ 222,250 บาท/เดือน โดยปัจจัยที่สำคัญคือ ขั้นตอนการใส่สารและอัตราส่วนวัตถุดิบที่ผสมคือ เศษวัตถุดิบ : แป้ง : เม็ดพลาสติก เป็น 20 : 19 : 27 กิโลกรัม

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงคุณสมบัติของการเชื่อมกระป๋องในด้าน ความแข็งแรงของรอยเชื่อม การประสานรอยเชื่อม การยืดตัวของรอยเชื่อมและขนาดความหนาของรอยเชื่อม โดยการดำเนินการทดสอบที่สำคัญ 4 การทดสอบ

1. การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rib Test)
2. การทดสอบการประสานรอยเชื่อม (Ball Test)
3. การทดสอบขนาดความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)
4. การทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

#### 1.คุณสมบัติของปัจจัยที่ทำการทดลอง

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของการเชื่อมกระป๋องที่ทำการทดสอบ คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง ขนาดของลวดทองแดงและพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก โดยที่

##### 1.1 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rib Test)

1.1.1 กระแสไฟฟ้า การละลายดีบุกที่ลวดทองแดง จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง โรลเชื่อม (Welding Roll)

1.1.2 แรงดันสปริง แรงกดมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าหากมีการกดมากก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ดี ในทางกลับกันหากแรงกดน้อยก็ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย

1.1.3 พื้นที่ของการซ้อนทับ การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก (Over Lap) หากมีการซ้อนทับน้อยรอยเชื่อมที่ออกมาจะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ฉีกขาดได้ง่าย แต่ถ้ามีการซ้อนทับที่มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถเชื่อมได้เนื่องจากไม่สามารถเข้าร่องโรลเชื่อมได้

1.1.4 ขนาดของลวดเชื่อม หากขนาดของลวดเชื่อมหลังจากทำการบีบแล้วเมื่อมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่พอดีกับร่องโรลเชื่อมจะส่งผลให้ไม่สามารถเชื่อมได้

##### 1.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการประสานรอยเชื่อม (Ball Test)

1.2.1 กระแสไฟฟ้า การละลายดีบุกที่ลวดทองแดง จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง โรลเชื่อม (Welding Roll)

1.2.2 แรงดันสปริง แรงกดมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า หากมีการกดมากก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ดี ในทางกลับกันหากแรงกดน้อยก็ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลน้อย

1.2.3 พื้นที่ของการซ้อนทับ การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก (Over Lap) หากมีการซ้อนทับน้อยรอยเชื่อมที่ออกมาจะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ฉีกขาดได้ง่าย แต่ถ้ามีการซ้อนทับที่มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถเชื่อมได้ เนื่องจากไม่สามารถเข้าร่องโรลเชื่อมได้

1.2.4 ขนาดของลวดเชื่อม หากขนาดของลวดเชื่อมหลังจากทำการบีบแล้วเมื่อมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่พอดีกับร่องโรลเชื่อมจะส่งผลให้ไม่สามารถเชื่อมได้

### 1.3 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

1.3.1 กระแสไฟฟ้า การละลายดีบุกที่ลวดทองแดง จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง โรลเชื่อม (Welding Roll) แรงดันสปริงแรงกดมีผลต่อการไหลของกระแสไฟหากมีการกดมากก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ดี ในทางกลับกันหากแรงกดน้อยก็ส่งผลให้กระแสไฟไหลได้น้อย

1.3.2 พื้นที่ของการซ้อนทับการซ้อนทับของแผ่นเหล็ก (Over Lap) หากมีการซ้อนทับน้อยรอยเชื่อมที่ออกมาจะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ฉีกขาดได้ง่าย แต่ถ้ามีการซ้อนทับที่มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถเชื่อมได้ เนื่องจากไม่สามารถเข้าร่องโรลเชื่อมได้

1.3.3 ขนาดของลวดเชื่อม หากขนาดของลวดเชื่อมหลังจากทำการบีบแล้วเมื่อมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่พอดีกับร่องโรลเชื่อมจะส่งผลให้ไม่สามารถเชื่อมได้

### 1.4 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดความกว้างของรอยเชื่อม

1.4.1 กระแสไฟฟ้า การละลายดีบุกที่ลวดทองแดง จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง โรลเชื่อม (Welding Roll)

1.4.2 แรงดันสปริง แรงกดมีผลต่อการไหลของกระแสไฟ หากมีการกดมากก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ดี ในทางกลับกันหากแรงกดน้อยก็ส่งผลให้กระแสไฟไหลได้น้อย

1.4.3 พื้นที่ของการซ้อนทับ การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก (Over Lap) หากมีการซ้อนทับน้อยรอยเชื่อมที่ออกมาจะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ฉีกขาดได้ง่าย แต่ถ้ามีการซ้อนทับที่มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถเชื่อมได้ เนื่องจากไม่สามารถเข้าร่องโรลเชื่อมได้

1.4.4 ขนาดของลวดเชื่อม หากขนาดของลวดเชื่อมหลังจากทำการบีบแล้วเมื่อมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่พอดีกับร่องโรลเชื่อมจะส่งผลให้ไม่สามารถเชื่อมได้

ดังนั้น ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการประสานรอยเชื่อม ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบ ทั้ง 4 การทดสอบหรือตัวแปร

ตอบสนอง (Response Variables) แสดงได้ดังสมการตัวแบบของแหล่งความผันแปรทั้งหลายต่อค่าตัวแปรตอบสนอง ได้ดังนี้

$$y_{ijklm} = \mu + \Gamma_i + \beta_j + (\Gamma\beta)_{ij} + \gamma_k + (\Gamma\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\Gamma\beta\gamma)_{ijk} + \delta_l + (\Gamma\delta)_{il} + (\beta\delta)_{jl} + (\Gamma\beta\delta)_{ijl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\Gamma\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\Gamma\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm}$$

โดยที่

$y$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองของการทดลอง

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ย

$\Gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้า

$\beta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยแรงดันสปริง

$\gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก

$\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยขนาดของลวดเชื่อม

$\Gamma\beta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\beta$

$\Gamma\gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\gamma$

$\Gamma\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\delta$

$\beta\gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\beta$  กับ  $\gamma$

$\beta\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\beta$  กับ  $\delta$

$\gamma\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\gamma$  กับ  $\delta$

$\Gamma\beta\gamma$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\beta$  กับ  $\gamma$

$\Gamma\beta\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\beta$  กับ  $\delta$

$\Gamma\gamma\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\gamma$  กับ  $\delta$

$\beta\gamma\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\beta$  กับ  $\gamma$  กับ  $\delta$

$\Gamma\beta\gamma\delta$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ  $\Gamma$  กับ  $\beta$  กับ  $\gamma$  กับ  $\delta$

$\varepsilon$  คือ ความคลาดเคลื่อน

เนื่องจากในการศึกษากระบวนการ การเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารครั้งนี้ จะทำการมุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยหลัก (Main Effect) และข้อจำกัดในการทดลองจึงสามารถทำการทดลองซ้ำได้เพียง 2 ครั้ง ทำให้อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ในระดับสูงไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ รวมทั้งอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ในระดับสูงไม่สามารถตีความหมายและไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตได้ ฉะนั้นเพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น จึงกำหนดสมมุติฐานของการทดสอบ โดยให้อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัย และปฏิสัมพันธ์ 4 ปัจจัย สามารถละเลยได้

หรือ  $\Gamma\beta\gamma = \Gamma\beta\delta = \Gamma\gamma\delta = \beta\gamma\delta = \Gamma\beta\gamma\delta = 0$

ดังนั้นสมการตัวแบบของแหล่งความผันแปรต่อค่าตัวแปรตอบสนองในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ จึงมีสมมุติฐานคือ

$$y_{ijklm} = \mu + \Gamma_i + \beta_j + (\Gamma\beta)_{ij} + \gamma_k + (\Gamma\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \delta_l + (\Gamma\delta)_{il} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + \varepsilon_{ijklm}$$

ฉะนั้นจึงใช้  $MS_{ABCD}$   $MS_{ABC}$   $MS_{ABD}$   $MS_{ACD}$   $MS_{BCD}$  และ  $MS_E$  ประมาณความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ( $\sigma^2$ ) โดยที่

$$E(MS_E) = \sigma^2$$

$$MS_E = [abcd(n-1)MS_E + (a-1)(b-1)(c-1)MS_{ABC} + (a-1)(b-1)(d-1)MS_{ABD} + (a-1)(c-1)(d-1)MS_{ACD} + (b-1)(c-1)(d-1)MS_{BCD} + (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)MS_{ABCD}] / [abcd(n-1) + (a-1)(b-1)(c-1) + (a-1)(b-1)(d-1) + (a-1)(c-1)(d-1) + (b-1)(c-1)(d-1) + (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)]$$

โดยที่

$E(MS_E)$  คือ ค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

$MS_E$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนใหม่

$MS_{ABCD}$   $MS_{ABC}$   $MS_{ABD}$   $MS_{ACD}$   $MS_{BCD}$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของ ทริตเมนต์ ABCD, ABD, ACD, และ BCD ตามลำดับ

$MS_E$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

## 2. ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

หลังจากการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์และการค้นคว้า ได้ทำการเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร ตลอดจนพิจารณาถึงการควบคุมค่าและวัดค่าที่เป็นไปได้ทำให้ได้ปัจจัยที่ศึกษาซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร ดังนี้

2.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า

2.2 แรงดันสปริง

2.3 พื้นที่ของการซ้อนทับของแผ่นเหล็ก

2.4 ความหนาของลวดเชื่อม (บีบแล้ว)

และกำหนดปัจจัยที่ควบคุม คือ แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (Tin Plate) แผ่นเหล็กบาง (ความหนา 0.28 มิลลิเมตรขึ้นไป) และมีดีบุกเคลือบป้องกันเป็นชั้นๆ ส่วนปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น ความชื้นอากาศภายนอก ซึ่งให้ถือว่าปัจจัยเหล่านั้นมีผลต่อกระบวนการน้อยมาก จนไม่สามารถนำมาพิจารณาได้

## 3. การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา

จากการสมมุติฐานในการออกแบบการทดลอง และข้อมูลจากการผลิต ซึ่งสภาวะการดำเนินการเชื่อมกระป๋องในปัจจุบันกำหนด

กระแสไฟฟ้า	50 แอมป์
แรงดันสปริง	60 daN
พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก	0.8 มิลลิเมตร
ขนาดความหนาของลวด(บีบแล้ว)	2.08 มิลลิเมตร

โดยกำหนดระดับการทดลองออกเป็น 3 ระดับ เนื่องจากไม่ทราบลักษณะอิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองว่ามีและใช้ในสภาวะปัจจุบัน ไว้ที่ระดับกลางและกำหนดค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลงของแต่ละปัจจัย ในระดับที่สูงกว่าและต่ำกว่าเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งช่วงที่ทำการศึกษาของตัวแปรแต่ละตัวจะเป็นจุดที่น่าสนใจในการผลิต ระดับของปัจจัยแบ่งได้ดังนี้

### 3.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่าย คือ

ระดับที่ 1 45 แอมป์

ระดับที่ 2 50 แอมป์

ระดับที่ 3 55 แอมป์

### 3.2 แรงดันสปริง

แรงดันสปริงในสภาวะการผลิตปัจจุบันกำหนดที่ 60 daN ฉะนั้นจึงแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยการเพิ่มและลดลงที่ 10 daN เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มและอิทธิพลของปัจจัยของแรงดันสปริง โดยคาดว่าช่วงแรงดันสปริงที่ศึกษาจะมีผลต่อการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร สามารถแบ่งระดับของปัจจัยได้ดังนี้

ระดับที่ 1 50 daN

ระดับที่ 2 60 daN

ระดับที่ 3 70 daN

3.3 พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก พื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก คือ เมื่อแผ่นเหล็กถูกม้วนขึ้นรูปเป็นตัวกระป๋อง (Bow) จะมีการซ้อนทับกันของแผ่นเหล็กโดยมีโรลคาลิเบตชั่น (Calibration Roll) เป็นตัวควบคุมการซ้อนทับ ทั้งทางด้านหัวและด้านท้าย ซึ่งในสภาวะการผลิตปัจจุบันกำหนดไว้ที่ 0.8 มิลลิเมตร จึงกำหนดพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นและลดลงที่ 0.2 มิลลิเมตรเนื่องจากหากมีการปรับเพิ่มหรือลดมากกว่านี้จะทำให้ไม่สามารถเชื่อมได้ ดังนั้นจึงแบ่งพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็กออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 0.5 มิลลิเมตร

ระดับที่ 2      0.7 มิลลิเมตร

ระดับที่ 3      0.9 มิลลิเมตร

3.4 ขนาดความหนาของลวดเชื่อม ขนาดความหนาของลวดเชื่อม หากขนาดของลวดอยู่ที่ขนาดเหมาะสมแล้ว จะส่งผลให้การเชื่อมมีคุณภาพมากขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

ระดับที่ 1      2.06 มิลลิเมตร

ระดับที่ 2      2.08 มิลลิเมตร

ระดับที่ 3      2.10 มิลลิเมตร

สามารถสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การกำหนดระดับปัจจัย

ปัจจัย	สัญลักษณ์	สถานะ		
		-(ต่ำ)	0(กลาง)	+(สูง)
1.ปริมาณกระแสไฟฟ้า	A	45	50	55
2.แรงดันสปริง	B	50	60	70
3.พื้นที่การซ้อนทับ	C	0.5	0.7	0.9
4.ขนาดของลวดเชื่อม	D	2.06	2.08	2.10

#### 4. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

4.1 การทำแบบสุ่ม (Randomization) เป็นการให้โอกาสแก่ข้อมูลในการเฉลี่ยอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป ในกระบวนการได้เลือกใช้การทำแบบสุ่มอย่างง่าย

4.2 การทดลองซ้ำ (Replication) หรือการกำหนดจำนวนครั้งในการทดลอง ซึ่งควรมีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งที่ระดับของปัจจัยต่างๆเหมือนกัน

เนื่องจากเหตุผลด้านค่าใช้จ่าย และข้อจำกัดในการทำการทดลองจึงกำหนดจำนวนซ้ำในการทดลอง 2 ครั้ง และทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

4.2.1 การเลือกค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปแล้ว คุณลักษณะของตัวแปรที่ถูกนำมาวัดผล และทำการวิเคราะห์ คือค่าเฉลี่ย หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือทั้งสองค่า เพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้องมากที่สุด และกำจัดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นให้ลดน้อยลงเท่าที่จะทำได้

4.2.2 รูปแบบการทดลอง การทดลองนี้ใช้การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ เพื่อเป็นการป้องกันเรื่องความไม่สม่ำเสมอ ความคลาดเคลื่อนทั้งเครื่องมือ และผู้ทำการทดลอง รวมทั้งอคติที่อาจเกิดขึ้นได้ในผู้ทำการทดลอง และการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเป็นแบบ



