

สทลัมพันธ์สำหรับจำลองคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

นายธนพงศ์ ปัญจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2554

**CORRELATION FOR MODELING  
THE CHARACTERISTICS OF LASER SOLDER  
INTERCONNECTION PROCESS**

**Thanapong Punchit**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2011**

## สหสัมพันธ์สำหรับจำลองคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.เกียรติ สุลักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

(อ. ดร.เปภากร พิทยชวาล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

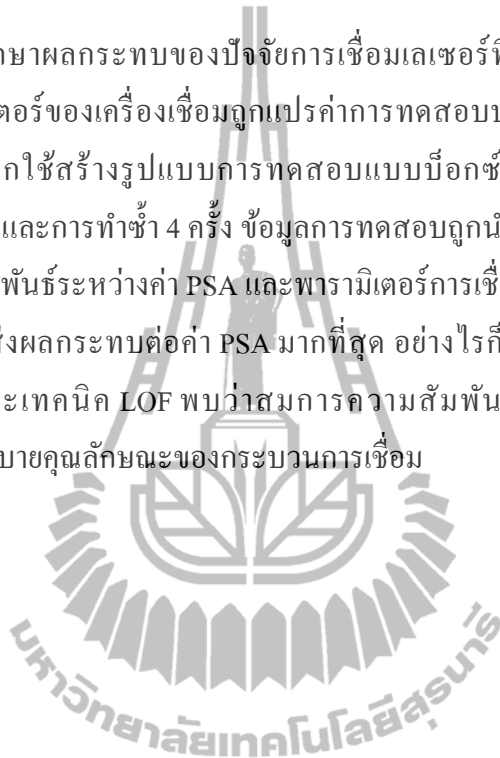
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รณพงศ์ ปัญจิต : สหสัมพันธ์สำหรับจำลองคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์  
(CORRELATION FOR MODELING THE CHARACTERISTICS OF LASER SOLDER  
INTERCONNECTION PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์, 98 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อค่ามุม PSA ของสไลเคอร์  
ในการศึกษาพารามิเตอร์ของเครื่องเชื่อมถูกแปรค่าการทดสอบบนเงื่อนไขที่การเชื่อมเกิดขึ้นได้  
โปรแกรม Minitab ถูกใช้สร้างรูปแบบการทดสอบแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ทั้งสิ้น 184 รูปแบบ  
จาก 4 ชุดการทดสอบและการทำซ้ำ 4 ครั้ง ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติและนำไป  
สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSA และพารามิเตอร์การเชื่อม จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย  
ระยะเวลาการเชื่อมส่งผลกระทบต่อค่า PSA มากที่สุด อย่างไรก็ตามบนเงื่อนไขความนำเชื่อถือ  
ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิค LOF พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความเหมาะสม 68.56  
เปอร์เซ็นต์ ที่จะใช้อธิบายคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อม



THANAPONG PUNCHIT : CORRELATION FOR MODELING  
THE CHARACTERISTICS OF LASER SOLDER INTERCONNECTION  
PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA,  
Ph.D., 98 PP.

LASER WELDING/ DESIGN OF EXPERIMENT/ BOX-BEHNKENDESIGN/  
PITCH ANGLE/ CORRELATION EQUATION

This research studies the effects of the laser welding parameters on the pitch angle of the slider. In this study, the setup values of those parameters are varied throughout the available condition of the welding. The Minitab program with the Box- Behnken method is investigated for design the experiment series with the number of 184 test cases from 4 experiments and 4 replications. The experimental data had been taken for analyzing statistically and then a relation between pitch angle and the effect of the parameters was formulated. From analyzing, the result shown that the welding time parameter had been found to be the majority effect on the PSA. It bases on 95 percent reliability condition and the technique of LOF, however, The obtained relation is 68.56 percent suitability for using in describing the welding process characteristic.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (IUCRC) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกัญญ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอดและตลอดเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วราพงษ์ ขำพิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสรีภูผล อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิว คำรังพงศ์ อาจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล อาจารย์เอกรงค์ สุขจิต และคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

บริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. คุณภูมิศักดิ์ งามวงษ์วาน และคณะวิศวกร สำหรับการสนับสนุนข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย และเอื้อเฟื้อด้านวัสดุและเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

คุณอรุณพรพรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

คุณศิริวรรณ รวมธรรม ที่ให้การช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจในการทำงานเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดาคุณพ่อสุนทร – คุณแม่สุกัญญา ปัญจิต ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งให้การเลี้ยงดูอบรมและสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ธนพงศ์ ปัญจิต

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อจำกัดในการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 หลักการและค่าสถิติที่สำคัญ.....	6
2.1.1 ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล.....	6
2.1.2 ค่าการกระจาย.....	7
2.2 กลยุทธ์ในการทดลอง.....	8
2.3 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง.....	9
2.3.1 เรพลิเคชัน.....	9
2.3.2 แรนดอมไมเซชัน.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.3.3	บล็อกกิง.....	9
2.4	แนวทางในการออกแบบการทดลอง .....	10
2.5	การทดสอบสมมติฐาน .....	10
2.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	12
2.7	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น .....	15
2.8	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	23
2.8.1	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย.....	24
2.8.2	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ .....	27
2.9	การทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน.....	29
2.10	หลักการออกแบบแผนการการทดลอง .....	29
2.11	การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	31
2.12	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	32
2.13	สรุป.....	34
<b>3</b>	<b>การดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>35</b>
3.1	การทำความเข้าใจถึงปัญหา.....	35
3.2	การเลือกตัวแปรตอบสนอง และเลือกปัจจัยที่จะทำการศึกษา .....	43
3.3	การออกแบบการทดลอง .....	44
3.3.1	การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต.....	45
3.3.2	การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง .....	46
3.3.3	แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน .....	46
3.4	การทดลอง.....	48
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>49</b>
4.1	การตรวจสอบข้อมูลการทดลอง .....	56
4.2	การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ .....	63



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ .....	64
4.4	แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองและพารามิเตอร์การเชื่อม .....	66
4.5	การทดสอบความเหมาะสมของสมการ .....	67
4.6	แนวทางปรับปรุงเพื่อลดผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่มีผลต่อระบบ .....	68
5	สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	70
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2	วิจารณ์ผลการทดลอง .....	71
	รายการอ้างอิง.....	72
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง รูปแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคนโดยใช้โปรแกรม Minitab .....	73
ภาคผนวก ข.	ขั้นตอนการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของพจน์ต่างๆ ของพารามิเตอร์การเชื่อม ที่มีผลต่อการแยกตัวของ HGA.....	82
ภาคผนวก ค.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	87
	ประวัติผู้เขียน .....	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว .....	13
2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง .....	14
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ .....	20
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ .....	22
2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัย .....	26
2.6 Orthogonal Array สำหรับการทดลอง $2^2$ แฟกทอเรียล .....	28
2.7 รหัสออร์ทอกอนัลสำหรับกำหนดให้ปัจจัย (กรณีศึกษาไม่เกิน 7 ระดับ) .....	30
2.8 การออกแบบออร์ทอกอนัล (กรณีศึกษา 3 ปัจจัย 2 ระดับ) .....	31
2.9 แผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับกรณีศึกษา 4 ปัจจัย .....	32
3.1 ผลกระทบของรอยเชื่อม และสาเหตุ .....	40
3.2 ระดับ และขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดลอง .....	46
3.3 รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB .....	47
4.1 รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA .....	49
4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ .....	63
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า PSA .....	65
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่มีผลต่อระบบ .....	69
ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB .....	74

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 จุดเชื่อมระหว่าง Slider กับ Flexure .....	1
1.2 การบิดงอของชิ้นงานหลังเชื่อม .....	2
2.1 แบบจำลองสำหรับกระบวนการหรือระบบ .....	8
2.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย.....	24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	34
3.2 องค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	35
3.3 หัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	36
3.4 ชุดประกอบหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	37
3.5 รูปแบบการเชื่อมของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ .....	38
3.6 รูปแบบของการเชื่อม HGA.....	38
3.7 รอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ของการเชื่อม HGA.....	39
3.8 รอยเชื่อมที่เกิดการไหม้.....	41
3.9 รอยเชื่อมแบบสะพาน .....	41
3.10 รอยเชื่อมที่ไม่ดี.....	42
3.11 ลักษณะของมุม PSA ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม .....	42
3.12 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อม .....	44
4.1 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P1 ในการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน .....	57
4.2 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P2 ในการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน .....	58
4.3 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P3 ในการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน .....	58
4.4 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P4 ในการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน .....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

4.5	แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P5 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน .....	59
4.6	สีสโตแกรมการกระจายข้อมูลของ PSA.....	60
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล.....	61
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย.....	61
4.9	กราฟค่าเฉลี่ยของปัจจัย P1, P2, P3, P4 และ P5 .....	62
4.10	กราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย P1, P2, P3, P4 และ P5 .....	62



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\alpha$	=	ระดับนัยสำคัญ
$A$	=	พารามิเตอร์การเชื่อม P1
$B$	=	พารามิเตอร์การเชื่อม P2
$C$	=	พารามิเตอร์การเชื่อม P3
$D$	=	พารามิเตอร์การเชื่อม P4
$E$	=	พารามิเตอร์การเชื่อม P5
$F$	=	ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน F-distribution
$HGA$	=	หัวอ่านเขียนข้อมูล
$HSA$	=	ชุดประกอบหัวอ่านเขียนข้อมูล
$DF_E$	=	องศาอิสระของส่วนที่อธิบายไม่ได้
$DF_T$	=	องศาอิสระของผลรวม
$LOF$	=	การทดสอบความเหมาะสมของสมการ
$n$	=	จำนวนข้อมูล
$MS_E$	=	ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองของสมการอธิบายไม่ได้
$MS_{LOF}$	=	ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองของ LOF
$MS_{PE}$	=	ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองของ Pure Error
$MS_{Regr}$	=	ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองของสมการอธิบายได้
$PSA$	=	ค่ามุมบิดตัวของ HGA / ค่าพิชสแตติกแอททิจูด (Pitch Static Attitude)
$P-Value$	=	ค่าที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน
$r$	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
$R^2$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
$R^2_{adj}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว
$SS$	=	ผลบวกกำลังสอง
$SS_E$	=	ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายไม่ได้
$SS_{Regr}$	=	ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายได้
$SS_T$	=	ผลรวมระหว่าง $SS_{Regr}$ กับ $SS_E$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\bar{x}$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
$x_{\max}$	=	ข้อมูลที่มีค่ามากที่สุด
$x_{\min}$	=	ข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุด
$\varepsilon$	=	ความผิดพลาด หรือส่วนที่ยังอธิบายไม่ได้จากการทดลอง

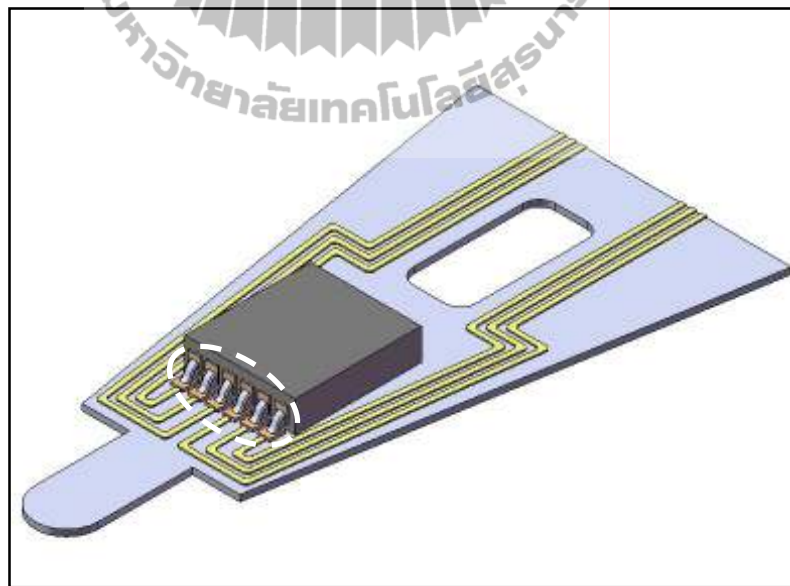


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

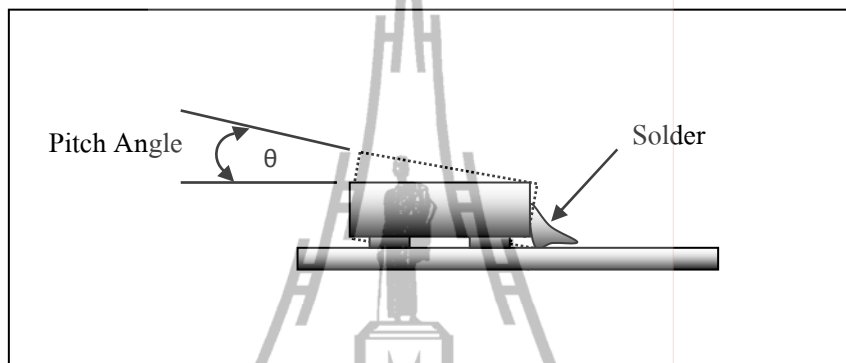
การเชื่อมเป็นกระบวนการประสานเนื้อวัสดุให้ติดกัน ปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ การเชื่อมพลาสมา การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สคลุม การเชื่อมเลเซอร์ และการเชื่อมเหนียวนา เป็นต้น ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์การเชื่อมที่นิยมใช้ในการประกอบวงจรชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์คือ การเชื่อมเลเซอร์ เพราะให้ความเที่ยงตรงสูงในการเชื่อม และเหมาะกับการประกอบชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กคือเกิดความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุน้อย โครงสร้างของชิ้นงานไม่เสียหาย ซึ่งการเชื่อมที่สำคัญอย่างหนึ่งในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์คือ การเชื่อมวงจร HGA (Head Gimbal Assembly) ซึ่งเป็นการเชื่อมระหว่าง Slider เข้ากับ Flexure ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 จุดเชื่อมระหว่าง Slider กับ Flexure

การเชื่อมดังกล่าวใช้หลักการพ่นเม็ดโลหะที่ถูกหลอมด้วยเลเซอร์มาติดยังตำแหน่งที่ต้องการ เนื่องจาก Slider และ Flexure ถูกติดอยู่บนแผ่นโลหะขนาดบางและมีขนาดเล็กมาก ความร้อนจาก

เมื่อโลหะที่ใช้เป็นจุดเชื่อมจะแผ่กระจายสู่บริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อม และเมื่อเย็นตัวลงแรงดึงผิวจะเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดแรงดึงรั้งที่บริเวณรอบ ๆ ในรูปของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วัสดุจะขยายตัวเมื่อร้อนและหดตัวกลับเมื่อเย็นตัวลง ดังนั้นในการเชื่อมเลเซอร์ของ HGA บริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อมจะต่อต้านการขยายตัวเมื่อเกิดความร้อนและเมื่อเย็นตัวก็จะเย็นตัวอย่างอิสระส่งผลให้เกิดการบิดงอของชิ้นงาน ดังแสดงรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การบิดงอของชิ้นงานหลังเชื่อม

กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ที่กล่าวถึงเป็นเครื่องจักรระบบอัตโนมัติ มีพารามิเตอร์หลายตัวที่ต้องควบคุมเพื่อให้การเชื่อมมีคุณภาพ การศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ ต่อการบิดตัวของชิ้นงานจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงกระบวนการผลิต

ในทางปฏิบัติจริงวิศวกรจะควบคุมการเชื่อม โดยควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องเชื่อม เพื่อให้ได้ค่าการบิดตัวน้อยที่สุด เพราะพฤติกรรมการบิดตัวเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากประสิทธิภาพทางการอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดิสก์ไดรฟ์จะลดลง ดังนั้นมุมบิดตัวของ Slider จะถูกควบคุมไม่ให้เกินค่าที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปจะควบคุมให้ไม่เกิน 0.8 องศา จากค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมจะก่อให้เกิดการบิดตัวเสมออย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยชิ้นงานที่มีมุมบิดตัวไม่เกินกว่าที่กำหนดจะถือเป็นชิ้นงานดี ส่วนชิ้นงานที่มีค่าการบิดตัวมากกว่าที่กำหนดจะถือเป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์และจะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงเพื่อตัดกลับให้ได้มุมในช่วงที่กำหนด การตัดกลับทำได้โดยการยิงเลเซอร์เพื่อให้ความร้อนบริเวณส่วนงอของ Suspension ของ HGA เพื่อสร้างผลกระทบของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ ในทางตรงกันข้ามกับมุมที่บิดไป อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่กล่าวข้างต้นอาศัยประสบการณ์ของวิศวกรในการควบคุมกระบวนการผลิต ในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับเครื่องเชื่อม ปัญหาคือเมื่อเปลี่ยนขนาดของบอลเชื่อม เปลี่ยนยี่ห้อ และรุ่นของ HGA ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการเชื่อมก็จะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน การหาค่าพารามิเตอร์



ของการเชื่อมที่เหมาะสมนั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เสียเวลาและทรัพยากรอย่างมาก เพราะต้องทำการทดสอบความเหมาะสมใหม่ทั้งหมด

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดว่าจะหาสามารถทราบคุณลักษณะของเครื่องเชื่อมได้ ก็น่าจะช่วยให้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำได้อย่างมีแบบแผน และรวดเร็ว งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการเชื่อม เหตุผลเพราะความเหมาะสมของพารามิเตอร์เป็นเรื่องกรณีต่อกรณี แต่มุ่งศึกษาค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวของเครื่องเชื่อมว่าส่งผลกระทบต่อการทำงานของ Slider จึงเป็นการศึกษาเพื่อหาคุณลักษณะหรือผลตอบสนองของเครื่องเชื่อม หากจะกล่าวในเชิงการวิเคราะห์ทางสถิติคือ งานวิจัยไม่ได้มุ่งหาค่าเฉลี่ย (Mean) ของแต่ละพารามิเตอร์ที่จะทำให้ได้มุมบิดน้อยที่สุด แต่มุ่งศึกษาความแปรปรวนของข้อมูลของแต่ละตัวแปรที่กระทบต่อมุมบิด ซึ่งยังไม่พบจากการสืบค้นงานวิจัยที่ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน ด้วยแนวทางดังกล่าวพารามิเตอร์การเชื่อมจึงถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขเดียวคือ การเชื่อมต้องเกิดขึ้นได้ หมายความว่าเครื่องเชื่อมต้องไม่เกิดการเสียหายภายใต้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าให้ โดยไม่สนใจว่ารอยเชื่อมจะเกิดความสมบูรณ์หรือไม่

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อการบิดตัวของชิ้นงานหลังเชื่อม วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคนถูกนำมาใช้ออกแบบการทดสอบ พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมถูกแปรค่าการทดสอบในช่วงที่การเชื่อมเกิดขึ้นได้ ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยให้ความสนใจความแปรปรวนเป็นหลัก จากนั้นนำไปสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมบิดตัวและพารามิเตอร์การเชื่อม แบบจำลองที่ได้บ่งชี้ถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีต่อมุมบิด ซึ่งนำไปสู่การปรับใช้ในกระบวนการเชื่อมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ในรูปแบบการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อการบิดตัวของ Slider
2. เพื่อประยุกต์ใช้แนวความคิดและหลักการการออกแบบการทดลองในกระบวนการวิเคราะห์และปรับปรุง คุณภาพของผลิตภัณฑ์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมจำนวน 5 พารามิเตอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ Slider โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน

2. เครื่องเชื่อมระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่องเชื่อมเลเซอร์ (ทำการทดลองบนเครื่องเชื่อมหลายเครื่อง)

3. HGA ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ 6 pad ขนาด 3.5 นิ้ว

#### 1.4 ข้อจำกัดในการวิจัย

1. ทำการทดลองในสายการผลิต โดยไม่สามารถระบุเครื่องมือทดลองได้
2. จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 300 ชิ้น

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมเลเซอร์ต่อการบิดตัวของ Slider ที่ใช้อธิบายคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อม
2. ได้แนวทางการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมของการเชื่อม HGA

#### 1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

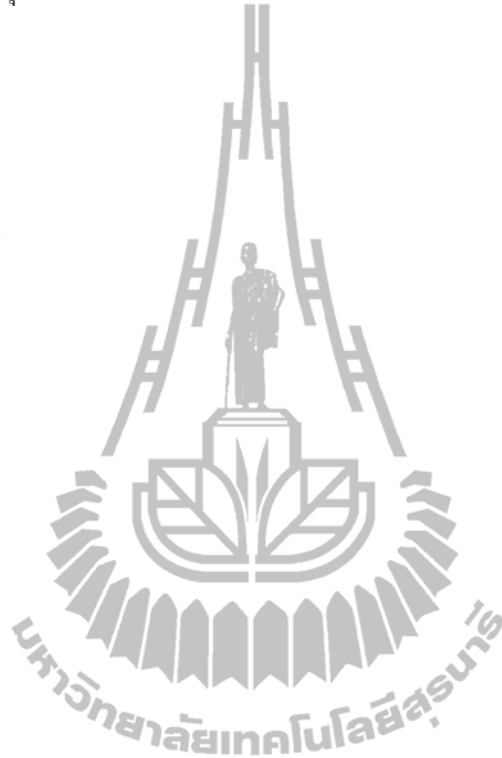
บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับหลักการและค่าสถิติที่สำคัญกลยุทธ์ในการทดลอง หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองแนวทางในการออกแบบการทดลองการทดสอบ สมมติฐานการวิเคราะห์ความแปรปรวนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วนหลักการออกแบบแผนการทดลองและการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน และปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย ได้แก่ การทำความเข้าใจถึงปัญหาที่จะศึกษา โดยศึกษาพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมเลเซอร์เพื่อเลือกตัวแปรตอบสนอง และเลือกพารามิเตอร์ที่จะทำการศึกษา หลังจากนั้นใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อออกแบบขั้นตอนและกระบวนการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน เมื่อได้แบบการทดลองแล้วจึงทำการทดลองตามแผนที่ได้ออกแบบไว้ และทำการตรวจวัดค่ามุมบิดตัวของ Slider ที่เป็นตัวแปรตอบสนอง ตามลำดับ

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล โดยเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองที่ได้ออกแบบใน บทที่ 3 โดยจะทำการตรวจสอบข้อมูลจากการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมบิดตัวของ Slider และพารามิเตอร์การเชื่อม

บทที่ 5 เป็นสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” เป็นกระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ นำไปสู่ข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ ยิ่งปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) ด้วยแล้ว วิธีการทางสถิติเป็นแนวทางเดียวที่เหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันเพราะการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ (Montgomery, 2001)

#### 2.1 หลักการและค่าสถิติที่สำคัญ

สถิติเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวมนำเสนอ และวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ เป็นเครื่องมือช่วยอธิบายลักษณะของข้อมูลประมาณค่าที่แท้จริงของระบบ (ประไพศรีสุภรณ์ ณ อรุรยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551) จัดแบ่งได้ 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

2.1.1 ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล (Central tendency) ใช้หาค่ากลางของข้อมูล ค่านี้เกี่ยวข้องกับค่าสถิติ 3 ค่าได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ถูกใช้เพื่ออธิบายความสมมาตรหรือความเบ้ (Skewness) ของข้อมูล ซึ่งมักถูกนำไปใช้หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; S) ของข้อมูล

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

ค่ามัธยฐาน (Median) คือค่าในตำแหน่งกลางของข้อมูล ถูกใช้เมื่อข้อมูลมีความเบ้มาก และค่าฐานนิยม (Mode) เป็นค่าความถี่สูงสุดในชุดข้อมูลที่พิจารณาโดยจะต้องมีการวิเคราะห์ก่อนว่าข้อมูลมีความเบี่ยงเบนโดยธรรมชาติหรือไม่เพราะจะมีผลต่อค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลาง

2.1.2 ค่าการกระจาย (Dispersion) หรือค่าการเปลี่ยนแปลงในระบบ สามารถวัดได้ด้วยค่าทางสถิติหลายค่าด้วยกัน เช่น ค่าพิสัย (Range) ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแปรปรวน (Variance;  $S^2$ ) เป็นต้น ซึ่งค่าต่าง ๆ คำนวณได้ดังนี้

ค่าพิสัย (Range; R)

$$x_{\max} - x_{\min} \quad (2.2)$$

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

ค่าความแปรปรวน

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.4)$$

- เมื่อ
- $x_{\max}$  คือ ข้อมูลที่มีค่ามากที่สุด
  - $x_{\min}$  คือ ข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุด
  - $x_i$  คือ ข้อมูลตำแหน่งที่  $i$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$
  - $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลและ  $n$  เป็นจำนวนข้อมูล

วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองแบ่งออกได้ 3 วิธี คือ

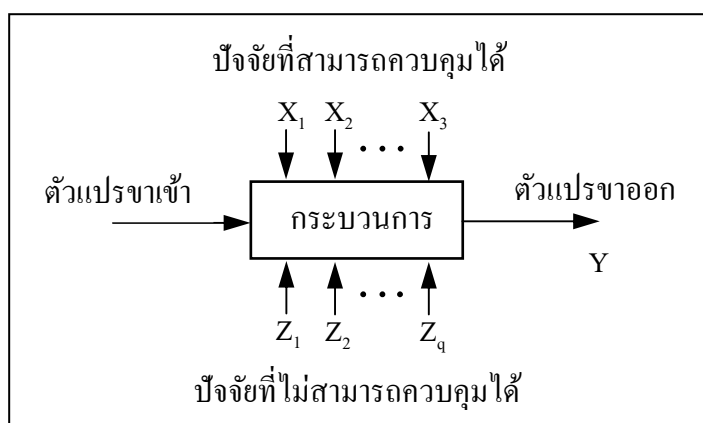
1. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory Data Analysis) ซึ่งจะวิเคราะห์จากกราฟหรือตาราง ได้แก่ แผนภาพจุด (Dot Diagram) ฮิสโตแกรม (Histogram) แผนภูมิก้านใบ (Stem and Leaf Diagram) และแผนภาพกล่อง (Box Plot) เป็นต้น

2. การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของระบบ เป็นพื้นฐานของการอนุมานทางสถิติการหาข้อสรุปมักจะอิงและเน้นในค่าสถิติหลักทั้ง 2 กลุ่ม คือ ค่าแวนวอนน์สู่ศูนย์กลางของข้อมูลโดยค่าเฉลี่ยเป็นค่าที่ชี้บ่งตำแหน่ง และค่าความแปรปรวนเนื่องจากการแปรผันโดยตรงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายการกระจายของข้อมูล หรือความแตกต่างภายในระบบ

