

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือน
สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1

A STUDY ON INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS OF RESISTANCE
SPOT WELDING ON TENSILE SHEAR LOAD FOR HOT-DIPPED ZINC-
COATED STEEL SHEETS SGCD1



ย 842.7
2555
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 132185
วัน,เดือน,ปี..... 4 ก.ค. 2557

b. 12585014
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555
KMITL-2012-EN-M-217-150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS OF RESISTANCE
SPOT WELDING ON TENSILE SHEAR LOAD FOR HOT-DIPPED ZINC-
COATED STEEL SHEETS SGCD1**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-217-150**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเดือนสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1

นักศึกษา

นายโยธิน จันทร์ทอง

รหัสนักศึกษา

52612007

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ (JIS G 3302) เกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional Factorial Design เพื่อกรองปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้ง 5 ปัจจัย คือแรงดันลมของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม โดยมีผลตอบเป็นค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของชิ้นงาน จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาปัจจัยและค่าระดับของปัจจัยที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ทราบว่าปัจจัยหลักและค่าระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดคือ แรงดันลมของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมที่ระดับ 0.20 MPa. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมที่ระดับ 11900 Amperes เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมที่ระดับ 25 Cycles ส่วน เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกันและ เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมให้ใช้ค่าที่อยู่ในช่วงระดับตามคู่มือการเชื่อมที่ระดับ 25 และ 20 Cycles ตามลำดับ จากการทดลองยืนยันผลเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นพบว่า ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้ค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.06 kN. และเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการทดลองได้ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409 ผลจากการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20.15 kN. ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากค่าที่ทำนายได้ถึงแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกันและเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 ไม่พบข้อบกพร่องในจุดเชื่อม ลักษณะจุดเชื่อมมีความสมบูรณ์ มีอัตราการซึมลึกที่ดี จากการปรับตั้งค่าระดับของปัจจัยดังกล่าว

Thesis	A Study on influence of welding parameters of resistance spot welding on tensile shear load for hot-dipped zinc-coated steel sheets SGCD1
Student	Mr.Yotin Janthong
Student ID.	52612007
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Sakon Klongboonjit
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The objective of this research was to study and analyze resistance spot welding parameters affecting tensile shear load of hot-dipped zinc-coated steel sheet (JIS G 3302) grade SGCD1. The experimental design of 2^{5-1} fractional factorial design was performed on the welding parameters including air pressure, squeeze time, weld current, weld time, and hold time. The Box-Behnken experimental design was then used to analyze the screened welding variables and to find out the optimal welding condition. Results showed that the optimal welding condition was air pressure of 0.20 MPa, weld current of 11900 Amperes, and weld time of 25 cycles. The squeeze time and hold time was set constantly at 25 and 20 cycles, respectively. Confirmation tests were performed and revealed that the average tensile shear strength was 19.06 kN, which passed the customer's specification. The optimal welding condition was extended to try on SUS 409 stainless steel, and it was found that the average tensile shear load is 20.15 kN, which also passes the customer's specification. Although it was performed on the different materials, the optimal welding condition still gave satisfied results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และรศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัทยานยนต์ จำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยฉบับนี้ และขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบทุกคน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

โยธิน จันทรทอง



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 กระบวนการเชื่อมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสี.....	7
2.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	9
2.4 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	11
2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	14
2.6 การทดสอบแรงดึง.....	31
2.7 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้าง.....	35
2.8 การทดสอบความแข็ง.....	37
2.9 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....	43
3.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อมและการทดสอบชิ้นงาน.....	46
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....	50
3.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย.....	51
3.5 การเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย.....	52
3.6 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม.....	52

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และหาค่าที่เหมาะสม.....	52
3.8 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผลตอบ.....	53
3.9 การสรุปผลการทดลอง.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	54
4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน.....	54
4.2 การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	63
4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยฟังก์ชัน Analyze Response Surface Design.....	94
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer.....	98
ภาคผนวก ค การตรวจสอบแรงดันลมของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม.....	102
ภาคผนวก ง การตรวจสอบแรงดันลมของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม.....	104
ภาคผนวก จ สำเนาวุฒิบัตรและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ.....	8
2.2 เครื่องหมายที่ใช้สำหรับคำนวณผลลัพธ์ของการออกแบบ 2^3	16
2.3 เศษส่วน $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ.....	21
2.4 การออกแบบการทดลองแบบสมดุลบล็อกไม่สมบูรณ์สำหรับ 3 ทรีทเมนต์ และ 3 บล็อก	27
2.5 การออกแบบการทดลอง แบบ Box-Behnken Design ที่มีตัวแปรสามตัวแปร.....	28
2.6 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	35
3.1 ระดับและขอบเขตของปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น	43
3.2 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลองเบื้องต้น	45
4.1 ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น	54
4.2 ค่า P ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง (Estimated Effect and Coefficients for Response, Coded Units) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (Alpha = 0.05)	62
4.3 ระดับปัจจัยและสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design).....	64
4.4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	65
4.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้ตัวแปรเข้ารหัส (Coded Units)	72
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance for tensile)	73
4.7 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมที่กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุด.....	79
4.8 ค่าระดับปัจจัยและผลการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน.....	82
4.9 ผลการตรวจสอบขนาดของจุดเชื่อม (Nugget diameter) และอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อม (Penetration).....	84
4.10 ค่าความแข็งแรงในแต่ละตำแหน่งของจุดเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อยืนยันผล.....	85
ข.1 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมที่กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุด.....	99
ค.1 ค่าแรงกดที่หัวอิเล็กโทรดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างหัวอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน.....	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบจุด	5
2.2 แสดงวงจรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	6
2.3 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มยื่น	6
2.4 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบตะเข็บ (RSEW).....	7
2.5 ท่อนจำลองทั่วไปของกระบวนการ.....	10
2.6 กราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง.....	13
2.7 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย.....	13
2.8 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง.....	14
2.9 การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	15
2.10 $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^k	17
2.11 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ	22
2.12 พื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่งและเส้นทางป็นขั้นด้วยทางขั้นที่ชันที่สุด.....	24
2.13 จุดที่มีผลตอบสูงที่สุด.....	25
2.14 จุดที่มีผลตอบต่ำที่สุด.....	25
2.15 จุดอานม้า.....	25
2.16 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$	26
2.17 การออกแบบการทดลอง แบบ Box-Behnken with a Center Point	28
2.18 Central Composite Design เมื่อ $k = 2$ และ $k = 3$	29
2.19 การกำหนดน้ำหนัก (Weight) ของผลตอบ (กรณีมีผลตอบเดียว).....	30
2.20 การกำหนดน้ำหนัก (Weight) ของผลตอบ (กรณีมีผลตอบ 2 ตัว)	30
2.21 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point).....	31
2.22 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	32
2.23 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก.....	33
2.24 การทดสอบแรงดึงเหนือนและการจับชิ้นงานทดสอบ.....	34
2.25 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเหนือน.....	34
2.26 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	35
2.27 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเรซิน.....	36
2.28 แสดงส่วนต่างๆ ของจุดเชื่อม (Nugget).....	36
2.29 หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นแบบปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	38
3.1 ขั้นตอนและลำดับการดำเนินการวิจัย.....	42
3.2 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดยี่ห้อ PANASONIC รุ่น YR-500SA2.....	46
3.3 รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ของแผง.....	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	ชิ้นงานทดสอบ.....47
3.5	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)47
3.6	เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ.....47
3.7	เครื่องขัดสายพาน.....48
3.8	เครื่องขัดแบบจานคู่ (Grinder polisher).....48
3.9	กล้อง digital micro scope (DINO LITE) รุ่น AM 413ZT.....48
3.10	กล้องจุลทรรศน์ Microscope Model : AT-412.....49
3.11	เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....49
3.12	แสดงลักษณะการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ.....50
3.13	แสดงการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน.....50
4.1	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (A) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....56
4.2	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (B) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....56
4.3	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (C) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....57
4.4	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (D) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....57
4.5	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (E) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....58
4.6	การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....59
4.7	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....59
4.8	แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....60
4.9	กราฟพาราโตของ Effect ที่ระดับนัยสำคัญ Alpha = 0.05 ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน.....61
4.10	กราฟของผลกระทบหลัก ของปัจจัย A, B,C,D และ E ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....61
4.11	กราฟแสดงอันตรกิริยาร่วมในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....62
4.12	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (A) ในการหาค่าที่เหมาะสม.....68
4.13	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (B) ในการหาค่าที่เหมาะสม.....69
4.14	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (C) ในการหาค่าที่เหมาะสม.....69
4.15	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (D) ในการหาค่าที่เหมาะสม.....70
4.16	แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (E) ในการหาค่าที่เหมาะสม.....70
4.17	การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง ในการหาค่าที่เหมาะสม.....71
4.18	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายในการหาค่าที่เหมาะสม.....71
4.19	แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองในการหาค่าที่เหมาะสม72
4.20	กราฟโครงร่างระหว่างกระแสไฟขณะทำการเชื่อมและเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม.....75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 กราฟโครงสร้างระหว่างแรงด้นลมของข้อวีเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงาน ขณะทำการเชื่อมและเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม.....	76
4.22 กราฟโครงสร้างระหว่างแรงด้นลมของข้อวีเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงาน ขณะทำการเชื่อมและกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม	76
4.23 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมเมื่อกำหนด ค่าแรงด้นลมของข้อวีเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมคงที่.....	77
4.24 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมเมื่อกำหนด ค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมคงที่.....	78
4.25 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมเมื่อกำหนด เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะทำการเชื่อมคงที่.....	78
4.26 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเมื่อกำหนดค่าเป้าหมายของ ผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบ (Maximum).....	80
4.27 แสดงค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม (Tensile Shear load).....	81
4.28 แสดงค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม (Tensile Shear load) สำหรับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS409.....	82
4.29 โครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อมในการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	83
4.30 ค่าความแข็งแรงบริเวณจุดเชื่อมในการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	85
4.31 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเหล็กเดิม (Base metal) กำลังขยาย 200 เท่า.....	86
4.32 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected Zone) กำลังขยาย 200 เท่า.....	87
4.33 โครงสร้างจุลภาคบริเวณจุดเชื่อม (Weld Nugget) กำลังขยาย 200 เท่า.....	87
ข.1 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย.....	100
ข.2 ชิ้นงานหลังการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสม สังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1.....	100
ข.3 ชิ้นงานหลังการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองสำหรับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409.....	101
ค.1 การหาค่าแรงกดที่หัววีเล็กโทรดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างข้อวีเล็กโทรดกับชิ้นงาน.....	102
ค.2 เครื่องตรวจสอบแรงกด (Force Gauge).....	102
ง.1 ลักษณะวงจรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	104
ง.2 ลักษณะปัจจัยที่มีหน่วยการวัดเป็น Cycles	105
ง.3 คลื่นความถี่ทางไฟฟ้า.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อม เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุโดยส่วนใหญ่เป็นโลหะและพลาสติก กรรมวิธีการเชื่อมโลหะนี้มีความแตกต่างกันออกไปตามต้นกำเนิดของความร้อนและวิธีการส่งถ่ายความร้อนให้กับชิ้นงาน ซึ่งแต่ละกรรมวิธีการเชื่อมก็จะเหมาะสมกับชนิดของโลหะและลักษณะของการใช้งานที่แตกต่างกัน ประเภทของการเชื่อมโลหะตามสมาคมการเชื่อมอเมริกา (American Welding Society: AWS) ได้จัดแบ่งกรรมวิธีการเชื่อมและกรรมวิธีการเชื่อมต่อเนื่องเป็น 12 ประเภทหลัก และแบ่งเป็นกรรมวิธีย่อยๆ อีกจำนวน 50 ชนิด และหนึ่งในนี้ ก็มีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการเชื่อมโลหะแผ่น ที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทประกอบรถยนต์ โดยมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความรวดเร็วในการเชื่อม ผลกระทบทางความร้อนน้อย มีขั้นตอนการทำงานไม่ยุ่งยาก มีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งาน และประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไปเหนือกว่าเหล็กกล้าชนิดแผ่นธรรมดา มีความจำเป็นต้องใช้เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 (JIS G 3302) [1] ซึ่งในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จะต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมหลายค่า ผู้ปฏิบัติการจะต้องปรับตั้งค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยประสบการณ์ การลองผิดลองถูก หรือตามข้อกำหนดที่ได้รับมาจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม ซึ่งค่าที่ระบุมานั้นเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นคุณภาพของจุดเชื่อมที่ออกมาจึงไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และทดลองทำซ้ำอีกหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้คุณภาพของจุดเชื่อมตรงตามมาตรฐาน ซึ่งในการทดลองในแต่ละครั้งต้องมีค่าใช้จ่าย เช่น วัสดุ พลังงาน และ เวลาในการทดลอง ล้วนแล้วแต่เป็นต้นทุนในการผลิต

ในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อให้ได้คุณภาพของจุดเชื่อมที่มีความแข็งแรงและคุณภาพดี ผู้วิจัยจึงศึกษาปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม (Air Pressure) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze Time) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (Weld Current) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (Weld Time) และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Hold Time) โดยศึกษาว่าปัจจัยใดที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเนื่องของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด รวมทั้งพิจารณาโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยปัจจัยที่ดีที่สุด เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการผลิตที่ต้องการคุณภาพงานเชื่อมแบบจุดและสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหาปัจจัยและค่าระดับปัจจัย ที่ทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดตามมาตรฐาน JIS Z 3140 [2] จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดกับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่มีความหนา 1.8 มิลลิเมตร

1.2.2 เพื่อหารูปแบบสมการการถดถอยของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยมีค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนเป็นตัวแปรผลตอบ

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมของชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ตามมาตรฐาน JIS Z 3139 [3] ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของงานวิจัยประกอบไปด้วย แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม (หน่วย: MPa) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (หน่วย: Cycle) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (หน่วย: Amperes) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (หน่วย: Cycle) และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (หน่วย: Cycle) มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 อย่างมีนัยสำคัญ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาเฉพาะค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

1.4.2 ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของการทดลองคือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

1.4.3 ในการทดลองใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด ยี่ห้อ PANASONIC รุ่น YR-500S Rated Capacity 50 kVA โดยใช้อิเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตรและใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine) ของ SHIMADZU รุ่น AG-13zSFL-50 KN รับแรงดึงได้สูงสุด 50 kN.

1.4.4 ชิ้นงานในการทดลองเป็นเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร และหนา 1.8 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) [4]

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

1.5.2 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ได้แก่ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

1.5.3 ออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อคัดกรองหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1

1.5.4 เตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อมและชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) และทำการเชื่อมตามลำดับของการออกแบบการทดลองไว้จนครบทุกปัจจัยการทดลอง

1.5.5 ทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงพร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.5.7 ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด โดยดูจากผลการทดลองเบื้องต้นจะทราบปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด

1.5.8 เตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อมและชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) และทำการเชื่อมตามลำดับของการออกแบบการทดลองไว้อีกครั้งจนครบทุกปัจจัยการทดลอง

1.5.9 ทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

1.5.10 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด โดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.5.11 ทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบโดยใช้ปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดเพื่อยืนยันผลการทดลอง จำนวน 5 ชิ้นและทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน

1.5.12 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมของชิ้นงานและตรวจสอบค่าความแข็งแรงบริเวณจุดเชื่อม

1.5.13 สรุปผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

1.6.1 ทราบถึงปัจจัยหลักและค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ความหนา 1.8 มิลลิเมตร

1.6.2 ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อควบคุมค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน

1.6.3 ทราบถึงโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1

1.6.4 ใช้เป็นข้อมูลในการปรับค่าระดับของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ที่ให้ได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3140 สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

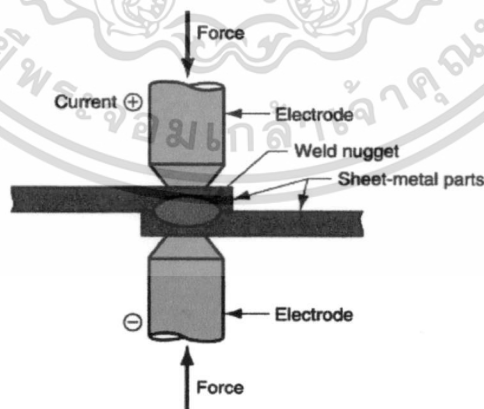
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ เพื่อศึกษาหาปัจจัยและค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่ทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กระบวนการเชื่อม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Welding; RW) [5] เป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากความต้านทานทางไฟฟ้า โดยที่มีอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าผ่านชิ้นงานสองชิ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโลหะแผ่นบาง (Sheet Metal) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายเป็นพื้นที่เล็กๆ จากนั้นใช้แรงกดอัดให้ผิวงานนั้นเชื่อมติดกัน

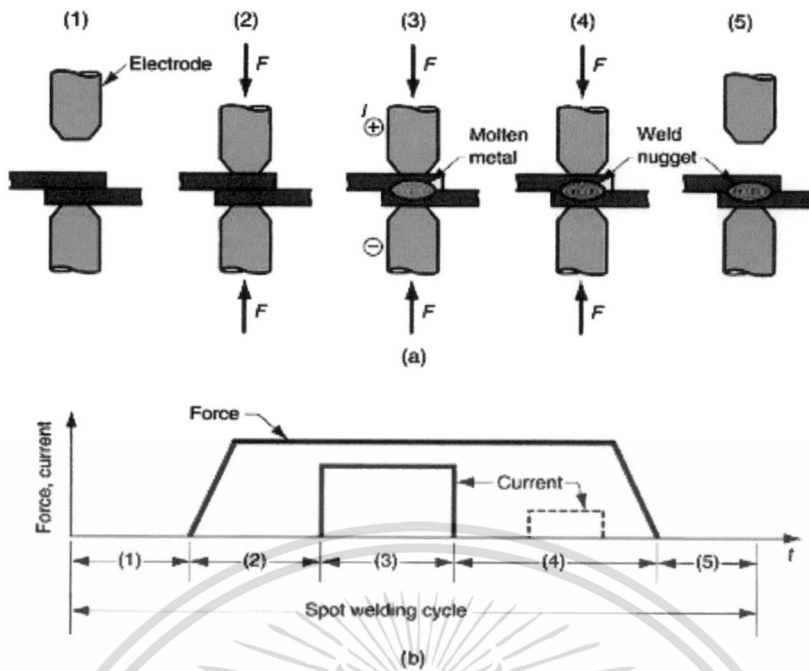
2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW)

เป็นการเชื่อมที่กระทำเป็นจุดๆ โดยไม่ต้องการความต่อเนื่องของแนวเชื่อม กระบวนการเชื่อมได้รับความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นงานด้วยขนาดของกระแสไฟที่สูงมาก จนเกิดการหลอมละลายเป็นจุดกลมๆ และบริเวณที่เกิดการหลอมละลายนี้จะถูกกดอัดให้เชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันเรียกว่า Weld Nugget ตามรูปที่ 2.1 และวงจรในการเชื่อมแบบจุดโดยมีขั้นตอนเริ่มจากการนำชิ้นงานสองชิ้นแบบต่อเกยสอดเข้าไประหว่างหัวเชื่อมอิเล็กโทรด กดหัวเชื่อมอิเล็กโทรดลงมาสัมผัสกับชิ้นงานด้วยค่าแรงดันลมที่กำหนดไว้ เมื่อครบวงจรแล้วปล่อยกระแสไฟให้ไหลผ่านชิ้นงานจนเกิดการหลอมละลายของชิ้นงานทั้งสองชิ้น จากนั้นหยุดปล่อยกระแสไฟเชื่อมแล้วยกหัวเชื่อมออกจากชิ้นงานดังแสดงตามรูปที่ 2.2a และ 2.2b



รูปที่ 2.1 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
ที่มา: ประสิทธิ์ และ ฉัตรชัย (2554)

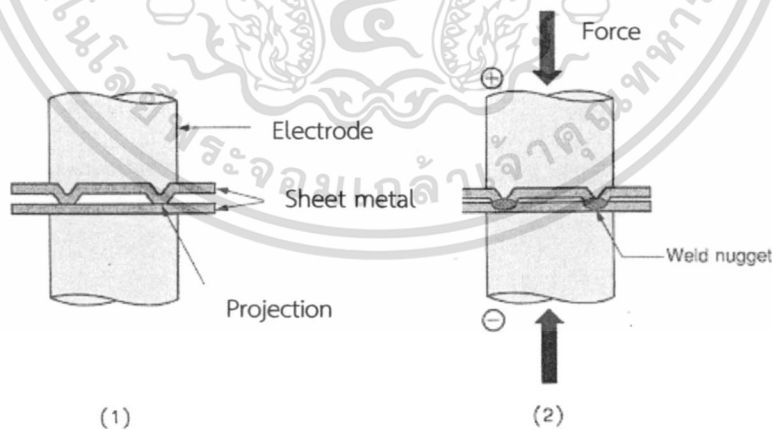
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
ที่มา: ประสิทธิ์ และ ฉัตรชัย (2554)

2.1.2 การเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มยื่น (Resistance Projection Welding: RPW)

เป็นการเชื่อมที่ลักษณะของชิ้นงานด้านหนึ่งจะถูกขึ้นรูปให้เป็นปุ่มเล็กๆ (Projection) ปุ่มนี้จะ
เป็นจุดสัมผัสที่จะทำให้เกิดความร้อนและหลอมละลาย การให้ความร้อนและแรงกดจะเป็นไปใน
ลักษณะเดียวกับการเชื่อมแบบ RSW ดังแสดงตามรูปที่ 2.3

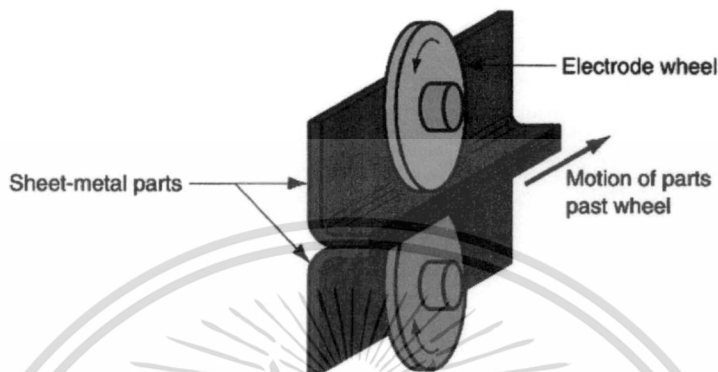


รูปที่ 2.3 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มยื่น
ที่มา: ประสิทธิ์ และ ฉัตรชัย (2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การเชื่อมความต้านทานแบบตะเข็บ (Resistance Seam Welding: RSEW)

เป็นการเชื่อมชิ้นงานโดยอิเล็กโทรดที่ใช้มีลักษณะเป็นล้อสัมผัสกับชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนและการหลอมละลายทำให้เกิดการเชื่อมอย่างต่อเนื่องเป็นแนวตะเข็บ การเชื่อมจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับการเชื่อมแบบ RSW จึงเหมาะที่จะเชื่อมชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นถังหรือภาชนะบรรจุต่างๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเชื่อมความต้านทานแบบตะเข็บ (RSEW)

ที่มา: ประสิทธิ์ และ ฉัตรชัย (2554)

2.2 เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสี

เป็นเหล็กกล้าชนิดแผ่นที่มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไปเหนือกว่าเหล็กกล้าชนิดแผ่นธรรมดาโดยทั่วไปเหล็กจะถูกกัดกร่อนได้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ กระบวนการกัดกร่อนเกิดจากการรวมตัวของเนื้อเหล็กกับออกซิเจนเป็นออกไซด์ของเหล็กซึ่งมีอยู่หลายประเภทการเคลือบเหล็กแผ่นด้วยสังกะสีเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี โดยชั้นเคลือบสังกะสีจะทำหน้าที่ 2 ประการคือ

1. ป้องกันเนื้อเหล็กจากการสัมผัสกับบรรยากาศภายนอก
2. สังกะสีจะทำหน้าที่ผู้ร่อนแทนเหล็ก (Sacrificial Protection) ในบริเวณขอบตัดของแผ่นเหล็กหรือบริเวณที่เกิดรอยขีดข่วน

ดังนั้นเนื้อเหล็กจะคงอยู่ในสภาพสมบูรณ์จนกว่าชั้นเคลือบสังกะสีในบริเวณนั้นจะผู้ร่อนจนหมด วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในการป้องกันเหล็กจากการเกิดสนิม เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีมีหลายชนิดด้วยกัน โดยขึ้นกับกระบวนการผลิตและส่วนผสมของชั้นเคลือบ โดยจะแบ่งเหล็กกล้าเคลือบโลหะผสมสังกะสี 5 กลุ่มใหญ่ดังต่อไปนี้

2.2.1 เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อน (Hot Dipped Galvanized: HDG)

เป็นเหล็กกล้าที่เคลือบสังกะสีโดยการผ่านเหล็กกล้าชนิดแผ่นลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลวผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดีและมีคุณสมบัติการทาสีติด (Printability) สามารถในการเชื่อมและการบัดกรีที่ดีแต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของชั้นสังกะสีมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้น

เหล็กกล้า ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับแท่งอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนการบัดกรีจะทำได้ง่ายหากใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม ได้แก่ ทองเหลืองและตะกั่ว นอกจากนี้การเคลือบโครเมตภายหลังจากการเคลือบสังกะสีจะช่วยเพิ่มความสามารถในการบัดกรีได้มากยิ่งขึ้นด้วย ข้อจำกัดในการใช้งานคือไม่ควรใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการกัดกร่อนที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล เขตอุตสาหกรรม ตัวอย่างการใช้งาน เช่น กรอบประตู พื้นสำเร็จรูป ผนังภายในและภายนอกอาคาร อุปกรณ์ระบายความร้อน ท่อระบายอากาศ เป็นต้น

2.2.2 เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนและอบ (SGCD)

เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเช่นเดียวกับ HDG แต่ต่างกันที่ ภายหลังจากการเคลือบผิวด้วยสังกะสีแล้วเหล็กกล้าชนิดแผ่นจะถูกส่งผ่านไปไปยังเตาอบ เพื่อเร่งให้เกิดชั้นของสารประกอบ Zn-Fe ผิวชั้นเคลือบที่ได้จะมีลักษณะสีเทาดำ (Matt Gray) สม่ำเสมอและไม่มี ลวดลายแพรวพราว (Spangle) ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบด้วยวิธีนี้จะมีความสามารถในการทาสีติดและ ความสามารถในการเชื่อมแบบ Spot และ Seam เหนือกว่าเหล็กกล้าเคลือบด้วยวิธี HDG เนื่องจาก ชั้นเคลือบสังกะสีของ HDG มีความสามารถนำไฟฟ้าต่ำกว่าชั้นของแผ่นเหล็ก อีกทั้งจุดหลอมเหลวก็ ยังต่ำกว่าแผ่นเหล็กด้วย ในส่วนชั้นเคลือบ Zn-Fe ของเหล็ก SGCD มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าและมี ความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับ HDG ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมจึงเทียบเท่าได้กับแผ่นเหล็กซึ่งเป็นโลหะพื้น และเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบแบบ SGCD นี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนตัวถังภายนอก รวมถึงใช้ในการผลิตถังน้ำมันรถยนต์ เป็นต้น และมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ

C	0.040 % Max
Mn	0.180 % Max
P	0.014 % Max
S	0.011 % Max
Fe	Remains

2.2.3 Galvalume (Zincalume)

เป็นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเหมือนกับ HDG แต่ต่างกันที่ส่วนผสมภายในอ่างชุบ โดยวิธีนี้จะใช้อลูมิเนียม 55% ซิลิกอน 1.6% และที่เหลือเป็นสังกะสี (JIS Handbook: Ferrous Material & Metallurgy II 2001) โดยธาตุผสมของชั้นเคลือบเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพที่ต่างกันคือ

2.2.3.1 อลูมิเนียม เพิ่มความทนทานต่อการใช้งาน (Durability) การป้องกันการกัดกร่อนในตัวเอง และเพิ่มความต้านทานต่อระดับความร้อนที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Resistant)

2.2.3.2 สังกะสี เพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนโดยการผูกกร่อนแทนเหล็ก การใช้งานของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ เช่นงานที่ต้องการคุณสมบัติทนความร้อน สะท้อนแสงและความร้อนได้ดี การใช้งานผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเช่น หลังคา ฝาผนังท่อ รางน้ำ เหล็กโครงสร้าง รั้ว

ป้าย โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง โดยมีระยะเวลาการใช้งานนานกว่าผลิตภัณฑ์ที่เคลือบแบบ HDG และ Gal fan ถึง 2-4 เท่าโดยขึ้นกับสภาวะการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการใช้งานอื่นๆ เช่น ท่อไอเสีย ชิ้นส่วนภายในเครื่องซักผ้า เตาปิ้งขนมปัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญ คือความสามารถในการเชื่อมที่อยู่ในระดับต่ำ โดยไม่สามารถทำการเชื่อมที่ระดับกระแสไฟฟ้าสูงได้ และไม่สามารถทำการบัดกรีได้

2.2.4 Gal fan (Galvanized Fantastic Steel)

เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่เหมือนกับ HDG แต่ต่างกันในส่วนของผลภายในอ่างชุบ โดยการเคลือบแบบ Gal fan นี้จะมีส่วนผสมของอลูมิเนียมใกล้เคียงกับ HDG คือ ประมาณ 5% (Zn-5Al) โดยมีการผลิตทั้ง Zn-4Al และ Zn-7Al ซึ่งโครงสร้างที่ได้จะมีขนาดละเอียดโดยเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากการเคลือบ ผลิตภัณฑ์นี้มีคุณสมบัติทางที่ดี และผิวชั้นเคลือบไม่มีผลแตกพร้าว (spangle) จึงไม่มีการแตกของชั้นผิวเคลือบในระหว่างการขึ้นรูป แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือความสามารถในการเชื่อมอยู่ในระดับปานกลางเท่านั้น การใช้งานของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ เช่น Heat Exchanger, Ventilator Housing, Garage Doors, Sign Posts, Window Frames

2.2.5 เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้า (Electro Galvanized Steel)

กระบวนการนี้เป็นการเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบ โดยมีส่วนผสมคือ ขี้ขวด ขี้ลอบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งได้แก่ สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulfate) โดยสังกะสีจะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กในลักษณะเป็นอ็อกไซด์ ซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อนที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าจึงสูงกว่าจากนั้นจะนำไปเคลือบด้วยฟอสเฟต (Phosphate Treatment; P) หรือโครเมต (Chromate Treatment; C) ซึ่งการเคลือบฟอสเฟตจะช่วยให้ความสามารถในการทาสีติดดียิ่งขึ้น ส่วนโครเมตช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนและป้องกันคราบต่างๆ ได้ ข้อดีของการเคลือบประเภทนี้ คือ สามารถทำการเคลือบผิวโดยที่ความหนาในแต่ละด้านไม่จำเป็นต้องเท่ากันได้ เนื่องจากการเคลือบทำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นความสามารถในการขึ้นรูปจะขึ้นกับคุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเป็นหลัก โดยไม่มีผลของความร้อนเหมือนการผลิตแบบจุ่มร้อนที่เหล็กแผ่นจะได้รับความร้อนในขณะที่เคลือบ และถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์เคลือบสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้ามีความสามารถในการขึ้นรูป การทาสีติด และการเชื่อมที่ดียิ่งขึ้น การใช้งาน เช่น ตัวถังและชิ้นส่วนภายนอกรถยนต์ ฝาครอบของมอเตอร์ ฝาครอบคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

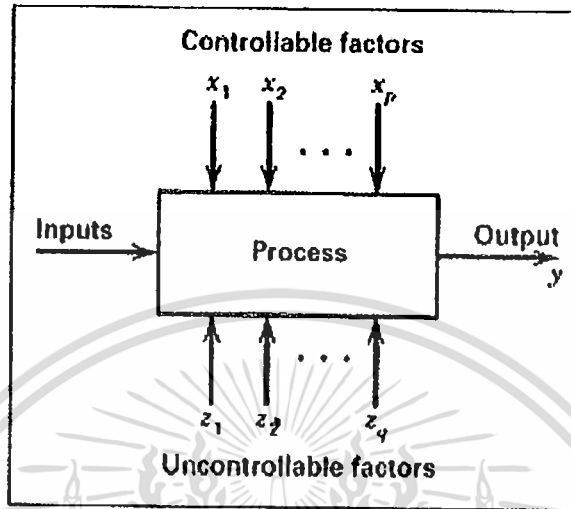
2.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง [6]

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiments: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการปรับสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time)

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองแบบปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่าจะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บ

ข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพัทธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หุ่นจำลองทั่วไปของกระบวนการ (Montgomery, 2001: 2)

อาจมองได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด X_1, X_2, \dots, X_p เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว Z_1, Z_2, \dots, Z_p เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

- 1) การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
- 2) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ค่า y ได้ตามค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ค่า y น้อยที่สุด
- 4) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ Z_1, Z_2, \dots, Z_p มีค่าต่ำสุด

2.3.1 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

2.3.1.1 เรพลีเคชัน (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลอง เรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลการทดลองนี้

2.3.1.2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้อง

เป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มมีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลกระทบของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

2.3.1.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

2.3.2 ปัจจัย (Factor) ในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เป็นผลดีต่อการทดลองเพราะว่าการทดลองผู้ทดลองจะต้องกำหนดค่าต่างๆ ในการทดลอง ที่คิดว่าจะมีผลต่อผลตอบที่ต้องการ

2.3.2.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดปัจจัยนั้นๆ ได้ในกระบวนการทดลอง ทั้งนี้อาจเกิดจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ อาจเป็นผลต่อกระบวนการ ผู้ทำการทดลองจะต้องพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะแบบนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้