แฟกทอเรียล ก็เพราะต้องการศึกษาถึงอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของบางปัจจัย และแก้ปัญหาข้อบกพร่องจากวิธีครั้งละหนึ่งปัจจัย (one-factor-at-a-time)

## 5. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้วิธีการเชิงสถิติวิศวกรรมในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการทดลอง และข้อสรุปจากการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) ตามสมการตัวแบบในสมมติฐานการออกแบบการทดลองซึ่งมีการทดสอบสมมติฐานดังนี้

$$\begin{array}{ll}
 (1) H_0: \Gamma_i = 0 & (6) H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0 \\
 H_1: \Gamma_i \neq 0 & H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \\
 (2) H_0: \beta_j = 0 & (7) H_0: \delta_l = 0 \\
 H_1: \beta_j \neq 0 & H_1: \delta_l \neq 0 \\
 (3) H_0: (\Gamma\beta)_{ij} = 0 & (8) H_0: (\Gamma\delta)_{ij} = 0 \\
 H_1: (\Gamma\beta)_{ij} \neq 0 & H_1: (\Gamma\delta)_{ij} \neq 0 \\
 (4) H_0: \gamma_k = 0 & (9) H_0: (\beta\delta)_{jl} = 0 \\
 H_1: \gamma_k \neq 0 & H_1: (\beta\delta)_{jl} \neq 0 \\
 (5) H_0: (\Gamma\gamma)_{ik} = 0 & (10) H_0: (\gamma\delta)_{kl} = 0 \\
 H_1: (\Gamma\gamma)_{ik} \neq 0 & H_1: (\gamma\delta)_{kl} \neq 0
 \end{array}$$

และตรวจสอบความถูกต้อง (Model Adequacy Checking) ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบ จะทำการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆด้วยกราฟของตัวแปรตอบสนอง (Response Plot)

ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง(SS)	ขั้นของความอิสระ(DF)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ตัวทดสอบ (F)	ค่า Fวิกฤต
ทรีตเมนต์					
ความคลาดเคลื่อน					
เหลือทั้งหมด					

## 6. ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นการทดลองสรุปได้ดังนี้

6.1 จัดเตรียมวัตถุดิบสำหรับการทดลอง จัดแผ่นเหล็กกระป๋องที่จะทำการทดลอง

ออกเป็น 4 ส่วน

- การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rip Weld Test)
- การทดสอบการประสานรอยเชื่อม (Ball Weld Test)
- การทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)
- การยืดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

## 6.2 การจัดเตรียมวัตถุดิบในการทดลอง

6.2.1 แผ่นเหล็กกระป๋อง ต้องผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติตามเงื่อนไขก่อนการใช้งาน (ข้อมูลทางด้านเทคนิคและข้อกำหนดเฉพาะแสดงในภาคผนวก ข)

- การตรวจสอบสภาพการบรรจุหีบห่อ
- การตรวจสอบลำดับและวันผลิตของผู้ผลิตและอายุ (Shelf Life)
- การตรวจสอบลักษณะปนเปื้อน ได้แก่ ฟูนง จารบี อื่นๆ

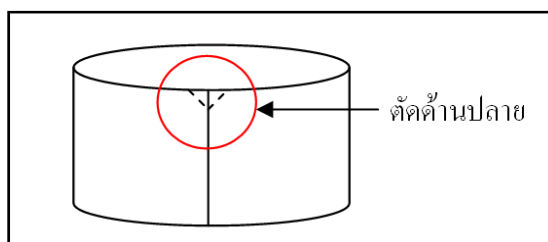
6.2.2 ลวดทองแดง ต้องผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติตามเงื่อนไขก่อนการใช้งาน (ข้อมูลทางด้านเทคนิคและข้อกำหนดเฉพาะแสดงในภาคผนวก ข)

- การตรวจสอบสภาพการบรรจุหีบห่อ
- การตรวจสอบลำดับและวันผลิตของผู้ผลิตและอายุ (Shelf Life)
- การตรวจสอบลักษณะปนเปื้อน ได้แก่ ฟูนง จารบี อื่นๆ

6.3 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองอยู่ในสภาพปกติ สภาวะการทำงานที่มีการแสดงสถานะทำงานได้ตามปกติ ความเร็วของเครื่องจักรคงที่ ไม่มีสิ่งสกปรกหรือสิ่งที่จะทำให้เกิดผลกระทบในการทดลอง

## 6.4 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rip Weld Test)

6.4.1 นำกระป๋องที่ทำการทดลองตามตารางเมตริกการออกแบบ มาตัดที่ปลายด้านหัวให้พอดีสำหรับที่จะสามารถใช้เข็มจับได้



ภาพที่ 14 แสดงลักษณะการตัดปากกระป๋อง

6.4.2 นำกระป๋องสอดเข้ากับชุดลือคกระป๋อง โดยให้ปลายด้านที่ตัดอยู่ด้านนอก

6.4.3 นำคีมจับด้านปลายที่ตัดไว้แล้วดึงด้วยแรงที่สม่ำเสมอจนรอยเชื่อมหลุดออกจากตัวกระป๋อง

6.4.4 ทำการตรวจสอบรอยเชื่อมที่ได้ โดยมีหลายละเอียดดังนี้

- หากขณะดึงรอยเชื่อมเกิดขาดระหว่างการดึงถือว่ารอยเชื่อมผิดปกติ เรียกว่า รอยเชื่อมอ่อนเปราะ (Cold Weld)

- หากดึงได้ปกติแต่เมื่อลองดูที่รอยเชื่อมหรือดูด้วยตา พบว่าที่รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นหนามรอบๆถือว่าผิดปกติ เรียกว่า รอยเชื่อมเป็นหนามหรือรอยเชื่อมแข็งเปราะ (Hot Weld)

- หากนอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นถือว่ารอยเชื่อมเป็นปกติ

#### 6.5 การทดสอบการประสานรอยเชื่อม (Ball Weld Test)

6.5.1 นำกระป๋องที่ทำการทดลองตามตารางเมตริกการออกแบบ มาใส่ที่ชุด Ball Test เพื่อทำการทดสอบ โดยก่อนที่จะใส่กระป๋องเปิดตัวดันรอยเชื่อมออกมาก่อนแล้วจึงค่อยใส่กระป๋องเข้าไป และต้องใส่รอยเชื่อมให้อยู่ตรงกลางของตัวดันรอยเชื่อม

6.5.2 เปิดวาล์วลม (Pressure Switch) เพื่อให้ตัวดันรอยเชื่อมวิ่งผ่านรอยเชื่อม

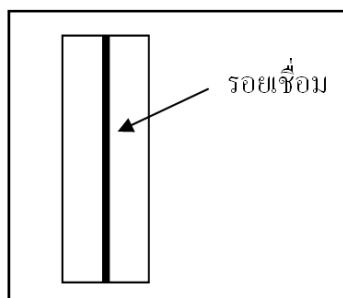
6.5.3 ทำการตรวจสอบรอยเชื่อมที่ได้ โดยมีหลายละเอียดดังนี้

- หากขณะดึงรอยเชื่อมเกิดแตกระหว่างการดึงถือว่ารอยเชื่อมผิดปกติ ซึ่งกล่าวได้ว่าจะจะเป็นรอยเชื่อมอ่อนเปราะ (Cold Weld) หรือรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นเวลแข็งเปราะ (Hot Weld)

- หากนอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นถือว่าเป็นเวลปกติ

#### 6.6 การทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)

6.6.1 นำกระป๋องที่ทำการทดลองตามตารางเมตริกการออกแบบ นำมาตัดตามยาวรอยเชื่อม



ภาพที่ 15 แสดงลักษณะการตัดแผ่นเหล็กกระป๋อง

6.6.2 นำแผ่นเหล็กผ่านกล้องนาโนเพื่อทำการตรวจสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test) (ดังแสดงในภาคผนวก ค รูปที่ ค.3)

6.6.3 ทำการวัดความกว้างของรอยเชื่อมโดยใช้โปรแกรมเป็นตัววัด ซึ่งค่าความกว้างต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด จึงถือว่ารอยเชื่อมปกติ

6.7 การทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

6.7.1 นำกระป๋องที่ทำการทดลองตามตารางเมตริกการออกแบบ นำมาตัดที่ปลายด้านหัวให้พอดีสำหรับที่จะสามารถใช้เข็มจับได้

6.7.2 นำกระป๋องสอดเข้ากับชุดล๊อคกระป๋อง โดยให้ปลายด้านที่ตัดอยู่ด้านนอก (ดังแสดงในภาคผนวก ค รูปที่ ค.1)

6.7.3 นำเข็มจับด้านปลายที่ตัดไว้แล้วดึงด้วยแรงที่สม่ำเสมอจนรอยเชื่อมหลุดออกจากตัวกระป๋อง

6.7.4 นำรอยเชื่อมที่ได้มาทำการทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม โดยเครื่องดึง จากนั้นทำการดึงจนกว่ารอยเชื่อมจะขาดออกจากกันแล้วบันทึกค่าที่สูงที่สุด

6.8 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

6.8.1 คีมช่าง

6.8.2 ถังมือกันลื่น

6.8.3 แวนตาไนริทซ์

6.8.4 รองเท้าเซฟตี้

ตารางที่ 4 ลำดับการทดลอง

No. *	หมายเลข*	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข
1	121	28	88	55	143	82	65	109	151	136	148
2	4	29	140	56	152	83	83	110	157	137	69
3	56	30	15	57	39	84	11	111	52	138	91
4	3	31	66	58	78	85	126	112	5	139	97
5	129	32	53	59	118	86	106	113	38	140	108
6	32	33	71	60	1	87	59	114	6	141	26
7	2	34	116	61	115	88	20	115	147	142	142
8	135	35	154	62	19	89	27	116	96	143	43
9	103	36	72	63	161	90	57	117	16	144	141
10	131	37	51	64	55	91	81	118	92	145	124
11	80	38	44	65	34	92	77	119	155	146	42
12	47	39	50	66	22	93	146	120	61	147	63
13	33	40	70	67	104	94	114	121	94	148	35
14	48	41	110	68	87	95	112	122	99	149	21
15	82	42	105	69	85	96	127	123	12	150	36
16	79	43	117	70	139	97	125	124	160	151	158
17	64	44	119	71	40	98	23	125	10	152	28
18	18	45	123	72	29	99	8	126	90	153	41
19	75	46	7	73	153	100	68	127	49	154	136
20	31	47	149	74	73	101	58	128	107	155	150
21	100	48	113	75	45	102	98	129	122	156	93
22	14	49	95	76	133	103	145	130	130	157	144
23	24	50	30	77	9	104	120	131	102	158	156
24	67	51	138	78	17	105	128	132	74	159	62
25	54	52	89	79	76	106	37	133	84	160	13
26	137	53	111	80	132	107	162	134	46	161	134
27	60	54	86	81	25	108	101	135	159	162	109

\* ลำดับการทดลอง

\* หมายเลขสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 5 เกณฑ์น้ำหนักการให้คะแนนของผลการทดลอง

ผลทดลอง	ลักษณะ		น้ำหนัก
Normal Weld	รอยเชื่อมมี Nugget & Extrusion สม่ำเสมอ	70 - 100 %	9
	รอยเชื่อมมี Nugget & Extrusion สม่ำเสมอ	40 - 69 %	8
	รอยเชื่อมมี Nugget & Extrusion สม่ำเสมอ	1 - 39 %	7
Hot Weld	รอยเชื่อมเป็นหนาม	> 60 - 100 %	6
	รอยเชื่อมเป็นหนาม	> 30 - 59 %	5
	รอยเชื่อมเป็นหนาม	> 1 - 29 %	4
Cold Weld	รอยเชื่อมมีลักษณะสีแดง	1 - 29 %	3
	รอยเชื่อมมีลักษณะสีแดง	30 - 59 %	2
	รอยเชื่อมมีลักษณะสีแดง	60 - 100 %	1

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 6 ลำดับในการทดลองทั้ง 4 ปัจจัย

C		-						0						+					
D		-		0		+		-		0		+		-		0		+	
A	B	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
-	-	1*	82	2	83	3	84	4	85	5	86	6	87	7	88	8	89	9	90
	0	10	91	11	92	12	93	13	94	14	95	15	96	16	97	17	98	18	99
	+	19	100	20	101	21	102	22	103	23	104	24	105	25	106	26	107	27	108
0	-	28	109	29	110	30	111	31	112	32	113	33	114	34	115	35	116	36	117
	0	37	118	38	119	39	120	40	121	41	122	42	123	43	124	44	125	45	126
	+	46	127	47	128	48	129	49	130	50	131	51	132	52	133	53	134	54	135
+	-	55	136	56	137	57	138	58	139	59	140	60	141	61	142	62	143	63	144
	0	64	145	65	146	66	147	67	148	68	149	69	150	70	151	71	152	72	153
	+	73	154	74	155	75	156	76	157	77	158	78	159	79	160	80	161	81	162

ระดับต่ำ -

ระดับกลาง 0

ระดับสูง +

1\* หมายเลขสภาวะการทดลอง

A ปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้า

B ปัจจัยแรงดันสปริง

C ปัจจัยพื้นที่การซ้อนทับของแผ่นเหล็ก

D ปัจจัยความหนาของลวดเชื่อม

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### 1. การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติวิศวกรรมจากการออกแบบการทดลอง

#### 1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rip Test)

การทดสอบความแข็งแรงรอยเชื่อม เป็นการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดึง โดยพิจารณาไว้จากลักษณะของรอยเชื่อมและการทนต่อแรงดึง (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก)

#### ก. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) โดยการกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ (กำหนด  $\alpha = 0.05$ ) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7 สรุปปัจจัยที่มีผลภายใต้ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

#### 1. ปัจจัยหลัก (Main Effects)

##### 1.1 กระแสไฟฟ้า

##### 1.2 แรงดันสปริง

##### 1.3 พื้นที่การซ้อนทับ

##### 1.4 ขนาดของลวดเชื่อม

#### 2. ปัจจัยร่วม (Interaction Effects)

2.1 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม แสดงว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าแต่ละระดับ มีการใช้ระดับแรงดันสปริงที่แตกต่างกันที่จะทำให้ได้ผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป

2.2 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม แสดงว่าพื้นที่การซ้อนทับแต่ละระดับก็จะใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่างกันออกไปที่จะทำให้เกิดผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.3 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม แสดงว่าการใช้ขนาดของลวดเชื่อมกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่