3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระบบในกรณีศึกษาเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้เป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

## 2.2 กลยุทธ์ในการทดลอง

การทดลองทำให้ทราบหรือค้นพบถึงบางอย่างเกี่ยวกับกระบวนการหรือระบบบางอย่าง โดยจะให้คำนิยามของการทดลองว่าเป็นการทดสอบหรือเป็นชุดของการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงกับตัวแปรขาเข้าของกระบวนการหรือระบบเพื่อการสังเกต หรือบ่งชี้ถึงเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบขาออกได้ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนที่ด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสำหรับกระบวนการหรือระบบ

โดยอาจจะมองได้ว่า กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากร เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต เช่น วัตถุดิบ ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ปัจจัยของกระบวนการ  $X_1, X_2, \dots, X_p$  เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factor) ในขณะที่ปัจจัย  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองจึงเกี่ยวกับ

1. หาดัชนีแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$
2. หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้ได้  $Y$  ตามค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้ค่า  $Y$  แปรผันน้อยที่สุด
4. หาวิธีการตั้งค่าของ  $X$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $Y$  เพื่อให้ผลที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

จะเห็นได้ว่าการทดลองส่วนมากมักเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว และวัตถุประสงค์ของผู้ทดลองคือ หาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของระบบจึงเรียกการวางแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง ซึ่งมีหลายรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ได้ เช่น One-factor-at-a-Time หรือการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นต้น (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

### 2.3 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองหมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น หากต้องการหาข้อสรุปจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง วิธีการทางสถิติเป็นเพียงวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้โดยหลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง คือ เรพลิเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และบล็อกกิง (Blocking) (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

2.2.1 เรพลิเคชันหมายถึงการทำซ้ำ มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ทำให้สามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดในการทดลองได้ และใช้ในการประเมินผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองให้มีค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

2.2.2 แรนดอมไมเซชัน หมายถึงการทดลองที่มีทั้งวัสดุและลำดับที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลกระทบต่อการทดลองได้

2.2.3 บล็อกกิง เป็นเทคนิคเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง โดยการลดปัจจัยรบกวน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่ได้ให้ความสนใจหรือไม่สามารถควบคุมได้

## 2.4 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง จะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ว่า กำลังศึกษาอะไร จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจปัญหา โดยจะต้องพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และต้องหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต โดยต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง
3. เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่
4. เลือกการออกแบบการทดลอง จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาจำนวนการทดลอง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรเลือกใช้วิธีบล็อกหรือการแรนดอมไมเซชัน
5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองต้องติดตามสังเกตกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน
6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้น จะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง หากนำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึกจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ
7. สรุปและข้อเสนอแนะ ในขั้นนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย นอกจากนี้แล้วการทำ การทดลองเพื่อยืนยันผลควรจะทำขึ้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

## 2.5 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

การทดสอบสมมติฐาน คือ การทดสอบเพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาว่า เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่โดยสมมติฐานที่จะทำการทดสอบอาจจะเป็นแบบสองด้าน หรือด้านเดียว ซึ่งสมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis;  $H_0$ ) ประกอบด้วยข้อสมมติฐานหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเป็นเท็จ หรือข้อความที่ต้องการปฏิเสธ ข้อความที่ระบุในสมมติฐานหลักจะเป็นส่วนกลับของ



สมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรองเสมอ และสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate hypothesis;  $H_1$ ) ประกอบด้วย ข้อสมมติฐานหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริงหรือต้องการยอมรับ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศัชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

การประยุกต์ในงานวิศวกรรมอาจจะสรุปสมมติฐานได้ 3 ประเภท (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2545) คือ

1. การควบคุม เป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากมาตรฐานหรือไม่โดยกำหนดสมมติฐานว่า

$$H_0 = \text{กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ} (\mu = \mu_0)$$

$$H_1 = \text{กระบวนการมิได้อยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ} (\mu \neq \mu_0)$$

2. การวิเคราะห์ เป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุของปัญหาที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

$$H_0 = \text{ปัจจัยที่พิจารณามีได้เป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร} y (\mu = \mu_0)$$

$$H_1 = \text{ปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร} y (\mu \neq \mu_0)$$

3. การปรับปรุง เป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงค่าตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

$$H_0 = \text{ปัจจัยที่พิจารณามีได้มีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร} y (\mu_1 = \mu_2)$$

$$H_1 = \text{ปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร} y (\mu_1 > \mu_2)$$

สิ่งที่ต้องทราบในขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน คือความผิดพลาดในการทดสอบ ซึ่งมี 2 ประเภทคือ ค่าความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) แทนด้วยสัญลักษณ์  $\alpha$  เป็นค่าความผิดพลาดที่ปฏิเสธข้อความในสมมติฐานหลักเมื่อสมมติฐานหลักถูกต้อง และค่าความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) แทนด้วยสัญลักษณ์  $\beta$  คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับข้อความในสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานรองถูกต้องโดยขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน แบ่งได้ 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- การตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบหรือประชากร โดยทั่วไปจะกำหนด  $H_1$  ก่อนและส่วนกลับของ  $H_1$  จะระบุใน  $H_0$

- กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance Level;  $\alpha$ ) สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90% แต่โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้คือ 5% หรือ  $\alpha = 0.05$

- ระบุค่าตัวทดสอบทางสถิติหรือการแจกแจงทางสถิติที่ใช้ทดสอบ (Test Statistics) และคำนวณค่าโดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่าง โดยค่าตัวทดสอบทางสถิติแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย และทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน

- กำหนดบริเวณวิกฤตหรือบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  และบริเวณที่ปฏิเสธ  $H_0$  ไม่ได้ คือ ค่าวิกฤตซึ่งได้จากการเปิดตารางของตัวทดสอบนั้น ๆ ซึ่งถ้าใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ค่า P-Value เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ

- สรุปผลการทดสอบ ซึ่งการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ พิจารณาค่าสถิติที่คำนวณจากขั้นตอนที่ 3 ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  หรือไม่ และลักษณะที่ 2 จะพิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P-Value เทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  ( $\alpha$ ) แทน ซึ่งจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า P-Value  $< \alpha$  เท่านั้น (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

## 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรที่มีประชากรมากกว่า 2 ชุดมักมีผลเสียคือจะทำให้ระดับนัยสำคัญมีค่าสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการตัดสินใจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการทดสอบแบบใหม่เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราความมีนัยสำคัญสูงขึ้น วิธีดังกล่าวอาศัยการแยกความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนย่อยเพื่อการตัดสินใจ เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2545) การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง (Response;  $y$ ) หรือลักษณะทางคุณภาพ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ

1) ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ คือความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย (Factor) หรือวิธีปฏิบัติ (Treatment) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

2) ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ คือความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้ หรือความเข้าใจเกี่ยวกับระบบยังไม่เพียงพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or Residual) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

ความแตกต่างจากสาเหตุหลักทั้งสองส่วนนั้น สามารถแสดงได้ตั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนอง ปัจจัย และความผิดพลาด ตามรูปแบบการทดลองได้ดังต่อไปนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.5)$$

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2.6)$$

โดยที่  $Y_{ij}$  คือ ผลจากการทดลองของวิธีปฏิบัติ  $i$  ในการทดลองซ้ำครั้งที่  $j$   
 $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยรวม  
 $\tau_i$  คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่  $i = 1, 2, \dots, a$   
 $\beta_j$  คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่  $j = 1, 2, \dots, b$   
 $\varepsilon_{ij}$  คือ ความผิดพลาด หรือส่วนที่ยังอธิบายไม่ได้จากการทดลอง

เรียกสมการที่ 2.5 ว่าสมการการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA model) และเรียกสมการที่ 2.6 ว่าสมการการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA model) โดยการทดสอบสมมติฐานจะอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

แหล่งที่มา (Source)	องศาอิสระ (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (Sum Square)	ค่าเฉลี่ย (Mean Square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติ (Treatment)	$a - 1$	$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{N}$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F = \frac{MS_A}{MS_E}$
ความผิดพลาด (Error)	$N - a$	$SS_E = SST - SS_A$	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
ทั้งหมด (Total)	$N - 1$	$SS_T = \sum_i \sum_j y_{ij}^2 - \frac{T^2}{N}$		

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

แหล่งที่มา (Source)	องศาอิสระ (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (Sum Square)	ค่าเฉลี่ย (Mean Square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติ (Treatment)	$a - 1$	$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{T_{i..}^2}{br} - \frac{T^2}{N}$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$
กลุ่ม (Block)	$b - 1$	$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{T_{.j.}^2}{ar} - \frac{T^2}{N}$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$
ความ ผิดพลาด (Error)	$N - a - b + 1$	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	
ทั้งหมด (Total)	$N - 1$	$SS_T = \sum \sum \sum y_{ijk}^2 - \frac{T^2}{N}$		

- เมื่อ  $SS_A$  คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่ 1 หรือวิธีปฏิบัติ  
 $SS_B$  คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่ 2 หรือกลุ่ม  
 $SS_E$  คือ ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด หรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้  
 $SS_T$  คือ ผลบวกกำลังสองของทั้งหมด  
 $MS_A$  คือ ค่าความแปรปรวนของสิ่งตัวอย่างเนื่องจากปัจจัยที่ 1 หรือวิธีปฏิบัติ  
 $MS_B$  คือ ค่าความแปรปรวนของสิ่งตัวอย่างเนื่องจากปัจจัยที่ 2 หรือกลุ่ม  
 $MS_E$  คือ ค่าความแปรปรวนของสิ่งตัวอย่างเนื่องจากความคาดเคลื่อน  
 $y_{ijk}$  คือ ข้อมูลจากการทดลองวิธีปฏิบัติที่  $i$  กลุ่มที่  $j$  ทำซ้ำครั้งที่  $k$   
โดยที่  $i = 1, 2, \dots, a$ ;  $a$  คือ จำนวนวิธีปฏิบัติ (Treatment)  
 $j = 1, 2, \dots, b$ ;  $b$  คือ จำนวนกลุ่ม (Block)  
 $k = 1, 2, \dots, r$ ;  $r$  คือ จำนวนครั้งที่ทำซ้ำในแต่ละวิธีปฏิบัติ  
 $T_{i..}$  คือ ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่  $i$   
 $T_{.j.}$  คือ ผลรวมข้อมูลกลุ่มที่  $j$   
 $T_{...}$  คือ ผลรวมข้อมูลทั้งหมด

- n คือ จำนวนข้อมูลในวิธีปฏิบัติ  
 N คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด

## 2.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม โดยอาจกล่าวได้ว่าการออกแบบการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรและมักใช้ร่วมกันเสมอ (ประไพศรี สุทัศน ฌ อยุธา และพงศัชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

รูปแบบของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น แบ่งได้ 2 ลักษณะ ขึ้นกับตัวแปรอิสระ ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว กับตัวแปรตาม 1 ตัวเรียกสมการที่ 2.7 และ 2.8 ว่า สมการเส้นตรงเต็มรูปและสมการพหุนามอันดับสอง ตามลำดับ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.7)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (2.8)$$

2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.9)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + \varepsilon \quad (2.10)$$

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่ายแบ่งได้ 4 ส่วนดังนี้

1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร

- กำหนดข้อสมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบความสัมพันธ์สำหรับตัวแปรตาม โดยแบ่ง

ออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่อธิบายได้และส่วนที่อธิบายไม่ได้

$$Y = \mu_{Y/X} + \varepsilon \quad (2.11)$$

โดยที่  $\mu_{Y/X}$  คือ ค่าเฉลี่ย  $Y$  ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ  $X$

$\varepsilon$  คือ ส่วนที่อธิบายไม่ได้หรือค่าผิดพลาด (Residual or Error)

- เก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในสมการค่าเฉลี่ย  $Y$  โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squared Method)

- ตรวจสอบข้อสมมติฐานเกี่ยวกับข้อผิดพลาด  $\varepsilon$

- ตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ ได้แก่การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ ทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit Test)

- เมื่อผ่านขั้นตอนการตรวจสอบความเหมาะสมในขั้นที่ 3 และ 4 แล้วจึงนำสมการไปใช้ ในทางตรงกันข้ามถ้าไม่ผ่านให้กลับไปทบทวนขั้นแรกอีกครั้ง

## 2) การประมาณตัวแบบสมการ

การประมาณตัวแบบสมการเพื่อพยากรณ์นั้น ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างง่ายจะอาศัยหลักการวิธีกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งมีพื้นฐานจากการพยากรณ์ที่ดีจะต้องทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงต่ำที่สุด ในทางอุดมคติต้องการให้เท่ากับศูนย์

จากสมการที่ 2.11 กำหนดให้

$$y_i = \hat{\mu}_{Y/X_i} \quad (2.12)$$

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2.13)$$

โดยที่  $\hat{y}_i$  คือ ค่าพยากรณ์ของค่าตอบสนองสำหรับค่าสังเกตที่  $i$

$e_i$  คือ ค่าผิดพลาดของค่าสังเกตที่  $i$

$y_i$  คือ ค่าตอบสนองของค่าสังเกตที่  $i$

หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือ “จะประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ทำให้ค่าผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด (Sum Square Error; SSE) มีค่าต่ำที่สุด” นั่นคือ

$$\text{Min } SS_E = \text{Min} \sum_{i=1}^n e_i^2 = \text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.14)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด (SSE) ขึ้นอยู่กับรูปแบบสมการตัวแบบ  $\mu_{Y/X}$  ที่ใช้การเลือกรูปแบบสมการจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างสมการพยากรณ์

- การประมาณตัวแบบสมการเส้นตรงเต็มรูป

$$\hat{y}_i = \beta_0 \hat{X}_i \quad (2.15)$$

$$e_i = y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i) \quad (2.16)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)]^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\beta_0$  คือ ค่าจุดตัดแกน Y  
 $\beta_1$  คือ ค่าความชัน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย

ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  นั้น ทำได้โดยหาอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับสัมประสิทธิ์นั้น เพื่อจะได้มาซึ่ง “สมการปกติ” (Normal Equation) สมการปกติจะเป็นสมการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้งกรณีแบบอย่างง่าย และแบบเชิงพหุ (หรือแบบหลายเชิง) โดยสมการปกติจะมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ในสมการความสัมพันธ์เสมอ ดังนั้นเมื่อแก้สมการปกติเพื่อหาคำตอบก็จะได้ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์

กำหนดให้

$$L = SS_E = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)]^2 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)] = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n X_i [y_i (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)] = 0 \quad (2.20)$$

จัดรูปแบบสมการ (2.19) และ (2.20) จะได้สมการปกติดังนี้คือ

$$\sum_{i=1}^n y_i = n \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.21)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (2.22)$$

จัดรูปแบบสมการ (2.21) และ (2.22) ค่าที่ไม่ทราบค่าคือ  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  นอกนั้นค่าผลบวกต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาแก้สมการทั้งสองจะได้สมการปกติดังนี้ คือ

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.23)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} \quad (2.24)$$

โดยที่  $S_{XY} = \sum_{i=1}^n y_i (X_i - \bar{X})$  (2.25)

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.26)$$



### 3) การทดสอบข้อสมมติในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

ข้อสมมติที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่สำคัญมี 4 ประการคือ

- $\varepsilon_i$  มีการแจกแจงปกติ
- $E(\varepsilon_i) = 0$  (ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์)
- $V(\varepsilon_i) = \sigma^2$  (ความแปรปรวนคงที่)
- $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$  (ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน)

ในการทดสอบข้อสมมตินี้ จะใช้หลักการเดียวกับข้อสมมติในการใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน นั่นคือ จะใช้กราฟที่แตกต่างกันดังนี้

#### 1. กราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot)

ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ (3.1) ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อสมมติที่ (3.1) ผ่าน

#### 2. Residuals Plot ระหว่าง $e_i$ กับ $i$ หรือ $e_i$ กับ $\hat{y}_i$

ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ (3.2) และ (3.3) โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์ อย่างสมดุล) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวน คงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่มแสดงถึงความ เป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาด ตรวจสอบข้อสมมติที่ (3.4)

#### 3. Residuals Plot ระหว่าง $e_i$ กับ $x$

ใช้พิจารณาความเป็นอิสระต่อกันของ  $e_i$  ถ้ายังมีรูปแบบความสัมพันธ์ แสดงว่าสมการความสัมพันธ์ที่ใช้มีรูปแบบไม่เหมาะสม

### 4) ทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

หลักการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และทดสอบข้อสมมติฐาน (3.1-3.4) ทั้ง 4 ข้อผ่านแล้ว ก่อนที่จะนำสมการ ไปใช้พยากรณ์จำเป็นต้องทดสอบความเหมาะสมของสมการ โดยนิยมใช้ 2 กรณี ดังนี้

- วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination;  $R^2$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการความสัมพันธ์หรือตัวแปรอิสระในสมการความสัมพันธ์ว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตาม (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า  $R^2$  ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนแยกความแปรปรวนของตัวแปรตาม y

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.27)$$

โดยที่  $SS_T$  คือ Sum Square Total ของ  $y$

$$\sum (y_i - \bar{y})^2$$

$SS_E$  คือ Sum Square Error (ส่วนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการความสัมพันธ์)

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$SS_{Regr}$  คือ Sum Square Regression (ส่วนที่อธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์)

$$\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

แหล่งที่มา (Source)	$d.f$	$SS$	$MS$	$F$
Regression	$p$	$SS_{Regr}$	$MS_{Regr} = \frac{SS_{Regr}}{p}$	$\frac{MS_{Regr}}{MS_E}$
Error	$n - p$	$SS_E$	$MS_E = \frac{SS_E}{n - p}$	
Total (adj)	$n - 1$	$SS_T$		

โดยที่  $p$  คือ จำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการ

$n$  คือ จำนวนข้อมูล

ตัวสถิติ  $F$  ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ใช้ในการทดสอบสมมติฐานต่อไปนี้ คือ

$$H_0 : \beta_1 = 0 \quad (\text{ไม่มีสมการความสัมพันธ์})$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad (\text{สมการความสัมพันธ์สร้างได้})$$

$$F = \frac{MS_{Regr}}{MS_E} \tag{2.28}$$

บริเวณปฏิเสธ  $H_0$  คือ  $F > F_{\alpha, (p, n-p)}$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  นั้นเกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า  $SS_{\text{Regs}}$  และค่า  $SS_T$  ดังนั้นค่า  $R^2$  จึงเป็นตัวระบุเปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regs}}}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.29)$$

หรือ  $R^2 = r^2$  เมื่อ  $r$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร  $x$  และ  $y$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (2.30)$$

เนื่องจากค่า  $R^2$  มีความไวในการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่า  $R^2$  จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จึงใช้ค่า  $R^2$  ที่ทำการปรับค่า  $R^2_{\text{adj}}$  แทน

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{MSE}{MST}; \quad MST = \frac{SST}{n-1} \quad (2.31)$$

ซึ่งจะอธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ  $y$  ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการความสัมพันธ์เช่นกัน

- การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit Test)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการจะทำการขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่า  $x$  ซ้ำ แต่ผลลัพธ์ของค่า  $y$  ที่ได้ต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ (ทำการทดลองซ้ำ) ในการทำการทดสอบ LOF นั้น จะทำการตั้งสมมติฐานเพื่อทำการทดสอบ กล่าวคือ

$H_0$ : สมการเหมาะสมแล้ว

$H_1$ : สมการขาดความเหมาะสม

โดยการทดสอบ LOF นี้ จะทำการทดสอบโดยใช้ตัวสถิติ F ซึ่งได้จากการแบ่งค่า SSE (ค่าผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด) ออกเป็นส่วนย่อยสองส่วน ได้แก่ ผลบวกกำลังสองที่เกิดจากการขาดความเหมาะสมของสมการ (Sum Square Lack-of-Fit;  $SS_{LOF}$ ) และผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดจริง (Sum Square Pure Error;  $SS_{PE}$ ) ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ

แหล่งที่มา (Source)	$d.f.$	$SS$	$MS \frac{SS}{d.f.}$	$F$
Regression	$p$	$SS_{Regr}$	$MS_{Regr}$	$F_1 = \frac{MS_{Regr}}{MSE}$
Error	$v_E$	$SSE$	$MSE = S^2$	$F_2 = \frac{MS_{Regr}}{MSE}$
- LOF	$v_{LOF}$	$SS_{LOF} = SSE + SS_{PE}$	$MS_{LOF}$	
- PE	$v_{PE}$	$SS_{PE}$	$MS_{PE}$	
Total (adj)	$n-1$	$SST$		

จากตารางที่ 2.4 สามารถทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสมการตามลำดับได้ดังนี้ คือ

- 1) จะทำการทดสอบว่าสมการสามารถสร้างได้หรือไม่ ตามสมมติฐานดังนี้

$H_0$  : สมการความสัมพันธ์ไม่สามารถสร้างได้

$H_1$  : สมการความสัมพันธ์สร้างได้

ตัวสถิติคือ  $F_1$  จะทำการปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $F_1 > F_{\alpha, (p, n-p)}$  จากตารางค่า  $F$  ที่  $\alpha$  ใดๆ

- 2) จะทำการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการซึ่งจะทำการทดสอบเมื่อสมมติฐานข้อ (1) ได้รับการปฏิเสธนั่นคือสมการความสัมพันธ์สามารถสร้างได้ หรือมีสมการ โดยจะทำการทดสอบ

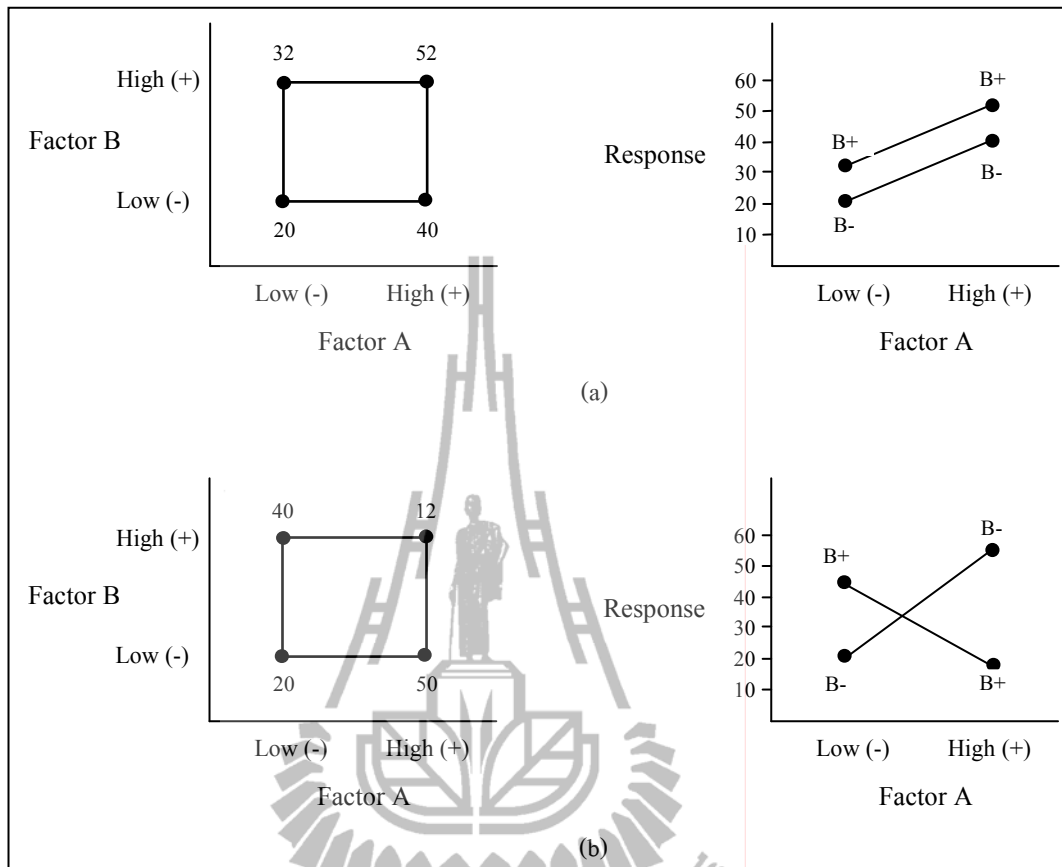
$H_0$  : สมการมีความเหมาะสมแล้ว

$H_1$  : สมการขาดความเหมาะสม

ตัวสถิติคือ  $F_2$  จะทำการปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $F_2 > F_{\alpha, (p, n-p)}$  จากตารางค่า  $F$  ที่  $\alpha$  ใด ๆ หรือจะกล่าวได้ว่า สมการมีความเหมาะสมเมื่อไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้

## 2.8 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการทดลองแบบแฟกทอเรียลนับเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เปรวลีเกิด (ไม่มีการทดลองซ้ำ) จะประกอบด้วย การทดลอง ทั้งหมด  $ab$  การทดลอง ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งต่อผลตอบสนอง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้น ๆ จะเรียกว่า ผลกระทบหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง จะเรียกว่า ผลกระทบอันตรกิริยา (Interaction Effect) ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 เป็นกราฟระหว่างผลตอบสนองของปัจจัย A ที่ระดับ ทั้งสองของปัจจัย B หากพบว่าเส้นของ B(-) และ B(+) ประมาณได้ว่าขนานกัน จะบ่งถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน หากเส้นของ B(-) และ B(+) ไม่ขนานกันหรือมีลักษณะตัดกัน สามารถกล่าวได้ว่า ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน (ปารเมศ ชูติมา, 2545)



รูปที่ 2.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย (a) แบบไม่มีผลกระทบบันตรกิริยา (b) แบบมีผลกระทบบันตรกิริยา

2.8.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

ในกรณีที่ทำการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย โดยกำหนดให้  $y_{ijk}$  คือผลตอบสนองเมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ  $i$  และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ  $j$  สำหรับการทดลองเรพลิเคตที่  $k$  ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้น ได้ดังนี้ สมการที่ 2.3.2

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{2.32}$$

โดยที่  $y_{ijk}$  คือ ค่าตอบสนอง ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับที่  $i$  ปัจจัย B ที่ระดับ  $j$  ทำการทดลองซ้ำครั้งที่  $k$  ;  $i=1,2,\dots,a$  ;  $j=1,2,\dots,b$  ;  $k=1,2,\dots,n$