2.4 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.4.1 การนิยามประชากร

ในการตัดสินใจทางสถิติ จะเรียกการรวบรวม (Collection) ของสิ่งที่ต้องการจะตัดสินใจนั้นว่า ประชากร (Population) และเรียกส่วนหนึ่งของประชากรที่ทำการศึกษาว่าสิ่งตัวอย่าง (Sample) โดยจะเรียกลักษณะเชิงตัวเลข (Numerical Characteristic) ของประชากรนั้นว่า พารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งโดยปกติให้แทนด้วยอักษรกรีก อาทิ μ , σ และเรียกลักษณะเชิงตัวเลขของสิ่งตัวอย่างว่า ตัวสถิติ (Statistic) ซึ่งโดยปกติให้แทนด้วยตัวอักษรละติน อาทิ \bar{x} , SD

พารามิเตอร์มี 2 ประเภทคือ แบบแอตทริบิวส์ (Attributes) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่ไม่สามารถวัดได้ เช่น ความสวยงาม ความเรียบร้อย สี ฯลฯ และแบบผันแปร (Variable) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่สามารถวัดได้และมีค่าผันแปรไป แม้ว่าจะวัดได้อย่างถูกต้อง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าใช้จ่าย แรงดึง ฯลฯ

ในทางวิศวกรรมอาจนิยาม “ประชากร” ได้ว่าเป็นการรวบรวมสิ่งที่สนใจที่เป็นไปได้ทั้งหมด ทั้งกรณีอาจมีรูปร่าง (Tangible) ก็ได้ เช่น กระบวนการผลิต เครื่องจักร ลอต (Lot) วัสดุดิบหรือกระบวนการบริการ เป็นต้น

ในนิยามประชากรเพื่อการศึกษาและตัดสินใจ จึงควรเริ่มต้นจากการกำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน แล้วอาศัยกลวิธีของการศึกษาวิธีการของวิศวกรรมอุตสาหกรรมการจัดการมาตรฐานการปฏิบัติการดังกล่าว โดยการนิยามประชากรนี้ทำให้การระบุด้วยว่า มีตัวแปรอะไรที่สามารถควบคุมได้ และมีตัวแปรอะไรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งนี้การนิยามประชากรดังกล่าวจะต้องไม่มาจากการศึกษาและสังเกตจากสถานที่จริง ของจริง และภายใต้สภาพแวดล้อมจริง หรืออาจ เรียกว่าหลัก 3 จริง โดยไม่ควรมีนิยามจากความเข้าใจทางทฤษฎีหรือจากแบบจำลอง (Model) หรือ จากแบบเขียน (Drawing) เท่านั้น เพราะจะทำให้การนิยามประชากรเป็นไปอย่างไม่ถูกต้อง อาทิ อุณหภูมิห้อง จะหมายถึง สิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้สำหรับกระบวนการทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับอุตสาหกรรมในห้องสะอาด (Clean Room) แล้วถือว่าอุณหภูมิห้องเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ เป็นต้น

ในการนิยามตัวแบบของประชากรที่ไม่ถูกต้อง จากการขาดทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) เนื่องจากการสังเกตหรือขาดความรู้ ความเข้าใจทางด้านวิศวกรรมเทคโนโลยี และวิศวกรรมการบริหารนั้น จะมีผลให้ได้ข้อมูลที่เกิดจากภาวะที่มีได้ควบคุม ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ทำให้ข้อมูลมีความแปรผันผิดปกติไป ไม่สามารถวิเคราะห์ทางสถิติได้โดย Dr. Walter A. Shewhart เรียกความผันแปรเนื่องจากสาเหตุที่มีได้ควบคุมสิ่งที่สามารถควบคุมได้นี้ว่า สาเหตุจากความผิดพลาด (Assignable Cause) และ Dr. Edwards Deming เรียกสาเหตุความผันแปรประเภทนี้ว่า สาเหตุธรรมดา (Special Cause) อาจสรุปได้ว่า ความผันแปรจากสาเหตุผิดพลาดจะทำให้ตัวแบบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้

ดังนั้น ในการนิยามประชากรทางสถิติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาข้อมูลของประชากรที่มีค่าไม่เท่ากันอย่างอิสระ และตัวแบบที่คงที่ที่สามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ มิฉะนั้น มีความจำเป็นต้องนิยามใหม่ ทั้งนี้ เนื่องจากว่ากลวิธีต่าง ๆ ทางสถิติจะไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความผันแปรจากสาเหตุจากความผิดพลาดได้ โดยการทบทวนความถูกต้องของนิยามประชากร อาจจะทำด้วย เครื่องมือเบื้องต้นทางสถิติ อาทิ แผนภูมิควบคุม สำหรับการทวนสอบความมีเสถียรภาพของตัวแบบข้อมูล

2.4.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่า การออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นนั้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีการผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ให้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100 \% \quad (2.1)$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขได้โดย

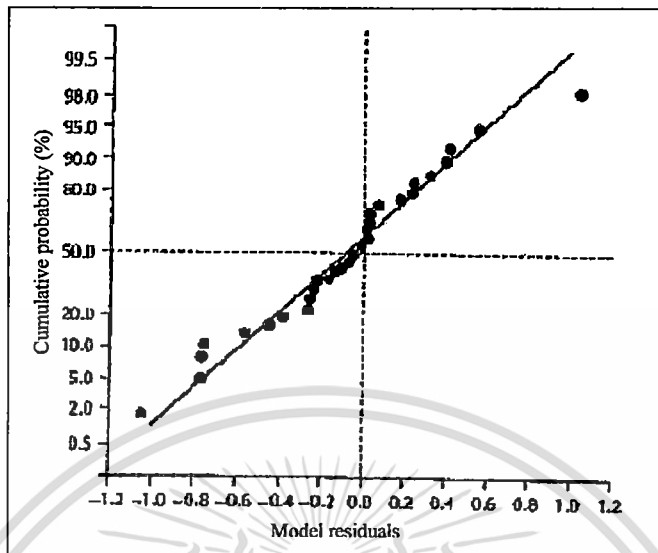
- 1) เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง
- 2) ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) มีมากต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

2.4.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อจะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Analyze Residuals) และตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองที่สร้างขึ้น

จากแบบจำลองแทนค่าตัวแปรลงในสมการเพื่อทำนายผลตอบของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งถ้าแบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยทุกเทอมของผลกระทบที่จำเป็นในการทำนายผลตอบ \hat{y} ค่าของส่วนตกค้าง ($e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_i$) ของแบบจำลอง ควรจะมีพฤติกรรม ดังนี้

- 1) มีค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างเข้าใกล้ศูนย์
- 2) ส่วนตกค้างควรเป็นแบบแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ดังรูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการแจกแจงของข้อมูลส่วนตกค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งจากกราฟพบว่าจุดของ

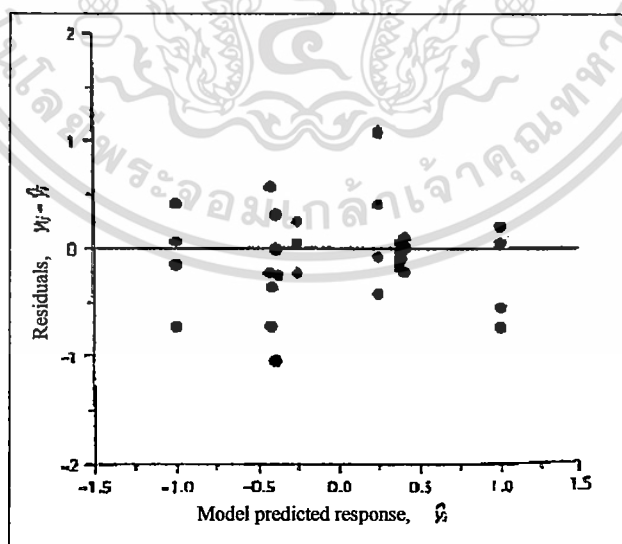
ส่วนตกค้างจะมีการกระจายตัวในเส้นตรง (0,0) ที่ลากผ่าน จะมีเพียง 2 หรือ 3 จุดเท่านั้นที่กระจายตัวอยู่ห่างเส้นตรง



รูปที่ 2.6 กราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

3) ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนที่คงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย (\hat{y}) หรือลำดับการทดลอง ดังนี้

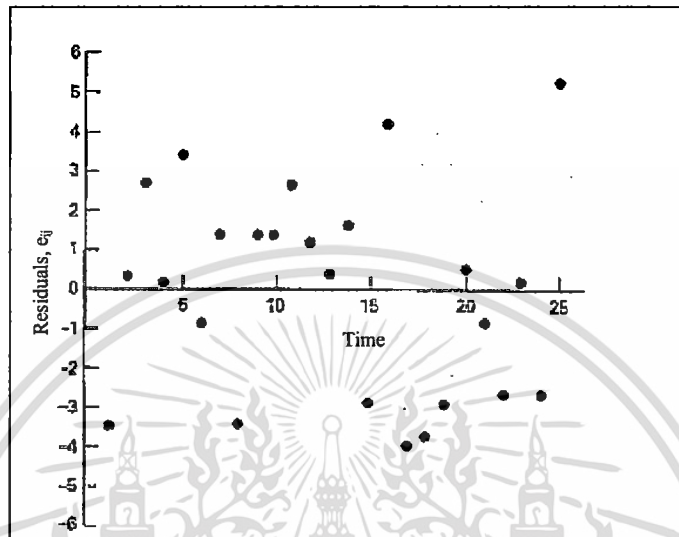
จากรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการแจกแจงข้อมูลส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plot of Residuals Versus the Predicted Value) ซึ่งจากกราฟมีลักษณะการกระจายตัวแบบอิสระมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างจากการทดลองไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ทำนาย



รูปที่ 2.7 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตกค้างจะต้องมีการกระจายตัวแบบอิสระ ไม่แปรผันตามปัจจัยที่สนใจศึกษาลำดับของการทดลอง หรือ อื่น ๆ จากรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการแจกแจงของข้อมูลส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus Run order) ซึ่งจากกราฟพบว่าเป็นส่วนตกค้างมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอนมีการกระจายตัวที่กระจัดกระจาย ไม่แปรผันตามลำดับการทดลอง



รูปที่ 2.8 กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง

ตั้งที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการตรวจสอบ ความเหมาะสมของแบบจำลองได้ดังนั้น คือใช้แบบจำลองที่ได้จากการทดลองทำนายค่าผลตอบในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นนำค่าทำนายที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง หรือคำนวณหาความผิดพลาดของส่วนตกค้าง ($e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_i$) ของแต่ละการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟการแจกแจงของส่วนตกค้างสังเกตลักษณะของกราฟที่ได้จากการพล็อต ซึ่งลักษณะของกราฟจะต้องมีพฤติกรรมดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

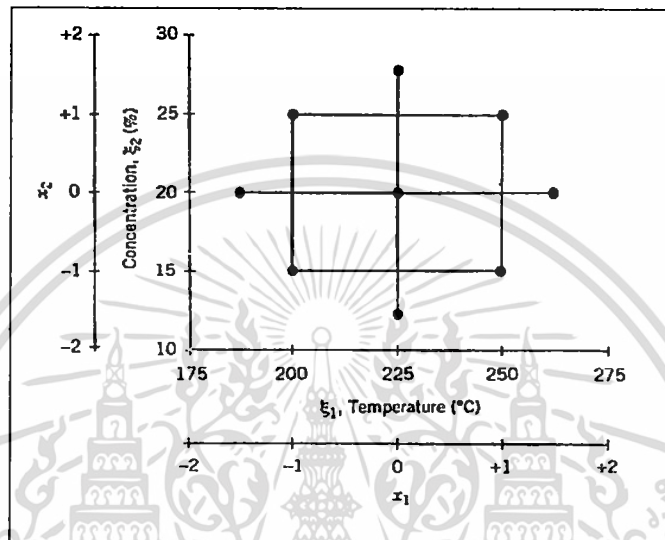
2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) ใช้ในการออกแบบการทดลองที่มีหลาย ๆ ปัจจัย (Factor) เพื่อที่จะหาผลของปัจจัยที่มีต่อตัวแปร ผลตอบ (Response Variable) ที่เป็นทั้งผลหลักและอันตรกิริยา (Interaction) กรณีพิเศษของ Factorial Design ที่มีความสำคัญมากคือ ในแต่ละปัจจัยที่เราสนใจมี 2 ระดับ (Level) ซึ่งเรียกว่า 2^k Factorial Design โดยที่ออกแบบการทดลองแบบนี้มีความสำคัญมากต่อการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ใน 3 ส่วนคือ

1) การออกแบบชนิด 2^k Factorial Design เป็นจุดเริ่มต้นของการหาค่าพื้นผิวผลตอบที่มีกระบวนการกรอง (Screening) เพื่อกำหนดตัวแปรของระบบหรือตัวแปรของกระบวนการที่สำคัญ

2) การออกแบบ 2^k Factorial Design โดยส่วนมากจะใช้สำหรับฟิตแบบจำลองพื้นผิวผลตอบลำดับหนึ่ง (Fit a First-Order Response Surface Model) และใช้ในการประมาณผลของปัจจัยที่ต้องการสำหรับวิธีการ Steepest Ascent

3) การออกแบบ 2^k Factorial Design เป็นการออกแบบพื้นฐานในการสร้างบล็อก เพื่อการสร้างพื้นผิวผลตอบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มการออกแบบ 2^k ด้วย Axial Runs ตามรูปที่ 2.9 แล้วจะให้ผลลัพธ์เป็น Central Composite Design ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบที่สำคัญมากของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Second-Order Response Surface Model)



รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลาง
(Myers and Montgomery, 1995:56)

2.5.1 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design)

เมื่อจำนวนปัจจัยการออกแบบของ 2^k เพิ่มขึ้น โดยส่วนมากแล้วจำนวนการทดลองสำหรับเรปลิเคตที่บริบูรณ์จะเพิ่มขึ้นมากเกินกว่าที่ทรัพยากร เช่น เวลา ค่าใช้จ่าย เป็นต้น ที่มีอยู่จะรองรับได้ ตัวอย่าง เช่น ใน 1 เรปลิเคตที่สมบูรณ์ของการออกแบบ 2^6 จะต้องมีการทดลองทั้งหมด 64 ครั้ง ในการออกแบบนี้แค่ 6 ตัว จากระดับขั้นความเสรี 63 ตัวเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลัก ระดับขั้นความเสรี 15 ตัว จะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบสองปัจจัย และระดับขั้นความเสรีที่เหลืออีก 42 ตัวที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยและมากกว่า

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล ถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ เราจะใช้ออกแบบเช่นนี้ เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้างที่เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อการกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองต่อ ๆ ไปที่จะตามมาในอนาคต

ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. หลักการที่ว่าปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่าง ๆ ของระบบหรือกระบวนการที่มีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

2. คุณสมบัติการฉายและการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่า (ใหญ่กว่า) ในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

3. การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

2.5.2 $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^k

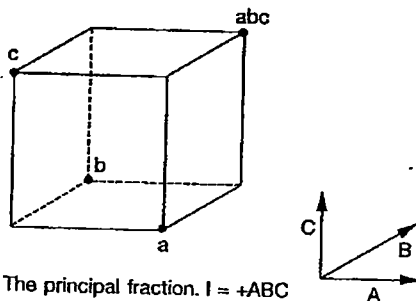
สมมติว่าเรากำลังสนใจที่จะทดสอบผลของ 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับแต่ปรากฏว่าเราไม่สามารถทำการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $2^3 = 8$ การทดลองได้ ทรัพยากรที่มีอยู่ยอมให้เราทดลองได้เพียง 4 การทดลองเท่านั้น เพราะว่าการออกแบบประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยจำนวน 2^{3-1} เท่ากับ 4 การทดลองซึ่งก็คือ $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^3 หรือเราอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการออกแบบ 2^{3-1}

เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบ 2^3 แสดงได้ดังตารางที่ 2.2 สมมติว่าเราเลือกการทดลองร่วมปัจจัย a, b, c และ abc เป็นเศษส่วนครึ่งหนึ่ง ซึ่งการทดลองเหล่านี้แสดงอยู่ในครึ่งบนของตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.10a

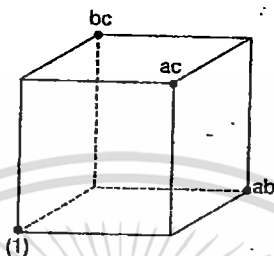
ตารางที่ 2.2 เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

Treatment	Factorial Effect							
Combination	1	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) The principal fraction. $I = +ABC$



(b) The alternate fraction. $I = -ABC$

รูปที่ 2.10 $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^k

สังเกตว่าการออกแบบของ 2^{3-1} ถูกสร้างขึ้นมาโดยเลือกจากการทดลองร่วมปัจจัยที่มีค่าในคอลัมน์ ABC ว่า ตัวก่อกำเนิด (Generator) ของเศษส่วนนี้ บางครั้งอาจจะเรียกตัวก่อกำเนิดเช่นนี้ว่า เวิร์ด (Word) ได้เช่นกัน ยิ่งกว่านั้นคอลัมน์เอกลักษณ์ I จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นเราจะเรียก $I = ABC$ ว่าเป็น ตัวกำหนดความสัมพันธ์ (Defining Relation) ของการออกแบบ โดยปกติแล้วตัวกำหนดความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงหมายถึงเซตของคอลัมน์ทั้งหมดที่เท่ากับคอลัมน์เอกลักษณ์ I

การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 2^{3-1} จะมีระดับขั้นความเสรีที่เราสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าของผลหลักได้เท่ากับ 3 เมื่อย้อนไปดูตารางที่ 2.2 อีกครั้งพบว่า ผลรวมเชิงเส้นของข้อมูลที่นำมาประมาณค่าของผลหลัก A, B, และ C คือ

$$I_A = \frac{1}{2} (a - b - c + abc) \tag{2.2}$$

$$I_B = \frac{1}{2} (-a + b - c + abc) \tag{2.3}$$

$$I_C = \frac{1}{2} (-a - b + c + abc) \tag{2.4}$$

นอกจากนั้นแล้วผลรวมเชิงเส้นที่ใช้สำหรับประมาณอันตรกิริยาแบบสองปัจจัยหาได้จาก

$$I_{BC} = \frac{1}{2} (a - b - c + abc) \quad (2.5)$$

$$I_{AC} = \frac{1}{2} (-a + b - c + abc) \quad (2.6)$$

$$I_{AB} = \frac{1}{2} (-a - b + c + abc) \quad (2.7)$$

ดังนั้น เราจะพบว่า $I_A = I_{BC}$, $I_B = I_{AC}$ และ $I_C = I_{AB}$ ซึ่งหมายความว่าเราไม่สามารถที่จะแยกความแตกต่างระหว่าง A และ BC, B และ AC, และ C และ AB ได้ ในความจริงแล้ว เมื่อเราประมาณค่าของ A, B และ C เราจะประมาณค่าของ $A + BC$, $B + AC$, และ $C + AB$ ด้วย เรานิยามผลของสองปัจจัยหรือมากกว่าที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า คู่แฝดแฝง (Alias) ในตัวอย่างนี้ A และ BC เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน, B และ AC เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน, และ C และ AC เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันและเราจะบ่งชี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $I_A \rightarrow A + BC$, $I_B \rightarrow B + AC$ และ $I_C \rightarrow C + AB$

โครงสร้างของคู่แฝดสำหรับการออกแบบนี้สามารถหาได้โดยใช้ตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABC$ โดยคุณคอลัมน์ใด ๆ ด้วยตัวกำหนดความสัมพันธ์จะได้คู่แฝดแฝงสำหรับของผลตัวนั้น ตัวอย่างเช่น เราต้องการหาคู่แฝดแฝงของ A ทำได้โดย

$$A \cdot I = A \cdot ABC = A^2 BC \quad (2.8)$$

หรือเนื่องจากว่ากำลังสองของคอลัมน์ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ I ดังนั้น

$$A = BC \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกันเราจะหาคู่แฝดแฝงของ B และ C ได้จาก

$$B \cdot I = B \cdot ABC \quad (2.10)$$

$$B = AB^2 C = AC \quad (2.11)$$

$$C \cdot I = C \cdot ABC \quad (2.12)$$

$$C = ABC^2 = AB \quad (2.13)$$

เราเรียกเศษส่วน $\frac{1}{2}$ ที่มี $I = ABC$ นี้ว่า เศษส่วนหลัก (Principal Fraction)

ตอนนี้เราเรียกว่าเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งแทน (เรียกว่า Alternate หรือ Complementary $\frac{1}{2}$ Fraction) นั่นคือ เราเลือกการทดลองร่วมปัจจัยในตารางที่ 2.2 ที่มีเครื่องหมายของคอลัมน์ ABC เป็นลบ เศษส่วนอีกครั้งหนึ่งนี้ (ประกอบได้ด้วย (1), ab, ac และ bc) แสดงดังรูปที่ 2.10b ตัวกำหนดความสัมพันธ์ของการออกแบบนี้ คือ

$$I = - ABC \quad (2.14)$$

ผลรวมเชิงเส้นสำหรับข้อมูลจากเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I'_A \rightarrow A - BC \quad (2.15)$$

$$I'_B \rightarrow B - AC \quad (2.16)$$

$$I'_C \rightarrow C - AB \quad (2.17)$$

ดังนั้น เมื่อเราประมาณค่า A, B และ C โดยใช้เศษส่วนชุดนี้ เราจะประมาณค่าของ A - BC, B - AC และ C - AB นั่นเอง

ในทางปฏิบัติเราสามารถใช้ได้ทั้งเศษส่วนชุดที่อยู่ในครั้งแรกหรือครั้งหลังก็ได้ ทั้งนี้เพราะเศษส่วนทั้งสองจะอยู่ในครอบครัว (Family) เดียวกัน นั่นคือ เศษส่วนทั้งสองครั้งหนึ่งนี้จะทำให้เกิดเป็นการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ ซึ่งสามารถดูได้จากรูป 2.10a และ 2.10b

สมมติว่าหลังจากที่ทดลองกับครั้งแรกของการออกแบบ 2^3 เรียบร้อยแล้ว เราตัดสินใจที่จะทดลองกับอีกครั้งหนึ่งด้วย ดังนั้น ในที่นี้การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 8 ของการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ได้ถูกดำเนินการขึ้น ตอนนี้เราจะได้ตัวประมาณ De - Aliased ของผลทั้งหมดโดยการวิเคราะห์การทดลองร่วมปัจจัยที่แปดเหมือนกับการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ที่ประกอบด้วย 2 บล็อก และมี 4 การทดลองในแต่ละบล็อก ซึ่งสามารถทำได้โดยการบวกและลบผลรวมเชิงเส้นของปัจจัยที่เกิดจากเศษส่วนทั้งสอง ตัวอย่างเช่น $I_A \rightarrow A + BC$ และ $I'_A \rightarrow A - BC$ ซึ่งหมายความว่า

$$\frac{1}{2}(I_A - I'_A) = \frac{1}{2}(A + BC - A + BC) \rightarrow A \quad (2.18)$$

และ

$$\frac{1}{2}(I_A + I'_A) = \frac{1}{2}(A + BC + A - BC) \rightarrow A \quad (2.19)$$

ดังนั้น สำหรับผลรวมเชิงเส้นทั้ง 3 คู่ เราจะได้

I	From $\frac{1}{2}(I_i + I'_i)$	From $\frac{1}{2}(I_i - I'_i)$
A	A	BC
B	B	AC
C	C	AB

2.5.3 มิติของการออกแบบ

เราเรียกการออกแบบ 2^{3-1} ดังกล่าวว่าการออกแบบมิติ III (Resolution III Design) ในการออกแบบเช่นนี้ ผลหลักจะคู่แฝดแ่งอันตรกิริยา 2 ปัจจัย การออกแบบที่มีมิติ R ก็ต่อเมื่อไม่มีผลของ p ปัจจัยใด ๆ ที่คู่แฝดแ่งกับผลอื่น ๆ ที่น้อยกว่า R - p เราจะใช้ตัวห้อยเป็นตัวเลขโรมันแทนมิติของการออกแบบ ดังนั้น เศษส่วน $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^3 ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ I = ABC (หรือ I = -ABC) คือการออกแบบ 2_{III}^{3-1}

เนื่องจากการออกแบบที่มีมิติ III, IV และ V มีความสำคัญ เราจะให้นิยามและยกตัวอย่างสำหรับการออกแบบเหล่านี้ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบมิติแบบ III การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักใด ๆ ที่จะคู่แฝดแ่งตัวอื่น ๆ แต่ผลหลักจะคู่แฝดแ่งกับอันตรกิริยาสองปัจจัย และอันตรกิริยาสองปัจจัยอาจจะคู่แฝดแ่งซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{3-1} ที่แสดงในตารางที่ 2.4 เป็นการออกแบบที่มีมิติ III (2_{III}^{3-1})

2. การออกแบบมิติ IV การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักใด ๆ ที่จะคู่แฝดแ่งกับผลหลักตัวอื่น ๆ กับอันตรกิริยาสองปัจจัยใด ๆ แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะคู่แฝดแ่งซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{4-1} ที่มี I = ABCD เป็นการออกแบบมิติ IV (2_{IV}^{4-1})

3. การออกแบบมิติ V การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยใด ๆ ที่จะคู่แฝดแ่งกับผลหลักหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยตัวอื่น ๆ แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะคู่แฝดแ่งกับอันตรกิริยาสามปัจจัย ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{5-1} ที่มี I = ABCD เป็นการออกแบบที่มี V (2_V^{5-1})

ตามปกติแล้วมิติของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับจะเป็นตัวอักษรที่น้อยที่สุดในเวิร์ดของตัวกำหนดความสัมพันธ์ สิ่งที่มาคือ เราสามารถเรียกการออกแบบต่อจากนี้ว่า การออกแบบชนิดสามตัวอักษร สี่ตัวอักษร และห้าตัวอักษร ตามลำดับ โดยมากแล้วเรามักจะกำหนดให้มิติสูงที่จะเป็นไปได้ของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลมีค่าตรงกันกับระดับของเศษส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การออกแบบยังมีมิติสูง ก็ยังมีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมติฐานเกี่ยวกับว่า อันตรกิริยาตัวใดจะถูกกลบเลือนได้ เพื่อที่จะได้มาซึ่งการตีความหมายข้อมูลอย่างถูกต้อง

2.5.4 การสร้างการออกแบบ $\frac{1}{2}$

เศษส่วน $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^k ที่มีมิติสูง อาจจะสามารถสร้างได้จากการเขียนการออกแบบเบื้องต้น (Basic Design) ซึ่งประกอบไปด้วย แฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ของ 2^{k-1} แล้วเติมปัจจัยตัวที่ k ลงไป โดยกำหนดให้เครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบของปัจจัยที่ k มีค่าเหมือนกับเครื่องหมายของอันตรกิริยาขั้นสูงสุด ABC...(K-1) ดังนั้น เศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2_{III}^{3-1} จะหาได้จากการเขียนแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ให้เป็นการออกแบบเบื้องต้นและหาค่า C จากอันตรกิริยา AB เศษส่วนอีกชุดหนึ่งหาได้โดยให้ C ร่วมปัจจัย (แถว) ที่ครบถูกต้อง แต่จะขาดอยู่ 1 คอลัมน์ เราจะใช้ I = ABC...K ในการหาคอลัมน์ที่ K ขาดหายไป ดังนั้น เราจะใช้ K = ABC...(K-1) ในการกำหนดเครื่องหมายบวกและลบที่จะใช้กับปัจจัยตัวที่ k

ตามความเป็นจริงแล้วเราสามารถนำผลของอันตรกิริยาตัวใด ๆ มาใช้ในการสร้างคอลัมน์สำหรับปัจจัยตัวที่ k ก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าใช้ผลของอันตรกิริยาตัวอื่นๆ นอกเหนือจาก ABC...(K-1) แล้ว การออกแบบนี้จะก่อให้เกิดการออกแบบที่มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้

อีกวิธีหนึ่งในการสร้างการออกแบบเศษส่วน $\frac{1}{2}$ ก็คือ แบ่งการทดลองทั้งหมดออกเป็น 2 บล็อกโดยใช้ ABC...K เป็นตัวคอนฟาวด์ ซึ่งในแต่ละบล็อก คือ การออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} ซึ่งมีมิติสูงสุด

ตารางที่ 2.3 เศษส่วน $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ

Run	Full 2^2 Factorial (Basic Design)			$2_{III}^{3-1} ./ = ABC$			$2_{III}^{3-1} ./ = -ABC$		
	A	B	C=AB	A	B	C=AB	A	B	C=AB
1	-	-	+	-	-	+	-	-	-
2	+	-	-	+	-	-	+	-	+
3	-	+	-	-	+	-	-	+	+
4	+	+	+	+	+	+	+	+	-

2.5.5 แบบจำลองการถดถอย (The Regression Model)

จะเป็นการง่ายมากในการแปลงผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณการในการออกแบบชนิด 2^k Factorial Design ไปเป็นแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ซึ่งจะช่วยให้หาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัย (Space Spanned) ของปัจจัยที่ได้ออกแบบ สำหรับแบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง (First-Order Regression Model) หาได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon \quad (2.20)$$

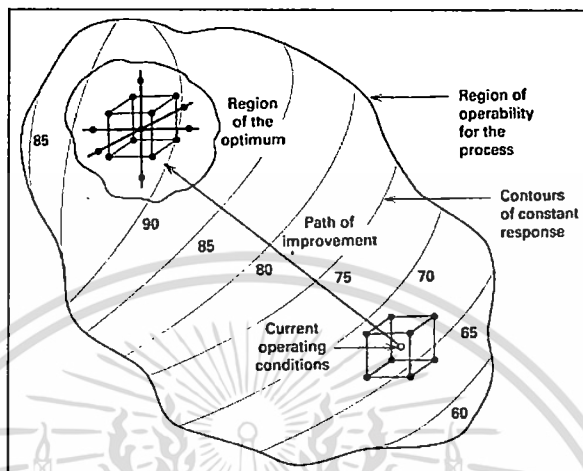
แบบจำลองการถดถอยนี้เป็นแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่งอย่างแท้จริงและถ้าพิจารณาในเทอมอันตรกิริยาสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \epsilon \quad (2.21)$$

2.5.6 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่นเงื่อนไขในการทำงานปัจจุบันตามรูปที่ 2.9 ซึ่งจะพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ก็คือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อพบค่าที่ดีที่สุดแล้วเราจะนำเอาแบบจำลอง

ที่ซับซ้อนขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถที่จะหาจุดที่ดีที่สุดได้ ดังรูปที่ 2.11 พบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทนเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันเป็นผลตอบแทนที่ดีที่สุด หรือถ้าค่าที่ดีที่สุดค่าต่ำสุด ในที่นี้อาจคิดเสมือนว่ากำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทนก็คือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ



รูปที่ 2.11 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทน (Montgomery, 2001 : 429)

ถ้ากำหนดให้ปัจจัยมีจำนวน k ตัว (x_1, x_2, \dots, x_k) แล้วจะได้ผลตอบ Y เป็นฟังก์ชันของ ϕ นั้น คือ

$$E(y) = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k) \tag{2.22}$$

ค่าเริ่มต้นของ ϕ ปกติจะประมาณจาก First Order Regression Model อยู่เหนือพื้นที่เล็กๆ ของ X นั้นคือจะเกิดความโค้งเล็กน้อย ดังนั้น

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \tag{2.23}$$

บนพื้นที่ที่มีความโค้งมาก โดยเฉพาะเมื่อเข้าใกล้จุดสูงสุด ปกติจะใช้ Second Order Model นั้นคือ

$$\begin{aligned} E(y) &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \\ &\quad + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{kk} x_k^2 \\ &\quad + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{k-1,p} x_{p-1} x_p \\ &= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_{j>1} \beta_{ij} x_i x_j \end{aligned} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบการทดลองเริ่มแรกจะพิจารณาที่ First Order Model เป็นอันดับแรกโดยมีประเด็นพื้นฐานอยู่ 2 ส่วนที่ต้องพิจารณาคือเป็นชนิดของการออกแบบการทดลองเริ่มแรกและเป็นแนวทางที่จะหาการออกแบบในขั้นต่อไป ดังนั้นต้องเข้าใจว่าขณะนี้เรากำลังจะไปบนพื้นที่ของพื้นผิวผลตอบ

2.5.7 การป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent)

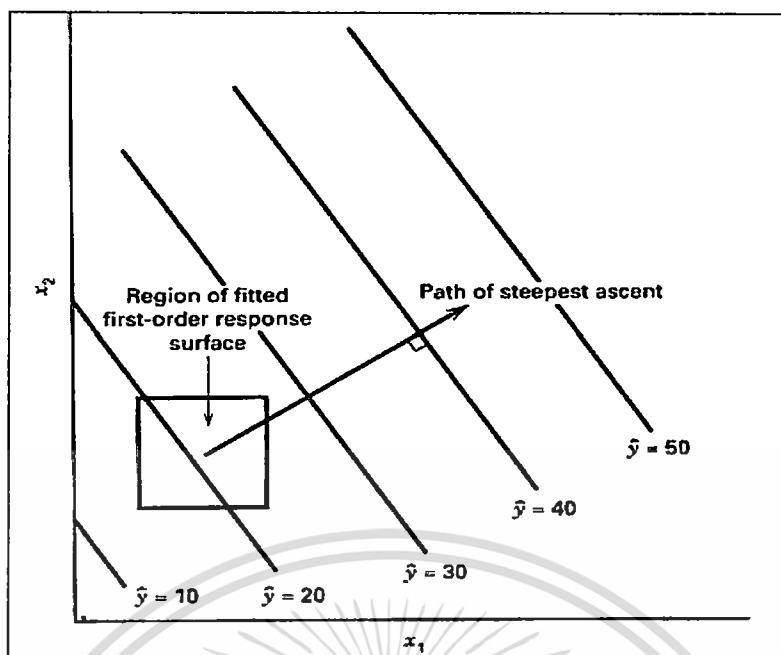
บ่อยครั้งที่การประมาณค่าเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดเบื้องต้นสำหรับระบบที่กำลังศึกษานั้นอยู่ห่างไกลกับจุดที่ดีที่สุดตัวจริง ในกรณีเช่นนั้นวัตถุประสงค์ของผู้ทำการทดลองคือ การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากจุดตั้งต้นไปสู่บริเวณที่ดีที่สุด วิธีการที่จะใช้ควรจะเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ เมื่ออยู่ห่างไกลกับจุดที่ดีที่สุดนั้น โดยมากแล้วจะสมมติว่าเป็นแบบจำลองกำลังหนึ่งนั้นเป็นแบบจำลองที่สามารถประมาณพื้นผิวที่แท้จริงสำหรับบริเวณเล็ก ๆ ของตัวแปร X

วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดความเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุดบนทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสูงที่สุด แต่ถ้าต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุดแทน จะเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Descent) แบบจำลองกำลังหนึ่งที่ถูกร่างขึ้นมา คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i \quad (2.25)$$

และพื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่ง (First-Order Response Surface) จะเป็นเส้นโครงร่างของ \hat{y} ซึ่งจะเป็นอันดับของเส้นขนานดังแสดงตามรูปที่ 2.12 ทิศทางของการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดคือทิศทางที่ค่า \hat{y} มีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วที่สุด ทิศทางนี้คือทิศทางที่ขนานกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกร่างขึ้นมา ซึ่งจะใช้เส้นทางที่ผ่านจุดศูนย์กลางของอาณาเขตที่กำลังสนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกร่างขึ้นมานี้เป็นเส้นทางในการป็นขึ้นที่มีความชันสูงสุด ดังนั้นการก้าวอย่าง (Step) บนเส้นทางเดินนี้จะเป็นส่วนสัมพันธ์กับการถดถอย $\{\hat{\beta}_i\}$ ขนาดที่แท้จริงของการก้าวอย่างจะหาได้จากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการของผู้ทำการทดลองหรือข้อพิจารณาทางปฏิบัติอื่น ๆ

การทดลองจะมีการทำขึ้นบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด จนกระทั่งค่าผลตอบไม่สามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้อีกไปได้ หลังจากนั้นแบบจำลองกำลังหนึ่งตัวใหม่อาจถูกสร้างขึ้นมาจะต้องมีการหาเส้นทางสูงสุดขึ้นมาใหม่ และกระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็จะเกิดขึ้นอีกครั้ง ในที่สุดผู้ทำการทดลองก็จะมาสู่จุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่ดีที่สุดซึ่งจะปรับบ่งชี้โดยดูจาก Lack of fit ของแบบจำลองกำลังหนึ่งเมื่อถึงตอนนั้นการทดลองเพิ่มเติมจะถูกดำเนินการขึ้นเพื่อหาตัวประมาณของค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสม



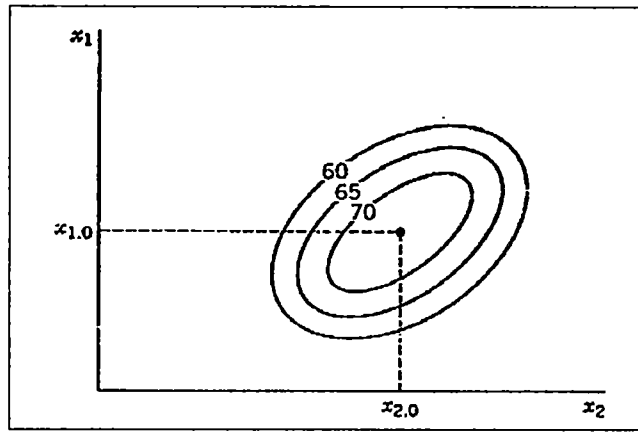
รูปที่ 2.12 พื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่งและเส้นทางป็นขึ้นด้วยทางขึ้นที่ชันที่สุด
(Montgomery, 2001 : 430)

2.5.8 วิเคราะห์พื้นผิวผลตอบกำลังสอง

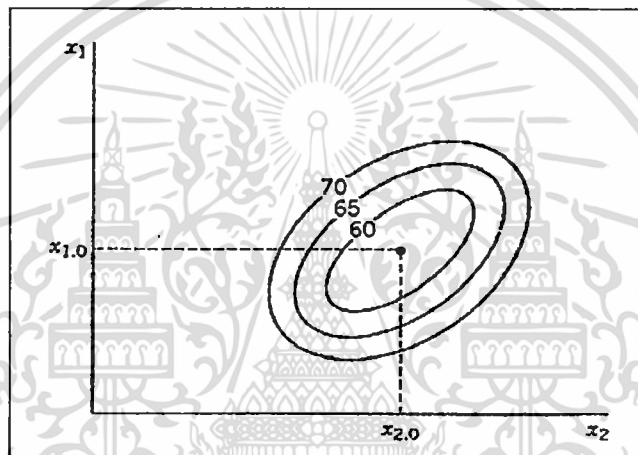
เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ที่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุด แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้ จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าผลตอบ ส่วนมากแบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบ ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.26)$$

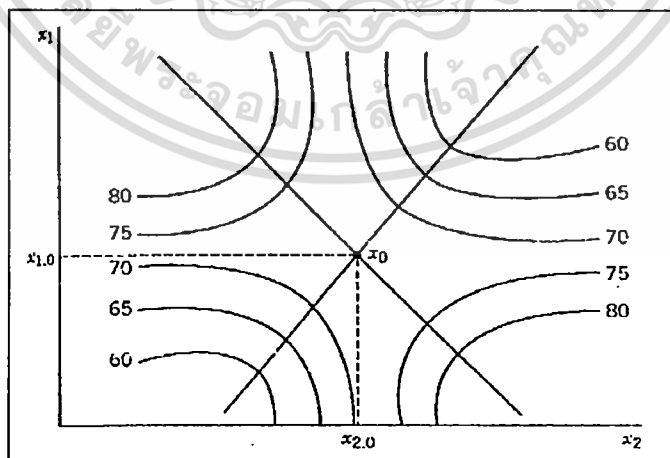
โดยธรรมชาติของระบบพื้นผิวผลตอบ คือ จุดสูงสุด จุดต่ำสุด และจุดอานม้า จะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายและสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองตามสมการ 2.26 และตามรูปที่ 2.11 จุดกลางของระบบคือ จุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) คือ จุดที่เป็นผลสูงสุดของผลตอบ ส่วนรูปที่ 2.12 จุดหยุดนิ่งเป็นจุดที่ต่ำสุดของผลตอบ โดยทั้ง 2 รูปนี้ ลักษณะของกราฟโครงร่างเป็นรูปไข่ ส่วนรูปที่ 2.13 เป็นลักษณะของจุดอานม้า (Saddle Point)



รูปที่ 2.13 จุดที่มีผลตอบสูงที่สุด
(Myers and Montgomery, 1995 : 210)



รูปที่ 2.14 จุดที่มีผลตอบต่ำที่สุด
(Myers and Montgomery, 1995 : 210)



รูปที่ 2.15 จุดอานม้า
(Myers and Montgomery, 1995 : 211)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

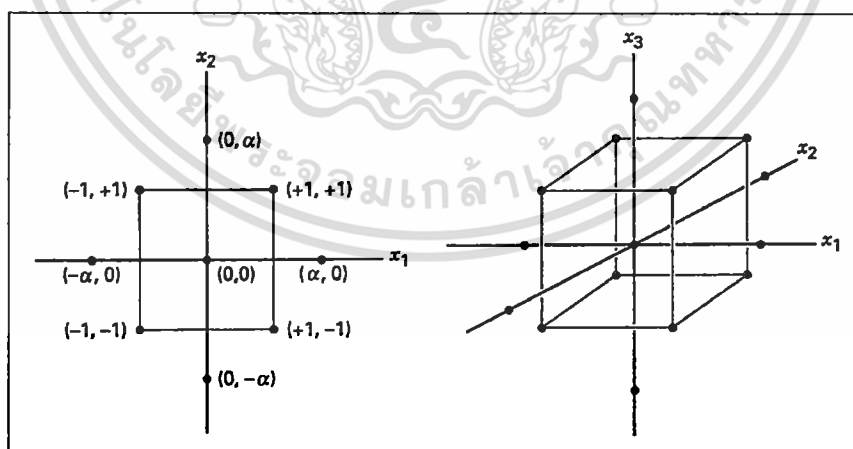
กราฟโครงร่าง (Contour Plot) มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบการใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการสร้างกราฟ โครงร่างของพื้นผิวผลตอบขึ้นมาจะทำให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิว และตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ

2.5.9 การออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เสนอโดย Box and Wilson จึงเรียกว่า Box-Wilson Central Composite Design ซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการ คือ เป็นการออกแบบ Orthogonal Rotatable ใช้สำหรับพิตแบบจำลองกำลังสอง โดยปกติ CCD ประกอบด้วย 2^k Factorial ที่มี n_f Runs, $2k$ Axial หรือ Star Runs และ n_c Center Runs (Montgomery, 2000) เพื่อยอมให้ประมาณความโค้งของผิวตอบ พารามิเตอร์ที่สำคัญของ CCD คือ ระยะของ α และ n_c โดยปกติค่า α จะขึ้นอยู่กับบริเวณในการปฏิบัติการทดลองหรือบริเวณที่สนใจ และมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง \sqrt{k} ส่วน n_c ปกติจะอยู่ระหว่าง $3 \leq n_c \leq 5$ (Myers and Montgomery, 1995) ถ้าระยะ ทางจากศูนย์กลางของจุดการออกแบบ Factorial มีค่า ± 1 หน่วย ในแต่ละปัจจัยแล้วระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ Star Point คือ $\pm \alpha$ ด้วย $|\alpha| > 1$ รูป 2.14 แสดง Central Composite Design ของ 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย

2.5.10 การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับสอง

การออกแบบส่วนประกอบ หรือ CCD ซึ่งใช้ในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพิตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียล ที่มี n_f การทดลอง, การทดลอง 2^k ในแนวแกนหรือแกนรูปดาว (Star) และ n_c การทดลองที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.16 จะเป็นการแสดง CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ ปัจจัย



รูปที่ 2.16 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$
(Montgomery, 2001 : 475)

2.5.11 CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Spherical) นั่นคือจะเป็นการตีความถ้าจะใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้ เมื่อบริเวณที่สนใจอยู่มีรูปทรงกลมอย่างไรก็ตาม การออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้อง 100 % ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่สนใจอยู่นั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{k}$ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลและการออกแบบในแนวแกนให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมีเท่ากับ \sqrt{k}

2.5.12 จุดศูนย์กลางของการทดลองใน CCD

การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่สนใจอยู่ เมื่อบริเวณนั้นเป็นรูปทรงกลมการออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการทดลองเข้าไว้ด้วยทั้งนี้เพื่อจะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบสนองที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้วขอแนะนำให้ใช้ 3-5 รัน (Run)

2.5.13 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบ แบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ได้ถูกพัฒนาโดย Box และ Behnken (1996) ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (Second-Order) วิธีการในการออกแบบโครงสร้างการทดลองนั้นมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก โครงสร้างการออกแบบการทดลองจะอยู่ในรูปแบบที่สมดุล บล็อกไม่สมบูรณ์ (Balance Incomplete Block Design) ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองแบบสมดุลบล็อกไม่สมบูรณ์ สำหรับ 3 ทรีทเมนต์ และ 3 บล็อก ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองแบบสมดุล บล็อกไม่สมบูรณ์ สำหรับ 3 ทรีทเมนต์ และ 3 บล็อก

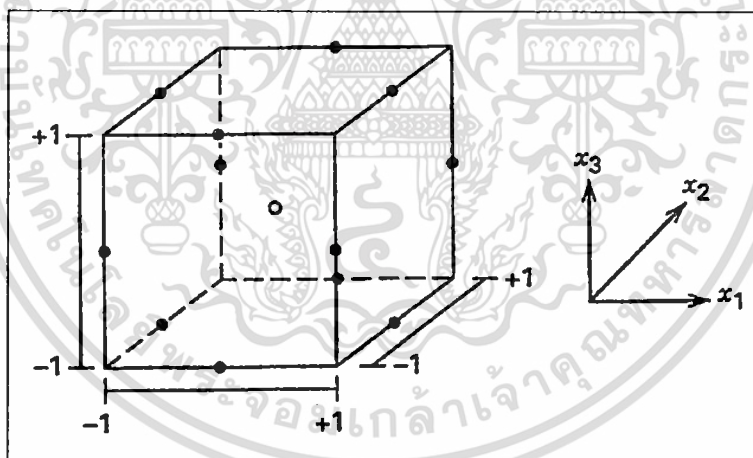
	Treatment		
	1	2	3
	X	X	
Block 1	X		X
Block 2		X	X
Block 3			

เมื่อนำตารางที่ 2.4 ไปสร้างแบบการทดลองจากบล็อกที่ 1 คู่ของทรีทเมนต์ที่ 1 และที่ 2 ในการเซ็คค่าพื้นผิวตอบสนอง จะมีตัวแปร x_1 และ x_2 อยู่ในรูปของ 2^2 Factorial (Scaling ± 1) ในขณะที่ x_3 จะกำหนดให้อยู่ที่จุดศูนย์กลาง ($x_3 = 0$) ในบล็อกที่ 2 และ 3 ก็จะเป็นเช่นเดียวกัน ซึ่งจะใช้รูปแบบ 2^2 Factorial เพื่อสร้างระดับของคู่ตัวแปร ส่วนตัวแปรที่เหลือจะกำหนดให้เท่ากับ 0

และแถวสุดท้ายจะกำหนดค่าตัวแปรแต่ละตัวให้อยู่ในจุดศูนย์กลาง เรียกว่า Vector of Center Runs จากผลของ Box-Behnken Design ที่ $k = 3$ แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การออกแบบการทดลอง แบบ Box-Behnken Design ที่มีตัวแปรสามตัวแปร

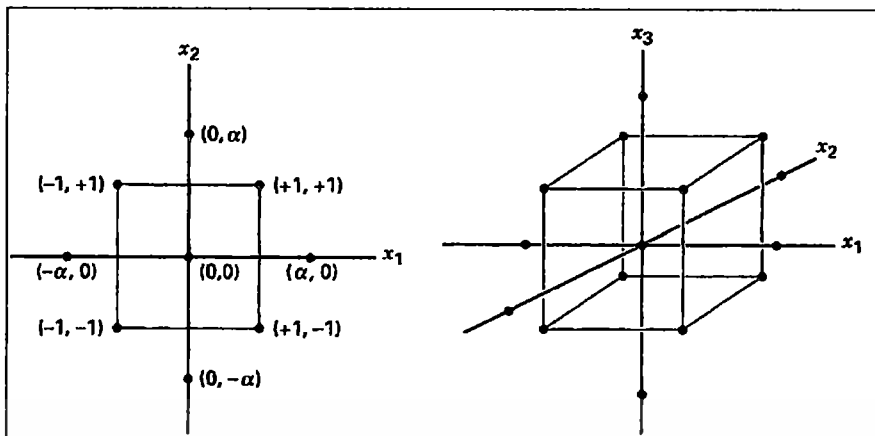
Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0



รูปที่ 2.17 การออกแบบการทดลอง แบบ Box-Behnken with a Center Point

จากรูปเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 สังเกตว่าการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้การออกแบบ แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดกำหนดบนและขีด จำกัดล่างของตัวแปรแต่ละตัวเป็นตัวกำหนด การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนรูปลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมาก หรือเป็น ไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 Central Composite Design เมื่อ k= 2 และ k = 3

2.5.14 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นฟังก์ชันที่มีใช้ในการพิจารณาสถานะของผลตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอิสระ โดยค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Desirability, d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เมื่อ d มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าความพึงพอใจก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อ d มีค่าเท่ากับหนึ่ง หมายถึง ผลตอบนั้นได้ความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ หรือค่าความพึงพอใจของผลตอบ ซึ่งได้จากสมการต่าง ๆ ดังนี้

กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณา มีเพียงผลตอบเดียว ค่าความพึงพอใจหาได้จากสมการ

2.27 และสมการ 2.28

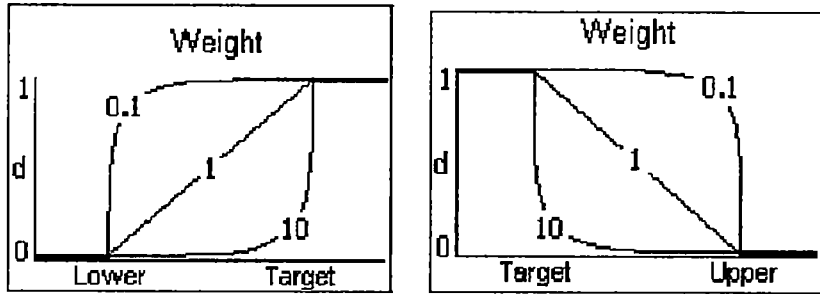
ถ้าต้องการผลตอบสูงสุด (Maximum) หาได้จากสมการ 2.27

$$d = \begin{cases} 0 & \left[\frac{y - L}{T - L} \right]^r \\ 1 & \end{cases} \quad \begin{matrix} y < L \\ L \leq y \leq T \\ y > T \end{matrix} \quad (2.27)$$

และต้องการผลตอบต่ำสุด (Minimum) หาได้จากสมการ 2.28

$$d = \begin{cases} 1 & \left[\frac{U - y}{U - T} \right]^r \\ 0 & \end{cases} \quad \begin{matrix} y < T \\ T \leq y \leq U \\ y > U \end{matrix} \quad (2.28)$$

- เมื่อ d คือ ความพึงพอใจของผลตอบ
 - y คือ ค่าของผลตอบ
 - L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบ
 - U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบ
 - r คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบ (Weight) ซึ่งกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบนี้
- สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนัก ดังรูปที่ 2.19



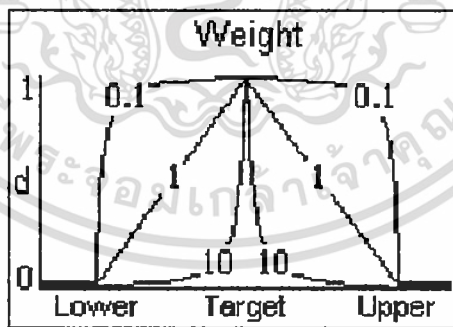
รูปที่ 2.19 การกำหนดน้ำหนัก (Weight) ของผลตอบ (กรณีมีผลตอบเดียว)

กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบหาได้จากสมการ 2.29

$$d = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{y-L}{T-L} \\ \frac{U-y}{U-T} \\ 0 \end{bmatrix} r_1 & y < L \\ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{y-L}{T-L} \\ \frac{U-y}{U-T} \\ 0 \end{bmatrix} r_2 & L \leq y \leq T \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & T \leq y \leq U \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & y > U \end{cases} \quad (2.29)$$

- เมื่อ T คือ ค่าเป้าหมายผลตอบ (Target)
- r1 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 1 (Weight 1)
- r2 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 2 (Weight 2)

การกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบทั้งสองนี้ สามารถเลือก กำหนดค่าของน้ำหนัก ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การกำหนดน้ำหนัก (Weight) ของผลตอบ (กรณีมีผลตอบ 2 ตัว)

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีหลายค่า จะต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability; D) จากสมการ 2.30

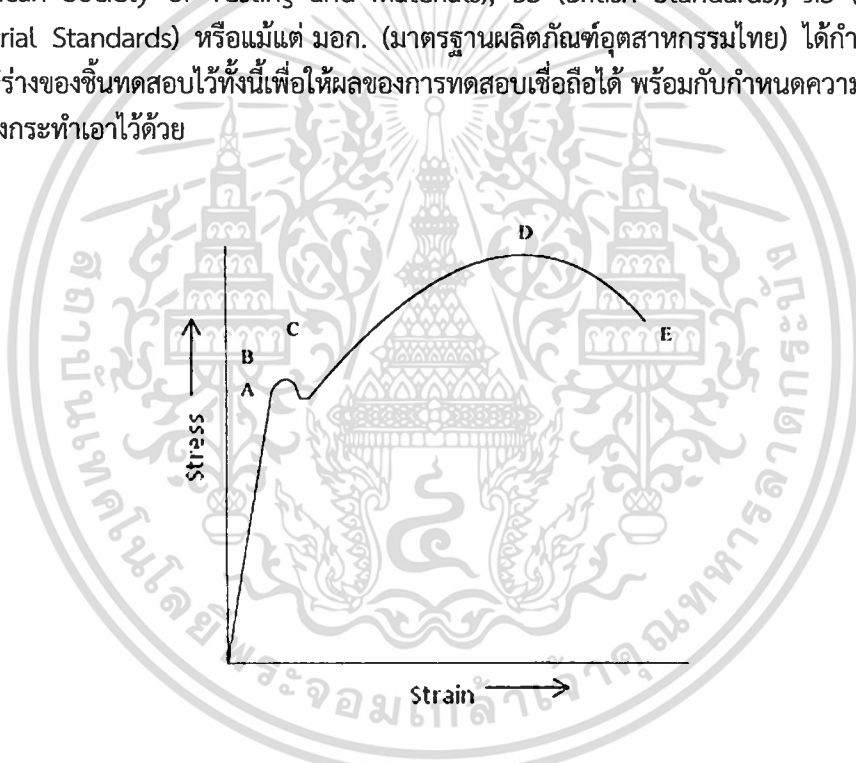
$$D = [d_1 * d_2 * \dots * d_k]^{1/k} \quad (2.30)$$

- เมื่อ D คือ ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability)
 d คือ ความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ (Desirability)
 k คือ จำนวนของผลตอบ

และเมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีเพียงค่า ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบจะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบนั้น

2.6 การทดสอบแรงดึง (Tension Test) [7]

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.21 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

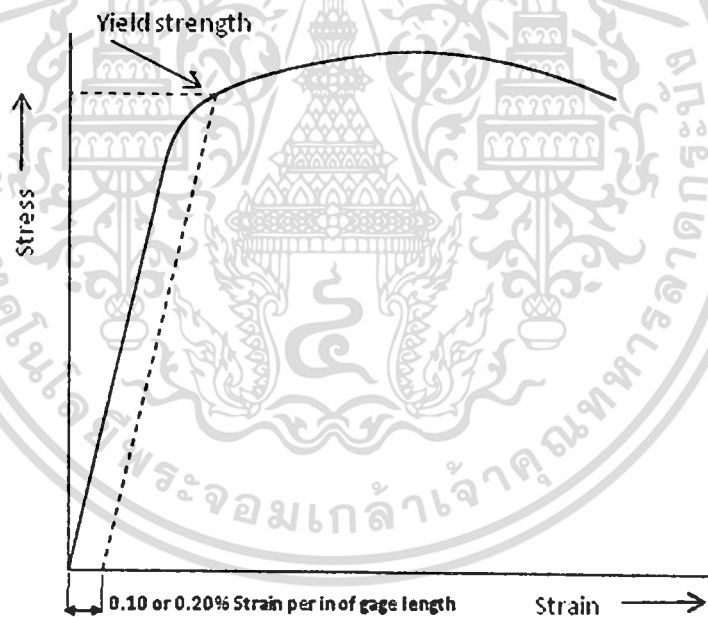


รูปที่ 2.21 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดจุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.22 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.22

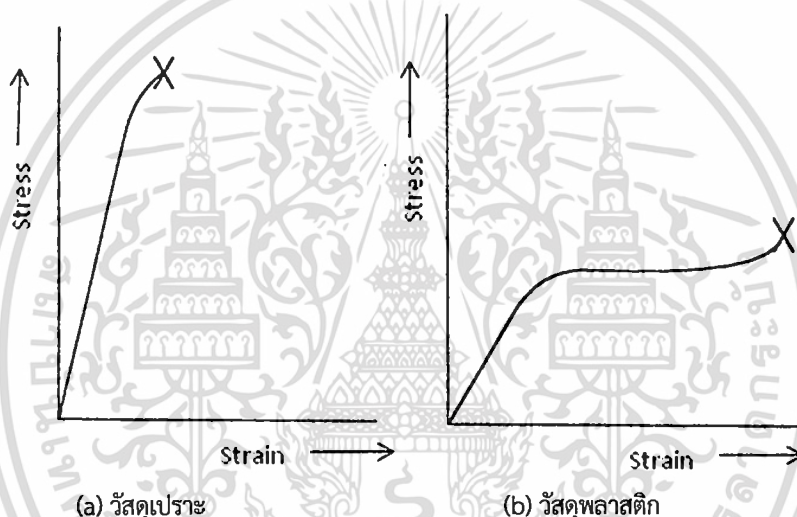


รูปที่ 2.22 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้น

สูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่าค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้วมันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.23a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มี การเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติก จะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.23 b

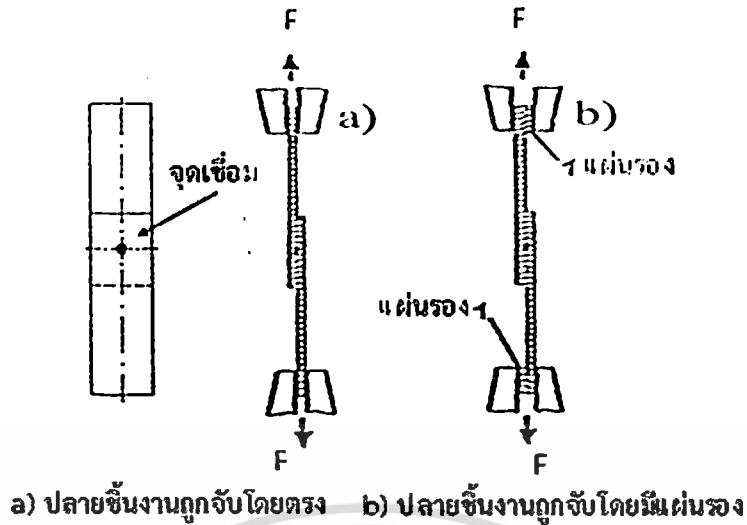


รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกเช่น ความเหนียว (Ductility)

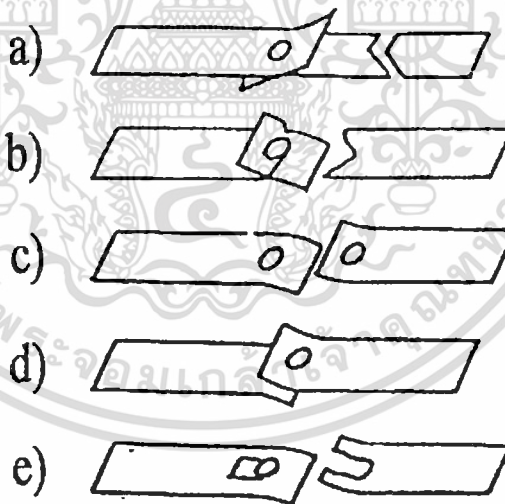
2.6.1 การทดสอบแบบดึงเฉือน (Shear Tension Test)

การทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นการใช้แรงดึงขึ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบต่อเกลียวสองชิ้นให้หลุดออกจากกันในแนวขนานกับจุดเชื่อมโดยแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การทดสอบแรงดึงเฉือนและการจับชิ้นงานทดสอบ

ผลของการทดสอบแบบดึงเฉือนจะให้ลักษณะของการฉีกขาดแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของจุดเชื่อม วัสดุที่ทำการทดสอบ ความหนาของแผ่นชิ้นงานทดสอบ การซึมลึกของจุดเชื่อม ความโตของจุดเชื่อม ความกว้างของชิ้นงาน ระยะห่างของจุดเชื่อม และความยาวของระยะซ้อนเกย แสดงดังรูปที่ 2.25

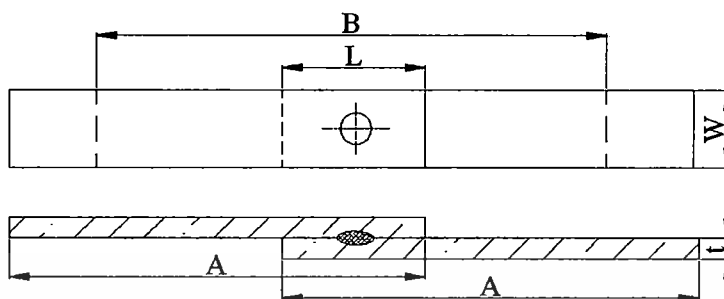


รูปที่ 2.25 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเฉือน

จากรูปที่ 2.25 ลักษณะการขาดจากการทดสอบแรงดึงเฉือนแบ่งได้ดังนี้ a) แผ่นชิ้นงานทดสอบขาด b) แผ่นชิ้นงานทดสอบฉีก c) จุดเชื่อมขาดแบบตัดเฉียงฉีก d) ชิ้นงานทดสอบขาดตรงจุดเชื่อมหลุดเป็นรู และ e) ชิ้นงานทดสอบขาดแบบฉีกเนื่องงานทดสอบ

2.6.2 ชิ้นงานทดสอบ

รูปร่างและมิติของชิ้นงานทดสอบรวมทั้งระยะจับของแคลมป์ (Clamp) ในการทดสอบแรงดึงเฉือน จะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 2.26 และตารางที่ 2.6



รูปที่ 26 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 2.6 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

ความหนาของแผ่นชิ้นงาน (t)	ความกว้าง (W)	ระยะต่อเกย (L)	ความยาว (A)	ระยะแคลมป์จับ (B)
0.3 ถึง 0.7	20	20	75	70
0.8 ถึง 1.2	30	30	100	90
1.3 ถึง 2.4	40	40	125	100
2.5 ถึง 5.0	50	50	150	110

หน่วย: มม.

2.7 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้าง

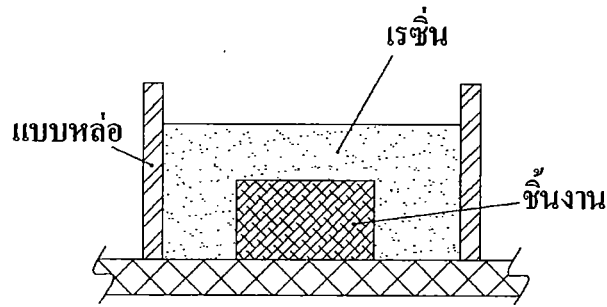
2.7.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า เพื่อวิเคราะห์ลักษณะที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบแบบง่ายๆ หรือถ้าใช้กล้องขยายก็มีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า เพื่อช่วยให้สามารถมองเห็นลักษณะจุดเชื่อมได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อม การแทรกตัวของวัสดุ รูพรุนที่เกิดขึ้น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบแรงดึงมาทำการตัดแบ่งตรงบริเวณจุดเชื่อมเป็นสองส่วนเพื่อนำมาทำการตรวจสอบ

ขั้นตอนการตรวจสอบ

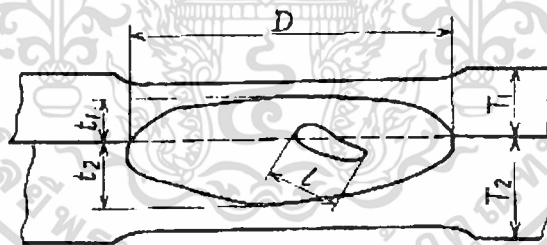
1.การหล่อเรซิน เพื่อทำให้สะดวกต่อการเตรียมชิ้นงานและการขัดผิวหน้าชิ้นงาน โดยเรซินจะทำหน้าที่ยึดเกาะชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงตามรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเรซิน

2. การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 400 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเกิดความเรียบ การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายต้องขัดตามทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นงานทดสอบ แล้วจึงขัดชิ้นงานทดสอบทำมุม 90 องศา จนรอยเดิมหายไปแล้วจึงเปลี่ยนกระดาษทรายที่ละเอียดมากขึ้นจนกระทั่งถึงเบอร์ 1200

3. การตรวจสอบขนาดของจุดเชื่อม (Diameter of Nugget) และอัตราการซึมของจุดเชื่อม (Penetration) [3] จากการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และทำการกัดกรดหรือเอตซิ่ง (Etching) การกัดกรดก็เพื่อทำให้เกิดการกัดผิวหน้าของโลหะให้เกิดเป็นหลุมเล็กๆ เมื่อส่องดูด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงๆ แสงก็จะกระทบและสะท้อนกลับมาทำให้มองเห็นโครงสร้างมหภาคในส่วนต่างๆ ของจุดเชื่อมดังแสดงตามรูปที่ 2.28 เพื่อที่จะทำการตรวจสอบขนาดของจุดเชื่อมและวิเคราะห์ถึงอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อม รวมถึงการตรวจสอบความสมบูรณ์ รอยแตก และจุดบกพร่องต่างๆ



รูปที่ 2.28 แสดงส่วนต่างๆ ของจุดเชื่อม (Nugget)

จากรูปที่ 2.28 สามารถหาอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเชื่อม ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมในแผ่นชิ้นงาน } T_1 = \frac{t_1}{T_1} \times 100 (\%) \quad (2.31)$$

$$\text{อัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมในแผ่นชิ้นงาน } T_2 = \frac{t_2}{T_2} \times 100 (\%) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T_1 และ T_2 คือ ค่าความหนาของแผ่นชิ้นงาน (Thinner Plate)

t_1 และ t_2 คือ ค่าการซึมลึกสูงสุดของจุดเชื่อม (Maximum Depth of Penetration)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเชื่อม (Diameter of Nugget)

L คือ ค่าความยาวมากสุดของรอยแตก (Crack) และรูพุนของจุดเชื่อม (Blowhole)

2.7.2 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อให้สามารถมองเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นในระยะที่ใกล้หรืออาจมองเห็นในระยะที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งกล้องจุลทรรศน์นั้นสามารถถ่ายภาพได้ทั้งโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค กล้องจุลทรรศน์จะมีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยมีหลักการการทำงานด้วยการปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังผิวชิ้นงานทดสอบ เมื่อแสงกระทบผิวหน้าของโลหะชิ้นงานแล้ว ก็จะสะท้อนกลับไปยังเลนส์ใกล้ตา ภาพก็จะปรากฏขึ้นเรียกว่า ไบรต์ฟิลด์อิมเมจ (Bright Field Image) ซึ่งเกิดขึ้นได้จากแสงที่มากกระทบกับแผ่นสะท้อนแสงและสะท้อนกลับมา ถ้าสะท้อนกลับมา มาก แสงที่ปรากฏก็จะสว่างมาก ก่อนจะนำโลหะมาส่องดูโครงสร้าง ต้องทำการกัดกรดหรือเอตซิง (Etching) การกัดกรดก็เพื่อทำให้เกิดการกัดผิวหน้าของโลหะให้เกิดเป็นหลุมเล็กๆ เมื่อส่องดูกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง แสงก็จะกระทบและสะท้อนกลับ ทำให้มองเห็นโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ถ้ากัดกรदनานเกินไปจะทำให้เป็นสีดำมาก

เกรนบาวด์นารี (Grain Boundary) คือขอบเขตของเกรนบริเวณที่แสงมากกระทบแล้วเกิดการหักเหของแสงสะท้อนกลับได้น้อย มองเห็นเป็นสีดำเหมือนเส้นแบ่งเขตแดน

ข้อควรระวังในการกัดกรดต้องทำอย่างระมัดระวัง เช่น กรดที่ใช้กัดต้องเลือกชนิดของกรดและโลหะให้เข้ากัน และเวลาในการแช่กรดไม่ควรแช่นานเกินไป เพราะจะทำให้ผิวงานดำทึบ มองเห็นโครงสร้างได้ยาก แต่ก็ไม่ควรใช้เวลาน้อยเกินไป เพราะจะทำให้มองไม่เห็นโครงสร้าง โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 5-10 วินาที แล้วแต่ชนิดของโลหะและกรดที่ใช้

2.8 การทดสอบความแข็ง

วัตถุประสงค์ในการทดสอบความแข็งเพื่อศึกษาวิศวกรรมด้านโลหะและใช้ทดสอบกับงานในงานอุตสาหกรรมโลหะต่างๆ ตลอดจนคุณสมบัติทางกลของโลหะในด้านการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ที่มีค่าเหมือนกันและต่างกัน ในการเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะด้วยการนำเอาไปอบชุบด้วยความร้อน เพื่อจะทราบว่าโลหะนั้นแข็งหรือไม่ โดยการใช้เครื่องทดสอบหาค่าความแข็ง และทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของโลหะในการทดสอบแรงดึง การต้านทานต่อการยึดตัวของโลหะ การต้านทานการสึกหรอและความเหนียวของโลหะ เป็นต้น

การวัดค่าความแข็งเป็นการทดสอบที่ง่ายและไม่ต้องการความชำนาญมากนัก เพราะเครื่องทดสอบช่วยได้มาก และทราบผลได้อย่างรวดเร็ว การวัดค่าความแข็งมีหลายวิธี ได้แก่ เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Tester), แบบร็อคเวลล์ (Rockwell), แบบวิกเกอร์ (Vicker) และแบบชอร์ (Chore)

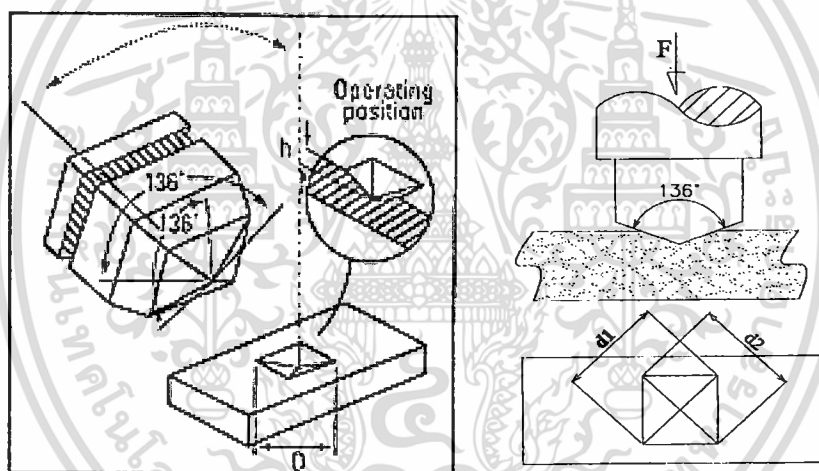
การทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชร มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับ

หัวกดลักษณะกลมมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.29 ใช้เวลากด 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว วิธีนี้หัวกดเป็นหัวเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มอ่อน (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (VH ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าสูตรดังต่อไปนี้

$$HV = \frac{1.854F}{d^2} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (2.33)$$

โดย F = แรงกด (kgf.)