2.4 ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดี

2.5 ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดี

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบแข็งแรงของรอยเชื่อม

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง	ขั้นของความอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F	Fวิกฤต ( $\alpha=0.05$ )	
A	30.26	2	15.13	133.68*	3.00	
B	168.44	2	84.22	76.13*		
C	64.70	2	32.35	29.25*		
D	12.44	2	6.22	5.62*		
AB	67.41	4	16.85	15.23*		2.37
AC	59.26	4	14.81	13.39*		
AD	49.74	4	12.44	11.24*		
BC	14.96	4	3.74	3.38*		
BD	20.44	4	5.11	4.62*		
CD	1.41	4	0.35	0.32		
Error	142.70	129	1.11			
Total	631.77	161				

$$F_{0.05,2,129} = 3.00$$

$$F_{0.05,4,129} = 2.37$$

\*มีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$

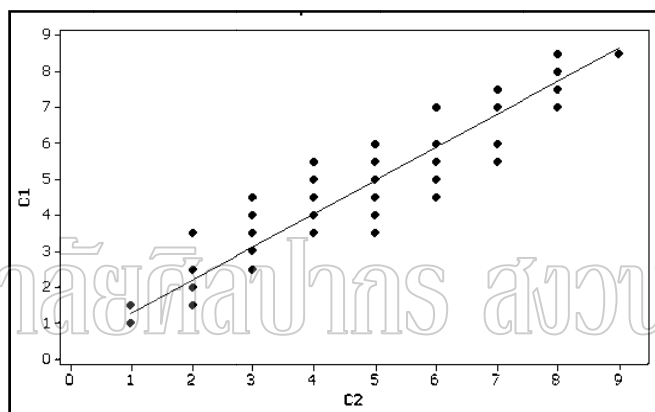
ข. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปตามภาพที่ 16 ถึง ภาพที่ 17 ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$  ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยต้องมีคุณสมบัติ 3 ข้อ

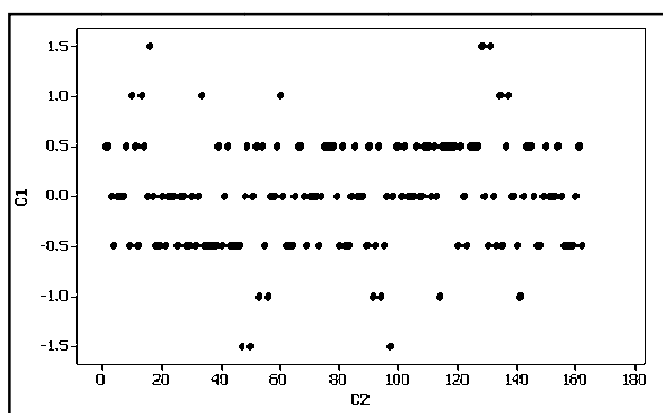
จากภาพที่ 16 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

จากภาพที่ 17 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างอิสระ สม่่าเสมอ ซึ่งได้ว่าลักษณะของข้อมูลมีความอิสระ

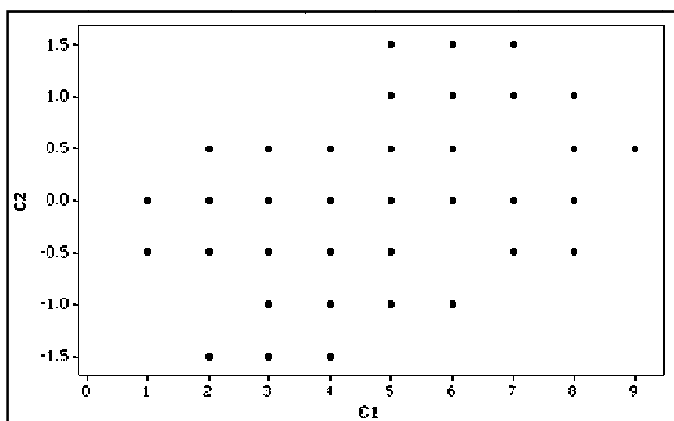
จากภาพที่ 18 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 16 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

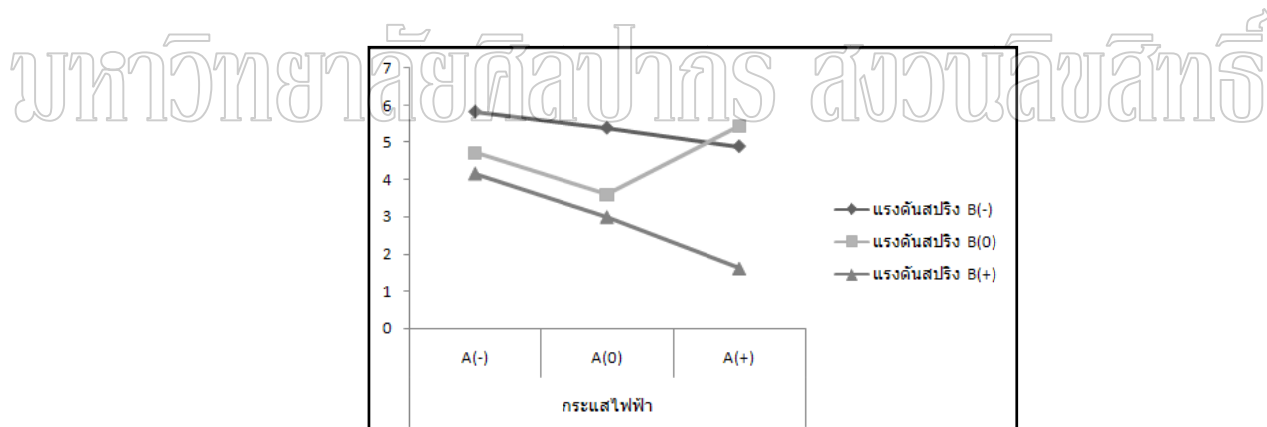


ภาพที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม



ภาพที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม

ค.การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม  
ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองในปัจจุบันสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบ  
ความแข็งแรงของรอยเชื่อม

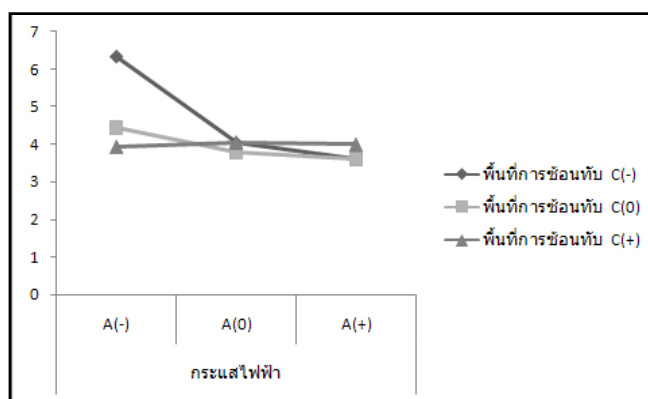


ภาพที่ 19 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่าง  
กระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

		แรงดันสปริง		
		B(-)	B(0)	B(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	5.83	4.72	4.17
	A(0)	5.39	3.61	3.00
	A(+)	4.89	5.44	1.61

จากภาพที่ 19 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง โดยปริมาณกระแสไฟฟ้ามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อระดับของแรงดันสปริงเปลี่ยนไป และเมื่อแรงดันสปริงสูงขึ้นก็มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม



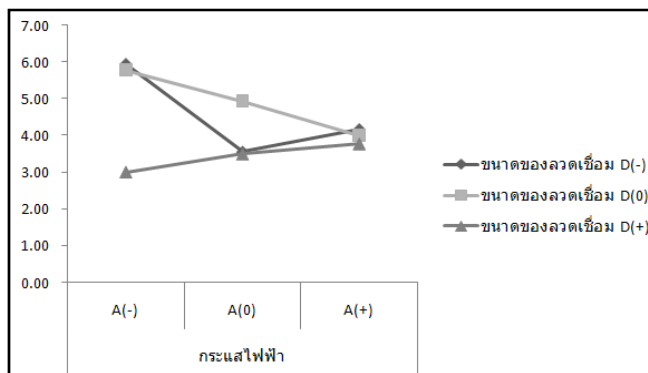
ภาพที่ 20 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวิศวกรรมศาสตร์

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ

		พื้นที่การซ้อนทับ		
		C(-)	C(0)	C(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	6.33	4.44	3.94
	A(0)	4.05	3.80	4.05
	A(+)	3.61	4.33	4.00

จากภาพที่ 20 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ โดยพื้นที่กระแสไฟฟ้าจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเมื่อพื้นที่การซ้อนทับอยู่ในระดับต่ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

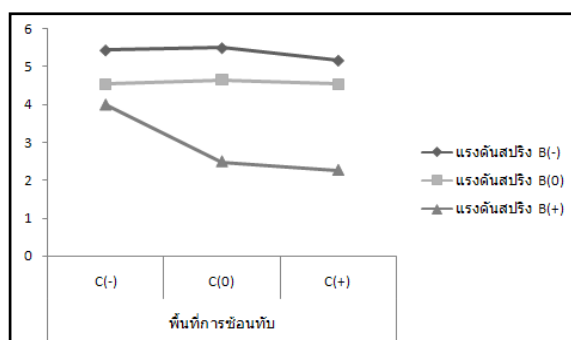


ภาพที่ 21 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม

		ขนาดของลวดเชื่อม		
		D(-)	D(0)	D(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	5.94	5.78	3.00
	A(0)	3.56	4.94	3.50
	A(+)	4.17	4.00	3.78

จากภาพที่ 21 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อมโดยกระแสไฟฟ้าจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามเมื่อขนาดของลวดเชื่อมอยู่ในระดับต่ำ หากระดับขนาดของลวดเชื่อมและกระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับสูงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

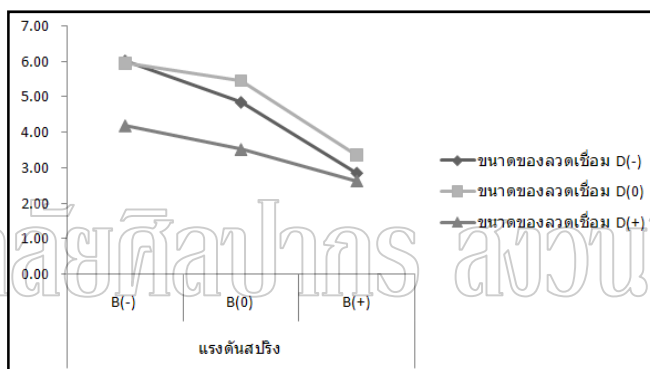


ภาพที่ 22 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ

		แรงดันสปริง		
		B(-)	B(0)	B(+)
พื้นที่การซ้อนทับ	C(-)	5.44	4.55	4.00
	C(0)	5.50	4.66	2.50
	C(+)	5.17	4.55	2.27

จากภาพที่ 22 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ จะเห็นได้ว่าระดับของแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับมีความสัมพันธ์กัน โดยค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในค่าระดับต่ำ

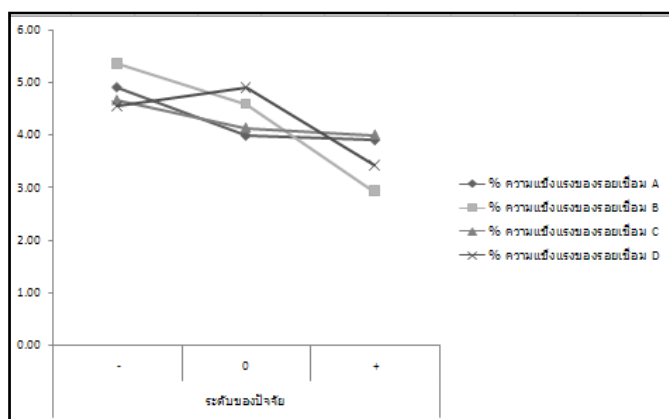


ภาพที่ 23 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับ ขนาดของลวดเชื่อม

		ขนาดของลวดเชื่อม		
		D(-)	D(0)	D(+)
แรงดันสปริง	B(-)	6.00	5.94	4.17
	B(0)	4.83	5.44	3.50
	B(+)	2.83	3.33	2.61

จากภาพที่ 23 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม แรงดันสปริงและขนาดของลวดเชื่อมมีผลความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้น



ภาพที่ 24 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ระดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C	ปัจจัย D
1(-)	4.91	5.37	4.66	4.55
2(0)	3.99	4.59	4.09	4.91
3(+)	3.90	2.92	4.00	3.43

จากภาพที่ 24 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง พื้นที่การซ้อนทับและขนาดของลวดเชื่อม มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยที่

- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 45 แอมป์ ที่ดีที่สุด ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- แรงดันสปริง พบว่าระดับของแรงดันสปริงที่ผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 60 daN
- พื้นที่การซ้อนทับ 0.9 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่การซ้อนทับที่ดี โดยหากพื้นที่การซ้อนทับมาก ความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็จะสูงขึ้นตามพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมหากขนาดของลวดเชื่อมสูงขึ้นจากการทดลองพบว่าขนาดของลวดเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 2.08 มิลลิเมตร

จากกราฟตัวแปรตอบสนองที่ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 24 สามารถเสนอแนะสถานะที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ให้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมอยู่ในระดับที่ดี คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 55 แอมป์ แรงดันสปริง 60 daN พื้นที่การซ้อนทับ 0.7 มิลลิเมตร และขนาดของลวดเชื่อม 2.10 มิลลิเมตร

## 1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม (Ball Test)

การทดสอบความประสานของรอยเชื่อม เป็นการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะรอยเชื่อมที่ตัวกระป๋อง โดยพิจารณาได้จากลักษณะของรอยเชื่อมและการยึดเกาะบนตัวกระป๋อง (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก)

### ก. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) โดยการกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ (กำหนด  $\alpha = 0.05$ ) ผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังตารางที่ 14 สรุปปัจจัยที่มีผลภายใต้ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

#### 1. ปัจจัยหลัก (Main Effects)

- 1.1 กระแสไฟฟ้า
- 1.2 แรงดันสปริง
- 1.3 พื้นที่การซ้อนทับ
- 1.4 ขนาดของลวดเชื่อม

#### 2. ปัจจัยร่วม (Interaction Effects)

2.1 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง มีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม แสดงว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าแต่ละระดับ มีการใช้ระดับแรงดันสปริงที่แตกต่างกันที่จะทำให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อม

2.2 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ มีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม แสดงว่าพื้นที่การซ้อนทับแต่ละระดับก็จะทำให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.3 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม แสดงว่าการใช้ขนาดของลวดเชื่อมกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.4 ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับมีผลต่อความประสานของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.5 ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อความประสานของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด



ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง	ขั้นของความอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F	Fวิกฤต ( $\alpha=0.05$ )
A	27.31	2	13.65	13.11*	3.00
B	178.09	2	89.04	85.48*	
C	57.23	2	28.62	27.47*	
D	9.79	2	4.90	4.70*	
AB	68.54	4	17.14	16.45*	2.37
AC	76.17	4	19.04	18.28*	
AD	51.73	4	12.93	12.42*	
BC	16.17	4	4.04	3.88*	
BD	18.17	4	4.54	4.36*	
CD	0.69	4	0.17	0.17	
Error	134.37	129	1.04		
Total	638.27	161			

$$F_{0.05,2,129} = 3.00$$

$$F_{0.05,4,129} = 2.37$$

\*มีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$

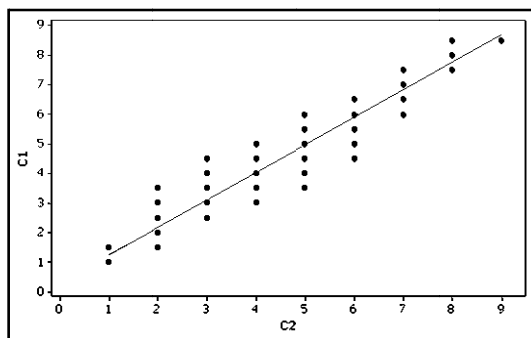
#### ข. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปดังภาพที่ 25 ถึง 27