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยรวม

$\alpha_i$  คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับ  $i$

$\beta_j$  คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\alpha\beta)_{ij}$  คือ ค่าอันตรกิริยา หรือค่าผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

$\varepsilon_{ijk}$  คือ ค่าผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย B ที่ระดับ j โดยทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k

การวิเคราะห์โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นทำได้โดย ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ ดังนี้

1) การทดลองสมมติฐานของปัจจัย A

$H_0$ : ปัจจัย A ไม่มีผลต่อ  $y$  ( $\alpha_i = 0$ )

$H_1$ : ปัจจัย A มีผลต่อ  $y$  ( $\alpha_i \neq 0$ )

2) การทดสอบของสมมติฐานของปัจจัย B

$H_0$ : ปัจจัย B ไม่มีผลต่อ  $y$  ( $\beta_j = 0$ )

$H_1$ : ปัจจัย B มีผลต่อ  $y$  ( $\beta_j \neq 0$ )

3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

$H_0$ : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  ( $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ )

$H_1$ : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  ( $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ )

โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทำได้โดยอาศัย ตารางที่ 2.5 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัยที่ a ระดับ และ b ระดับตามลำดับโดยทำการทดลองซ้ำ n ครั้ง

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับกรณีศึกษา 2 ปัจจัย

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ย SS $MS = \frac{SS}{d.f.}$	ค่าสถิติ F
A	$a - 1$	$SS_A$	$MS_A$	$F_A = \frac{MS_A}{MSE}$
B	$b - 1$	$SS_B$	$MS_B$	$F_B = \frac{MS_B}{MSE}$
AB	$(a - 1)(b - 1)$	$SS_{AB}$	$MS_{AB}$	$F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MSE}$
ค่าผิดพลาด	(การลบ)	$SS_E$	$MS_E$	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	$N - 1$	$SST$		

โดยที่

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

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

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{subtotals} = SS_{ineachi,j} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotals} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

และกำหนดให้

$y_{i...}$  คือ ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ  $i$  ของปัจจัย A

$y_{.j.}$  คือ ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ  $j$  ของปัจจัย B

$y_{ij.}$  คือ ผลรวมของข้อมูลการทดลองใน  $ij$  ใด ๆ



$y_{...}$	คือ ผลรวมของข้อมูลการทดลองทุก ๆ ข้อมูล
$\bar{y}_{i..}$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ $i$ ของปัจจัย A
$\bar{y}_{.j.}$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ $j$ ของปัจจัย B
$\bar{y}_{ij.}$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองใน $ij$ ใด ๆ
$\bar{y}_{...}$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองทุก ๆ ข้อมูล

สามารถเขียนแทนได้โดยรูปแบบคณิตศาสตร์คือ

$$y_{i...} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; i=1,2,\dots,a$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; j=1,2,\dots,b$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; i=1,2,\dots,a \quad ; j=1,2,\dots,b$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

และ

$$\bar{y}_{i..} = y_{i../bn} \quad ; i=1,2,\dots,a$$

$$\bar{y}_{.j.} = y_{.j./an} \quad ; j=1,2,\dots,b$$

$$\bar{y}_{ij.} = y_{ij./n} \quad ; i=1,2,\dots,a$$

$$\bar{y}_{...} = y_{.../abn} \quad ; j=1,2,\dots,b$$

## 2.8.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เป็นการออกแบบที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัย ประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบการทดลอง  $2^k$  มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการศึกษา การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย ทั้ง  $k$  ชนิด ได้อย่างสมบูรณ์ ในที่นี้จะแทนผลกระทบของปัจจัยด้วยตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ ตัวอักษรตัวเดียวแทนผลกระทบหลักเช่น A ส่วนตัวอักษรเขียนต่อกัน 2 ตัว แทนผลกระทบอันตรกิริยา เช่น AB ตัวอักษรพิมพ์เล็กแทนการทดลองร่วม (Treatment Combination) ของปัจจัยที่ระดับสูง (High) เช่น a แทนการทดลองร่วมเมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับสูง หรือ ab แทนผลการทดลองร่วมเมื่อปัจจัย AB อยู่ที่ระดับสูง และเลขในวงเล็บ (1) แทนการทดลองร่วมเมื่อทุกปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 Orthogonal Array สำหรับการทดลอง  $2^2$  แฟกทอเรียล

Run	Treatment Combination	ผลกระทบ (Effect)			Y total
		A	B	AB	
1	(1)	-1	-1	+	Y total (1)
2	a	+1	-1	-	Y total (2)
3	b	-1	+1	-	Y total (3)
4	ab	+1	+1	+1	Y total (4)

การวิเคราะห์ผลนั้นจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเช่นเดียวกับการทดลองแฟกทอเรียล ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งสามารถหาค่า Sum of Square ได้จากค่า Contrast ของแต่ละผลกระทบได้ดังนี้

$$\text{Contrast } (\hat{A}) = \sum_{A_i} y_{Total}(i) \quad (2.33)$$

$$\text{Sum of Square (SS)} = \frac{(\hat{A})^2}{n \times 2^k} \quad (2.34)$$

$$\text{Effect} = \frac{\hat{A}}{n \times \sum_{A_i}^+} \quad (2.35)$$

$$\text{Coefficient} = \frac{\hat{A}}{n} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $A_i$  คือตัวเลขที่ได้จาก Orthogonal Array  $Y_{total(i)}$  คือผลรวมทุกการทดลองซึ่ง ในแต่ละการทดลองร่วม  $n$  คือ จำนวนการทำซึ่ง  $A_i^+$  คือ ตัวเลขที่มีเครื่องหมายบวกในผลกระทบของ A

ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_A X_A + \hat{\beta}_B X_B + \hat{\beta}_{AB} X_{AB} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\hat{\beta}_0$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

## 2.9 การทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน (Fraction Factorial Experiment)

ในกรณีที่ปัจจัยของระบบมีจำนวนมากการทดลองในรูปแบบการทำซ้ำอย่างสมบูรณ์จะสิ้นเปลืองทรัพยากรอย่างมาก เพราะมีจำนวนการทดสอบมาก อย่างไรก็ตาม หากตั้งข้อสมมติสำหรับการทดลองโดยพิจารณาให้ผลกระทบของปัจจัยที่มีอันดับสูง (Higher-Order Interaction) มีความสำคัญลดลงพิจารณาเพียงผลกระทบหลักของปัจจัย และผลกระทบอันตรกิริยาที่อันดับต่ำ ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวได้ โดยอาศัยการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน ซึ่งในปัจจุบันวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายในการพัฒนากระบวนการ และการออกแบบผลิตภัณฑ์ และในกรณีที่การทดลองมีเวลางบประมาณ และทรัพยากรอย่างจำกัดโดยประยุกต์วิธีนี้เข้ากับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลเบื้องต้นเพื่อใช้พิจารณาความสำคัญของปัจจัยที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดส่งผลกระทบต่อระบบมากน้อยอย่างไร (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551) แนะนำว่า การใช้งานแบบการทดลองนี้จะประสบผลสำเร็จขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดังนี้

1. เมื่อระบบ หรือกระบวนการประกอบไปด้วยปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัย ระบบควรจะได้รับอิทธิพลอันเกิดจากปัจจัยหลัก และผลกระทบระหว่างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอันดับต่ำ ๆ
2. การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน ควรจะสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่องในการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ได้ สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบ
3. การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน ควรที่จะสามารถขยายโดยการทดลองอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อการสรุป และวิเคราะห์ในลักษณะของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ได้

## 2.10 หลักการออกแบบแผนการการทดลอง

หลักการที่สำคัญ และนิยมใช้ในการออกแบบแผนการทดลอง มี 2 ประการดังนี้

1. การแปลงค่าข้อมูลเป็นรหัสออร์ทอกอนัล (Orthogonal Coding)

เมตริกซ์การออกแบบ คือ เมตริกซ์ที่แสดงถึงระดับของปัจจัยหลัก ค่าในเมตริกซ์การออกแบบ หรือแผนการทดลอง โดยปกติจะไม่แสดงค่าปัจจัยในเชิงปริมาณ มักนิยมใช้การแปลงค่าอยู่ในรูปรหัสออร์ทอกอนัลคือ +1 และ -1 ในกรณีที่ปัจจัยนั้นทำการศึกษาที่ 2 ระดับ ในกรณีที่ทำการทดลองโดยศึกษาปัจจัยมากกว่า 2 ระดับ การแปลงค่าแบบออร์ทอกอนัลจะอาศัยหลักการกำหนดให้ช่วงของค่าแปลง มีค่าห่างเท่า ๆ กัน เพื่อให้เกิดความถูกต้องของช่วงห่างในการสร้างกราฟค่าเฉลี่ย และกราฟอันตรกิริยา ดังนั้นค่าจริงของปัจจัย จึงต้องห่างเท่ากันเสมอ เช่นกรณีศึกษา

ปัจจัย A ที่ 3 ระดับในช่วง 10 ถึง 30 นาที ค่า A ที่ระดับที่ 1 ควรใช้ที่ 10 นาที A ที่ระดับที่ 2 ควรใช้ที่ 20 นาที A ที่ระดับที่ 3 ควรใช้ที่ 30 นาที เป็นต้น ตารางที่ 2.7 แสดงค่าแปลง ในกรณีศึกษาปัจจัยมากกว่า 2 ระดับ

ตารางที่ 2.7 รหัสออร์ทอกอนัลสำหรับกำหนดให้ปัจจัย (กรณีศึกษาไม่เกิน 7 ระดับ)

ระดับปัจจัยที่ศึกษา (Level of Factors)	ค่าแปลง Orthogonal Code
3	-1, 0, +1
4	-3, -1, +1, +3
5	-2, -1, 0, +1, +2
6	-5, -3, -1, +1, +3, +5
7	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3

## 2. การออกแบบออร์ทอกอนัล (Orthogonal Design)

การออกแบบออร์ทอกอนัลจะทำการพิจารณาที่ผลกระทบของปัจจัยในแต่ละคอลัมน์ว่ามีความเป็นอิสระโดยไม่มีผลกระทบแฝง ถ้าค่า Code ของแต่ละปัจจัยตามแนวตั้งสมดุล กล่าวคือผลบวกของค่าในแต่ละคอลัมน์เท่ากับศูนย์  $\left(\sum_{i=1}^n x_{ij} = 0; \forall_j\right)$  และผลคูณระหว่างคู่ของปัจจัย 2 ปัจจัยในแต่ละแถวมีค่าเท่ากับศูนย์  $\left(\sum_{i=1}^n x_{ij}x_{ik} = 0\right)$  สำหรับปัจจัย j และ k ใด ๆ ดังตารางที่ 2.8 เป็น

การออกแบบออร์ทอกอนัล ซึ่งจะพบว่า  $\sum_{i=1}^8 x_{ij} = 0 ; j:1, 2, 3$  และ  $\sum_{i=1}^8 x_{ij}x_{ik} = 0$

ตารางที่ 2.8 การออกแบบออร์ทอกอนัล (กรณีศึกษา 3 ปัจจัย 2 ระดับ)

การทดลองที่	ปัจจัย		
	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

## 2.11 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

Box-Behnken (1960) ได้นำเสนอการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคนจะใช้หลักการของ  $2^2$  แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบวนวกกับจุดกึ่งกลางรวมเข้าไป ซึ่งบ็อกซ์-เบห์นเคน ได้จัดทำตารางสำหรับการทดลองเพื่อใช้ศึกษาปัจจัย 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 16 ปัจจัย ตัวอย่างของแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน ของการศึกษาระดับ 4 ปัจจัย ดังตารางที่ 2.9 โดยแผนการทดลองจะจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วย 9 การทดลอง ซึ่งจะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 27 การทดลอง โดยหลักการออกแบบแผนการทดลอง จะกำหนดให้พารามิเตอร์ 2 ตัว อยู่ในรูปรหัสออร์ทอกอนัล คือ +1 หรือ -1 ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือจะกำหนดให้เป็น 0 ข้อดีคือสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้นผลกระทบกำลังสอง (quadratic effect) และผลกระทบอันตรกิริยา 2 ปัจจัยได้ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551) และเป็นแบบการทดสอบที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม และงานวิจัยต่าง ๆ เช่น สภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (อนุสิทธิ์ อ่ำไพบุรย์, 2551) และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ สำหรับเหล็ก เอสที 37 (อนุสิทธิ์ อ่ำไพบุรย์, 2549)

ตารางที่ 2.9 แผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับกรณีศึกษา 4 ปัจจัย

ปัจจัย			
A	B	C	D
$\pm 1$	$\pm 1$	0	0
0	0	$\pm 1$	$\pm 1$
0	0	0	0
$\pm 1$	0	0	$\pm 1$
0	$\pm 1$	$\pm 1$	0
0	0	0	0
$\pm 1$	0	$\pm 1$	0
0	$\pm 1$	0	$\pm 1$
0	0	0	0

หลักการออกแบบแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน จะกำหนดให้พารามิเตอร์ 2 ตัว อยู่ในรูปรหัสออร์ทอกอนัล คือ +1 หรือ -1 ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือจะกำหนดให้เป็น 0 ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เป็นตัวอย่างของแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับกรณีศึกษา 4 ปัจจัย

## 2.12 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทางสถิติในงานอุตสาหกรรม มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งเกิดจากการรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้อย่างเป็นระบบ เพื่อแปลความหมายจากข้อมูลที่ได้ และนำเสนอข้อมูลในลักษณะของบทสรุป หรือข้อมูลทางกราฟ

อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูรย์ (2549) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์การเชื่อมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ สำหรับเหล็ก เอสที 37 โดยใช้หลักการการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วนเพื่อกรองปัจจัย 6 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วการเชื่อม ระยะ โพล์ลวดเชื่อม มุมของหัวเชื่อมและแก๊สคลุม ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาผลตอบสนองที่ดีที่สุด พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่าง ๆ คือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 250 แอมป์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 32 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 22 นิ้วต่อนาที ระยะ โพล์ลวดเชื่อม เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 45.6 องศา และแก๊สคลุม เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 6400 kgf.

อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูรย์ (2550) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์ค โลหะก๊าซคลุมใช้หลักการการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^{5-2}$  โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เพื่อกรองปัจจัย 5 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม มุมหัวเชื่อมและแก๊สคลุม

ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม จากนั้นใช้การทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคนเพื่อวิเคราะห์หาผลตอบสนองที่ดีที่สุด ผลการทดลองความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อม ที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ คือ กระแสไฟเท่ากับ 220 แอมป์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 30 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 10 นิ้วต่อนาที มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 75 องศาและแก๊ส CO<sub>2</sub> คลุมแนวเชื่อม เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 8192 kgf.

สมหมาย สารมาท และ วิชัย นัทรทินวัฒน์ (2550) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเอสเคดี 11 เพื่อหารูปแบบและข้อกำหนดวิธีปฏิบัติในกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2<sup>k</sup> เพื่อกรองปัจจัย 4 ปัจจัย คือ กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม มุมแกนลวดทั้งสแตนเลสและอเล็กโทรดและอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม และใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคนในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11 ที่สามารถควบคุมการแตกร้าวในแนวเชื่อมได้ คือ การปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อมที่ 200 เซนติเมตรต่อนาทีอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียส

ณ รัช สิริ สันติ สัมฤทธิ์ สุภอ อัย ภู พันธ์ศิริพัฒน์ ชูศักดิ์ พรสิงห์ และ อาณัติ วัฒนสังสุทธิ (2550) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสม ที่จะทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงเฉือน โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2<sup>k</sup> เพื่อกรองปัจจัย 3 ปัจจัยคือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน และใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคนเพื่อหาสมการถดถอยของพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีความสัมพันธ์กับแรงเฉือนของจุดเชื่อม

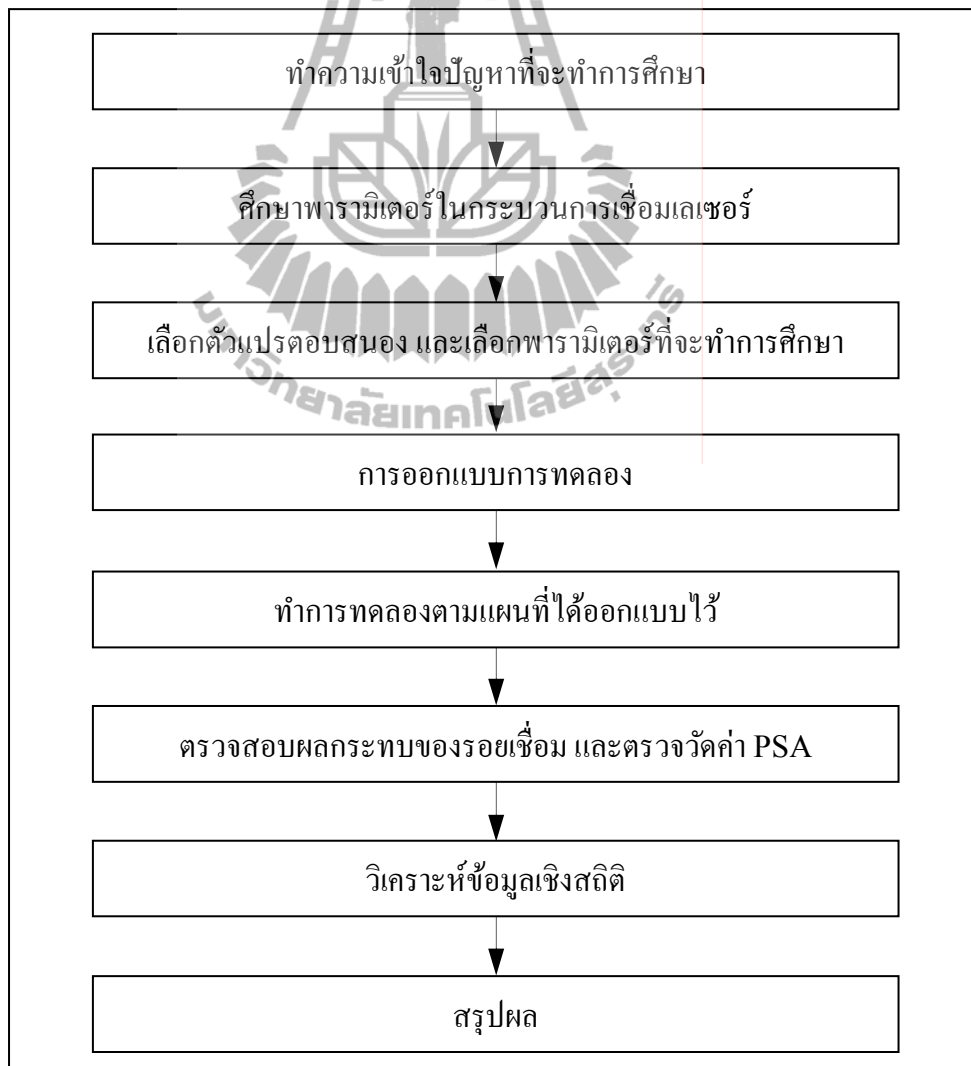
## 2.13 สรุป

ทฤษฎีทางสถิติที่ได้กล่าวมาเป็นส่วนหนึ่งของการประยุกต์วิธีทางสถิติเพื่อใช้ในการหาบทสรุปที่สมเหตุผล เพื่อพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการในงานต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้มาซึ่งข้อสรุปที่สมเหตุผลสมผลได้ ทั้งนี้ได้มีงานวิจัยหลายแขนงที่เลือกใช้การออกแบบการทดลองในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน และกระบวนการเชื่อมต่าง ๆ ของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น

### บทที่ 3

#### การดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัย จะแสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นลำดับขั้นตอนการวิจัยเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองเพื่อวางแผนและเก็บข้อมูลการทดลองที่จะนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และสรุปผลจะกล่าวในบทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ

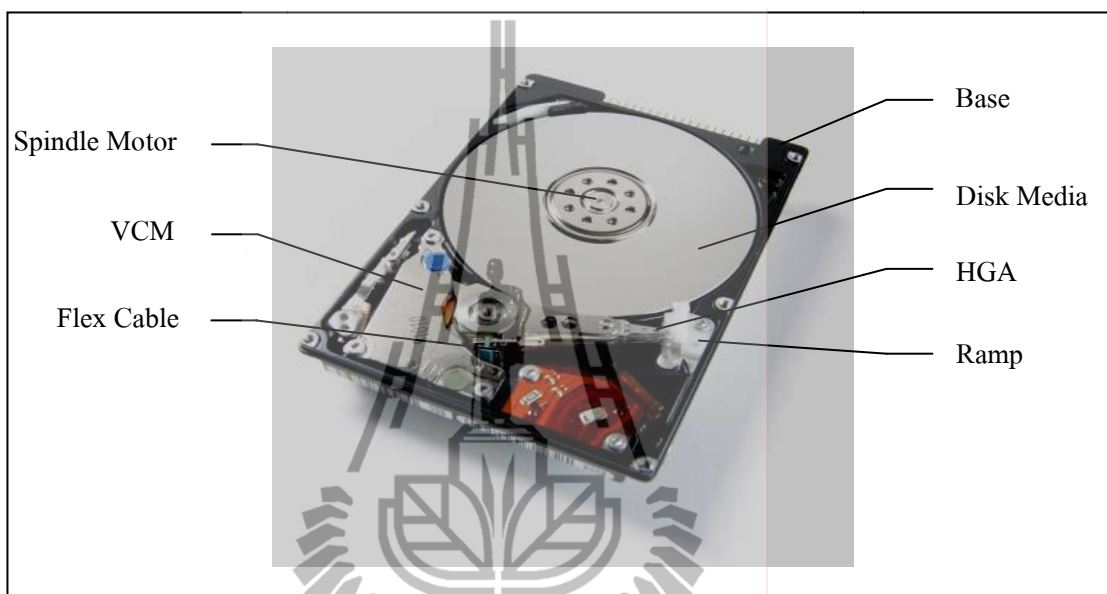


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



### 3.1 การทำความเข้าใจถึงปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนี้



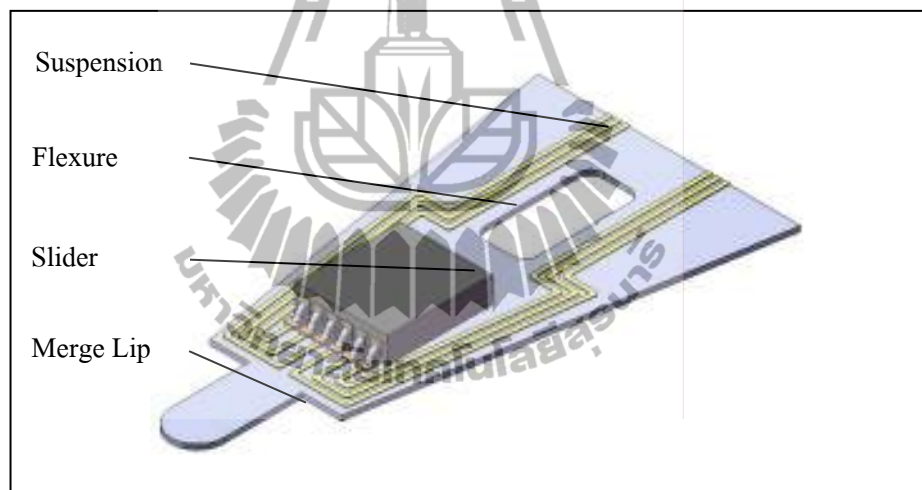
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

1. Base คือ ฐานที่ใช้ในการรองรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
2. Spindle Motor ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนแผ่นดิสก์ให้หมุน
3. แผ่นดิสก์ (Disk Media) ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
4. หัวอ่านเขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly, HGA) ทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์ ซึ่งการอ่านเขียนข้อมูลบนดิสก์ 1 แผ่น จะประกอบด้วย HGA 2 ตัว โดยจะอ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็กลงด้านบนและด้านล่างของแผ่นดิสก์ตามลำดับ ซึ่ง HGA หลายตัว ที่ถูกประกอบเข้ากับ Actuator Arm จะเรียกว่า Head Stack Assembly (HSA)
5. Flex Cable ทำหน้าที่ส่งสัญญาณการอ่านเขียนข้อมูลระหว่าง HGA กับ Card โดยมี Arm Electronic Module (AE Module) ทำหน้าที่ในการเลือกหัว Slider ในการเขียนสัญญาณลงดิสก์ และขยายสัญญาณที่ได้จากการอ่านส่งเข้า Card เพื่อทำการประมวลผล
6. Voice Coil Motor (VCM) เป็นตัวช่วยสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ HSA เกิดการเคลื่อนที่โดยโครงสร้างของ VCM นั้นประกอบด้วยแม่เหล็ก 2 ชั้น แต่ละชั้นประกอบด้วย

แม่เหล็ก 2 ขั้ว เมื่อประกอบเป็นตัว VCM แม่เหล็ก 2 ชั้นที่มีขั้วต่างกันจะเกิดการดึงดูดกัน เมื่อนำ HSA ที่มี Coil Support เป็นส่วนฐานและทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ VCM ส่งผลให้ HSA เกิดการเคลื่อนที่

7. Ramp เป็นที่พักของ HSA ในขณะที่ Spindle Motor ไม่ทำงาน
8. Card ทำหน้าที่ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานทั้งหมดของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จำเป็นต้องมีพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่มากพอแก่ความต้องการของผู้ใช้งานและมีความสามารถในการอ่านและเขียนข้อมูลที่รวดเร็วด้วยเพื่อประสิทธิภาพในการอ่านเขียนข้อมูล ดังนั้นชิ้นส่วน HGA จึงเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญที่จะทำให้เกิดการอ่านและเขียนข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง HGA ประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ดังนี้