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm) = $(d_1 + d_2)/2$



รูปที่ 2.29 หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นแบบปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ที่มา : http://www.instron.us/wa/applications/test_types/hardness/vickers.aspx

เงื่อนไขการทดสอบแบบวิกเกอร์

เนื่องจากรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กมากจึงต้องให้ผิวชิ้นทดสอบผิวเรียบปราศจากออกไซด์หรือผ่านการกัดกรดมาก่อนเพื่อที่จะได้เห็นโครงสร้างจุลภาคและสามารถเลือกกดบนโครงสร้างที่ต้องการได้ ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10-35 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างรอยกด อย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด การให้แรงกดจะต้องสม่ำเสมอ ให้เวลากดแชบนผิวงานเท่ากันเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่า ขยายและมีแสงสว่างให้เพียงพอในการวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ งานวิจัยของ นราธิป แสงซ้าย และบรรเจิด ดอนเนตรงาน [8] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าการทดสอบความแข็งแรงดึง-เฉือน ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนเหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ที่ความหนา 2 mm. โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ แรงกดระหว่างชิ้นงาน กระแสไฟฟ้า เวลาในการกดระหว่างชิ้นงาน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม ในการศึกษาที่ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางสถิติชนิด 2^k พบว่าปัจจัยต่างๆ ข้างต้นมีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเรียงจากปัจจัยที่มีผลกระทบจากน้อยไปหามากตามลำดับดังนี้ กระแสไฟฟ้า เวลาในการกด ผลร่วมระหว่าง กระแสไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม ผลร่วมระหว่างเวลาในการกดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อม จากผลการทดสอบทำให้สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมโดยสามารถส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง-เฉือนจากการเชื่อมอยู่ในระดับ 5.166 ถึง 5.492 KN

ปรัชญา เพ็ญสุระ [9] ได้ทำการศึกษาหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด งานวิจัยนี้้นำการตรวจสอบสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา มาประยุกต์หาช่วงเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่เหมาะสม ได้ทำการทดลองกับเหล็กเหนียว ความหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136: 1999 และทำการทดสอบโครงสร้างมหภาค ตามมาตรฐาน JIS Z 3139: 1978 จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์เทียบกับมาตรฐาน JIS Z 3140 ผลการทดลองปรากฏว่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8 ไซเคิล (8/50วินาที) ถึง 10 ไซเคิล (10/50 วินาที)

ปรัชญา เพ็ญสุระ [10] ได้ทำการศึกษาการเฝ้าติดตามการวัดค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชื่อมมาควบคุมความสมบูรณ์ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด โดยใช้ออสซิซิลอสโคปเป็นเครื่องมือวัดค่าความต้านทานในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองกับเหล็กกล้าผสม SS400 ใน 3 สภาวะการเชื่อมคือ ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดชิ้นงานที่มีคราบน้ำมันกันสนิม และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยอิเล็กโทรดที่มีการเปลี่ยนรูปซึ่งเป็นสภาวะการจริงที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136:1999 และทำการทดสอบโครงสร้างมหภาค ตามมาตรฐาน JIS Z 3139:1978 ผลการทดลองปรากฏว่า ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาด จะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.29-0.37 มิลลิโอม์ ชิ้นงานเชื่อมที่มีคราบน้ำมันกันสนิมจะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.38-0.46 มิลลิโอม์ พบว่าจะมีค่าความต้านทานสูง ส่งผลให้มีปริมาณความร้อนมากขึ้นและชิ้นงานที่เชื่อมด้วยอิเล็กโทรดที่มีการเปลี่ยนรูป จะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.27-0.38 มิลลิโอม์ ค่าความต้านทานจะมีค่าที่น้อยกว่าสภาวะอื่นที่มีความสมดุลและมีค่าความต้านทานสูงมากถึง 3 ไซเคิล และลดลงในไซเคิลต่อไปมากกว่าทั้ง 2 สภาวะ เนื่องจากกระแสสามารถไหลผ่านชิ้นงานได้อย่างสะดวก จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการเชื่อมที่มีความไม่สมบูรณ์ ณ. รอยต่อชิ้นงานเชื่อมจะมีสมบัติทางกลลดลงค่าความเชื่อมแน่นในการจำแนกคุณลักษณะของค่าความต้านทานในการเชื่อมทั้ง 3 สภาวะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ (ที่ P-value < 0.05)

ณรัตน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และศุภอัมย์ พันศิริพัฒน์ [11] ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงเฉือน โดยทดลองกับเหล็กแผ่นรีดร้อน SS400 มีความหนา 0.9 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทดสอบจะทำตามมาตรฐาน JIS Z 3136 ผลจากการ

Screening Experiment โดยการใช้ Factorial Design (2^k) ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองซึ่งมีพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 3 ตัว พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ เมื่อนำพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อม มาออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองอีกครั้งโดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology แบบ Box-Behnken Design ทำให้ได้สมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงเฉือนของจุดเชื่อม คือ

$$Y = -110393 - 574.767P + 136.911I + 1658.355S - 9.329902P^2 - 30418532I^2 + 837.485S^2 + 0.4828PI + 72.663PS$$

และมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ แรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน (P): $10 < P < 20$ (kg/cm²) ค่ากระแสไฟฟ้า (I): $1500 < I < 1600$ แอมแปร์ และ เวลาในการเชื่อม (S): $1.0 < S < 2.0$ (วินาที)

Qiu, และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือนสำหรับอลูมิเนียมอัลลอยด์ A5052 ชนิดแผ่น โดยใช้เทคนิคการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีแผ่นฝาครอบ และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมโดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม แรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) เวลาหน่วงหลังการเชื่อม (Down-Slope Time) และใช้อิเล็กโทรดทองแดงผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า การใช้เทคนิคการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีแผ่นฝาครอบมีความเป็นไปได้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับโลหะผสมอลูมิเนียมอัลลอยด์ A5052 ชนิดแผ่น และพบว่าแรงกดของอิเล็กโทรด มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมมากที่สุด

Kaya และ Kahraman [13] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือนสำหรับแผ่นไททาเนียมบริสุทธิ์ (Pure Titanium) โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ แรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) มี 2 ระดับ คือ 3 kN. และ 6 kN. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม มี 3 ระดับคือ 3, 5 และ 7 kA. และ เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม มี 3 ระดับคือ 10, 20 และ 30 Cycles ผลจากการศึกษาพบว่าแรงกดของอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม ที่ระดับสูงมีผลให้ ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมมีค่าสูงขึ้น ปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุดคือ แรงกดของอิเล็กโทรดที่ระดับ 6 kN. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมที่ระดับ 7 kA. และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมที่ระดับ 30 Cycles และผลการทดสอบค่าความแข็งแรงพบว่าบริเวณจุดเชื่อม (Weld Nugget) มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 125 ± 10 HV บริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) มีค่าเท่ากับ 120 ± 5 HV และบริเวณวัสดุเดิม (Base Material) มีค่าเท่ากับ 110 ± 3 HV ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค พบว่าจุดเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องของจุดเชื่อม

Chang และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดหลุมด้านหน้าของอิเล็กโทรด (Electrode Pitting) ขนาดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 5 มิลลิเมตร ที่มีต่อขนาดของจุดเชื่อม (Weld Nugget) โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ 5182 โดยใช้พารามิเตอร์ในการเชื่อมคือ กระแสไฟในการเชื่อมที่ระดับ 29 kA. แรงกดของอิเล็กโทรดที่ระดับ 5 kN เวลาในการกดชิ้นงานที่ระดับ 25 Cycles เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมที่ระดับ 5 Cycles และเวลาถัดขึ้นงานหลังจากการเชื่อมที่ระดับ 12 Cycles ผลจากการศึกษาพบว่า ขนาดหลุมด้านหน้าของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0 ถึง 3 มิลลิเมตร ไม่มีผลกระทบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อขนาดของจุด

เชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดของหลุมด้านหน้าของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 3 มิลลิเมตรขึ้นไปมีผลกระทบหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะขนาดหลุมด้านหน้าของอิเล็กโทรดที่ 5 มิลลิเมตรทำให้ขนาดของจุดเชื่อมเล็กกลางและจุดเชื่อมมีรูปทรงวงแหวนไม่หลอมละลายในบริเวณตรงกลางของจุดเชื่อม และยังสามารถสรุปได้ว่าพื้นผิวหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดขนาดของจุดเชื่อม

Shamsul และ Hisyam [15] ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมกับขนาดของจุดเชื่อม โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Stainless Steer Type 304) ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ใช้กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมที่ระดับ 2.5 kA., 3.75 kA., 5.0 kA. และ 6.25 kA. ตามลำดับ และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมที่ระดับ 4 Cycles และแรงกดของอิเล็กโทรดที่ระดับ 150 kgf. ผลการศึกษาพบว่าค่าระดับของกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมมีความสัมพันธ์กับขนาดของจุดเชื่อมโดยที่ค่าระดับของกระแสไฟขณะทำการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นทำให้ขนาดของจุดเชื่อมมีขนาดมากขึ้น และพบว่าผลการตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของจุดเชื่อมมีค่าสูงสุดที่บริเวณของจุดเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและบริเวณวัสดุเดิม และค่าความแข็งของจุดเชื่อมไม่มีผลกระทบหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักกับค่าระดับของกระแสไฟขณะทำการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนและลำดับการดำเนินการวิจัยโดยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและลำดับการดำเนินการวิจัย

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงขั้นตอนและลำดับการดำเนินการวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่ม

ร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยจะอธิบายได้ดังนี้

3.1 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น

การออกแบบการทดลองเบื้องต้นเป็นการคัดกรองหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะต้องทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ปัจจัยและเป็นการคัดกรองปัจจัย ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบ แฟรคชันนัลแฟคเตอเรียล 2^{k-1} (Fractional Factorial Design) โดยปัจจัยที่มีอยู่ 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ โดยการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคเตอเรียล 2^{5-1} จะเท่ากับ 16 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองทั้งหมด เท่ากับ 32 การทดลองเพื่อทำให้เกิดความเชื่อมั่นและความแม่นยำของการทดลอง ซึ่งจะสามารถหาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน ของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ซึ่งการออกแบบการทดลองเบื้องต้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขตการทดลอง

จากการศึกษาจากตำราและคู่มือประกอบการเชื่อมและประสบการณ์การทำงานในการเชื่อมและการทดสอบชิ้นงานจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ผู้วิจัยให้ความสำคัญของปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัยที่น่าสนใจในการศึกษาดังนี้

1. แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม (Air Pressure)
2. เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze Time)
3. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (Weld Current)
4. เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (Weld Time)
5. เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Hold Time)

โดยระดับของแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) ก่อนทำการทดลองจริงผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นและอ้างอิงจากการเชื่อมจริงในกระบวนการผลิตจริงเพื่อกำหนดช่วงระดับของปัจจัยให้เหมาะสม ค่าขอบเขตของปัจจัยในการเชื่อมและสัญลักษณ์ของปัจจัยในการเชื่อม แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับและขอบเขตของปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย/หน่วย	ระดับการปรับตั้งค่าปัจจัย		สัญลักษณ์
	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)	
1) แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดขณะทำการเชื่อม (หน่วย: MPa)	0.15	0.25	A
2) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (หน่วย: Cycle)	20	30	B
3) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (หน่วย: Ampere)	11000	12000	C
4) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (หน่วย: Cycle)	20	26	D
5) เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (หน่วย: Cycle)	15	25	E

3.1.2 การทดลองซ้ำ (Replication)

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลอง และสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลอง

3.1.3 การสุ่มในการทดลอง (Randomization)

ลำดับการทดลองทั้ง 32 การทดลองเป็นแบบสุ่มโดยในการทดลองได้จัดทำตัวเลขลำดับการทดลอง และสุ่มตัวเลขลำดับการทดลองจากผลการคำนวณจากโปรแกรม MINITAB Release 15

3.1.4 ปัจจัยคงที่ (Held-Constant Factors)

เป็นปัจจัยที่ไม่ได้สนใจในการทดลองครั้งนี้แต่อาจจะกำหนดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองครั้งต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ในการทดลองโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดของ PANASONIC รุ่น YR-500S Rated Capacity 50 kVA.

2. ในการทดลองใช้เหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยบริษัท TOYOTA TSUSHO CORPORATION เป็นผู้แทนจำหน่ายแห่งเดียว เพื่อป้องกันปัจจัยภายนอกที่อาจเกิดจากธาตุผสมของวัสดุดิบ

3. ในการทดลองโดยใช้อิเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตรและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าสัมผัสเท่ากับ 7 มิลลิเมตรดังแสดงตามรูปที่ 3.3

4. ผู้ปฏิบัติงานเชื่อมที่ทำการทดลองเชื่อม โดยเป็นผู้ปฏิบัติงานคนเดียวกันตลอดการทดลอง

5. ผู้ปฏิบัติงานในการทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน โดยผู้ปฏิบัติงานคนเดียวกันตลอดการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และเที่ยงตรง

3.1.5 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Nuisance Factors)

เป็นปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม แต่น้อยหรือไม่ได้สนใจในการทดลอง ซึ่งในการทดลองผู้ทดลองเลือกใช้เทคนิคการบล็อก (Blocking) เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรง และขจัดความแปรผันที่เกิดขึ้นจากปัจจัยรบกวนโดย

1. สภาพความชื้นในอากาศในช่วงเวลาที่เชื่อมชิ้นงาน
2. อุณหภูมิทั่วไปในขณะที่ทำการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

3.1.6 เลือกตัวแปรผลตอบ

ในการวิจัยนี้ ต้องการศึกษารูปแบบผลตอบที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3140) ต้องได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนมากกว่า 10.1 kN. จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงเดือนตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136)

3.1.7 เลือกการออกแบบการทดลอง

หลังจากทำการเลือกตัวแปรผลตอบแล้วจากนั้นเลือกวิธีการออกแบบการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในการออกแบบการทดลองนี้จะเกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ตามตารางที่ 3.1 โดยจะต้องทำการคัดกรองปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน

สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่า การออกแบบการทดลองที่เหมาะสมในช่วงแรกเพื่อคัดกรองปัจจัย คือ การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด 5 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะมี 2 ระดับ จะต้องทำการทดลองเท่ากับ 2^4 เท่ากับ 16 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองทั้งสิ้น 32 การทดลอง การออกแบบนี้ทำให้สามารถหาปัจจัยหลักที่ผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ และรูปแบบการทดลองจะมีลำดับในการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดความคลาดเคลื่อน (Error) ที่อาจเกิดจากปัจจัยที่ไม่ได้ทำการควบคุม ซึ่งรูปแบบการทดลองแสดงตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลองเบื้องต้น

ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย (หน่วย)				
		A (MPa.)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)
1 , 28	2 , 18	0.25	20	11000	20	15
2 , 23	11 , 27	0.15	30	11000	26	25
3 , 8	8 , 24	0.25	30	12000	20	15
4 , 11	17 , 1	0.15	20	11000	20	25
5 , 6	16 , 32	0.25	30	12000	26	25
7 , 27	29 , 13	0.15	20	12000	26	25
9 , 32	23 , 7	0.15	30	12000	20	25
10 , 29	15 , 31	0.15	30	12000	26	15
12 , 14	19 , 3	0.15	30	11000	20	15
13 , 21	30 , 14	0.25	20	12000	26	15
15 , 22	10 , 26	0.25	20	11000	26	25
16 , 24	4 , 20	0.25	30	11000	20	25
17 , 30	28 , 12	0.25	30	11000	26	15
18 , 31	21 , 5	0.15	20	12000	20	15
19 , 26	25 , 9	0.15	20	11000	26	15
20 , 25	22 , 6	0.25	20	12000	20	25

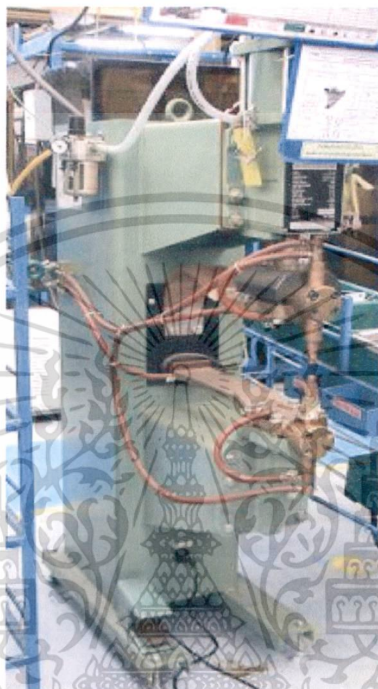
3.1.8 ทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย

ทำการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยหลังจากที่ได้ลำดับการทดลองจากตารางที่ 3.2 โดยใช้โปรแกรม Minitab สุ่มลำดับขั้นการทดลอง เพื่อขจัดความลำเอียง (Bias) ที่อาจจะเกิดขึ้น จากนั้นทำการทดลองตามลำดับขั้นตอนที่ได้ออกแบบการทดลองไว้เบื้องต้น สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมที่จำเป็นดังจะแสดงในหัวข้อที่ 3.2

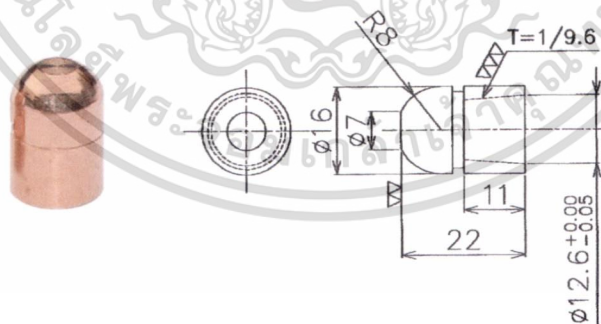
3.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อมและการทดสอบชิ้นงาน

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ในการทดลองโดยใช้เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดยี่ห้อ PANASONIC รุ่น YR-500SA2 Rated Capacity 50 kVA แสดงตามรูปที่ 3.2 ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดและใช้อิเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร แสดงตามรูปที่ 3.3



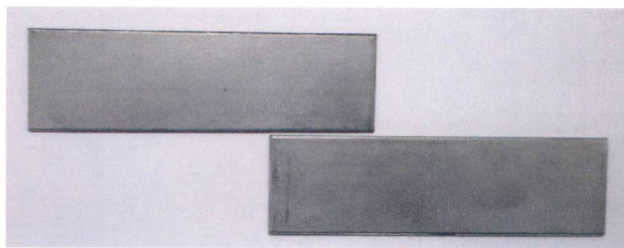
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดยี่ห้อ PANASONIC รุ่น YR-500SA2



รูปที่ 3.3 รูปแบบอิเล็กโทรดทองแดง

2) ชิ้นงานทดลองเป็นเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 (JIS G 3302) ขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตรและมีความหนา 1.8 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้นในหนึ่งหน่วยการทดลอง แสดงตามรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบ

3) เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine) ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง คือ SHIMADZU รุ่น AG-13zSFL-50 KN รับแรงดึงสูงสุดได้ 50 kN. และสามารถปรับควบคุมความเร็วได้โดยในงานทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

4) เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนทำการขัดละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) เครื่องขัดกระดาษทรายใช้สำหรับขัดชิ้นงานทดสอบก่อนทำการขัดละเอียด แสดงตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดสายพาน

6) เครื่องขัดด้วยผงขัดแบบจานคู่ (Grinder Polisher) ใช้ในการขัดผิวหน้าของชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของบริเวณจุดเชื่อม แสดงตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดแบบจานคู่ (Grinder Polisher)

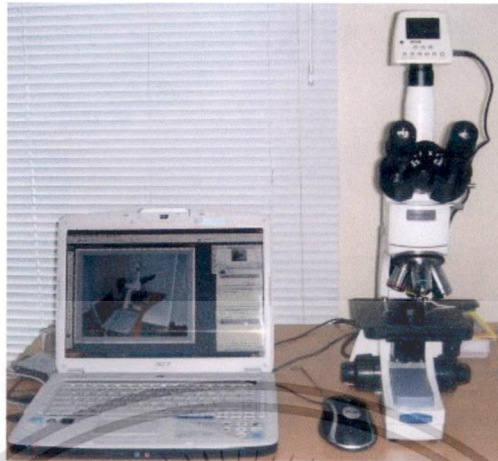
7) กล้อง Digital Microscope (DINO LITE) รุ่น AM 413ZT Digital Zoom 200X ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อมชิ้นงานทดสอบ แสดงตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้อง Digital Microscope (DINO LITE) รุ่น AM 413ZT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) กล้องจุลทรรศน์ Microscope Model : AT-412 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค บริเวณจุดเชื่อมของชิ้นงานทดสอบ แสดงตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์ Microscope Model : AT-412

9) เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ รุ่น FV-700 อ่านค่าเป็นแบบตัวเลขที่ใช้ในการทดสอบความแข็งบริเวณของจุดเชื่อมจากการทดสอบ แสดงตามรูปที่ 3.11

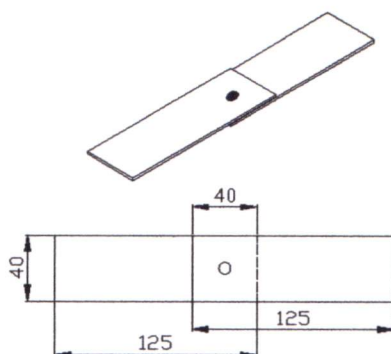


รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.2.2 การเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

ตามเงื่อนไขและการเตรียมองค์ประกอบในการเชื่อมชิ้นงานทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) ในหนึ่งหน่วยการทดลองใช้ชิ้นงานสองชิ้นแบบต่อกันในระยะ 40 มิลลิเมตรและทำการเชื่อม 1 จุดเชื่อม แสดงตามรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ลักษณะการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

3.2.3 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม

โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงทำการทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงเดือน ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) ในแต่ละจุดเชื่อมดังแสดงตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

จากข้อมูลผลการทดลองในการหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลในเชิงสถิติโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional Factorial Design เพื่อคัดกรองหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน โดยทำการพล็อตกราฟพาเรโตที่เส้นระดับนัยสำคัญ Alpha = 0.05 แล้วเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนอย่างมีนัยสำคัญของการเชื่อมเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จากกราฟให้เลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนอย่างแท้จริงโดยเปรียบเทียบจากค่า P-Value กับค่า Alpha เพื่อให้ได้ปัจจัยที่จะต้องนำไปทำการออกแบบการทดลองในขั้นสูง และใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิตินี้ได้มีการนำโปรแกรม MINITAB เข้ามาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้

3.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

จากผลการทดลองเบื้องต้นทำให้เราทราบถึงปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 ไปทำการออกแบบการทดลองโดยละเอียดเพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยหลัก ซึ่งการออกแบบการทดลองโดยละเอียดนี้มี 3 ขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำปัจจัยหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติในเบื้องต้นโดยนำปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 มาทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยหลัก โดยระดับของปัจจัยในการออกแบบทดลองโดยละเอียดนี้จะมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง ระดับสูง

3.4.2 เลือกตัวแปรผลตอบ

สิ่งที่เราต้องการหา คือ ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในงานวิจัยนี้คือค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งเหมือนกับผลตอบของการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

3.4.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยได้มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ คือ การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับ ซึ่งการออกแบบการทดลองเช่นนี้ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและงานด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งการออกแบบนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบที่ดีที่สุดในการสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์แบบควอดราติกแต่เหมาะสำหรับผู้ที่สนใจกับผลตอบที่มีลักษณะที่เป็นส่วนโค้งและการออกแบบพื้นผิวผลตอบ นี้ก็มีวิธีที่นำสนใจอยู่สองวิธีด้วยกันคือ การออกแบบส่วนประสมกลาง และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งการทดลองที่สมบูรณ์ของการออกแบบส่วนประสมกลางจะมีการเพิ่มข้อมูลเพื่อให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบกำลังสองได้ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการทดลองบนปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยในขอบเขตที่อยู่นอกเหนือจากค่าในระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัยได้ กล่าวคือ ปัจจัยนำเข้าทุกปัจจัยจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าให้มีขนาดเท่าใดก็ได้แต่การทดลองที่สมบูรณ์ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะไม่มีการเพิ่มข้อมูลเช่นเดียวกับการออกแบบส่วนประสมกลาง ทำให้สามารถทำการทดลองบนค่าในระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆ ทั้งสิ้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองเป็นแบบสามระดับสำหรับพีตพื้นผิวผลตอบโดยใช้ค่าระดับจากการคัดกรองปัจจัยแล้วและยังสามารถหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองได้ เพราะค่าระดับปัจจัยจะอยู่ในขอบเขตของการออกแบบการทดลองที่ได้จากการคัดกรองปัจจัยแล้วซึ่งมีปัจจัยบางตัวไม่สามารถเพิ่มค่าระดับของปัจจัยได้ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายของชิ้นงานได้

3.5 การเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

จากการเลือกการออกแบบการทดลองตามหัวข้อ 3.4.3 และทำการออกแบบการทดลองแล้วจะได้ลำดับขั้นการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามลำดับขั้นที่ได้ทำการออกแบบการทดลองไว้สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด กับชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด

3.6 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม

ทำการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเดือนตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z 3136) ในแต่ละจุดเชื่อมของชิ้นงานทดสอบและให้ดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.3

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และหาค่าที่เหมาะสม

เมื่อได้ผลการทดลองนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเพื่อวิเคราะห์ความผันแปร ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อดูความเหมาะสมของข้อมูล วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อตรวจสอบแหล่งผันแปรของข้อมูล และนำค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมต่างๆ ของปัจจัยที่ได้ไปทำการเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม โดยมีผลตอบ คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ดังแสดงในสมการ 3.1 ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.1)$$

นำสมการทำนายดังกล่าว ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยใช้คำสั่งในฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB Release 15 เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งฟังก์ชันนี้จะใช้ในการวัดค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Desirability Function)

ตามที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการเลือกตัวแปรผลตอบในการวิเคราะห์ผลค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม

จากนั้นนำผลการประมาณค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม (yt) โดยใช้คำสั่งในฟังก์ชัน Response Optimizer นำไปคำนวณในสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อนำค่าของปัจจัยไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลต่อไป

3.8 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผลตอบ

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากนั้นทำการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด ว่ามีความถูกต้องตามสมการทำนายและเป็นการยืนยันผลการทดลองว่าได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 โดยทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบจำนวนทั้งหมด 11 หน่วยการทดลอง โดยแบ่งการทดลองเพื่อการยืนยันผลการทดลองดังนี้

1. สำหรับทดสอบหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนจำนวน 5 หน่วยการทดลอง
2. สำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อมจำนวน 5 หน่วยการทดลอง เพื่อตรวจสอบหาขนาดของจุดเชื่อมและอัตราการซึมของจุดเชื่อม รวมถึงการตรวจสอบความสมบูรณ์ รอยแตก และจุดบกพร่องต่างๆ ตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.8.1
3. สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมจำนวน 1 หน่วยการทดลอง เพื่อตรวจสอบดูการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน รูปร่าง เส้นขอบของเกรน และเฟสที่แตกต่างไปจากเนื้อวัสดุเดิมรวมทั้งสิ่งเจือปนต่างๆ [16] และตรวจสอบค่าความแข็งแรงของจุดเชื่อม

3.9 การสรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็นสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำการออกแบบการทดลองและหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยมีค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 และค่าที่เหมาะสมของระดับปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนต่างๆ ในบทที่ 3 จะได้ผลการวิจัยในขั้นตอนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อรองรับปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เมื่อได้ปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองมาแล้ว ผู้วิจัยได้นำปัจจัยเหล่านั้นไปทำการออกแบบการทดลอง เพื่อสร้างสมการทำนายและหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด ซึ่งผลการวิจัยที่ได้ก็จะเป็นค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ซึ่งผลการวิจัยทั้งหมดจะกล่าวตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน

ผลการวิจัยนี้มาจากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยการนำปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลาถอดชิ้นงานหลังจากการเชื่อม มาทำการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional Factorial Design เพื่อรองรับปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมอย่างแท้จริง ซึ่งเมื่อเชื่อมชิ้นงานทดสอบตามการออกแบบการทดลองครบทั้ง 32 การทดลองแล้วนำชิ้นงานทดสอบไปทำการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป แสดงตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

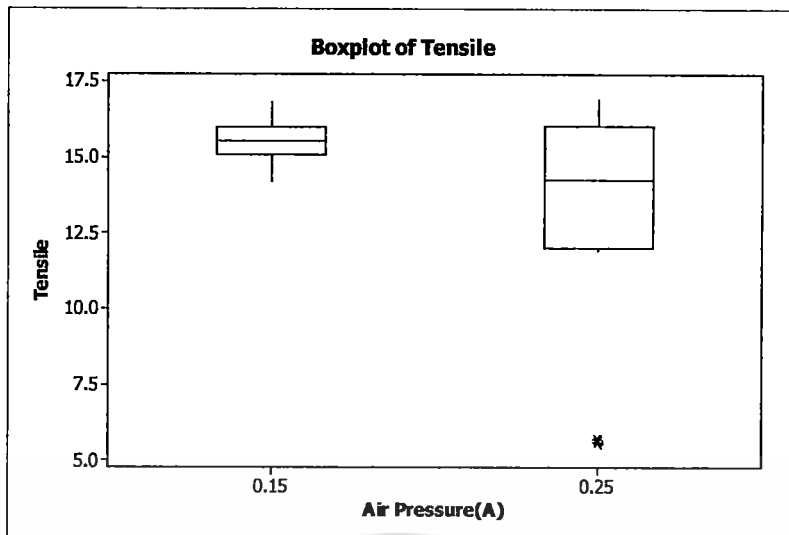
ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย(หน่วย)					ความแข็งแรงดึง เฉือน Tensile shear load (kN)
		A (MPa)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
1	2	0.25	20	11000	20	15	12.14
2	11	0.15	30	11000	26	25	14.96
3	8	0.25	30	12000	20	15	13.26
4	17	0.15	20	11000	20	25	15.40
5	16	0.25	30	12000	26	25	16.24
6	32	0.25	30	12000	26	25	16.50
7	29	0.15	20	12000	26	25	16.74
8	24	0.25	30	12000	20	15	13.33
9	23	0.15	30	12000	20	25	15.53
10	15	0.15	30	12000	26	15	15.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