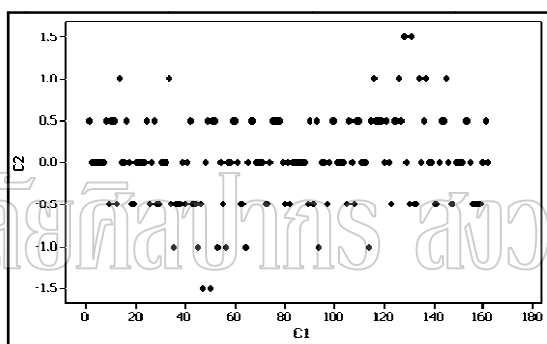
จากภาพที่ 25 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

จากที่ 26 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างอิสระ สม่่าเสมอ ซึ่งได้ว่าลักษณะของข้อมูลมีความอิสระ

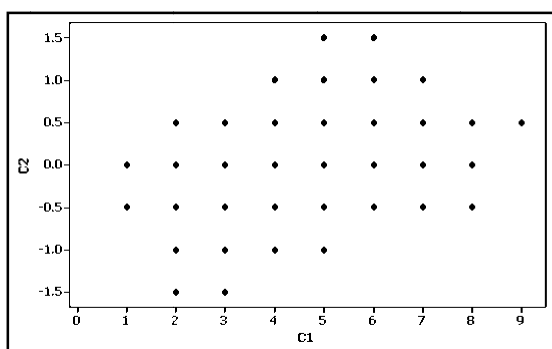
จากภาพที่ 27 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างสม่่าเสมอไม่เกิดเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 25 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความ  
แข็งแรงของรอยเชื่อม



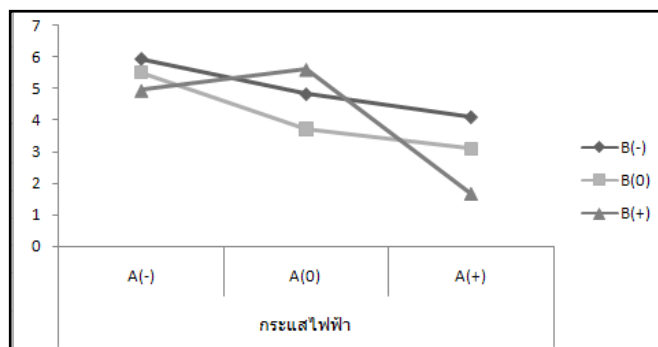
ภาพที่ 26 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม



ภาพที่ 27 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม

ค. การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอย  
เชื่อม

ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองในปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

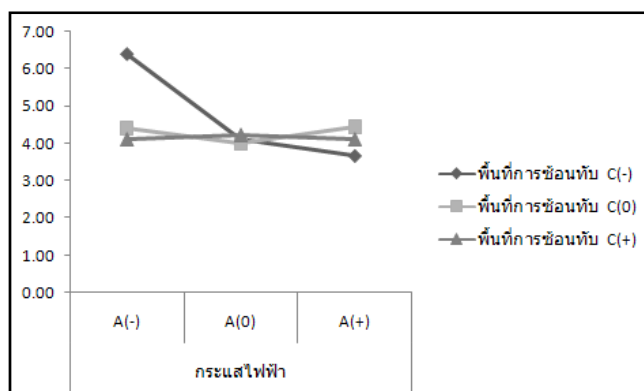


ภาพที่ 28 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ แรงดันสปริง

		แรงดันสปริง		
		B(-)	B(0)	B(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	5.94	5.5	4.94
	A(0)	4.83	3.72	5.61
	A(+)	4.11	3.11	1.62

จากภาพที่ 28 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง โดยปริมาณกระแสไฟฟ้ามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อระดับของแรงดันสปริงเปลี่ยนไป และเมื่อแรงดันสปริงสูงขึ้นก็มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม

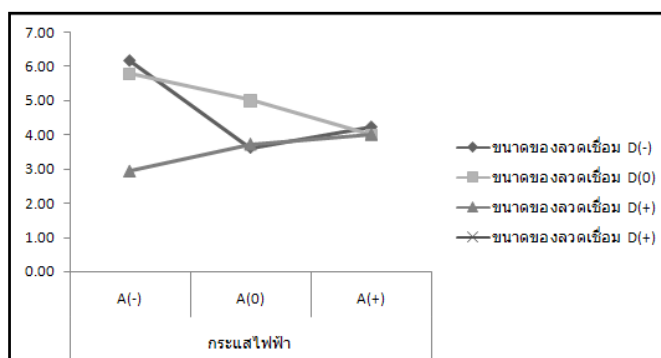


ภาพที่ 29 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการเชื่อม

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อม

		พื้นที่การเชื่อม		
		C(-)	C(0)	C(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	6.39	4.39	4.11
	A(0)	4.11	4.00	4.22
	A(+)	3.67	4.44	4.11

จากภาพที่ 29 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อม โดยพื้นที่การเชื่อมจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งจะส่งผลต่อความประสานของรอยเชื่อม

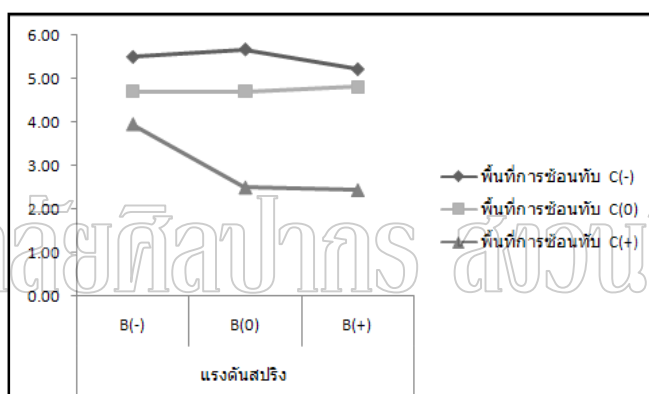


ภาพที่ 30 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม

		ขนาดของลวดเชื่อม		
		D(-)	D(0)	D(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	6.17	5.78	2.94
	A(0)	3.61	5.00	3.72
	A(+)	4.22	4.00	4.00

จากภาพที่ 30 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม โดยกระแสไฟฟ้าจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามระดับขนาดของลวดเชื่อม

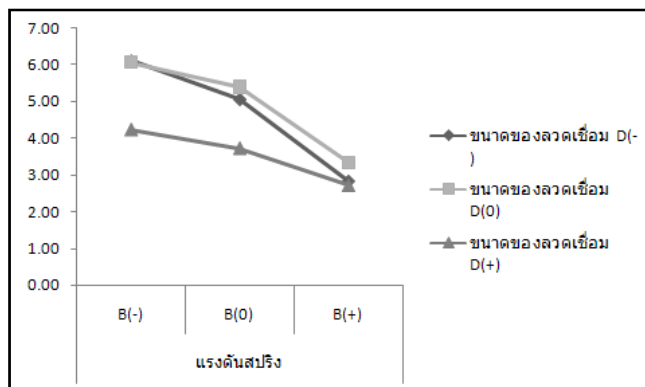


ภาพที่ 31 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อม

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับ พื้นที่การเชื่อม

		พื้นที่การเชื่อม		
		C(-)	C(0)	C(+)
แรงดันสปริง	B(-)	5.50	4.70	3.94
	B(0)	5.67	4.70	2.50
	B(+)	5.22	4.80	2.44

จากภาพที่ 31 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับพื้นที่การเชื่อม แรงดันสปริงจะมีผลต่อความไวมากกว่าพื้นที่การเชื่อม

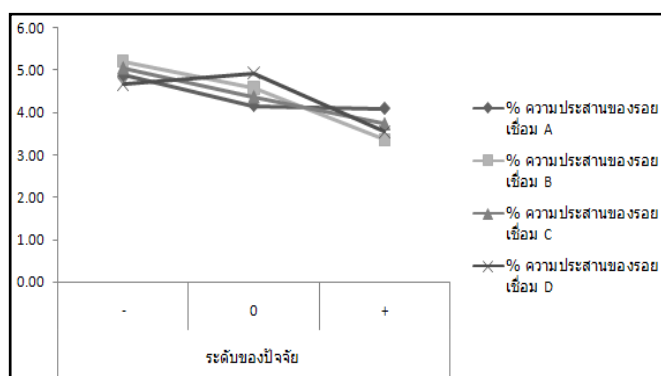


ภาพที่ 32 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การเชื่อมทับ

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม

		ขนาดของลวดเชื่อม		
		D(-)	D(0)	D(+)
แรงดันสปริง	B(-)	6.11	6.06	4.22
	B(0)	5.06	5.39	3.72
	B(+)	2.83	3.33	2.72

จากภาพที่ 31 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมแรงดันสปริงและขนาดของลวดเชื่อมมีผลความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้น



ภาพที่ 33 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

ระดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C	ปัจจัย D
1(-)	4.88	5.21	5.21	4.67
2(0)	4.17	4.58	4.42	4.93
3(+)	4.10	3.36	3.52	3.55

จากภาพที่ 33 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง พื้นที่การซ้อนทับและขนาดของลวดเชื่อม มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยที่

- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 45 แอมป์ ที่ดีที่สุด ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- แรงดันสปริง พบว่าระดับของแรงดันสปริงที่ผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 50 daN
- พื้นที่การซ้อนทับ 0.5 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่การซ้อนทับที่ดี โดยหากพื้นที่การซ้อนทับมากความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็จะสูงขึ้นตาม

- ขนาดของลวดเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมหากขนาดของลวดเชื่อมสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าขนาดของลวดเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 2.08 มิลลิเมตร

จากกราฟตัวแปรตอบสนองที่ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 33 สามารถเสนอแนะสถานะที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ให้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมอยู่ในระดับที่ดี คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 45 แอมป์ แรงดันสปริง 50 daN พื้นที่การซ้อนทับ 0.5 มิลลิเมตร และขนาดของลวดเชื่อม 2.08 มิลลิเมตร

### 1.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)

การทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม เป็นการทดสอบขนาดความกว้างของรอยเชื่อมที่ตัวกระป๋อง โดยพิจารณาไว้จากขนาดความกว้างของรอยเชื่อมผ่านกล้องนาโน (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก)

#### ก.การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) โดยการกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ (กำหนด  $\alpha = 0.05$ ) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 21 สรุปปัจจัยที่มีผลภายใต้ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

#### 1. ปัจจัยหลัก (Main Effects)

##### 1.1 แรงดันสปริง

## 1.2 ขนาดของลวดเชื่อม

## 2. ปัจจัยร่วม (Interaction Effects)

2.1 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง มีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม แสดงว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าแต่ละระดับ มีการใช้ระดับแรงดันสปริงที่แตกต่างกันที่จะทำให้ให้ได้ผลต่อความประสานของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

ตารางที่ 21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง	ขั้นของความอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F	Fวิกฤต ( $\alpha=0.05$ )
A	0.003	2	0.001	1.610	3.00
B	0.006	2	0.003	3.842*	
C	0.003	2	0.001	1.610	
D	1.603	2	0.802	987.033*	
AB	0.117	4	0.029	36.033*	2.37
AC	0.001	4	0.000	0.181	
AD	0.002	4	0.000	0.541	
BC	0.003	4	0.001	0.875	
BD	0.007	4	0.002	2.011	
CD	0.002	4	0.000	0.532	
Error	0.105	129	0.001	1.610	
Total	1.85	161			

$$F_{0.05,2,129} = 3.00$$

$$F_{0.05,4,129} = 2.37$$

\*มีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$

## ข. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปตามภาพที่ 34 ถึง 36 ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$  ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยต้องมีคุณสมบัติ 3 ข้อ

## 1. ข้อมูลมีการแจกกระจายแบบปกติ



## 2. ข้อมูลมีความอิสระ

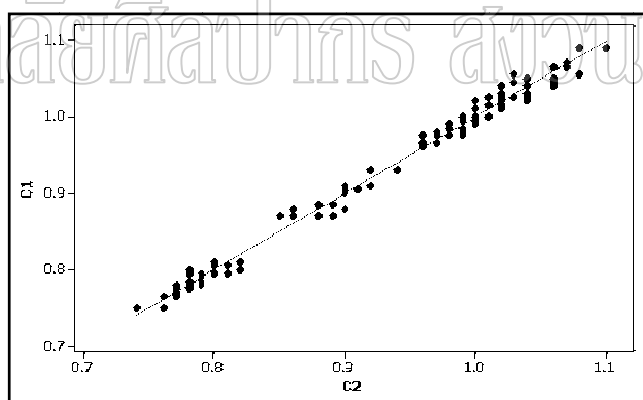
### 3. ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

โดยการตรวจสอบเป็นไปตามวิธีการที่ระบุไว้ในทฤษฎี (บทที่ 2)

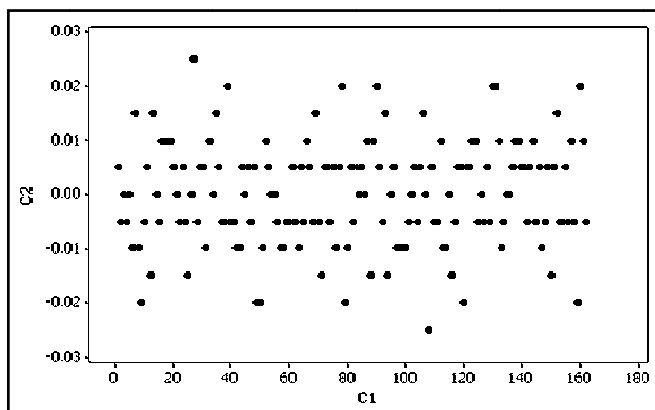
จากภาพที่ 34 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

จากภาพที่ 35 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างอิสระ สม่่าเสมอ ซึ่งได้ว่าลักษณะของข้อมูลมีความอิสระ

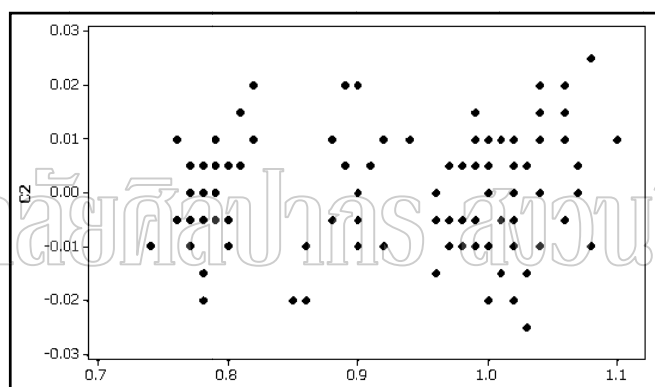
จากภาพที่ 36 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 34 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม

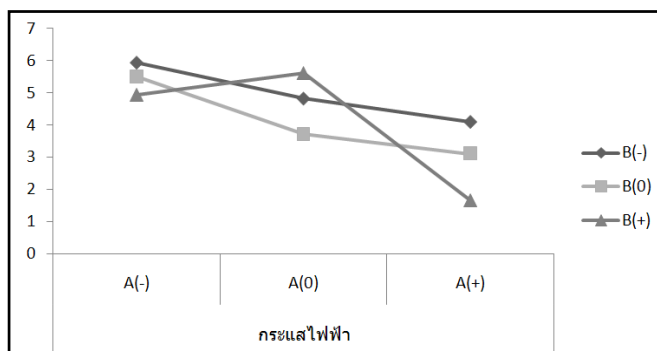


ภาพที่ 35 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม



ภาพที่ 36 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม

ค. การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม  
 ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองในปัจจุบันสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบ  
 ความกว้างของรอยเชื่อม

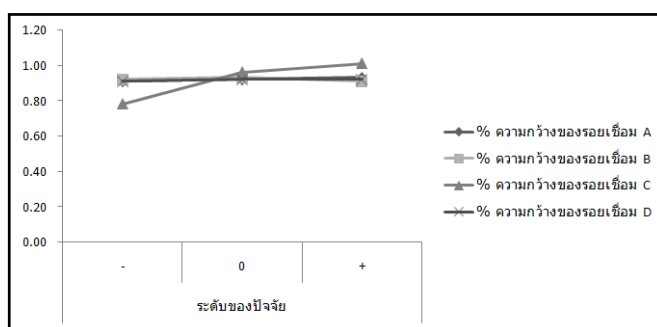


ภาพที่ 37 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

		พื้นที่การเชื่อมทับ		
		B(-)	B(0)	B(+)
แรงดันสปริง	A(-)	0.89	0.97	0.88
	A(0)	0.92	0.93	0.92
	A(+)	0.95	0.89	0.95

จากภาพที่ 37 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริงจะมีความไวมากกว่า



ภาพที่ 38 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม

ระดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C	ปัจจัย D
1(-)	0.91	0.92	0.78	0.91
2(0)	0.92	0.93	0.96	0.92
3(+)	0.93	0.91	1.01	0.92

จากภาพที่ 38 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง พื้นที่การซ้อนทับและขนาดของลวดเชื่อม มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยที่

- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 55 แอมป์ ที่ดีที่สุด ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- แรงดันสปริง พบว่าระดับของแรงดันสปริงที่ผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีอยู่

ที่ 60 daN

- พื้นที่การซ้อนทับ 0.9 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่การซ้อนทับที่ดี โดยหากพื้นที่การซ้อนทับมากความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็จะสูงขึ้นตาม

- ขนาดของลวดเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมหากขนาดของลวดเชื่อมสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าขนาดของลวดเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 2.08 มิลลิเมตร

จากกราฟตัวแปรตอบสนองที่ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากภาพที่ 34 ถึงภาพที่ 38 สามารถเสนอแนะสถานะที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ให้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมอยู่ในระดับที่ดี คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 55 แอมป์ แรงดันสปริง 60 daN พื้นที่การซ้อนทับ 0.9 มิลลิเมตร และขนาดของลวดเชื่อม 2.08 มิลลิเมตร

#### 1.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

การทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม เป็นการทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อมที่ตัวกระป๋อง โดยพิจารณาไว้จากการยืดตัวของรอยเชื่อมโดยการดึงที่รอยเชื่อม (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก)

##### ก. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) โดยการกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ (กำหนด  $\alpha = 0.05$ ) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 24 สรุปปัจจัยที่มีผลภายใต้ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ดังนี้

#### 1. ปัจจัยหลัก (Main Effects)

##### 1.1 กระแสไฟฟ้า

##### 1.2 แรงดันสปริง

### 1.3 พื้นที่การซ้อนทับ

#### 2. ปัจจัยร่วม (Interaction Effects)

2.1 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม แสดงว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าแต่ละระดับ มีการใช้ระดับ

แรงดันสปริงที่แตกต่างกันที่จะทำให้ได้ผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.2 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม แสดงว่าพื้นที่การซ้อนทับแต่ละระดับก็จะใช้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ต่างกันออกไปที่จะทำให้ได้ผลการยึดตัวของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.3 ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม แสดงว่าการใช้ขนาดของลวดเชื่อมกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการยึดตัวของรอยเชื่อมที่ดี

2.4 ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับมีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการยึดตัวของรอยเชื่อมที่ดี

2.5 ปัจจัยร่วมของพื้นที่การซ้อนทับกับขนาดของลวดเชื่อมมีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อมแสดงว่าการใช้แรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการยึดตัวของรอยเชื่อมที่ดี

ตารางที่ 24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม

แหล่งของความผันแปร	ผลรวมกำลังสอง	ขั้นของความอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F	Fวิกฤต ( $\alpha=0.05$ )	
A	8.12	2	1846081.13	1451977.43*	3.00	
B	263.12	2	4.06	3.19*		
C	55.11	2	131.56	103.47*		
D	15.26	2	27.56	21.678		
AB	109.59	4	7.63	6.00*		2.37
AC	58.10	4	27.40	21.55*		
AD	56.56	4	14.53	11.42*		
BC	10.30	4	14.14	11.12*		
BD	17.06	4	2.57	2.02		
CD	4.88	4	4.27	3.36*		

ตารางที่ 24 (ต่อ)

แหล่งของ ความผันแปร	ผลรวม กำลังสอง	ชั้นของ ความอิสระ	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง	F	Fวิกฤต ( $\alpha=0.05$ )
Error	164.01	129	1.22	0.96	
Total	762.13	161			

$$F_{0.05,2,129} = 3.00$$

$$F_{0.05,4,129} = 2.37$$

\*มีนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$

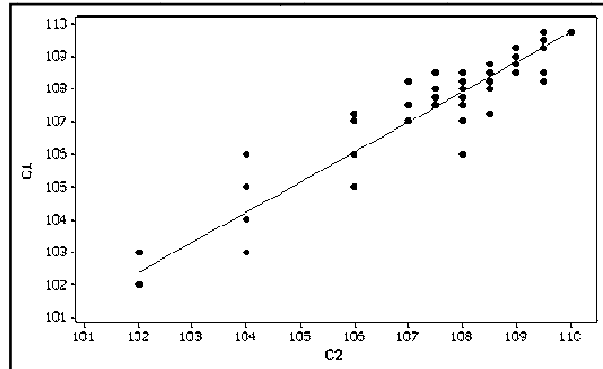
ข. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปดังภาพที่ 39 ถึง 41 ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ  $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยต้องมีคุณสมบัติ 3 ข้อ

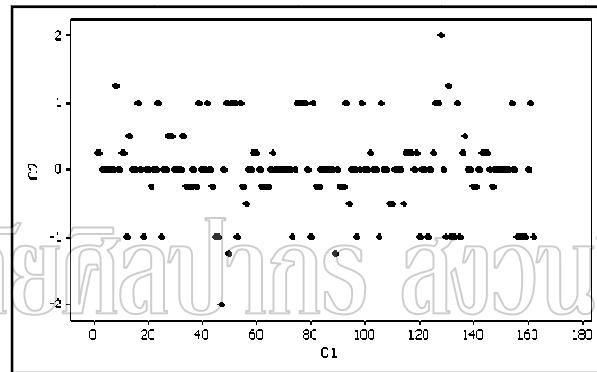
จากภาพที่ 39 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

จากภาพที่ 40 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างอิสระ สม่่าเสมอ ซึ่งได้ว่าลักษณะของข้อมูลมีความอิสระ

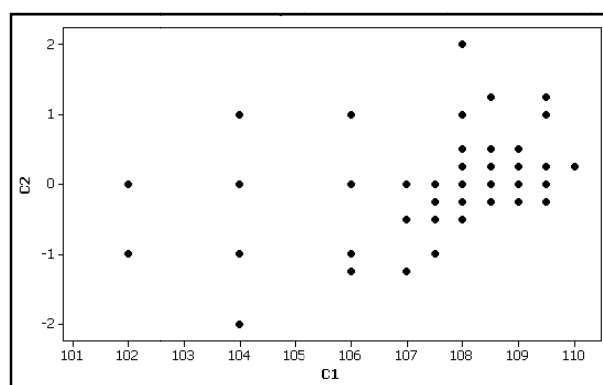
จากภาพที่ 41 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 39 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม

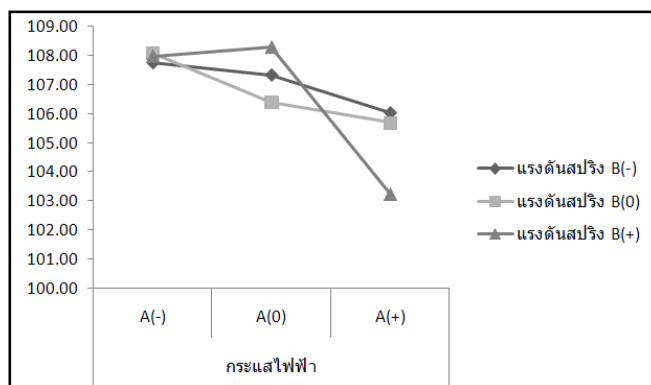


ภาพที่ 40 ค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม



ภาพที่ 41 ค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบรอยเชื่อม

ค. การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม  
ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองในปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบ  
การยึดตัวของรอยเชื่อม



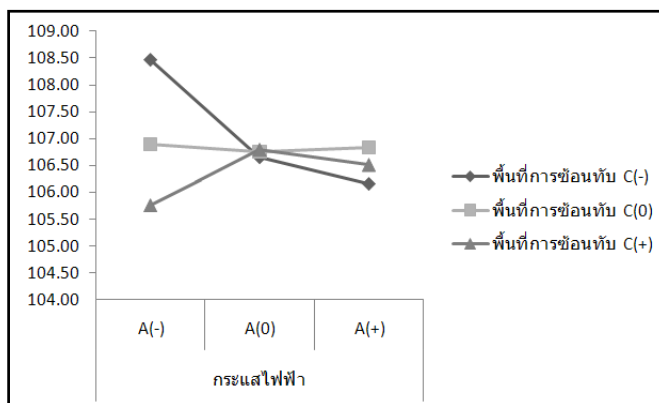
ภาพที่ 42 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้า  
กับแรงดันสปริง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สาขาวิศวกรรมศาสตร์  
ตารางที่ 25 ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

		แรงดันสปริง		
		B(-)	B(0)	B(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	107.75	108.08	107.97
	A(0)	107.33	106.39	108.28
	A(+)	106.03	105.69	103.22

จากภาพที่ 42 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง โดย  
ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อระดับของแรงดันสปริงเปลี่ยนไป และ  
เมื่อแรงดันสปริงสูงขึ้นก็มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม



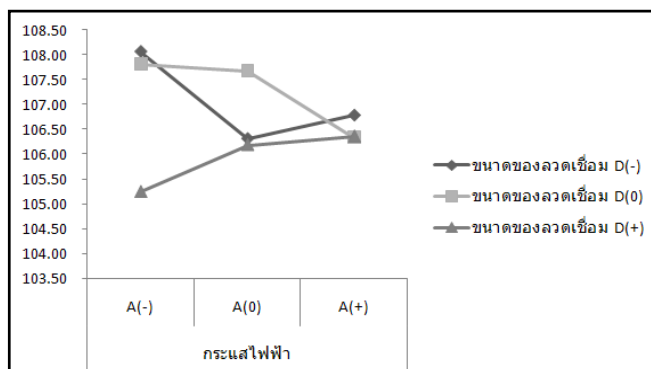


ภาพที่ 43 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ

		พื้นที่การซ้อนทับ		
		C(-)	C(0)	C(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	108.47	106.89	105.75
	A(0)	106.64	106.75	106.78
	A(+)	106.14	106.83	106.50

จากภาพที่ 43 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ โดยพื้นที่การซ้อนทับจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งจะส่งผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม

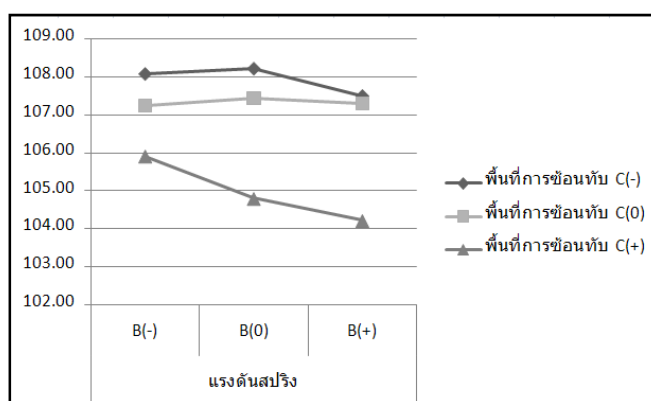


ภาพที่ 44 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับขนาด ลวดเชื่อม

		พื้นที่การซ้อนทับ		
		D(-)	D(0)	D(+)
กระแสไฟฟ้า	A(-)	108.06	107.81	105.25
	A(0)	106.31	107.67	106.19
	A(+)	106.78	106.33	106.36

จากภาพที่ 44 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม โดยพื้นที่การซ้อนทับจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งจะส่งผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม

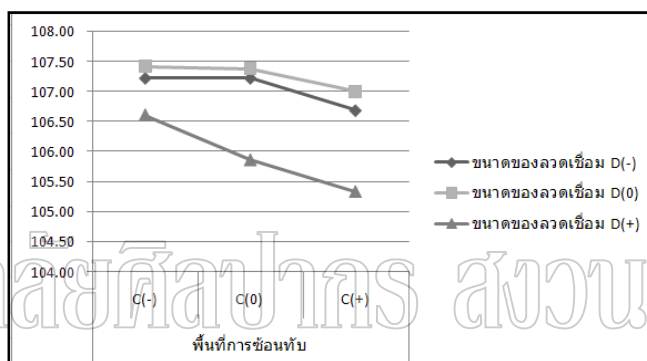


ภาพที่ 45 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ

ตารางที่ 28 ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ

		พื้นที่การซ้อนทับ		
		C(-)	C(0)	C(+)
แรงดันสปริง	B(-)	108.08	107.25	105.91
	B(0)	108.22	107.44	104.80
	B(+)	107.50	107.31	104.22

จากภาพที่ 45 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับพื้นที่การซ้อนทับ แรงดันสปริงจะมีผลต่อความไวมากกว่าพื้นที่การซ้อนทับ