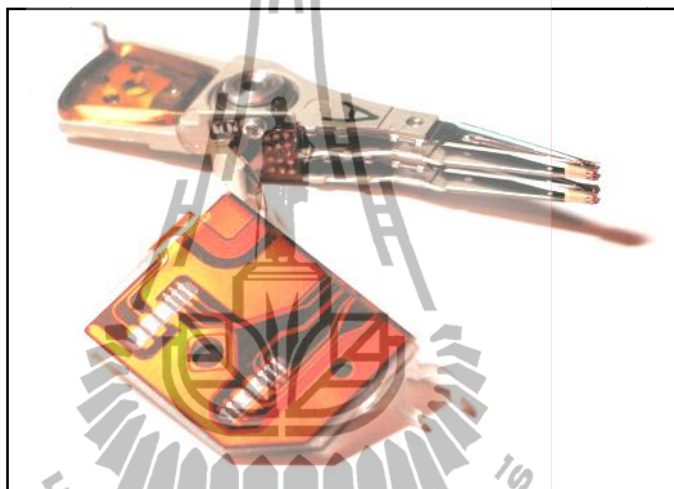


รูปที่ 3.3 หัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

1. Merge Lip เป็นส่วนปลายของ HGA ใช้เกาะกับ Ramp เมื่อ HSA เข้าไปพักที่ Ramp
2. Slider คือ หัวอ่านและเขียนสัญญาณลงบนแผ่นดิสก์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมสีดำ ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำหน้าที่เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้นขณะที่ Slider อ่านและเขียนข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์ ซึ่ง Slider มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ หัวเขียน หัวอ่านและ Air Bearing Surface (ABS) เป็นส่วนที่ใช้รับแรงลมที่เกิดจากการหมุนของ Spindle Motor เพื่อให้ Slider ลอยอยู่เหนือแผ่นดิสก์ ตามระดับความสูง (Flying Height) ที่ได้ออกแบบและคำนวณไว้
3. Bend Zone เป็นส่วนที่ช่วยให้ HGA เกิดความยืดหยุ่น

4. Suspension คือ โครงหรือฐานสำหรับประกอบ Flexure
5. Flexure คือ วงจรไฟฟ้าแบบอ่อน ที่ใช้ในการโอนถ่ายสัญญาณไฟฟ้าจาก Slider ไปยังชิปที่อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์

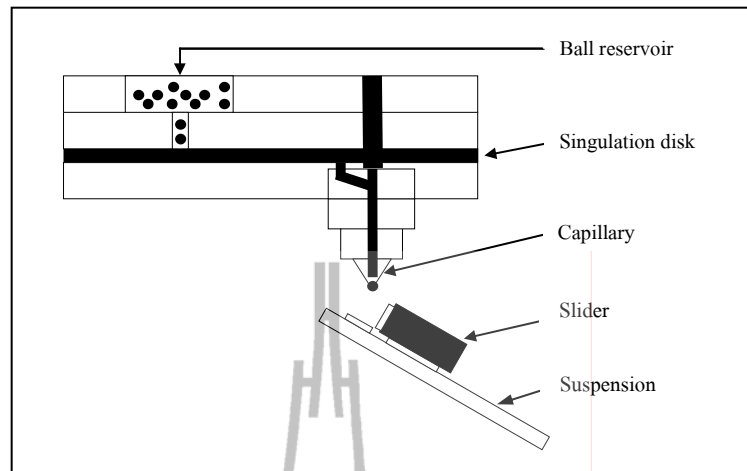
ในรูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของ HSA ซึ่งเกิดจากการนำ HGA มาซ้อนกันหลายชั้น โดยประกอบเข้ากับ Actuator arm และ Flex Cable



รูปที่ 3.4 ชุดประกอบหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

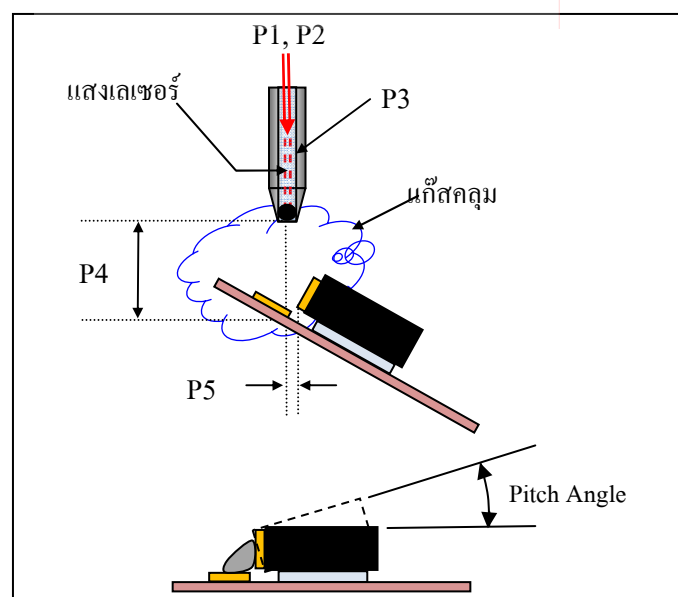
จากหลักการทำงานและส่วนประกอบของ HGA ข้างต้นพบว่า การอ่านและเขียนข้อมูลจะรวดเร็วและถูกต้องหรือไม่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งในปัจจุบันพบว่าความผิดพลาดในการอ่านเขียนข้อมูล เกิดจากความผิดปกติของ Slider เอง โดยสิ่งที่ผิดปกติดังกล่าวมักเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตของ Slider และกระบวนการประกอบ Slider เข้ากับ Suspension ซึ่งในการประกอบหัวอ่านเขียนข้อมูล จะอาศัยกระบวนการเชื่อม โดยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ หลักการทำงานคืออาศัยความร้อนจากลำแสงเลเซอร์ ในการหลอมเม็ดบอล (Solder ball) เพื่อเชื่อมต่อวงจรระหว่าง Slider และ Flexure ของ HGA

ซึ่งในกระบวนการเชื่อมจะทำงานผ่านซอฟต์แวร์ของเครื่องเลเซอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ในการบอกตำแหน่งของ pad และตำแหน่งของ HGA แต่ละตัวใน Carrier โดย 1 Carrier จะมี HGA 10 ตัว ซึ่งรูปที่ 3.5 แสดงถึงรูปแบบการเชื่อมของเครื่องเชื่อมเลเซอร์



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเชื่อมของเครื่องเชื่อมเลเซอร์

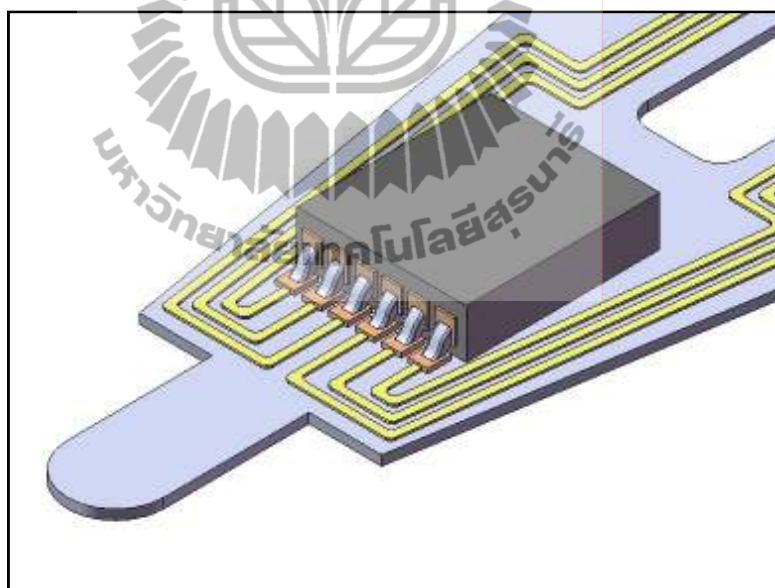
จากรูปที่ 3.5 กระบวนการเชื่อมจะเริ่มจากการเตรียม HGA บนแท่นจับยึด ซึ่งจะทำมุมกับแนวระดับ 45 องศา ต่อมาเป็นการเตรียมเม็ดบอลเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อม โดยที่ Singulation disk จะรองรับเม็ดบอลที่จะใช้เชื่อม เมื่อเริ่มกระบวนการ Singulation disk จะหมุนเม็ดบอลมายังตำแหน่งจุดปล่อยเม็ดบอลเพื่อส่งมายังตำแหน่งส่วนปลายของ Capillary เพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมต่อไป



รูปที่ 3.6 รูปแบบของการเชื่อม HGA

จากรูปที่ 3.6 การเชื่อมจะถูกกำหนดโดยการปรับค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสม โดยขั้นตอนการเชื่อมจะเริ่มจากกระแสไฟฟ้าส่งผ่านพลังงานให้เกิดลำแสงเลเซอร์ในช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้หลอมเม็ดบอลหลังจากนั้นแก๊สไนโตรเจนจะเป็นตัวขับเคลื่อนบอลที่หลอมแล้วในส่วนปลายของคาพิลลารี ไปยังตำแหน่งระหว่าง pad ของ Slider และ Flexure เรียกว่าตำแหน่งของการเชื่อม โดยความสูงระหว่างคาพิลลารีถึงแผ่น HGA เรียกว่าความสูงของการเชื่อมและการเชื่อมจะเริ่มอีกครั้งหลังจากเสร็จสิ้นการเชื่อมที่จุดแรก จนครบตามจำนวน pad ที่จะทำให้การเชื่อมทั้งหมดและแก๊สไนโตรเจนถูกใช้เพื่อคลุมบริเวณรอยเชื่อมป้องกันมิให้ออกซิเจน และความชื้นในอากาศเข้าไปรวมตัวกับรอยเชื่อม หลังจากการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์จะเกิดการบิดตัวของ Slider ผลกระทบของมุมบิดนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในกระบวนการและต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี

จากกระบวนการเชื่อมข้างต้น หากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสม คุณภาพของงานเชื่อม หรือรอยเชื่อมที่ได้จะมีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.7 แสดงรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ของการเชื่อม HGA 5 pad



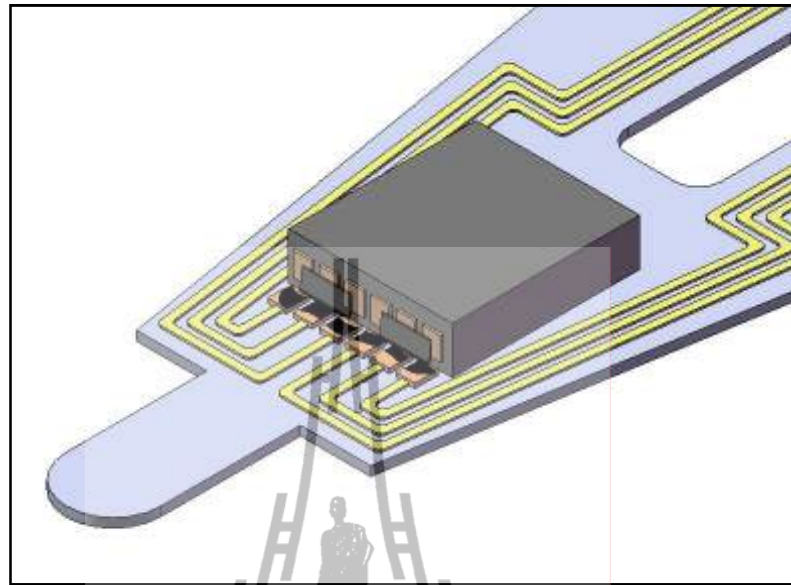
รูปที่ 3.7 รอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ของการเชื่อม HGA

หากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม จะก่อให้เกิดรอยเชื่อมที่ไม่มีคุณภาพและไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งผลกระทบของรอยเชื่อมเกิดขึ้นได้หลายปัจจัย โดยตารางที่ 3.1 แสดงผลกระทบของรอยเชื่อม และสาเหตุของปัญหา

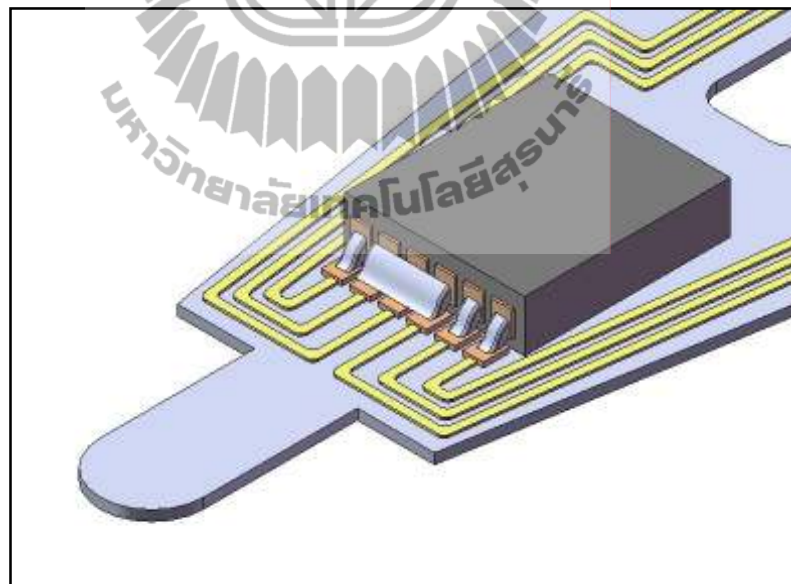
ตารางที่ 3.1 ผลกระทบของรอยเชื่อม และสาเหตุ

ผลกระทบของรอยเชื่อม	สาเหตุ
1. รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์	1. กำลังไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่ำเกินไป 2. เนื้อวัสดุของจุดเชื่อมมีการปนเปื้อน
2. รอยเชื่อมแบบสะพาน	1. ตำแหน่งของการเชื่อม ระหว่าง pad ของ Slider และ pad ของ Flexure ไม่เหมาะสม 2. คาพิลลารีใกล้กับHGA มากเกินไป 3. ความแม่นยำของการยิงเม็ดบอล 4. กำลังไฟฟ้าในขณะที่เชื่อม
3. เกิดการไหม้บริเวณรอยเชื่อม	1. กำลังไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมสูงเกินไป 2. ตำแหน่งของการเชื่อม ระหว่าง pad ของ Slider และ pad ของ Flexure ไม่เหมาะสม 3. คาพิลลารีใกล้กับ HGA มากเกินไป
4. รอยเชื่อมที่ไม่ติด	1. เนื้อวัสดุของจุดเชื่อมมีการปนเปื้อน 2. ความแม่นยำของการยิงเม็ดบอล 3. ความสูงระหว่างคาพิลลารีกับ HGA มากเกินไป 4. HGA ไม่ได้ทำมุมกับแนวระดับที่ 45 องศา
5. รอยเชื่อมแบนราบ ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน	1. คาพิลลารีใกล้กับ HGA มากเกินไป 2. แรงดันลมที่ใช้ขับเม็ดบอลที่หลอมแล้ว มายังตำแหน่งเชื่อมสูงเกินไป
6. รอยเชื่อมไม่เต็ม pad	1. ความสูงระหว่างคาพิลลารีกับ HGA มากเกินไป 2. แรงดันลมที่ใช้ขับเม็ดบอลที่หลอมแล้ว มายังตำแหน่งเชื่อมสูงเกินไป

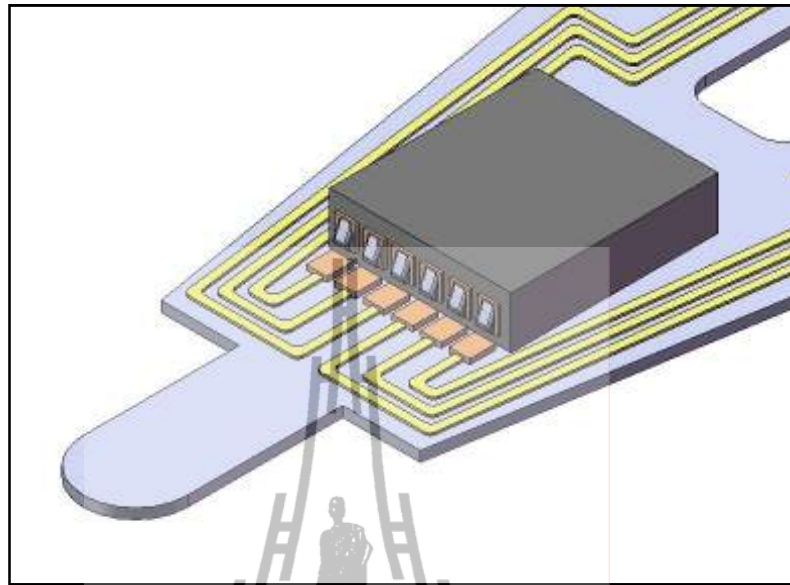
รูปที่ 3.8 - 3.10 แสดงผลกระทบของรอยเชื่อมที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งรูปที่ 3.8 แสดงรอยเชื่อมที่เกิดการไหม้ (Burn Bond) รูปที่ 3.9 แสดงรอยเชื่อมแบบสะพาน (Bridge Bond) และรูปที่ 3.10 แสดงรอยเชื่อมที่ไม่ติด (No Connection Bond)



รูปที่ 3.8 รอยเชื่อมที่เกิดการไหม้

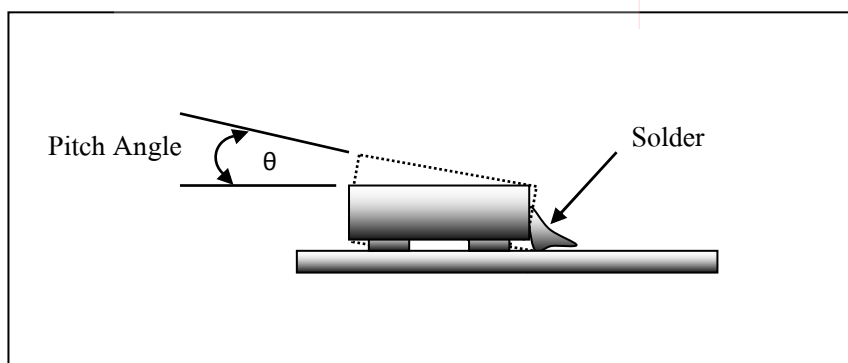


รูปที่ 3.9 รอยเชื่อมแบบสะพาน



รูปที่ 3.10 รอยเชื่อมที่ไม่ติด

รอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์และมีคุณภาพ จะนำไปสู่กระบวนการตรวจสอบคุณสมบัติของ HGA ซึ่งการตรวจสอบจะทำการตรวจสอบค่า Pitch Static Attitude (PSA) ซึ่งเป็นค่ามุมที่วัดการบิดตัวในลักษณะการเงี้ยวของ HGA ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะของมุม PSA ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม



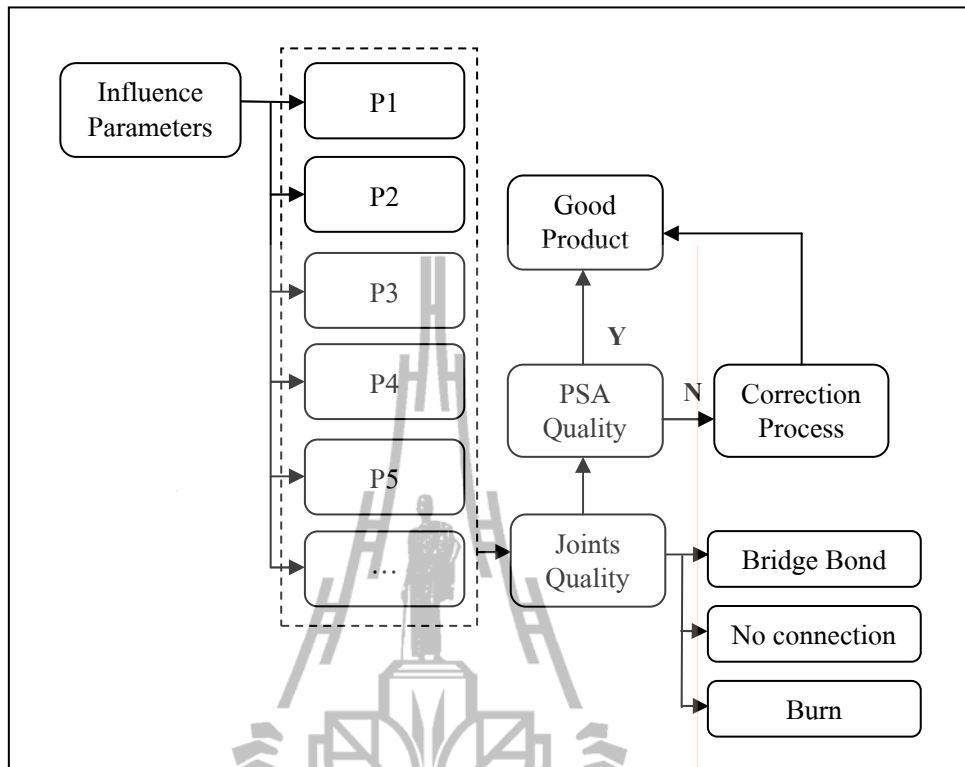
### 3.2 การเลือกตัวแปรตอบสนอง และเลือกปัจจัยที่จะทำการศึกษา

จากการทำความเข้าใจปัญหาพบว่า การผลิตหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต้องใช้การเชื่อมเพื่อต่อวงจรของ Slider และ Flexure ดังนั้นคุณภาพของรอยเชื่อมจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ การเชื่อมหากมีการปรับค่าพารามิเตอร์การเชื่อมไม่เหมาะสม ก็จะได้รอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์เช่น เกิดการไหม้ เกิดการเชื่อมติด เป็นต้นอย่างไรก็ตามการจะปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของแต่ละพารามิเตอร์เสียก่อน

พารามิเตอร์การเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมพิชสแตติกแอททิจูดที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมแบ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม และพารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่าจากเครื่องเชื่อมโดยตรง ดังนี้

- 1) พารามิเตอร์การเชื่อมที่ทำการศึกษา เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการเชื่อม เป็นปัจจัยเชิงปริมาณ และสามารถปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์
- 2) พารามิเตอร์คงที่ เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้สนใจในครั้งนี้ ซึ่งจะปรับค่าตามค่ามาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต
- 3) พารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ได้ เป็นพารามิเตอร์ที่อาจมีผลต่อการแยกตัวของชิ้นงานหลังการเชื่อมแต่เป็นส่วนที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าจากเครื่องเชื่อมได้

ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ค่ามุม PSA ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการเชื่อม จึงใช้ค่านี้เป็นตัวแปรตามในการจำลองสมการความสัมพันธ์ซึ่งสามารถจำแนกพารามิเตอร์การเชื่อมและตัวแปรตอบสนองได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อม

พารามิเตอร์การเชื่อมแบ่งออกเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม และพารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่าจากเครื่องเชื่อมโดยตรง แต่ในที่นี้จะศึกษาพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์เท่านั้น ได้แก่ P1, P2, P3, P4, และ P5 ส่วนพารามิเตอร์คงที่และพารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ได้ จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากมีข้อจำกัดอุปกรณ์และเครื่องมือเชื่อม สำหรับคุณภาพของงานเชื่อมในขั้นแรกจะพิจารณาความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ซึ่งได้แก่ (1) รอยเชื่อมต่อระหว่าง pad ของ Slider และ pad ของ Flexure (2) รอยเชื่อมไม่ต่อกันระหว่าง pad ของ Slider และ pad ของ Flexure และ (3) เกิดการไหม้บริเวณรอยเชื่อมในลำดับต่อมาจะนำไปสู่กระบวนการตรวจวัดค่ามุมพิชสแตติกแอททิจูดซึ่งจะเลือกค่านี้เป็นตัวแปรตอบสนองที่จะนำมาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่อไป

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

ในลำดับขั้นตอนนี้จะทำการเลือกการออกแบบการทดลอง ที่สามารถใช้งานวิจัยนี้ได้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ได้มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปร

ตอบสนอง อีกทั้งยังสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่ออธิบายระบบที่ทำการศึกษาได้ ซึ่งเรียกรวมวิธีเหล่านี้ว่าการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) โดยการออกแบบพื้นผิวตอบสนองนี้มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธี คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นการทดลองที่บริบูรณ์ของการออกแบบส่วนประสมกลางจะมีการเพิ่มข้อมูลเพื่อให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองกำลังสองได้คือ จุดที่มีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าอยู่ที่ค่ากลางคือ 0 ฉะนั้นจึงเหมาะสำหรับการทดลองบนปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยในขอบเขตที่อยู่นอกเหนือจากค่าระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัยได้ กล่าวคือ ปัจจัยนำเข้าทุกปัจจัยจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้มีขนาดเท่าใดก็ได้ แต่การทดลองที่ บริบูรณ์ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะไม่มีการเพิ่มข้อมูลเช่นเดียวกับ CCD ทำให้สามารถทำการทดลองบนค่าในระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใด ๆ ทั้งสิ้น ยกตัวอย่างเช่น (1) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ค่าระดับของพารามิเตอร์ คือ -1, 0 และ 1 เท่านั้น (2) การออกแบบส่วนประสมกลาง ค่าระดับของพารามิเตอร์ คือ  $-\alpha$ , -1, 0, 1,  $\alpha$  ซึ่งหากในการทดลองมีพารามิเตอร์ของเวลา เมื่อกำหนดเวลาในระดับต่ำสุดคือ 1 วินาที เวลาในระดับกลางคือ 2 วินาที และเวลาในระดับสูงคือ 3 วินาที ส่วนการกำหนดเวลาในระดับที่  $-\alpha$  อาจอยู่ในช่วงที่เวลามีค่าลบ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ จึงเป็นจุดด้อยของวิธีนี้

ดังนั้นจึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนในการหาสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยวิธีนี้เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับสำหรับการฟิตพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีที่สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองได้เพราะค่าระดับปัจจัยจะอยู่ในขอบเขตของการออกแบบการทดลองที่สามารถทำการทดลองได้

### 3.3.1 การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

การกำหนดปัจจัยที่จะทำการศึกษามีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งมีทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ P1, P2, P3, P4 และ P5 โดยระดับของแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) โดยตารางที่ 3.2 จะแสดงระดับและขอบเขตของปัจจัยของการทดลองที่สามารถทำการเชื่อมได้

ตารางที่ 3.2 ระดับ และขอบเขตของพารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ระดับ			ระดับ ปัจจุบัน
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
P1	1500	1700	1900	1500
P2	1	1.5	2	1
P3	45	62.5	80	60
P4	170	285	400	200
P5	-20	-5	10	-5

### 3.3.2 การหาขนาดตัวอย่าง

ในการตัดสินใจโดยการทดสอบสมมติฐานนั้น จะคำนึงถึงความเสี่ยงในการตัดสินใจทั้ง  $\alpha$  และ  $\beta$  ซึ่งการทดสอบสมมติฐานจะต้องควบคุมความเสี่ยงในการตัดสินใจด้วยการกำหนดให้  $\alpha$  คงที่ แล้วพยายามออกแบบให้  $\beta$  มีค่าต่ำที่สุด ด้วยการลดขนาดความคลาดเคลื่อนมาตรฐานลง ทั้งนี้ด้วยการพิจารณาถึงค่าเหมาะสมของขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2545)