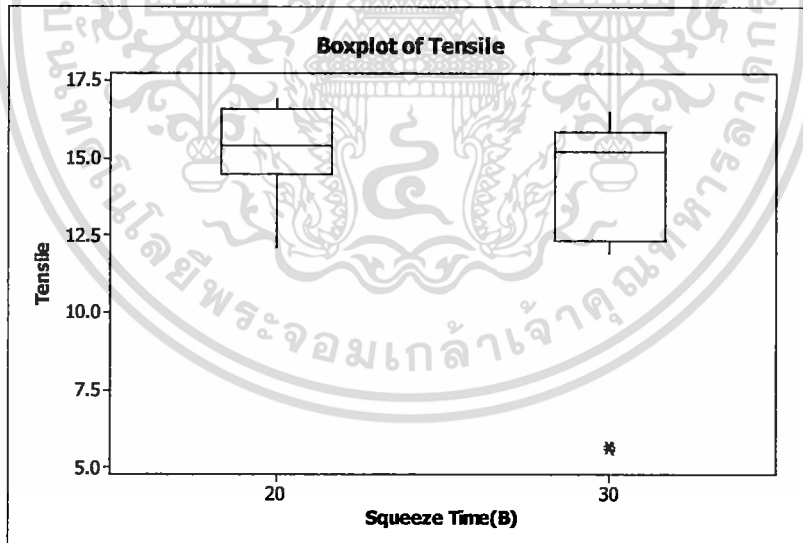
ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย(หน่วย)					ความแข็งแรงดึง เฉือน Tensile shear load (kN)
		A (MPa)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
11	1	0.15	20	11000	20	25	15.35
12	19	0.15	30	11000	20	15	15.48
13	30	0.25	20	12000	26	15	16.83
14	3	0.15	30	11000	20	15	15.53
15	10	0.25	20	11000	26	25	15.21
16	4	0.25	30	11000	20	25	11.99
17	28	0.25	30	11000	26	15	5.60
18	21	0.15	20	12000	20	15	14.20
19	25	0.15	20	11000	26	15	16.00
20	22	0.25	20	12000	20	25	15.48
21	14	0.25	20	12000	26	15	16.91
22	26	0.25	20	11000	26	25	15.31
23	27	0.15	30	11000	26	25	14.92
24	20	0.25	30	11000	20	25	11.90
25	6	0.25	20	12000	20	25	15.40
26	9	0.15	20	11000	26	15	16.08
27	13	0.15	20	12000	26	25	16.79
28	18	0.25	20	11000	20	15	12.10
29	31	0.15	30	12000	26	15	15.91
30	12	0.25	30	11000	26	15	5.67
31	5	0.15	20	12000	20	15	14.25
32	7	0.15	30	12000	20	25	15.60

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าของผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ได้จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น และนำข้อมูลผลการทดลองมาทำการสร้างแผนภาพแบบกล่อง (Box Plot) โดยการเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มของค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 4.1 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (A) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

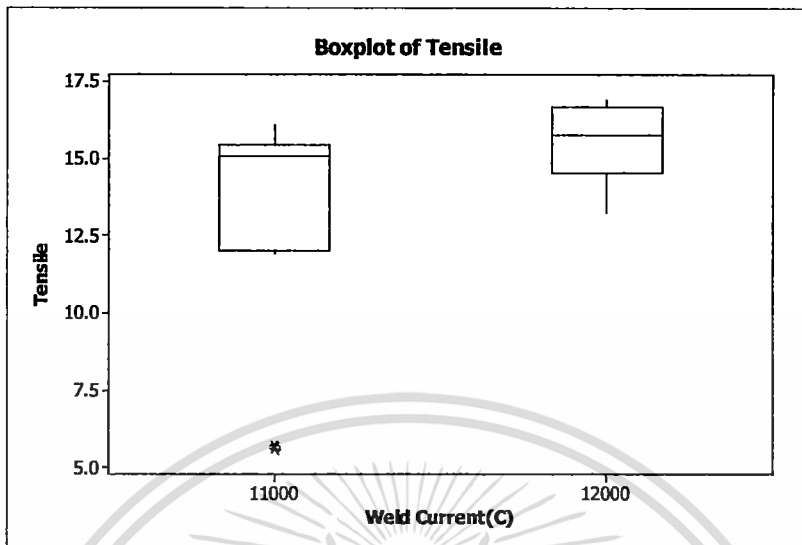
จากรูป 4.1 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (A) แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม โดยตั้งค่าแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในระดับต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่า การตั้งแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในระดับสูง



รูปที่ 4.2 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (B) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

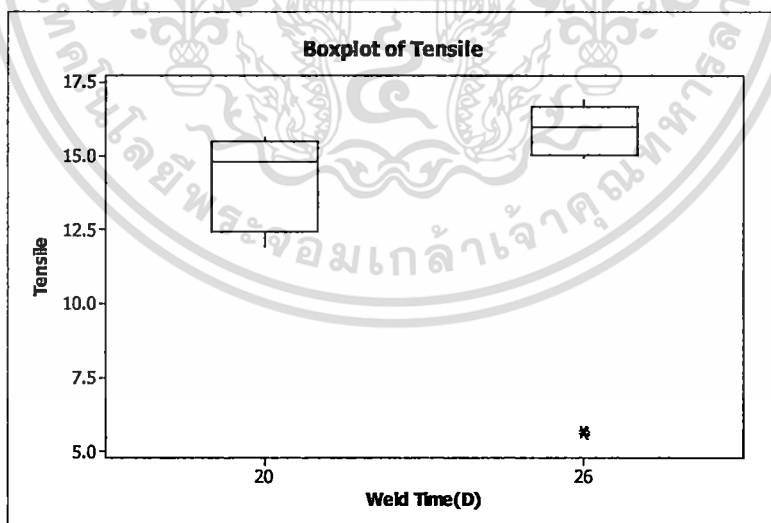
จากรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (B) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้

ติดกัน โดยตั้งค่าเวลากดขึ้นงานสองชิ้นให้ติดกันระดับต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเหนือของจุดเชื่อมสูงกว่า การตั้งค่าของเวลากดขึ้นงานสองชิ้นให้ติดกันในระดับสูง



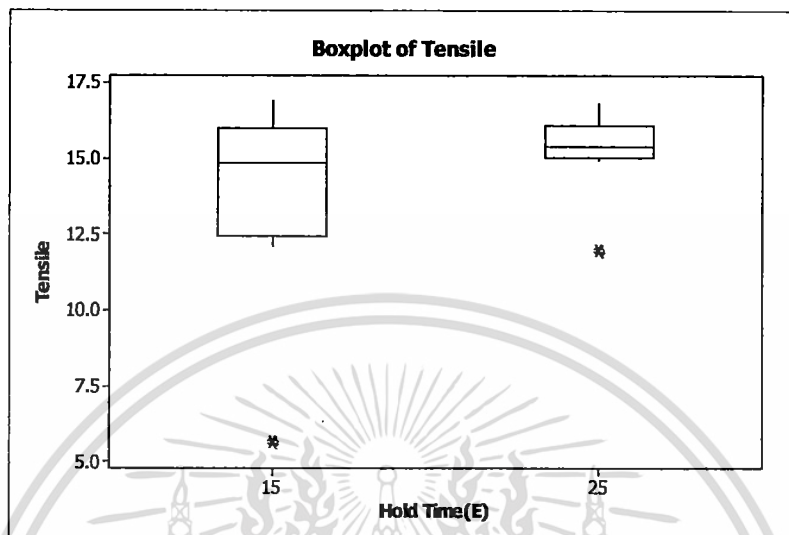
รูปที่ 4.3 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (C) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

จากรูป 4.3 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (C) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม ในระดับสูง มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเหนือของจุดเชื่อมสูงกว่า การตั้งค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมในระดับต่ำ



รูปที่ 4.4 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (D) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

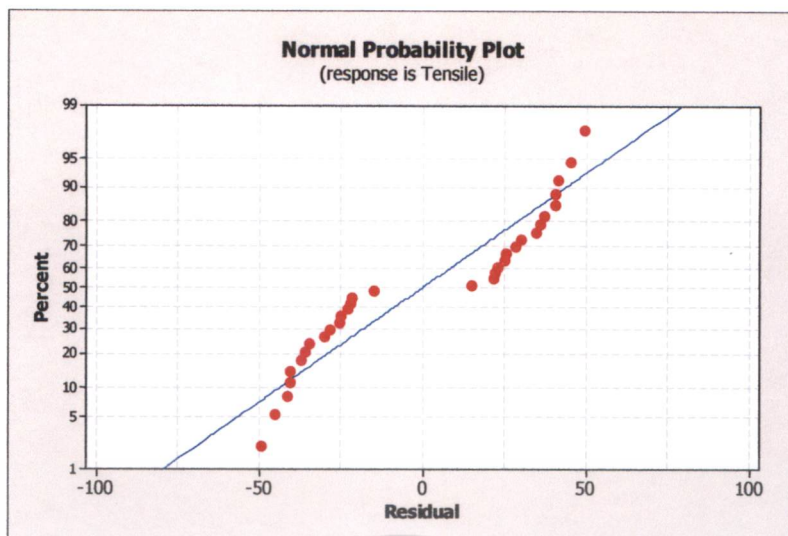
จากรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (D) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมในระดับสูง มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่า การตั้งค่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมในระดับต่ำ



รูปที่ 4.5 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (E) ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

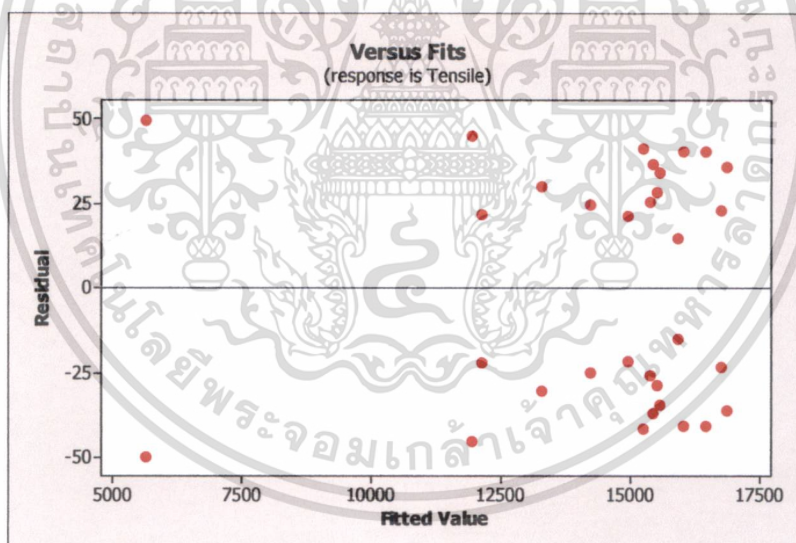
จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (E) เวลาถัดเข้าชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในระดับสูง มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่า การตั้งค่าเวลาถัดเข้าชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในระดับต่ำ

จากนั้นทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้นความเพียงพอของแบบจำลองสามารถตรวจสอบ โดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of The Residuals) ดังรูปที่ 4.6 พบว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งดูได้จากลักษณะของกราฟโดยจุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.6 การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

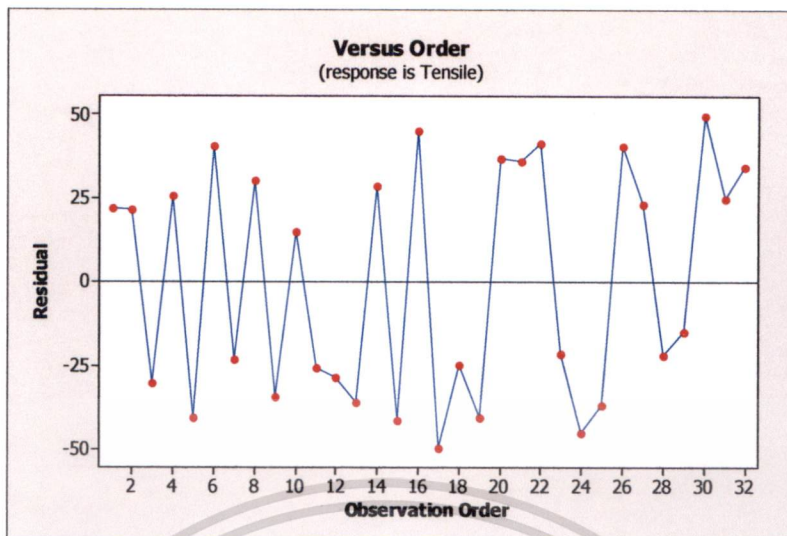
จากรูปที่ 4.7 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plots of Residuals Versus Fitted Values) จากกราฟพบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่แตกต่างกัน ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย



รูปที่ 4.7 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

จากรูปที่ 4.8 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plots of Residuals Versus the Observation Order of the Data) จากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

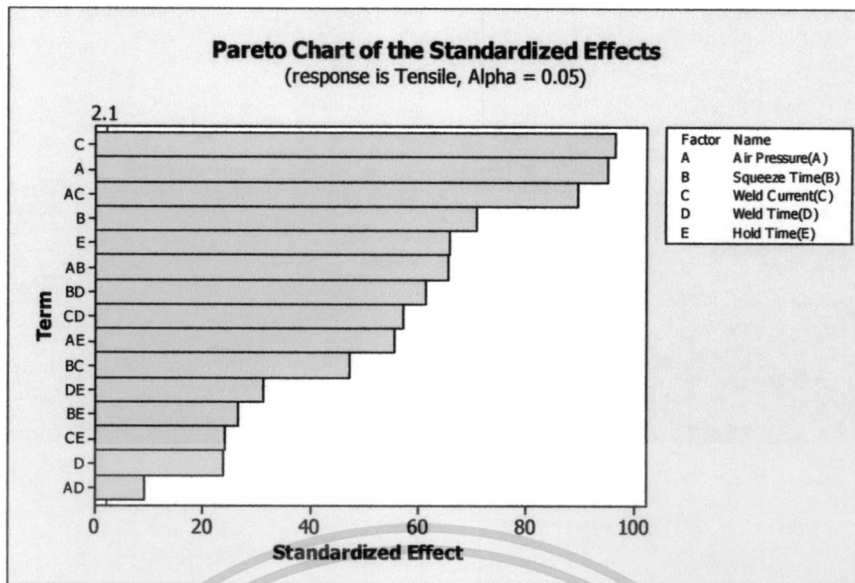


รูปที่ 4.8 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 สามารถสรุปได้ว่า ส่วนตกค้าง (Residuals) ของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับการทำนาย (Fitted Value) และลำดับของการทดลอง (Observation Order) นำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อกรองปัจจัยที่เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงทำการสร้างกราฟพาเรโตของผลกระทบ (Effect) ที่ได้จากการประมาณค่าของผลตอบในคอนแทรสต์ที่อยู่ในความสนใจ ได้แก่ คอนแทรสต์ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาร่วมของปัจจัย เพื่อใช้เปรียบเทียบลำดับความสำคัญของคอนแทรสต์ (Contrast) ต่าง ๆ โดยพิจารณาจากเส้นนัยสำคัญ (Significant Line) จะได้ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อความเร็วในการวิเคราะห์ผล ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติตามหัวข้อ 4.1.1 ดังนี้

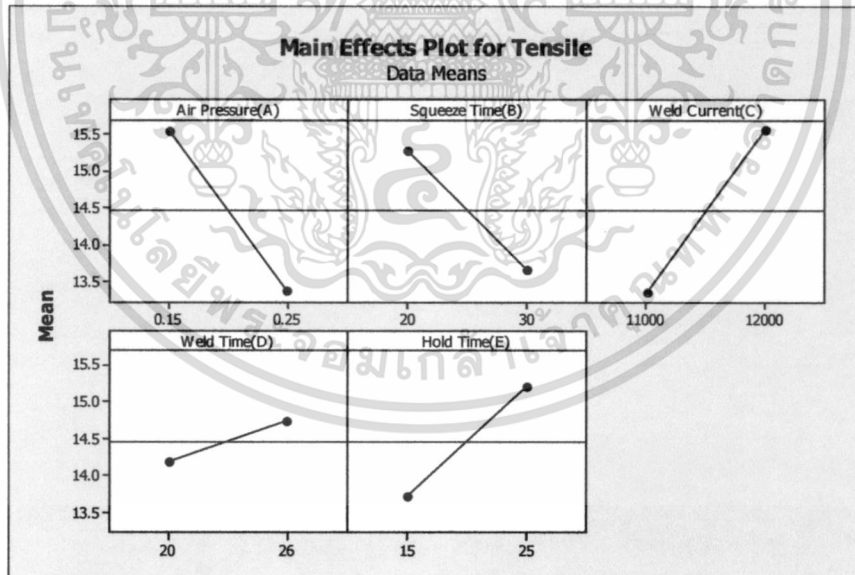
4.1.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน

สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยพิจารณาเลือกคอนแทรสต์ที่ผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ปัจจัยใดที่มีค่าผลกระทบยิ่งเกินกว่าเส้นนัยสำคัญนี้ ให้ถือว่า มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนคอนแทรสต์ใดที่มีค่าผลกระทบยิ่งต่ำกว่าหรือไม่ถึงเส้นนัยสำคัญนี้ ก็ให้ถือว่าสามารถละเลยได้ โดยที่แกน X คือ ค่าของ T test ที่ได้จากการประเมินค่าผลกระทบและสัมประสิทธิ์ของปัจจัยตามตารางที่ 4.2 และแกน Y คือ คอนแทรสต์ของปัจจัยหลัก ตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟพาราโตของผลกระทบที่ระดับนัยสำคัญ Alpha = 0.05 ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน

จากรูปที่ 4.9 คอนแทรกต์ที่สูงเกินเส้นนัยสำคัญจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน คือ ทุกปัจจัยและทุกอันตรกิริยาร่วม

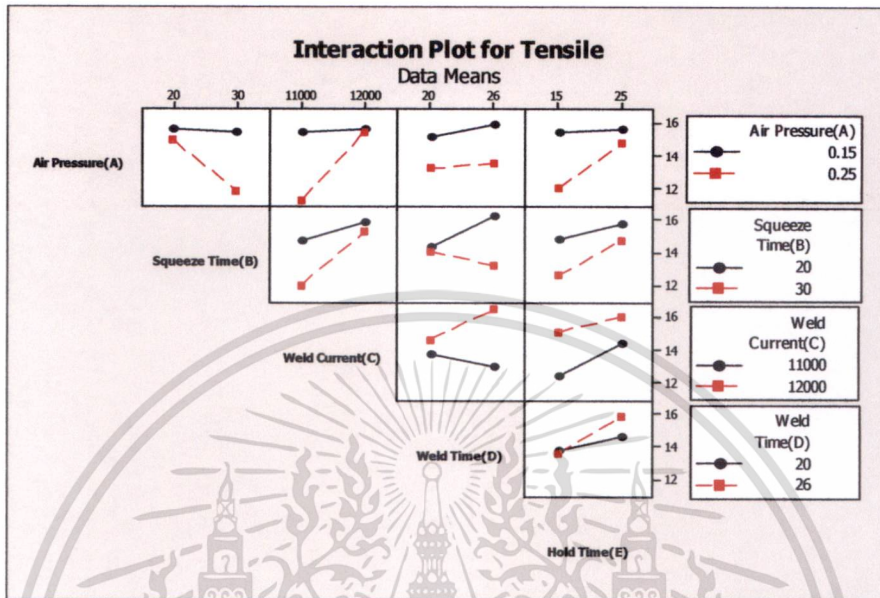


รูปที่ 4.10 กราฟของผลกระทบหลักของปัจจัย A, B, C, D และ E ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

ในการพิจารณารูปแบบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อค่าแรงในการรับแรงดึงเดือน จากรูปที่ 4.10 กราฟรูปแบบของปัจจัยหลักเมื่อพิจารณาเพียงผลกระทบหลักพบว่าเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันลมหรือเวลากดชิ้นงานอยู่ในระดับสูงมีผลให้ค่าแรงในการรับแรงดึงเดือนลดลง ดังนั้นควรตั้งเงื่อนไขทั้งสองปัจจัยให้อยู่ในระดับต่ำเพื่อให้ได้ค่าแรงในการรับแรงดึงเดือนที่สูงและในส่วนของกระแสไฟเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม ควรตั้งให้อยู่ในระดับสูงเพื่อให้ได้ค่าแรงในการรับแรงดึงเดือนที่สูง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอันตรกิริยาร่วมในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

จากรูปที่ 4.11 พิจารณารูปแบบของอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน พบว่าอันตรกิริยาร่วมทุกปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน เช่น อันตรกิริยาร่วมระหว่างแรงดันลมกับเวลากดชิ้นงานจะเห็นได้ว่าแรงดันลมระดับต่ำเวลากดชิ้นงานระดับสูงทำให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนมีค่าสูง เป็นต้น ดังนั้นควรตั้งเงื่อนไขของปัจจัยแรงดันลมและเวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกันอยู่ในระดับต่ำ และปัจจัยของกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมให้อยู่ในระดับสูง

ตารางที่ 4.2 ค่า P ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง (Estimated Effect and Coefficients for Response, Coded Units) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

Term	Effect	Coeff	SE Coeff	T	P
Constant		14464	8.390	1723.88	< 0.001
A	-2163	-1081	8.390	-128.89	< 0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่า P ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง (Estimated Effect and Coefficients for Response, Coded Units) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (Alpha = 0.05) (ต่อ)

Term	Effect	Coeff	SE Coeff	T	P
B	-1602	-801	8.390	-95.47	< 0.001
C	2215	1107	8.390	131.98	< 0.001
D	555	278	8.390	33.10	< 0.001
E	1516	758	8.390	90.36	< 0.001
A*B	-1485	-742	8.390	-88.49	< 0.001
A*C	2060	1030	8.390	122.78	< 0.001
A*D	-195	-97	8.390	-11.60	< 0.001
A*E	1278	639	8.390	76.18	< 0.001
B*C	1086	543	8.390	64.73	< 0.001
B*D	-1388	-694	8.390	-82.71	< 0.001
B*E	620	310	8.390	36.94	< 0.001
C*D	1321	661	8.390	78.75	< 0.001
C*E	-535	-267	8.390	-31.85	< 0.001
D*E	720	360	8.390	42.90	< 0.001

S = 47.4618

PRESS = 144168

R-Sq = 99.98 %

R-Sq (pred) = 99.94 %

R-Sq (adj) = 99.97 %

จากตาราง 4.2 ทำการเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่าของ Alpha ที่ใช้ในการสร้างเส้นนัยสำคัญบนกราฟพาราโต โดยค่า P-Value ของปัจจัยนั้น ๆ จะต้องมิต่ำกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในระดับที่มีนัยสำคัญ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน คือ ทุกปัจจัยและทุกอันตรกิริยารวม และในการออกแบบขั้นสูง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ต้องมีปัจจัยอย่างน้อย 3 ปัจจัย ดังนั้น การหาปัจจัยหลักสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จึงมีปัจจัยเพียงพอต่อการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดในขั้นตอนต่อไป

4.2 การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เมื่อได้ปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการออกแบบการทดลองอย่างละเอียดเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด ผู้วิจัยใช้โปรแกรม MINITAB

Release 15 ช่วยในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลที่ออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบโดยใช้วิธี แบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย และทำการออกแบบการทดลอง โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อม จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม

ผลการทดลองในขั้นตอนนี้ได้มาจาก การออกแบบการทดลองเพื่อค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ซึ่งทำได้โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน โดยทำการกำหนดระดับปัจจัย ขอบเขต และสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ตามตารางที่ 4.3

ดังนั้น จึงต้องทราบว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MINITAB Release 15 ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะวิเคราะห์ความแปรปรวน และทำการพล็อตกราฟพาราโตที่เส้นนัยสำคัญมีค่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบหลัก แล้วเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จากกราฟดังกล่าวไปทำการลดรูปสมการให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดอย่างแท้จริง โดยเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่าของ α โดยต้องมีปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมอย่างน้อย 3 ปัจจัยจึงจะเพียงพอต่อการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน เนื่องจากงานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยให้อยู่นอกเหนือจากระดับทั้งสามได้จึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน ซึ่งจะไม่มี การเพิ่มค่าในการทดลองทำให้สามารถทดลองบนค่า ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใด ๆ

ตารางที่ 4.3 ระดับปัจจัยและสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัย/หน่วย	ระดับการตั้งค่า			สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
1.แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดขณะทำการเชื่อม (หน่วย: MPa)	0.15	0.20	0.25	A
2.เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (หน่วย: Cycle)	20	25	30	B
3.กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (หน่วย: Ampere)	11000	11500	12000	C
4.เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (หน่วย: Cycle)	20	23	26	D
5.เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (หน่วย: Cycle)	15	20	25	E

จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางการกำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ซึ่งมี

ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ 5 ปัจจัย ซึ่งมีความเพียงพอต่อการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน คือ

1. แรงดันลมของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม แทนด้วยสัญลักษณ์ (A)
2. เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน แทนด้วยสัญลักษณ์ (B)
3. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม แทนด้วยสัญลักษณ์ (C)
4. เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม แทนด้วยสัญลักษณ์ (D)
5. เวลาถอดชิ้นงานหลังจากการเชื่อม แทนด้วยสัญลักษณ์ (E)

โดยกำหนดให้มี 3 ระดับตามการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสี

แบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 ในการออกแบบการทดลองแบบแบบบล็อกซ์ – เบห์นเคน

ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย					ผลตอบ (yt) ความแข็งแรง ดึงเดือน (kN)
		A (MPa.)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
1	86	0.20	30	11500	26	20	19.63
2	89	0.20	25	11500	23	20	19.33
3	4	0.25	30	11500	23	20	15.77
4	40	0.20	30	11500	26	20	19.58
5	74	0.25	25	11500	26	20	15.63
6	10	0.20	30	11500	23	15	18.96
7	17	0.20	25	11500	20	15	18.12
8	33	0.15	25	11500	23	15	14.23
9	65	0.20	25	11500	20	25	18.11
10	52	0.20	25	12000	20	20	15.78
11	59	0.15	25	11000	23	20	13.22
12	83	0.20	20	11500	20	20	18.21
13	85	0.20	20	11500	26	20	19.64
14	22	0.20	30	11000	23	20	16.22
15	91	0.20	25	11500	23	20	19.23
16	26	0.25	25	11500	20	20	15.25
17	15	0.15	25	12000	23	20	14.84
18	18	0.20	25	11500	26	15	19.62
19	51	0.20	25	11000	20	20	15.83
20	46	0.20	25	11500	23	20	19.20
21	29	0.20	25	11000	23	15	16.23
22	38	0.20	30	11500	20	20	18.12
23	90	0.20	25	11500	23	20	19.25
24	3	0.15	30	11500	23	20	14.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในการออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (ต่อ)

ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย					ผลตอบ (yt) ความแข็งแรง ดึงเฉือน (kN)
		A (MPa.)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
25	43	0.20	25	11500	23	20	19.27
26	92	0.20	25	11500	23	20	19.21
27	47	0.15	20	11500	23	20	14.22
28	37	0.20	20	11500	20	20	18.11
29	60	0.25	25	11000	23	20	14.88
30	81	0.15	25	11500	23	25	14.18
31	53	0.20	25	11000	26	20	16.75
32	62	0.25	25	12000	23	20	16.88
33	1	0.15	20	11500	23	20	14.17
34	82	0.25	25	11500	23	25	15.67
35	44	0.20	25	11500	23	20	19.28
36	11	0.20	20	11500	23	25	19.40
37	73	0.15	25	11500	26	20	14.58
38	34	0.25	25	11500	23	15	15.75
39	69	0.20	20	12000	23	20	20.05
40	70	0.20	30	12000	23	20	19.93
41	27	0.15	25	11500	26	20	14.51
42	66	0.20	25	11500	26	25	19.58
43	80	0.25	25	11500	23	15	15.73
44	75	0.20	25	11000	23	15	16.27
45	55	0.20	20	11500	23	15	18.99
46	12	0.20	30	11500	23	25	19.44
47	58	0.20	30	11500	23	25	19.38
48	41	0.20	25	11500	23	20	19.26
49	77	0.20	25	11000	23	25	16.32
50	64	0.20	25	11500	26	15	17.34
51	36	0.25	25	11500	23	25	15.65
52	48	0.25	20	11500	23	20	15.78
53	30	0.20	25	12000	23	15	19.97
54	49	0.15	30	11500	23	20	14.20
55	21	0.20	20	11000	23	20	16.25
56	88	0.20	25	11500	23	20	19.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในการออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์ – เบ็นเคน (ต่อ)

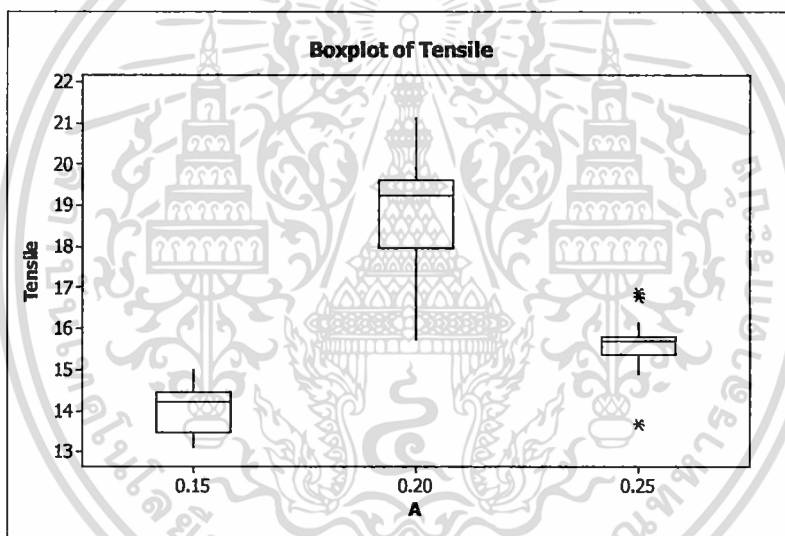
ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย					ผลตอบ (yt) ความแข็งแรง ดึงเฉือน (kN)
		A (MPa.)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
57	5	0.20	25	11000	20	20	15.73
58	6	0.20	25	12000	20	20	19.64
59	42	0.20	25	11500	23	20	19.27
60	28	0.25	25	11500	26	20	16.12
61	9	0.20	20	11500	23	15	18.98
62	87	0.20	25	11500	23	20	19.30
63	16	0.25	25	12000	23	20	16.78
64	57	0.20	20	11500	23	25	19.40
65	39	0.20	20	11500	26	20	19.62
66	8	0.20	25	12000	26	20	17.89
67	13	0.15	25	11000	23	20	13.11
68	61	0.15	25	12000	23	20	14.98
69	7	0.20	25	11000	26	20	16.84
70	19	0.20	25	11500	20	25	18.21
71	35	0.15	25	11500	23	25	14.22
72	20	0.20	25	11500	26	25	19.62
73	67	0.20	20	11000	23	20	16.35
74	24	0.20	30	12000	23	20	19.95
75	32	0.20	25	12000	23	25	19.80
76	78	0.20	25	12000	23	25	19.89
77	79	0.15	25	11500	23	15	14.17
78	45	0.20	25	11500	23	20	19.21
79	50	0.25	30	11500	23	20	15.78
80	54	0.20	25	12000	26	20	21.11
81	56	0.20	30	11500	23	15	18.30
82	84	0.20	30	11500	20	20	18.15
83	72	0.25	25	11500	20	20	15.28
84	31	0.20	25	11000	23	25	16.27
85	71	0.15	25	11500	20	20	13.21
86	23	0.20	20	12000	23	20	20.05
87	76	0.20	25	12000	23	15	19.98
88	68	0.20	30	11000	23	20	16.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในการออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (ต่อ)

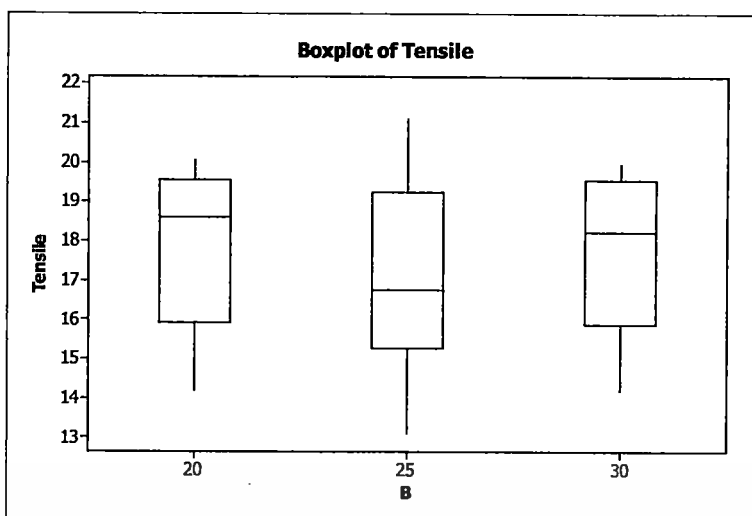
ลำดับที่ การทดลอง มาตรฐาน	ลำดับที่ การทดลอง ตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย					ผลตอบ (yt) ความแข็งแรง ดึงเฉือน (kN)
		A (MPa.)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
89	2	0.25	20	11500	23	20	15.63
90	63	0.20	25	11500	20	15	18.15
91	25	0.15	25	11500	20	20	13.25
92	14	0.25	25	11000	23	20	13.67

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 มาทำการสร้าง Box Plot เพื่อดูแนวโน้มของค่าระดับแต่ละปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน



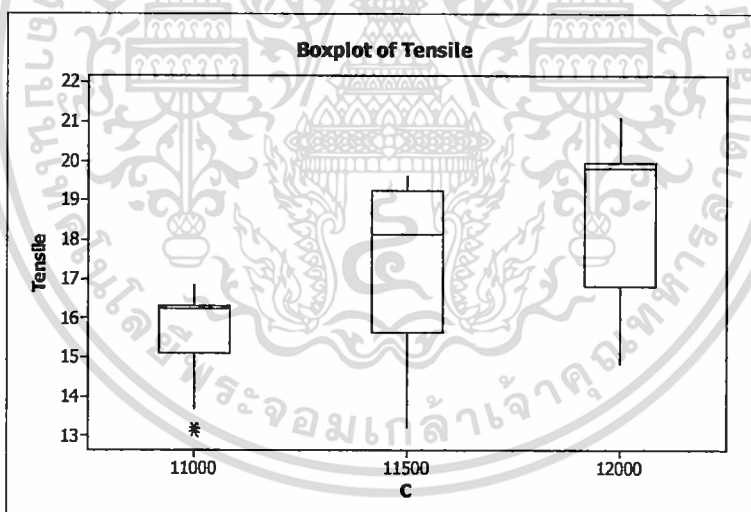
รูปที่ 4.12 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (A) ในการหาค่าที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (A) แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม โดยตั้งค่าแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในระดับกลาง มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่าการตั้งแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในระดับต่ำและระดับสูง