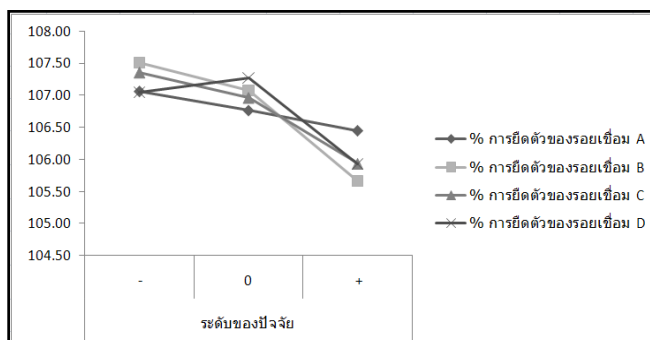


ภาพที่ 46 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมระหว่างพื้นที่การซ้อนทับกับขนาดของลวดเชื่อม

		ขนาดของลวดเชื่อม		
		D(-)	D(0)	D(+)
แรงดันสปริง	C(-)	107.22	107.42	106.61
	C(0)	107.22	107.37	105.86
	C(+)	106.69	107	105.33

จากภาพที่ 46 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม แรงดันสปริงและขนาดของลวดเชื่อมมีผลความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้น



ภาพที่ 47 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม

ระดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C	ปัจจัย D
1(-)	107.05	107.51	107.35	107.05
2(0)	106.76	107.08	106.96	107.27
3(+)	106.44	105.66	105.94	105.93

ภาพที่ 47 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม พบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 4 คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันสปริง พื้นที่การซ้อนทับและขนาดของลวดเชื่อม มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยที่

- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 45 แอมป์ ที่ดีที่สุด ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- แรงดันสปริง พบว่าระดับของแรงดันสปริงที่ผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีอยู่

ที่ 50 daN

- พื้นที่การซ้อนทับ 0.5 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่การซ้อนทับที่ดี โดยหากพื้นที่การซ้อนทับมากความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็จะสูงขึ้นตาม

- ขนาดของลวดเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมหากขนาดของลวดเชื่อมสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าขนาดของลวดเชื่อมที่ดีอยู่ที่ 2.08 มิลลิเมตร

จากกราฟตัวแปรตอบสนองที่ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 47 สามารถเสนอแนะสถานะที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ให้ผลความแข็งแรงของรอยเชื่อมอยู่ในระดับที่ดี คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 45 แอมป์ แรงดันสปริง 50 daN พื้นที่การซ้อนทับ 0.5 มิลลิเมตร และขนาดของลวดเชื่อม 2.08 มิลลิเมตร

## 2. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

เนื่องจากการทดลองมีการทดสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อมในหลายๆด้านหรือมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว ฉะนั้นเพื่อให้ได้ลักษณะคุณภาพ (Quality Characteristic) ของรอยเชื่อมที่ดี จึงต้องพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับของแต่ละปัจจัยของการทดลองจากการประเมินผลของตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ที่ศึกษาและพิจารณาคะแนนรวมทุกตัวแปรตอบสนองเพื่อการตัดสินใจ การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนองในตารางที่ 31

ตารางที่ 31 การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง

การทดสอบที่ 1	การทดสอบที่ 2	การทดสอบที่ 3	การทดสอบที่ 4	ระดับคะแนน
91 – 100 %	91 – 100 %	มากกว่า 0.5	มากกว่า 110	10
81– 90 %	81– 90 %	0.48 – 0.49	108 - 109	9
71 – 80 %	71 – 80 %	0.46 – 0.47	106 - 107	8
61 – 70 %	61 – 70 %	0.44 – 0.45	104 - 105	7
51 – 60 %	51 – 60 %	0.42 – 0.43	102 – 103	6
41 – 50 %	41 – 50 %	0.40 – 0.41	100 – 101	5
31 – 40 %	31 – 40 %	0.38 – 0.39	98 - 99	4
21 – 30 %	21 – 30 %	0.36 – 0.37	96 - 97	3
11 – 20 %	11 – 20 %	0.34 – 0.35	94 - 95	2
1 – 10 %	1 – 10 %	น้อยกว่า 0.33	น้อยกว่า 92	1

\*การทดสอบที่ 1 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

\*การทดสอบที่ 2 การทดสอบความประสานของรอยเชื่อม

\*การทดสอบที่ 3 การทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม

\*การทดสอบที่ 4 การทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม

ประเมินผลคะแนนรวมจากผลของการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบ (ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก) โดยได้ทำการเลือกสภาวะของปัจจัยในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร ที่ให้ผลการทดสอบที่ผ่านเกณฑ์ที่ต่ำที่สุดของข้อกำหนดในการใช้งานในทุกผลการทดสอบ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาด้านใดด้านหนึ่งซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานได้ แล้วนำมาประเมินระดับคะแนนเพื่อเปรียบเทียบผล แสดงการประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ได้ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 การประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

ลำดับ ที่	สภาวะปัจจัย				คะแนน 1	คะแนน 2	คะแนน 3	คะแนน 4	คะแนน รวม
	A	B	C	D	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	
1	-	0	-	+	3	9	4	8	6
2	-	0	+	0	3	8	6	5	5.5
3	-	+	-	-	4	6	4	5	4.75
4	-	+	-	0	4	7	5	4	5
5	-	+	-	+	4	6	6	9	6.25
6	-	+	0	+	4	7	8	8	6.75
7	-	+	+	+	3	5	5	7	5
8	0	-	0	0	6	5	8	5	6
9	0	0	-	0	5	6	4	6	5.25
10	0	0	+	0	6	5	6	5	5.5
11	0	0	+	+	5	6	6	8	6.25
12	0	+	-	0	6	8	5	7	6.5
13	0	+	+	+	6	7	5	8	6.5
14	+	-	-	0	7	4	4	7	5.5
15	+	-	-	+	7	5	4	8	6
16	+	-	0	-	8	4	7	6	6.25
17	+	-	0	0	8	5	9	6	7
18	+	-	0	+	8	6	8	8	7.5
19	+	-	+	-	9	5	7	5	6.5
20	+	-	+	0	8	5	6	7	6.5
21	+	0	-	-	7	9	5	5	6.5
22	+	0	-	0	8	8	4	7	6.75
23	+	0	-	+	9	8	6	8	7.75
24	+	0	0	-	8	9	8	6	7.75
25	+	0	0	0	8	8	9	7	8
26	+	0	0	+	10	9	10	9	9.5

ตารางที่ 32 (ต่อ)

ลำดับที่	สภาวะปัจจัย				คะแนน 1	คะแนน 2	คะแนน 3	คะแนน 4	คะแนนรวม
	A	B	C	D	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	ความสำคัญ 0.25	
27	+	0	+	-	8	8	7	5	7
28	+	0	+	+	9	9	6	8	8
29	+	+	-	-	9	5	6	6	6.5
30	+	+	-	0	8	6	5	7	6.5
31	+	+	-	+	9	7	6	9	7.75
32	+	+	0	-	8	6	8	6	7
33	+	+	0	0	8	5	9	7	7.25
34	+	+	0	+	9	6	6	9	7.5
35	+	+	+	-	8	5	5	5	5.75

\*การให้ความสำคัญ 0.25 มีสาเหตุมาจากผลของตัวแปรตอบสนองมีความสัมพันธ์กันกล่าวคือหากพบปัญหาที่ตัวแปรตอบสนองตัวใดตัวหนึ่งก็ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอีกทั้ง 3 ตัวทำให้การให้ความสำคัญมีระดับเท่ากัน

จากตารางที่ 32 การประเมินผลคะแนนรวม โดยใช้เกณฑ์คะแนนรวมสูงสุดจากผลการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบคือ การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม การทดสอบความประสานของรอยเชื่อม การทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม และการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อม ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารตามสภาวะ ในลำดับที่ 26 คือ

1. ปัจจัย A (+) กระแสไฟฟ้า 55 แอมป์
2. ปัจจัย B (0) แรงดันสปริง 60 daN
3. ปัจจัย C (0) พื้นที่การซ้อนทับ 0.7 มิลลิเมตร
4. ปัจจัย D (+) ขนาดของลวดเชื่อม 2.10 มิลลิเมตร

โดยมีผลการทดสอบดังนี้

ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ได้ 10 คะแนน

ผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมได้ 9 คะแนน

ผลการทดสอบพื้นที่การซ้อนทับได้ 10 คะแนน

ผลการทดสอบยึดตัวของรอยเชื่อมได้ 9 คะแนน

ตารางที่ 33 การประเมินผลเปรียบเทียบกับสภาวะการเชื่อมกระป๋องในปัจจุบัน

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม	สภาวะปัจจุบัน
กระแสไฟฟ้า	55	55
แรงดันสปริง	60	58
พื้นที่การซ้อนทับ	0.7	0.8
ขนาดของลวดเชื่อม	2.10	2.08

จะเห็นได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมหรือเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ได้จากการทดลอง ใช้แรงดันสปริงเพิ่มขึ้นจากเดิม 58 daN เป็น 60 daN พื้นที่การซ้อนทับลดลงจากเดิม 0.8 มิลลิเมตรเป็น 0.7 มิลลิเมตร และ ขนาดของลวดเชื่อมเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.08 มิลลิเมตร เป็น 2.10 มิลลิเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ายังคงเดิมคือ 55 แอมป์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบของสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองกับข้อมูลผลการทดสอบในอดีตของสภาวะปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 34

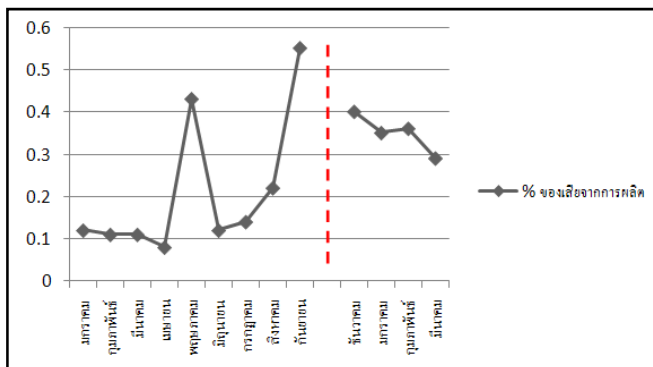
ตารางที่ 34 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

การทดสอบ	ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ	
	สภาวะที่เหมาะสม	สภาวะในปัจจุบัน
ความแข็งแรงของรอยเชื่อม	98%	97%
ความประสานของรอยเชื่อม	90%	89%
ความกว้างของรอยเชื่อม	0.5 mm.	0.48 mm.
การยึดตัวของรอยเชื่อม	110 Mpa	106 Mpa

จากการเปรียบเทียบจะพบว่าสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติของรอยเชื่อมดีกว่าเดิม โดยความแข็งแรงของรอยเชื่อมดีขึ้น คือ 97 เปอร์เซ็นต์ เป็น 98 เปอร์เซ็นต์ ความประสานของรอยเชื่อมดีกว่าเดิมจากเดิม 89 เปอร์เซ็นต์ เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.48 มิลลิเมตร เป็น 0.5 มิลลิเมตร และการยึดตัวของรอยเชื่อมสามารถทนได้เพิ่มขึ้นจาก 110 เมกะพาสคัล เป็น 106 เมกะพาสคัล

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่ได้จากการทดลองทำให้ได้การเชื่อมที่มีคุณสมบัติดีกว่าสภาวะการเชื่อมในปัจจุบัน ในด้านความแข็งแรงของรอยเชื่อม ความประสานของรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อมและการยึดตัวของรอยเชื่อม





ภาพที่ 48 เปอร์เซ็นต์ของเสียจากการผลิตหลังการนำค่าที่ได้จากการศึกษาไปควบคุมใช้งาน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

**บทที่ 5**  
**สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ**

**1. ข้อสรุปปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร**

จากการออกแบบการทดลองด้วยการพิจารณาปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยและไปดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ผลการทดสอบ สามารถสรุปตามการวิเคราะห์ความแปรปรวน ( $\alpha = 0.05$ ) ได้ว่า

**1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rib Test)**

- กระแสไฟฟ้า
- แรงดันสปริง
- พื้นที่ของการซ้อนทับ
- ขนาดของลวดเชื่อม

- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม
- ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม

**1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความประสานของรอยเชื่อม (Ball Test)**

- กระแสไฟฟ้า
- แรงดันสปริง
- พื้นที่ของการซ้อนทับ
- ขนาดของลวดเชื่อม

- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม
- ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับขนาดของลวดเชื่อม

**1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)**

- แรงดันสปริง
- ขนาดของลวดเชื่อม
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง

#### 1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการยึดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

- กระแสไฟฟ้า
- แรงดันสปริง
- พื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันสปริง
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของกระแสไฟฟ้ากับขนาดของลวดเชื่อม
- ปัจจัยร่วมของแรงดันสปริงกับพื้นที่ของการซ้อนทับ
- ปัจจัยร่วมของพื้นที่ของการซ้อนทับกับขนาดของลวดเชื่อม

### 2. อิทธิพลของปัจจัยและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร

#### 2.1 กระแสไฟฟ้า

จากกราฟและการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยกระแสไฟฟ้าจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมในด้านต่างๆ โดยที่

##### 2.1.1 กระแสไฟฟ้า 45 แอมป์

- มีผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมดีที่สุด

##### 2.1.2 กระแสไฟฟ้า 55 แอมป์

- มีผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมดีที่สุด

#### 2.2 แรงดันสปริง

ปัจจัยแรงดันสปริงก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร โดยที่

##### 2.2.1 แรงดันสปริง 50 daN

- มีผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมดีที่สุด

##### 2.2.2 แรงดันสปริง 60 daN

- มีผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อมดีที่สุด

### 2.3 พื้นที่การซ้อนทับ

เป็นปัจจัยที่ส่งผลในผลการทดสอบที่มีผลน้อยที่สุดต่อการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร โดยที่

#### 2.3.1 พื้นที่การซ้อนทับ 0.5 มิลลิเมตร

- มีผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมดีที่สุด

#### 2.3.2 พื้นที่การซ้อนทับ 0.9 มิลลิเมตร

- มีผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบความกว้างรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมดีที่สุด

### 2.4 ขนาดของลวดเชื่อม

เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อในปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม โดยที่

- มีผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบความประสานของรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบความกว้างรอยเชื่อมดีที่สุด
- มีผลการทดสอบการยึดตัวของรอยเชื่อมดีที่สุด

## 3. ข้อเสนอแนะ

3.1 ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่การซ้อนทับ จากการผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าปัจจัยกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดอยู่ที่ระดับสูงคือ 55 A. และพื้นที่การซ้อนทับก็อยู่ที่ระดับสูงคือ 0.9 mm. ฉะนั้นควรจะมีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระแสไฟฟ้าและพื้นที่การซ้อนทับเพิ่มเติม โดยมีการกำหนดช่วงที่ใช้ในการทดลองให้มากกว่านี้