งานวิจัยนี้หาขนาดตัวอย่างผ่าน โปรแกรม Minitab โดยใช้ชุดคำสั่ง Power and Sample size ใน Stat เมื่อทราบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -0.86574 และ 0.12494 ตามลำดับ จากการหาขนาดตัวอย่างผ่าน โปรแกรม Minitab พบว่ามีค่าเท่ากับ 3 นั้นหมายความว่า การทดลองนี้จำเป็นต้องมีกระบวนการเก็บข้อมูลซ้ำ 3 ครั้งเป็นอย่างน้อย จากบทสรุปในการเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน การทดลอง 1 ชุดการทดลอง มีการทดลองทั้งหมด 46 การทดลองดังนั้นจึงเลือกการเก็บข้อมูลซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทดลองและความผิดพลาดในการประมาณค่าเนื่องจากไม่สามารถควบคุมการทดลองได้ทั้งหมด ส่งผลให้จำนวนการทดลองมีทั้งสิ้น 184 การทดลอง

### 3.3.3 แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

โปรแกรม Minitab ถูกใช้ในการสร้างรูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับกรณีศึกษาปัจจัย 5 ตัว รูปแบบการทดลองจะมีทั้งสิ้น 184 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 3.4

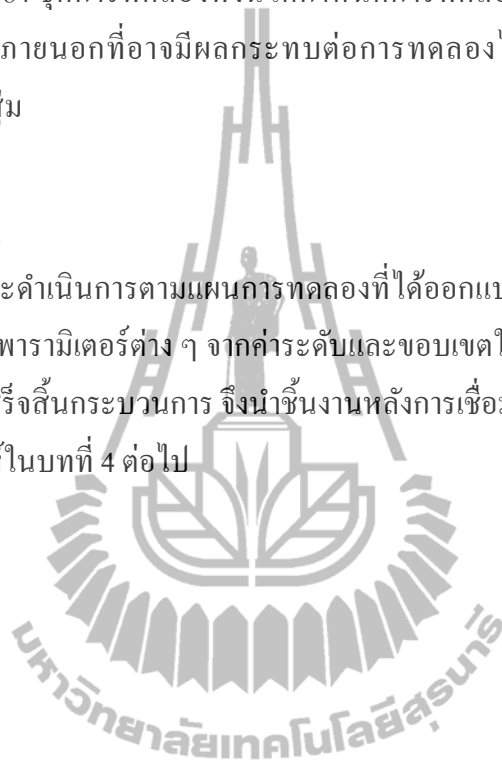
ตารางที่ 3.3 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	P1	P2	P3	P4	P5
98	1	2	1	0	0	1	-1	0
103	2	2	1	0	-1	0	0	1
57	3	2	1	0	-1	0	0	1
164	4	2	1	1	0	0	-1	0
114	5	2	1	0	1	-1	0	0
49	6	2	1	-1	1	0	0	0
163	7	2	1	-1	0	0	-1	0
178	8	2	1	0	1	0	1	0
89	9	0	1	0	0	0	0	0
22	10	2	1	0	1	-1	0	0
149	11	2	1	0	-1	0	0	1
80	12	2	1	1	0	0	0	-1
125	13	2	1	-1	0	0	0	-1
42	14	0	1	0	0	0	0	0
79	15	2	1	-1	0	0	0	-1
14	16	2	1	1	0	-1	0	0
13	17	2	1	-1	0	-1	0	0
182	18	0	1	0	0	0	0	0
90	19	0	1	0	0	0	0	0
161	20	2	1	0	-1	1	0	0
44	21	0	1	0	0	0	0	0
32	22	2	1	0	0	1	0	1
-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	182	0	1	0	0	0	0	0
108	183	2	1	1	0	1	0	0
35	184	2	1	-1	0	0	0	1

เมื่อ Std Order คือ ลำดับของการทดลองตามการสุ่ม Run order คือ ลำดับของการทดลองที่ต้องปฏิบัติตามโดยรูปแบบการทดลองในตารางที่ 3.4 นี้ถูกออกแบบโดยกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลอง และเพื่อให้สามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ฉะนั้นการทดลองครั้งนี้จะมีจำนวนการทดลอง 184 ชุดการทดลองทั้งนี้ได้กำหนดการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลกระทบต่อผลการทดลองได้ ซึ่งลำดับการทดลองทั้ง 184 การทดลองเป็นแบบสุ่ม

### 3.4 การทดลอง

การทดลองจะดำเนินการตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.3 โดยจะแทนค่า +1, 0 และ -1 ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากค่าระดับและขอบเขตในตารางที่ 3.2 จากนั้นเมื่อทำการทดลองตามแผนจนเสร็จสิ้นกระบวนการ จึงนำชิ้นงานหลังการเชื่อมไปตรวจวัดค่า PSA เพื่อนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ต่อไป



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

จากบทที่ 3 ทำให้เข้าใจปัญหาที่ศึกษา อีกทั้งได้กำหนดตัวแปรตอบสนอง และพารามิเตอร์การเชื่อมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ จากนั้นได้ใช้หลักการการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน และสร้างรูปแบบขั้นตอนการทดลอง โดยใช้โปรแกรม MINITAB ได้ทั้งหมด 184 การทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้และตรวจสอบค่า PSA ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นข้อมูลถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเชื่อมและค่า PSA

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
98	1	1700	1.0	62.5	285	10	-0.77224	-
103	2	1700	1.0	62.5	285	10	-0.80531	-
57	3	1900	1.5	62.5	170	-5	-0.84075	-
164	4	1700	2.0	45.0	285	-5	-0.96425	-
114	5	1500	2.0	62.5	285	-5	-0.90569	-
49	6	1500	1.5	62.5	170	-5	-0.92838	-
163	7	1700	2.0	62.5	400	-5	-0.83100	-
178	8	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.89953	-
89	9	1700	2.0	45.0	285	-5	-0.98474	-
22	10	1700	1.0	62.5	285	10	-0.91090	Burn
149	11	1900	1.5	62.5	285	-20	-0.87159	-
80	12	1500	1.5	62.5	285	-20	-1.05337	-
125	13	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.95959	-
42	14	1700	1.0	62.5	285	10	-0.84067	Good
79	15	1500	1.5	62.5	285	-20	-0.98148	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
14	16	1900	1.5	45.0	285	-5	-0.79319	Burn
13	17	1500	1.5	45.0	285	-5	-0.71874	Good
182	18	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.97370	-
90	19	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.90019	-
161	20	1700	1.0	80.0	285	-5	-0.83520	-
44	21	1700	1.5	62.5	285	-5	-1.01697	Good
32	22	1700	1.5	80.0	285	10	-0.75076	Good
58	23	1700	2.0	62.5	285	10	-0.72277	-
48	24	1900	1.0	62.5	285	-5	-0.82001	-
130	25	1700	2.0	62.5	170	-5	-0.63379	-
75	26	1700	1.5	45.0	285	-20	-0.94354	-
40	27	1700	2.0	62.5	400	-5	-0.91361	Burn
101	28	1700	1.0	62.5	285	-20	-0.99097	-
158	29	1700	1.5	62.5	400	10	-0.100298	-
76	31	1700	1.5	80.0	285	-20	-0.84544	-
29	32	1700	1.5	45.0	285	-20	-0.95179	Burn
123	33	1700	1.5	45.0	285	10	-0.79572	-
65	34	1700	1.5	62.5	170	10	-0.86910	-
112	35	1700	1.5	62.5	400	10	-0.82551	-
160	36	1700	2.0	45.0	285	-5	-0.88501	-
145	37	1700	1.5	45.0	400	-5	-0.98136	-
37	38	1700	1.0	62.5	170	-5	-0.85245	Good
18	39	1700	1.5	62.5	400	-20	-1.12390	Burn
10	40	1700	2.0	62.5	285	-20	-0.90754	Good
86	41	1700	2.0	62.5	400	-5	-0.90434	-
26	42	1900	1.5	62.5	170	-5	-0.92329	Burn
7	43	1700	1.5	45.0	400	-5	-0.98360	Bridge



ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
106	44	1900	1.5	45.0	285	-5	-0.75919	-
181	45	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.93357	-
151	46	1500	1.5	45.0	285	-5	-0.73328	-
183	47	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.96263	-
33	48	1500	1.5	62.5	285	-20	-0.98335	Good
150	49	1700	2.0	62.5	285	10	-0.79425	-
133	50	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.98273	-
173	51	1500	1.5	62.5	285	10	-0.72112	-
56	52	1700	2.0	62.5	285	-20	-0.97229	-
134	53	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.81828	-
110	54	1700	1.5	62.5	400	-20	-1.03950	-
54	55	1700	1.5	80.0	400	-5	-0.74971	-
69	56	1700	1.0	80.0	285	-5	-0.86212	-
153	57	1500	1.5	80.0	285	-5	-0.98486	-
12	58	1700	2.0	62.5	285	10	-0.75582	Burn
82	59	1900	1.5	62.5	285	10	-0.59527	-
23	60	1700	1.0	80.0	285	-5	-0.88307	Bridge
45	61	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.83927	Good
167	62	1700	1.5	45.0	285	-20	-0.95879	-
1	63	1500	1.0	62.5	285	-5	-0.69018	Good
59	64	1500	1.5	45.0	285	-5	-0.73574	-
131	65	1700	1.0	62.5	400	-5	-0.73707	-
142	66	1900	2.0	62.5	285	-5	-0.63545	-
19	67	1700	1.5	62.5	170	10	-0.81427	Good
94	68	1900	1.0	62.5	285	-5	-0.85201	-
64	69	1700	1.5	62.5	400	-20	-1.04948	-
70	70	1700	2.0	80.0	285	-5	-0.73875	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
60	71	1900	1.5	45.0	285	-5	-0.75065	-
111	72	1700	1.5	62.5	170	10	-0.86250	-
85	73	1700	1.0	62.5	400	-5	-0.73788	-
91	74	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.87685	-
159	75	1700	1.0	45.0	285	-5	-0.71030	-
119	76	1500	1.5	62.5	400	-5	-0.96834	-
97	77	1700	1.5	45.0	170	-5	-0.94034	-
15	78	1500	1.5	80.0	285	-5	-0.92217	Good
118	79	1900	1.5	62.5	170	-5	-0.96880	-
96	80	1900	2.0	62.5	285	-5	-0.56203	-
104	81	1700	2.0	62.5	285	10	-0.73975	-
46	82	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.96804	Good
93	83	1500	1.0	62.5	285	-5	-0.69122	-
177	84	1700	1.0	62.5	400	-5	-0.78626	-
143	85	1700	1.5	45.0	170	-5	-0.93151	-
3	86	1500	2.0	62.5	285	-5	-0.85654	Good
50	87	1900	2.0	62.5	285	-5	-0.69422	-
72	88	1900	1.5	62.5	170	-5	-0.91043	-
135	89	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.96185	-
168	90	1700	1.5	80.0	285	-20	-0.82971	-
105	91	1500	1.5	45.0	285	-5	-0.70364	-
120	92	1900	1.5	62.5	400	-5	-0.68086	-
30	93	1700	1.5	80.0	285	-20	-0.82147	Burn
24	94	1700	2.0	80.0	285	-5	-0.74370	Bridge
152	95	1900	1.5	45.0	285	-5	-0.81383	-
174	96	1900	1.5	62.5	285	10	-0.57668	-
66	97	1700	1.5	62.5	400	10	-0.87549	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
34	98	1900	1.5	62.5	285	-20	-0.99297	Burn
147	99	1700	1.0	62.5	285	-20	-0.96637	-
144	100	1700	1.5	80.0	170	-5	-0.76085	-
53	101	1700	1.5	45.0	400	-5	-0.99928	-
2	102	1900	1.0	62.5	285	-5	-0.80928	Good
67	103	1700	1.0	45.0	285	-5	-0.77258	-
139	104	1500	1.0	62.5	285	-5	-0.69782	-
155	105	1700	1.5	62.5	170	-20	-0.95974	-
47	106	1500	1.0	62.5	285	-5	-0.69941	-
169	107	1700	1.5	45.0	285	10	-0.81399	-
52	108	1700	1.5	80.0	170	-5	-0.76988	-
115	109	1700	1.0	80.0	285	-5	-0.89561	-
165	110	1500	1.5	62.5	400	-5	-0.91274	-
16	111	1900	1.5	80.0	285	-5	-0.81801	Burn
51	112	1700	1.5	45.0	170	-5	-0.94591	-
140	113	1900	1.0	62.5	285	-5	-0.89224	-
55	114	1700	1.0	62.5	285	-20	-1.02784	-
166	115	1900	1.5	62.5	400	-5	-0.61091	-
176	116	1700	2.0	62.5	170	-5	-0.64018	-
63	117	1700	1.5	62.5	170	-20	-1.07149	-
170	118	1700	1.5	80.0	285	10	-0.73261	-
107	119	1500	1.5	80.0	285	-5	-0.95615	-
36	120	1900	1.5	62.5	285	10	-0.61485	Burn
43	121	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.93059	Good
129	122	1700	1.0	62.5	170	-5	-0.83898	-
141	123	1500	2.0	62.5	285	-5	-0.95147	-
61	124	1500	1.5	80.0	285	-5	-0.97483	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
4	125	1900	2.0	62.5	285	-5	-0.68403	Bridge
137	126	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.96773	-
100	127	1700	1.5	80.0	400	-5	-0.76621	-
73	128	1500	1.5	62.5	400	-5	-0.95347	-
9	129	1700	1.0	62.5	285	-20	-0.98338	Good
81	130	1500	1.5	62.5	285	10	-0.72532	-
128	131	1900	1.5	62.5	285	10	-0.62449	-
84	132	1700	2.0	62.5	170	-5	-0.63982	-
78	133	1700	1.5	80.0	285	10	-0.78007	-
74	134	1900	1.5	62.5	400	-5	-0.62498	-
109	135	1700	1.5	62.5	170	-20	-0.97949	-
41	136	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.99235	Good
68	137	1700	2.0	45.0	285	-5	-0.89586	-
127	138	1500	1.5	62.5	285	10	-0.78303	-
39	139	1700	1.0	62.5	400	-5	-0.72112	Good
148	140	1700	2.0	62.5	285	-20	-0.93837	-
27	141	1500	1.5	62.5	400	-5	-1.06017	Good
138	142	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.93591	-
179	143	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.97229	-
113	144	1700	1.0	45.0	285	-5	-0.73371	-
5	145	1700	1.5	45.0	170	-5	-0.95962	Good
99	146	1700	1.5	45.0	400	-5	-0.95777	-
132	147	1700	2.0	62.5	400	-5	-0.98654	-
31	148	1700	1.5	45.0	285	10	-0.76923	Good
116	149	1700	2.0	80.0	285	-5	-0.80548	-
122	150	1700	1.5	80.0	285	-20	-0.83310	-
154	151	1900	1.5	80.0	285	-5	-0.82439	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
175	152	1700	1.0	62.5	170	-5	-0.80646	-
20	153	1700	1.5	62.5	400	10	-0.84029	Good
184	154	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.98849	-
121	155	1700	1.5	45.0	285	-20	-0.96787	-
17	156	1700	1.5	62.5	170	-20	-0.99504	Burn
124	157	1700	1.5	80.0	285	10	-0.74154	-
136	158	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.98046	-
71	159	1500	1.5	62.5	170	-5	-0.76101	-
171	160	1500	1.5	62.5	285	-20	-0.97223	-
87	161	1700	1.5	62.5	285	-5	-1.00102	-
25	162	1500	1.5	62.5	170	-5	-0.83438	Good
172	163	1900	1.5	62.5	285	-20	-1.03264	-
117	164	1500	1.5	62.5	170	-5	-0.79447	-
102	165	1700	2.0	62.5	285	-20	-0.95285	-
28	166	1900	1.5	62.5	400	-5	-0.63768	Burn
11	167	1700	1.0	62.5	285	10	-0.85941	Good
92	168	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.97050	-
180	169	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.86895	-
62	170	1900	1.5	80.0	285	-5	-0.82561	-
6	171	1700	1.5	80.0	170	-5	-0.78756	Good
156	172	1700	1.5	62.5	400	-20	-1.05562	-
8	173	1700	1.5	80.0	400	-5	-0.70639	Good
157	174	1700	1.5	62.5	170	10	-0.84393	-
21	175	1700	1.0	45.0	285	-5	-0.74216	Good
162	176	1700	2.0	80.0	285	-5	-0.74942	-
77	177	1700	1.5	45.0	285	10	-0.78150	-
146	178	1700	1.5	80.0	400	-5	-0.72111	-

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA (ต่อ)

Std Order	Run Order	P1	P2	P3	P4	P5	Pitch Angle	Status
83	179	1700	1.0	62.5	170	-5	-0.80133	-
126	180	1900	1.5	62.5	285	-20	-1.07233	-
38	181	1700	2.0	62.5	170	-5	-0.66171	Burn
88	182	1700	1.5	62.5	285	-5	-0.85071	-
108	183	1900	1.5	80.0	285	-5	-0.80346	-
35	184	1500	1.5	62.5	285	10	-0.75861	Good

โดย Std Order คือ ลำดับการสุ่ม Run Order คือ ลำดับการทดลอง P1, P2, P3, P4 และ P5 เป็นตัวแปรพารามิเตอร์ที่สนใจ ส่วน Pitch Angle เป็นมุม PSA ที่วัดได้และ Status เป็นผลกระทบของรอยเชื่อมที่เกิดจากการปรับค่าระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละการทดลอง ซึ่งเป็นข้อมูล 1 ชุด การทดสอบ (46 การทดลอง) ส่วนอีก 3 ชุดทดสอบไม่สามารถดำเนินการได้ด้วยเหตุผลด้านเครื่องมือตรวจสอบ หากพิจารณาจากข้อมูลที่มีอยู่จะพบว่ามีรอยเชื่อมดี 27 ชิ้น รอยเชื่อมใหม่ 15 ชิ้น และรอยเชื่อมแบบสะพาน 3 ชิ้น ซึ่งคิดเป็น 58, 32 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ข้อมูลในตารางถูกใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ทางสถิติดังต่อไปนี้

#### 4.1 การตรวจสอบข้อมูลการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการทางสถิติที่อาศัยการนำกราฟเข้ามาช่วยตรวจสอบข้อมูลหลังการทดลอง จากตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และผลการตรวจวัดค่า PSA ของการเชื่อม HGA และได้นำข้อมูลผลการทดลองนี้ไปสร้างแผนภาพแบบกล่องโดยเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มของค่าระดับแต่ละพารามิเตอร์ของการเชื่อม

แผนภาพกล่องเป็นกราฟที่ใช้อธิบายรายละเอียดของข้อมูล ได้แก่ ค่าตำแหน่งค่ากลาง ค่าการกระจาย รูปร่างการแจกแจง และข้อมูลที่ผิดปกติ โดยการสร้างแผนภาพกล่องต้องใช้ค่าสถิติดังต่อไปนี้คือ (1) ค่าควอไทล์ที่ 1 และควอไทล์ที่ 3 ในการชี้บ่งขอบเขตความยาวของกล่อง ซึ่งอธิบายการกระจายของข้อมูล (2) ค่าควอไทล์ที่ 2 ในการชี้บ่งตำแหน่งของค่ากลางของระบบและรูปร่างการแจกแจงข้อมูล ถ้าค่านี้แบ่งกล่องออกเป็นสองส่วนเท่ากัน ข้อมูลจะมีการแจกแจงแบบปกติหาก่อนไปด้านบนของกล่อง ข้อมูลจะมีการแจกแจงแบบเบ้ขวา และหาก่อนลงด้านล่าง

ข้อมูลจะมีการแจกแจงแบบเบ้ซ้าย (3) เส้นลักษณะคล้ายหนวดแมว (Whisker) เพื่อชี้บ่งข้อมูลที่ผิดปกติ โดยข้อมูลที่อยู่นอกเส้นหนวดแมวคือข้อมูลที่ผิดปกติ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)

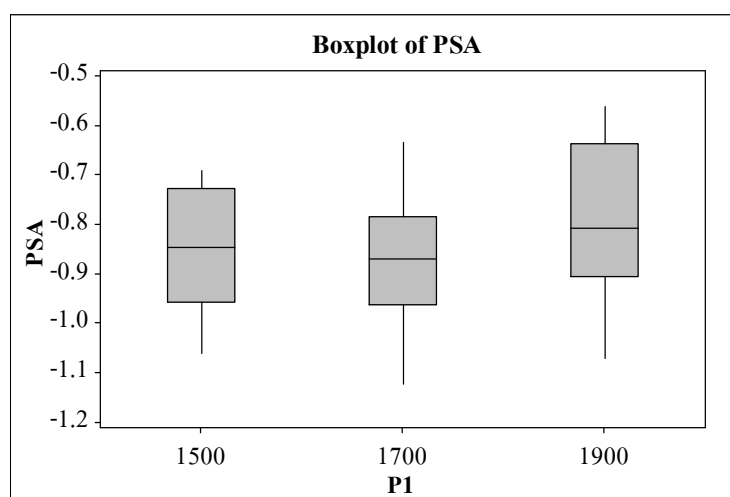
จากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่าผลการทดลองของการเชื่อม HGA ของพารามิเตอร์ P1 โดยการตั้งค่าในระดับสูง (1900) มีแนวโน้มของการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าการตั้งค่าระดับ P1 ในระดับต่ำ (1500) และระดับกลาง (1700)

จากรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าผลการทดลองของการเชื่อม HGA ของพารามิเตอร์ P2 โดยการตั้งค่าในระดับต่ำ (1) มีแนวโน้มของการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าการตั้งค่าระดับ P2 ในระดับกลาง (1.5) และระดับสูง (2)

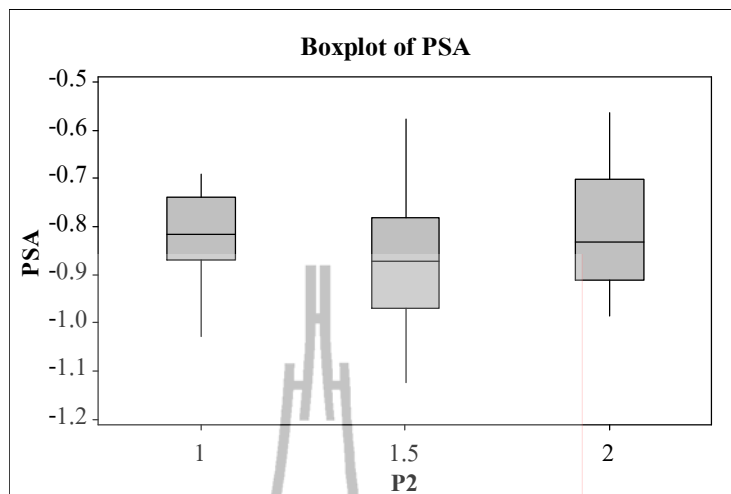
จากรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่าผลการทดลองของการเชื่อม HGA ของพารามิเตอร์ P3 โดยการตั้งค่าในระดับสูง (80) มีแนวโน้มของการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าการตั้งค่าระดับ P3 ในระดับต่ำ (45) และระดับกลาง (62.5)

จากรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่าผลการทดลองของการเชื่อม HGA ของพารามิเตอร์ P4 โดยการตั้งค่าในระดับต่ำ (170) มีแนวโน้มของการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าการตั้งค่าระดับ P4 ในระดับกลาง (285) และระดับสูง (400)

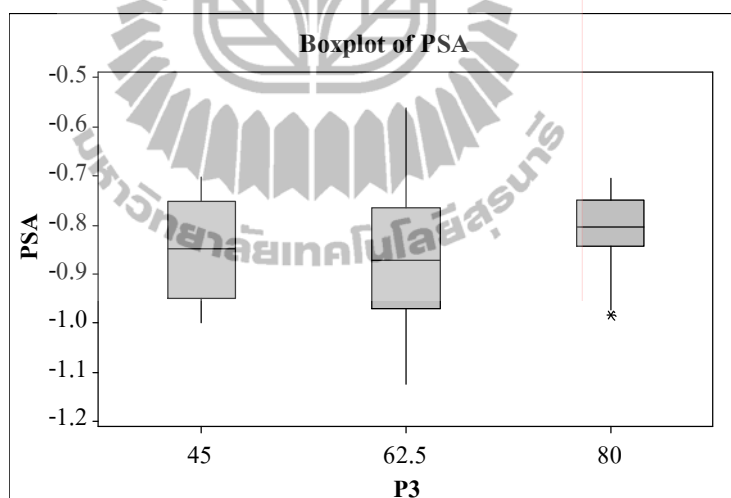
จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าผลการทดลองของการเชื่อม HGA ของพารามิเตอร์ P5 โดยการตั้งค่าในระดับสูง (10) มีแนวโน้มของการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าการตั้งค่าระดับ P5 ในระดับต่ำ (-20) และระดับกลาง (-5)



รูปที่ 4.1 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P1 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

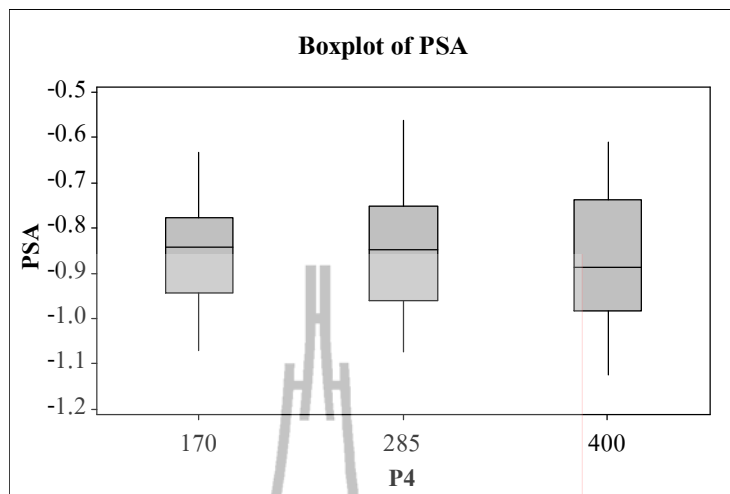


รูปที่ 4.2 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P2 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