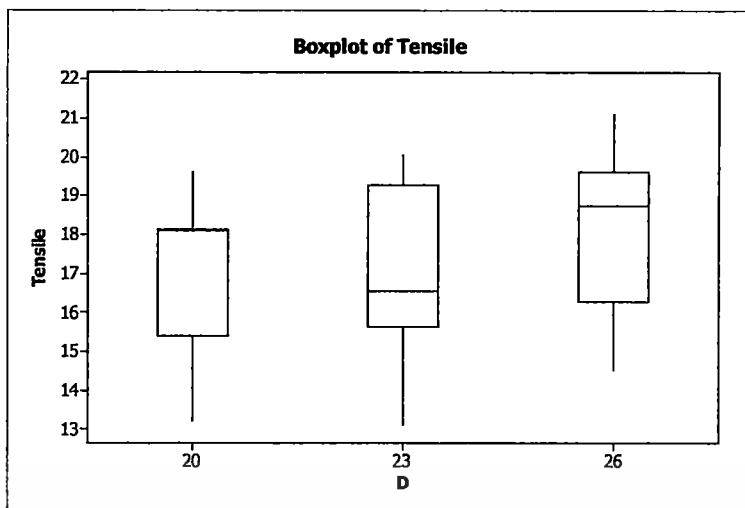
รูปที่ 4.13 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (B) ในการหาค่าที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.13 พบว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (B) เวลาติดตั้งงานสองชั้นให้ติดกัน โดยตั้งค่าเวลาติดตั้งงานสองชั้นให้ติดกันในระดับกลาง มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมต่ำกว่าการตั้งค่าของเวลาติดตั้งงานสองชั้นให้ติดกันในระดับต่ำและระดับสูง



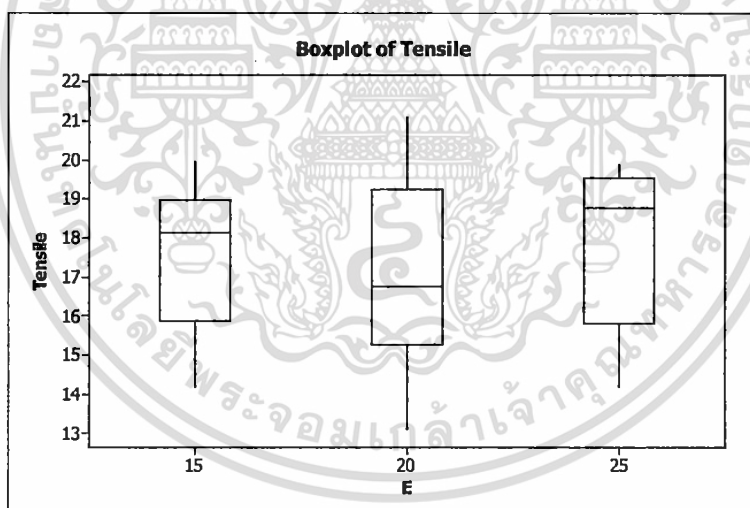
รูปที่ 4.14 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (C) ในการหาค่าที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.14 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (C) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม ในระดับสูง มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่าการตั้งค่ากระแส ไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมในระดับต่ำ



รูปที่ 4.15 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (D) ในการหาค่าที่เหมาะสม

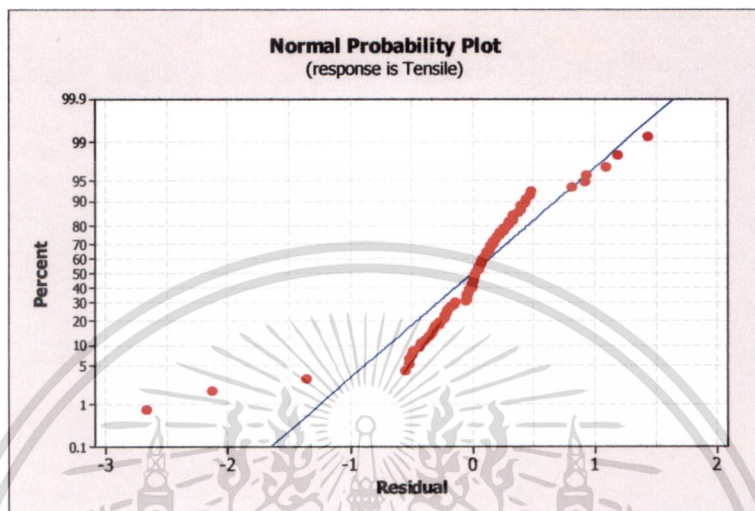
จากรูปที่ 4.15 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (D) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมในระดับสูง มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่าการตั้งค่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมในระดับต่ำ



รูปที่ 4.16 แผนภาพแบบกล่องของปัจจัย (E) ในการหาค่าที่เหมาะสม

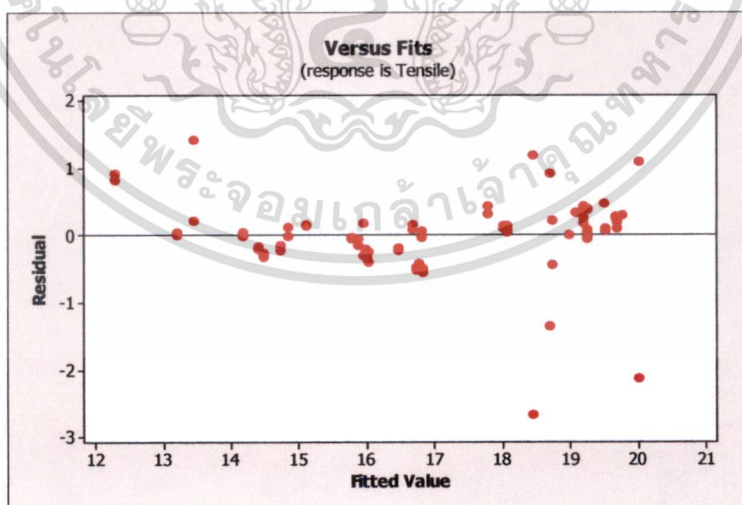
จากรูปที่ 4.16 สังเกตได้ว่าผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ของปัจจัย (E) เวลาถัดขึ้นงานหลังจากการเชื่อมในระดับสูง มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงกว่าการตั้งค่าเวลาถัดขึ้นงานหลังจากการเชื่อมในระดับต่ำ

จากนั้นทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้นความเพียงพอของแบบจำลองสามารถตรวจสอบโดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง ดังรูปที่ 4.17 พบว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งดูได้จากลักษณะของกราฟ โดยจุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.17 การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการหาค่าที่เหมาะสม

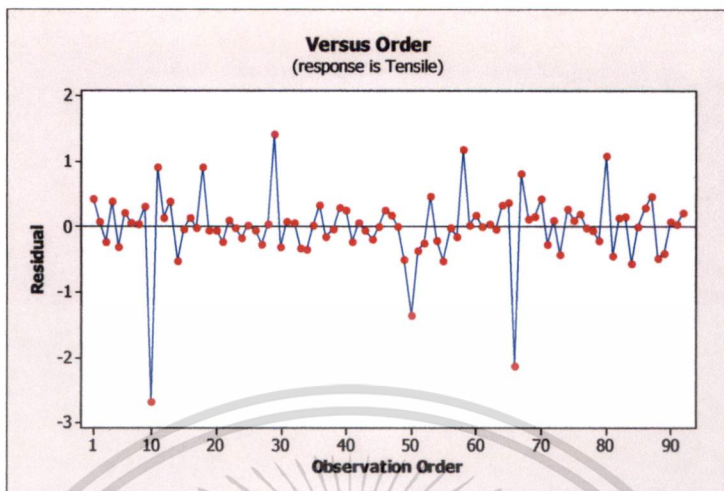
จากรูป 4.18 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่แตกต่างกัน ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย



รูปที่ 4.18 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายในการหาค่าที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง จากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง



รูปที่ 4.19 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองในการหาค่าที่เหมาะสม

4.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์เพื่อตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองในเทอมต่าง ๆ ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ในระดับที่มีนัยสำคัญ แสดงตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้ตัวแปรเข้ารหัส (Coded Units)

Term	Coeff	SE Coeff	T	P
Constant	19.2550	0.1742	110.543	< 0.001
A	0.7791	0.1067	7.304	< 0.001
B	-0.0300	0.1067	-0.281	0.779
C	1.4791	0.1067	13.866	< 0.001
D	0.5909	0.1067	5.540	< 0.001
E	0.1359	0.1067	1.274	0.207
A*A	-3.9535	0.1444	-27.374	< 0.001
B*B	-0.0715	0.1444	-0.495	0.622
C*C	-0.9477	0.1444	-6.562	< 0.001
D*D	-0.5519	0.1444	-3.821	< 0.001
E*E	-0.1885	0.1444	-1.305	0.196
A*B	0.0125	0.2133	0.059	0.953
A*C	0.2025	0.2133	0.949	0.346

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้ตัวแปรเข้ารหัส (Coded Units) (ต่อ)

Term	Cofe	SE Coef	T	P
A*D	-0.1762	0.2133	-0.826	0.411
A*E	-0.0200	0.2133	-0.094	0.926
B*C	-0.0113	0.2133	-0.053	0.058
B*D	-0.0000	0.2133	-0.000	1.000
B*E	0.0913	0.2133	0.428	0.670
C*D	0.1937	0.2133	0.908	0.367
C*E	-0.0437	0.2133	-0.205	0.838
D*E	0.2737	0.2133	1.283	0.204

S = 0.603399

PRESS = 45.9466

R-Sq = 94.01 %

R-Sq (pred) = 89.35 %

R-Sq (adj) = 92.32 %

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance for Tensile)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	405.581	405.581	20.2790	55.70	<0.001
Linear	5	101.221	101.221	20.2442	55.60	<0.001
Square	5	302.796	302.796	60.5592	166.33	<0.001
Interaction	10	1.564	1.564	0.1564	0.43	0.927
Residual Error	71	25.850	25.850	0.3641		
Lack-of-Fit	20	9.454	9.454	0.4727	1.47	0.134
Pure Error	51	16.396	16.396	0.3215		
Total	91	431.431				

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ตามตารางที่ 4.5 พบว่าค่าสัดส่วนของปัจจัยหลัก A , C , D และอันตรกิริยาระหว่าง A*A , C*C และ D*D มีค่า P-Value น้อยกว่าค่าของ Alpha (Alpha = 0.05) ซึ่งทำให้ปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัยที่เหลือจะต้องถูกเอาออกจากแบบจำลอง

4.2.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)

ทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ โดยพิจารณาจากค่าของ R^2 ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100 % หรือไม่ ถ้ามีค่าใกล้เคียง 100 % แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี รวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด จากตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 94.01 % ถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ ซึ่งอาจได้ค่าที่ทำนายผลแตกต่างจากค่าที่ยืนยันผลและหลัง R^2 (adj) ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่าเท่ากับ 92.32 % ซึ่งมีวิธีการคำนวณหาค่า R^2 ของการทดลองในครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 94.01 % ตามสมการ 4.1

โดยที่ R^2 ที่คำนวณได้จากโปรแกรมหาได้จาก

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{405.518}{431.431} = 0.93993 \approx 94 \% \quad (4.1)$$

และ Adjusted R^2 หาได้จาก

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{SS_E / df_E}{SS_{Total} / df_{Total}} = 1 - \frac{25.850/71}{431.431/91} = 0.9232 \approx 92.30 \% \quad (4.2)$$

4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

จากตารางที่ 4.6 ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเพียงพอของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ทำการตรวจสอบฟังก์ชันการถดถอยเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่ โดยพิจารณาค่า P-Value ของ Lack-of-Fit ต้องมากกว่า 0.05 [6] อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยทุกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญจึงพิจารณาค่าสัดส่วนของความแปรปรวนของความไม่เหมาะสมของแบบจำลอง (F Value of Lack-of-Fit, F_0) จากการคำนวณได้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนของความไม่เหมาะสมของแบบจำลอง ดังนี้

สมการทดสอบ ทดสอบ F_0 ได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} = \frac{0.4727}{0.3215} = 1.47 \quad (4.3)$$

การตรวจสอบความไม่เหมาะสมของแบบจำลอง ค่าของ $F_{v1, v2, 1-\alpha}$ เมื่อระดับชั้นความเป็นเสรีคือ 20 และ 51 ในช่วงความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ $F_{v1, v2, 1-\alpha} = F_{20, 51, 0.95} = 1.80$ พบว่า มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเพียงพอที่ใช้ในการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 และเมื่อพิจารณาสมการของ Full Quadratic มาทำการวิเคราะห์ค่าของ R-Sq มีค่าเท่ากับ 94.01 % ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ซึ่งอาจได้ค่าที่ทำนายผลแตกต่างจากค่าที่ยืนยันผล และสามารถพิจารณาค่า P-Value ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับในการทดลอง ผู้วิจัยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ Alpha = 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของ Square Term < 0.01 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ค่าระดับนัยสำคัญ Alpha = 0.05 แสดงว่า มีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่ผิวผลตอบ จึงสามารถใช้สมการสำหรับทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1

4.2.4 สร้างสมการทำนาย

สร้างสมการทำนาย โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficients) ของปัจจัยในเทอมต่าง ๆ ไปทำการเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม โดยใช้

ข้อมูลที่คำนวณได้จากโปรแกรมตัวแปรเข้ารหัส (Coded Unit) เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต่อไป

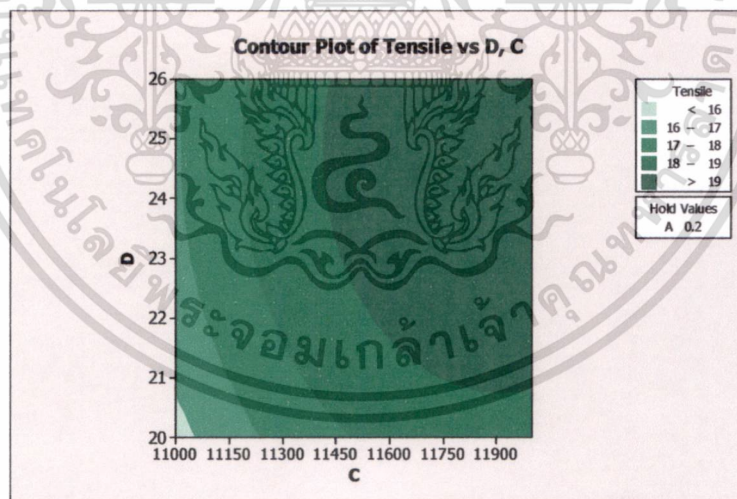
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละเทอมต่าง ๆ ทุกเทอมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ได้ ไปทำการเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม ซึ่งจะได้สมการทำนายที่ 4.4

สมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 โดยที่ y_t คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม และค่าปัจจัยทั้งสามในสมการแทนด้วยตัวแปรถูกเข้ารหัส (Coded Unit) คือ

$$y_t = 19.255 + 0.7791(A) + 1.4791(C) + 0.5909(D) - 3.9535(A*A) - 0.9477(C*C) - 0.5519(D*D) \quad (4.4)$$

4.2.5 สร้างพื้นผิวผลตอบ (Response Surface)

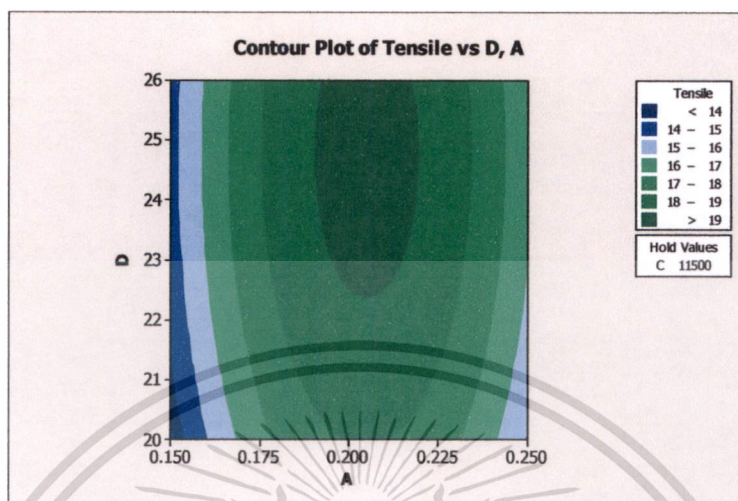
จากการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด ในขั้นตอนต่อไปสร้างพื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม เทียบกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม ตามรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 กราฟโครงร่างระหว่างกระแสไฟขณะทำการเชื่อมและเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม

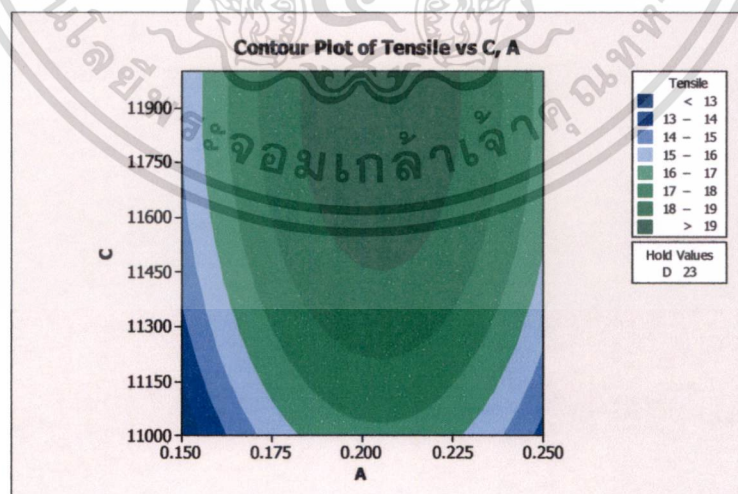
จากรูปที่ 4.20 กราฟโครงร่างระหว่างกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยปรับค่าแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมให้อยู่ใน

ระดับที่ 0.20 MPa. จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงสุดที่ระดับค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมประมาณ 11900 Amperes และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมประมาณ 24 Cycles



รูปที่ 4.21 กราฟโครงร่างระหว่างแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม

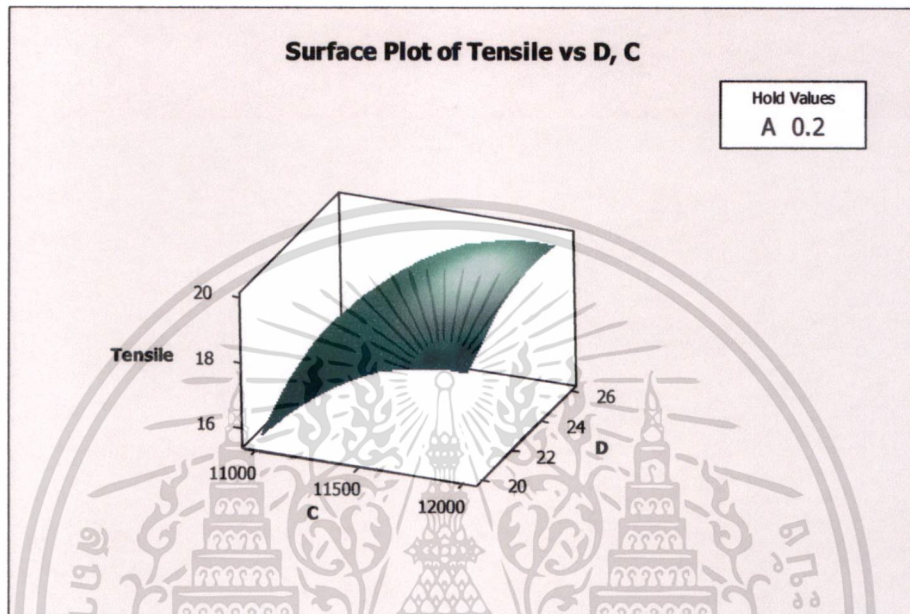
จากรูปที่ 4.21 โครงร่างระหว่างแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 11500 Amperes จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงสุดอยู่ที่แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมประมาณ 0.2 MPa และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมประมาณ 24 Cycles



รูปที่ 4.22 กราฟโครงร่างระหว่างแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม

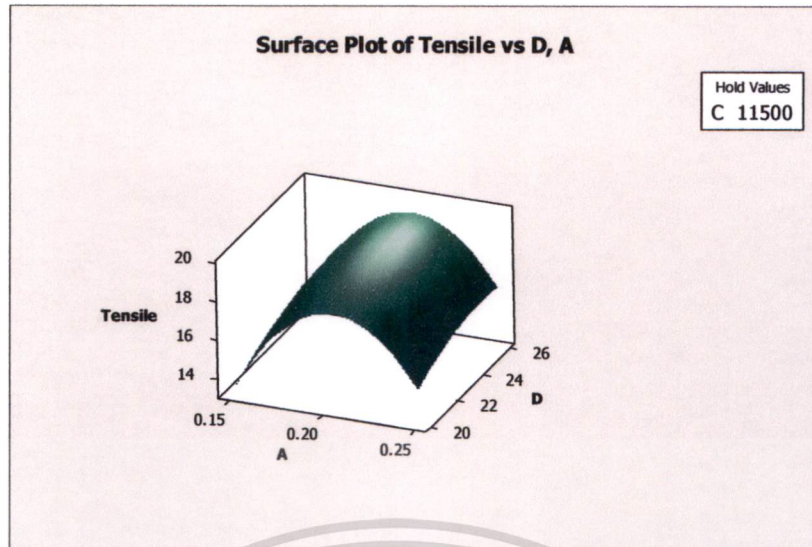
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 กราฟโครงร่างระหว่างแรงดันลมของข้ออเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยปรับค่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะทำการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 23 Cycles จะเห็นว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุดอยู่ที่ค่าแรงดันลมของข้ออเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมประมาณ 0.20 MPa และกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมประมาณ 11900 Amperes



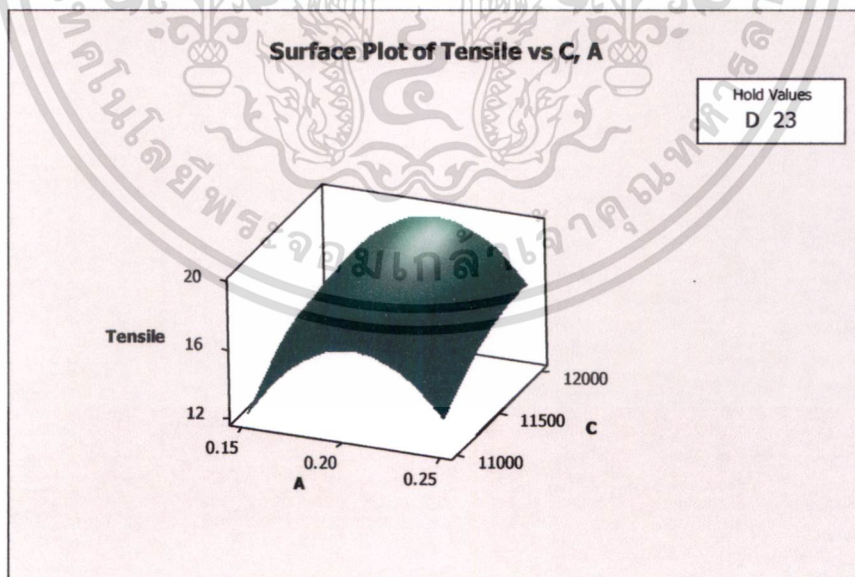
รูปที่ 4.23 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมเมื่อกำหนดค่าแรงดันลมของข้ออเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมคงที่

จากรูปที่ 4.23 แสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบระหว่างกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เป็นกราฟแสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยปรับค่าแรงดันลมของข้ออเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 0.20 MPa. จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด ที่ระดับค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมประมาณ 11900 Amperes และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมประมาณ 24 Cycles



รูปที่ 4.24 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมเมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมคงที่

จากรูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างพื้นผิวผลตอบระหว่างแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เป็นกราฟแสดงโครงสร้างพื้นผิวผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 11500 Amperes จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด อยู่ที่แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมประมาณ 0.2 MPa. และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมประมาณ 24 Cycles



รูปที่ 4.25 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมเมื่อกำหนดเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะทำการเชื่อมคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.25 แสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบระหว่างแรงดันลมของซั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเป็นกราฟแสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบที่ให้ผลตอบของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยปรับค่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะทำการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 23 Cycles จะเห็นว่าค่าผลตอบที่ให้ค่าค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมสูงสุดอยู่ที่ค่าแรงดันลมของซั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมประมาณ 0.20 MPa และกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมประมาณ 11900 Amperes

4.2.6 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB Release 15 ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งกรณีที่ D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ถ้าค่า D มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงผลตอบตัวใดตัวหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งตัวอยู่นอกขอบเขตขีดจำกัดการยอมรับ ในกรณีที่ผลตอบมีเพียงตัวเดียว ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability) จะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Desirability) นั้น

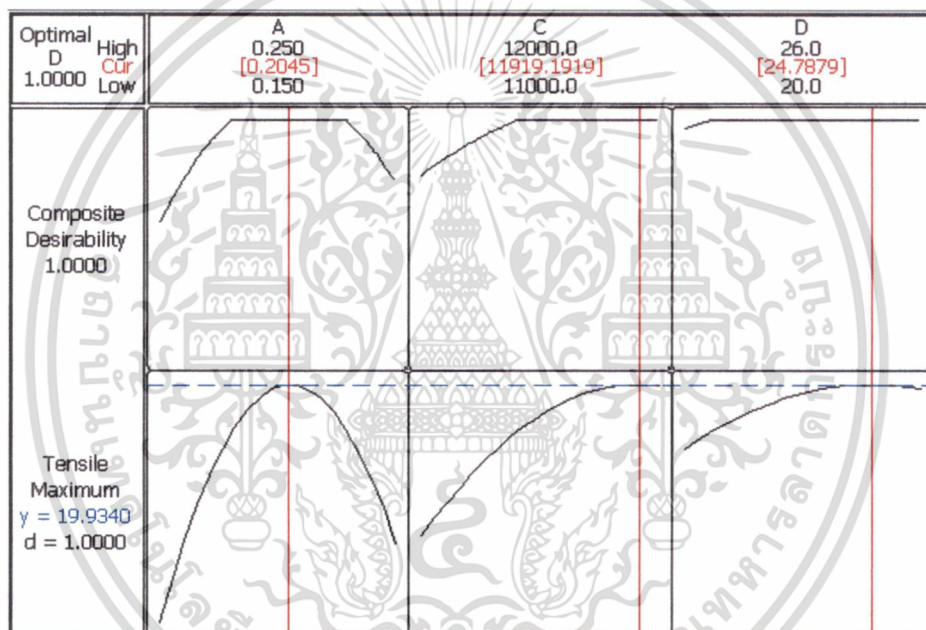
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) ค่ามากที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อม ดังแสดงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมที่กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุด

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Tensile	Maximum	10.1	19	19	1	1
Global Solution						
A	=	0.204545				
C	=	11919.2				
D	=	24.7879				
Predicted Responses						
Tensile	=	19.9340	,	desirability =	1.000000	
Composite Desirability	=	1.000000				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบ (Maximum) เนื่องจากต้องการให้ได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อน และอบเกรต SGCD1 ในการกำหนดค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) ได้กำหนดให้เท่ากับ 10.1 kN. อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3140 ต้องได้ค่ามากกว่า 10.1 kN. และค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงาน ขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 0.2045 MPa กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 11919.2 Amperes และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 24.7879 Cycles โดยได้ค่าการทำนายความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม (Predicted Response) เท่ากับ 19.9340 kN. ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 และได้ค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 1.000 โดยมีลักษณะกราฟของแต่ละปัจจัยแสดงตามรูปที่ 4.26



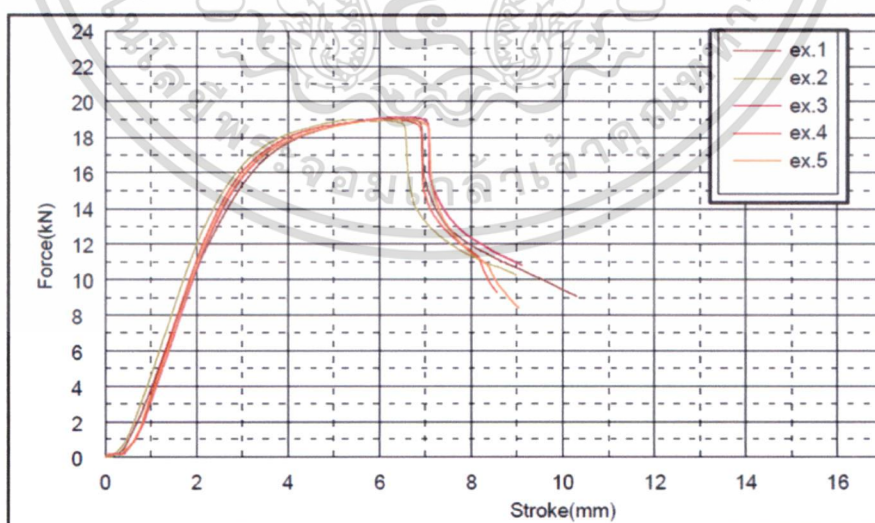
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเมื่อกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบ (Maximum)

ดังนั้นค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MINITAB Release 15 นี้ คือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 0.20 MPa. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เท่ากับ 11900 Amperes. และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 25 Cycles. โดยมีค่าการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมเท่ากับ 19.934 kN. จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 มีค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 1.000

4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Experiments)

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการปรับค่าแรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 0.20 MPa เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกันให้อยู่ในระดับที่ 25 Cycles กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 11900 Amperes เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 25 Cycles และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่ 20 Cycles ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่น ในการทดลองเพื่อยืนยันผลจะเห็นได้ว่ามีอยู่สองปัจจัย คือ เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน เวลากดแช่ชิ้นงาน หลังจากการเชื่อม จากการศึกษาพบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม แต่ก็ไม่สามารถตัดปัจจัยทั้งสองนี้ออกจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่าระดับของปัจจัยทั้งสองไว้ที่ระดับ 25 Cycles และ 20 Cycles ตามลำดับ โดยทำการอ้างอิงมาจากคู่มือการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของผู้ผลิตเครื่องเชื่อมและค่าระดับปัจจัยที่กำหนดนั้นก็เป็ค่าระดับของปัจจัยที่เคยทำการทดลองมาแล้ว ซึ่งไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องเชื่อมและต่อชิ้นงานทดสอบ

ผลการทดลองเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและเพื่อยืนยันผลได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.06 kN. แสดงดังรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.8 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4.4 ทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมได้เท่ากับ 19.934 kN. ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมน้อยกว่าค่าทำนายโดยสมการประมาณ 4.38 เปอร์เซ็นต์เพราะว่าใช้ค่าระดับของปัจจัย C คือ กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมต่ำกว่าค่า Optimal จากการคำนวณโดยโปรแกรมเนื่องจากเครื่องเชื่อมไม่สามารถปรับตั้งค่าตามค่าที่คำนวณได้ จากผลการทดลองสามารถยอมรับได้และเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน JIS Z 3140 ก็ได้ค่าที่มากกว่าค่ามาตรฐานที่ 10.10 kN.