3.2 ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหาร และเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองที่ทำให้การเชื่อมที่ได้มีคุณภาพที่ดี โดยในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขไม่ได้พิจารณาเปรียบเทียบถึงค่าใช้จ่ายในแต่ละเงื่อนไขว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ฉะนั้นในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรม จึงควรทำการวิเคราะห์ในส่วนค่าใช้จ่ายต้นทุนมาประกอบเพื่อการตัดสินใจในการกำหนดสภาวะและการเลือกใช้ในการผลิต

3.3 ทำการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า การออกแบบมั่นคง (Robust Design) เพื่อให้ได้กระบวนการเชื่อมกระป๋องบรรจุอาหารที่มีอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) น้อยที่สุด

3.4 ควรมีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติม โดยทำการเพิ่มระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองให้มากขึ้น และทำการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสม (Optimization)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

### บรรณานุกรม

- ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- กัลยา วานิชย์ปัญญา. การวิเคราะห์สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- ทศพล เกียรติเจริญผล. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบแคเทอร์บนแผ่นเหล็กโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- ปณัยกรณ์ อังกรากินันท์. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทนแรงดึงในแนวตะเข็บกระบวนการผลิตถลุงพลาสติกหีวรูปถ้วย. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.
- สุทธิวัฒน์ มหัทธมปกรณ์. การศึกษาปัจจัยของกรรมวิธีการเชื่อมระบบ TIG สำหรับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด SUS436L. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- สถาพร พิมสาร. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบผงโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋อง. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.
- เปมิกา สุวรรณมณี. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเฟอร์นิเจอร์ไม้โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- อุทุมพร พงษ์อุดม. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อลูมิเนียมจากกระบวนการรีดขึ้นรูปกรณีศึกษาโรงงานผลิตหม้อน้ำรถยนต์. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.
- เสาวภา แซ่ซัน. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพิมพ์ออฟเซตบนกล่องบรรจุภัณฑ์โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษ. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- เขาวภา เลหาทวีโชค. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบอลูมิเนียม. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.
- ธานี ศรีวงศ์ชัย. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในเพาะเลี้ยงอับละอองเกสรข้าวบาร์เลย์เพื่อนำไปใช้ในลูกผสมช่วงที่หนึ่ง. นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540.

ดวงกมล เรืองธระกิจ. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้าโดย  
วิธีการออกแบบการทดลอง. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ, 2544.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Rip Weld Test)

C		-						0						+					
D		-		0		+		-		0		+		-		0		+	
A	B	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
		1	2	1	2	1	2	1	2	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
-	-	9	8	8	7	3	3	7	8	7	7	3	3	7	7	8	7	1	2
	0	8	6	6	5	2	3	7	5	6	5	3	3	7	4	5	5	2	3
	+	7	8	8	8	7	8	3	3	3	3	2	2	1	2	3	3	2	2
0	-	5	6	5	5	6	6	4	5	6	6	6	4	5	6	5	6	5	6
	0	3	3	5	6	3	2	3	3	5	5	3	2	3	3	5	6	2	3
	+	2	3	2	5	3	3	3	2	3	6	2	2	3	2	3	5	3	2
+	-	4	5	4	6	4	4	6	6	6	5	6	4	5	5	4	5	4	5
	0	4	5	5	5	6	5	6	5	6	6	5	6	6	6	6	6	5	5
	+	1	2	1	1	2	1	3	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบการประสานรอยเชื่อม (Ball Weld Test)

C		-						0						+					
D		-		0		+		-		0		+		-		0		+	
A	B	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
		-	-	9	8	8	8	3	3	8	8	7	7	3	3	7	7	8	7
	0	8	7	6	5	2	3	7	5	5	5	3	3	7	6	5	5	2	3
	+	7	8	8	8	7	7	3	3	3	3	2	1	1	2	3	3	3	2
0	-	5	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	4	5	6	5	7	5	6
	0	3	3	5	6	3	3	3	3	5	5	3	2	3	3	5	6	2	4
	+	2	3	2	5	3	3	3	2	3	6	3	2	3	2	3	5	3	3
+	-	4	5	4	6	4	4	6	6	6	5	6	5	5	5	4	5	4	5
	0	4	6	5	5	6	5	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6
	+	1	2	1	1	2	1	3	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม (Post Weld Test)

C		-						0						+					
D		-		0		+		-		0		+		-		0		+	
A	B	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
		1	2	1	2	1	2	1	2	ที่ 1	ที่ 2	1	2	1	2	ที่ 1	ที่ 2	ที่ 1	ที่ 2
-	-	0.77	0.76	0.77	0.78	0.79	0.79	0.88	0.89	0.90	0.90	0.92	0.94	0.99	0.96	0.98	1.00	1.02	1.06
	0	0.79	0.80	0.80	0.79	0.78	0.81	0.99	0.96	0.96	0.96	0.98	0.99	1.02	1.00	1.02	1.00	0.99	0.97
	+	0.82	0.80	0.80	0.79	0.78	0.78	1.01	1.02	0.99	0.98	0.99	1.00	1.03	1.06	1.07	1.07	1.08	1.03
0	-	0.80	0.81	0.79	0.78	0.80	0.79	1.02	1.04	1.10	1.08	1.06	1.04	1.04	1.04	1.06	1.03	1.07	1.06
	0	0.78	0.79	0.79	0.80	0.82	0.78	0.98	0.99	0.96	0.97	0.98	1.00	1.00	1.02	1.00	0.99	1.02	1.02
	+	0.77	0.76	0.78	0.79	0.80	0.79	0.85	0.89	0.86	0.90	0.90	0.92	1.02	1.00	0.99	0.98	1.00	1.01
+	-	0.77	0.77	0.76	0.77	0.74	0.76	0.86	0.88	0.88	0.89	0.90	0.91	1.00	0.99	0.98	0.99	1.00	1.02
	0	0.79	0.78	0.76	0.77	0.79	0.77	0.99	0.98	0.97	0.98	0.99	0.96	1.01	1.02	1.01	1.04	1.02	1.01
	+	0.80	0.79	0.80	0.81	0.79	0.78	0.99	1.01	1.02	1.01	1.06	1.02	1.00	1.04	1.04	1.06	1.03	1.02

ตารางที่ 38 การยืดตัวของรอยเชื่อม (Stretch Weld Test)

C		-						0						+					
D		-		0		+		-		0		+		-		0		+	
A	B	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
-	-	110	109.5	109.5	109	107	107	109.5	109.5	109	109	106	106	109	109	109.5	107	102	102
	0	109	108.5	108.5	108	104	106	109	108	108	108	106	106	109.5	107.5	108	108	104	106
	+	109.5	109.5	109.5	109.5	109	109.5	106	106	106	106	104	102	102	104	104	104	104	104
0	-	108	107	108	107	108.5	108.5	108	108	108.5	108.5	108.5	107.5	108	108.5	108	108.5	108	108
	0	106	106	108	108.5	106	104	106	106	108	108	106	104	106	106	108	108.5	104	106
	+	104	106	104	108	106	106	106	104	106	108.5	106	104	106	104	106	108	106	104
+	-	107.5	108	107.5	108.5	107.5	107.5	108.5	108.5	108.5	108	108.5	108	108	108	108	107.5	108	107.5
	0	107.5	108	108	108	108.5	108	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108	108
	+	102	104	102	102	104	102	106	104	104	102	104	102	104	104	102	104	104	102

ตารางที่ 39 ผลค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
1	121	3	0	5	0	0.985	0.005	106	0
2	4	7.5	0.5	8	0	0.885	-0.005	109.5	0
3	56	5	1	5	-1	0.765	-0.005	108	-0.5
4	3	3	0	3	0	0.79	0	107	0
5	129	3	0	3	0	0.795	-0.005	106	0
6	32	6	0	6	0	1.09	0.01	108.5	0
7	2	7.5	-0.5	8	0	0.775	-0.005	109.25	0.25
8	135	2.5	-0.5	3	0	1	0	105	-1
9	103	3	0	3	0	1.015	0.005	106	0
10	131	4.5	1.5	4.5	1.5	0.88	0.02	107.25	1.25
11	80	1.5	-0.5	1.5	-0.5	1.05	-0.01	103	-1
12	47	3.5	-1.5	3.5	-1.5	0.785	-0.005	106	-2
13	33	5	1	5	1	1.05	0.01	108	0.5
14	48	3	0	3	0	0.795	0.005	106	0
15	82	8.5	-0.5	8.5	-0.5	0.765	-0.005	109.75	-0.25

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
16	79	2	0	2	0	1.02	-0.02	104	0
17	64	4.5	-0.5	5	-1	0.785	0.005	107.75	-0.25
18	18	2.5	-0.5	2.5	-0.5	0.98	0.01	105	-1
19	75	2.5	0.5	1.5	0.5	0.785	0.005	103	1
20	31	4.5	-0.5	5	0	1.03	-0.01	108	0
21	100	7.5	0.5	7.5	0.5	0.81	-0.01	109.5	0
22	14	5.5	0.5	5	0	0.96	0	108	0
23	24	2	0	1.5	0.5	0.995	-0.005	103	1
24	67	5.5	0.5	5.5	0.5	0.985	0.005	108.5	0
25	54	2.5	0.5	3	0	1	0	105	1
26	137	5	1	5	1	0.765	0.005	108	0.5
27	60	5	1	5.5	0.5	0.905	-0.005	108.25	0.25
28	88	7	0	7	0	0.975	-0.015	109	0
29	140	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.885	0.005	108.25	-0.25
30	15	3	0	3	0	0.99	-0.05	106	0



ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
31	66	5.5	0.5	5.5	0.5	0.78	0.01	108.25	0.25
32	53	4	-1	4	-1	0.985	0.005	107	-1
33	71	6	0	6	0	1.025	-0.015	108.5	0
34	116	4.5	0.5	6	1	1.045	-0.015	108.25	0.25
35	154	1.5	0.5	1.5	0.5	0.795	-0.005	103	1
36	72	5	0	5.5	-0.5	1.015	0.005	108	0
37	51	2	0	2.5	0.5	0.91	-0.01	105	1
38	44	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.995	0.005	108.25	-0.25
39	50	4.5	-1.5	4.5	-1.5	0.88	-0.02	107.25	-1.25
40	70	6	0	6	0	1.015	-0.005	108.5	0
41	110	5	0.5	5.5	0.5	0.785	-0.005	107.5	-0.5
42	105	2	0	1.5	-0.5	0.995	0.005	103	-1
43	117	5.5	0.5	5.5	0.5	1.065	-0.005	108.25	0.25
44	119	5.5	0.5	5.5	0.5	0.795	0.005	108.25	0.25
45	123	2.5	-0.5	2.5	-0.5	0.99	0.01	105	-1

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
46	7	7	0	7	0	0.975	0.015	109	0
47	149	6	0	6	0	0.975	0.005	108.5	0
48	113	6	0	6	0	1.09	-0.01	108.5	0
49	95	5.5	-0.5	5	0	0.96	0	108	0
50	30	6	0	6	0	0.795	0.005	108.5	0
51	138	4	0	5.7	0	0.75	0.01	107.5	0
52	89	7.5	7.5	7.5	7.5	0.99	0.01	108.25	-1.25
53	111	6	0	6	0	0.795	-0.005	108.5	0
54	86	7	0	7	0	0.9	0	109	0
55	143	4.5	0.5	4.5	0.5	0.985	0.005	107.75	0.25
56	152	6	0	6	0	1.025	0.015	108.5	0
57	39	2.5	0.5	3	0	0.8	0.02	105	1
58	78	1.5	0.5	1.5	0.5	1.04	0.02	103	1
59	118	3	0.5	3.5	0.5	0.785	0.005	106	0
60	1	8.5	0.5	8.5	0.5	0.765	0.005	109.75	0.25

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
61	115	5.5	0.5	5.5	0.5	1.04	0	108.25	0.25
62	19	7.5	-0.5	7.5	-0.5	0.81	0.01	109.5	0
63	161	1.5	0.5	1.5	0.5	1.05	0.01	103	1
64	55	4.5	-0.5	4.5	-0.5	0.77	0	107.75	-0.25
65	34	5.5	-0.5	5.5	-0.5	1.04	0	108.25	-0.25
66	22	3	0	3	0	1.015	-0.005	106	0
67	104	3	0	3	0	0.985	-0.005	106	0
68	87	3	0	3	0	0.93	0.01	106	0
69	85	7.5	0.5	8	0	0.885	0.005	109.5	0
70	139	6	0	6	0	0.87	0.01	108.5	0
71	40	3	-0.5	3.5	-0.5	0.985	-0.005	106	0
72	29	5	-0.5	5.5	-0.5	0.785	0.005	107.5	0.5
73	153	5	0	5.5	0.5	1.015	-0.005	108	0
74	73	1.5	-0.5	1.5	-0.5	0.795	0.005	103	-1
75	45	2.5	-0.5	3	-1	1.02	0	105	-1

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
76	133	2.5	0.5	2.5	-0.5	1.01	-0.01	105	-1
77	9	1.5	-0.5	1.5	-0.5	1.04	-0.02	102	0
78	17	5	0	5	0	1.01	0.01	108	0
79	76	2.5	0.5	2.5	0.5	1	-0.01	105	1
80	132	2	0	2.5	-0.5	0.91	0.01	105	-1
81	25	1.5	-0.5	1.5	-0.5	1.045	-0.015	103	-1
82	65	5	0	6	0	0.765	-0.005	108	0
83	83	7.5	-0.5	8	0	0.775	0.005	109.25	-0.25
84	11	5.5	0.5	5.5	0.5	0.785	0.005	108.25	0.25
85	126	2.5	0.5	3	1	1.02	0	105	1
86	106	1.5	0.5	1.5	0.5	1.045	0.015	103	1
87	59	5.5	0.5	5.5	0.5	0.885	-0.005	108.25	0.25
88	20	8	0	8	0	0.795	0.005	109.5	0
89	27	2	0	2.5	0.5	1.055	0.025	104	0
90	57	4	0	4	0	0.75	-0.01	107.5	0

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
91	81	7	0.5	2	0	1.025	0.005	103	1
92	77	1.5	0.5	1.5	0.5	1.015	0.005	103	1
93	146	5	0	5	0	0.765	0.005	108	0
94	114	5	-1	5	-1	1.05	-0.01	108	-0.5
95	112	4.5	0.5	5	0	1.03	0.01	108	0
96	127	2.5	0.5	2.5	0.5	0.765	-0.005	105	1
97	125	5.5	0.5	5.5	0.5	0.995	-0.005	108.25	0.25
98	23	3	0	3	0	0.985	0.005	106	0
99	8	7.5	0.5	7.5	0.5	0.99	-0.01	108.25	1.25
100	68	6	0	6	0	0.975	-0.005	108.5	0
101	58	6	0	6	0	0.87	-0.01	108.5	0
102	98	5	0	5	0	1.01	-0.01	108	0
103	145	4.5	0.5	5	1	0.785	-0.005	107.75	0.25
104	120	2.5	-0.5	3	0	0.8	-0.02	106	0
105	128	3.5	1.5	3.5	1.5	0.785	0.005	103	-1