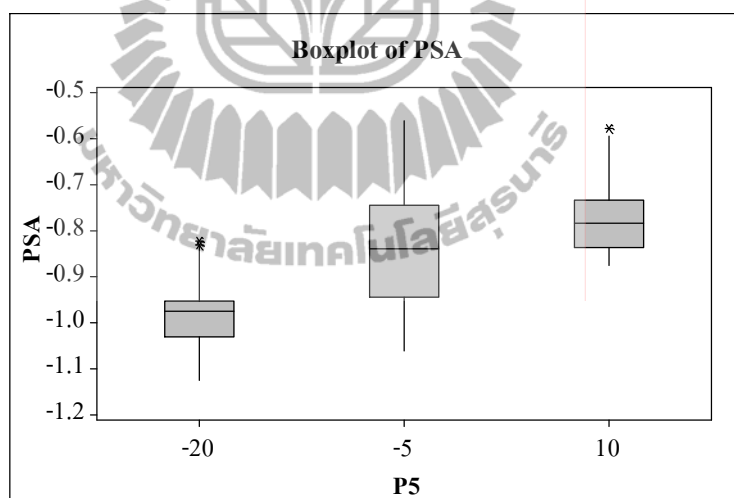


รูปที่ 4.3 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P3 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน





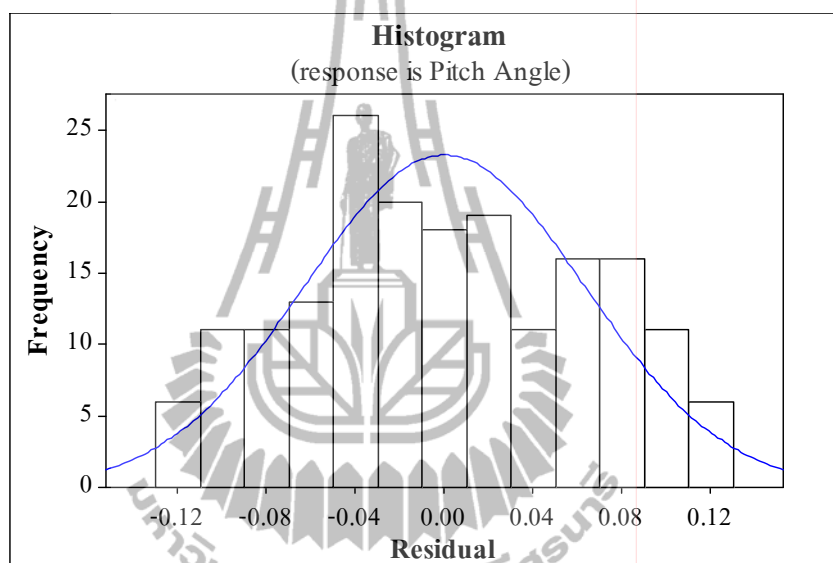
รูปที่ 4.4 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P4 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน



รูปที่ 4.5 แผนภาพกล่องของพารามิเตอร์ P5 ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

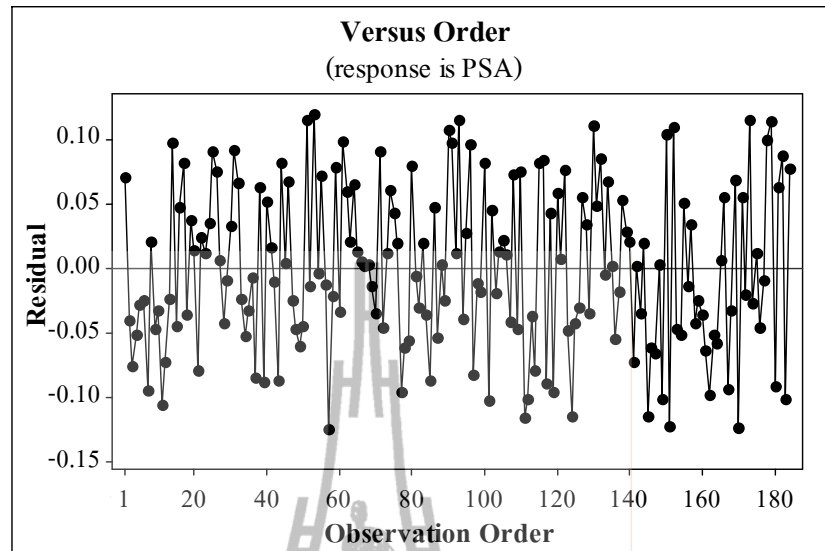
จากนั้นทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น กระบวนการทางสถิติที่อาศัยการนำกราฟเข้ามาช่วยวิเคราะห์ข้อมูล โดยนิยมทำการตรวจสอบ 3 ส่วน ได้แก่ การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน โดยรูปที่ 4.6 เป็นการตรวจสอบ

การกระจายแบบแจกแจงปกติ โดยนำค่าส่วนตกค้าง (ผลต่างระหว่างค่าผลตอบสนองจากการทดลองกับค่าผลตอบสนองจากสมการความสัมพันธ์) และค่าความถี่ของข้อมูลมาพล็อตกราฟซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าฮิสโตแกรมที่ได้มีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ โดยความผันแปรของข้อมูลมีลักษณะสมมาตรรอบค่ากลางค่าหนึ่ง และกระจายตัวอย่างสมมาตรรอบค่ากลาง ซึ่งพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงที่ไม่ผิดปกติ โดยการแจกแจงของข้อมูลมีความสมมาตร และข้อมูลไม่มีความเบ้



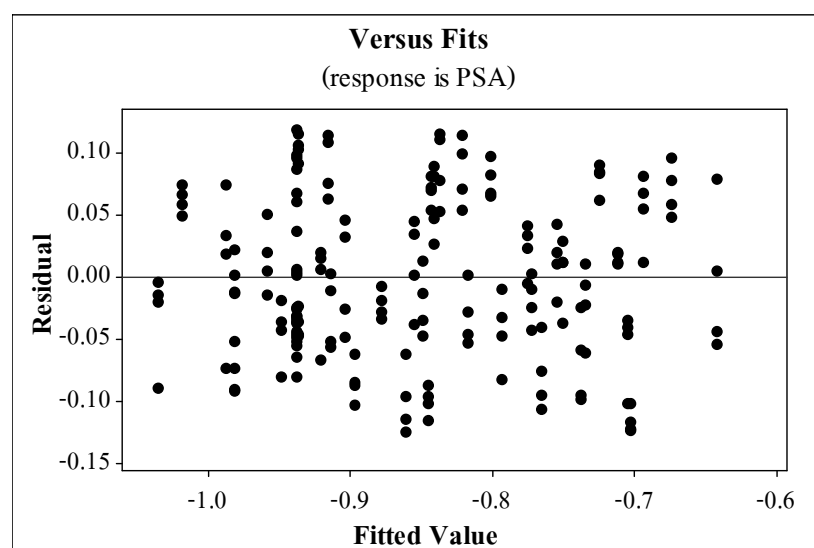
รูปที่ 4.6 ฮิสโตแกรมแสดงกระจายข้อมูลของ PSA

รูปที่ 4.7 เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residual Versus the Observation Order of the Data) โดยข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) คือค่าประมาณความคลาดเคลื่อนที่ข้อมูลเบี่ยงเบนไปจากสมการความสัมพันธ์ และลำดับของข้อมูล (Observation Order) จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบแกนอ้างอิงศูนย์ ไม่เอนเอียงไปส่วนใดส่วนหนึ่ง แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ

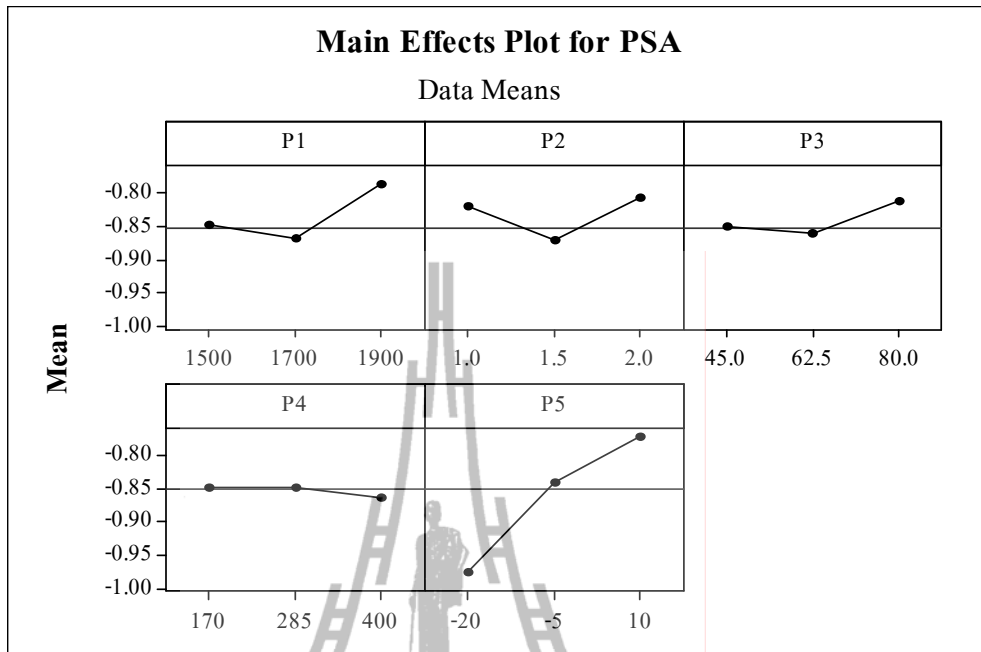


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล

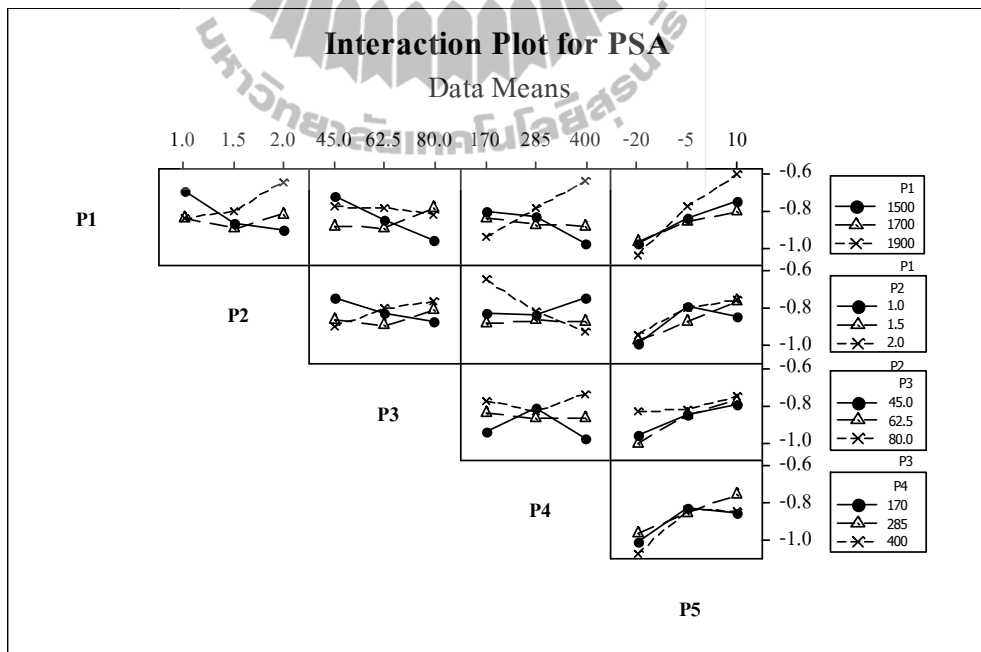
รูปที่ 4.8 เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน โดยการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plot of Residual Versus Fitted Values) พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายรอบแกนอ้างอิงศูนย์ในบางข้อมูล แต่ยังมีอีกหลายชุดข้อมูลที่มีการกระจายรอบแกนอ้างอิงที่ไม่คงที่ อันเนื่องมาจากสาเหตุผลลัพธ์ของค่ามุมเงยในแต่ละครั้ง ที่ได้จากการทดสอบในกระบวนการทำซ้ำ มีความแตกต่างกันมากเกินไป จึงก่อให้เกิดความแปรปรวนที่ไม่คงที่



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย



รูปที่ 4.9 กราฟค่าเฉลี่ยของปัจจัย P1, P2, P3, P4 และ P5



รูปที่ 4.10 กราฟผลกระทบบรร่วมระหว่างปัจจัย P1, P2, P3, P4 และ P5

จากรูปที่ 4.9 พบว่าปัจจัย P1, P2, P3, P4 และ P5 มีผลกระทบร่วมกัน (กราฟไม่ขนานกัน) โดยผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ทำให้ค่ามุมบิดตัวมีค่าต่ำสุด จากรูปที่ 4.10 มีดังนี้ (1) เมื่อ P1 และ P2 มีค่าในระดับสูงจะส่งผลให้ค่ามุมบิดตัวมีค่าต่ำสุดในทำนองเดียวกัน (2) เมื่อ P1 และ P3 มีค่าในระดับต่ำ (3) เมื่อ P1 และ P4 มีค่าในระดับสูง (4) เมื่อ P1 และ P5 มีค่าในระดับสูง (5) เมื่อ P2 และ P3 มีค่าในระดับต่ำ (6) เมื่อ P2 มีค่าในระดับสูงและ P4 มีค่าในระดับต่ำ (7) เมื่อ P2 และ P5 มีค่าในระดับสูง (8) เมื่อ P3 และ P4 มีค่าในระดับสูง (9) เมื่อ P3 และ P5 มีค่าในระดับสูง (10) เมื่อ P4 มีค่าในระดับกลางและ P5 มีค่าในระดับสูง

#### 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อตรวจสอบความผันแปรของแบบจำลองในเทอมต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ที่มีต่อการแยกตัวของ HGA แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12.6794	1.21948	10.397	0.000
P1	-0.0102	0.00106	-9.650	0.000
P2	-2.7347	0.34738	-7.872	0.000
P3	-0.0614	0.01007	-6.101	0.000
P4	-0.0081	0.00149	-5.435	0.000
P5	-0.0228	0.01118	-2.037	0.043
P1* P1	0.0000	0.00000	6.850	0.000
P2* P2	0.3302	0.04526	7.296	0.000
P3* P3	0.0002	0.00004	5.192	0.000
P4* P4	0.0000	0.00000	2.427	0.016
P5* P5	0.0000	0.00005	0.286	0.775
P1* P2	0.0010	0.00017	6.083	0.000
P1* P3	0.0000	0.00000	2.962	0.004
P1* P4	0.0000	0.00000	7.054	0.000
P1* P5	0.0000	0.00001	3.109	0.002
P2* P3	0.0077	0.00191	4.029	0.000

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (ต่อ)

Term	Coef	SE Coef	T	P
P2* P4	-0.0016	0.00029	-5.405	0.000
P2* P5	0.0014	0.00223	0.624	0.533
P3* P4	0.0000	0.00001	1.091	0.277
P3* P5	-0.0001	0.00006	-1.260	0.210
P4* P5	0.0000	0.00001	1.153	0.251

$$S = 0.0668503 \quad R\text{-Sq} = 72.00\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 68.56\%$$

จากตาราง Coef คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ SE Coef (Standard Error Coefficient) คือค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ เพื่อวัดความแม่นยำของการประมาณ ถ้ามีค่าน้อยความแม่นยำจะเพิ่มขึ้น ค่า T คือค่าอัตราส่วนระหว่าง Coef กับ SE Coef และค่า P คือค่าที่ถูกรู้ใช้เพื่อประเมินว่าปัจจัยใดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบ

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ตามตาราง 4.2 จะทำการตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ว่ามีผลกระทบต่อระบบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยใช้ค่า P ในการพิจารณาเปรียบเทียบกับ ค่าความผิดพลาดประเภทที่ 1 ( $\alpha$ ) ซึ่งค่านี้ เป็นค่าที่ใช้กำหนดขอบเขตของค่าความผิดพลาดประเภทที่ 1 ของการทดสอบสมมติฐาน โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้คือ 0.05 แต่ในความเป็นจริงค่านี้ใช้ได้ในช่วง 0.01-0.1 หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์พบว่าผลกระทบระหว่างปัจจัยของพารามิเตอร์ P5\*P5, P2\*P5, P3\*P4, P3\*P5 และ P4\*P5 มีค่า P-Value มากกว่าค่า  $\alpha$  ( $\alpha = 0.05$ ) ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของ HGA อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาในพจน์อื่น ๆ ได้แก่ P1\*P1, P2\*P2, P3\*P3, P4\*P4, P1\*P2, P1\*P3, P1\*P4, P1\*P5, P2\*P3 และ P2\*P4 พบว่ามีค่า P-Value น้อยกว่าค่า Alpha ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลกระทบต่อการทำงานของ HGA อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาที่ผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ คือ P1, P2, P3, P4 และ P5 มีผลกระทบต่อการทำงานของ HGA เช่นกัน

#### 4.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เป็นค่าที่อธิบายว่าสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการอธิบายความผันผวนของตัวแปรตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งเป็นสัดส่วน

ของค่า  $SS_{\text{Regr}}$  ต่อ SST โดยใช้ค่าในตารางที่ 4.3 ดังนั้น R จึงเป็นตัวระบุเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมูบิตตัวที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regr}}}{SS_T} = \frac{1.87276}{2.60120} = 0.71996 \approx 72\% \quad (4.1)$$

เมื่อ  $SS_{\text{Regr}}$  เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายได้  $SS_E$  เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายไม่ได้  $SS_T$  เป็นผลรวมระหว่าง  $SS_{\text{Regr}}$  กับ  $SS_E$

ในทางปฏิบัติค่า R จะมีความไวในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อจำนวนตัวแปรอิสระในสมการเพิ่มขึ้น ค่า R จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงใช้ค่า R ที่ทำการปรับค่าแล้ว ( $R_{\text{adj}}^2$ ) แทน

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{SS_E / DF_E}{SS_T / DF_T} = 1 - \frac{0.72844 / 163}{2.60120 / 183} = 68.56\% \quad (4.2)$$

เมื่อ  $DF_E$  เป็นองศาอิสระของส่วนที่อธิบายไม่ได้ (ค่าผิดพลาด)  $DF_T$  เป็นองศาอิสระของผลรวม

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า PSA

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	1.87276	1.87276	0.093638	20.95	0.000
Linear	5	0.75139	0.63783	0.127567	28.55	0.000
- P1	1	0.05607	0.41618	0.416177	93.13	0.000
- P2	1	0.00173	0.27696	0.276955	61.97	0.000
- P3	1	0.02460	0.16635	0.166355	37.22	0.000
- P4	1	0.00372	0.13199	0.131987	29.53	0.000
- P5	1	0.66526	0.01855	0.018545	4.15	0.043
Square	5	0.42803	0.42803	0.085606	19.16	0.000
- P1* P1	1	0.1116	0.20970	0.209705	46.92	0.000
- P2* P2	1	0.18186	0.23787	0.237871	53.23	0.000
- P3* P3	1	0.10757	0.12046	0.120462	26.96	0.000
- P4* P4	1	0.02663	0.02632	0.026318	5.89	0.016

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า PSA (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
- P5* P5	1	0.00037	0.00037	0.000366	0.08	0.775
Interaction	10	0.69334	0.69334	0.069334	15.51	0.000
- P1* P2	1	0.16536	0.16536	0.165360	37.00	0.000
- P1* P3	1	0.03920	0.03920	0.039204	8.77	0.004
- P1* P4	1	0.22236	0.22236	0.222360	49.76	0.000
- P1* P5	1	0.04321	0.04321	0.043207	9.67	0.002
- P2* P3	1	0.07255	0.07255	0.072546	16.23	0.000
- P2* P4	1	0.13057	0.13057	0.130572	29.22	0.000
- P2* P5	1	0.00174	0.00174	0.001742	0.39	0.533
- P3* P4	1	0.00532	0.00532	0.005320	1.19	0.277
- P3* P5	1	0.00709	0.00709	0.007090	1.59	0.210
- P4* P5	1	0.00594	0.00594	0.005939	1.33	0.251
Residual Error	163	0.72844	0.72844	0.004469		
Lack-of Fit	20	0.54398	0.54398	0.027199	21.08	0.000
- Pure Error	143	0.18446	0.18446	0.001290		
Total	183	2.60120				

#### 4.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยและพารามิเตอร์การเชื่อม

ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติ ได้ถูกนำมาสร้างสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSA และพารามิเตอร์การเชื่อมได้ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งสมการประกอบไปด้วยส่วนของผลกระทบหลัก ส่วนของผลกระทบร่วม และส่วนของผลกระทบกำลังสอง



$$\begin{aligned}
PSA = & 12.6794 - 2.7347P_2 - 3.3019P_2^2 \times 10^{-1} \\
& - (1.0223P_1 + 6.1426P_3 + 2.2765P_5) \times 10^{-2} \\
& - \left( \begin{array}{l} 8.1170P_4 - 1.0166P_1 \cdot P_2 - 7.6955P_2 \cdot P_3 \\ + 1.5711P_2 \cdot P_4 \end{array} \right) \times 10^{-3} \\
& - (-1.9181P_3 \cdot P_3) \times 10^{-4} \\
& - (-1.4143P_1 \cdot P_3 - 1.7322P_1 \cdot P_5) \times 10^{-5} \\
& - (-1.9376P_1 \cdot P_1 - 2.0762P_4 \cdot P_4 - 5.1256P_1 \cdot P_4) \times 10^{-6}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

จากสมการจะเห็นว่าพารามิเตอร์  $P_2$  มีผลกระทบต่อมุม PSA มากที่สุด ส่วนพารามิเตอร์  $P_1, P_3, P_4$  และ  $P_5$  มีผลกระทบต่อมุมยงเช่นกัน โดยเป็นความสัมพันธ์ของผลกระทบหลัก ความสัมพันธ์ของผลกระทบร่วม ได้แก่  $P_1 \cdot P_2, P_2 \cdot P_3, P_2 \cdot P_4, P_1 \cdot P_3, P_1 \cdot P_5$  และ  $P_1 \cdot P_4$  และ ความสัมพันธ์ของผลกระทบกำลังสอง ได้แก่  $P_1 \cdot P_1, P_2 \cdot P_2, P_3 \cdot P_3,$  และ  $P_4 \cdot P_4$

#### 4.5 การทดสอบความเหมาะสมของสมการ

เนื่องจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการไม่สามารถทราบสมการแท้จริงของข้อมูลได้ ถึงแม้จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ได้ ก็ไม่ได้หมายความว่าสมการมีความเหมาะสม ดังนั้นการทดสอบความเหมาะสมของสมการด้วยเทคนิค LOF จึงถูกใช้เพื่อพิจารณาความสมบูรณ์ของสมการที่ได้ โดยอยู่บนสมมติฐานการตรวจสอบ 2 ขั้นตอน คือ

1. ทดสอบว่าสามารถสร้างสมการได้หรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานให้  $H_0$  หมายถึงสมการไม่สามารถสร้างได้ และ  $H_1$  หมายถึงสมการสามารถสร้างได้ และ  $F_1$  เป็นตัวสถิติดังนี้

$$F_1 = \frac{MS_{Regr}}{MS_E} \tag{4.3}$$

การทดสอบจะเข้าเงื่อนไข  $H_1$  เมื่อ  $F_1 > F_{\alpha, (v_{Regr}, v_{Re. E.})}$  จากการตรวจสอบจากตาราง ANOVA ในตารางที่ 4.3  $F_1 = 20.95$  และจากตาราง Percentage Point of the F Distribution (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551) ค่า  $F_{0.05, (20, 163)} \approx 1.57$  ซึ่งจะเข้าเงื่อนไข  $H_1$  คือ สมการสามารถสร้างได้หรือสามารถทดสอบสมมติฐานได้จากค่า P (P-Value) จากตาราง ANOVA ในตารางที่ 4.3 หาก P มีค่าน้อยกว่า  $\alpha$  ก็จะเข้าเงื่อนไข  $H_1$  จากการทดสอบสมมติฐานนี้พบว่า P มีค่าเท่ากับ 0.000 เมื่อ  $\alpha = 0.05$  (ความน่าเชื่อถือ 95 เปอร์เซ็นต์) จึงเข้าเงื่อนไข  $H_1$  คือ สมการสามารถสร้างได้

2. ทำการทดสอบเมื่อสมมติฐานในข้อ 1 เข้าเงื่อนไข  $H_1$  นั่นคือสมการสามารถสร้างได้ โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้  $H_0$  แทนสมการเหมาะสมแล้ว  $H_1$  แทนสมการขาดความเหมาะสม และ  $F_2$  เป็นตัวสถิติดังนี้

$$F_2 = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (4.4)$$

โดยที่การทดสอบจะเข้าเงื่อนไข  $H_1$  เมื่อ  $F_2 > F_{\alpha, (v_{LOF}, v_{PE})}$  จากการตรวจสอบจากตาราง ANOVA ในตารางที่ 3  $F_2 = 21.08$  และจากตาราง Percentage Point of the F Distribution (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551) ค่า  $F_{0.05, (20, 143)} \approx 1.57$  ซึ่งจะเข้าเงื่อนไข  $H_1$  คือ สมการขาดความเหมาะสม หรือสามารถทดสอบสมมติฐานได้จากค่า P (P-Value) จากตาราง ANOVA ในตารางที่ 4.3 เช่นเดียวกับการทดสอบที่ 1 หาก P มีค่ามากกว่า  $\alpha$  ก็จะเข้าเงื่อนไข  $H_0$  จากการทดสอบสมมติฐานนี้พบว่า P มีค่า 0.000 เมื่อ  $\alpha = 0.05$  จึงพบว่าเข้าเงื่อนไข  $H_1$  หรืออีกนัยหนึ่งคือ สมการขาดความเหมาะสมเมื่อ  $MS_{LOF}$  เป็นค่าทางสถิติ  $MS_{PE}$  เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสอง  $v_{LOF}$  เป็นองศาอิสระของสมการความสัมพันธ์  $v_{PE}$  เป็นองศาอิสระของค่าผิดพลาด

จากข้อสรุปข้างต้นวิเคราะห์ได้ว่าเนื่องจากในการเก็บข้อมูลที่มีค่าตัวแปรอิสระซ้ำในที่นี้คือพารามิเตอร์การเชื่อม ผลลัพธ์ของค่ามุม PSA ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันมากเกินไป ซึ่งเกิดจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงที่สามารถทำการเชื่อมต่อได้ กล่าวคือค่าพารามิเตอร์การเชื่อมถูกกำหนดนอกค่าการทำงานปกติ โดยคำนึงเพียงว่าค่านี้จะต้องไม่ทำให้เครื่องเชื่อมเสียหาย และมีการเชื่อมเกิดขึ้น โดยไม่คำนึงถึงว่ารอยเชื่อมจะสมบูรณ์หรือไม่เช่น รอยเชื่อมเกิดการไหม้ รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ เป็นต้น ซึ่งในการทดสอบนี้ได้นำชิ้นงานที่เกิดผลกระทบดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วย จึงเกิดการแปรปรวนของข้อมูลทำให้สมการที่ได้นั้นขาดความเหมาะสม