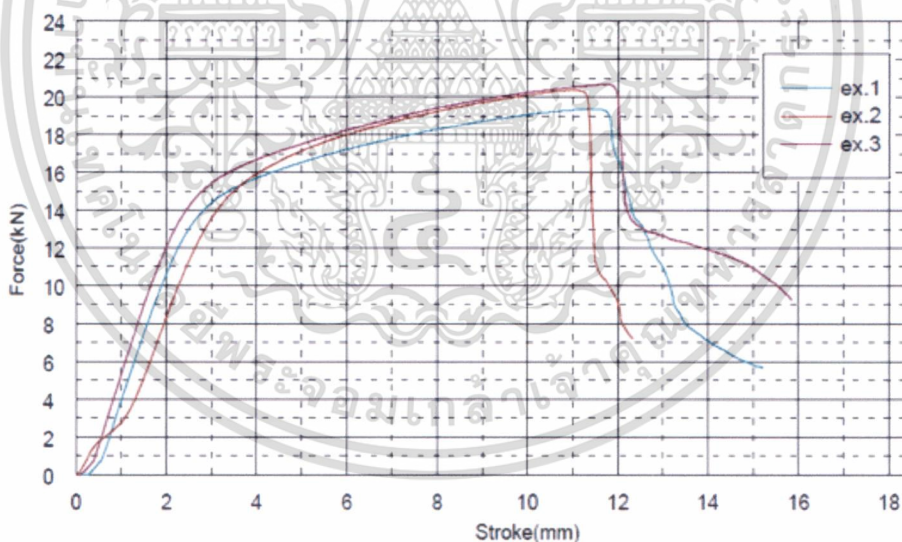
รูปที่ 4.27 แสดงค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม (Tensile Shear load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าระดับปัจจัยและผลการทดลองยืนยันผลของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน

ลำดับ การ ทดลอง	ค่าระดับปัจจัย (หน่วย)					ความแข็งแรงดึงเฉือน Tensile shear load (kN)
	A (MPa)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)	
1	0.20	25	11900	25	20	19.11
2	0.20	25	11900	25	20	19.01
3	0.20	25	11900	25	20	19.15
4	0.20	25	11900	25	20	19.02
5	0.20	25	11900	25	20	19.04
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม						19.06

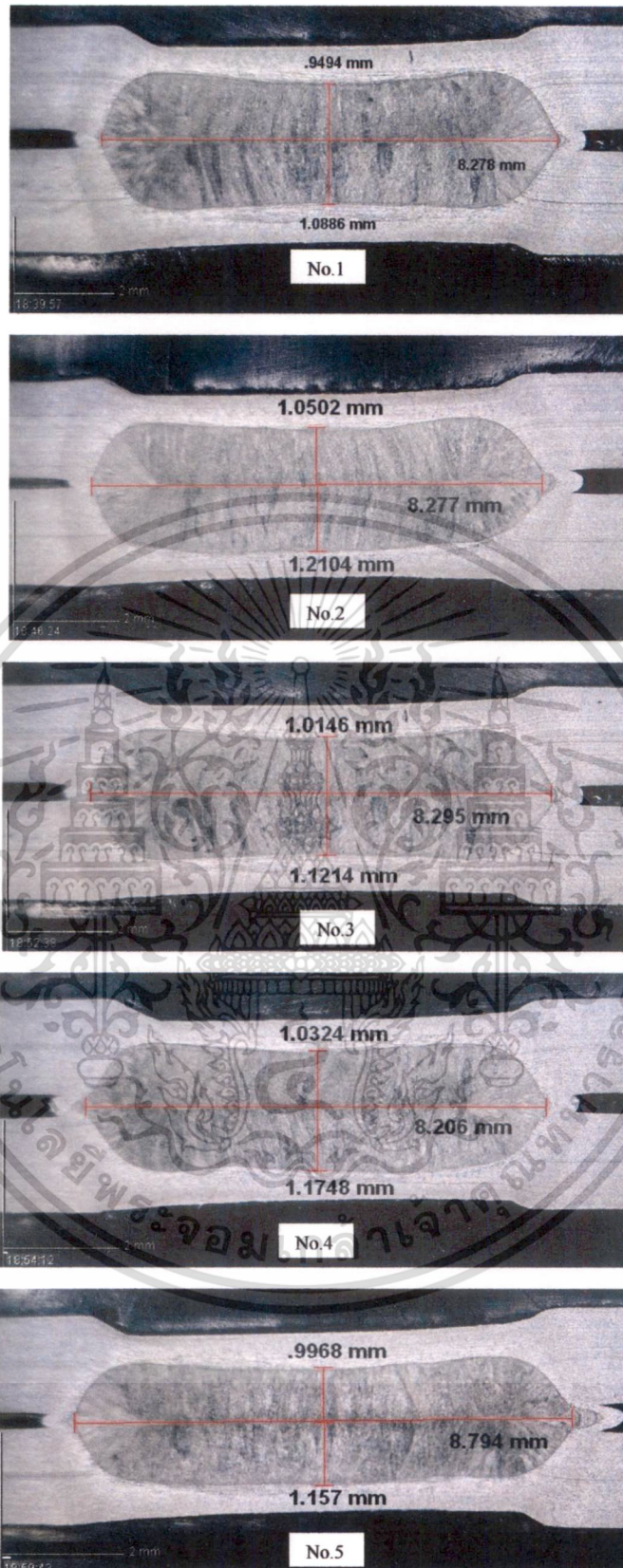
เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการทดลองได้ทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409 ที่ความหนา 1.8 มิลลิเมตร จำนวน 3 หน่วยการทดลอง ผลจากการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20.15 kN. แสดงดังรูปที่ 4.28 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4.4 ค่าทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมได้เท่ากับ 19.934 kN. ผลการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมมากกว่าค่าทำนายโดยสมการประมาณ 1.08 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกับค่าที่ทำนายได้ถึงแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นผลการทดลองสามารถยอมรับได้และสามารถนำไปใช้กับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS409 ได้



รูปที่ 4.28 แสดงค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม (Tensile Shear load) สำหรับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409

จากนั้นทำการตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อมเพื่อคุณลักษณะความสมบูรณ์ของจุดเชื่อม ลักษณะรอยบกพร่องของจุดเชื่อมและหาค่าขนาดของจุดเชื่อม (Nugget diameter) ตลอดจนอัตราการซึมลึก (Penetration) ของจุดเชื่อม พบว่าจุดเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องของจุดเชื่อมดังแสดงดังรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 โครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อมในการทดลองเพื่อยืนยันผล

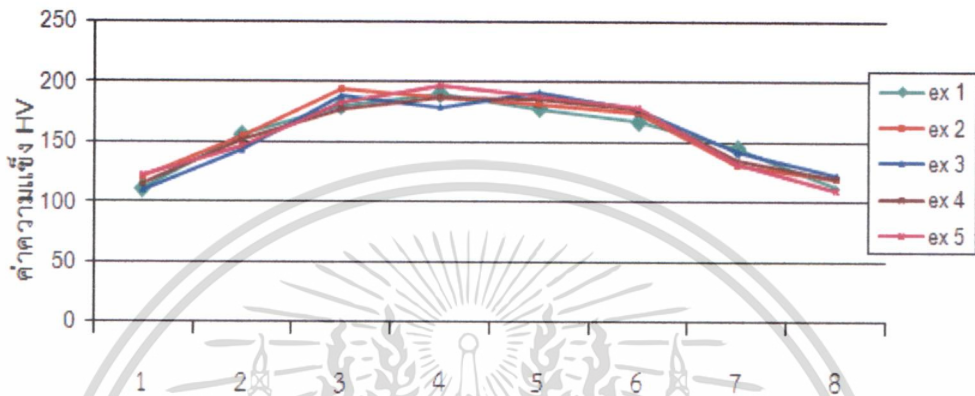
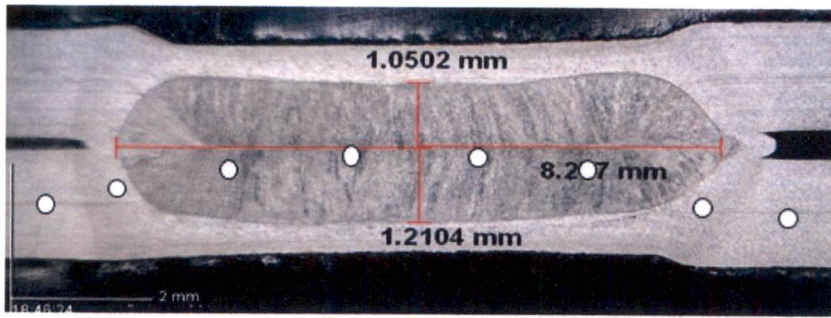
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตรวจสอบขนาดของจุดเชื่อม (Nugget Diameter) จากการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 พบว่าขนาดของจุดเชื่อมมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.370 มิลลิเมตร และอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 63.90 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 ขนาดของจุดเชื่อมต้องมากกว่า 5.70 มิลลิเมตรและอัตราการซึมลึกต้องมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการตรวจสอบขนาดของจุดเชื่อม (Nugget Diameter) และอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อม (Penetration)

ลำดับการทดลอง	ค่าระดับปัจจัย (หน่วย)					ขนาดจุดเชื่อม (Nugget) (mm.)	อัตราการซึมลึก (Penetration) (%)
	A (MPa)	B (Cycle)	C (Ampere)	D (Cycle)	E (Cycle)		
1	0.2	25	11900	25	20	8.278	60.47
2	0.2	25	11900	25	20	8.277	67.24
3	0.2	25	11900	25	20	8.295	62.27
4	0.2	25	11900	25	20	8.206	65.26
5	0.2	25	11900	25	20	8.794	64.27
ขนาดของจุดเชื่อมและอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ย						8.370	63.90

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งแรงของจุดเชื่อมจากการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของระดับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 พบว่าค่าความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเดิมและค่าความแข็งแรงสูงสุดที่บริเวณจุดเชื่อมหรือเรียกว่า Weld Nugget Zone ดังแสดงตามรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.10 เนื่องจากโครงสร้างบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิมลักษณะของเกรนเป็นผลึกแนวยาวเนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างเฟิร์ลโลดต์เพิ่มขึ้นและมีเฟอร์ไรต์น้อยจึงทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงตามรูปที่ 4.31 ถึง 4.33

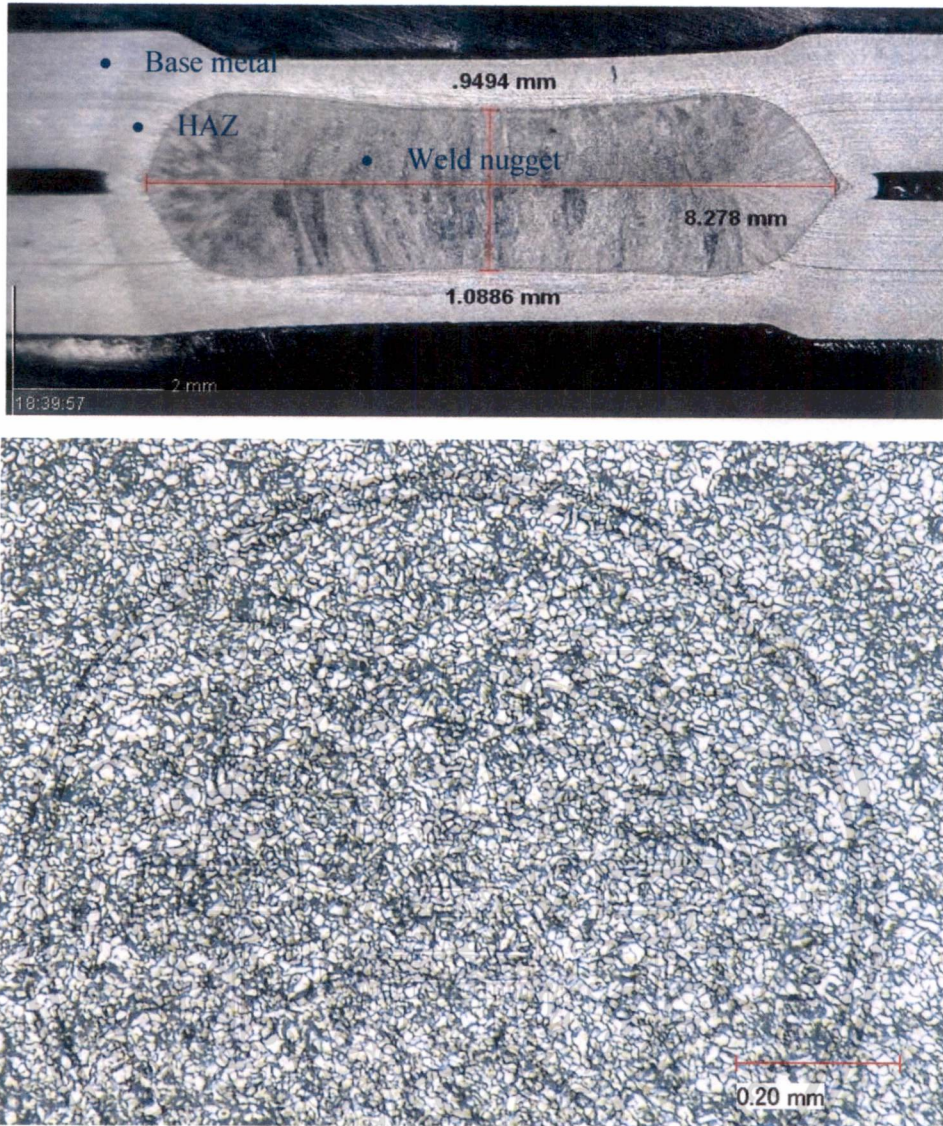


รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งบริเวณจุดเชื่อมในการทดลองเพื่อยืนยันผล

ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งในแต่ละตำแหน่งของจุดเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อยืนยันผล

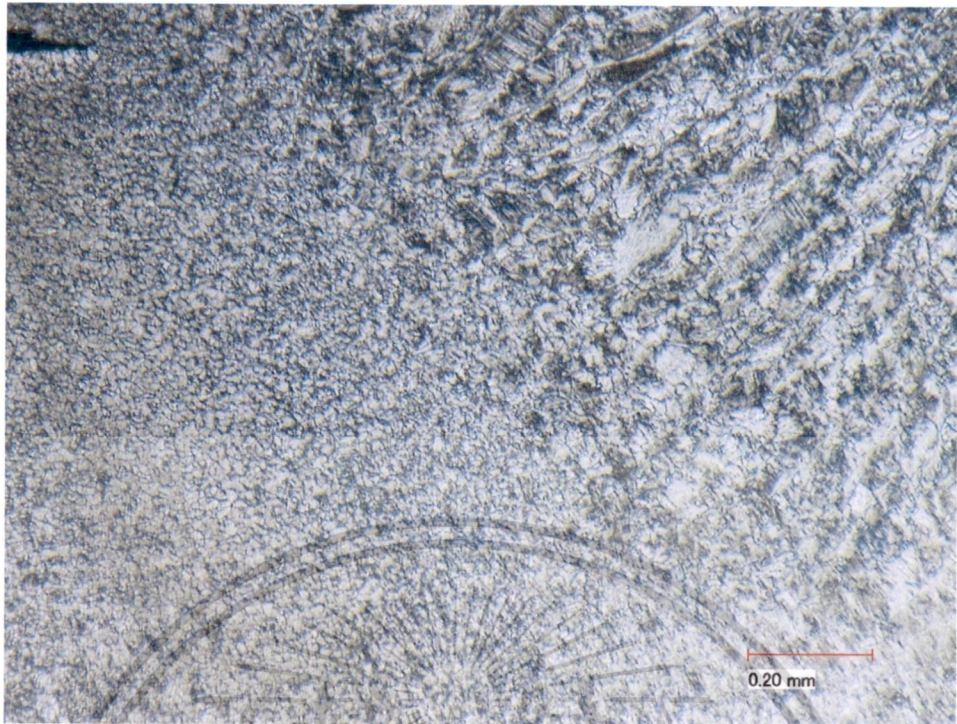
ชิ้นงานทดลอง	ตำแหน่งจุดตรวจสอบและค่าความแข็ง (หน่วย: HV)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	111	156	180	190	178	167	145	112
2	120	155	194	187	181	174	130	119
3	110	143	188	179	191	177	142	123
4	115	152	178	188	186	178	135	120
5	122	147	183	197	189	179	132	110
ค่าเฉลี่ย	116	151	185	188	185	175	137	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

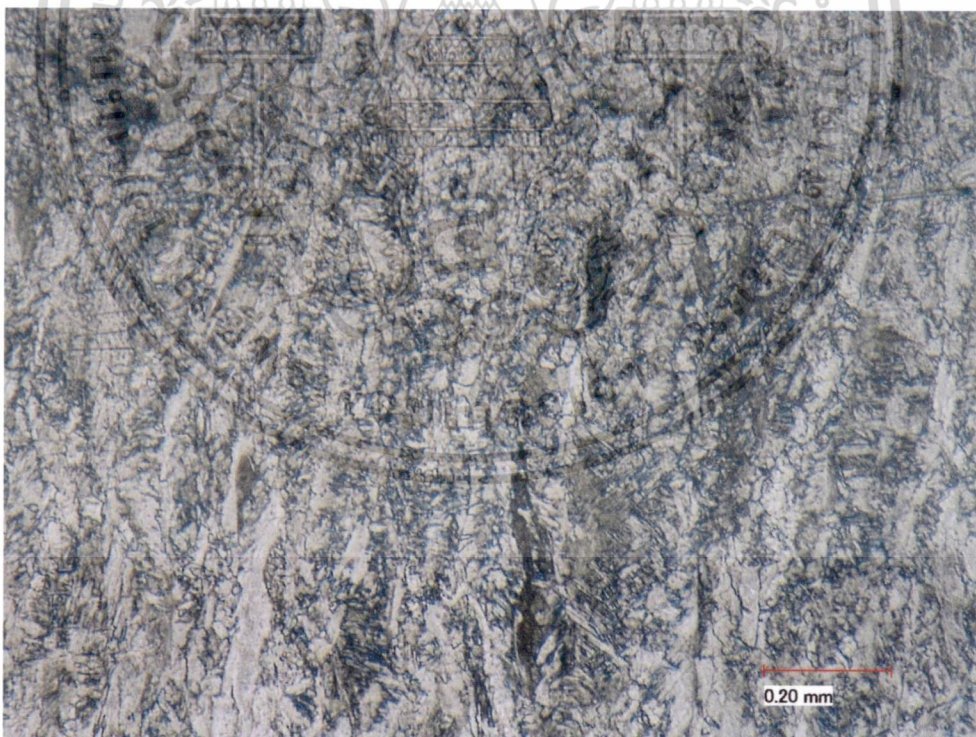


รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเหล็กเดิม (Base metal) กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone) กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคบริเวณจุดเชื่อม (Weld Nugget) กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.31 ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของจุดเชื่อมในการทดลองเพื่อยืนยันผล พบว่าโครงสร้างจุลภาคเดิมของเนื้อเหล็ก (Base metal) มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์พื้นสีขาวๆ เกรนขนาดเล็ก ขอบเกรนและสิ่งเจือปนสีดำลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ ส่วนบริเวณจุดเชื่อม (Weld Nugget) มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิมลักษณะของเกรนเป็นผลึกแนวยาวเนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์เพิ่มขึ้นและมีเฟอร์ไรต์น้อยจึงทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 4.33 และในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone) มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ น้อยกว่าบริเวณจุดเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.32 เพราะบริเวณนี้ได้รับความร้อนน้อยกว่า จึงทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าวัสดุเดิมแต่น้อยกว่าบริเวณจุดเชื่อม

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลสามารถสรุปได้ว่าการปรับค่าระดับของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลและนำค่าระดับของปัจจัยมาทำการกำหนดค่าระดับของปัจจัยในการเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 5 ชิ้น โดยตั้งค่าระดับปัจจัยดังนี้ คือ

1. แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลองบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 0.20 MPa.
2. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 11900 Amperes
3. เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 25 Cycles

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดและขนาดของจุดเชื่อม ค่าที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 มีค่ามากกว่า 10.1 kN. ไม่พบข้อบกพร่องในจุดเชื่อม ลักษณะจุดเชื่อมมีความสมบูรณ์ มีอัตราการซึมลึกที่ดี ส่งผลให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรง สามารถรับแรงดึงเฉือนได้ดีเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้น สรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเพียงพอที่จะทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 และเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดและเป็นไปตามมาตรฐาน JIS Z 3140 ในการทดลองเบื้องต้นโดยใช้การทดลองแบบ แฟร็กชันนัลแฟคเตอร์เรียล 2^{k-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยคือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน กระแสไฟขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปัจจัยหลัก ทั้งหมดมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ซึ่งจำนวนปัจจัยทั้งหมดมีความเพียงพอในการนำปัจจัยดังกล่าวไปทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมและตามมาตรฐาน JIS Z 3140 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองที่เป็นแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวตอบโดยใช้ค่าระดับปัจจัยจากการคัดกรองปัจจัยแล้ว และยังสามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองได้ เพราะค่าระดับปัจจัยจะอยู่ในขอบเขตของการออกแบบการทดลองที่ได้จากการคัดกรองปัจจัยแล้ว จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 และค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ทำให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดและเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140 คือ

1. แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม 0.20 MPa.
2. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม 11900 Amperes
3. เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม 24 Cycles

ส่วนปัจจัยอื่นสามารถใช้ค่าที่อยู่ในช่วงระดับตามคู่มือการเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้โดยให้พิจารณาถึงความเหมาะสมตามความหนาของชิ้นงานในคู่มือการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของผู้ผลิตเครื่องเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมและเวลาในการทำงาน ผลการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.06 kN. และเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4.4 ทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมได้เท่ากับ 19.934 kN. ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุดของจุดเชื่อมน้อยกว่าค่าทำนายโดยสมการประมาณ 4.38 เปอร์เซ็นต์เพราะว่าใช้ค่าระดับของปัจจัย C คือ กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมต่ำกว่าค่า Optimal จากการคำนวณโดยโปรแกรมเนื่องจากเครื่องเชื่อมไม่สามารถปรับตั้งค่าตามค่าที่คำนวณได้ จากผลการทดลองสามารถยอมรับได้และเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน JIS Z 3140 ก็ได้ค่าที่มากกว่าค่ามาตรฐานที่ 10.10 kN.

เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการทดลองได้ทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409 ที่ความหนา 1.8 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20.15 kN. เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4.4 ทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมได้เท่ากับ 19.934 kN. ผลการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมมากกว่าค่าทำนายโดยสมการประมาณ 1.08 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกับค่าที่ทำนายได้ถึงแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นผลการทดลองสามารถยอมรับได้และสามารถนำไปใช้กับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS409 ได้

จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ได้คือ

$$y_t = 19.255 + 0.7791(A) + 1.4791(C) + 0.5909 (D) - 3.9535 (A^*A) - 0.9477(C^*C) - 0.5519 (D^*D) \quad (5.1)$$

โดยที่ y_t คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของจุดเชื่อม จากการทดลองบนค่าระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดจากการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 พบว่าขนาดของจุดเชื่อมมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.37 มิลลิเมตร และอัตราการซึมลึกของจุดเชื่อมมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 63.90 เปอร์เซ็นต์ และไม่พบข้อบกพร่องของจุดเชื่อมซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3140

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งแรงบริเวณจุดเชื่อมพบว่า ค่าความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงสูงขึ้นจากค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเดิม และค่าความแข็งแรงสูงที่สุดที่บริเวณจุดเชื่อม เนื่องจากโครงสร้างบริเวณนี้ได้รับผลกระทบทางความร้อนทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิม ลักษณะเกรนของเกรนเป็นผลึกแนวยาวเนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างเฟิร์ลโลต์เพิ่มขึ้นและมีเฟอร์ไรต์น้อยจึงทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่นๆ

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมพบว่าโครงสร้างเดิมของเนื้อเหล็ก มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ฟันสีขาวๆ เกรนขนาดเล็ก ขอบเกรนและสิ่งเจือปนสีดำลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ ส่วนบริเวณจุดเชื่อม มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิมลักษณะของเกรนเป็นผลึกแนวยาวเนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างเฟิร์ลโลต์เพิ่มขึ้นและมีเฟอร์ไรต์น้อยจึงทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่นๆ และในส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีโครงสร้างเฟิร์ลโลต์น้อยกว่าบริเวณจุดเชื่อม เพราะบริเวณนี้ได้รับความร้อนน้อยกว่า จึงทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าวัสดุเดิมแต่น้อยกว่าบริเวณจุดเชื่อม

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและทดลอง มีบางหัวข้อที่ยังไม่ถูกนำมาทำการศึกษาและทดลอง เพื่อเป็นการพัฒนาการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้นจึงได้สรุปรวบรวม ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 การเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า มีด้วยกัน 3 วิธีและในแต่ละวิธีมีการตรวจสอบและทดสอบคุณภาพของงานเชื่อมที่แตกต่างกันมีหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด และทดสอบคุณภาพของจุดเชื่อมด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงเฉือน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่ไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดและยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถนำมาทำการตรวจสอบคุณภาพของจุดเชื่อมได้ เช่น การทดสอบการดึงในแนวตั้งฉากกับจุดเชื่อม (Tension test) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3137 การทดสอบตีหักแนวเชื่อม การทดสอบแรงกระแทกแนวเชื่อม และการทดสอบด้วยรังสีโดยใช้เครื่อง X-ray

5.2.1 ในการทดลองและวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดลองบนสมมติฐานของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด กับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z 3136 ซึ่งไม่ใช่ชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริงในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยในการเชื่อมได้ และถ้ามีทุนวิจัยในด้านต้นทุนของวัสดุที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ชิ้นงานจริงในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มาทำการทดลองก็จะทำให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและจะเป็นแนวทางในการศึกษาทำวิจัยครั้งต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Japanese Industrial Standard 1998, **Hot-dip zinc-coated steel sheets and coils**. Japanese Standard Association , JIS G 3302-1998,Japan,pp.336-355.
- [2] Japanese Industrial Standard 1998, **Method of Inspection for Spot Weld**. Japanese Standard Association , JIS Z 3140-1998,Japan,pp.636-644.
- [3] Japanese Industrial Standard 1978, **Method of Macro Test for Section of Spot Welded Joint**. Japanese Standard Association , JIS Z 3139-1978,Japan,pp.632-635.
- [4] Japanese Industrial Standard 1978, **Method of Tension shear Test for Spot Welded Joint**. Japanese Standard Association , JIS Z 3136-1978,Japan,pp.611-617.
- [5] ประสิทธิ์ เวียงแก้ว และฉัตร ลาภรังสิรัตน์. 2554. **คู่มืองานเหล็ก**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [6] ปารเมศ ชูติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] ทวีศักดิ์ อัครางกูร. 2542. **วัสดุวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [8] นราธิป แสงชัย. 2550. “การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้ารีดเย็น SPCD (JIS G3141) โดยหลักการออกแบบการทดลอง”, หน้า. 856-860 ใน **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่16**. ภูเก็ต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [9] ปรัชญา เพ็ญสุระ 2550. “การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดโดยการทดสอบสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา”. ใน **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 10**. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
- [10] ปรัชญา เพ็ญสุระ 2550. “การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเหนียวด้วยการวัดค่าความต้านทาน”. ใน **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่16**. ภูเก็ต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] ณรัตน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และคณะ. 2550. “การสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อการพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุด”, หน้า 625-632. ใน **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่16**. ภูเก็ต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] Ranfeng Qiu et al. 2010. “ Influence of Welding Parameters on the Tensile Shear Strength of Aluminum Alloy Joint Welded by Resistance Spot Welding”. **Materials Engineering and Performance**. 2011(20) : pp.355-358.
- [13] Yakup Kaya and Nizamettin Kahraman. 2011. “The effects of electrode force, welding current and welding”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2011.

- [14] B. H.Chang, Y. Zhou, I. Lum and D. Du. 2005. "Finite Element Analysis of Effect of Electrode Pitting in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy". **Science and Technology of Welding and Joining**. 2005 VOL 10. NO 1. pp.61-66
- [15] J.B. Shamsul and M.M. Hisyam. 2007. "Study Of Spot Welding Of Austenitic Stainless Steel Type 304". **Journal of Applied Sciences Research**, 2007(11). pp.1494-1499
- [16] วิกรม วัชรคุปต์. 2550. "โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอน". กรุงเทพฯ : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยฟังก์ชัน Analyze Response Surface Design

ขั้นตอนการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของเทอมต่างๆ ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 จากผลการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่างๆ ของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบคือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม โดยนำค่าของผลตอบป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม MINITAB Release 15 ที่ได้ทำการออกแบบการทดลองไว้แล้ว ในคอลัมน์ที่อยู่ถัดจากคอลัมน์ที่มีอยู่แล้วใน Worksheet โดยกำหนดชื่อของคอลัมน์ชื่อ Response คือ Tensile จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายตามขั้นตอน ดังนี้

1. สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์ - เบห์นเคน เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design เลือกปัจจัยที่มีผลค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม > OK > Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design
2. เลือกตัวแปรผลตอบ (Response) ซึ่งตัวแปรผลตอบที่ทำการวิเคราะห์ คือ Response of Tensile
3. เลือกลักษณะของข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ (Analyze Data Using) โดยเลือก Code Units เมื่อต้องการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันตัวแปรเข้ารหัส (-1, 0, 1) หรือเลือก Uncode Units เมื่อต้องการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันตัวแปรธรรมชาติ (ค่าในขอบเขตของปัจจัย)
4. กำหนด Terms ของปัจจัยโดยเลือกลักษณะของการวิเคราะห์ข้อมูล เป็นแบบ Full Quadratic
5. คลิก OK
6. โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับ Coefficients ของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อม
7. ทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่าของ R – Square ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100% หรือไม่ ถ้ามีค่าตั้งแต่ 90-100% แสดงว่าแบบจำลองมีความเพียงพอในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี รวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด
8. ตรวจสอบฟังก์ชันการถดถอยเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่ โดยพิจารณาค่า P-Value ของ Lack-of-Fit ต้องมากกว่า 0.05

9. สร้างสมการทำนาย โดยการนำค่าของ Coefficients ในเทอมต่าง ๆ ของปัจจัยไปทำการเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 ตามสมการที่ ก1

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (ก1)$$

1. ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ที่ออกแบบโดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1

Box-Behnken Design

Factors: 5 Replicates: 2
 Base runs: 46 Total runs: 92
 Base blocks: 1 Total blocks: 1
 Center points: 12

Response Surface Regression: Tensile versus A, B, C, D, E

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Tensile

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19.2550	0.1742	110.543	0.000
A	0.7791	0.1067	7.304	0.000
B	-0.0300	0.1067	-0.281	0.779
C	1.4791	0.1067	13.866	0.000
D	0.5909	0.1067	5.540	0.000
E	0.1359	0.1067	1.274	0.207
A*A	-3.9535	0.1444	-27.374	0.000
B*B	-0.0715	0.1444	-0.495	0.622
C*C	-0.9477	0.1444	-6.562	0.000
D*D	-0.5519	0.1444	-3.821	0.000
E*E	-0.1885	0.1444	-1.305	0.196
A*B	0.0125	0.2133	0.059	0.953
A*C	0.2025	0.2133	0.949	0.346
A*D	-0.1762	0.2133	-0.826	0.411
A*E	-0.0200	0.2133	-0.094	0.926
B*C	-0.0113	0.2133	-0.053	0.958
B*D	-0.0000	0.2133	-0.000	1.000
B*E	0.0913	0.2133	0.428	0.670
C*D	0.1937	0.2133	0.908	0.367
C*E	-0.0437	0.2133	-0.205	0.838
D*E	0.2737	0.2133	1.283	0.204

S = 0.603399 PRESS = 45.9466
 R-Sq = 94.01% R-Sq(pred) = 89.35% R-Sq(adj) = 92.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance for Tensile

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	20	405.581	405.581	20.2790	55.70	0.000
Linear	5	101.221	101.221	20.2442	55.60	0.000
Square	5	302.796	302.796	60.5592	166.33	0.000
Interaction	10	1.564	1.564	0.1564	0.43	0.927
Residual Error	71	25.850	25.850	0.3641		
Lack-of-Fit	20	9.454	9.454	0.4727	1.47	0.134
Pure Error	51	16.396	16.396	0.3215		
Total	91	431.431				

2. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับปรุงการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

Response Surface Regression: Tensile versus A, C, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Tensile

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19.1064	0.1097	174.105	0.000
A	0.7791	0.1027	7.589	0.000
C	1.4791	0.1027	14.408	0.000
D	0.5909	0.1027	5.757	0.000
A*A	-3.8978	0.1306	-29.842	0.000
C*C	-0.8920	0.1306	-6.829	0.000
D*D	-0.4962	0.1306	-3.799	0.000

S = 0.580693 PRESS = 35.7354
 R-Sq = 93.36% R-Sq(pred) = 91.72% R-Sq(adj) = 92.89%

Analysis of Variance for Tensile

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	402.769	402.769	67.128	199.07	0.000
Linear	3	100.601	100.601	33.534	99.45	0.000
Square	3	302.168	302.168	100.723	298.70	0.000
Residual Error	85	28.662	28.662	0.337		
Lack-of-Fit	12	9.332	9.332	0.778	2.94	0.002
Pure Error	73	19.330	19.330	0.265		
Total	91	431.431				

Unusual Observations for Tensile

Obs	StdOrder	Tensile	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	52	15.780	18.606	0.203	-2.826	-5.19 R
11	59	13.220	12.058	0.203	1.162	2.13 R
29	60	14.880	13.617	0.203	1.263	2.32 R
50	64	17.340	19.201	0.154	-1.861	-3.32 R
66	8	17.890	19.788	0.203	-1.898	-3.49 R
80	54	21.110	19.788	0.203	1.322	2.43 R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R denotes an observation with a large standardized residual.
 Estimated Regression Coefficients for Tensile using data in
 uncoded units

Term	Coef
Constant	-585.952
A	639.234
C	0.0850216
D	2.73291
A*A	-1559.13
C*C	-3.56798E-06
D*D	-0.0551290



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer

เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรต SGCD1 ซึ่งในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB Release 15 เป็นเครื่องมือช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer
2. เลือกตัวแปรผลตอบ (Response) ซึ่งเป็นตัวแปรผลตอบ คือค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน (Response Tensile)
3. ทำการเลือกค่าของ Goal โดยกำหนดให้ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือน (Response of Tensile) เป็น Maximum จากนั้นกำหนดค่า Lower, Target, Weight และ Importance ของผลตอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนสูงสุด โดยพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความหมายดังนี้

Lower คือ ค่าต่ำสุดของผลตอบ

Target คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ

Upper คือ ค่าสูงสุดของผลตอบ

Weight คือ ค่าที่กำหนดน้ำหนักของเป้าหมาย โดยการกำหนดน้ำหนักสามารถกำหนดเป็นตัวเลขต่าง ๆ ที่มีความหมายดังนี้

ก) ตัวเลขน้อยกว่า 1 แต่ไม่ต่ำกว่า 0.1 หมายถึง เน้นเป้าหมายน้อย

ข) ตัวเลขเท่ากับ 1 หมายถึง เน้นเป้าหมายและขอบเขตเท่ากัน

ค) ตัวเลขมากกว่า 1 แต่ไม่เกิน 10 หมายถึง เน้นเป้าหมายมาก

ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ Weight = 1 เพราะต้องการให้ผลตอบเข้าใกล้เป้าหมายมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดด้วย

Importance คือ ค่าที่กำหนดความสำคัญระหว่างผลตอบ กล่าวคือกำหนดว่าผลตอบใดมีความสำคัญมากกว่ากัน โดยการกำหนดความสำคัญสามารถกำหนดเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0.1 – 10 ซึ่งผลตอบใดที่มีความสำคัญมากให้กำหนดตัวเลขที่มีค่ามาก และผลตอบที่สำคัญรองลงมากำหนดตัวเลขให้มีความสำคัญตามอัตราส่วนความสำคัญ แต่ถ้าผลตอบที่นำมาวิเคราะห์มีเพียงผลตอบเดียว หรือมีหลายผลตอบแต่ผลตอบทั้งหมดมีความสำคัญเท่ากัน จะกำหนดค่าความสำคัญเป็นตัวเลขเท่าใด ก็ได้ที่มีค่าเท่ากัน ดังนั้นการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงกำหนดค่า Importance = 1 เพราะต้องการให้ผลตอบทั้งคู่มีความสำคัญเท่ากัน

4. คลิก OK

5. โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยให้โดยอัตโนมัติ

6. ตรวจสอบผลการคำนวณ Response Optimization ที่ได้ ว่าค่าของแต่ละปัจจัยเป็น Global Solution หรือไม่ ถ้าใช่แสดงว่าผลการวิเคราะห์นี้เป็นค่าเป้าหมายของผลตอบจริง และสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปได้

ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเค้นสูงสุด โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) สำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบ โลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Response Optimizer จะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเค้นสูงสุดของ จุดเชื่อม สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ตามตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเค้นของ จุดเชื่อมที่กำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุด

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Tensile	Maximum	10.1	19	19	1	1

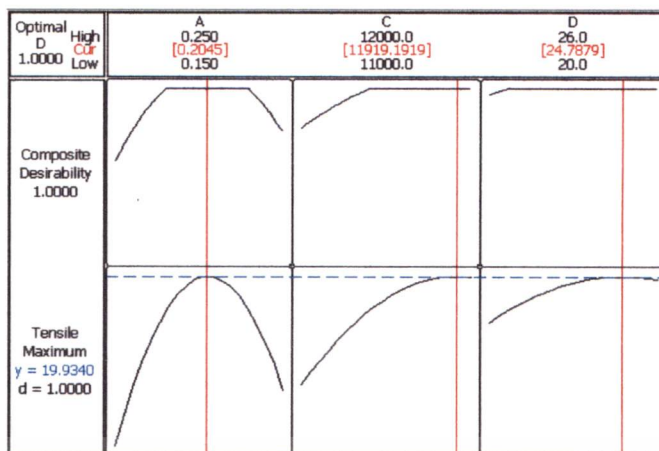
Global Solution

A	=	-0.204545
C	=	11919.2
D	=	24.7879

Predicted Responses

Tensile = 19.9340 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

จากตารางที่ ข.1 ผู้วิจัยได้เลือกค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบ (Maximum) เนื่องจากต้องการให้ได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมสูงสุด โดยการเชื่อมความต้านทานแบบจุด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ในการกำหนดค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) ได้กำหนดให้เท่ากับ 10.1 kN. อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3140 ต้องได้ค่ามากกว่า 10.1 kN. และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบเท่ากับ 1.000000 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือนสูงสุด โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1 ได้แก่

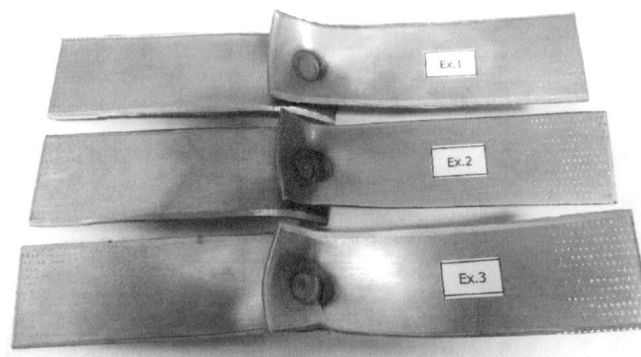
1. แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 0.20 MPa.
2. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 11900 Amperes.
3. เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 25 Cycles.

ผลจากการทดสอบแรงดึงเฉือนแสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 ชิ้นงานหลังการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองสำหรับเหล็กกล้าชุบเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบเกรด SGCD1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 ชิ้นงานหลังการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองสำหรับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409

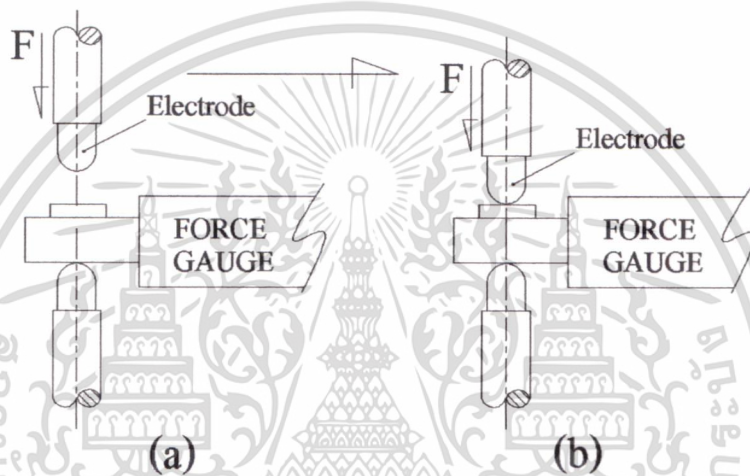
เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการทดลองได้ทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับ ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมเกรด SUS 409 ที่ความหนา 1.8 มิลลิเมตร จำนวน 3 หน่วยการทดลอง ผลจากการทดสอบแรงดึงเดือนแสดงดังรูปที่ ข.3 และได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20.15 kN. เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4.4 ค่าทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมได้เท่ากับ 19.934 kN. ผลการทดลองได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเดือนของจุดเชื่อมมากกว่าค่าทำนายโดยสมการประมาณ 1.08 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกับค่าที่ทำนายได้ถึงแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นผลการทดลองสามารถยอมรับได้และสามารถนำไปใช้กับเหล็กกล้าผสมเกรด SUS409 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การตรวจสอบแรงดันลมของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงาน ขณะทำการเชื่อม

เป็นการตรวจสอบค่าแรงดันลมของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมเพื่อต้องการหาค่าแรงกดที่หัวอิเล็กทรอนิกส์บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างหัวอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน แสดงตามรูปที่ ค.1 สำหรับการปรับค่าแรงดันลมในแต่ละระดับของปัจจัยและทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละระดับของค่าปัจจัยโดยใช้เครื่องมือตรวจสอบแรงกด (Force Gauge) แสดงตามรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.1 การหาค่าแรงกดที่หัวอิเล็กทรอนิกส์บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างหัวอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน



รูปที่ ค.2 เครื่องตรวจสอบแรงกด (Force Gauge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตรวจสอบตรวจสอบค่าแรงดันลมของข้อวีเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมและค่าแรงกดที่หัววีเล็กโทรดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างข้อวีเล็กโทรดกับชิ้นงาน แสดงตามตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ค่าแรงกดที่หัววีเล็กโทรดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างข้อวีเล็กโทรดกับชิ้นงาน

ระดับแรงดันลม (MPa)	ค่าแรงกดที่อ่านได้จากเครื่องตรวจสอบแรงกด (หน่วย kN.)			ค่าเฉลี่ย (หน่วย kN.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0.10	2.08	2.04	2.08	2.06
0.15	3.36	3.33	3.35	3.34
0.20	4.56	4.52	4.52	4.53

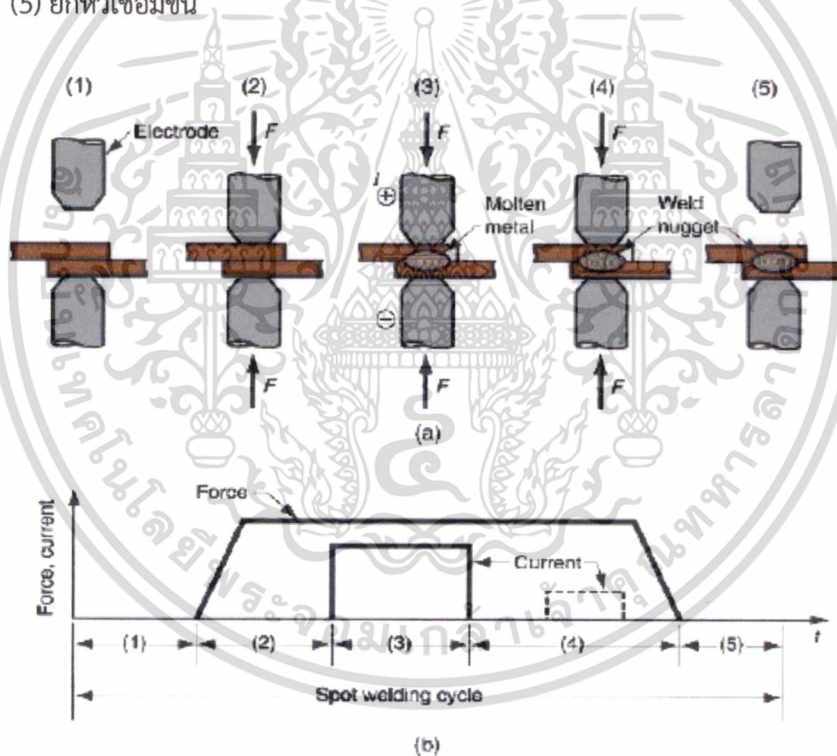
ผลการตรวจสอบค่าแรงดันลมของข้อวีเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมให้ค่าแรงกดที่หัววีเล็กโทรดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างข้อวีเล็กโทรดกับชิ้นงานที่ระดับแรงดันลม 0.15 MPa. ได้ค่าแรงกดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.06 kN. ระดับแรงดันลม 0.15 MPa. ได้ค่าแรงกดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.34 kN. และระดับแรงดันลม 0.20 MPa. ได้ค่าแรงกดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.53 kN.

ภาคผนวก ง

วงจรการเชื่อมความต้านทานแบบจุดและการหาค่าเวลาของ ปัจจัยในการเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถแบ่งวงจรการเชื่อมได้เป็น 5 ขั้นตอนดังแสดงตามรูปที่ ง.1 ในวงจรการเชื่อมแบบจุดมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ โดยเริ่มจาก

- (1) นำชิ้นงานสองชิ้นในลักษณะแบบต่อเกยสอดเข้าไปในระหว่างหัวเชื่อมอิเล็กโทรด
- (2) กดหัวเชื่อมลงมาสัมผัสชิ้นงานตามเวลาที่กำหนดคือ เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน
- (3) เมื่อครบวงจรแล้วปล่อยกระแสไฟไหลผ่านตามเวลาที่ตั้งไว้คือ เวลาปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม จนทำให้ชิ้นงานสองชิ้นหลอมละลายติดกันจนเกิดเป็นจุดเชื่อม
- (4) ครบกำหนดเวลาเชื่อมแล้วหยุดปล่อยกระแสไฟแต่หัวอิเล็กโทรดยังกดชิ้นงานไว้ตามเวลาที่ตั้งไว้หรือเรียกว่า เวลากดแช่หลังจากการเชื่อม
- (5) ยกหัวเชื่อมขึ้น



รูปที่ ง.1 ลักษณะวงจรการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
ที่มา: ประสิทธิ์ และ ฉัตรชัย (2554)

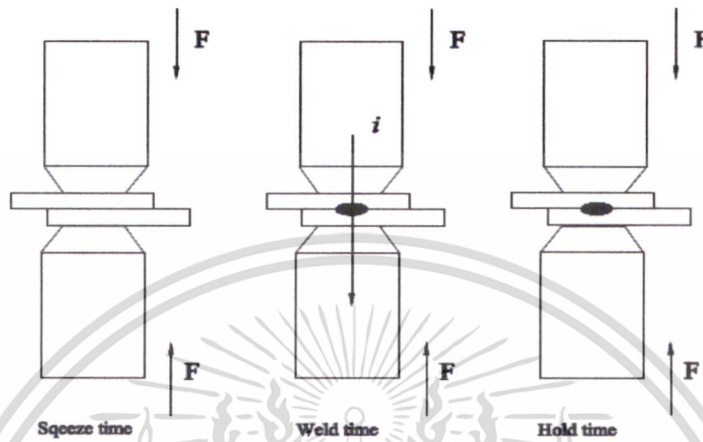
ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดทั้ง 5 ขั้นตอนและมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ

1. แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม
2. เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม
4. เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าขณะเชื่อม
5. เวลาหดแซ่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

ซึ่งทั้ง 5 ปัจจัยนี้มีอยู่ 3 ปัจจัยที่มีหน่วยการวัดเป็น Cycles ดังแสดงตามรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 ลักษณะปัจจัยที่มีหน่วยการวัดเป็น Cycles

หน่วยที่ใช้ในแต่ละปัจจัยได้มาจากระบบคลื่นความถี่ทางไฟฟ้าโดยที่ความถี่ 1 Hz (เฮิร์ตซ์ Hertz ย่อเป็น Hz) คือความถี่เท่ากับ 1 ครั้งต่อวินาที (1/s) หรือ $1\text{Hz} = 1/\text{s}$ แสดงดังรูปที่ ง.3 ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz หมายถึงมีคลื่นความถี่เท่ากับ 50 ครั้งต่อ 1 วินาที และใน 1 Cycle = $1/50\text{Hz}$ เท่ากับ 0.02 วินาที



รูปที่ ง.3 คลื่นความถี่ทางไฟฟ้า

ที่มา: <http://www.youtube.com/watch?v=AwL1CAg43PU>

ดังนั้นเวลาในการเชื่อมของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดค่าในการเชื่อมเพื่อยืนยันผลการทดลองหาได้คือ

1. เวลาหดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกันใช้สัญลักษณ์ (B) กำหนดค่าไว้ที่ 25 Cycles มีค่าเท่ากับ $25/50\text{Hz} = 0.5$ วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมใช้สัญลักษณ์ (D) กำหนดค่าไว้ที่ 25 Cycles มีค่าเท่ากับ $25/50\text{Hz} = 0.5$ วินาที

3.เวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมใช้สัญลักษณ์ (E) กำหนดค่าไว้ที่ 20 Cycles มีค่าเท่ากับ $20/50\text{Hz} = 0.4$ วินาที

ดังนั้นเวลารวมในการเชื่อมความตานทานแบบจุดสำหรับ 1 จุดเชื่อมใช้เวลาทั้งหมดเท่ากับ 1.4 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สำเนาอนุมัติบัตรและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเดือนสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ

SGCD1

โดย

โยธิน จันทร์ทอง วรรณชัย กัลยาศิริ
และสกันธ์ คล่องบุญจิต

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50

ระหว่างวันที่ 31 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์ 2555

(รองศาสตราจารย์ ดร.พนิท เข็มทอง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือน
สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1

A Study on influence of welding parameters of resistance spot welding on tensile shear load for
hot-dipped zinc-coated steel sheets SGCD1

โยธิน จันทร์ทอง¹ กรรณชัย กัลยาศิริ¹ และ สกนธ์ คล่องบุญจิต¹

Yotin Janthong¹ Kannachai Kanlayasiri¹ and Sakon Klongboonjit¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional Factorial Design ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 5 ปัจจัย คือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม (Air Pressure) เวลากดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze Time) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (Weld Current) เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม (Weld Time) และเวลาพักชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Hold Time) โดยมีผลตอบเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของชิ้นงาน จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ทราบว่าปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยและอันตรกิริยามีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ Alpha (α) = 0.05

ABSTRACT

The objective of this research was to study and analyze resistance spot welding parameter affecting tensile shear load of the hot-dipped zinc-coated steel sheet SGCD1. The experimental design of 2^{5-1} fractional factorial design was used in this study. The resistance spot welding parameters analyzed in this research included air pressure, squeeze time, weld current, weld time, and hold time. Results showed that all welding parameters and their interactions significantly affect to the tensile shear load at the significance level of 0.05.

Keywords : Resistance spot welding, Experimental design, Tensile shear load, Automotive part

e-mail address : yotin_je@hotmail.com

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

คำนำ

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ต้องมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไปที่เหนือกว่าเหล็กกล้าชนิดแผ่นธรรมดา มีความจำเป็นต้องใช้เหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 (JIS G 3302:1998) ซึ่งในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) สำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 จะต้องมี การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมหลายค่า ผู้ปฏิบัติงานจะต้องปรับตั้งค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยประสบการณ์ การลองผิดลองถูก หรือตามข้อกำหนดที่ได้ระบุมาจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม ซึ่งค่าที่ระบุมานั้นเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นคุณภาพของรอยเชื่อมที่ออกมาจึงไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และทดลองทำซ้ำอีกหลายครั้งเพื่อให้ได้คุณภาพของรอยเชื่อมตรงตามมาตรฐาน ในการทดลองในแต่ละครั้งต้องมีค่าใช้จ่าย เช่น วัสดุ พลังงาน และ เวลาในการทดลอง ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นต้นทุนในการผลิต

มีงานวิจัยหลายชิ้นได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เช่น งานวิจัยของ นราธิป แสงซ้าย (2550) ได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนเหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCD ที่ความหนา 2 mm. โดยใช้ปัจจัยในการศึกษาคือ แรงกดระหว่างชิ้นงาน กระแสไฟฟ้า เวลาในการกดระหว่างชิ้นงาน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเชื่อม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design 2^k ได้พบว่าปัจจัยทั้งหมดมีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ และได้ค่าแรงดึงเฉือนจากการเชื่อมอยู่ในระดับ 5.166 ถึง 5.429 kN ปรัชญา เพ็ญสุระ (2550) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดโดยทำการทดลองกับเหล็กเหนียวที่ความหนา 1 mm. ผลการทดลองสรุปได้ว่าเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 8 ถึง 10 Cycles ณรัณ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาก่อสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อการพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุด โดยใช้ Factorial Design 2^k ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สนใจคือ ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยพบว่าปัจจัยทั้งหมดมีอิทธิพลต่อการรับแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ Kim และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในโลหะผสมเกรด TRIP ซึ่งปัจจัยในการศึกษาประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเชื่อม และแรงกดระหว่างชิ้นงาน โดยพบว่าปัจจัยทั้งหมดมีอิทธิพลต่อการรับแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Design เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบต่อเกลียวและทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงด้วย การทดสอบแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3140 (1998) และใช้เป็นแนวทางในการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดให้ได้คุณภาพและจุดเชื่อมมีความแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งาน

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional Factorial Design โดยใช้ปัจจัยในการศึกษา 5 ปัจจัย คือ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม (Air

Pressure) เวลาหดขึ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน (Squeeze Time) กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม (Weld Current) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าขณะเชื่อม (Weld Time) และเวลาหดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (Hold Time) โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับซึ่งได้ข้อมูลมาจากกระบวนการผลิตจริงในปัจจุบันของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงใน Table 1

Table 1 Factors and levels of factors used in the study.

Factor (Unit)	Level		Symbol
	Low (-1)	High (+1)	
Air Pressure (Unit: MPa)	0.15	0.25	A
Squeeze time) (Unit: Cycle)	20	30	B
Weld Current (Unit: Ampere)	11000	12000	C
Weld Time (Unit: Cycle)	20	26	D
Hold Time (Unit: Cycle)	15	25	E

จากปัจจัยที่มีอยู่ 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ดังนั้นมีหน่วยการทดลองทั้งหมด 32 หน่วยการทดลองมี Design Generators $E = ABCD$ และ Alias Structure คือ $I = ABCDE, A = BCDE, B = ACDE, C = ABDE, D = ABCE, E = ABCD, AB = CDE, AC = BDE, AD = BCE, AE = BCD, BC = ADE, BD = ACE, BE = ACD, CD = ABE, CE = ABD, DE = ABC$ โดยการทดลองมีการจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยที่ไม่ได้ทำการควบคุม

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 (JIS G 3302:1998) มีความหนา 1.8 mm. และมีส่วนผสมทางเคมีแสดงใน Table 2

Table 2 Chemical compounds for hot-dipped zinc-coated steel sheet SGCD1

C	0.040 % Max
Mn	0.180 % Max
P	0.014 % Max
S	0.011 % Max
Fe	Remains

ขนาดของชิ้นงานทดสอบมีความกว้าง 40 ยาว 125 mm. นำมาต่อเกลียวในระยะ 40 mm. อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3136 (1978) แสดงดัง Figure 1

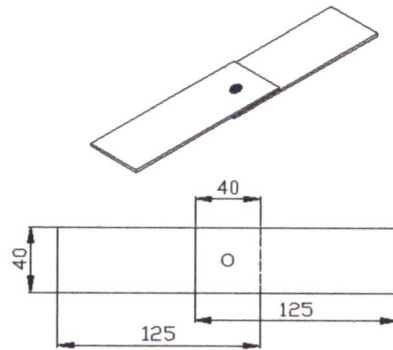


Figure 1 Size of specimen.

เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องเชื่อม PANASONIC รุ่น YR-500S มีพิกัดกำลังอยู่ที่ 50 kVA โดยใช้ขั้วเล็กโทรดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm. ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Resistance welding machine is used in experiment.

เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

เครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง คือ SHIMADZU รุ่น AG-13zSFL-50 KN รับแรงดึงสูงสุดได้ 50 kN และสามารถปรับและควบคุมความเร็วได้ โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 10 mm/s.

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเชื่อมชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 32 การทดลองและทำการทดสอบความแข็งแรงของจุดเชื่อมโดยการทดสอบแรงดึงเฉือนและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเฉือนมาทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MINITAB Release 15 โดยแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) แสดงดัง Figure 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

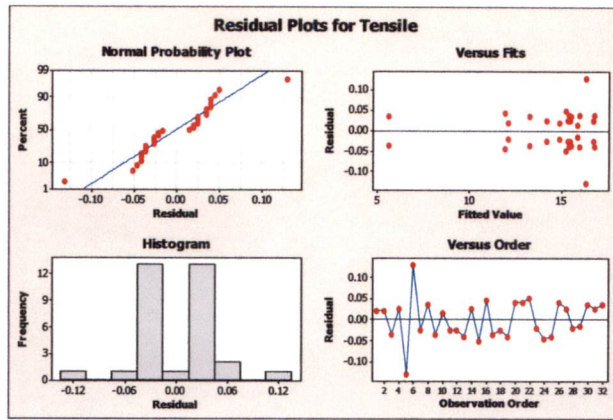


Figure 3 Model adequacy checking

จาก Figure 3 พบว่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากรูปแบบการกระจายตัวของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณากราประหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่แตกต่างกับส่วนตกค้างที่มีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นกับค่าที่ถูกทำนาย และเมื่อพิจารณากราประหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองพบว่าการกระจายตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้

จาก Table 3 ทำการเปรียบเทียบค่า p - value กับค่าของระดับนัยสำคัญ (α) โดยค่า p - value ของปัจจัยนั้นๆ จะต้องมิต่ำน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน คือ ทุกปัจจัยและอันตรกิริยารวมดังแสดงใน Table 3

Table 3 the p values are used to select the significant factors that influence the shear load.

Estimated Effects and Coefficients for Tensile (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		14.455	0.01143	1265.01	0.000
Air Pressure(A)	-2.176	-1.088	0.01143	-95.20	0.000
Squeeze Time(B)	-1.614	-0.807	0.01143	-70.64	0.000
Weld Current(C)	2.204	1.102	0.01143	96.46	0.000
Weld Time(D)	0.542	0.271	0.01143	23.71	0.000
Hold Time(E)	1.506	0.753	0.01143	65.88	0.000
Air Pressure(A)*Squeeze Time(B)	-1.497	-0.748	0.01143	-65.50	0.000
Air Pressure(A)*Weld Current(C)	2.049	1.025	0.01143	89.68	0.000
Air Pressure(A)*Weld Time(D)	-0.208	-0.104	0.01143	-9.11	0.000
Air Pressure(A)*Hold Time(E)	1.268	0.634	0.01143	55.49	0.000
Squeeze Time(B)*Weld Current(C)	1.078	0.539	0.01143	47.18	0.000
Squeeze Time(B)*Weld Time(D)	-1.402	-0.701	0.01143	-61.34	0.000
Squeeze Time(B)*Hold Time(E)	0.609	0.305	0.01143	26.66	0.000
Weld Current(C)*Weld Time(D)	1.309	0.655	0.01143	57.30	0.000
Weld Current(C)*Hold Time(E)	-0.549	-0.275	0.01143	-24.04	0.000
Weld Time(D)*Hold Time(E)	0.711	0.355	0.01143	31.10	0.000
S = 0.0646384 PRESS = 0.2674					
R-Sq = 99.97% R-Sq(pred) = 99.88% R-Sq(adj) = 99.94%					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 the p values are used to select the significant factors that influence the shear load.(next)

Analysis of Variance for Tensile (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	118.075	118.075	23.6150	5652.05	0.000
2-Way Interactions	10	112.898	112.898	11.2898	2702.12	0.000
Residual Error	16	0.067	0.067	0.0042		
Pure Error	16	0.067	0.067	0.0042		
Total	31	231.040				

ในการพิจารณารูปแบบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเฉือน จาก Figure 4 กราฟรูปแบบของปัจจัยหลักเมื่อพิจารณาเพียงผลกระทบบหลักพบว่าเมื่อแรงดันลมหรือเวลาดัดชิ้นงานอยู่ในระดับสูง มีผลให้แรงดึงเฉือนลดลง ดังนั้นควรตั้งเงื่อนไขทั้งสองปัจจัยให้อยู่ในระดับต่ำเพื่อให้ได้ค่าแรงดึงเฉือนที่สูงและใน ส่วนของกระแสไฟเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม เวลาดัดชิ้นงานหลังจากการเชื่อม ควรตั้งให้อยู่ใน ระดับสูงเพื่อให้ได้แรงดึงเฉือนที่สูง

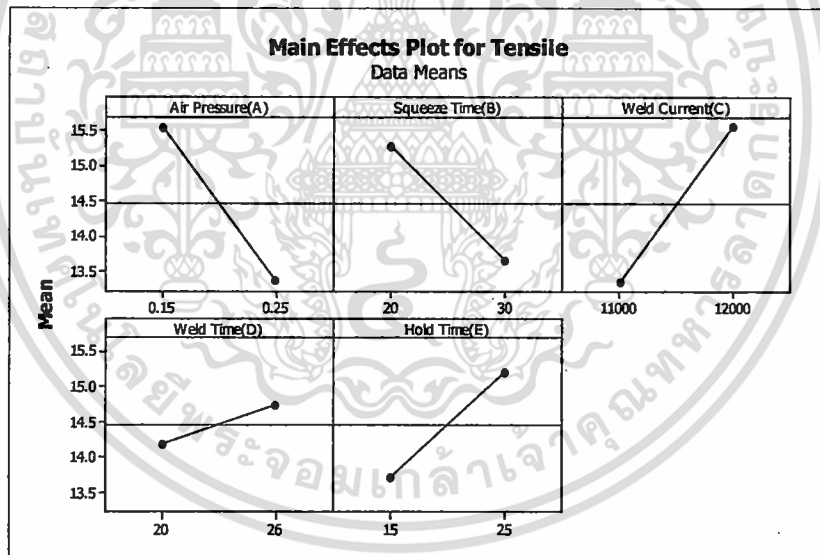


Figure 4 Main effects significantly influence to the tensile shear load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

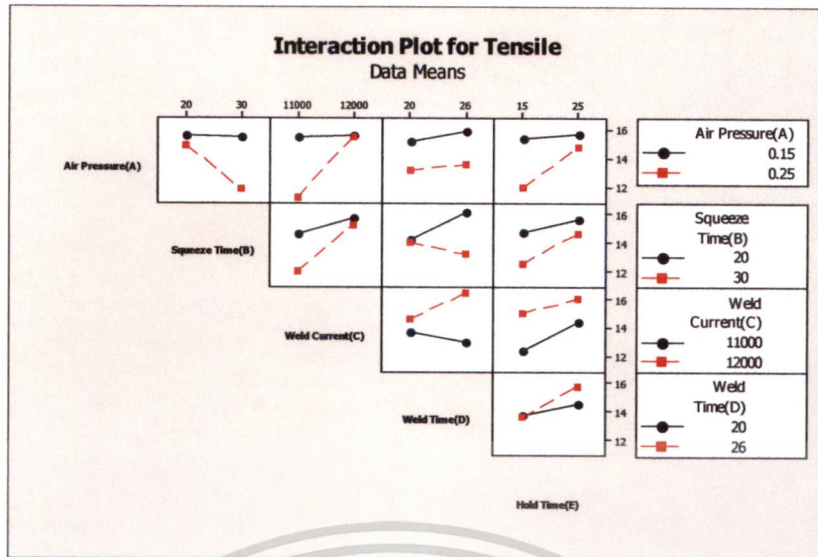


Figure 5 Interactions significantly influence to the tensile shear load

ในการพิจารณารูปแบบของอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลอย่างมีระดับนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน จาก Figure 5 พบว่าอันตรกิริยาร่วมทุกปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงเฉือน และเมื่อพิจารณาอันตรกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นสามารถตั้งเงื่อนไขของปัจจัยการเชื่อมเพื่อให้ได้แรงดึงเฉือนของชิ้นงานที่มีค่าสูงดังนี้ ตั้งแรงดันลมและเวลากดชิ้นงานสองชั้นให้ติดกันอยู่ในระดับต่ำ และตั้งกระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมให้อยู่ในระดับสูง

สรุปผลการทดลอง

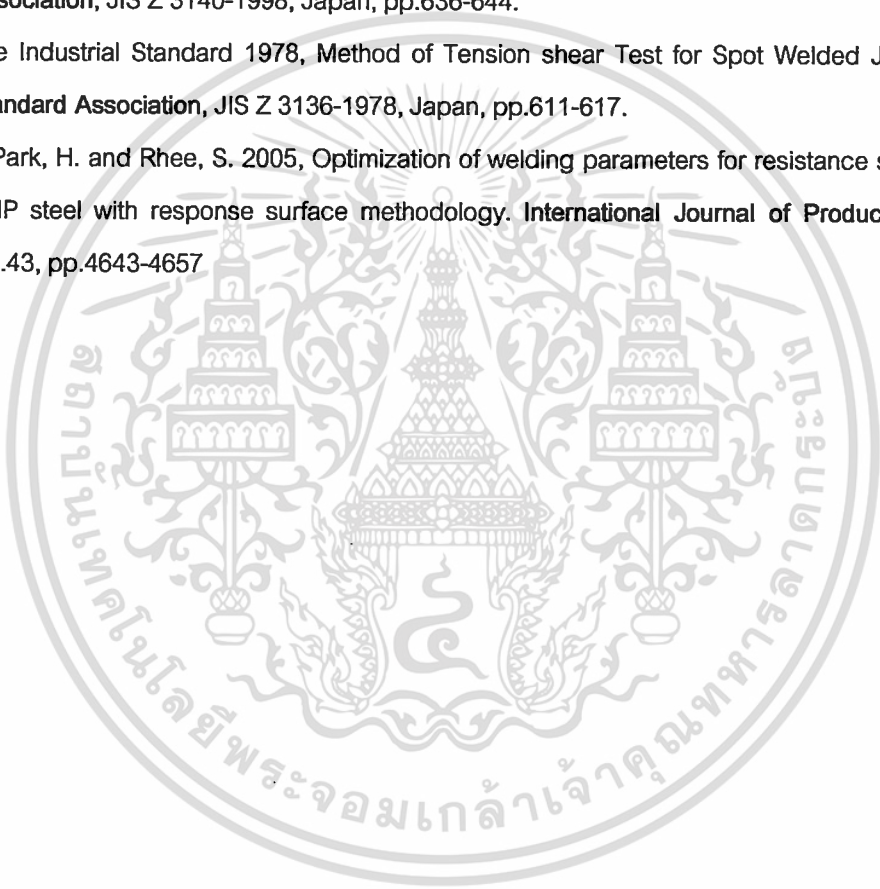
จากการศึกษาปัจจัยของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1 ได้แก่ แรงดันลมของหัวอิเล็กโทรดที่ใช้กดลงบนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม เวลากดชิ้นงานสองชั้นให้ติดกัน กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม และเวลากดแช่ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม โดยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ Alpha (α) = 0.05 งานวิจัยนี้สามารถนำค่าระดับของปัจจัยและผลการทดลอง ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดและใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจในการเลือกค่าของปัจจัยในการเชื่อมได้

เอกสารอ้างอิง

ณรัตน์ ศิริสันติสัมฤทธิ์, ศุภอักษร วัฒนศิริพัฒน์ และ ชูศักดิ์ พรสิงห์ 2550. การสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อการพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุด, น. 625-632, ใน การประชุมวิชาการชายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่16. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ภูเก็ต.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นราธิป แสงซ้าย. 2550. การศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กกล้ารีดเย็น SPCD (JIS G3141) โดยหลักการออกแบบการทดลอง, น. 856-860, ใน **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 16**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ภูเก็ต.
- ปรัชญา เพ็ญสุระ 2550. การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดโดยการทดสอบสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา. ใน **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นิวเคลียร์ ครั้งที่ 10** สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ.
- Japanese Industrial Standard 1998, Hot-dip zinc-coated steel sheets and coils. **Japanese Standard Association**, JIS G 3302-1998, Japan, pp.336-355.
- Japanese Industrial Standard 1998, Method of Inspection for Spot Weld. **Japanese Standard Association**, JIS Z 3140-1998, Japan, pp.636-644.
- Japanese Industrial Standard 1978, Method of Tension shear Test for Spot Welded Joint. **Japanese Standard Association**, JIS Z 3136-1978, Japan, pp.611-617.
- Kim, T. Park, H. and Rhee, S. 2005, Optimization of welding parameters for resistance spot welding of TRIP steel with response surface methodology. **International Journal of Production Research**, Vol.43, pp.4643-4657



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายโยธิน จันทร์ทอง
วัน เดือน ปีเกิด	26 กันยายน 2520 ที่จังหวัดอุตรดิตถ์
ที่อยู่	5/1 หมู่ที่ 3 บ้านผาเต่าพัฒนา ตำบลผาเลือด อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ 53190 โทร.+66 (0) 81 544 9719
ประวัติการศึกษา	2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2554 รัฐศาสตรบัณฑิต สาขาวิชารัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	ออกแบบอุปกรณ์ตรวจสอบและทดสอบชิ้นส่วนยานยนต์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2545-2550	บริษัทยานยนต์จำกัด มหาชน ตำแหน่งวิศวกร วิศวกรรมคุณภาพ
พ.ศ.2550-ปัจจุบัน	บริษัทยานยนต์จำกัด มหาชน ตำแหน่งผู้จัดการส่วนงานทดสอบและสอบเทียบฝ่ายประกันคุณภาพ
พ.ศ. 2555	โยธิน จันทร์ทอง, กรรณชัย กัลยาศิริ และสภณธ์ คล่องบุญจิต. 2555. “การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อการรับแรงดึงเฉือนสำหรับเหล็กกล้าชนิดแผ่นเคลือบโลหะผสมสังกะสีแบบจุ่มร้อนและอบ SGCD1”. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้