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
106	37	3	0.5	3.5	-0.5	0.785	-0.005	106	0
107	162	1.5	-0.5	2	0	1.025	-0.005	103	-1
108	101	8	0	8	0	0.795	-0.005	109.5	0
109	151	6	0	6	0	1.015	0.005	108.5	0
110	157	2.5	-0.5	2.5	-0.5	1	0.01	105	-1
111	52	2.5	0.5	2.5	0.5	1.01	0.01	105	1
112	5	7	0	7	0	0.9	0	109	0
113	38	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.795	-0.005	108.25	-0.25
114	6	3	0	3	0	0.93	-0.01	106	0
115	147	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.78	-0.01	108.25	-0.25
116	96	3	0	3	0	0.985	0.005	106	0
117	16	5.5	1.5	6.5	0.5	1.01	0.01	108.5	1
118	92	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.785	-0.005	108.25	-0.25
119	155	1	0	1	0	0.805	0.005	102	0
120	61	5	-0.5	5	0	0.995	0.005	108	0

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
121	94	6	-1	6	-1	0.975	-0.015	108.5	-0.5
122	99	2.5	0.5	2.5	0.5	0.98	-0.01	105	1
123	12	2.5	-0.5	2.5	-0.5	0.795	-0.015	105	-1
124	160	2	0	2	0	1.02	0.02	104	0
125	10	7	1	7.5	0.5	0.795	-0.005	108.75	0.25
126	90	6.5	0.5	1.5	0.5	1.04	0.02	102	0
127	49	2.5	0.5	2.5	0.5	0.87	-0.02	105	1
128	107	3	0	3	0	1.07	0	104	0
129	122	5	0	5	0	0.965	0.005	108	0
130	130	2.5	-0.5	2.5	-0.5	0.87	0.02	105	-1
131	102	7.5	0.5	7	0	0.78	0	109.25	0.25
132	74	1	0	1	0	0.805	-0.005	102	0
133	84	3	0	3	0	0.79	0	107	0
134	46	2.5	-0.5	2.5	-0.5	0.765	0.005	105	-1
135	159	1.5	-0.5	1.5	-0.5	1.04	-0.02	103	-1

ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
136	148	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.985	--0.005	108.5	0
137	69	5.5	-0.5	6	0	0.975	0.015	108.5	0
138	91	7	-1	7.5	-0.5	0.795	0.005	108.75	-0.25
139	97	5.5	-1.5	6.5	-0.5	1.01	-0.01	108.5	-1
140	108	2	0	2.5	-0.5	1.055	-0.025	104	0
141	26	7.5	0.5	8	0	0.775	-0.005	104	0
142	142	5	0	5	0	0.995	-0.005	108	0
143	43	3	-0.5	3.5	-0.5	1.01	-0.01	106	0
144	141	5	-1	5.5	-0.5	0.905	0.005	108.25	-0.25
145	124	3	0.5	3.5	0.5	1.01	0.01	106	0
146	42	2.5	0.5	2.5	0.5	0.99	-0.01	105	1
147	63	4.5	-0.5	4.5	-0.5	1.01	-0.01	107.75	-0.25
148	35	4.5	-0.5	6	-1	1.045	0.015	108.25	-0.25
149	21	7.5	-0.5	7	0	0.78	0	109.25	-0.25
150	36	5.5	-0.5	5.5	-0.5	1.065	0.005	108.25	-0.25



ตารางที่ 39 (ต่อ)

ลำดับ	หมายเลข	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม		การประสานรอยเชื่อม		ความกว้างของรอยเชื่อม		การยึดตัวของรอยเชื่อม	
		Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual	Predicted	Residual
151	158	1.5	0	1.5	-0.5	1.015	-0.005	103	-1
152	28	5.5	-0.5	5.5	-0.5	0.805	-0.005	107.5	0.5
153	41	5	0	5	0	0.965	-0.005	108	0
154	136	4.5	0.5	4.5	0.5	0.77	0	107.75	0.25
155	150	5.5	0.5	6	0	0.975	-0.015	108.5	0
156	93	2.5	0.5	2.5	0.5	0.795	0.0015	105	1
157	144	4.5	0.5	4.5	0.5	1.01	0.01	107.75	0.25
158	156	2.5	-0.5	1.5	-0.5	0.785	-0.005	103	-1
159	62	4.5	-0.5	4.5	-0.5	0.985	-0.005	107.75	-0.25
160	13	6	1	6	1	0.975	0.015	108.5	0.5
161	134	4	1	4	1	0.985	-0.005	107	1
162	109	5.5	0.5	5.5	0.5	0.805	0.005	107.5	-0.5

ภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

## 1. ประเภทและคุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำกระป๋อง

### 1.1 วัสดุที่ใช้ทำกระป๋องโลหะ

โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำกระป๋องโลหะ อาจแบ่งได้เป็น 6 ชนิดหลักๆ ดังนี้

1.1.1 แผ่นเหล็กดำ (Black plate) : เป็นแผ่นเหล็กดำที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ผ่านการรีดเย็นเป็นแผ่นบางๆ (Cold – reduced Steel Plate) ใช้ทำกระป๋องสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีโซ่อาหารและไม่มีคุณสมบัติการกัดกร่อน

1.1.2 แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (Timpla) : เป็นแผ่นเหล็กดำที่มีความหนาแน่นระหว่าง 0.15-0.5 มม. นำมาเคลือบผิวหน้าเดียวหรือทั้งสองหน้าด้วยดีบุก เพื่อให้ทนทานต่อการผุกร่อนและไม่เป็นพิษ ใช้ทำกระป๋องบรรจุอาหาร และผลิตภัณฑ์อื่นๆ

1.3 แผ่นเหล็กทินฟรี (Tin Free Steel , TFS) : เป็นแผ่นเหล็กดำที่นำมาเคลือบผิวด้วยสารอื่นแทนดีบุก เพื่อลดต้นทุน ในปัจจุบันมีการเคลือบอยู่ 3 ชนิด คือ :

- เคลือบด้วยสารผสมฟอสเฟตและโครเมต เป็นฟิล์มบางๆ (Phosphate Chromate Film) ใช้ทำกระป๋องบรรจุเบียร์ น้ำผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว และทำถังโลหะชนิดต่างๆ

- เคลือบด้วยโครเมียมและโครเมียมออกไซด์ เพื่อให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี นิยมใช้ทำกระป๋องบรรจุอาหารทะเล นมข้นหวาน เป็นต้น ในการขึ้นรูปกระป๋องจะติดตะเข็บข้างโดยวิธีบัดกรีไม่ได้ แต่ต้องเป็นแบบซ้อนหรือเกี่ยว โดยวิธีเชื่อมด้วยไฟฟ้า หรือใช้วัสดุเชื่อมพวกในลอน

- เคลือบด้วยอะลูมิเนียม มีความทนทานต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากความชื้นได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับอาหารที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูง ในการขึ้นรูปกระป๋องจะติดตะเข็บข้างโดยวิธีบัดกรีไม่ได้ แต่ต้องใช้วิธีเชื่อมด้วยไฟฟ้าและใช้วัสดุเชื่อมจำพวกในลอน

1.4 แผ่นเหล็กสองซีอาร์ (2 CR Plate): เป็นแผ่นเหล็กดำที่ผ่านการรีดเย็น 2 ครั้ง จนมีความบางลดลงจากเดิมร้อยละ 25-50 แล้วนำมารีดสองครั้งเพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จะใช้ทำกระป๋องและถังที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ กรรมวิธีการขึ้นรูปจำเป็นต้องใช้เทคนิคก้าวหน้า

1.5 แผ่นเหล็กกัลวาไนซ์ (Galvanized Plate) เป็นแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยสังกะสี ไม่ใช่ทำกระป๋องบรรจุอาหาร เพราะวัสดุมีโลหะหนักจำพวกสังกะสีและตะกั่ว ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกายแต่ใช้ทำกระป๋องและถังบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีโซ่อาหารได้ดี เพราะมีราคาถูกกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

1.6 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม (Aluminum and Its Alloy) จะใช้ในลักษณะของแผ่นหรือเหรียญ (Slug) ก็ได้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต นิยมใช้ทำกระป๋อง 2 ชั้น (2

– Piece can) สำหรับบรรจุน้ำอัดลมและเบียร์ ตลอดจนกระป๋องฉีดพ่น (Aerosol) เนื่องจากมีน้ำหนักเบา นอกจากนั้นยังใช้เป็นวัสดุสำหรับทำฝาชนิดที่มีห่วงเพื่อให้เปิดง่าย (Easy Open End) อีกด้วย

1.2 มาตรฐานแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นเหล็กเคลือบคิง (Standard Of Box Steel For Timplate) แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นเหล็กเคลือบคิง แบ่งได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1.2.1 ชนิด L เป็นแผ่นเหล็กที่มีสารตกค้าง เช่น ฟอสฟอรัส ซิลิกอน ทองแดง นิกเกิล โครเมียม ในปริมาณต่ำ ถ้าคุณภาพของแผ่นเหล็กชนิดนี้ระบุว่า “LT” จะหมายความว่า เป็นแผ่นเหล็กชนิด L ที่ผ่านการตรวจสอบสมบัติด้านความทนทานต่อการผุกร่อนมาแล้ว โดยทั่วไปแผ่นเหล็กชนิด L จะใช้ทำกระป๋องสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีความกัดกร่อนสูง มีความเป็นกรดสูง หรือปานกลาง เช่น น้ำผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว เบอร์รี่ พรุณ เซอร์รี่ และผักดอง เป็นต้น

1.2.2 ชนิด MR เป็นแผ่นเหล็กที่มีฟอสฟอรัสต่ำมาก แต่ไม่จำกัดปริมาณสารตกค้าง ใช้ทำกระป๋องสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีความกัดกร่อนปานกลาง เช่น อาหารที่มีความเป็นกรดเล็กน้อยหรือต่ำ ได้แก่ พืช ถั่ว ข้าวโพด เนื้อสัตว์ ปลา เป็นต้น ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ไม่กัดกร่อน เช่น ชุปแข็ง อาหารแช่แข็ง เนย เป็นต้น

1.2.3 ชนิด MC เป็นแผ่นเหล็กที่มีฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง (ร้อยละ 0.02) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้แก่แผ่นเหล็กนั้น แม้ว่าจะใช้ทำกระป๋องสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกับชนิด MR ก็ตาม แต่ในปัจจุบันไม่นิยมเท่าใดนัก เพราะถูกทดแทนด้วยแผ่นเหล็กสองซีอาร์

1.2.4 ชนิด N เป็นแผ่นเหล็กชนิด L หรือ MC ที่ได้รับการเติมไนโตรเจนลงไป เพื่อให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น

1.3 ความแข็งของแผ่นเหล็ก (Plate Hardness) แผ่นเหล็กที่ใช้ทำกระป๋องโลหะจะแบ่งตามความแข็ง ซึ่งวัดในหน่วยของเทมเปอร์ (Temper – unit) ด้วยเครื่องร็อกเวลล์ที่ 30 (Rockwell T30) ในเชิงการค้าจะแบ่งออกเป็น 6 ระดับ เทมเปอร์ 1 (T1) จะแข็งน้อยที่สุด และเทมเปอร์ (T6) จะแข็งมากที่สุด การใช้งานแตกต่างกันดังนี้ :

T1 = ใช้ทำหัวฉีด ฝาปิด และตัวกระป๋อง 2 ชั้น

T2 = ใช้ทำวงแหวน จุก ฝาปิด กระป๋องที่ขึ้นรูปขึ้น ๆ และชิ้นส่วนของกระป๋อง

T3 = ใช้ทำฝาปิด และตัวของกระป๋อง ฝาปิดขนาดใหญ่หรือฝาจับ

T4 = ใช้ทำฝาปิด และตัวกระป๋อง ฝาปิดขนาดเล็ก

T5 = ใช้ทำฝาปิด และตัวกระป๋อง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่กัดกร่อน

T6 = ใช้กับงานเฉพาะอย่างที่ต้องการความแข็งเป็นพิเศษ

ตารางที่ 40 ส่วนประกอบทางเคมีเป็นร้อยละของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

ธาตุ	ชนิด L	ชนิด MR	ชนิด MC
คาร์บอน	0.05-0.13	0.05-0.13	0.05-0.13
แมงกานีส	0.30-0.60	0.03-0.06	0.25-0.70
ฟอสฟอรัส	0.015 สูงสุด	0.02 สูงสุด	0.03-0.15
กำมะถัน	0.05 สูงสุด	0.05 สูงสุด	0.05 สูงสุด
ซิลิคอน	0.01 สูงสุด	0.01 สูงสุด	0.10 สูงสุด
ทองแดง	0.06 สูงสุด	0.20 สูงสุด	0.20 สูงสุด
นิกเกิล	0.04 สูงสุด	A*	A
โครเมียม	0.06 สูงสุด	A	A
โมลิบดีนัม	0.05 สูงสุด	A	A
สารหนู	0.02 สูงสุด	A	A
ไนโตรเจน	0.02	A	A

\*A หมายถึง ไม่กำหนดปริมาณ

## มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

### 1.4 ความหนาแผ่นเหล็ก

ในปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วส่วนใหญ่จะเรียกความหนาของแผ่นเหล็กตามมาตรฐานของยุโรป (EURONORM System) ซึ่งเป็นหน่วยมิลลิเมตร แต่เดิมความหนาของแผ่นเหล็กได้ใช้เหล็กเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่ คือ ปอนด์เบสบล็อกซ์ (lb / base lox) 1 ปอนด์ / เบสบล็อกซ์ หมายถึงแผ่นของเหล็กที่นิยมใช้การผลิตกระป๋องมีดังนี้

$$70 \text{ ปอนด์ / เบสบล็อกซ์} = 0.0077 \text{ นิ้ว} = 0.20 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$90 \text{ ปอนด์ / เบสบล็อกซ์} = 0.0099 \text{ นิ้ว} = 0.25 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$100 \text{ ปอนด์ / เบสบล็อกซ์} = 0.0110 \text{ นิ้ว} = 0.28 \text{ มิลลิเมตร}$$

\*หน่วยของแรงดันสปริงเท่ากับ daN มาจาก

$$\text{da} = \text{deka} (10^1)$$

$$\text{N} = \text{Newton}$$

ภาคผนวก ค

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 49 แสดงอุปกรณ์สำหรับ Rip Test



ภาพที่ 50 แสดงอุปกรณ์สำหรับ Ball Test



ภาพที่ 51 แสดงอุปกรณ์สำหรับวัดความกว้างของรอยเชื่อม

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายไพโรจน์ จันทร์โสภณโน
ที่อยู่	11 ซอยลำเภาทอง ตำบลตากลิ อำเภอดากลิ จังหวัดนครสวรรค์ 60140
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2542	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2552	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์