#### 4.6 แนวทางปรับปรุงเพื่อลดผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่มีผลกระทบต่อระบบ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้นได้ทำการลดพารามิเตอร์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบซึ่งพิจารณาผ่านค่า F โดยเลือกเฉพาะผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีค่า F ต่ำกว่า 10 ได้แก่  $P_4 * P_4$ ,  $P_5 * P_5$ ,  $P_1 * P_3$ ,  $P_1 * P_5$ ,  $P_2 * P_5$ ,  $P_3 * P_4$ ,  $P_3 * P_5$ ,  $P_4 * P_5$  ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีลดผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่มีผลต่อระบบ

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	12	1.74326	1.74326	0.145271	28.95	0.000
Linear	5	0.75139	1.28153	0.256306	51.09	0.000
- P1	1	0.05607	0.38011	0.380114	75.76	0.000
- P2	1	0.00173	0.26762	0.267623	53.34	0.000
- P3	1	0.02460	0.16483	0.164831	32.85	0.000
- P4	1	0.00372	0.10711	0.107115	21.35	0.000
- P5	1	0.66526	0.66526	0.665257	32.60	0.000
Square	3	0.40103	0.40103	0.133677	26.64	0.000
- P1* P1	1	0.11160	0.19887	0.198867	39.64	0.000
- P2* P2	1	0.18186	0.22814	0.228139	45.47	0.000
- P3* P3	1	0.10757	0.10757	0.10757	21.44	0.000
Interaction	4	0.59084	0.59084	0.147710	29.44	0.000
- P1* P2	1	0.16536	0.16536	0.16536	32.96	0.000
- P1* P4	1	0.22236	0.22236	0.22236	44.32	0.000
- P2* P3	1	0.07255	0.07255	0.072546	14.46	0.000
- P2* P3	1	0.13057	0.13057	0.130572	26.02	0.000
Residual Error	171	0.85794	0.85794	0.005017		
Lack-of Fit	28	0.67348	0.67348	0.024053	18.65	0.000
- Pure Error	143	0.18446	0.18446	0.001290		
Total	183	2.60120				

R-Sq = 67.02%

R-Sq(pred) = 62.17%

R-Sq(adj) = 64.70%

จากข้อมูลในตารางพบว่าค่า  $R_{adj}^2$  มีค่าเท่ากับ 64.70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลวิเคราะห์เดิมกรณียังไม่ลดผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ไม่มีผลต่อระบบซึ่งมีค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 68.56 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มากนักเมื่อพิจารณาที่ความคุ้มค่าของทรัพยากรการทดลองเมื่อทำการลดพารามิเตอร์ลงจะส่งผลให้จำนวนการทดลองลดลง ลดระยะเวลาการทำงานลง มีความคุ้มค่ามากกว่าโดยที่ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเชื่อมกับค่ามุม PSA ของสไลเดอร์ วิธีสถิติและการออกแบบการทดลองถูกประยุกต์ใช้เพื่อสร้างรูปแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง พารามิเตอร์การเชื่อมที่ศึกษามี 5 พารามิเตอร์ การออกแบบการทดลองใช้โปรแกรม Minitab บนพื้นฐานของวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งได้รูปแบบการทดสอบทั้งสิ้น 184 รูปแบบ จาก 4 ชุดการทดสอบและการทำซ้ำ 4 ครั้ง จากการทดสอบพารามิเตอร์ที่ศึกษาถูกแปรค่าการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่การเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ กล่าวคือค่าที่เซ็จะต้องไม่ทำให้เครื่องเชื่อมเสียหาย และต้องปรากฏร่องรอยการเชื่อมขึ้นในบริเวณที่กำหนด โดยไม่สนใจว่าการเชื่อมจะสมบูรณ์หรือไม่ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบดังกล่าวพบว่า มีรอยเชื่อมดี รอยเชื่อมใหม่ และรอยเชื่อมสะพานคิดเป็น 58, 32 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมกับค่า PSA พบว่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อค่า PSA อย่างมีนัยสำคัญ โดยพารามิเตอร์ P2 ส่งผลกระทบมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  ซึ่งเป็นตัวระบุเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า PSA บนเงื่อนไขระดับความน่าเชื่อถือ 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 68.56 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าสมการความสัมพันธ์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากข้อมูลการทดลองยังขาดความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรืออธิบายพฤติกรรมของระบบ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือข้อมูลการทดลองไม่สามารถนำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมได้ นั่นคือสมการ (หรือข้อมูล) มีความเหมาะสมเพียง 68.56 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจเป็นเพราะข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีการกระจายตัวอย่างไร้รูปแบบมากเกินไป การทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่การเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพของรอยเชื่อม ผลกระทบของรอยเชื่อมบางส่วนที่ไม่ได้คุณภาพ อาทิ รอยเชื่อมใหม่ รอยเชื่อมสะพาน นั้นให้พฤติกรรมของ PSA ที่ไร้รูปแบบแนวโน้มและคาดการณ์ได้ไม่ชัดเจน เมื่อนำชิ้นงานในลักษณะดังกล่าวมาวิเคราะห์ร่วมด้วยจึงเกิดการแปรปรวนของข้อมูลโดยรวมจนนำไปสู่การได้สมการที่มีความเหมาะสมน้อย นั่นเอง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงพอสรุปได้ว่า การทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไม่สามารถนำไปสู่การได้ข้อมูลที่เหมาะสมต่อการอธิบายคุณลักษณะหรือพฤติกรรมของระบบได้อย่างชัดเจน

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลวิจัยนี้พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมุม PSA ได้ 68.56 เปอร์เซ็นต์ส่วนที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ ส่งผลให้สมการที่ได้ขึ้นขาดความเหมาะสม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สมการที่ได้ขาดความเหมาะสม อาจเกิดจากในกรณีที่การเก็บข้อมูลที่มีค่าตัวแปรอิสระซ้ำ ผลลัพธ์ของค่ามุมเบี่ยงในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันมากเกินไป จากสาเหตุที่ในการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์การเชื่อมก่อนทำการทดลอง และระหว่างทำการทดลองเป็นการทำงานบนเครื่องเชื่อมคนละเครื่องจึงอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดของการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การเชื่อม จุดสังเกตคือในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกันแต่เครื่องเชื่อมต่างกัน บางครั้งเกิดรอยเชื่อมที่ดี บางครั้งเกิดรอยเชื่อมที่ไหม้ ซึ่งโดยปกติหากเป็นการเชื่อมโดยเครื่องเดียวกันโดยที่ปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกัน ผลลัพธ์ที่ได้ต้องเหมือนกันหรือไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะกำหนดเครื่องเชื่อมที่จะทำการทดลองได้ จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลลัพธ์ของสมการที่ได้ขาดความเหมาะสม และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากในการออกแบบชุดการทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งศึกษาพารามิเตอร์การเชื่อม 5 พารามิเตอร์ ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคนมีชุดการทดลองทั้งหมด 46 ชุดการทดลอง โดยหากทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง จะมีชุดการทดลองทั้งหมด 184 ชุดการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดให้ทำการทดลองทั้ง 184 ชุดการทดลองเป็นแบบสุ่ม ซึ่งในการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคนโดยใช้โปรแกรม Minitab สามารถที่จะเลือกใช้ฟังก์ชัน Block on Replicate ได้ซึ่งการเลือกฟังก์ชันนี้จะทำให้การทดลองแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม โดยในแต่ละกลุ่มจะมี 46 ชุดการทดลอง และจะถูกกำหนดการทดลองแบบสุ่มในแต่ละกลุ่ม ซึ่งอาจจะทำให้การวิเคราะห์ผลไม่เกิดความแปรปรวนมากนัก

## รายการอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2545). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม1 (ประมวลผลด้วย MINITAB). (พิมพ์ครั้งที่4). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2545). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม2 (ประมวลผลด้วย MINITAB). (พิมพ์ครั้งที่8). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- ปารเมศ ชูดีมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่1). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. (พิมพ์ครั้งที่1). ท้อป
- ณรัตน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ สุภอัยภู์ พันศิริพัฒน์ชูศักดิ์ พรสิงห์ และ อาณัติ วัฒนสังสุทธิ์ (2550). การสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อพัฒนาระบบการเชื่อมแบบจุด. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ประจำปี พ.ศ.2550, 24-26 ตุลาคม 2550
- สมหมาย สารมาท และ วิชัย ฉัตรทินวัฒน์ (2550). การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ฉบับที่ 14(2-3) หน้า 34-41
- อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูรย์ (2551). การหาสภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ประจำปี พ.ศ.2551, 20-22 ตุลาคม 2551
- อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูรย์ (2550). ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ประจำปี พ.ศ.2550, 24-26 ตุลาคม 2550
- อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูรย์ (2549). พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกน ฟลักซ์ สำหรับเหล็ก เอสที 37.การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงาน. ประจำปี พ.ศ.2549
- Box, G.E.P., Behnken, D.W., 1960. **Some new three level designs for the study of quantitative variable**, Technometrics 2, 455-475
- Montgomery, D.C. 2001. **Design and analysis of experiment**. (5<sup>th</sup> Edition), The United States of America: John Wiley & Sons.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง รูปแบบการทดลอง  
แบบบล็อกซ์-เบห์นเคนโดยใช้โปรแกรม Minitab

## ก.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยใช้โปรแกรม Minitab

ในการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบแผนการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

สำหรับการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design > เลือก Box-Behnken > กำหนด Number of Factors เท่ากับ 5 > เข้าฟังก์ชัน Design กำหนด Number of Replicates เท่ากับ 4 > OK > OK

โดยจะได้รูปแบบการทดลองดังตาราง ก.1

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
98	1	2	1	0	0	1	-1	0
103	2	2	1	0	-1	0	0	1
57	3	2	1	0	-1	0	0	1
164	4	2	1	1	0	0	-1	0
114	5	2	1	0	1	-1	0	0
49	6	2	1	-1	1	0	0	0
163	7	2	1	-1	0	0	-1	0
178	8	2	1	0	1	0	1	0
89	9	0	1	0	0	0	0	0
22	10	2	1	0	1	-1	0	0
149	11	2	1	0	-1	0	0	1
80	12	2	1	1	0	0	0	-1
125	13	2	1	-1	0	0	0	-1
42	14	0	1	0	0	0	0	0
79	15	2	1	-1	0	0	0	-1



ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
14	16	2	1	1	0	-1	0	0
13	17	2	1	-1	0	-1	0	0
182	18	0	1	0	0	0	0	0
90	19	0	1	0	0	0	0	0
161	20	2	1	0	-1	1	0	0
44	21	0	1	0	0	0	0	0
32	22	2	1	0	0	1	0	1
58	23	2	1	0	1	0	0	1
48	24	2	1	1	-1	0	0	0
130	25	2	1	0	1	0	-1	0
75	26	2	1	0	0	-1	0	-1
40	27	2	1	0	1	0	1	0
101	28	2	1	0	-1	0	0	-1
158	29	2	1	0	0	0	1	1
95	30	2	1	-1	1	0	0	0
76	31	2	1	0	0	1	0	-1
29	32	2	1	0	0	-1	0	-1
123	33	2	1	0	0	-1	0	1
65	34	2	1	0	0	0	-1	1
112	35	2	1	0	0	0	1	1
160	36	2	1	0	1	-1	0	0
145	37	2	1	0	0	-1	1	0
37	38	2	1	0	-1	0	-1	0
18	39	2	1	0	0	0	1	-1
10	40	2	1	0	1	0	0	-1

ตาราง ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
86	41	2	1	0	1	0	1	0
26	42	2	1	1	0	0	-1	0
7	43	2	1	0	0	-1	1	0
106	44	2	1	1	0	-1	0	0
181	45	0	1	0	0	0	0	0
151	46	2	1	-1	0	-1	0	0
183	47	0	1	0	0	0	0	0
33	48	2	1	-1	0	0	0	-1
150	49	2	1	0	1	0	0	1
133	50	0	1	0	0	0	0	0
173	51	2	1	-1	0	0	0	1
56	52	2	1	0	1	0	0	-1
134	53	0	1	0	0	0	0	0
110	54	2	1	0	0	0	1	-1
54	55	2	1	0	0	1	1	0
69	56	2	1	0	-1	1	0	0
153	57	2	1	-1	0	1	0	0
12	58	2	1	0	1	0	0	1
82	59	2	1	1	0	0	0	1
23	60	2	1	0	-1	1	0	0
45	61	0	1	0	0	0	0	0
167	62	2	1	0	0	-1	0	-1
1	63	2	1	-1	-1	0	0	0
59	64	2	1	-1	0	-1	0	0
131	65	2	1	0	-1	0	1	0

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบ้นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
142	66	2	1	1	1	0	0	0
19	67	2	1	0	0	0	-1	1
94	68	2	1	1	-1	0	0	0
64	69	2	1	0	0	0	1	-1
70	70	2	1	0	1	1	0	0
60	71	2	1	1	0	-1	0	0
111	72	2	1	0	0	0	-1	1
85	73	2	1	0	-1	0	1	0
91	74	0	1	0	0	0	0	0
159	75	2	1	0	-1	-1	0	0
119	76	2	1	-1	0	0	1	0
97	77	2	1	0	0	-1	-1	0
15	78	2	1	-1	0	1	0	0
118	79	2	1	1	0	0	-1	0
96	80	2	1	1	1	0	0	0
104	81	2	1	0	1	0	0	1
46	82	0	1	0	0	0	0	0
93	83	2	1	-1	-1	0	0	0
177	84	2	1	0	-1	0	1	0
143	85	2	1	0	0	-1	-1	0
3	86	2	1	-1	1	0	0	0
50	87	2	1	1	1	0	0	0
72	88	2	1	1	0	0	-1	0
135	89	0	1	0	0	0	0	0
168	90	2	1	0	0	1	0	-1

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
105	91	2	1	-1	0	-1	0	0
120	92	2	1	1	0	0	1	0
30	93	2	1	0	0	1	0	-1
24	94	2	1	0	1	1	0	0
152	95	2	1	1	0	-1	0	0
174	96	2	1	1	0	0	0	1
66	97	2	1	0	0	0	1	1
34	98	2	1	1	0	0	0	-1
147	99	2	1	0	-1	0	0	-1
144	100	2	1	0	0	1	-1	0
53	101	2	1	0	0	-1	1	0
2	102	2	1	1	-1	0	0	0
67	103	2	1	0	-1	-1	0	0
139	104	2	1	-1	-1	0	0	0
155	105	2	1	0	0	0	-1	-1
47	106	2	1	-1	-1	0	0	0
169	107	2	1	0	0	-1	0	1
52	108	2	1	0	0	1	-1	0
115	109	2	1	0	-1	1	0	0
165	110	2	1	-1	0	0	1	0
16	111	2	1	1	0	1	0	0
51	112	2	1	0	0	-1	-1	0
140	113	2	1	1	-1	0	0	0
55	114	2	1	0	-1	0	0	-1
166	115	2	1	1	0	0	1	0

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
176	116	2	1	0	1	0	-1	0
63	117	2	1	0	0	0	-1	-1
170	118	2	1	0	0	1	0	1
107	119	2	1	-1	0	1	0	0
36	120	2	1	1	0	0	0	1
43	121	0	1	0	0	0	0	0
129	122	2	1	0	-1	0	-1	0
141	123	2	1	-1	1	0	0	0
61	124	2	1	-1	0	1	0	0
4	125	2	1	1	1	0	0	0
137	126	0	1	0	0	0	0	0
100	127	2	1	0	0	1	1	0
73	128	2	1	-1	0	0	1	0
9	129	2	1	0	-1	0	0	-1
81	130	2	1	-1	0	0	0	1
128	131	2	1	1	0	0	0	1
84	132	2	1	0	1	0	-1	0
78	133	2	1	0	0	1	0	1
74	134	2	1	1	0	0	1	0
109	135	2	1	0	0	0	-1	-1
41	136	0	1	0	0	0	0	0
68	137	2	1	0	1	-1	0	0
127	138	2	1	-1	0	0	0	1
39	139	2	1	0	-1	0	1	0
148	140	2	1	0	1	0	0	-1

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
27	141	2	1	-1	0	0	1	0
138	142	0	1	0	0	0	0	0
179	143	0	1	0	0	0	0	0
113	144	2	1	0	-1	-1	0	0
5	145	2	1	0	0	-1	-1	0
99	146	2	1	0	0	-1	1	0
132	147	2	1	0	1	0	1	0
31	148	2	1	0	0	-1	0	1
116	149	2	1	0	1	1	0	0
122	150	2	1	0	0	1	0	-1
154	151	2	1	1	0	1	0	0
175	152	2	1	0	-1	0	-1	0
20	153	2	1	0	0	0	1	1
184	154	0	1	0	0	0	0	0
121	155	2	1	0	0	-1	0	-1
17	156	2	1	0	0	0	-1	-1
124	157	2	1	0	0	1	0	1
136	158	0	1	0	0	0	0	0
71	159	2	1	-1	0	0	-1	0
171	160	2	1	-1	0	0	0	-1
87	161	0	1	0	0	0	0	0
25	162	2	1	-1	0	0	-1	0
172	163	2	1	1	0	0	0	-1
117	164	2	1	-1	0	0	-1	0
102	165	2	1	0	1	0	0	-1

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่ได้จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

Std Order	Run Order	PtType	Blocks	A	B	C	D	E
28	166	2	1	1	0	0	1	0
11	167	2	1	0	-1	0	0	1
92	168	0	1	0	0	0	0	0
180	169	0	1	0	0	0	0	0
62	170	2	1	1	0	1	0	0
6	171	2	1	0	0	1	-1	0
156	172	2	1	0	0	0	1	-1
8	173	2	1	0	0	1	1	0
157	174	2	1	0	0	0	-1	1
21	175	2	1	0	-1	-1	0	0
162	176	2	1	0	1	1	0	0
77	177	2	1	0	0	-1	0	1
146	178	2	1	0	0	1	1	0
83	179	2	1	0	-1	0	-1	0
126	180	2	1	1	0	0	0	-1
38	181	2	1	0	1	0	-1	0
88	182	0	1	0	0	0	0	0
108	183	2	1	1	0	1	0	0
35	184	2	1	-1	0	0	0	1



ขั้นตอนการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของพจน์  
ต่าง ๆ ของพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีผลต่อการงอตัวของ HGA



## ข.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของเทอมต่าง ๆ ของพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีผลต่อการงอตัวของ HGA

หลังจากได้ทำการทดลองตามแผนที่ได้ออกแบบไว้จึงนำชิ้นงานเชื่อมนั้นมาตรวจวัดค่า PSA และนำผลการตรวจวัดนั้นป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม MINITAB ในคอลัมน์ที่อยู่ถัดจาก Worksheet โดยกำหนดชื่อคอลัมน์ชื่อ PSA จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ดังนี้

1. เมื่อเปิดเข้าสู่ไฟล์ที่ได้ออกแบบการทดลองแล้ว เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design
2. เลือกตัวแปรตอบสนอง ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ทำการวิเคราะห์นี้คือ คอลัมน์ PSA
3. กำหนดเทอมของพารามิเตอร์โดยเลือกลักษณะการวิเคราะห์เป็น Full Quadratic
4. คลิก OK
5. โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของค่า PSA
6. ทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดคลื่นใจ
7. ตรวจสอบค่า Lack-of-Fit
8. สร้างสมการความสัมพันธ์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมต่างๆ ของพารามิเตอร์ไปเขียนสมการความสัมพันธ์กับค่า PSA

โดยผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม MINITAB มีรายละเอียดดังนี้

### Box-Behnken Design

Factors: 5 Replicates: 4

Base runs: 46 Total runs: 184

Base blocks: 1 Total blocks: 1

Center points: 24

**The analysis was done using coded units.**

**Estimated Regression Coefficients for PSA**

<b>Term</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Cons.	12.6794	1.21948	10.397	0.000
A	-0.0102	0.00106	-9.650	0.000
B	-2.7347	0.34738	-7.872	0.000
C	-0.0614	0.01007	-6.101	0.000
D	-0.0081	0.00149	-5.435	0.000
E	-0.0228	0.01118	-2.037	0.043
A*A	0.0000	0.00000	6.850	0.000
B*B	0.3302	0.04526	7.296	0.000
C*C	0.0002	0.00004	5.192	0.000
D*D	0.0000	0.00000	2.427	0.016
E*E	0.0000	0.00005	0.286	0.775
A*B	0.0010	0.00017	6.083	0.000
A*C	0.0000	0.00000	2.962	0.004
A*D	0.0000	0.00000	7.054	0.000
A*E	0.0000	0.00001	3.109	0.002
B*C	0.0077	0.00191	4.029	0.000
B*D	-0.0016	0.00029	-5.405	0.000
B*E	0.0014	0.00223	0.624	0.533
C*D	0.0000	0.00001	1.091	0.277
C*E	-0.0001	0.00006	-1.260	0.210
D*E	0.0000	0.00001	1.153	0.251

S = 0.0668503

R-Sq = 72.00%

R-Sq(adj) = 68.56%

### Analysis of Variance for PSA

Sour.	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regr.	20	1.87276	1.87276	0.093638	20.95	0.000
Lin.	5	0.75139	0.63783	0.127567	28.55	0.000
A	1	0.05607	0.41618	0.416177	93.13	0.000
B	1	0.00173	0.27696	0.276955	61.97	0.000
C	1	0.02460	0.16635	0.166355	37.22	0.000
D	1	0.00372	0.13199	0.131987	29.53	0.000
E	1	0.66526	0.01855	0.018545	4.15	0.043
Squ.	5	0.42803	0.42803	0.085606	19.16	0.000
A*A	1	0.1116	0.20970	0.209705	46.92	0.000
B*B	1	0.18186	0.23787	0.237871	53.23	0.000
C*C	1	0.10757	0.12046	0.120462	26.96	0.000
D*D	1	0.02663	0.02632	0.026318	5.89	0.016
E*E	1	0.00037	0.00037	0.000366	0.08	0.775
Int.	10	0.69334	0.69334	0.069334	15.51	0.000
A*B	1	0.16536	0.16536	0.165360	37.00	0.000
A*C	1	0.03920	0.03920	0.039204	8.77	0.004
A*D	1	0.22236	0.22236	0.222360	49.76	0.000
A*E	1	0.04321	0.04321	0.043207	9.67	0.002
B*C	1	0.07255	0.07255	0.072546	16.23	0.000
B*D	1	0.13057	0.13057	0.130572	29.22	0.000
B*E	1	0.00174	0.00174	0.001742	0.39	0.533
C*D	1	0.00532	0.00532	0.005320	1.19	0.277
C*E	1	0.00709	0.00709	0.007090	1.59	0.210
D*E	1	0.00594	0.00594	0.005939	1.33	0.251

<b>Re.E.</b>	163	0.72844	0.72844	0.004469		
LOF	20	0.54398	0.54398	0.027199	21.08	0.000
P.E.	143	0.18446	0.18446	0.001290		
<b>Tot.</b>	183	2.60120				

**Estimated Regression Coefficients for PSA using data in uncoded units**

<b>Term</b>	<b>Coef</b>
Constant	12.6794
A	-0.0102230
B	-2.73466
C	-0.0614256
D	-0.00811696
E	0.0227648
A*A	1.93765E-06
B*B	0.330188
C*C	0.000191814
D*D	2.07616E-06
E*E	1.43870E-05
A*B	0.00101661
A*C	1.41428E-05
A*D	5.12555E-06
A*E	1.73219E-05
B*C	0.00769551
B*D	-0.00157108
B*E	0.00139140
C*D	9.06053E-06
C*E	-8.01902E-05
D*E	1.11688E-05



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ธนพงศ์ ปัญจิจิต และ กิรติ สุลักษณ์. แบบจำลองของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์สำหรับการเชื่อมรอยต่อเกย. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 25. 19-21 ตุลาคม 2554

ธนพงศ์ ปัญจิจิต กนต์ธร ชานิประศาสน์ และ กิรติ สุลักษณ์. ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อมุมเงยสำหรับกระบวนการเชื่อมวงจรรีเล็คทรอนิกส์. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 ประจำเดือนมกราคม-มีนาคม 2555





## ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อมุมเงยสำหรับกระบวนการเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์

### Effect of Welding Parameter on Pitch Angle for Electronic Circuit Process

ธนพงศ์ ปัญจิต<sup>1)</sup> กนต์ธร จำนัประศาสน์<sup>2)</sup> และ กิรติ สุลักษณ์<sup>3)</sup>

Thanapong Puchit<sup>1)</sup> Kontom Chamniprasat<sup>2)</sup> and Keerati Sulaksana<sup>3)</sup>

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Received November 2011

Accepted January 2012

#### บทคัดย่อ

การเชื่อมมีความสำคัญต่อการประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการดังกล่าวมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ต้องควบคุมเพื่อให้การเชื่อมมีคุณภาพ ได้แก่ ค่าตั้งไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม การศึกษาลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อม งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อมุมเงยตัวของชิ้นงานหลังเชื่อม วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคนถูกนำมาใช้ออกแบบการทดสอบพารามิเตอร์ของเครื่องเชื่อมถูกแปรค่าการทดสอบบนเครื่องจักรเชื่อมเกิดขึ้นได้ ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยให้ความสนใจความแปรปรวนเป็นหลัก จากนั้นนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยตัวและพารามิเตอร์การเชื่อม แบบจำลองที่ได้บ่งชี้ถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีต่อมุมเงยตัวซึ่งนำไปสู่การปรับใช้ในกระบวนการเชื่อมได้

**คำสำคัญ :** การเชื่อม, การออกแบบการทดลอง, มุมเงย, สมการความสัมพันธ์, วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน

#### Abstract

Laser welding process plays important role in assembling the small component. In the process, there are many parameters that must be controlled in order to yield the good welding quality such as current power, welding time, inert gas feed rate, pressing force, and welding position. An understanding in the characteristics of those parameters makes the engineers to improve the quality of welding. This research studies the effects of those influent parameters to the pitch angle of the welding joints. The Box-Behnken method is investigated for design the experiment. The parameters for controlling the machine are varied within the

ทดลอง ลำดับการทดลองที่ใช้เก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรใช้วิธีบล็อกหรือการสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ (5) ทำการทดลอง ติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวังจนแน่ใจว่าทุกอย่างเป็นไปตามแผน (6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อหาผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ มีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ และ (7) สรุปผลโดยนำเอาวิธีการทางกราฟมาช่วย นอกจากนี้ควรทำการทดลองเพื่อยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุป

### 2.3. แนวทางการออกแบบการทดลอง

สถิติเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวมนำเสนอ และวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ เป็นเครื่องมือช่วยอธิบายลักษณะของข้อมูลประมาณค่าที่แท้จริงของระบบ [3] จัดแบ่งได้ 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

1) ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล (Central tendency) ใช้หาทิศทางของข้อมูล ค่านี้เกี่ยวข้องกับค่าสถิติ 3 ค่าได้แก่ (1) ค่าเฉลี่ย (Mean) ถูกใช้เพื่อนำไปใช้หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S) ของข้อมูล (2) ค่ามัธยฐาน (Median) คือค่าในตำแหน่งกลางของข้อมูล ถูกใช้เมื่อข้อมูลมีค่านับมาก และ (3) ค่าฐานนิยม (Mode) เป็นค่าความถี่สูงสุดในข้อมูลชุดนั้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะต้องมีการวิเคราะห์ก่อนว่าข้อมูลมีความเบี่ยงเบนโดยธรรมชาติหรือไม่เพราะจะมีผลต่อค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลาง

2) ค่าการกระจาย (Dispersion) หรือค่าการเปลี่ยนแปลงในระบบ สามารถวัดได้ด้วยค่าทางสถิติหลายค่าด้วยกัน เช่น ค่าพิสัย (Range)

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวน (Variance:  $S^2$ ) เป็นต้น

ค่าสถิติทั้ง 2 กลุ่มจะเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระบบในกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป ซึ่งเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

### 2.4. แนวทางการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลายวิธี โดยรายละเอียดของการออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ มีดังนี้ (1)  $3^{3-2}$  factorial ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยสามารถประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) และผลกระทบกำลังสอง (Quadratic Effects) ได้ทั้งหมดแต่ไม่เหมาะสมในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด (2)  $3^k$  full factorial ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ต้องใช้งบประมาณมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองสูงกว่าแผนอื่นๆ โดยหากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะต้องทำการทดลองจำนวน 243 การทดลอง (3) Central Composite Designs (CCD) เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพ 1 ปัจจัยก็ยังคงใช้วิธีนี้ได้ ซึ่งประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสอง เลือกศึกษาผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ ซึ่งหากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะทำการทดลองจำนวน 20 การทดลอง แต่ในการทดลองจำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เข้า



available range of the welding. The experimental data is taken into account for analyzing statistically and the variation of the data is of interest. The experimental data is then taken into account for formulating the correlations between the pitch angle and those welding parameters. The correlations can be used to predict the effect of each parameter to the pitch angle and leading to apply in the welding process.

**Keywords :** Welding, Design of experiment, Pitch angle, Correlation Equation, Box-Behnken method

## 1. บทนำ

การเชื่อมเป็นกระบวนการประสานเนื้อวัสดุให้เข้ากัน ซึ่งปัจจุบันมีหลายประเภทและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูงในการประกอบ การเชื่อมจึงมักถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ข้อดีคือ มีความแม่นยำในการเชื่อมสูง แต่ด้วยความที่ชิ้นส่วนที่เชื่อมมีขนาดเล็ก ผลกระทบจากการเชื่อมมักทำให้เกิดการโก่งของชิ้นงานที่เรียกว่าการเงยตัวขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการเชื่อมเพื่อประกอบวงจรกับแผ่นโลหะ ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการเชื่อมจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อม โดยอาศัยหลักการการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและจำลองผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมให้อยู่ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปแบบสมการ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง หมายถึงการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางสถิติหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ การออกแบบการทดลองเป็นสิ่งจำเป็นหากต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ ยิ่งถ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลองด้วยแล้ว วิธีการทางสถิติเป็นวิธีเดียวที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ทั้งสองนี้เกี่ยวข้องและสืบเนื่องต่อกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่นำมาใช้ [7]

### 2.2. แนวทางการออกแบบการทดลอง

แนวทางการออกแบบการทดลองมีขั้นตอนดังนี้ [1] (1) ทำความเข้าใจปัญหา วัตถุประสงค์ของการทดลอง สืบหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (2) เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต เพื่อนำมาใช้แปรค่าในการทดลอง กำหนดขอบเขตการแปรค่าของปัจจัย และกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง (3) เลือกปัจจัยตอบสนองที่จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ (4) เลือกการออกแบบการทดลอง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับจำนวนการ

คำนึงถึงผลกระทบของกระบวนการ ดังแสดงใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัย ระดับและขอบเขตของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับ		
	ต่ำ	กลาง	สูง
	(-1)	(0)	(+1)
กำลังไฟฟ้า (A)	1500	1700	1900
เวลาของการเชื่อม (B)	1	1.5	2
อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (C)	45	62.5	80
แรงกดของหัวเชื่อม (D)	170	285	400
ตำแหน่งการเชื่อม (E)	-20	-5	10

3.2. การเลือกการออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อศึกษามลพิษของปัจจัยที่มีต่อการเสียดตัวของวงจรวัดหรืออิเล็กทรอนิกส์ และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมเงยตัวกับพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยวิธี Box-Behnken ที่ได้กำหนดระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามี 5 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 1 รูปแบบการทดลองถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม จึงได้รูปแบบการทดลองทั้งหมด 46 ชุด โดยแต่ละชุดมีการทำซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดและประเมินผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 184 การทดลองดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้ค่าระดับในแต่ละปัจจัย ในตารางที่ 1 แทนตัวเลข -1, 0, +1 เพื่อใช้สร้างรูปแบบการทดลอง โดยขั้นตอนการทดลองจะอ้างอิงตามคอลัมน์ Run Order ซึ่งเป็นลำดับการทดลองที่เกิดจาก

การสุ่ม (Randomization) ตาม คอลัมน์ Std Order เพื่อลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจกระทบต่อการทดลองได้

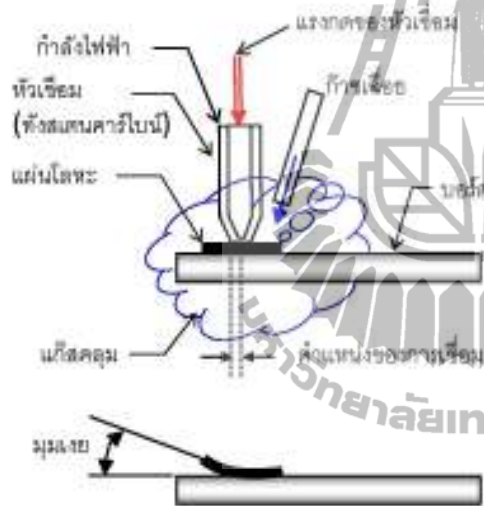
ตารางที่ 2 รูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่ได้จากโปรแกรม Minitab

Std Order	Run Order	A	B	C	D	E
98	1	0	0	1	-1	0
103	2	0	1	0	0	1
57	3	0	1	0	0	1
164	4	1	0	0	-1	0
114	5	0	1	-1	0	0
...	...	...	...	...	...	...
108	183	1	0	1	0	0
35	184	-1	0	0	0	1

3.3. การทดสอบ

การทดสอบดำเนินการตามแผนการทดลองของ Box-Behnken ซึ่งมีรูปแบบและระดับการทดลองดังตารางที่ 2 และลักษณะงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2 โดยขั้นตอนการเชื่อมจะเริ่มจากหัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของการเชื่อมที่ขีดไว้ โดยตำแหน่งนี้วัดเทียบกับแนวกึ่งกลางแผ่นโลหะ ซึ่งมีค่าบวกเมื่อวัดไปทางขวาและเป็นลบเมื่อวัดไปทางซ้าย จากนั้นหัวเชื่อมจะกดลงไปยังแผ่นโลหะที่วางตัวอยู่บนบอร์ดด้วยขนาดแรงกดที่กำหนดไว้ กำลังไฟฟ้าน้อยมิลลิวัตต์ถูกปล่อยจากแหล่งจ่ายส่งผ่านเข้าสู่หัวเชื่อมซึ่งทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ ความต้านทานไฟฟ้าในเนื้อวัสดุของหัวเชื่อมจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยส่วนปลายหัวเชื่อมจะเกิดความร้อนสูงสุดเพราะมีพื้นที่หน้าตัดเล็กสุด กำลังไฟฟ้าจะถูกปล่อยด้วยช่วงเวลาที่กำหนดด้วยขนาดมิลลิวินาที ความร้อน

ก่อให้เกิดการหลอมแผ่นโลหะเชื่อมติดกับวงจรถอบของบอร์ด แก๊สเฉื่อยซึ่งในที่นี้ใช้ในโตรเจนถูกใช้เพื่อคลุมบริเวณเชื่อมป้องกันมิให้ออกซิเจนและความชื้นในอากาศเข้าไปรวมตัวกับรอยเชื่อม ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการข้างต้นถูกเข็ดจากเครื่องเชื่อมและการทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติ หลังการเชื่อมเสร็จแผ่นโลหะจะเกิดการโค้งตัวขึ้นด้วยขนาดมุมที่เรียกว่ามุมเยื้อง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดและต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ



รูปที่ 2 กระบวนการเชื่อมแผ่นรีป

4. ผลการทดสอบ

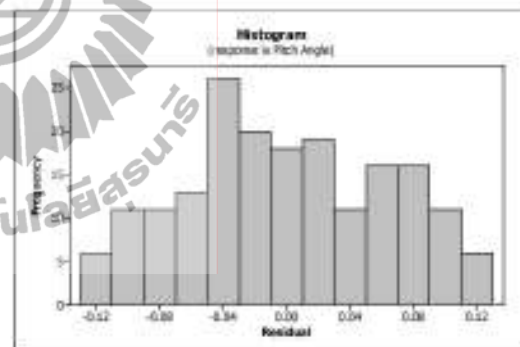
ผลการทดสอบถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MINITAB เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อกระบวนการเชื่อม โดยในที่นี้กำหนดตัวแปรต่างๆ แทนพารามิเตอร์การเชื่อมดังนี้ A แทนกำลังไฟฟ้า (mW) B แทนเวลาของการเชื่อม (ms) C แทนอัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (kg/h) D แทนแรงกดของหัวเชื่อม (mN) และ E แทนตำแหน่งของการเชื่อม

(mm) ผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ การตรวจสอบข้อมูลผลการทดสอบ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเยื้องกับพารามิเตอร์การเชื่อม และการทดสอบความเหมาะสมของสมการ

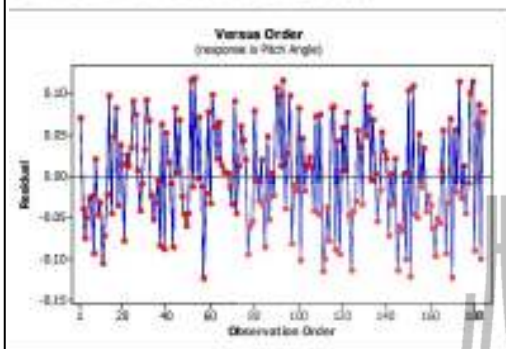
4.1. การตรวจสอบข้อมูลผลการทดสอบ

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการทางสถิติที่อาศัยการนำกราฟเข้ามาช่วยวิเคราะห์ข้อมูล โดยนิยมทำการตรวจสอบ 3 ส่วน ได้แก่ การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน ดังนี้

รูปที่ 3 ฮิสโตแกรมแสดงกระจายของข้อมูล

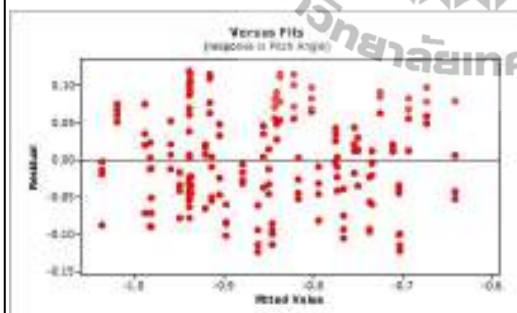


การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยให้แผนภูมิการกระจายสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4 ส่วนตกค้าง (Residual) คือค่าประมาณความคาดเคลื่อนที่ข้อมูลเบี่ยงเบนไปจากสมการความสัมพันธ์ และลำดับของข้อมูล (Observation Order) จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบแกนอ้างอิงศูนย์ไม่เอนเอียงไปส่วนใดส่วนหนึ่ง แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล

การตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวนโดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคาดเคลื่อนจากรูปที่ 5 พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดสอบมีการกระจายรอบแกนอ้างอิงศูนย์กลางข้อมูล แต่ยังมีอีกหลายชุดข้อมูลที่มีลักษณะกระจายแบบแกมอ้างอิงที่ไม่คงที่ อันเนื่องมาจากสาเหตุหลักๆ ของค่ามุมเงยในแต่ละครั้ง ที่ได้รับการวัดผลอยู่ในกระบวนการทำซ้ำ มีความแตกต่างกันมากเกินไป จึงก่อให้เกิดความแปรปรวนที่ไม่คงที่



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย

4.2. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่า  $SS_{Reg}$  และค่า SST ดังนั้น R

จึงเป็นตัวระบุเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมุมเงย ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ประมาณขึ้น

$$R^2 = \frac{SS_{Reg}}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \tag{1}$$

เมื่อ  $SS_{Reg}$  เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายได้ SSE เป็นผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่สมการอธิบายไม่ได้ SST เป็นผลรวมระหว่าง  $SS_{Reg}$  กับ SSE

ในทางปฏิบัติค่า R จะมีความไวในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อจำนวนตัวแปรอิสระในสมการเพิ่มขึ้น ค่า R จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงใช้ค่า R ที่ทำการปรับค่าแล้ว ( $R_{adj}^2$ ) แทน

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{MSE}{MST} \tag{2}$$

$$MST = \frac{SST}{n-1} \tag{3}$$

เมื่อ MSE เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองที่สมการอธิบายไม่ได้ และ MST เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองทั้งหมด

ซึ่งค่านี้ใช้อธิบาย เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมุมเงย ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการเช่นกัน เมื่อพิจารณา R จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 72.0% และ  $R_{adj}^2$  มีค่าเท่ากับ 68.56% จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง

#### 4.3. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฉยและพารามิเตอร์การเชื่อม

ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติ ได้ถูกนำมาสร้างสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฉย ( $\theta$ ) และพารามิเตอร์การเชื่อมได้ดังสมการที่ 4 ซึ่งสมการประกอบไปด้วยส่วนของผลกระทบหลัก ส่วนของผลกระทบร่วม และส่วนของผลกระทบกำลังสอง

$$\begin{aligned} \theta = & 12.6794 - 2.7347B - 3.3019BB \times 10^{-1} \\ & - (1.0223A + 6.1426C + 2.2765E) \times 10^{-1} \\ & - (8.1170D - 1.0166AB - 7.6955BC + 1.5711BD) \times 10^{-1} \\ & + (1.9181CC) \times 10^{-4} + (1.4143AC + 1.7322AE) \times 10^{-5} \\ & + (1.9376AA + 2.0762DD + 5.1256AD) \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (4)$$

จากสมการจะเห็นว่าพารามิเตอร์เวลาของการเชื่อม (B) มีผลกระทบต่อมุมเฉยมากที่สุด ส่วนพารามิเตอร์กำลังไฟฟ้า (A) อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย (C) แรงกดของหัวเชื่อม (D) และตำแหน่งของการเชื่อม (E) มีผลกระทบต่อมุมเฉยเช่นกัน โดยเป็นความสัมพันธ์ของผลกระทบหลักและความสัมพันธ์ของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

#### 5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองทางสถิติ ในการศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อการเงยตัวในกระบวนการเชื่อมวงจรมงจรรกับแผ่นโลหะของการประกอบวงจรรีเลย์คทรอนิกส์ โดยปัจจัยที่ศึกษามี 5 ปัจจัยได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม ข้อมูลการทดสอบถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ จากนั้นนำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฉยตัวกับพารามิเตอร์การเชื่อม และพบว่าพารามิเตอร์เวลาของการเชื่อมมีผลกระทบต่อการเงยตัวของชิ้นงานมากที่สุด

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/UCRC) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- (1) Chutima P. Design of Experiments. 1<sup>st</sup> ed. Chulalongkorn University; 2002. (In Thai).
- (2) Ploypanichcharoen K. Statistics for engineers. 6<sup>th</sup> ed. Technology Promotion Association (Thailand-Japan); 2002. (In Thai).
- (3) Sudasna-na-Ayudhya P, Luangpaiboon P. Design and Analysis of Experiments. 1<sup>st</sup> ed. Top; 2008. (In Thai).
- (4) Ampaiboon A. Optimization of MAG-M Welding Condition Using Experiment Design Technique. IE Network Conference. 2008 Oct 20-22.
- (5) Ampaiboon A. Optimization of Gas Metal Arc Welding Factor. IE Network Conference. 2007 Oc Oct 24-26.
- (6) Ampaiboon A. Optimal parameters of the flux core welding for steel ST 37. IE Network Conference. 2005 Oc Oct 20-22.
- (7) Montgomery, D.C. 2009. Design and analysis of experiment. (7th Edition). The United States of America: John Wiley & Sons.
- (8) Box, G.E.P., Behnken, D.W., 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variable, Technometrics 2, 455-475.

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย MINITAB

The analysis was done using coded units.					Estimated Regression Coefficients for PSA using data in uncoded units	
Estimated Regression Coefficients for PSA					Term	Coef
Term	Coef	SE Coef	T	P	Constant	12.6794
Cons.	12.6794	1.21948	10.397	0.000	A	-0.0102230
A	-0.0102	0.00106	-9.650	0.000	B	-2.73486
B	-2.7347	0.34738	-7.872	0.000	C	-0.0614255
C	-0.0614	0.01007	-6.101	0.000	D	-0.00811696
D	-0.0081	0.00149	-5.435	0.000	E	-0.0227648
E	-0.0228	0.01118	-2.037	0.043	A*A	1.93765E-06
A*A	0.0000	0.00000	6.850	0.000	B*B	0.330188
B*B	0.3302	0.04526	7.296	0.000	C*C	0.000191814
C*C	0.0002	0.00004	5.192	0.000	D*D	2.07616E-06
D*D	0.0000	0.00000	2.427	0.016	E*E	1.43870E-05
E*E	0.0000	0.00005	0.286	0.775	A*B	0.00101681
A*B	0.0010	0.00017	6.083	0.000	A*C	1.41428E-05
A*C	0.0000	0.00000	2.962	0.004	A*D	5.12555E-06
A*D	0.0000	0.00000	7.054	0.000	A*E	1.73219E-05
A*E	0.0000	0.00001	3.109	0.002	B*C	0.00769551
B*C	0.0077	0.00191	4.029	0.000	B*D	-0.00157108
B*D	-0.0016	0.00029	-5.465	0.000	B*E	0.00139140
B*E	0.0014	0.00223	0.624	0.533	C*D	9.06053E-06
C*D	0.0000	0.00001	1.091	0.277	C*E	-8.01902E-05
C*E	-0.0001	0.00006	-1.260	0.210	D*E	1.11688E-05
D*E	0.0000	0.00001	1.153	0.251		
S = 0.0868503 PRESS = 0.934190					Coef	= ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์
R-Sq = 72.00% R-Sq(pred) = 61.09%					SE Coef	= ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์
R-Sq(adj) = 68.56%					T-value	= ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน t-distribution
Analysis of Variance for PSA					P-value	= เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน โดยเปรียบเทียบกับค่า $\alpha$ ในที่นี้ใช้ $\alpha = 0.05$
Sour.	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regr.	20	1.87276	1.87305	0.093633	20.95	0.000
Lin.	5	0.75139	0.63783	0.127587	28.55	0.000
A	1	0.05807	0.41618	0.416177	93.13	0.000
B	1	0.00173	0.27696	0.276955	61.97	0.000
C	1	0.02460	0.16635	0.166355	37.22	0.000
D	1	0.00372	0.13199	0.131987	29.53	0.000
E	1	0.66526	0.01855	0.018545	4.15	0.043
Squ.	5	0.42803	0.42803	0.085606	19.18	0.000
A*A	1	0.11160	0.20970	0.209705	46.92	0.000
B*B	1	0.18186	0.23787	0.237871	53.23	0.000
C*C	1	0.10757	0.12046	0.120462	26.96	0.000
D*D	1	0.02663	0.02632	0.026318	5.89	0.016
E*E	1	0.00037	0.00037	0.000366	0.08	0.775
Int.	10	0.69334	0.69334	0.069334	15.51	0.000
A*B	1	0.16536	0.16536	0.165360	37.00	0.000
A*C	1	0.03920	0.03920	0.039204	8.77	0.004
A*D	1	0.22236	0.22236	0.222360	49.76	0.000
A*E	1	0.04321	0.04321	0.043207	9.67	0.002
B*C	1	0.07255	0.07255	0.072546	16.23	0.000
B*D	1	0.13057	0.13057	0.130572	29.22	0.000
B*E	1	0.00174	0.00174	0.001742	0.39	0.533
C*D	1	0.00532	0.00532	0.005320	1.19	0.277
C*E	1	0.00709	0.00709	0.007090	1.59	0.210
D*E	1	0.00594	0.00594	0.005939	1.33	0.251
Residual	163	0.72844	0.72844	0.004469		
LOF	20	0.54398	0.54398	0.027199	21.08	0.000
P.E.	143	0.18446	0.18446	0.001290		
Tot.	183	2.60120				
					R-Sq	= สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )
					R-Sq(adj)	= สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ทำการปรับค่า ( $R_{adj}^2$ )
					Seq SS	= ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน
					Adj SS	= ผลรวมของกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่ทำการปรับค่าแล้ว
					Adj MS	= ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองที่ทำการปรับค่าแล้ว
					F	= ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน F-distribution
					Lin.	= การวิเคราะห์ผลกระทบบางอย่าง
					Squ.	= การวิเคราะห์ผลกระทบบ้างบางส่วน
					Int.	= การวิเคราะห์ผลกระทบบ้างบางส่วน
					LOF	= การทดสอบความเหมาะสมของสมการ

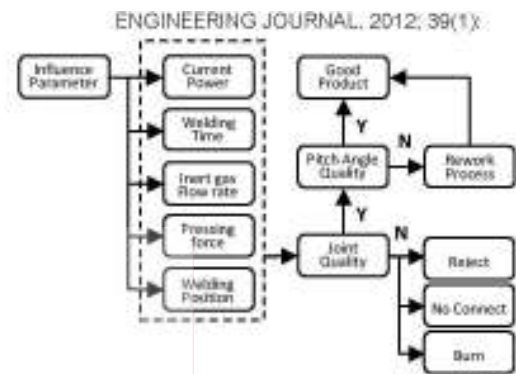
กับรูปแบบการทดลองซึ่งอาจอยู่นอกช่วงการทดลอง จึงไม่ยึดหยุ่นสำหรับใช้ในทางปฏิบัติจริง (4) Box-Behnken ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ และอาจจะใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพได้ในบางกรณีขึ้นกับจำนวนปัจจัย สามารถประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยได้ทุกค่า หากพิจารณาที่ 5 ตัวแปร จะต้องทำการทดลองจำนวน 48 การทดลอง จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าแบบการทดลองต่างๆ มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงควรเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับงาน

Box-Behnken (1960) ได้นำเสนอการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ วิธี Box-Behnken จะใช้หลักการของ  $2^2$  แพ็คทอเรียลเต็มรูปแบบทุกจุดที่กลางรวมเข้าไป งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Box-Behnken เพราะเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขที่มีอยู่คือจำนวนขั้นทดลอง อีกทั้งเป็นแบบการทดลองที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การหาสภาวะที่เหมาะสมของเงื่อนไขการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง [4] และการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ สำหรับเหล็กเอสที 37 [6]

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1. การเลือกปัจจัย ระดับ ขอบเขต และตัวแปรตอบสนอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเชื่อมวงจรถือเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ผลกระทบที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อม

การศึกษาพารามิเตอร์ในครั้งนี้มีการคัดกรองโดยอาศัยหลักความเป็นไปได้ในการทดสอบ และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ ได้พารามิเตอร์ที่จะทำการ ศึกษา 5 ตัวคือ กำลังไฟฟ้า เวลาของการเชื่อม อัตราการป้อนก๊าซเฉื่อย แรงกดของหัวเชื่อม และตำแหน่งของการเชื่อม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมทั้ง 5 พารามิเตอร์ สามารถปรับค่าได้จากซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม สำหรับคุณภาพของงานเชื่อมในขั้นแรกจะพิจารณาความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ว่าเกิดการไหม้บริเวณรอยเชื่อมหรือไม่ หรือรอยเชื่อมไม่ต่อกันระหว่างวงจรถูกที่เชื่อม จากนั้นจึงนำไปตรวจวัดค่ามุมเฉย ซึ่งจะเลือกค่านี้เป็นตัวแปรตอบสนองที่จะนำมาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่อไป และในการกำหนดระดับของพารามิเตอร์เพื่อนำมาเปลี่ยนแปลงค่าในระหว่างทำการทดสอบนั้นเลือกที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) เนื่องจากต้องการศึกษาพารามิเตอร์อย่างละเอียด โดยค่าระดับต่ำคือ ค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ค่าระดับกลางคือ ค่ากลางระหว่างค่าต่ำที่สุดและมากที่สุดที่จะศึกษา และค่าระดับสูงคือ ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งระดับเหล่านี้ถูกเลือกมาจากการปรับค่าจากซอฟต์แวร์ที่สามารถปรับค่าได้ กล่าวคืออยู่ในช่วงที่การเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ โดยไม่

## ประวัติผู้เขียน

นายชนพงศ์ บุญจิต เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน 2529 ที่จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับ ประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนกมลลักษณ์ มัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนวังสามหมอวิทยาคาร และมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนอุดรพัฒนาการ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมยานยนต์) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชาได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และ (3) วิชาเขียน แบบวิศวกรรม 2

ในระหว่างศึกษาได้ตีพิมพ์บทความในวิศวกรรมสาร มข. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น) ปีที่ 39 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มีนาคม 2555 ในชื่องานวิจัยเรื่อง “ผลกระทบของพารามิเตอร์การ เชื่อมต่อมุมงอสำหรับกระบวนการเชื่อมวงจรถอดเหล็ก”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี