การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง

โดย
นางสาวจิดาภา เบ้าบัวเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง

โดย
นางสาวจิดาภา เบ้าบัวเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PRODUCTIVITY IMPROVEMENT IN PROJECTION WELDING PROCESS BY DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENT A CASE OF AN AUTOMOBILE PARTS MANUFACTURER

By

MISS Jidapa BAOBUANGOEN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Engineering (ENGINEERING MANAGEMENT)

Department of INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง
โดย	จิดาภา เบ้าบัวเงิน
สาขาวิชา	การจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ พรสิงห์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองแท่ง ทองลิ่ม)

620920038 : การจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง, การควบคุมคุณภาพ, การลดปริมาณของเสีย, กระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม

นางสาว จิดาภา เบ้าบัวเงิน: การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ พรสิงห์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม (Resistance Projection Welding) โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน และระดับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องจักร ด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Design of Experiment: DOE) กับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานต์ยนต์กรณีศึกษาแห่งหนึ่ง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์บกพร่องของงานเชื่อมนัทขนาด M4x ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณของเสียมากที่สุด คิดเป็น 9.52 % โดยใช้แผนภูมิสาเหตุและผลเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุพบว่าเกิดจากการตั้งค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในเครื่องจักรไม่เหมาะสม ซึ่งมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ เวลาในกระบวนการเชื่อม กระแสไฟในการเชื่อม และแรงดันหัวทิปของเครื่องจักร ผู้วิจัยจึงใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ 2 ระดับ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต และใช้การออกแบบการทดลอง 3 ระดับเพื่อวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการ Response Optimization ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต คือ เวลาในกระบวนการเชื่อม และกระแสไฟในการเชื่อม โดยมีระดับปัจจัยเท่ากับ 8 Cycle หรือ 1.76 วินาที และ 10,500 mA ตามลำดับ เมื่อนำระดับปัจจัยมาปรับตั้งในกระบวนการผลิตทำให้สามารถลดปริมาณผลิตภัณฑ์ภัณฑ์บกพร่องของปัญหานี้ได้ถึง 59.14% จากที่ตั้งเป้าหมายไว้ 20%

620920038 : Major (ENGINEERING MANAGEMENT)
Keyword : Design of Experiment, Quality Control, Waste Reduction, Resistance Projection Welding

MISS JIDAPA BAOBUANGOEN : PRODUCTIVITY IMPROVEMENT IN PROJECTION WELDING PROCESS BY DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENT A CASE OF AN AUTOMOBILE PARTS MANUFACTURER THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHOOSAK PORNSING, Ph.D.

The purpose of this research is to decrease the defective parts from the manufacturing process using resistance projection welding. The research studied on the important factor that impact to the quality of parts and the suitable parameter for the machine by applying the design of experiment from the study of the Automotive parts manufacturing.

The researcher begins study and collecting some examples of defecting parts M4x which is the most of defect with 9.52% using Cause and Effect Chart to help analyze the problem. The researcher found that the parameter of the machine was off and not suitable. There are three factors timing of the welding, welding current, and machine head pressure. The researcher designs two levels of experiment which are factor that not affect to the process, and using three levels of analyze most suitable factor with response optimization. The result of the research shown that the factor that impact the manufacturing process were timing and current for welding. Which are 1.76 seconds with 10,500 mAh. After changing to these factors in the process, the defective parts was decreased by 59.14% form the targeted just 20%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำ ให้โอกาสที่ดี และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอตลอดมา รวมทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองแท่ง ทองลิ่มที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ และชี้แนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ทั้งนี้ขอขอบพระคุณโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์กรณีศึกษา และวิศวกรทุกท่าน ที่ได้อนุเคราะห์ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยทางด้านข้อมูลและส่วนงานต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา ครอบครัว พี่สาว และมิตรสหายผู้ร่วมทาง ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือให้กำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

จิดาภา เบ้าบัวเงิน

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 5

2.1 ความรู้ทั่วไปในกระบวนการเชื่อมโลหะ 5

2.1.1 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าความต้านทานแบบปุ่ม (Resistance Projection Welding).. 7

2.1.2 วัฏจักรกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม 9

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเชื่อมต้านทานไฟฟ้าแบบปุ่ม 12

2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม 12

2.2 เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools) 13

2.2.1 ใบตรวจสอบ (Check Sheet) 13

2.2.2 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) 14

2.2.3 แผนภูมิกราฟ (Graph) 14
2.2.4 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) 15
2.2.5 แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) 16
2.2.6 แผนภาพฮิสโตรแกรม (Histogram) 17
2.2.7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) 17
2.3 หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) 19
2.3.1 ความหมายของหลักการออกแบบการทดลอง 20
2.3.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง 22
2.3.3 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง 23
2.3.4 องค์ประกอบในการศึกษาหัวข้อ 24
2.3.5 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง 25
2.3.6 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง 26
2.4 หลักการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (2^k Factorial Design) 28
2.4.1 การวิเคราะห์หลักการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^k 29
2.5 หลักการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design) 30
2.5.1. ความหมายของการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design) 30
2.6 ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) 32
2.6.1 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน 32
2.6.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน 33
2.7 แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Attribute Control Charts) 33
2.8 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อม 34
2.8.1 การตรวจสอบแบบทำลาย (Destructive testing) 34
2.8.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Examination: NDE) 35
2.8.3 การทดสอบด้วยแรงบิด (Twist Test) 35

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 37
บทที่ 3 40
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 40
3.2 ศึกษาข้อมูลทั่วไป 41
3.2.1 ข้อมูลกระบวนการผลิต 41
3.2.2 ข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำการวิจัย 44
3.2.3 ข้อมูลสภาพการทำงาน 46
3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา 48
3.3.1 การวิเคราะห์ปัญหา 48
3.3.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อกำหนดปัจจัยหลัก (Main Effect) 48
3.4 การกำหนดระดับปัจจัย 54
3.5 การตั้งสมมติฐานการทดลอง 54
3.6 การออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสองระดับ 55
3.7 ขั้นตอนการทำการทดลองการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลเบื้องต้น 57
3.8 การออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสามระดับ 57
บทที่ 4 58
4.1 ผลการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design 58
4.2 ผลการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design 65
4.3 ผลการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Optimization 71
4.4 ผลการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง 72
บทที่ 5 73
5.1 สรุปผลการวิจัย 73
5.1.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด 73
5.1.2 ผลที่ได้หลังการปรับปรุง 74

5.2 ข้อเสนอแนะ 74
ภาคผนวก 75
ภาคผนวก ก 76
รายการอ้างอิง 78

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ความหมายของระดับวัฏจักรในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม 10

ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม 12

ตารางที่ 3 การตีความแผนภูมิควบคุม 19

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 27

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ 28

ตารางที่ 6 ผลรวมข้อมูลในแต่ละวิธีการปฏิบัติ Factor และ Treatment 29

ตารางที่ 7 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A B และ C 31

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 31

ตารางที่ 9 ประเภทของความผิดพลาดจากการทดสอบสมมติฐาน 33

ตารางที่ 10 ข้อบ่งใช้แผนภูมิควบคุมเชิงคุณลักษณะ 34

ตารางที่ 11 สัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ 42

ตารางที่ 12 จำนวนจุดเชื่อมของแต่ละผลิตภัณฑ์ในหน่วย 1 ชิ้น 44

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนตุลาคม พ.ศ. 2562 47

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562 47

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 47

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ 4 M ของปัญหาการเกิดของเสีย และการแก้ไข 50

ตารางที่ 17 ระดับปัจจัยการทดลอง 2 ระดับ 54

ตารางที่ 18 ลำดับการทดลองแบบสุ่ม 2 ระดับ ด้วยโปรแกรม Minitab V.18 56

ตารางที่ 19 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ 2k Full Factorial Design 58

ตารางที่ 20 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัยการทดลองแบบ 2^k Factorial Design 58

ตารางที่ 21 บันทึกผลการทดลองแบบ 2^k Factorial Design 59

ตารางที่ 22 ผลการออกแบบการทดลอง 2 ระดับเพื่อคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพชิ้นงาน. 64
ตารางที่ 23 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design..... 65
ตารางที่ 24 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัยการทดลองแบบ 3^k Factorial Design..... 65
ตารางที่ 25 ผลการทดลองแบบ 3^k Factorial Design..... 65
ตารางที่ 26 ผลการออกแบบการทดลอง 3 ระดับเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการ..... 70
ตารางที่ 27 Output Optimize Point..... 71
ตารางที่ 28 ผลสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม..... 71
ตารางที่ 29 ผลเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้เพื่อเปรียบเทียบ ก่อนและหลัง..... 72
ตารางที่ 30 จำนวนของเสียแต่ละลำดับการทดลอง 2 ระดับ..... 77
ตารางที่ 31 จำนวนของเสียแต่ละลำดับการทดลอง 3 ระดับ..... 78

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ตัวอย่างลักษณะของเสียที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบ 2

ภาพที่ 2 จำนวนของเสียจากการทดสอบคุณภาพชิ้นงาน ระยะเวลา เดือน ต.ค – ธ.ค พ.ศ.2562 3

ภาพที่ 3 กรอบแนวคิดงานวิจัย 4

ภาพที่ 4 องค์ประกอบวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน 6

ภาพที่ 5 รูปแบบการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Welding : RW) 7

ภาพที่ 6 ลักษณะการเชื่อมแบบโปรเจ็คชั่น 8

ภาพที่ 7 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มระหว่างชิ้นงานกับชิ้นงาน (Spot - Part) 8

ภาพที่ 8 วัฏจักรกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม 9

ภาพที่ 9 แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) 13

ภาพที่ 10 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) 14

ภาพที่ 11 แผนภูมิกราฟ (Graph) 15

ภาพที่ 12 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) 16

ภาพที่ 13 แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) 16

ภาพที่ 14 แผนภาพฮิสโตรแกรม (Histogram) 17

ภาพที่ 15 การแจกแจงแบบปกติ 18

ภาพที่ 16 ปัจจัย กระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง 21

ภาพที่ 17 องค์ประกอบในการศึกษา DOE 25

ภาพที่ 18 2^K Factorial Design 29

ภาพที่ 19 แรงบิด 36

ภาพที่ 20 กรรมวิธีการทดสอบด้วยแรงบิด 36

ภาพที่ 21 ขั้นตอนการดำเนินงานนิจัย 40

ภาพที่ 22 ขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา 41
ภาพที่ 23 ความถี่การเกิดของเสียจากกระบวนการเชื่อมแบบปุ่ม 42
ภาพที่ 24 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น A 43
ภาพที่ 25 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น B 43
ภาพที่ 26 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น C 43
ภาพที่ 27 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น D 43
ภาพที่ 28 ประแจวัดแรงบิด 45
ภาพที่ 29 กระบวนการทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ 45
ภาพที่ 30 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนตุลาคม พ.ศ.2562 46
ภาพที่ 31 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562 46
ภาพที่ 32 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนธันวาคม พ.ศ.2562 47
ภาพที่ 33 แผนผังสาเหตุของปัญหา 54
ภาพที่ 34 ค่ากระแสไฟที่ได้จากเครื่องจักร 52
ภาพที่ 35 ตัวอย่างเครื่องวัดค่ากระแสไฟจากเครื่องจักร 52
ภาพที่ 36 ระยะเวลาในการเชื่อมที่ตั้งค่าไว้แสดงบนจอมอนิเตอร์เครื่องจักร 53
ภาพที่ 37 เกจวัดแรงดันที่ติดตั้งบริเวณเครื่องจักร 53
ภาพที่ 38 Normality Test สำหรับค่าสัดส่วนของเสีย 60
ภาพที่ 39 การตรวจสอบความเป็นอิสระของการทดลอง 2 ระดับ 61
ภาพที่ 40 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fits Value 62
ภาพที่ 41 การตรวจสอบการกระจายตัวของคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ 63
ภาพที่ 42 ผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ 63
ภาพที่ 43 อันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ 63
ภาพที่ 44 การตรวจสอบการกระจายตัวของการทดลอง 3 ระดับ 67
ภาพที่ 45 การตรวจสอบความเป็นอิสระของการทดลอง 3 ระดับ 68

ภาพที่ 46 ค่ากระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fits Value 68
ภาพที่ 47 ตัวอย่างชิ้นงานจากการทดลอง 3^k Full Factorial Design 69
ภาพที่ 48 การทดลอง 3^k Full Factorial Design 69
ภาพที่ 49 ผลค่ากราฟตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม 71
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบของเสียก่อน – หลังปรับปรุง 72

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จัดเป็นหนึ่งในห่วงโซ่ของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทยและถูกกำหนดให้เป็นอุตสาหกรรมเดิมที่มีศักยภาพ (First S-curve) (วรรณา ยงพิศาลพบ,2562) เพื่อมุ่งเน้นให้เป็นอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์เป้าหมายของภาคการผลิตและการส่งออกของประเทศ อีกทั้งยังได้รับการพัฒนาขีดความสามารถอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 40 ปี ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นประเทศที่มีศักยภาพเพียงพอต่อการเป็นฐานผลิตและส่งออกยานยนต์ที่สำคัญของโลก

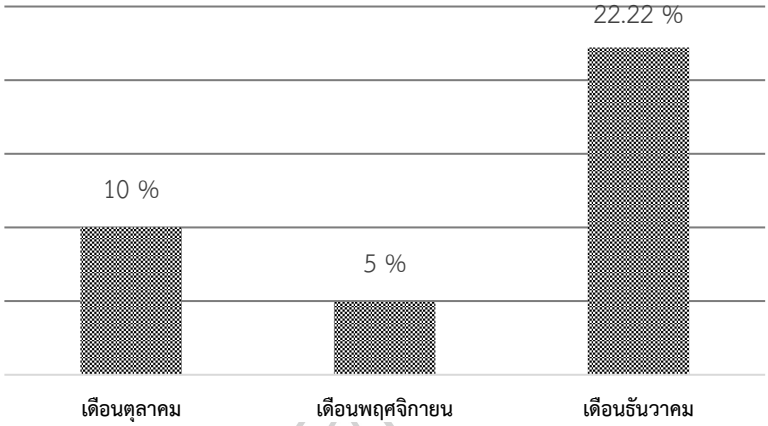
อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไทยเริ่มดำเนินขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2506 และเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยสามารถสร้างรายได้ในการส่งออกให้กับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 มีมูลค่าสูงถึง 19,844.69 ล้านเหรียญสหรัฐฯ เพิ่มขึ้นถึง ร้อยละ 15.50 จากปี พ.ศ. 2559 (สถาบันยานยนต์, 2561) และในปี พ.ศ. 2561 ความสำเร็จครั้งใหญ่เกิดขึ้นอีกครั้งในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศไทย คือ สามารถยกระดับขีดความสามารถในการผลิตจนกลายเป็นผู้ส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ทุกประเภท เป็นอันดับที่ 1 ในเขตภูมิภาคอาเซียน และติดอันดับที่ 14 ของโลก เนื่องมาจากความได้เปรียบทางด้านภูมิศาสตร์และมีความพร้อมในห่วงโซ่การผลิตหลายด้าน เช่น ด้านฝีมือแรงงานทักษะความชำนาญ ความละเอียดรอบคอบ และมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมที่ทันสมัย รวมถึงยังได้รับการยอมรับทางด้านคุณภาพจากผู้ผลิตยานยนต์ทั่วโลกทำให้ประเทศไทยกลายเป็นศูนย์กลางของภูมิภาคอาเซียนในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

จนกระทั่งในระยะเวลา 2 ปี ที่ผ่านมาพบว่าประเทศไทยกำลังเผชิญกับอุปสรรค (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2561) ในการแข่งขันด้านการผลิตที่สูงขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องมาจากผู้ผลิตยานยนต์ต่างชาติที่ตั้งฐานการผลิตในประเทศไทยมีแนวโน้มย้ายฐานการผลิตไปประเทศอื่นในอาเซียน เช่น เวียดนาม เพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยเฉพาะต้นทุนทางด้านค่าจ้างแรงงานที่ถูกกว่าประเทศไทย และค่าวัตถุดิบ ทำให้ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยต้องเกิดการปรับตัวโดยการมุ่งเน้นทางด้านการลดต้นทุนการผลิต และลดปริมาณของเสียเพื่อใช้ทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงรักษาจุดแข็งของอุตสาหกรรมด้วยการให้ความสำคัญด้านการรักษามาตรฐานกระบวนการผลิตที่ดี และคุณภาพของชิ้นงานให้เป็นที่ยอมรับในตลาดโลก

หนึ่งในกระบวนการผลิตที่เป็นหัวใจสำคัญของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ คือ กระบวนการเชื่อมความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance welding) เช่น การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) ที่ใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนตัวถังรถยนต์ รวมถึงการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม (Resistance projection welding) ที่ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมประกอบระหว่างชิ้นส่วน 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน เช่น การเชื่อมน๊อต (Nuts weld) กับชิ้นส่วนแผ่นเหล็กสำหรับประกอบกระจกรถยนต์ ซึ่งในการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มสำหรับการเชื่อมน๊อต (Nuts) แต่ละขนาดกับวัสดุแต่ละชนิดจะต้องมีการปรับตั้งค่าระดับของปัจจัยพารามิเตอร์ในการเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสามารถรับแรงบิดได้สูงเพื่อป้องกันชิ้นงานหลุดระหว่างการประกอบซึ่งจะกลายเป็นของเสียและเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตให้สูงขึ้นตามลำดับ

จากความสำคัญดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง จากการศึกษาและติดตามกระบวนการผลิตพบว่า เกิดของเสียจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม โดยรูปแบบของเสียที่เกิดขึ้นมาจากชิ้นงานเชื่อมระหว่างน๊อตขนาด M4 กับแผ่นชิ้นงานซึ่งมีลักษณะหลุดออกจากกัน ด้วยการทดสอบค่าแรงบิดของชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 1 สาเหตุหนึ่งนำมาสู่การเกิดของเสีย คือ การใช้ค่าระดับปัจจัยพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมตัวต้านทานแบบจุดที่ไม่เหมาะสมทำก่อให้เกิดปริมาณของเสียอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงภาพที่ 2

ภาพที่ 1 ตัวอย่างลักษณะของเสียที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบ



ภาพที่ 2 จำนวนของเสียจากการทดสอบคุณภาพชิ้นงาน ระยะเวลา เดือน ต.ค – ธ.ค พ.ศ.2562

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเครื่องมือคุณภาพ (7 QC Tools) เข้ามาช่วยติดตามกระบวนการผลิตดังกล่าวเพื่อตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสีย และใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม รวมถึงประยุกต์ใช้โปรแกรม MINITAB เพื่อวิเคราะห์ระดับปัจจัยและประมวลผลต่อไป หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วจะนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาค่าระดับปัจจัยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

1.2.1 เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้อย่างน้อย 20 เปอร์เซ็นต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน

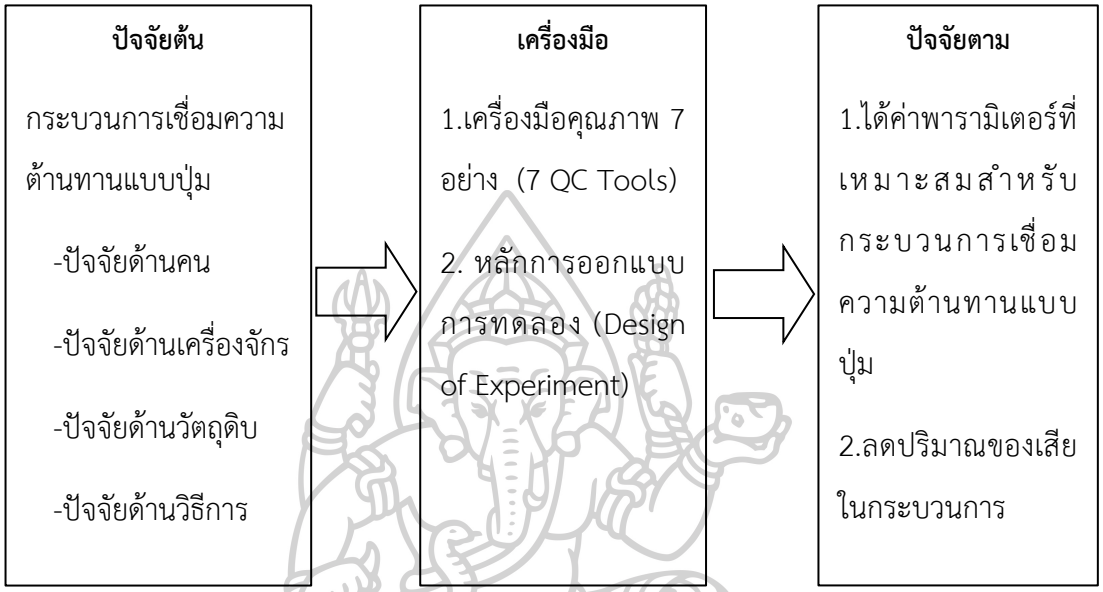
1.3.2 ระยะเวลาในการดำเนินงานตั้งแต่ เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ.2563 – ธันวาคม พ.ศ 2563

1.3.3 วิเคราะห์ปัญหาด้วยเครื่องมือคุณภาพ (7 QC Tools) เพื่อหาสาเหตุหลักของการเกิดของเสีย และหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

1.3.4 ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมชิ้นงาน,แรงกดชิ้นงาน เวลาในการเชื่อมชิ้นงาน

1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการเชื่อมที่ส่งผลให้เกิดของเสีย โดยสามารถอธิบายกรอบแนวคิดเป็นลักษณะของปัจจัยต้น เครื่องมือที่ใช้ และปัจจัยตามได้ดังนี้



ภาพที่ 3 กรอบแนวคิดงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ค่าระดับปัจจัยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

1.5.2 สามารถลดจำนวนของเสียในกระบวนการผลิตและใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทที่ 2
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและแนวคิดที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและนำมาใช้ในการช่วยวิเคราะห์ปัญหา และค้นหาสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดของเสีย โดยผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปในกระบวนการเชื่อมโลหะ

2.2 เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools)

2.3 หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

2.4 หลักการออกการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^K Factorial Design)

2.5 หลักการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design)

2.6 ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

2.7 แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Attribute Control Chart)

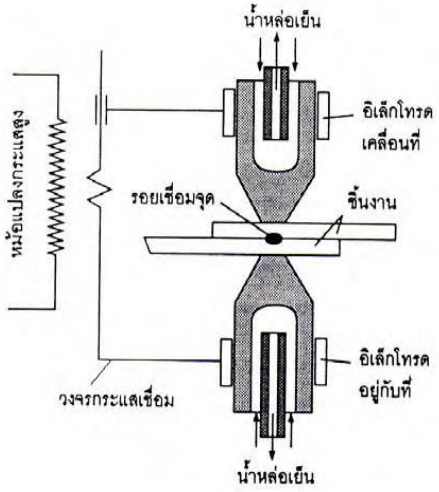
2.8 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบปุ่ม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปในกระบวนการเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะ (สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ, 2532) คือ การนำโลหะตั้งแต่ 2 ชิ้นมาต่อประสานกัน ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน ซึ่งโลหะจะต้องได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมละลาย (Melting Point) โดยทั่วไปแล้วกรรมวิธีการเชื่อมทุกวิธีจะมีข้อแตกต่างกันตรงที่ต้นกำเนิดซึ่งเป็นแหล่งความร้อนและวิธีการส่งถ่ายความร้อนแก่ชิ้นงาน งานเชื่อมโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การเชื่อมโดยการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว คือ การเชื่อมหลอมละลาย (Fusion Welding)
2. การเชื่อมโดยใช้ความร้อนพร้อมแรงอัด คือ การเชื่อมอัด (Pressure Welding) กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานจัดอยู่ในกลุ่มการเชื่อมอัดรูปแบบหนึ่ง โดยอาศัยความร้อนจากความต้านทานของวัสดุเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดสัมผัสของชิ้นงานหรือรอยต่อ จนทำให้เกิดความร้อนสูงและเกิดการหลอมละลายในบริเวณดังกล่าวและด้วยแรงกดของอิเล็กโทรดทำให้น้ำโลหะกระจายตัวรอบจุดสัมผัสเพื่อยึดติดแผ่นโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 องค์ประกอบวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน

ที่มา : สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2532).

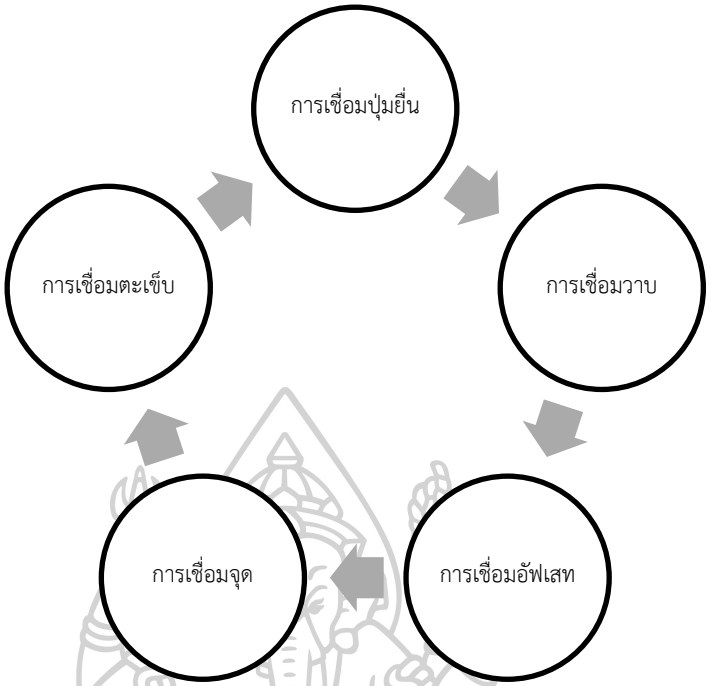
โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานเป็นไปตามหลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน โดยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวแปร คือ

(1) กระแสไฟฟ้า

(2) ความต้านทานรวมของชิ้นงานที่ทำการเชื่อม

(3) เวลาในการปล่อยกระแส ตัวแปรเหล่านี้ต้องต้อง

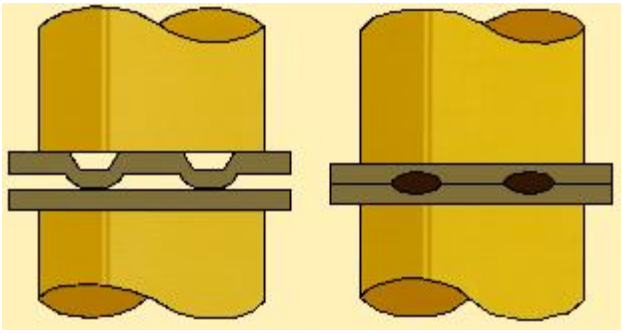
ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Welding : RW) สามารถแบ่งออกได้หลายวิธี (ปัณณทัต จำปากุล, 2561) ดังแสดงภาพที่ 5 ได้แก่



ภาพที่ 5 รูปแบบการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Welding : RW)
ที่มา : สุประดิษฐ์ วังพฤกษ์. (ม.ป.ป.) หลักการเชื่อมไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก http://www.supradit.in.th/contents/metal/Data/5/1.html.th

2.1.1 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าความต้านทานแบบปุ่ม (Resistance Projection Welding)

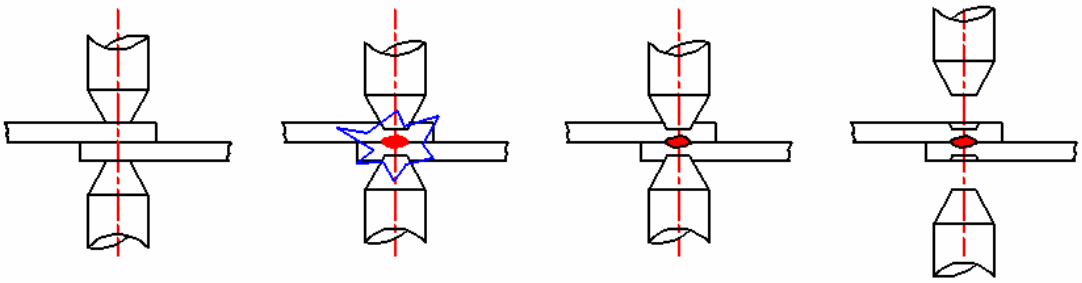
เป็นกระบวนการเชื่อมความต้านทานชนิดหนึ่งซึ่งมีการกำหนดจุดเชื่อมที่ชัดเจนโดยการสร้างรอยนูนที่ชิ้นงาน เพื่อลดพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นและเป็นตำแหน่งหลอมละลายของแนวเชื่อม การเชื่อมแบบความต้านทานแบบปุ่มจะอาศัยหลักการเชื่อมด้วยความต้านทานในการสร้างความร้อน โดยเริ่มที่กระแสไฟฟ้าที่สูงโดยประมาณ (100 – 50,000 แอมแปร์) แต่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (2 – 8 โวลต์) ไหลผ่านปลายอิเล็กโทรดรูปร่างวงกลมผ่านชิ้นงานและแผ่นโลหะบริเวณที่เป็นจุดสัมผัส เมื่อมีความต้านทานเกิดขึ้นทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นเนื้อเหล็กบริเวณจุดสัมผัสจะหลอมละลายและอาศัยแรงกดของอิเล็กโทรดบนโลหะแผ่นด้วยแรงอัด (แรงอัด 20 – 10,000 นิวตัน) จะทำให้โลหะแผ่นทั้งสองยึดรวมกันเป็นจุดวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะการเชื่อมแบบโปรเจ็คชั่น

ที่มา : สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2532).

ปัจจุบันกรรมวิธีการเชื่อมแบบความต้านทานแบบปุ่มนิยมนำมาใช้แพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เพราะเป็นวิธีการที่สามารถทำให้ชิ้นงานบางๆ สามารถยึดติดกับชิ้นงานอื่นๆ ได้ดี มีความสะดวกรวดเร็ว โดยเฉพาะชิ้นส่วนซึ่งผ่านการปั๊มขึ้นรูปมาจากโลหะบางและต้องการนำนัทมายึดติดเพื่อไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่นๆ ดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะแบ่งลักษณะการเชื่อมแบบความต้านทานแบบปุ่มเป็นตามลักษณะงานที่นำมาทำการเชื่อม 2 รูปแบบ (สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ, 2532) คือ การเชื่อมแบบความต้านทานแบบปุ่มระหว่างชิ้นงานกับชิ้นงาน (Spot - Part) แสดงในภาพที่ 7

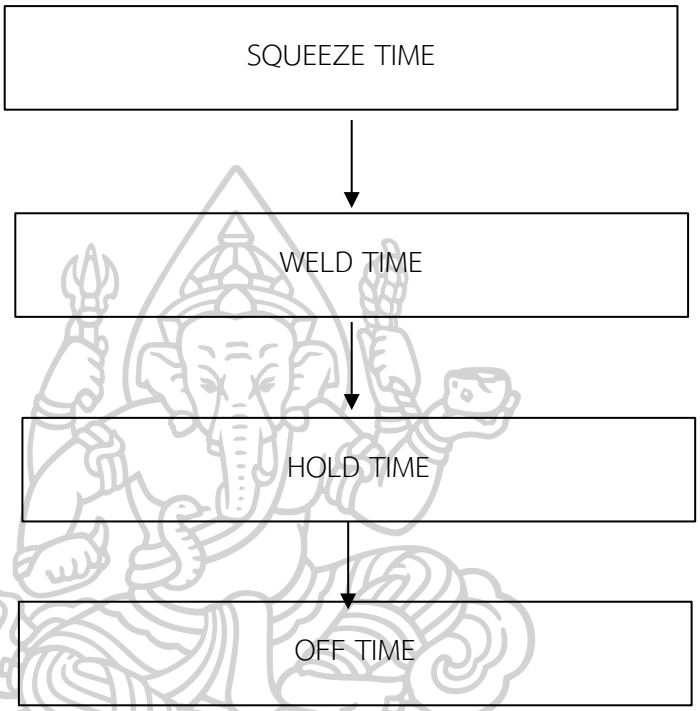


ภาพที่ 7 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มระหว่างชิ้นงานกับชิ้นงาน (Spot - Part)

ที่มา : สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2532).

2.1.2 วัฏจักรกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

การทำงานของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มจะมีวัฏจักรในการทำงาน 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 8 และอธิบายการเกิดวัฏจักรและปัจจัยในกระบวนการเชื่อม ได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 8 วัฏจักรกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

ที่มา : สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2532).

ตารางที่ 1 ความหมายของระดับวัฏจักรในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

เฟส	ความหมาย	ผลของการเลือกระดับปัจจัย	
		มาก	น้อย
Squeeze Time (เวลากด)	ระยะเวลาที่หัวทิปอิเล็กโทรดเริ่มเคลื่อนตัวลงมาบีบกับชิ้นงาน ซึ่งจะใช้ระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะปล่อยกระแสไฟออกมา	ถ้าระยะเวลาที่หัวทิปอิเล็กโทรดเริ่มเคลื่อนตัวลงมาบีบกับชิ้นงานมาก คือ ลูกสูบเลื่อนตัวลงบีบชิ้นงานแล้วแต่ไม่ถึงเวลาปล่อยกระแสไฟออกมา ซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อจุดเชื่อม แต่จะมีผลทำให้เกิดความล้าช้าในการเชื่อมจุดต่อไป	ถ้าระยะเวลาที่หัวทิปอิเล็กโทรดเริ่มเคลื่อนตัวลงมาบีบกับชิ้นงานน้อย ส่งผลให้ลูกสูบเลื่อนตัวลงหัวทิปยังไม่มาบีบกับชิ้นงานตัวปล่อยกระแสไฟฟ้า (Transformer) ก็ปล่อยกระแสไฟออกมารออยู่แล้วที่ปลายหัวทิปอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการสปารค์ (Spark) ชิ้นงานทะลุและหัวทิปก็จะเกิดการชำรุด
Weld Time (เวลาเชื่อม)	ระยะเวลาที่จะปล่อยกระแสไฟเพื่อที่จะเชื่อมชิ้นงาน ซึ่งจะเป็นเวลาที่ต่อเนื่องจาก Squeeze Time ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน	ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้านานเกินไปส่งผลให้เนื้อโลหะหลอมละลายมากและเป็นการสูญเสียค่าไฟฟ้าที่สูงด้วย โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาชิ้นงาน ความสกปรก, มีสนิม, คราบน้ำมัน หรือการนำไฟฟ้า	ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าน้อยส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเชื่อมซึ่งจะเล็กไม่ได้ตามขนาดมาตรฐานและจุดเชื่อมไม่ติด ซึ่งสาเหตุเกิดมาจากระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟน้อย กระแสไฟไม่สามารถเชื่อมชิ้นงาน 2 ชิ้น ให้ติดกันได้ทันเวลา สามารถทดสอบได้ด้วยการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดเชื่อม

ตารางที่ 1 ความหมายของระดับวัฏจักรในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม (ต่อ)

ชื่อเฟส	ความหมาย	ผลของการเลือกระดับปัจจัย	
		มาก	น้อย
Hold Time (เวลากดค้าง)	ระยะเวลาที่หัวทิปกดกับชิ้นงานอยู่หลังจากปล่อยกระแสไฟแล้ว จุดประสงค์เพื่อที่จะให้จุดเชื่อมแข็งตัวและมีความแข็งแรง	กรณีที่ระยะเวลาหลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้ามาก คือ ทำให้สูญเสียเวลาในการทำงานขั้นตอนต่อไป	กรณีที่ระยะเวลาหลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้าน้อย คือ ทำให้จุดเชื่อมไม่แข็งตัวและไม่แข็งแรง ทำให้อาจจะเชื่อมไม่ติด
Off Time (เวลาปลดชิ้นงาน)	ระยะเวลาที่หัวทิปออกจากกัน เพื่อจะเริ่มกระบวนการเชื่อมจุดใหม่ (Start Cycle) ในการตั้งค่าระยะเวลาที่หัวทิปออกจากกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการผลิต		
น้ำหล่อเย็นในหัวเชื่อม	มีหน้าที่หล่อเย็นในหัวเชื่อม (Spot Gun) ซึ่งมีการปล่อยกระแสไฟออกมาบริเวณหัวทิป จะมีความร้อนมากจึงจำเป็นต้องมีน้ำเพื่อหล่อเย็นหัวทิป ถ้ากรณีที่แรงดันของน้ำมีน้อย น้ำไม่สามารถจะหล่อเย็นหัวทิปได้ทัน เมื่อใช้งานไปมากๆ จะทำให้หัวทิปร้อนและอ่อนตัวอายุการใช้งานของหัวทิปสั้นลง และลักษณะของจุดเชื่อม (Spot) จะดำเป็นรอยไหม้รอบๆ จุดเชื่อมและส่งผลให้จุดเชื่อมไม่แข็งแรง		
ระบบลม	มีหน้าที่ให้แรงดันหัวทิปสำหรับกดชิ้นงานและปลดชิ้นงานออก ถ้าแรงดันลมมีน้อย แรงบีบชิ้นงานน้อยจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานที่นำมาเชื่อม ส่งผลให้เมื่อเหล็กหลอมละลายน้ำเหล็กก็จะไหลเข้าไปในช่องว่างที่เกิดขึ้นเมื่อเย็นตัวก็จะกลายเป็นฟองอากาศ ถ้าแรงดันลมมีมากเกินไปจะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของจุดเชื่อมมีขนาดเล็กไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด		

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเชื่อมต้านทานไฟฟ้าแบบปุ่ม

การเลือกปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม (มานพ ตันตระบัณฑิตย์, 2539) นอกจากจะต้องพิจารณาช่วงเวลาการเชื่อมที่เหมาะสมในแต่ละชิ้นงานแล้วยังมีปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น ชนิดและรูปร่างของหัวทิปอิเล็คโทรด และแรงกด ก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา โดยรวมแล้วหากปัจจัยทั้งหลายไม่สอดคล้องกันจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งหากใช้เวลาเชื่อมนานไปอาจทำให้เกิดโลหะหลอมละลายเกิดรอยเชื่อมใหญ่เกินไปและเกิดโพรงอากาศได้ และถ้าเวลากดค้างนานเกินไปประกอบกับวัสดุโลหะมีปริมาณคาร์บอนสูงอาจทำอาจจะส่งผลให้รอยเชื่อมเปราะบางและแตกได้ หากเลือกใช้หัวทิปที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นการเลือกปัจจัยต่าง ๆ ให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก

2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

การเลือกใช้กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มมีข้อดีและข้อเสียที่มีความแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม

ข้อดี	ข้อเสีย
1.กระบวนการเชื่อมประเภทนี้ก่อให้เกิดมลพิษที่ต่ำ 2.ใช้พลังงานน้อยและจะไม่ทำให้ชิ้นงานเสียรูป 3.สามาถเร่งกระบวนการทำงานได้รวดเร็วและปรับเปลี่ยนเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่ายซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ลวด. 4.สามารถประยุกต์ใช้กับแขนยนต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ซึ่งในรถยนต์คันหนึ่งอาจมีรอยเชื่อมแบบปุ่มได้มากถึงหลายพันจุด	1.มีข้อจำกัดในด้านการใช้งานที่ยังไม่หลากหลาย และอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง 2.ความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ได้จะต่ำกว่าการเชื่อมด้วยกระบวนการอื่น ๆ

2.2 เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools)

เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (เรืองลักษณ์ บุตรเพ็ชร และคณะ, 2560) เป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่สำคัญในการแก้ไขปัญหาทางด้านคุณภาพของกระบวนการผลิตซึ่งจะถูกนำมาช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหาทั่วไปในอุตสาหกรรม จากนั้นจะนำปัญหาที่ศึกษาไปคัดเลือกหรือจัดลำดับความสำคัญ รวมถึงการสำรวจสภาพปัจจุบันของปัญหานำมาสู่การค้นหาและวิเคราะห์หาข้อเท็จจริง และสาเหตุหลักของปัญหา เพื่อให้สามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้องและถูกจุด รวมทั้งติดตามผลในกระบวนการอย่างต่อเนื่องตลอดจนใช้ข้อมูลที่มาจากเครื่องมือทั้ง 7 ช่วยในการจัดทำมาตรฐานการทำงาน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพที่สำคัญมี 7 ชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ใบตรวจสอบ (Check Sheet)

ใบตรวจสอบเป็นแบบฟอร์มที่อยู่ในรูปตารางที่หรือรูปภาพถูกนำมาใช้สำหรับกรอกรายละเอียดของข้อมูลเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุและติดตามผลการดำเนินงาน ซึ่งลักษณะของใบตรวจสอบต้องคำนึงถึงคือการกำหนดรายละเอียดที่ชัดเจน เช่น รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ผู้ตรวจสอบ วันและเวลาที่ตรวจ เป็นต้น มีการจัดรูปแบบของแบบฟอร์มให้สะดวกต่อการบันทึกข้อมูล ง่ายต่อการจำแนกข้อมูล และวิเคราะห์ผล แสดงดังภาพที่ 9

Motor Assembly Check Sheet

Name of Data Recorder: Lester B. Rapp
Location: Rochester, New York
Data Collection Dates: 1/17 - 1/23

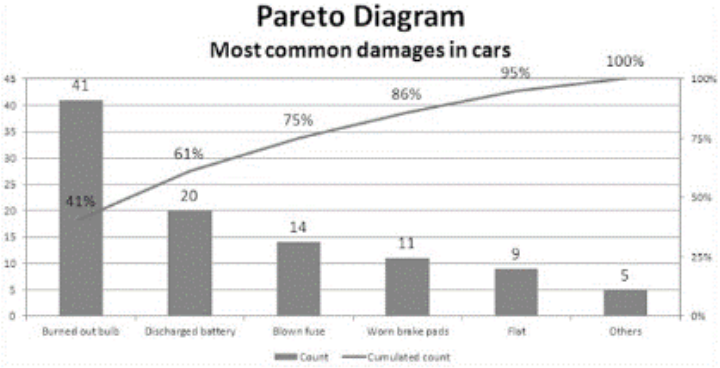
Defect Types/ Event Occurrence	Dates							TOTAL
	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	
Supplied parts rusted		IIIIIIIII	IIIII	IIII	II			20
Misaligned weld			III			II		5
Improper test procedure								0
Wrong part issued		I		II				3
Film on parts								0
Voids in casting				IIII	II			6
Incorrect dimensions						II		2
Adhesive failure								0
Masking insufficient					I			1
Spray failure			IIIII					5
TOTAL		10	13	10	5	4		

ภาพที่ 9 แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet)

ที่มา: ปาโก้ เอ็นจิเนียริ่ง. (2560). เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด(7 Qc Tools) สืบค้นเมื่อเดือน พฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.pakoengineering.com/blog/2017/เครื่องมือคุณภาพ-7-ชนิด-7-qc-tools/

2.2.2 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram)

แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) เกิดจากแนวคิด“ภายใต้สภาวะการณ์ธรรมชาติ สิ่งที่มีความสำคัญมากจะมีเพียงเล็กน้อย (Vital Few) ในขณะที่สิ่งที่มีความสำคัญน้อย จะมีจำนวนมากมาย (Trivial Many) โดยถูกใช้เพื่อกำหนดสาเหตุที่สำคัญ (Critical Factor) ของปัญหาเพื่อแยกออกมาจากสาเหตุอื่น ๆ สามารถบ่งบอกได้ถึงหัวข้อปัญหาที่มีระดับความรุงแรงมากที่สุด รวมถึงระบุอัตราส่วนของปัญหาในแต่ละข้อในทั้งหมด แสดงดังในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram)

ที่มา: ปาโก้ เอ็นจิเนียริ่ง. (2560). เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด(7 Qc Tools) สืบค้นเมื่อเดือน พฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.pakoengineering.com/blog/2017/เครื่องมือคุณภาพ-7-ชนิด-7-qc-tools/

2.2.3 แผนภูมิกราฟ (Graph)

แผนภูมิรูปแบบต่าง ๆ ที่แสดงถึงตัวเลข และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ทำให้การประเมินผลเข้าใจง่ายประเภทของแผนภูมิมีดังนี้ และแสดงรูปแบบของแผนภูมิกราฟดังภาพที่ 11

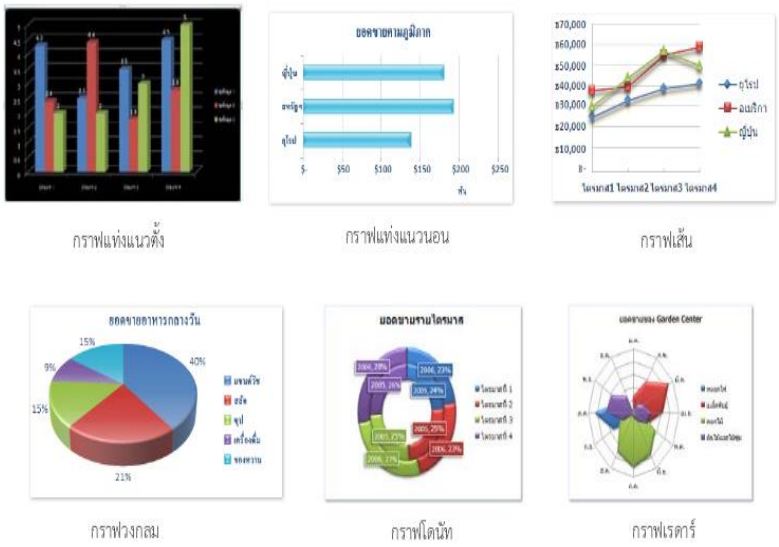
(1) กราฟเส้น (Line Graph) แสดงถึงความผันแปรของข้อมูลเชิงตัวเลขในแกน X เป็นเวลาจะเรียกว่ากราฟแนวโน้ม (Trend Graph)

(2) กราฟแท่ง (Bar Graph) แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลตั้งแต่ 2 ข้อมูลขึ้นไปทำได้โดยการเปรียบเทียบความยาวของกราฟหรือพื้นที่ของกราฟ

(3) กราฟวงกลม (Pie Chart) แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของข้อมูลแต่ละประเภท

(4) กราฟแถบ (Belt Graph) แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของข้อมูลแต่ละประเภทซึ่งแตกต่างจากกราฟวงกลมในเรื่องของการแสดงอนุกรมเวลา

(5) กราฟเรดาร์หรือใยแมงมุม (Radar Chart) แสดงเปรียบเทียบปริมาณของข้อมูลที่ต้องการแสดงผลมากกว่า 2 มิติแยกเป็นสัดส่วน

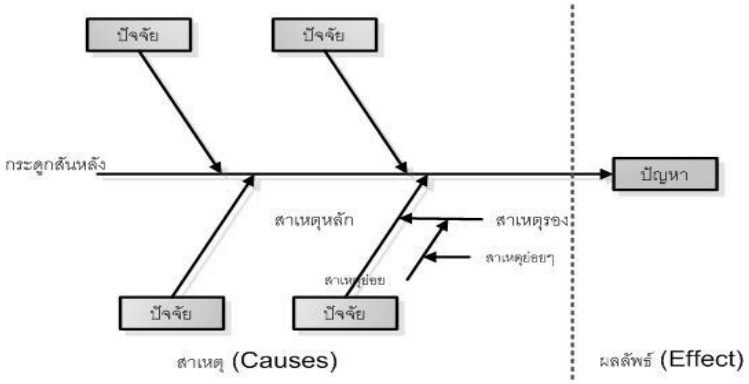


ภาพที่ 11 แผนภูมิกราฟ (Graph)

ที่มา: วิทยาลัยเทคโนโลยีมิตรพลบริหารธุรกิจ. (ม.ป.ป.). การนำเสนอข้อมูลด้วยแผนภูมิหรือกราฟ. [เว็บบล็อก]. สืบค้นเมื่อ มีนาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.totomoji7.weebly.com/

2.2.4 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

เป็นเครื่องมือที่แสดงถึงความสัมพันธ์อย่างมีระบบระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นและสาเหตุหลายๆสาเหตุที่เข้ามามีความเกี่ยวข้องแผนผังสาเหตุและผลใช้เพื่อวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหารากเหง้าที่แท้จริงของสาเหตุ (Root Cause) ที่ทำให้เกิดปัญหาและนำไปสู่การแก้ปัญหาแบบถอนรากถอนโคน รวมถึงการป้องกันปัญหาไม่ให้เกิดซ้ำขึ้นอีก เรียกว่า“การปฏิบัติการแก้ไข” (Corrective Action : C/A)

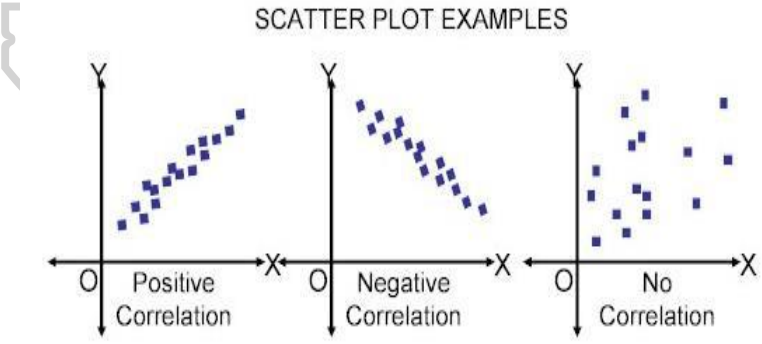


ภาพที่ 12 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

ที่มา: ปาโก้ เอ็นจิเนียริ่ง. (2560). เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด(7 Qc Tools) สืบค้นเมื่อเดือน พฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.pakoengineering.com/blog/2017/เครื่องมือคุณภาพ-7-ชนิด-7-qc-tools/

2.2.5 แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram)

เป็นลักษณะกราฟที่แสดงค่าความสัมพันธ์ของสาเหตุกับปัญหา (สาเหตุ X และปัญหา Y) เพื่อทดสอบว่าสาเหตุที่กพหนดไว้นั้นมีผลต่อปัญหาหรือไม่ และมีผลในลักษณะใดแผนผังการกระจายใช้เพื่อตรวจดูความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ตัวแปร โดยสิ่งที่สนใจศึกษาว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่

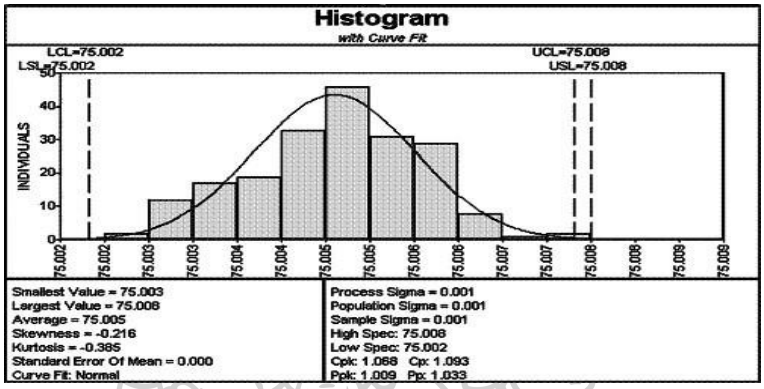


ภาพที่ 13 แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram)

ที่มา: ปาโก้ เอ็นจิเนียริ่ง. (2560). เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด(7 Qc Tools) สืบค้นเมื่อเดือน พฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.pakoengineering.com/blog/2017/เครื่องมือคุณภาพ-7-ชนิด-7-qc-tools/

2.2.6 แผนภาพฮิสโตรแกรม (Histogram)

แผนภาพฮิสโตรแกรม (Histogram) ใช้สำหรับแสดงถึงความผันแปรของข้อมูลที่ได้มาจากการวัดในข้อมูลกลุ่มย่อยเดียวกัน โดยความผันแปรของข้อมูลจะแสดงถึง รูปทรง การกระจาย ตลอดจนแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลแผนภาพฮิสโตรแกรมใช้เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการในระยะยาว



ภาพที่ 14 แผนภาพฮิสโตรแกรม (Histogram)

ที่มา: วันเฉลิม วรรณสถิตย์. (2559).เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tools). สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก http://econs.co.th/index.php/2016/07/29/7-qc-tools/

2.2.7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart)

เป็นเครื่องมือทางสถิติที่แยกความผันแปรหรือความเปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการผลิต ที่มาจากสาเหตุที่ผิดธรรมชาติและมีแนวโน้มออกจากความผันแปรโดยธรรมชาติ สามารถใช้แก้ไขปัญหาด้านคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว โดยผ่านกลไกที่สาคัญคือ พิกัดควบคุม (Control Limit) ของแผนภูมิ โดยที่แผนภูมิควบคุมจะใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพในระหว่างการผลิต และในส่วนของการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance sampling) ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพสำหรับการรับเข้าวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตและการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์หรือสินค้าก่อนส่งออกเพื่อจำหน่าย

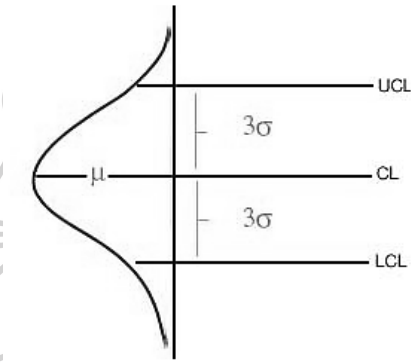
แผนภูมิจะถูกใช้เพื่อตรวจสอบค่าของตัวแปรที่ต้องการควบคุมคุณภาพว่าเกิดความแปรผันเกินจากขอบเขตที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งหากพบว่าเกินจากขอบเขตที่กำหนดไว้ ผู้วิเคราะห์จะต้องทำการค้นหาหาสาเหตุของความแปรผัน และดำเนินการแก้ไขก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับผลิตภัณฑ์ โดยแผนภูมิเป็นการพล็อตค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดลักษณะทาง

คุณภาพของตัวอย่างที่ได้จากการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิต โดยรายละเอียดของแผนภูมิควบคุมจะแสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งแสดงถึงเส้นควบคุมแผนภูมิ 3 เส้น ได้แก่

(1) เส้นกึ่งกลาง (Central Line: CL) โดย CL จะอยู่ที่ค่าเฉลี่ยและมีระยะห่างของ CL ถึง UCL และ LCL เท่ากับ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยเส้นกึ่งกลางจะใช้แสดงค่าลักษณะกระบวนการผลิต ในกระบวนการผลิตที่ดีควรมีค่าตกในเส้นกึ่งกลาง

(2) เส้นขอบบน (Upper Control Limit: UCL)

(3) เส้นขอบล่าง (Lower Control Limit: LCL)



ภาพที่ 15 การแจกแจงแบบปกติ

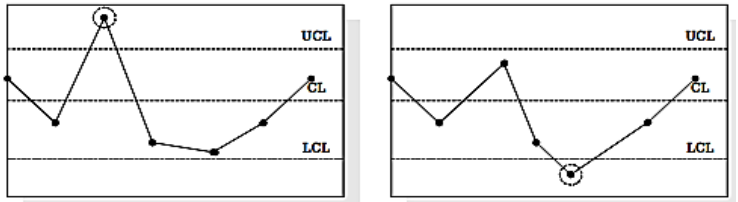
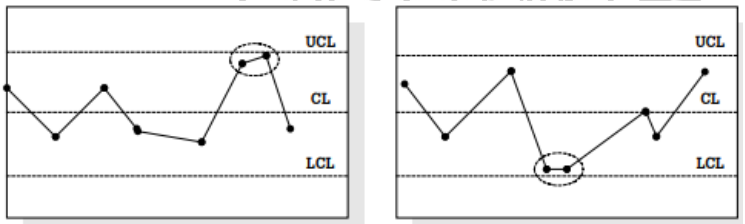
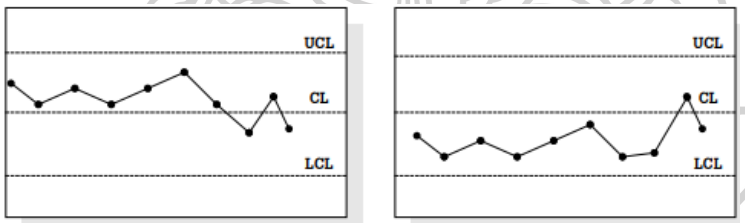
ที่มา: วันเฉลิม วรรณสถิตย์. (2559).เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tools). สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก http://econs.co.th/index.php/2016/07/29/7-qc-tools/

สาเหตุของความผันแปรที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์นั้นมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ (1) สาเหตุที่เป็นปกติวิสัยหรือสาเหตุโดยบังเอิญ (Chance Cause) เป็นความแปรผันที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญจากสาเหตุตามธรรมชาติที่ควบคุมไม่ให้เกิดขึ้นได้ยาก เช่น การเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิ หรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น (2) สาเหตุที่ระบุได้หรือกำจัดได้ (Assignable Cause) เป็นความผันแปรที่เกิดจากความผิดปกติ หรือความผิดพลาด ความชำรุดของปัจจัยการผลิตต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ใช่เป็นธรรมชาติของการผลิต เช่น การปฏิบัติของคนงาน การผิดปกติของเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะอยู่นอกการควบคุม (Out of control)

ด้านการแปลความแผนภูมิควบคุมโดยปกติเมื่อได้แผนภูมิควบคุมแล้วก็จะทำการสุ่มตัวอย่างและทำการวัดผล ถ้าผลของการลงจุดในแผนภูมิควบคุม ทุกจุดกระจายภายในเขตควบคุมอย่างสุ่ม คือ ภาพที่ ได้จะไม่แน่นอน จะได้กระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม แต่ถ้าอยู่ในรูปแบบใด

ใน 3 ลักษณะนี้ ถือว่ากระบวนการผลิตอยู่นอกการควบคุม (Out of control)สำหรับการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจะเริ่มพิจารณาจุดที่ปรากฏบนแผนภูมิควบคุมที่มีแนวโน้มลักษณะผิดปกติ โดยลักษณะจุดในแผนภูมิควบคุมที่ผิดปกติมีลักษณะหลัก ๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การตีความแผนภูมิควบคุม

รูปภาพ	คำอธิบาย
	มีจุดใดจุดหนึ่งอยู่นอกขีดจำกัดควบคุมทางสูงหรือทางต่ำ
	มี 2 จุดติดต่ออยู่ใกล้ขีดจากัดควบคุมทางสูงหรือทางต่ำ
	มีจุดอย่างน้อย 7จุดติดต่อกันอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง

2.3 หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

ในปี ค.ศ. 1920 ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการนำหลักการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชผักทางการเกษตรเมื่อมีการใช้สูตรผสมของปุ๋ยที่แตกต่างกัน นั่นถือเป็นครั้งแรกในการประยุกต์ใช้หลักการนี้ ซึ่งเป็นอีกแขนงหนึ่งของสถิติประยุกต์ (ฉลอง สีแก้วสิ่ว, 2552)

ต่อมาจนเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 สหรัฐอเมริกาก็สามารถก้าวเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมการผลิตแทนที่ประเทศแถบยุโรปซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของทฤษฎีสถิติประยุกต์และทวีปแรกที่มีการประยุกต์ใช้สถิติควบคู่กับกระบวนการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมและการควบคุมคุณภาพของสินค้ามาก่อนหลายปี ซึ่งสินค้าที่ผลิตจากอุตสาหกรรมในอเมริกาขายดีมากผลิตเท่าไหร่ก็ขายหมดทำให้ความ

ใส่ใจในการวิจัยและพัฒนาด้านสินค้าและคุณภาพในเชิงลึกไม่ได้รับความเอาใจใส่เท่าที่ควร และละเลยไม่ได้เน้นความสำคัญในการประยุกต์ใช้หลักสถิติในการผลิตและควบคุมคุณภาพสินค้า และนับวันคุณภาพก็น้อยลงเรื่อย ๆ และการดูแลและควบคุมคุณภาพของสินค้าก็อยู่ในลักษณะที่เรียกว่าฉาบฉวยมากขึ้นๆ ซึ่งทำให้คู่แข่งอย่างประเทศญี่ปุ่นที่ให้ความสำคัญด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตีตื้นขึ้นมา

ผู้นำด้านอุตสาหกรรมในญี่ปุ่นเอาจริงเอาจังในการประยุกต์ใช้หลักสถิติในการควบคุมคุณภาพสินค้า การใช้หลักการออกแบบการทดลองในการควบคุมการผลิตสินค้า และยึดถือปฏิบัติต่อเนื่องและมีการพัฒนาจนนำหลักดังกล่าวไปสู่พนักงานทุกระดับ ปลูกฝังให้มีจิตสำนึกในด้านคุณภาพ โดยเฉพาะพนักงานฝ่ายผลิตที่เป็นคนลงมือผลิตสินค้าเอง

2.3.1 ความหมายของหลักการออกแบบการทดลอง

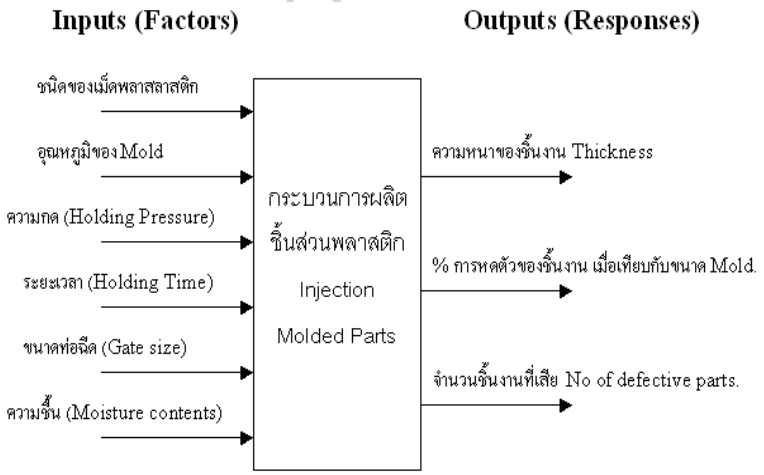
การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือคุณภาพที่นิยมใช้กันในกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยการออกแบบจะต้องทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ถูกออกแบบไว้โดยใช้วิธีสุ่มเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบประมาณการระหว่างค่าตัวแปรอิสระแล้วจึงนำมาสร้างขึ้นเป็นสมการทางสถิต โดยทั่วไปจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพ ตัวแปรในกระบวนการตัวแปรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประโยชน์ของการออกแบบการทดลองสามารถนำไปปรับใช้ในกระบวนการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่วางเป้าหมายไว้

ในการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงสิ่งที่ถูกจำกัด อย่างเช่น ในเรื่องของเวลาต้นทุนในการทดลอง บุคลากร วัสดุที่ใช้ในการทดลองและอื่น ๆ ดังนั้นในการทดลองจะต้องวางแผนและมีการควบคุมการดำเนินการอย่างเป็นระบบจะช่วยให้ได้ข้อมูลที่สำคัญสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ และการทดลองที่มีการออกแบบมาอย่างดี จะช่วยให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพในการหาตัวแปรในกระบวนการ (Process variable) ตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product variable) องค์ประกอบของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการผลิต

สำหรับการออกแบบการทดลองที่ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการนั้น ผู้ดำเนินการต้องทำความเข้าใจกับปัญหาที่ทำการศึกษาอย่างดี และกำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน ทำการเลือกผลลัพธ์ (Y) ของกระบวนการ และกำหนดปัจจัย (X) ที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ (Y) จากนั้นวางแผนและควบคุมการดำเนินการตามขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะต้องทำการเก็บข้อมูลที่จำเป็นและมีความสำคัญเพื่อนำไปทำการทดลอง โดยมีรูปแบบของการออกแบบการทดลองที่จะนำไปใช้ ได้แก่ Full Factorial, Fractional Factorial, 2^k Factorial และอื่น ๆ เมื่อ

ผู้ดำเนินการได้ทำการออกแบบการทดลอง และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดลองเรียบร้อยแล้ว จะนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อทำการยืนยันผลจากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ไปปรับใช้ในกระบวนการ

ในการวิเคราะห์จะต้องมีองค์ประกอบ 5M 1E คือ คน (Man) ทำงานร่วมกับเครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Methods) กระบวนการวัดค่า (Measurement) และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (Environment) โดยตัวอย่างความสัมพันธ์ของปัจจัย กระบวนการและตัวแปรตอบสนองในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ปัจจัย กระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง

ที่มา : ฉลอง สีแก้วสิ่ว. (2552). Design of Experiment [เว็บบล็อก]. สืบค้นเมื่อ มีนาคม พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก http://www.geocities.ws/Chalong_sri/why_DOE.

จากภาพที่ 16 จะแสดงตัวแปรเข้า (Input factors) คือตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการและตัวตอบสนอง (Output factors) คือ ความหนา การหดตัวของชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานที่เสียที่เป็นตัวบ่งบอกถึงกระบวนการเมื่อใช้ DOE (Design of Experiment) จะไม่นิยมใช้ Response หลายตัว ในกระบวนการสามารถมีได้หลายปัจจัยมาก บางตัวควบคุมได้และปัจจัยบางตัวไม่สามารถควบคุมทั้งที่ปัจจัยนั้นส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการ ซึ่งบางปัจจัยมีความจำเป็นที่ต้องปล่อยให้เป็นไปตามธรรมชาติเพราะไม่สามารถควบคุมได้ อย่างเช่น สิ่งแวดล้อม

สำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในการออกแบบการทดลองนั้นจะเรียกว่า “Noise” และตัวแปรบางตัวที่มีผลต่อกระบวนการมากกว่าตัวแปร Noise ซึ่งเรียกว่า “Key Process Input

Variable”(KPIV) เป็นตัวแปรที่ต้องควบคุมและเปลี่ยนแปลงตัวแปรให้อยู่ในตำแหน่งที่ส่งผลเสียต่อกระบวนการให้น้อยที่สุด

ตัวชี้วัดจะทำให้เรารู้ประสิทธิภาพหรือความเป็นไปของกระบวนการได้ ซึ่งการวัดตัวชี้วัดในกระบวนการอาจวัดด้วยตัวชี้วัดเพียงหนึ่งตัวหรือมากกว่า 1 ตัวก็ได้ โดยวิธีการวัดมีทั้งการวัดด้วยเครื่องมือและการวัดด้วยการนับ สำหรับการวัดด้วยเครื่องมือค่าที่ได้จะเป็นค่าต่อเนื่อง (Continuous data) ที่เรียกว่าตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) และสำหรับการวัดด้วยการนับจะเป็นการสังเกตซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) ที่เรียกว่าตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative variable) การวัดตัวชี้วัดไม่สามารถวัดตัวแปร Output ของกระบวนการได้ทุกตัว จึงจำเป็นต้องวัดเฉพาะตัวแปรที่สื่อถึงประสิทธิภาพหรือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ดีที่สุด ตัวแปรที่มีการคัดเลือกเรียกว่า “Key Process Output Variable” (KPOV)

การออกแบบการทดลองเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยใดหรือตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมาโดยมีจุดมุ่งหมาย ดังนี้

1.เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ข้อเท็จจริงโดยจะพิสูจน์จากความเชื่อของประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่มีการอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

2.เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) เป็นการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขรูปแบบใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

2.3.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

1. การสุ่ม (Randomization) การดำเนินการใด ๆ กับปัจจัยจะต้องมีความอิสระเพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน และจะต้องคำนึงถึงหลักการกระจายอย่างทั่วถึงและมีความสมดุล (Balance out) ต่อปัจจัยอื่น ๆ ที่เราไม่สามารถควบคุมได้

2. การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยจุดประสงค์ในการทำซ้ำ คือ) เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการบ้าง และเพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนทิ้ง (Average out) โดยอิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่มีผลต่อปัจจัยเหมือนการหาค่าเฉลี่ยเป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง

3.การบล็อค (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ของการทดลองเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.3.3 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

1.ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ วิธีการใดวิธีการหนึ่งที่ต้องกระทำกับสิ่งทดลองเพื่อวัดผลและทำการเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.หน่วยทดลอง (Experiment Unit) เป็นหน่วยที่ใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ (Treatment) หน่วยทดลอง คือ สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของการทดลอง ซึ่งได้รับจากทรีทเมนต์เดียวกัน ในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัดสามารถผันแปรได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง ถึงแม้จะใช้สิ่งทดลองที่เหมือนกันก็ตาม ในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องให้คาจากัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

3. ปัจจัย (Factor) คือ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหมดที่มีความเกี่ยวข้องกันเรียกว่าตัวแปรอิสระก็ได้ ซึ่งปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและข้อมูลเชิงปริมาณ สามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยได้ เช่น ข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยี ต้นทุน ซึ่งปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

ก.ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสอบ (Response Variable) ในการทดลอง แต่ไม่ใช่ปัจจัยที่กำลังทำการศึกษา ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมหรือสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก เวลา อุปกรณ์ หรือระบบที่ไม่สามารถควบคุมได้

ข.ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Nuisance Variable) คือ ตัวแปรที่ไม่รู้จักมาก่อนและมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยจะกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม

4. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระในการทดลองสามารถวัดค่าของตัวแปรตามที่มากกว่า 1 ก็ได้ โดยการเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) และความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรและความเป็นไปได้จะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้รับจากทรีทเมนต์หนึ่งๆควรมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสมมติฐานความปกติ (Normality) เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลองอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติ

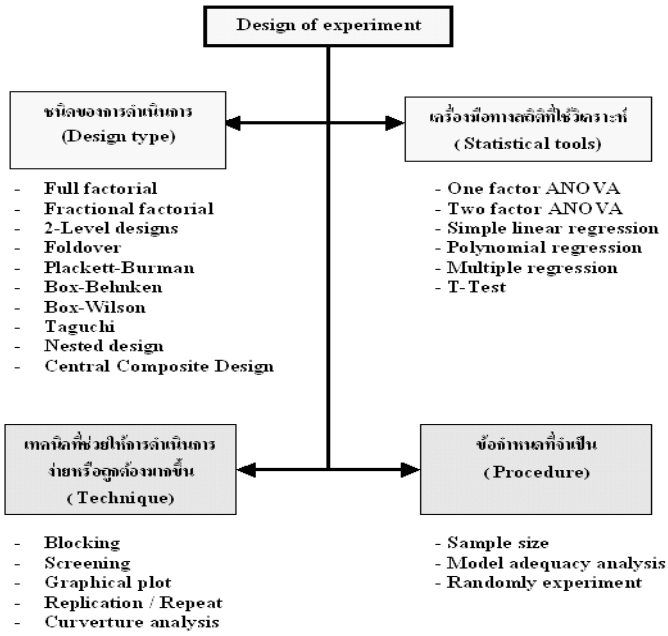
2.3.4 องค์ประกอบในการศึกษาหัวข้อ

1. ชนิดของการดำเนินการ (Design type) หมายถึง รูปแบบที่ใช้ในการดำเนินการ ซึ่งผู้ทำการทดลองจะต้องตัดสินใจเลือกตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนวางแผน เพราะ Design จะนำไปสู่วิธีการดำเนินการทดลอง วิธีการเก็บและการบันทึกข้อมูล รวมถึงเครื่องมือทางสถิติที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ในการจะตัดสินใจเลือก Design นั้น ต้องพิจารณาถึงผลหรือเป้าหมายที่ต้องการได้รับ ความซับซ้อนของการทาการทดลอง และข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องศึกษารายละเอียดของแต่ละ Design ก่อนเลือกนำมาใช้งาน

2. เครื่องมือทางสถิติ (Statistical tools) หมายถึง การนำวิธีการทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนการวางแผนการทดลอง เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ ผู้ทดลองต้องเข้าใจเครื่องมือที่ใช้และสามารถอ่านความหมายได้ ในกรณีที่เกิดข้อผิดพลาดผู้ทดลองจะตรวจพบและสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากจุดใด

3. เทคนิคหรือกลยุทธ์ (Technique) หมายถึง วิธีการที่จะทำให้การทดลองมีความง่ายและสะดวกในการดำเนินงาน มีความประหยัดของทรัพยากร โดยที่ผลการวิเคราะห์ยังเป็นที่ยอมรับได้ซึ่งผู้ทาการทดลองจะต้องกาหนดเทคนิคหรือกลยุทธ์พร้อมกับการเลือก Design เพราะในบาง Design มีข้อห้ามหรือข้อกาหนดที่ยืดหยุ่นที่แตกต่างกันไป

4. ข้อกำหนดที่จำเป็น (Fundamental procedure) หมายถึง สิ่งพื้นฐานที่ผู้ทำการทดลองจะต้องนึกถึงอยู่เสมอ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์และข้อสรุปบรรลุเป้าหมาย ซึ่งมีทั้ง 4 องค์ประกอบ สามารถแสดงองค์ประกอบดังภาพที่ 17 ได้ดังนี้



ภาพที่ 17 องค์ประกอบในการศึกษา DOE

ที่มา :: ฉลอง สีแก้วสิ่ว. (2552). Design of Experiment [เว็บบล็อก]. สืบค้นเมื่อ มีนาคม พ.ศ. 2563.สืบค้นได้จาก http://www.geocities.ws/Chalong_sri/why_DOE.

2.3.5 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

1.กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem statement) จะต้องชัดเจน สามารถเข้าใจง่าย มีความเป็นรูปธรรมซึ่งประกอบด้วยหลัก 3 อย่าง คือ อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นอย่างไรมากน้อยแค่ไหน (How) และพบปัญหานั้นที่ไหนช่วงเวลาใด (Where)

2.การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการที่แท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากวิธีการคัดกรองด้วยเครื่องมือทางสถิติ หรือปรึกษาผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้น ๆที่สามารถให้คำแนะนำในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัย

3.การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือหรือการนับและจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษาได้อย่างดีด้วย

4.เลือกแบบทดลอง (Experiment design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่างวิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

5.ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment) ให้เป็นไปตามแผนการทดลองทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลองและเก็บผลการทดลอง

6.การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ต้องสามารถตรวจสอบลักษณะ และคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองของการ Run computer program การพิสูจน์ความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model adequacy checking) การหาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไขของ ANOVA ด้วย

7.การสรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ ผู้ดำเนินการทดลองจะต้องเป็นผู้ที่เข้าใจที่มาของข้อมูลอย่างดี และวิเคราะห์ได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาลักษณะนี้เป็นเพราะอะไร สังเกตการณ์ได้ว่าการดำเนินการมีข้อบกพร่องตรงไหน มีสาระสำคัญใดบ้างต้องอ่านการรายงานผล และแนวทางใดที่เป็นบรรทัดฐานสามารถนำไปดำเนินการต่อในอนาคตได้ ซึ่งผู้บริหารหรือหัวหน้าหน่วยงานอาจจะมีความสนใจในหัวข้อการวิเคราะห์ตามความคิดเห็นของผู้ดำเนินการมากกว่าผลที่ปรากฏก็เป็นไปได้

2.3.6 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

1.การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เป็นแผนการทดลองแบบง่ายสุด เหมาะสมกับการทดลองที่ไม่สามารถแยกได้ว่าหน่วยทดลองที่นำมาใช้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรก่อนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนทดลองนี้จะแยกสาเหตุของ ความผันแปรของข้อมูลทั้งหมดว่าเนื่องมาจากอิทธิพลของทรีทเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีสาเหตุจากปัจจัยอื่น จึงเรียกข้อมูลนี้ว่า ข้อมูลแบบแจกแจงทางเดียว (One-Way Classification) ตามแผนการทดลองนี้แสดงว่า เมื่อหน่วยทดลองได้รับทรีทเมนต์ที่ต้องการทดสอบแล้ว ความแตกต่างของข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละหน่วยทดลองจะต้องเกิดจากอิทธิพลของทรีทเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้แผนการทดลองมี ประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยทดลองที่นำมาใช้ควรมีลักษณะที่สม่ำเสมอและคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือมีความผันแปรระหว่างหน่วยทดลองน้อยที่สุด หลักสำคัญของแผนการทดลองนี้คือ การจัดทรีทเมนต์ให้กับหน่วยทดลองหรือจัดหน่วยทดลองให้กับทรีทเมนต์จะต้องเป็นไปโดยสุ่มไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสุ่ม

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

ข้อดี	ข้อเสีย
1.เป็นแผนการทดลองที่จัดง่าย 2.ให้ค่าองศาแห่งความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน (Degree of Freedom for Error) สูงสุด 3.วิธีการวิเคราะห์ง่ายที่สุดเมื่อเทียบกับแผนการทดลองแบบอื่น 4.ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนซ้ำไม่เท่ากันในแต่ละทรีทเมนต์ก็ไม่ทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อน	1.มีข้อจำกัดว่าจะใช้ได้อย่างเหมาะสมเมื่อมีจำนวนทรีทเมนต์น้อย หากมีทรีทเมนต์จำนวนมากแล้ว จำเป็นต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้นอาจไม่สามารถกระทำได้ 2.ใช้กับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอ 3.ไม่สามารถตรวจสอบอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างปัจจัยหรือสิ่งที่เราสนใจในการทดลองได้

2. การออกแบบการทดลองแบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCB)

ในบางการทดลองอาจประสบปัญหาเกี่ยวกับหน่วยทดลองที่ใช้ไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้การใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากความผันแปรของข้อมูลจะไม่ใช่ผลของทรีทเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ยังมีความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลองรวมอยู่ด้วย ซึ่งความผันแปรส่วนหลังนี้จะไปรวมอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ทำให้ผลรวมของผลบวกของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้นมีผลต่อการทดสอบทำให้ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องพยายามแยกผลอันเกิดจากอิทธิพลอื่นที่ไม่ใช่ทรีทเมนต์ออกจากความแปรปรวนทั้งหมด เพื่อให้แน่ใจว่าผลที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นอิทธิพลของทรีทเมนต์ (Treatment Effect) เพียงอย่างเดียว แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อก เป็นวิธีหนึ่งในหลาย ๆ วิธีของการจำแนกแบบสองทาง (Two-Way Classification) จะใช้เมื่อหน่วยทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ ทางแนวนอน (Row) และแนวตั้ง (Column) มีหลักการคือ พยายามจัดหน่วยทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันซึ่งเรียกว่า บล็อก (Block) ดังนั้นความแปรปรวนระหว่างหน่วยในบล็อกเดียวกันจึงมีค่าต่ำและให้ความแตกต่างระหว่างบล็อกมีค่าสูง ในแต่ละบล็อกกระทำโดยสุ่ม กรณีนี้จะทำให้แยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมาจากยอดรวมของผลบวกของกำลังสองได้

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบล็อกสุ่มสมบูรณ์

ข้อดี	ข้อเสีย
1.ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนทรีทเมนต์หรือบล็อก 2.ถ้าหากจำเป็นที่จะต้องมีซ้ำสำหรับรีทเมนต์ใดก็อาจเพิ่มหน่วยทดลองเป็นสองหรือมากกว่านั้นในแต่ละบล็อก 3.กรณีที่ข้อมูลในบล็อกใดหรือทรีทเมนต์ใดใช้ไม่ได้หรือสูญหายไป สามารถละเว้นได้โดยไม่	1.ถ้าหน่วยทดลองในแต่ละบล็อกมีความผันแปรมากจะทำให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นจากการทดลองย่อมมากด้วย ตามกรณีนี้มักเกิดขึ้นถ้าไม่สามารถควบคุมหน่วยทดลองภายในบล็อกให้สม่ำเสมอตลอดได้

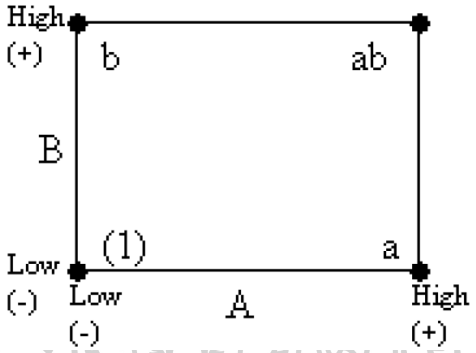
2.4 หลักการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (2^k Factorial Design)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (ปารเมศ ชุติมา, 2545) หรือการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสองระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วยระดับสูงและค่าต่อของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 การทำซ้ำที่บริบูรณ์ของการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรกเมื่อมีปัจจัยจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้เหลือน้อยลง โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

ผู้ทดลองจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือจำนวนปัจจัยหรือ Main effect โดยในแต่ละปัจจัยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ 2 ระดับ และเป็นการออกแบบการทดลองที่ให้ผลจำนวน Run น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ การใช้ 2^k Factorial Design ได้กำหนดให้แต่ละ Factor มีเพียง 2 ระดับ (Level) เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องออกแบบ 2^k ภายใต้สมมติฐานของ Factor ทั้งหมดมีผลกระทบต่อ Response เป็นแบบเชิงเส้นตลอดย่านของค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดที่ได้ออกแบบไว้

2.4.1 การวิเคราะห์หลักการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^k

Geometric Notation Factor ในการทดลองครั้งนี้ คือ A และ B แสดงดังรูปที่ 18 และตารางที่ 6 แสดงให้เห็นในช่อง Treatment แต่ละค่าของ A และ B มี 4 ลักษณะที่แตกต่างกัน (Combination)



ภาพที่ 18 2^K Factorial Design

ที่มา : ปารเมศ ชุติมา. (2545).

ตารางที่ 6 ผลรวมข้อมูลในแต่ละวิธีการปฏิบัติ Factor และ Treatment

factor		Treatment Combination
A	B	
Low	Low	(1)
High	Low	a
Low	High	B
High	High	ab

จากภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่าแต่ละ Treatment อยู่ ณ ตำแหน่งใด ซึ่งเรียกแผนภาพนี้ว่า Geometric Notation และตารางที่ 7 แสดงให้เห็นในความหมายเดียวกัน ในช่องTreatment นั้นแต่ละค่าของ A และ B รวมทั้งหมด 4 ลักษณะที่แตกต่างกัน (Combination) สามารถเขียน Notation แทนได้ดังในตารางที่ ช่อง Treatment ทั้ง A และ B เราเรียกว่า **“Main Effect”**

2.5 หลักการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design)

การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design) คือ วิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณี เนื่องจากการทดลองนี้มีระดับปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องนำปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองในทุกปัจจัยมาทำการวิเคราะห์

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้จะทำให้สามารถหาค่าตัวแปรตอบสนองที่ใกล้เคียงกับค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมกับกระบวนการที่ดีที่สุด โดยระดับปัจจัยและคุณลักษณะป้อนเข้าสำหรับการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ที่นำมาใช้ในการศึกษาในขั้นตอนนี้ได้มาจากการกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) เพื่อขจัดปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในกระบวนการ

2.5.1. ความหมายของการทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full Factorial Design)

การทดลองแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์เป็นการทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ สามารถศึกษาผลกระทบหลัก (Main Effect) ซึ่งเป็นผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว (Main Factors) และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction Factors) จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้ (จำนวนการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ) มีค่าเท่ากับ a^k โดยที่

a คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา

k คือ จำนวนปัจจัยในกรณีศึกษา

เช่น ในการทดลองหนึ่งมีจำนวนระดับปัจจัย 5 ค่า และมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 3 ตัวแปร ดังนั้นวิธีปฏิบัติทั้งหมดคือ 5^3 จะเรียกแผนการทดลองว่าการทดลอง 5^3 แฟกทอเรียลเต็มรูป (5^3 Full Factorial Experiment) อย่างไรก็ตามการทดลองรูปแบบนี้มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลา และทรัพยากรมากตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัยที่ศึกษาซึ่งในการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A B และ C จะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 7 นี้

ตารางที่ 7 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A B และ C

Main Effects	2-Way Interaction	3-Way Interaction
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

ก. ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effect) คือ ผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

ข. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor or 2 Ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB AC และ BC

ค. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factor or 3-Ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกันในทีนี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC อันตรกิริยา (Interactions) คือ “ความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง (Y) ที่จะมีค่าต่างเท่ากันเมื่อผู้ทดลองทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยที่หนึ่ง (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้แต่ละระดับของปัจจัยที่สอง

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ข้อดี	ข้อเสีย
1.ศึกษาได้หลายปัจจัยพร้อม ๆ กันจึงเป็นการใช้ทรัพยากรที่ประหยัด และมีประสิทธิภาพมากกว่า CRD, RCBD 2.กรณีที่ไม่พบผลกระทบร่วม ผู้ทดลองสามารถใช้ผลยืนยันได้ว่าในการทดลองมีแต่ปัจจัยหลักหรือผลกระทบหลักเท่านั้นที่มีผล เมื่อทดลองครั้งต่อไปจะสามารถลดจำนวนการทดลองลงโดยใช้วิธีการทดลองทีละปัจจัย (One-Factor at a Time) ได้	1.เนื่องจากมี Treatment Combination จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น ทำให้อาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง 2.ถ้าจำนวนปัจจัยมีมากขนาดของการทดลองจะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ข้อดี	ข้อเสีย
3.กรณีที่พบผลกระทบร่วม (Interactions) ก็จะทำให้ผู้ทดลองสามารถทราบถึงรูปแบบอิทธิพลของผลกระทบนั้น	

2.6 ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

ในการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลโดยที่ไม่มีหลักการทดสอบทางสถิติที่ชัดเจนสำหรับสนับสนุนการสรุปผล จะส่งผลให้การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลดังกล่าวทำได้แค่เพียงการประมาณค่าแบบจุด (Point estimation) เท่านั้น ส่วนค่าทางสถิติที่ประมาณได้จะเป็นตัวแปรสุ่มและมีค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มได้ ดังนั้น การทดสอบสมมติฐานนั้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางคุณภาพของระบบ (Quality characteristic) หรือค่าพารามิเตอร์ของประชากรที่สนใจ

การทดสอบสมมติฐาน คือ การทดสอบว่าสมมติฐานหลักที่เราสนใจนั้นมีความจริงหรือไม่ ซึ่งในการทดสอบสมมติฐานนั้น ๆ จะอาศัยกลุ่มตัวอย่างที่สนใจทั้งหมดทำการเก็บสถิติต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทำการตัดสินใจว่าสมมติฐานหลักที่เราสนใจนั้นมีความจริงหรือไม่ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นตัวทดสอบว่าจะยอมรับสมมติฐานหลักหรือปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือไม่การทดสอบ โดยสมมติฐานจะประกอบด้วย

ก. สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) นั้นเป็นข้อสงสัยเกี่ยวกับลักษณะต่าง ๆในกลุ่มประชากรที่ผู้วิจัยต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริงหรือไม่ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ H_0

ข.สมมติฐานที่ขัดแย้ง (Alternative hypothesis) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ H1 เป็นข้อความที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยในการทดลอง โดยทั่วไปแล้ว H_0 และ H_1 จะมีความหมายตรงข้ามกันเสมอ เครื่องหมายในสมมติฐานขัดแย้งจะปรากฏใน H_1 เป็นได้เพียง 3 กรณีเท่านั้น คือ $\neq$ เพื่อบอกความแตกต่างกัน $<$ หรือ $>$ เพื่อบอกว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขึ้นกับคุณภาพที่ผู้วิจัยสนใจ

2.6.1 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบสมมติฐานข้างต้นนั้นผู้ทดสอบจะมีโอกาสตัดสินใจอยู่ 2 ลักษณะ คือ ปฏิเสธและยอมรับสมมติฐานหลักซึ่งการตัดสินใจต้องเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนกับสภาพความจริง ซึ่งได้ให้ความหมายของความผิดพลาดจากการตั้งสมมติฐาน ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ประเภทของความผิดพลาดจากการทดสอบสมมติฐาน

ความจริง	การตัดสินใจ		สัญลักษณ์	คำอธิบาย
	การยอมรับ H_0	การปฏิเสธ H_1		
H_0 ถูกต้อง	ตัดสินใจถูกต้อง	ตัดสินผิดพลาด (Type I error)	α	ความน่าจะเป็นที่ผู้วิจัยจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง
H_1 ผิด	ตัดสินผิดพลาด (Type II error)	ตัดสินใจถูกต้อง	β	ความผิดพลาดเนื่องจากไม่ทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ทั้งที่เป็นเท็จ

2.6.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

ตั้งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบเกี่ยวกับกระบวนการหรือประชากรโดยทั่วไปแล้วจะกำหนดสมมติฐานรอง H_1 ขึ้นมาก่อน แล้วจึงกำหนดสมมติฐานหลัก H0 ซึ่งเป็นส่วนกลับของสมมติฐานรอง

1.กำหนดระดับนัยสำคัญ (Significance level) ที่ใช้ในการทดสอบนั้นโดยส่วนใหญ่จะกำหนด α อยู่ระหว่าง 0.01-0.1

2. ระบุตัวทดสอบทางสถิติ (Test statistic) และจะทำการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลตัวอย่างนั้น ๆ

3. กำหนดบริเวณพื้นที่วิกฤตหรือพื้นที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

4. สรุปผลการทดสอบ ซึ่งจะสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกจะเป็นการพิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือไม่หากค่าที่ได้อยู่ในบริเวณดังกล่าวผู้วิจัยจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก วิธีที่สองจะเป็นการพิจารณาค่า P-value เทียบกับพื้นที่บริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก ผู้วิจัยจะปฏิเสธสมมติฐานหลักก็ต่อเมื่อค่า P-value < α เท่านั้น

2.7 แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Attribute Control Charts)

แผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (ศุภชัย นาทะพันธ์, 2551) เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ต้องการควบคุมหาได้จากการนับ เช่น ผลิตภัณฑ์ดีหรือเสีย ผลิตภัณฑ์ชำรุดหรือไม่ชำรุด ผลิตภัณฑ์ที่มี รอยตำหนิหรือไม่มีรอยตำหนิ ผลิตภัณฑ์บกพร่องหรือไม่บกพร่อง เป็นต้น ซึ่งการพิจารณาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ดีหรือเสียนั้น จะทำการเปรียบเทียบกับ

มาตรฐานหรือขีดจำกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ หรืออาจพิจารณา ด้วยการมองด้วยสายตาอย่างคร่าว ๆ โดยมีทั้ง 4 แผนภูมิย่อย ได้แก่ แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-Chart) แผนภูมิควบคุมจำนวนของเสีย (np-Chart) แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิ (c-Chart) และ u-Chart โดยมีข้อบ่งใช้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ข้อบ่งใช้แผนภูมิควบคุมเชิงคุณลักษณะ

แผนภูมิ	ข้อบ่งใช้	หมายเหตุ
p-Chart	ใช้ตรวจสอบจำนวนของเสียของกระบวนการผลิต	ใช้สำหรับขนาดของกลุ่มตัวอย่างไม่คงที่ กรณีแบบบ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์หรือสัดส่วนชิ้นงานดี-เสีย
np-Chart	ใช้ตรวจสอบจำนวนของเสียของกระบวนการผลิต	ใช้กับขนาดของกลุ่มตัวอย่างคงที่กรณีแบบบ่งบอกเป็นจำนวนนับ
c-Chart	ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิของผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย	ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิของผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย เช่น เก็บข้อมูลรอยตำหนิของโทรศัพท์มือถือ 10 เครื่อง กำหนดให้เป็นหนึ่งหน่วย
u-Chart	ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิของผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย	ใช้กับขนาดของตัวอย่างในหนึ่งหน่วยไม่คงที่ เช่น เก็บข้อมูลรอยตำหนิเฉลี่ยต่อโทรศัพท์มือถือ 1 เครื่อง

2.8 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อม

คุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากกระบวนการขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ขนาดของรอยเชื่อมหรือนักเกต ลักษณะรอยเชื่อม การซึมลึกของเนื้อเชื่อม สิ่งบกพร่องในรอยเชื่อม การระเบิดของเนื้อเชื่อม เป็นต้น ซึ่งในการตรวจสอบคุณภาพหรือความสมบูรณ์ของกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การตรวจสอบแบบทำลาย (Destructive testing) และการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing)

2.8.1 การตรวจสอบแบบทำลาย (Destructive testing)

การตรวจสอบแบบทำลายจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของรอยเชื่อมเมื่อได้ทำการเชื่อมเสร็จแล้ว เช่น คุณสมบัติทางกล ทางโลหะวิทยา หรือทางเคมี เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของ

รอยเชื่อม ซึ่งชิ้นงานเชื่อมถูกทดสอบในรูปแบบถูกทำลายจนได้รับความเสียหายในระหว่างการทดสอบจนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก ซึ่งมีตัวอย่างรูปแบบการทดสอบ 3 ชนิด คือ

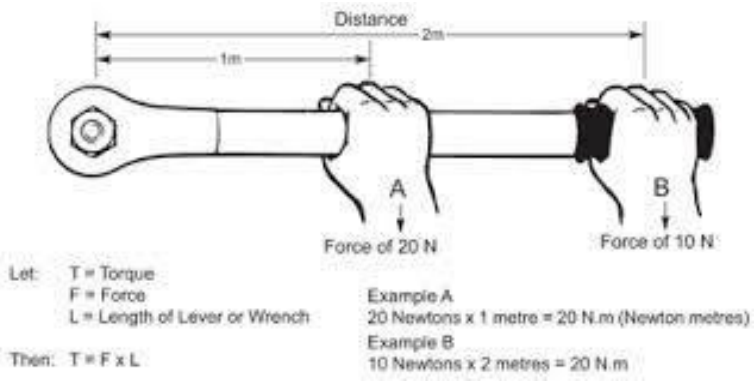
1. การทดสอบคุณสมบัติทางกล เช่น การทดสอบแรงดึงเฉือน (Tension Shear Test) การทดสอบด้วยการลอก (Peel Test) การทดสอบด้วยการบิด (Twist Test) การทดสอบด้วยแรงกระแทก (Impact Test)
2. การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี เช่น การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion Test)
3. การทดสอบคุณสมบัติทางโลหะวิทยา เช่น การทดสอบโครงสร้างมหภาค (Macro-Specimen Test) การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro-Specimen Test)

2.8.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Examination: NDE)

การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Examination : NDE) (ประจักษ์ อ่างบุญตา, 2547) เป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงานโดยไม่ทำลายสภาพเดิมของชิ้นงานให้เกิดความเสียหาย รอยขีดข่วน การแยกส่วน หรือการแตกหักเสียหาย เพื่อตรวจสอบลักษณะสมบัติสมรรถภาพ โครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่อยู่ภายใน โดยใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รังสี คลื่นเสียง ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็ก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ ซึ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลายดังกล่าวจะเป็นการวัดลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ เพื่อประเมินความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ได้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด ประหยัดที่สุด และมีประสิทธิภาพคือวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการตรวจสอบขั้นแรกของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ได้แก่ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องบริเวณผิว การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องภายใน

2.8.3 การทดสอบด้วยแรงบิด (Twist Test)

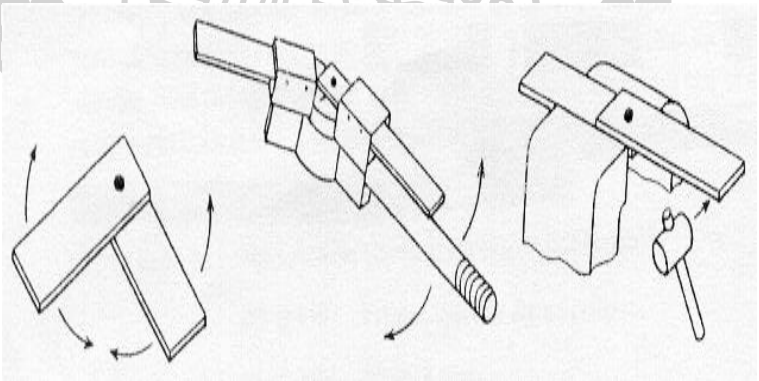
ทอร์ก (Torque) หรือแรงบิด คือ แรงที่พยายามจะหมุนมวลโดยแรงนี้สามารถสร้างได้ด้วยตนเองโดยการใช้ประแจขันน๊อตซึ่งจะเกิดแรงที่กระทำกับด้ามจับซึ่งจะกลายเป็นอร์กที่พยายามหมุนน๊อตให้แน่น หน่วยอังกฤษของทอร์กคือ ปอนด์ - นิ้ว หรือ ปอนด์ - ฟุต หน่วย SI คือ นิวตัน - เมตร หน่วยของทอร์กเกิดจากแรงคูณด้วยระยะทาง ซึ่งการจำลองการเกิดแรงบิดแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แรงบิด

ที่มา : เอบีออลเทคโน. (ม.ป.ป.). แรงบิด (Torque) คืออะไร. สืบค้นเมื่อ พฤษภาคม พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก www.aballtechno.com/article/35/แรงบิด-torque-คืออะไร.

การทดสอบด้วยแรงบิดเป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดรอยเชื่อมหรือขนาดของนักเกต และลักษณะการแตกหักด้วยการใส่แรงบิดให้หักออกจากกันในทิศทางขนานกับผิวงาน เหมาะกับชิ้นงานที่มีความหนาปานกลางถึงหนาในการทดสอบด้วยแรงบิดสามารถใช้ชิ้นงานทดสอบแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบด้วยแรงดึงเฉือน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเป็นเครื่องมือที่สามารถวัดแรงบิดได้สูง และหามุมของการบิดได้ด้วย การทดสอบด้วยแรงบิดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต หาค่าความสามารถในการเชื่อมของชิ้นงาน และเลือกเงื่อนไขการเชื่อม ลักษณะของการทดสอบด้วยแรงบิด โดยแสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 กรรมวิธีการทดสอบด้วยแรงบิด

ที่มา : ประจักษ์ อ่างบุญตา. (2547)

.

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณรัณ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และคณะ (2548) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อสร้างตัวแบบสถิติในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่เหมาะสมโดยเริ่มจากคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อรอยเชื่อมมากที่สุดด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design 2^k ผลที่ได้คือ พบพารามิเตอร์ทั้งสิ้น3 ตัว ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า, เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน หลังจากนั้นนำพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมมาออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองอีกครั้งโดยใช้เทคนิค พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบ Box-Behnken เพื่อหาสมการการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับการรับแรงเฉือนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตั้งค่าเครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ

อาทิตย์ ติรณสวัสดิ์ (2554) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมความต้านทานเบบจุดให้เหมาะสมเพื่อลดปริมาณข้อบกพร่องประเภทน๊อตเชื่อมหลุด โดยปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดน๊อตเชื่อมหลุดอย่างมีนัยสำคัญมีอยู่ 3 ปัจจัยคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานหรือเวลาในการเชื่อม และแรงกดของหัวทิปที่ใช้ในการเชื่อม ก่อนการปรับปรุงพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงานเท่ากับ 5.9679 N จึงทำการปรับปรุงเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 16 kA วลาในการเชื่อมเท่ากับ 6 Cycles และแรงกดของหัวทิปเท่ากับ 4kN ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงานเท่ากับ 1.0128 N ซึ่งทำให้ไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นและสามารถเพิ่มความสามารถของกระบวนการ (Cpk) จากเดิมเท่ากับ 0.50 เพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.51

โยธิน จันทร์ทอง และคณะ (2555) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken) และฟังก์ชันความต้องการเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม ระหว่างชิ้นงานน๊อต M8 กับเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด SPHC 270 โดยเริ่มจากใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k เพื่อค้นหาและคัดปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า เวลาในการเชื่อม และแรงกดของอิเล็กโทรดที่กระทำต่อชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ α = 0.05 จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ในการหาค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดของน๊อตสูงสุดภายใต้เงื่อนไข ซึ่งในการประมาณค่าของแรงบิดจะใช้สมการกำลังสองเชิงถดถอย (Second-order polynomial regression) โดยผลการทดลองทำให้ได้ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torques) ที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของลูกค้า คือ มากกว่า 63.7 N.m (TSB 1503G) ซึ่งการที่จะได้ค่าแรงบิดเท่านี้จะต้องประกอบไปด้วยการตั้งค่าปัจจัยดังนี้ แรงกดของขั้วอิเล็กโทรดขณะทำการเชื่อมเท่ากับ

2.93 kN กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 10.5 kA และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมเท่ากับ 13 Cycles และจากการทดลองยืนยันผลด้วยการใช้ค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าได้ค่าแรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 134.2 N.m ซึ่งผ่านตามเกณฑ์การยอมรับของลูกค้า

สุชาดา มะโนชัย และสมเกียรติ จงประสิทธิ์พร (2556) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตและหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นคือ บริเวณฐานโช๊คอัพซึ่งความแข็งแรงของรอยเชื่อมไม่ได้มาตรฐาน จึงได้ทำการใช้แผนภูมิก้างปลาเพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่แท้จริงในการทำให้เกิดของเสียดังกล่าว พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม แรงกดชิ้นงาน และเวลาในการเชื่อม ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้ กระแสไฟฟ้า 8,450 Ampere แรงกดชิ้นงาน 4.6 kg/f และเวลา 11 วินาที

มนตรี พิพัฒน์ไพบูลย์ และพชร หงษาครประเสริฐ (2559) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในโรงงานผลิตอุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ที่เกิดจากการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมแล้วค่าแรงดึงแนวเชื่อมแล้วพบว่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานทำให้เกิดของเสียจำนวนมากขึ้น งานวิจัยนี้เริ่มจากการคัดเลือกปัจจัยในเบื้องต้นที่สันนิฐานว่ามีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมด้วยการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2^k เมื่อได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยตรงแล้วจึงนำไปทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบ(Full Factorial Design) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ค่าความเร็วในการเติมลวด ค่ากระแสไฟ และค่าความเร็วในการเดินเชื่อม ที่เหมาะสมจึงนำไปปรับปรุง ผลการดำเนินพบว่าสามารถลดปริมาณของเสียลดลง 5.08 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่า 771,750.00 บาท/ปี

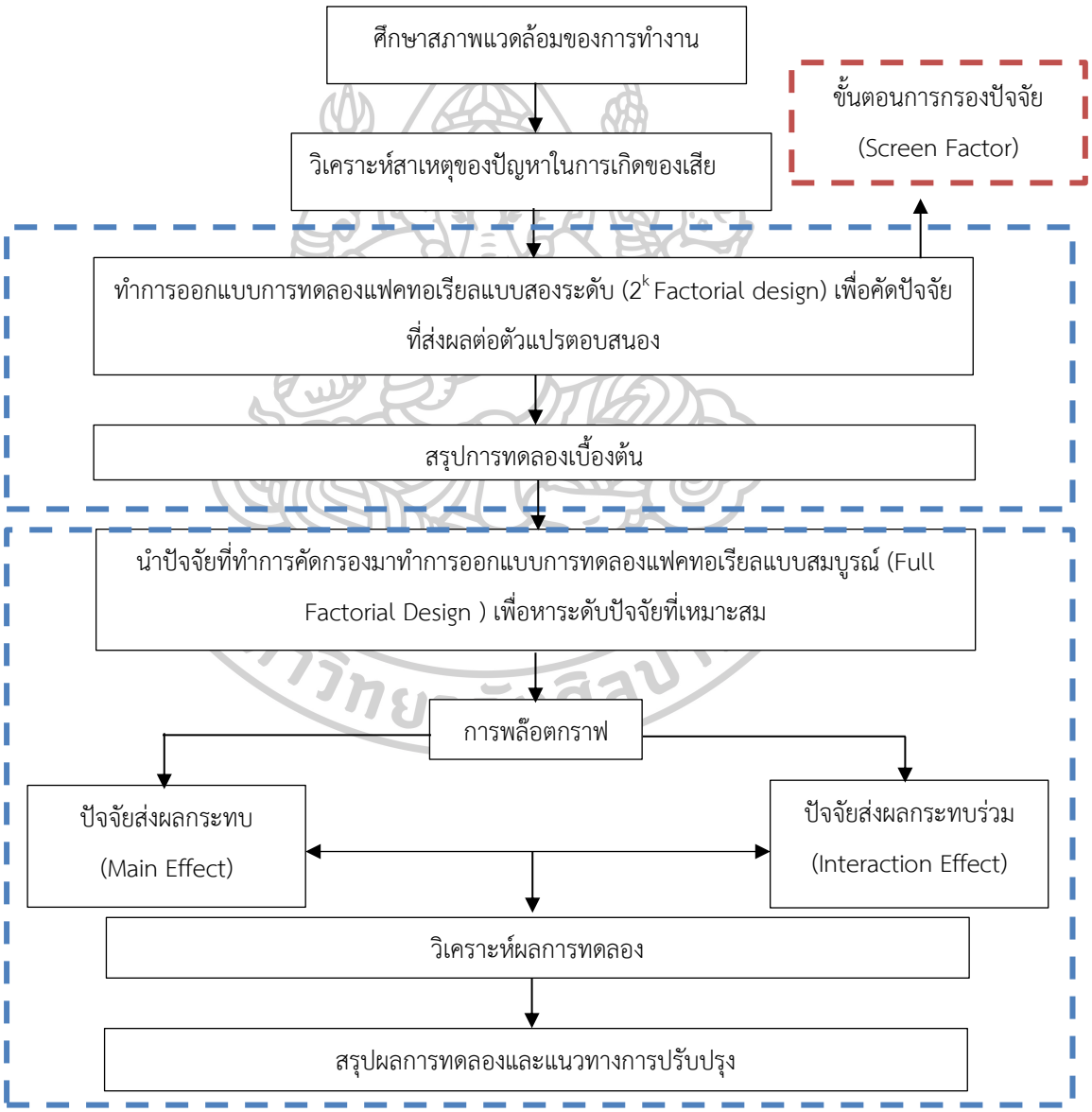
พิชิตพล อยู่พะเนียด (2561) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตโอริงในชุด Curing Bladder ชำรุดและผนัง Bladder บางเพราะน้ำร้อนกัด โดยเริ่มจากการใช้หลัก 4M เพื่อจำแนกสาเหตุของปัญหาที่มีอิทธิพลต่อของเสีย และเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงจากการสอบถามผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง จึงได้ปัจจัยที่มีผลโดยตรงคือ 1. อุณหภูมิน้ำร้อนภายใน Bladder 2. แรงดันน้ำร้อนภายใน Bladder 3.อุณหภูมิไอน้ำ Dome Steam 4.แรงดันไอน้ำ Dome Steam หลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 2 ระดับ (2k Full Factorial Design) เพื่อศึกษาทั้ง 4 ปัจจัย ในการปรับตั้งค่าอุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสม

ปาพจนี ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2561) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรม ได้แก่ แผนผังพาเรโต้เพื่อคัดเลือกปัญหาได้ที่ควรได้รับการแก้ไขอย่างเหมาะสม และนำแผนภูมิก้างปลานำมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นของการเกิดของเสีย ซึ่งพบว่าของเสียเกิดจากการปรับตั้งค่าของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งมีทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ 1.อุณหภูมิในการอุ่นเม็ด 2.อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก 3.อุณหภูมิแม่พิมพ์ 4.แรงดันในการฉีด และใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ 2k Full Factorial Design เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดของเสีย จากนั้นทำการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้หลักการ Response Optimization ในการหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนผลิต

บทที่ 3
วิธีดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design and of Experiment) กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการดำเนินงานิจัย

โดยการดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาสภาพการทำงานปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบคุณภาพของชิ้นงานและทำการเก็บรวบรวมข้อมูล จากนั้นจะนำมาทำการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อค้นหาสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ในขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการออกแบบการทดลองโดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบสองระดับ 2 ระดับ (2^k Factorial Design) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าน่าจะเกี่ยวข้องนำมาพิจารณาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองโดยตรง ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ปัจจัยป้อนเข้าของกระบวนการผลิต โดยการระดมสมองของผู้เชี่ยวชาญ และฝ่ายวิศวกรรม

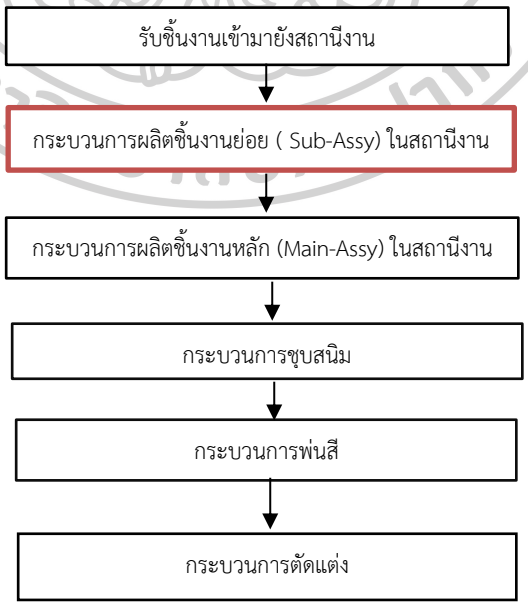
ส่วนที่ 2 เป็นการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการทดลองแบบสมบูรณ์ 3 ระดับ (3^k Factorial Design) โดยนำปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองอย่างมีนัยยะสำคัญเข้ามาทำการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการอย่างแท้จริง

ซึ่งทั้ง 2 ส่วนจะใช้โปรแกรม MINITAB 18 เข้ามาช่วยในการประมวลผลและวิเคราะห์ผล จากนั้นจะทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทำงาน และทำการสรุปผลการทดลองในขั้นตอนสุดท้าย

3.2 ศึกษาข้อมูลทั่วไป

3.2.1 ข้อมูลกระบวนการผลิต

จากกระบวนการแรกตั้งแต่รับชิ้นงานเข้าจนถึงกระบวนการสุดท้ายก่อนส่งมอบถึงไปยังแผนกถัดไปมีกระบวนการหลัก ๆ ดังนี้

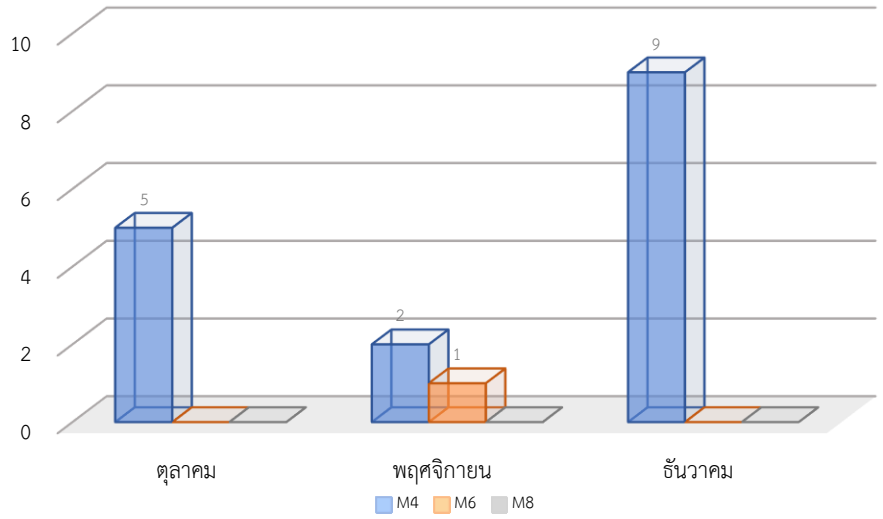


ภาพที่ 22 ขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกรณีศึกษา

ในสถานีงานที่ 1 มีการผลิตชิ้นงานย่อยด้วยกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม ซึ่งลักษณะของชิ้นงานจะเป็นลักษณะระหว่างชิ้นงานกับน๊อตที่มีหลายขนาด ได้แก่ M4, M6 และ M8 ซึ่งพบจำนวนของเสียที่เกิดจากการเชื่อมน๊อตขนาด M4 มากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์สะสมเท่ากับ 9.52% ดังตารางที่ 11 และมีแนวโน้มการเกิดของเสียสูงสุด ดังภาพที่ 23 ดังนั้นจึงเลือกนำปัญหาระหว่างชิ้นงานกับน๊อตขนาด M4 มาแก้ไขโดยมีเป้าเพื่อลดของเสียในการะบวนการเชื่อม

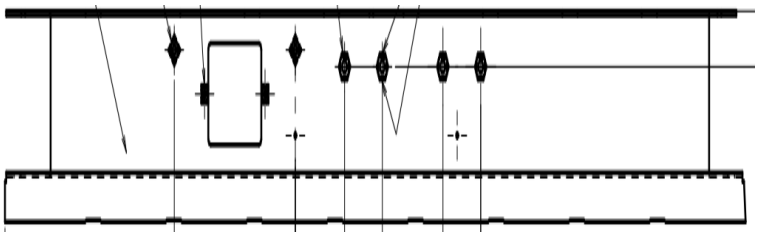
ตารางที่ 11 สัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ

ปัญหาที่พบ	จำนวนของเสียที่พบ (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย (%)
Size M4 x	16	9.52
Size M6 x	1	0.60
Size M8 x	0	0.00

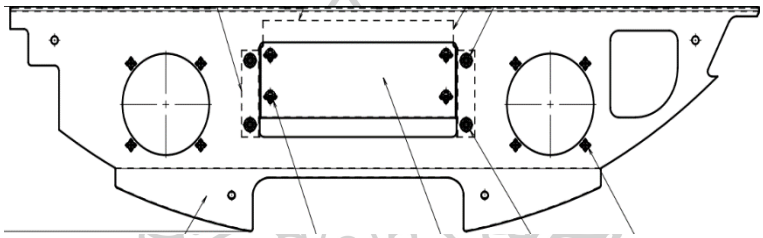


ภาพที่ 23 ความถี่การเกิดของเสียจากกระบวนการเชื่อมแบบปุ่ม

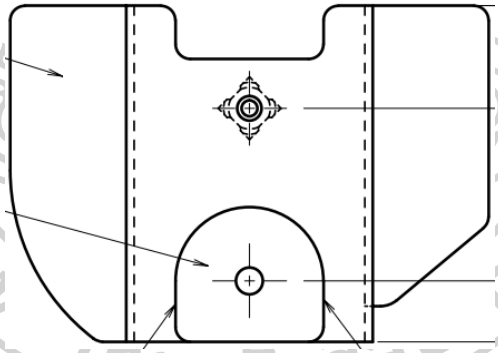
โดยในกระบวนการผลิตชิ้นงานนั้นจะมีการตรวจสอบคุณภาพแผ่นเหล็ก ด้านมาตรฐานด้านความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนจะถูกส่งไปยังสถานีงานที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ผู้ศึกษาได้ทำการเลือกสถานีงานที่ 1 ซึ่งเป็นสถานีงานผลิตชิ้นส่วนย่อยสำหรับเตรียมชิ้นส่วนเพื่อนำไปประกอบชิ้นเป็นส่วนหลักลำดับถัดไป โดยจะประกอบด้วยตัวน๊อตขนาด M4 เข้ากับแผ่นเหล็กชิ้นงาน ซึ่งมีโมเดลชิ้นงาน 4 รุ่น ดังภาพที่ 24 - ภาพที่ 27



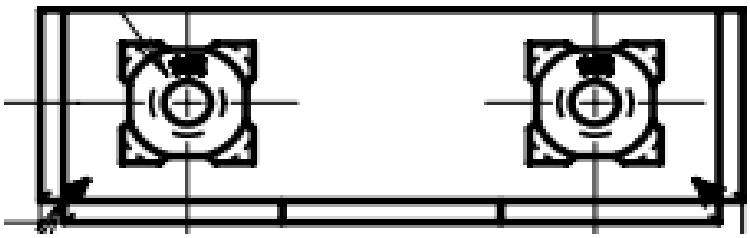
ภาพที่ 24 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น A



ภาพที่ 25 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น B



ภาพที่ 26 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น C



ภาพที่ 27 ลักษณะชิ้นงาน รุ่น D

3.2.2 ข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำการวิจัย

1. ข้อมูลการผลิตของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาศึกษามาจากสถานีการผลิตที่ 1 มีการผลิตชิ้นงาน 4 รุ่นได้แก่ A, B, C และ D ซึ่งแต่ละรุ่นเป็นชิ้นงานย่อย และจะนำไปประกอบเป็นชิ้นงานหลักในสถานีที่ 2 ต่อไป โดยจะถูกนำไปประกอบเป็นหัวแคปสำหรับขุดตักในรถแมคโคร แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในภาพที่ 24 - ภาพที่ 27 โดยแต่ละวันพนักงานจะทำการเชื่อมชิ้นงานระหว่างแผ่นเหล็กชนิดต่าง ๆ กับน๊อต 3 ขนาด ได้แก่ M4, M6, และM8 ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 จำนวนจุดเชื่อมของแต่ละผลิตภัณฑ์ในหน่วย 1 ชิ้น

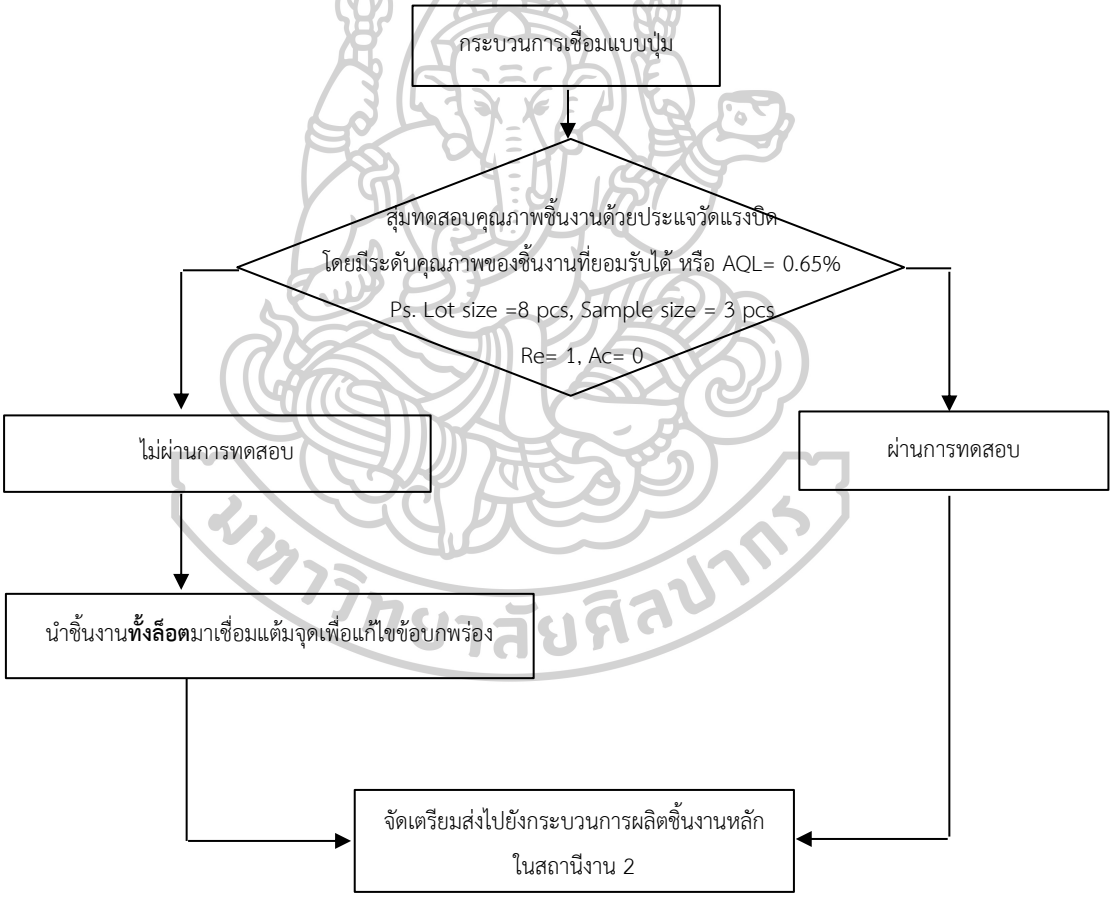
รหัสผลิตภัณฑ์	จำนวนครั้งการเชื่อมต้านทานแบบปุ่มของชิ้นงาน (ครั้ง : 1 ชิ้น)		
	M4	M6	M8
A	2	2	4
B	8	-	8
C	2	-	-
D	2	-	-
รวม	14	2	12

จากตารางที่ 14 แสดงให้เห็นถึงในกระบวนการผลิตมีการเชื่อมชิ้นงานระหว่างแผ่นเหล็ก และน๊อตขนาด M4 มากที่สุด ซึ่งในแต่ละผลิตภัณฑ์มีการใช้น๊อตขนาด M4 เป็นตัวประกอบที่สำคัญ นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย น๊อตขนาด M4 ที่ไม่ผ่านคุณภาพจากการทดสอบค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมจากการทดสอบด้วยประแจทอ์คมากที่สุด ดังภาพที่ 23 จึงทำให้เลือกศึกษากระบวนการเชื่อมระหว่างน๊อตขนาด M4 กับแผ่นชิ้นงาน

2. การทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์

ในกระบวนการทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะทดสอบจากประแจวัดแรงบิด (Torque Wrench) ดังภาพที่ 28 ตั้งค่าแรงบิดที่กำหนด คือ 4.6 Nm ตามมาตรฐานการผลิตชิ้นงาน จากนั้นทำการขันทดสอบ ซึ่งจะเป็นการทดสอบโดยการสุ่มแบบทำลายเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานแล้วจะคัดแยกชิ้นงานที่ผ่าน (G) และไม่ผ่าน (NG) จากนั้นทำการแก้ไขปัญหาชิ้นงานที่ไม่ผ่านเบื้องต้น เป็นลำดับถัดไป แสดงกระบวนการทดสอบดังภาพที่ 29

ภาพที่ 28 ประแจวัดแรงบิด

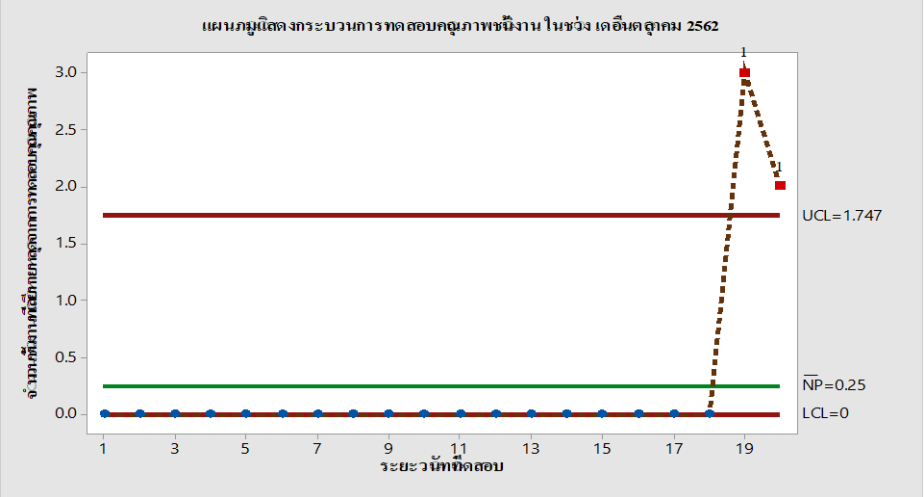


ภาพที่ 29 กระบวนการทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์

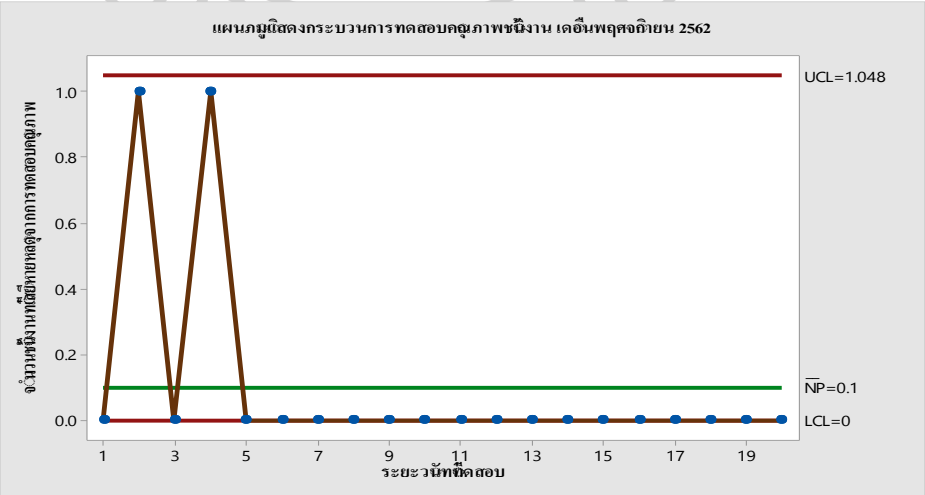
ในโรงงานใช้แผนการสุ่มตัวอย่างแบบ MIL-STD-105E ซึ่งมีแผนการสุ่มตัวอย่างครั้งเดียวโดยใช้ระดับการตรวจสอบทั่วไปแบบเคร่งครัด ซึ่งระดับคุณภาพของชิ้นงานที่ยอมรับได้ (Accept Quality Level: AQL) ของโรงงานกรณีศึกษาถูกกำหนดไว้ที่ 0.65 %

3.2.3 ข้อมูลสภาพการทำงาน

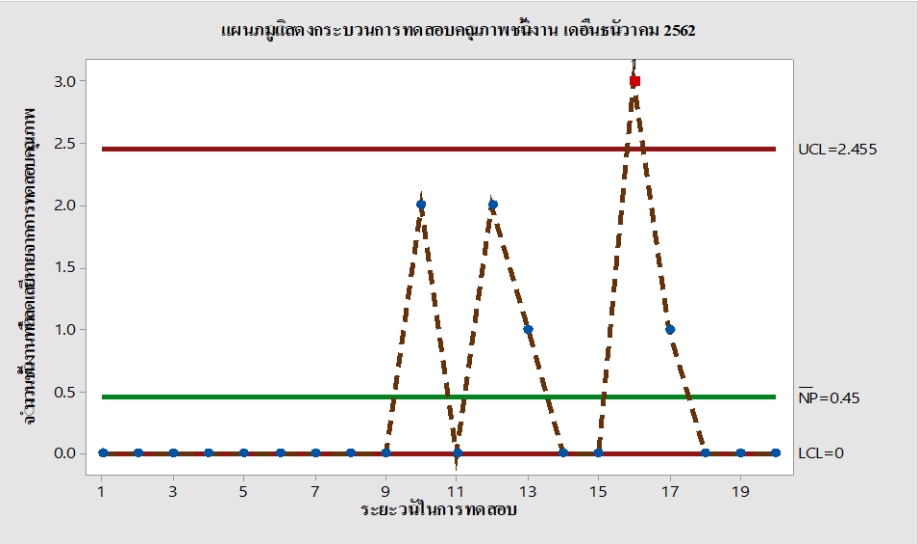
ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตจากการติดตามกระบวนการผลิตชิ้นงานตลอด 3 เดือน แสดงดังภาพที่ 30 - ภาพที่ 32 พบว่ากระบวนการผลิตชิ้นงานมีจุดอยู่นอกควบคุม (Out of Control) ซึ่งนำมาสู่สภาวะของกระบวนการผลิตที่ผิดปกติและส่งผลกระทบต่อไปยังคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งก่อนส่งมอบชิ้นงานไปยังกระบวนการถัดไปได้มีการทดสอบคุณภาพชิ้นงานด้วยค่าแรงบิดจากประแจทอร์ค พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานไม่ได้มาตรฐานทำให้ชิ้นงานทั้งสองหลุดจากกัน ซึ่งภายในระยะเวลา 3 เดือน ได้แก่ เดือนตุลาคม 2562 - เดือนธันวาคม 2562 มีผลการทดสอบค่าแรงบิด แสดงดังตารางที่ 13 – ตารางที่ 15



ภาพที่ 30 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนตุลาคม พ.ศ.2562



ภาพที่ 31 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562



ภาพที่ 32 แผนภูมิควบคุมกระบวนการผลิต เดือนธันวาคม พ.ศ.2562

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนตุลาคม พ.ศ. 2562

ครั้งที่	เดือนตุลาคม พ.ศ.2562																			
	1	2	3	4	7	8	9	10	16	17	18	21	22	24	25	26	28	29	30	31
1	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	NG	NG
2	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	NG	NG
3	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	NG	G

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562

ครั้งที่	เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562																			
	1	2	4	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	25	26	27	28	29
1	G	NG	NG	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
2	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
3	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน เดือนธันวาคม พ.ศ. 2562

ครั้งที่	เดือนธันวาคม พ.ศ.2562																		
	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	16	17	18	19	20	23	25	27	28
1	G	G	G	G	G	G	G	NG	G	G	G	NG	G	G	G	G	NG	G	G	NG
2	G	G	G	G	G	G	G	NG	G	NG	NG	NG	G	G	G	G	G	G	NG	G
3	G	G	G	G	G	G	G	G	G	NG	G	NG	NG	G	G	G	NG	G	G	G

ตารางที่ 13 – ตารางที่ 15 แสดงให้เห็นผลการทดสอบค่าแรงบิดด้วยประแจทอร์คกับชิ้นงาน ในระยะเวลาตั้งแต่เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562 – ธันวาคม พ.ศ. 2562 โดยสัญลักษณ์ G แทนชิ้นงานที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ และ NG (No go) แทนชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ

3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

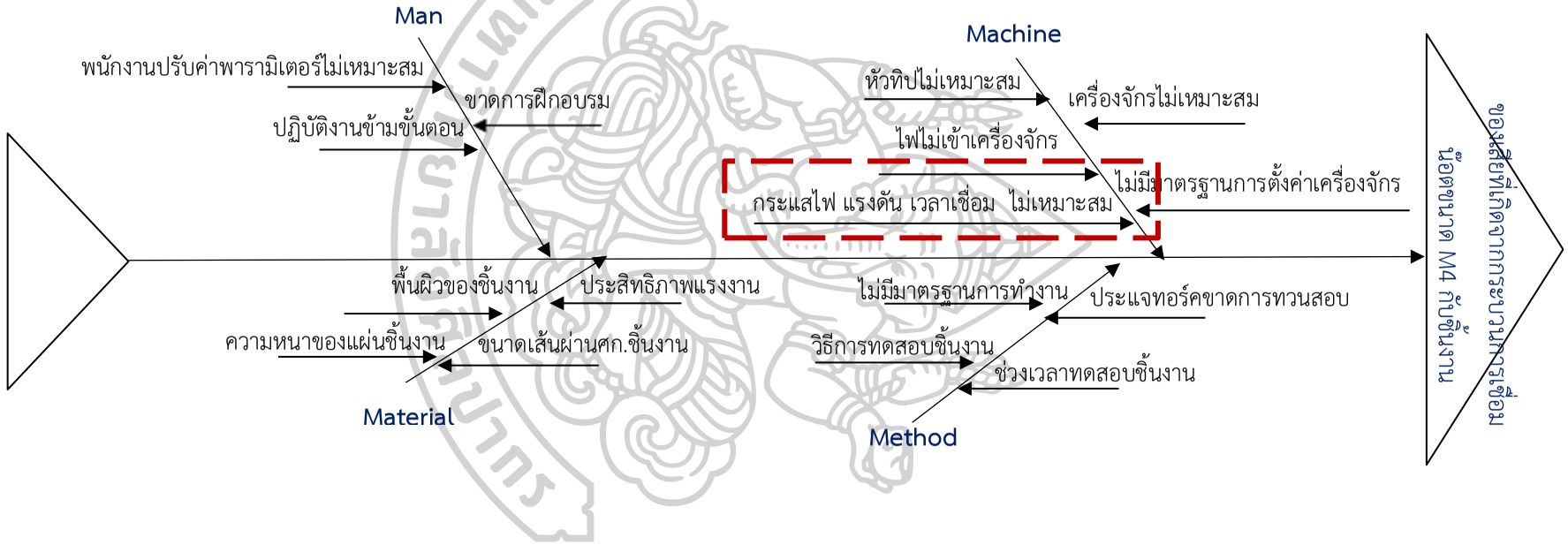
3.3.1 การวิเคราะห์ปัญหา

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานแล้วพบว่าเมื่อทำการทดสอบค่าแรงบิดของชิ้นด้วยประแจทอร์ค (Torque wrench) ซึ่งค่าแรงบิดที่ตั้งไว้ตามมาตรฐานส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากกันซึ่งอาจจะเกิดจากหลายปัจจัย ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวโดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมที่เรียกว่าแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram or Cause and Effect) มาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุเบื้องต้นเพื่อช่วยหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานสนใจจะนำมาพิจารณา

3.3.2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อกำหนดปัจจัยหลัก (Main Effect)

การวิเคราะห์สาเหตุปัจจัยที่อาจจะส่งผลทำให้เกิดของเสียในกระบวนการ ผู้วิจัยนำหลักการ 4M มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยหลักการประกอบไปด้วย Man Material Method Machine จากนั้นระบุปัจจัยที่อาจจะส่งผลทำให้เกิดของเสีย ดังภาพที่ 33

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 33 แผนผังสาเหตุของปัญหา

จากภาพที่ 33 แสดงแผนภาพการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่อาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ข้อเท็จจริงเพื่อหาปัจจัยหลักที่จะใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยผ่านการวิเคราะห์ร่วมกับผู้มีประสบการณ์ วิศวกร และพนักงานหน้าเครื่อง แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ 4 M ของปัญหาการเกิดของเสีย และการแก้ไข

การวิเคราะห์ 4 M ของปัญหาการเกิดของเสีย		
ปัจจัย	**ปัญหา**	**การดำเนินการแก้ไข**
Man	ขาดการฝึกอบรม	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	พนักงานปรับค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	ปฏิบัติงานข้ามขั้นตอน	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	ประสิทธิภาพแรงงาน	วัดจากความสามารถในการผลิตต่อวัน
Machine	ไม่มีมาตรฐานการตั้งค่าเครื่องจักร	จัดทำมาตรฐานการใช้เครื่อง
	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไม่ตรงจุดเชื่อม	ตรวจสอบความแข็งแรงของ Jig บนแท่นจับชิ้นงาน
	ไฟเข้าไม่คงที่	ติดตั้งสายไฟเข้าที่เครื่องจักรเครื่องเดียว ไม่แบ่งไปใช้ร่วมกับเครื่องอื่น
	แรงกดของหัวทิปไม่เหมาะสม	ทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสม
	กระแสไฟเชื่อมไม่เหมาะสม	ทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสม
	เวลาเชื่อมไม่เหมาะสม	ทำการทดลองหาระดับที่เหมาะสม
	หัวทิปเชื่อมไม่เหมาะสม	เปลี่ยนหัวเชื่อมและทดสอบด้วยแผ่นลอกลายคาร์บอนเทส
	ประแจทอร์คขาดการทวนสอบ	ตรวจเช็ครอบการทวนสอบ
	เครื่องจักรที่ใช้ไม่เหมาะสม	ทดสอบกับเครื่องจักรที่ใกล้เคียง

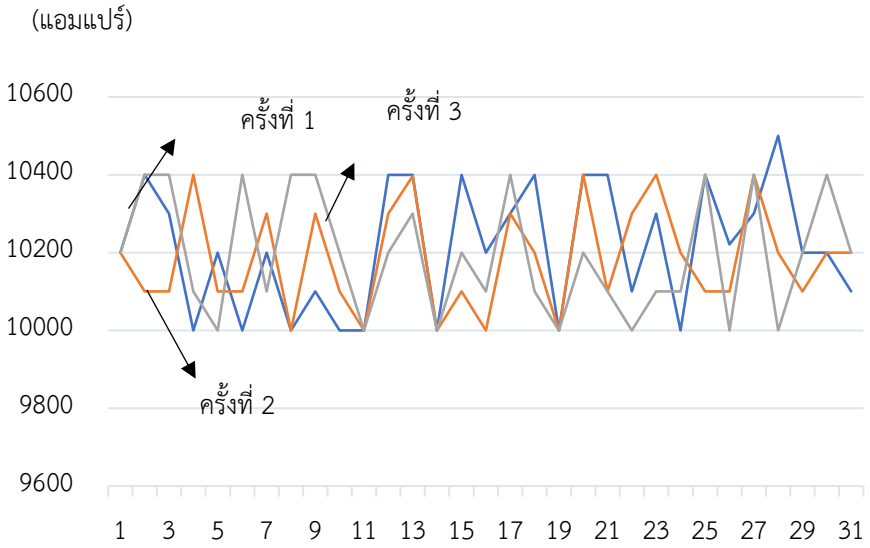
ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ 4 M ของปัญหาการเกิดของเสีย และแก้ไข (ต่อ)

การวิเคราะห์ 4 M ของปัญหาการเกิดของเสีย		
ปัจจัย	**ปัญหา**	**การดำเนินการแก้ไข**
Material	พื้นผิวชิ้นงาน	มีการตรวจสอบจากฝ่ายผลิต
	ขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน	มีการตรวจสอบจากฝ่ายผลิต
Method	ขาดการฝึกอบรม	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	พนักงานปรับค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	ปฏิบัติงานข้ามขั้นตอน	จัดอบรมให้กับพนักงาน
	ประสิทธิภาพแรงงาน	วัดจากความสามารถในการผลิตต่อวัน

จากผลการวิเคราะห์สาเหตุที่คาดว่าจะเป็นไปได้และการดำเนินการแก้ไขไปบางส่วนเบื้องต้นแล้ว เช่น การจัดการอบรมพนักงาน การตรวจเช็ครอบการทวนสอบของประแจทอร์ค การตรวจสอบความแข็งแรงของ Jig บนแท่นจับชิ้นงาน และเรื่องปัจจัยด้านหัวทิปอิเลคโทรดที่ไม่เหมาะสม ซึ่งได้เปลี่ยนหัวทิปแท่งใหม่ และทำการทดสอบด้วยแผ่นลอกลายคาร์บอนเทส ปรากฏว่าชิ้นงานยังหลุดออกจากกัน ในด้านประสิทธิภาพของแรงงาน พนักงานที่ปฏิบัติงานในสถานีที่ 1 สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามแผนการผลิตโดยไม่ตกแผนตลอดระยะเวลา 3 เดือน และสามารถส่งมอบงานไปยังสถานีต่อไปได้ตรงตามวันและเวลาส่งมอบงาน เป็นต้น ทำให้เหลือเพียงไม่กี่ปัจจัยสรุปได้ดังนี้ คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม เวลาที่ใช้ในการเชื่อม และแรงกดของหัวทิปที่ใช้ในการเชื่อม ซึ่งมีการวัดผลขณะทำการทดสอบ ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (Current Weld)

พนักงานได้ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจักรด้วยเครื่องแอมมิเตอร์พบว่าค่ากระแสไฟที่ออกมาจากเครื่องจักรเมื่อวัดค่าแล้วอยู่ในช่วงที่มาตรฐานการทำงานกำหนด แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ค่ากระแสไฟที่ได้จากเครื่องจักร

ภาพที่ 35 ตัวอย่างเครื่องวัดค่ากระแสไฟจากเครื่องจักร

2. เวลาที่ใช้ในการเชื่อม (Cycle Time)

ในการทำงานได้มีการตั้งค่าระยะเวลาในการเชื่อมของเครื่องจักรดังแสดงดังภาพที่ 36 พนักงานได้ทำการใช้เครื่องวัดความเร็วในการเชื่อม เพื่อทดสอบเวลาในการทำงานของเครื่องจักร โดยระยะเวลา Weld Time เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.22 - 1 วินาที

ภาพที่ 36 ระยะเวลาในการเชื่อมที่ตั้งค่าไว้แสดงบนจอมอนิเตอร์เครื่องจักร

3. แรงกดของหัวทิปที่ใช้ในการเชื่อม (Pressure Weld)

พนักงานได้ทำการติดตั้งเกจวัดแรงดันเพื่อเช็คค่าแรงดันที่ออกมาจากเครื่องจักรโดยมีลักษณะดังภาพที่ 37 ซึ่งค่าแรงดันอยู่ในช่วงมาตรฐานการทำงานที่กำหนด คือ 4 Kg/Cm^2

ภาพที่ 37 เกจวัดแรงดันที่ติดตั้งบริเวณเครื่องจักร

3.4 การกำหนดระดับปัจจัย

ในการออกแบบการทดลองแบบ 2 ระดับ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยตัวแปรตอบสนอง (Response) ของชิ้นงาน คือ อัตราส่วนของดีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม โดยสามารถแบ่งระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือระดับ “สูง” และระดับ “ต่ำ” จากการวิเคราะห์พบปัจจัยที่มีอิทธิพล และส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานระหว่างน็อตขนาด M4 กับชิ้นงานแผ่นเหล็ก มี 3 ปัจจัยดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ระดับปัจจัยการทดลอง 2 ระดับ

ปัจจัย	สัญลักษณ์	Number of Factor		หน่วย
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)	
1.กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม	A	10,000	10,500	mA
2.เวลาในกระบวนการเชื่อม	B	4	8	cycle
3.แรงกดของหัวทิป	C	2	4	Kg/Cm^2

3.5 การตั้งสมมติฐานการทดลอง

จากการแบ่งระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจากนั้นจากตารางที่ 19 นั้น ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานที่ใช้ในการทดลองโดยมีตัวแปร ดังนี้

α คือ เวลาที่ใช้ในการเชื่อม

β คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

γ คือ แรงกดของหัวทิปที่ใช้ในการเชื่อม

โดยที่ I, j, k และ l คือระดับปัจจัยของ α β γ ตามลำดับ และมีระดับดังนี้คือ i=1,2,...,a j=1,2,...,b k=1,2,...,c และ l=1,2,...,d

สมมติฐานที่ 1 ค่าของเวลาที่ใช้ในการเชื่อม (A) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $\alpha_i = 0$ i = 1,2,...,a H_1 : $\alpha_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 2 ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม (B) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $\beta j = 0$ j = 1,2,...,b H_1: $\beta j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 3 ค่าของแรงกดของหัวทิปที่ใช้เชื่อม (C) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $\gamma_k = 0$ k = 1,2,...,c H_1: $\gamma_k \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 4 ผลกระทบร่วมระหว่างค่าของเวลาที่ใช้ในการเชื่อม (A) และค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม (B) มีผลต่อแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ H_1: $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 5 ผลกระทบร่วมระหว่างค่าของเวลาที่ใช้ในการเชื่อม (A) และค่าของแรงกดของหัวทิปที่ใช้เชื่อม (C) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $(\alpha\gamma)_i$ k = 0 H1: $(\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 6 ผลกระทบร่วมระหว่างค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม (B) และค่าของแรงกดของหัวทิปที่ใช้เชื่อม (C) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $(\beta\gamma)$j k = 0 H_1: $(\beta\gamma)$j k $\neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

สมมติฐานที่ 7 ผลกระทบร่วมระหว่างค่าของเวลาที่ใช้ในการเชื่อม (A) ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม (B) และค่าของแรงกดของหัวทิปที่ใช้เชื่อม (C) มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมระหว่างน๊อตกับชิ้นงาน

H_0: $(\alpha\beta\gamma)$i j k = 0 H_1: $(\alpha\beta\gamma)$i j k $\neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

3.6 การออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสองระดับ

ผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่นำมาทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 2 ระดับ (2^k Factorial Experiment) เพื่อกรองเอาปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออก (Screen Factor) โดยระดับปัจจัย มี 2 ระดับ คือ “ต่ำ” และ “สูง” โดยทำการทดลองแบบสุ่ม (Random) ตามข้อบังคับของการทดลอง จากนั้นทำการทดลองผลการตอบสนองโดยให้ผลตอบสนองของการทดลองเป็นสัดส่วนของเสียต่อปริมาณการผลิต ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α =0.05) ซึ่งมีรูปแบบการทดลอง 2^k ทั้งหมด 3 ปัจจัย ซึ่งก็จะเท่ากับ 8 และกำหนดการทดลองซ้ำกัน 3 ครั้ง (3 Replicate) ดังนั้นจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 24 การทดลอง โดยใช้โปรแกรม MINITAB 18 ในการสุ่มการทดลองรูปแบบการจัดลำดับการทดลองที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ลำดับการทดลองแบบสุ่ม 2 ระดับ ด้วยโปรแกรม Minitab V.18

StdOrder	RunOrder	A	B	C	Yield %
7	1	10000	4	2	
19	2	10500	4	2	
11	3	10000	4	4	
5	4	10500	4	4	
1	5	10000	8	2	
23	6	10500	8	2	
24	7	10000	8	4	
6	8	10500	8	4	
22	9	10000	4	2	
13	10	10500	4	2	
2	11	10000	4	4	
12	12	10500	4	4	
10	13	10000	8	2	
17	14	10500	8	2	
9	15	10000	8	4	
16	16	10500	8	4	
4	17	10000	4	2	
14	18	10500	4	2	
8	19	10000	4	4	
3	20	10500	4	4	
18	21	10000	8	2	
21	22	10500	8	2	
15	23	10000	8	4	
20	24	10500	8	4	

3.7 ขั้นตอนการทำการทดลองการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลเบื้องต้น

เมื่อได้ทำการจัดลำดับการทดลองแล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดลองทั้งหมด 24 การทดลองเพื่อหาค่าตอบสนอง คือ อัตราส่วนของดีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม เมื่อได้ผลการทดลองแล้วผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม Minitab 18 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสรุปผล โดยจะทำการการวิเคราะห์ ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเสียปัญหาชิ้นงานรอยเชื่อมไม่แข็งแรงซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลกับการเกิดของเสียอย่างมีนัยสำคัญ
3. การวิเคราะห์ผลการตอบสนองที่ดีสุด (Response Optimization)

โดยขั้นตอนนี้เป็นการนำเอาค่าตอบสนอง (Response) ที่ได้จากการทำการทดลองมาวิเคราะห์ต่อเพื่อยืนยันผลของการทดลอง โดยใช้หลักการ Response Optimization เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสม จากนั้นทำการสรุปผล และนำค่าที่ได้ไปใช้ในปรับตั้งค่าเครื่องเชื่อมโปรเจคชั่นต่อไป

3.8 การออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสามระดับ

หลังจากที่ดำเนินการทำการทดลองแบบสองระดับเพื่อหาว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลกับการเกิดของเสียแล้วนั้น ลำดับถัดไปคือการนำปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดลองแบบสามระดับโดยเพิ่มระดับปัจจัยเป็นตัวระดับกลาง และทำการวิเคราะห์ผล ดังนี้

1.การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

2.ทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองที่ดีสุด (Response Optimizer) โดยขั้นตอนนี้เป็นการนำเอาค่าตอบสนอง (Response) ที่ได้จากการทำการทดลองมาวิเคราะห์ต่อโดยใช้ฟังชั่นก์ Response Optimizer ใน Minitab เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสม

เมื่อทำการทดลองสามระดับเสร็จแล้วจึงทำการสรุปผล และนำค่าที่ได้ไปใช้ในปรับตั้งค่าเครื่องเชื่อมโปรเจคชั่น และวัดผลหลังการปรับปรุงต่อไป

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

เริ่มจากการกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธี 2^k Full Factorial Design โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไข ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ จึงได้ว่าชุดการทดลอง คือ $2^3 = 8$ การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 24 การทดลอง โดยการทดลองจะจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเป็นการลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์ผล ในการทดลองจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบตัวแปรตอบสนองให้ครบทุกการทดลองและจะให้ความสนใจกับตัวที่มีอิทธิพลเป็นหลัก

ในการออกแบบการทดลองแบบ 2 ระดับ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยตัวแปรตอบสนอง (Response) ของชิ้นงาน คือ อัตราส่วนของดีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม โดยสามารถแบ่งระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือระดับ “สูง” และระดับ “ต่ำ” จากการวิเคราะห์พบปัจจัยที่มีอิทธิพลและส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมชิ้นงานระหว่างน็อตขนาด M4 กับชิ้นงานแผ่นเหล็ก มี 3 ปัจจัยดังตารางที่ 20

ตารางที่ 19 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ 2k Full Factorial Design

ขนาดตัวอย่างต่อ 1 การทดลอง (n)	จำนวนการทดลอง (N)	จำนวนชิ้นงานในการทดลองทั้งหมด (ชิ้น)
8	24	192

ตารางที่ 20 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัยการทดลองแบบ 2^k Factorial Design

ปัจจัย	สัญลักษณ์	Number of Factor		หน่วย
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)	
1.กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม	A	10,000	10,500	mA
2.เวลาในกระบวนการ	B	4	8	cycle
3.แรงกดของหัวทิป	C	2	4	Kg/Cm^2

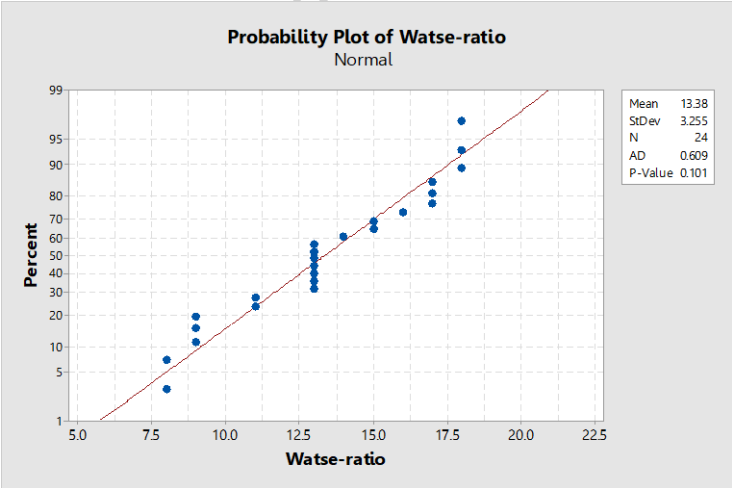
ตารางที่ 21 บันทึกผลการทดลองแบบ 2^k Factorial Design

StdOrder	RunOrder	A	B	C	Yields %
7	1	10000	2	4	62.50%
19	2	10500	2	4	75.00%
11	3	10000	4	4	75.00%
5	4	10500	4	4	62.50%
1	5	10000	2	8	87.50%
23	6	10500	2	8	25.00%
24	7	10000	4	8	0.00%
6	8	10500	4	8	0.00%
22	9	10000	2	4	0.00%
13	10	10500	2	4	25.00%
2	11	10000	4	4	37.50%
12	12	10500	4	4	0.00%
10	13	10000	2	8	0.00%
17	14	10500	2	8	87.50%
9	15	10000	4	8	87.50%
16	16	10500	4	8	0.00%
4	17	10000	2	4	12.50%
14	18	10500	2	4	0.00%
8	19	10000	4	4	0.00%
3	20	10500	4	4	75.00%
18	21	10000	2	8	12.50%
21	22	10500	2	8	75.00%
15	23	10000	4	8	37.50%
20	24	10500	4	8	0.00%

ก่อนจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองจากผลการทดลองในตารางที่ 19 โดยนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง ดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติสามารถตรวจสอบจากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของสัดส่วนของเสียของชิ้นงานโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value **มากกว่า 0.05**



ภาพที่ 38 Normality Test สำหรับค่าสัดส่วนของเสีย

จากภาพที่ 38 แสดงส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อทดสอบการแจกแจงปกติในระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α =0.050) ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

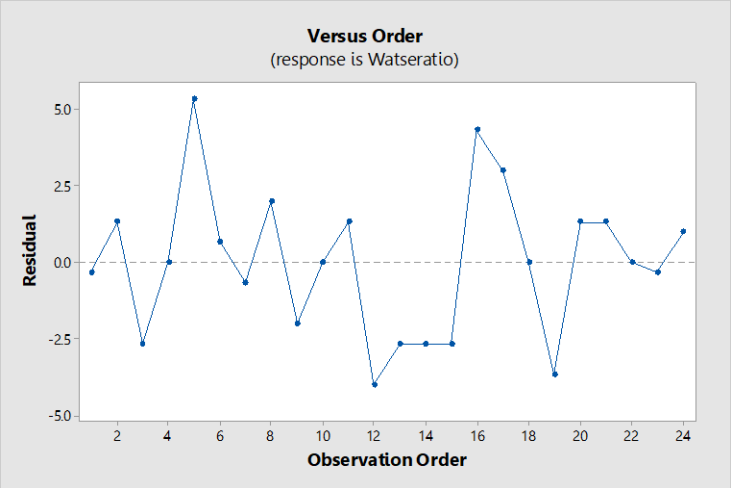
H_0: $\alpha i = 0$ เป็นการแจกแจงแบบปกติ

H_1: $\alpha i \neq 0$ ไม่เป็นการแจกแจงแบบปกติ

โดยผลการทำ Normality Test ดังภาพที่ 38 ซึ่งจากการทำ Normality Test พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.101 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นไม่ปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ข้อมูลสัดส่วนของเสียที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ

2. การตรวจสอบการเป็นอิสระของชุดข้อมูล (Independent)

การตรวจสอบความเป็นอิสระ ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จะพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Order of the data) ซึ่งไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบของข้อมูลที่แน่นอน จากแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot)

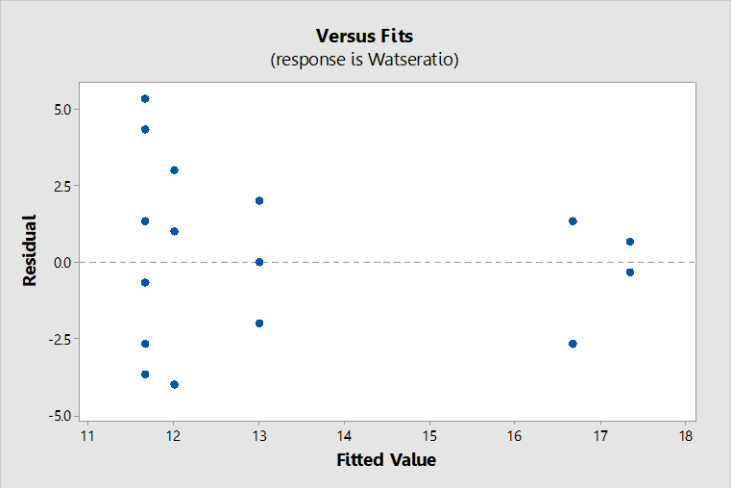


ภาพที่ 39 การตรวจสอบความเป็นอิสระของการทดลอง 2 ระดับ

จากภาพที่ 39 พบว่า ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน และการกระจายตัวไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่สามารถประมาณรูปแบบของข้อมูลที่แน่นอนได้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นอิสระต่อกัน (Independent)

3. การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) ตรวจสอบได้โดยแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของข้อมูลผลการวัดขนาดความหนา (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือการกระจายตัวที่เป็นรูปแบบของกรวยปลายเปิด แต่ควรที่จะมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน



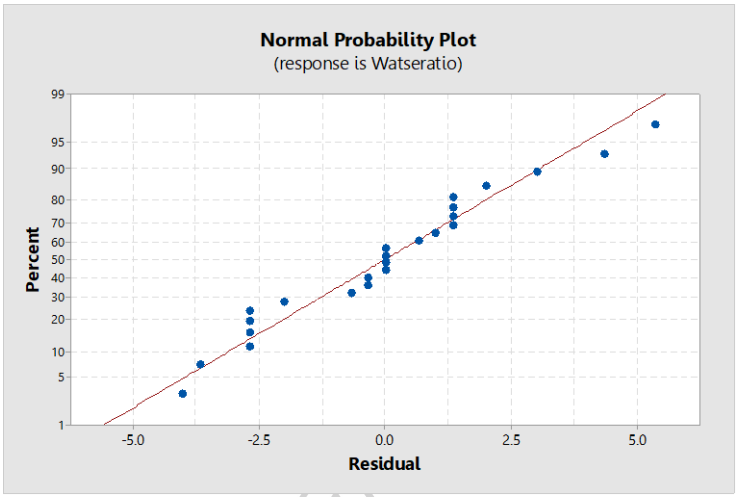
ภาพที่ 40 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fits Value ของการทดลอง 2 ระดับ

จากภาพที่ 40 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวค่าส่วนตกค้าง พบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะที่มีรูปแบบเป็นแนวโน้ม หรือการกระจายตัวที่เป็นรูปแบบของกรวยปลายเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

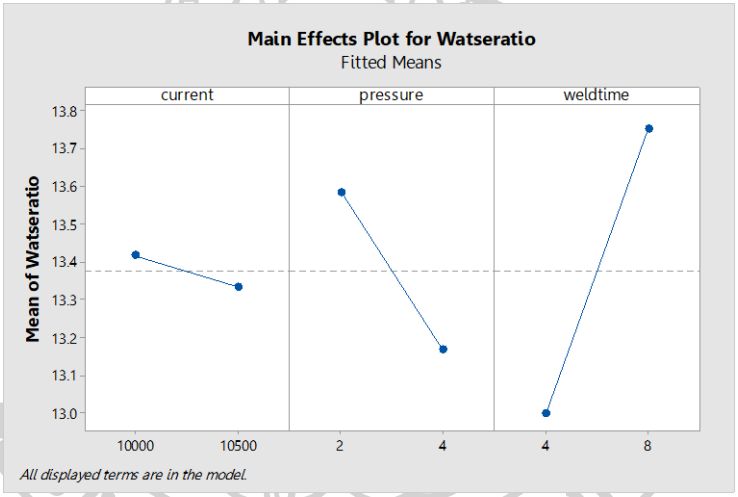
จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 3 ประการ คือมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความเสถียรของข้อมูล จึงเป็นไปตามเงื่อนไข ε_{ij}~ NID $(0,\sigma^2)$ ทุกประการ จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้

4. การวิเคราะห์ผลจากการทดลองแบบ 2^k Full Factorial Design

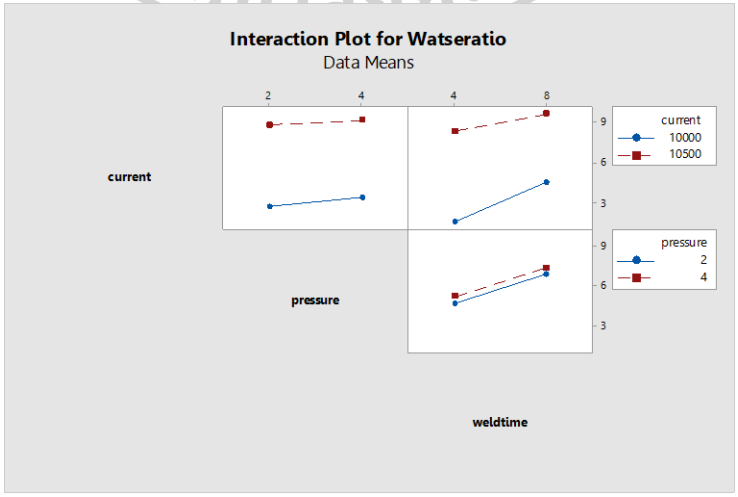
เมื่อได้ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเรียบร้อยแล้วจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่นัยสำคัญออกมาในรูปแบบของ Normal Probability Plot ดังภาพที่ 41 และแสดงผลของการออกแบบการทดลองของผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองและผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ดังภาพที่ 42 - ภาพที่ 43



ภาพที่ 41 การตรวจสอบการกระจายตัวของคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ



ภาพที่ 42 ผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ



ภาพที่ 43 อันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานของการทดลอง 2 ระดับ

ตารางที่ 22 ผลการออกแบบการทดลอง 2 ระดับเพื่อคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพชิ้นงาน

Factorial Fit: response versus					
Estimated Effect and Coefficient for response (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE-Coef	T	P
Constant		0.6615	0.0276	24.00	0.000
current	0.5729	0.2865	0.0276	10.39	0.000
pressure	0.0729	0.0365	0.0276	1.32	0.204
weldtime	0.2396	0.1198	0.0276	4.35	0.000
Current * pressure	-0.0104	-0.0052	0.0276	-0.19	0.852
Current * weldtime	-0.1354	-0.0677	0.0276	-2.46	0.026
Pressure * weldtime	-0.0521	-0.0260	0.0276	-0.94	0.359
current*pressure*weldtime	-0.0104	-0.0052	0.0276	-0.19	0.852
S =0.135015		R-sq = 89.45%		R-sq (adj) = 84.84%	

จากการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้นจากโปรแกรม Minitab เพื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าที่มีผลกับคุณภาพชิ้นงาน ที่แสดงในตารางที่ 24 พบว่า ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จะถูกกำหนด ให้เป็นปัจจัยหลัก (Main Effect) ซึ่งมีจำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ **กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม** และมีปัจจัยอิทธิพลร่วมกัน 1 คู่ ได้แก่ **กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟ**

4.2 ผลการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design

หลังจากทำการทดลองเพื่อให้ทราบว่าปัจจัยหลักข้างต้นมีผลต่อกระบวนการผลิตทำให้เกิดของเสียแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญมาหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเพื่อกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการทำงานในปัจจุบัน ด้วยการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design โดยชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 25 ซึ่งจะสามารถคำนวนการทดลองได้จาก $3^2 = 9$ การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 23 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design

ขนาดตัวอย่างต่อ 1 การทดลอง (n)	จำนวนการทดลอง (N)	จำนวนชิ้นงานในการทดลองทั้งหมด (ชิ้น)
8	27	216

ตารางที่ 24 ปัจจัยนำเข้าและการแบ่งระดับปัจจัยการทดลองแบบ 3^k Factorial Design

ปัจจัย	สัญลักษณ์	Number of Factor			หน่วย
		ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง	
1.กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม	A	10,000	10,250	10,500	mA
2.เวลาในกระบวนการ	B	4	6	8	Cycle

ตารางที่ 25 ผลการทดลองแบบ 3^k Factorial Design

StdOrder	RunOrder	A	B	Yield %
6	1	10250	8	62.50
10	2	10000	4	12.50
23	3	10250	6	75.00
5	4	10250	6	75.00
22	5	10250	4	37.50
20	6	10000	6	25.00
11	7	10000	6	50.00
14	8	10250	6	62.50
21	9	10000	8	87.50
13	10	10250	4	50.00
19	11	10000	4	0.00

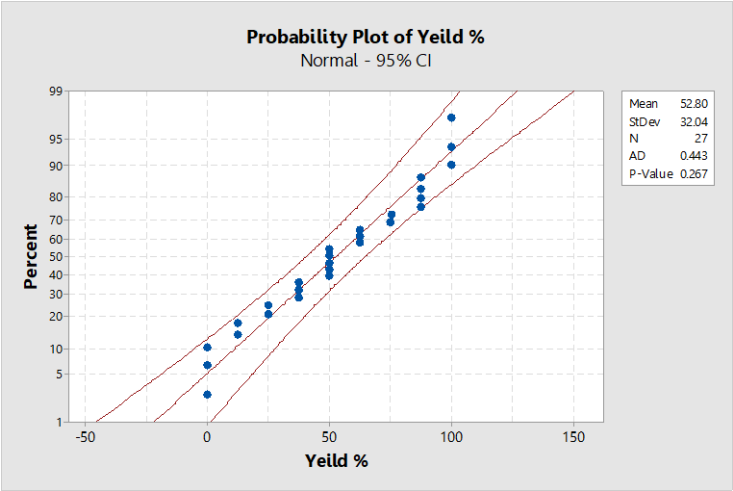
ตารางที่ 25 ผลการทดลองแบบ 3^k Factorial Design (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	A	B	Yield %
24	12	10250	8	87.50
3	13	10000	8	62.50
15	14	10250	8	87.50
9	15	10500	8	87.50
18	16	10500	8	75.00
27	17	10500	8	100.00
26	18	10500	6	75.00
7	19	10500	4	37.50
1	20	10000	4	25.00
25	21	10500	4	0.00
8	22	10500	6	75.00
4	23	10250	4	12.50
17	24	10500	6	12.50
16	25	10500	4	50.00
2	26	10000	6	37.50
12	27	10000	8	100.00

มหาวิทยาลัยศิลปากร

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติสามารถตรวจสอบจากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของสัดส่วนของเสียของชิ้นงานโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value **มากกว่า 0.05**



ภาพที่ 44 การตรวจสอบการกระจายตัวของการทดลอง 3 ระดับ

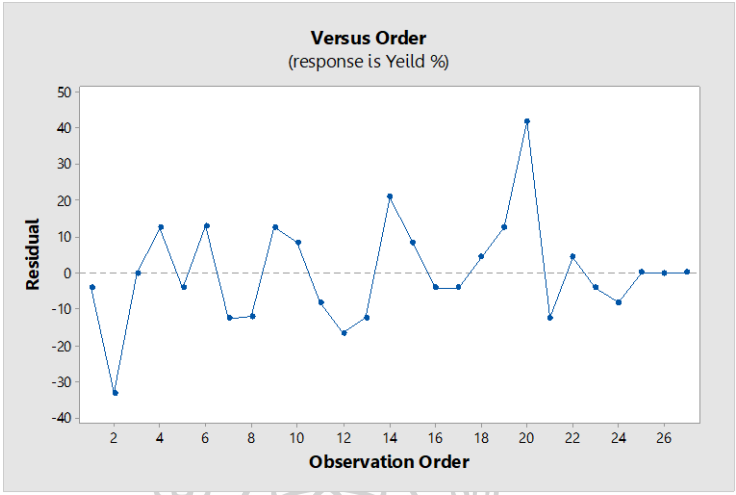
จากภาพที่ 44 แสดงส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อทดสอบการแจกแจงปกติในระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α =0.050) ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

H_0: $\alpha_i = 0$ เป็นการแจกแจงแบบปกติ

H_1: $\alpha_i \neq 0$ ไม่เป็นการแจกแจงแบบปกติ

โดยผลการทำ Normality Test ดังภาพที่ 44 ซึ่งจากการทำ Normality Test พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.267 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นไม่ปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ข้อมูลสัดส่วนของเสียที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ

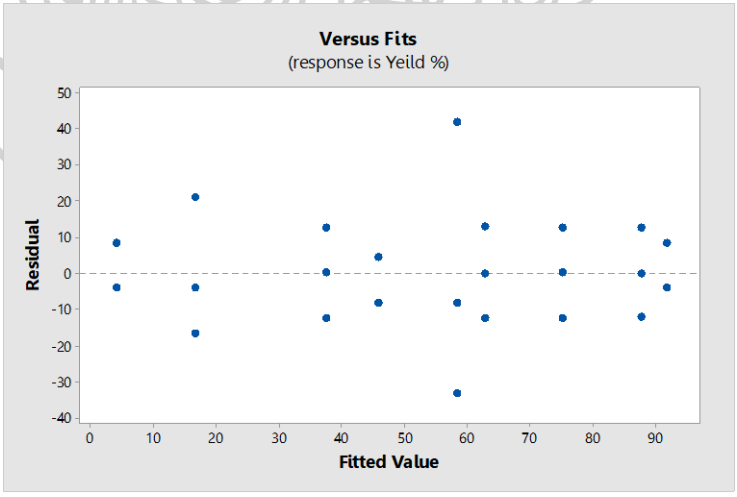
2. การตรวจสอบการเป็นอิสระของชุดข้อมูล (Independent)



ภาพที่ 45 การตรวจสอบความเป็นอิสระของการทดลอง 3 ระดับ

จากภาพที่ 45 พบว่า ค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน และการกระจายตัวไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่สามารถประมาณรูปแบบของข้อมูลที่แน่นอนได้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นอิสระต่อกัน (Independent

3. การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)



ภาพที่ 46 ค่ากระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fits Value ของการทดลอง 3 ระดับ

จากภาพที่ 46 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวค่าส่วนตกค้าง พบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะที่มีรูปแบบเป็นแนวโน้ม หรือการกระจายตัวที่เป็นรูปแบบของกรวยปลายเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียร

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดทั้ง 3 ประการ คือมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความเสถียรของข้อมูล จึงเป็นไปตามเงื่อนไข ε_{ij}~ NID $(0,\sigma^2)$ ทุกประการ จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้

ภาพที่ 47 ตัวอย่างชิ้นงานจากการทดลอง 3^k Full Factorial Design

ภาพที่ 48 การทดลอง 3^k Full Factorial Design

ตารางที่ 26 ผลการออกแบบการทดลอง 3 ระดับเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการ

Factor Information

Factor	Levels	Values
Current	3	10000, 10250, 10500
Cycle	3	4, 6, 8

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	21896	2736.9	9.46	0.000
Linear	4	18392	4598.1	15.89	0.000
Current	2	2523	1261.6	4.36	0.029
Cycle	2	15869	7934.5	27.42	0.000
2-Way Interactions	4	3503	875.8	3.03	0.045
Current*Cycle	4	3503	875.8	3.03	0.045
Error	18	5209	289.4		
Total	26	27104			

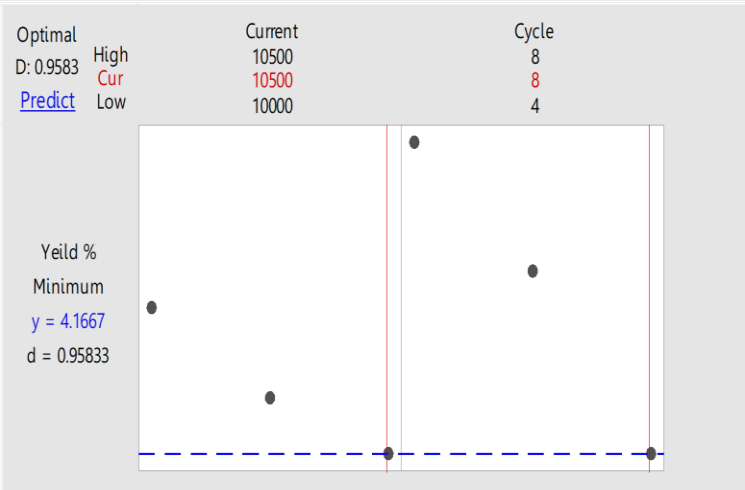
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
17.0109	80.78%	72.24%	56.76%

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.3 ผลการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Optimization

จากผลการทดลองจากภาพที่ 49 พบว่าค่าระดับของแต่ละปัจจัยดังนี้ กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม มีค่าเท่ากับ 10,500 mA และเวลาในกระบวนการเชื่อมเท่ากับ 8 cycle หรือ 1.76 วินาที



ภาพที่ 49 ผลค่ากราฟตอบสนองระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ตารางที่ 27 Output Optimize Point

Response Optimization						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
	Minimize	0	0	100	1	1
A = 10500						
B = 8						
Predicted Response						
response = 4.1677			desirability = 0.95833			
Composite Desirability = 0.95833						

ตารางที่ 28 ผลสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบปุ่ม

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
กระแสไฟฟ้า	10,500	mA
เวลาเชื่อม	8	Cycle

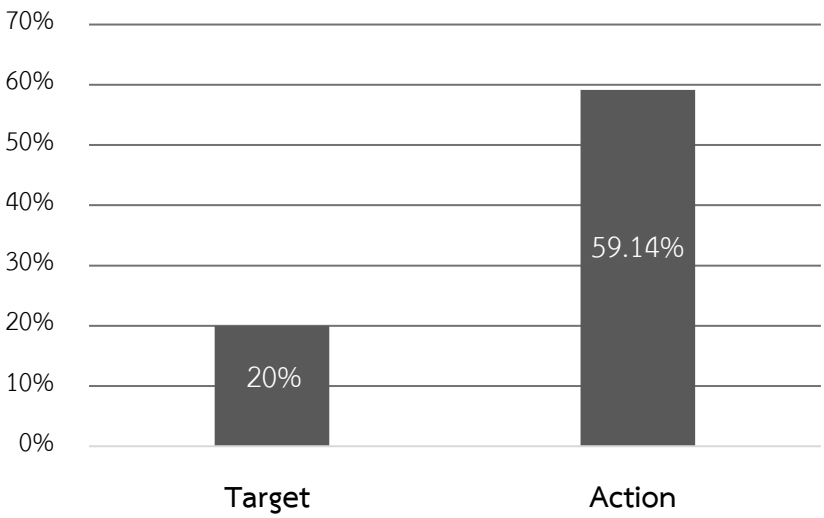
4.4 ผลการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

จากการใช้หลักการ Response Optimizer ในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม เมื่อได้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดตามภาพที่ 49 เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิจัยว่าสามารถลดของเสียปัญหาชิ้นงานเชื่อมไม่ติด ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบและกำหนดค่าตามระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จากนั้นนำข้อมูลจำนวนของเสียก่อนและหลังการทำการวิจัย มาทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังทำการปรับปรุง

ตารางที่ 29 ผลเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้เพื่อเปรียบเทียบ ก่อนและหลัง

จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นก่อน-หลังปรับปรุง ชิ้นงาน M4		
รายละเอียด		สัดส่วน
1	ยอดของเสียก่อนปรับปรุง	9.52 %
2	ยอดของเสียหลังปรับปรุง	3.89 %
อัตราส่วนการปรับปรุงรวม		59.14 %

จากตารางที่ 29 สรุปได้ว่าจำนวนของเสียจากกระบวนการเชื่อมชิ้นงานโดยก่อนเริ่มปรับปรุงพบว่ามีจำนวนเท่ากับของเสียเท่ากับ 9.52% ของยอดผลิตทั้งหมด จากการวิเคราะห์ Response Optimization เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากโปรแกรม MINITAB 18 พบว่าสัดส่วนของเสียลดลงหลังปรับปรุงเหลือ 3.89% ของยอดผลิตทั้งหมดสามารถลดสัดส่วนของเสียเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงลดลงถึง 59.14% สามารถสรุปเป็นแผนภูมิดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบของเสียก่อน – หลังปรับปรุง

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดปริมาณของเสียในกระบวนการเชื่อมต้านทานแบบจุดในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D ที่มีน๊อตขนาดต่าง ๆ ซึ่งขนาด M4 เกิดของเสียมากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์สะสมเท่ากับ 9.52% ผู้วิจัยเริ่มทำการศึกษาจากการระดมความคิด (Brainstorming) ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญเพื่อค้นหาปัจจัยสำคัญที่เป็นเหตุต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการเชื่อมไม่ติด ปรากฏสาเหตุหลักเบื้องต้น 3 ประการ คือ แรงดันลมที่ใช้กดลงบนขึ้นงานขณะทำการเชื่อม กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อม จากนั้นนำปัจจัยดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจว่าปัจจัยใดส่งผลกระทบกับปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบการทดลองแบบ แบบ 2^k Full Factorial Design ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α=0.05) และเมื่อทราบปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับปัญหาเรียบร้อยแล้ว จึงนำปัจจัยดังกล่าวมาทำการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α =0.05) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยและทดลอง หลังจากนั้นสุ่มตรวจชิ้นงานจากการผลิตตามค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการปรับปรุง พบว่าผลที่ได้จากการปรับปรุงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่วางเป้าหมายในการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอย่างน้อย 20% ดังนี้

5.1.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ในการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Full Factorial Design ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α =0.05) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยในการเชื่อมผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วยน็อตขนาด M4 คือ กระแสไฟฟ้าขณะทำการเชื่อมมีระดับที่เหมาะสม คือ 10,500 mA และเวลาในการปล่อยกระแสไฟขณะเชื่อมมีระดับที่เหมาะสม คือ 8 cycles หรือ 1.76 วินาที

5.1.2 ผลที่ได้หลังการปรับปรุง

หลังจากได้ค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปใช้ในการผลิตจริง และติดตามผลหลังการปรับปรุง พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตได้ถึง 59.14% ซึ่งบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ที่ 20% และยังช่วยลดมูลค่าความสูญเสียจากการเกิดของเสีย และส่งผลให้องค์กรมีผลกำไรที่มากขึ้น ในด้านกระบวนการผลิตเป็นการสร้างมาตรฐานในการทำงานใหม่ และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ไม่ได้วิเคราะห์ปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์บกพร่อง เช่น การตรวจสอบคุณภาพของแผ่นเหล็กและตัวน๊อต อายุการใช้งานของเครื่องจักร และหัวทิปอิเลคโทรด และสภาพแวดล้อมในกระบวนการ ซึ่งในการขยายผลงานวิจัยครั้งต่อไปควรจะต้องคำนึงในด้านดังกล่าว

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 30 จำนวนของเสียแต่ละลำดับการทดลอง 2 ระดับ

StdOrder	RunOrder	A	B	C	Quality of Part (piece)
7	1	10000	2	4	3
19	2	10500	2	4	2
11	3	10000	4	4	2
5	4	10500	4	4	3
1	5	10000	2	8	1
23	6	10500	2	8	6
24	7	10000	4	8	8
6	8	10500	4	8	8
22	9	10000	2	4	8
13	10	10500	2	4	6
2	11	10000	4	4	5
12	12	10500	4	4	8
10	13	10000	2	8	8
17	14	10500	2	8	1
9	15	10000	4	8	1
16	16	10500	4	8	8
4	17	10000	2	4	7
14	18	10500	2	4	8
8	19	10000	4	4	8
3	20	10500	4	4	2
18	21	10000	2	8	7
21	22	10500	2	8	2
15	23	10000	4	8	5
20	24	10500	4	8	8

ตารางที่ 31 จำนวนของเสียแต่ละลำดับการทดลอง 3 ระดับ

StdOrder	RunOrder	A	B	Quality of Part (piece)
6	1	10250	8	1
10	2	10000	4	2
23	3	10250	6	7
5	4	10250	6	8
22	5	10250	4	7
20	6	10000	6	5
11	7	10000	6	4
14	8	10250	6	6
21	9	10000	8	4
13	10	10250	4	8
19	11	10000	4	4
24	12	10250	8	0
3	13	10000	8	2
15	14	10250	8	3
9	15	10500	8	1
18	16	10500	8	0
27	17	10500	8	0
26	18	10500	6	4
7	19	10500	4	7
1	20	10000	4	8
25	21	10500	4	5
8	22	10500	6	4
4	23	10250	4	7
17	24	10500	6	3
16	25	10500	4	6
2	26	10000	6	5
12	27	10000	8	3

รายการอ้างอิง

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2561). โ**ครงการเตรียมความพร้อมและสร้างเครือข่ายความร่วมมือภาคอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อรองรับประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (*AEC*).** สืบค้นเมื่อ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก http://www.dip.go.th/Portals/0/AEC/SWOT_Analysisของอุตสาหกรรมรายสาขา.pdf

จิรวุฒิ โลหภาษัย. (2548). **การแบ่งระดับคุณภาพของรอยเชื่อมชนิดความต้านทานแบบจุดจากสัญญาณอะคูสติกอิมิชชั่น**. วศ.ม.,วิศวกรรมการเชื่อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์,. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. สืบค้นเมื่อ เดือนเมษายน พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก https://tdc.thailis.or.th/tdc/dccheck.php?Int_code=54&RecId=10132&obj_id=30003&showmenu=no.th

ฉลอง สีแก้วสิ่ว. (2552). **Design of Experiment.** สืบค้นเมื่อ เดือนเมษายน พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก http://www.geocities.ws/Chalong_sri/why_DOE

ณรัณ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และศุภอัษฎ์ พันศิริพัฒน. (2548). **การสร้างตัวแบบทางสถิติเพื่อพัฒนาแบบจำลองกระบวนการเชื่อมแบบจุด**. วศ.บ.อุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีฯ,. มหาวิทยาลัยศิลปากร. หอสมุดมหาวิทยาลัยศิลปากร. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563.

ปัณณทัต จำปากุล. (2561). **หลักการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding).** สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก https://www.slideshare.net/champakulutm_campaign=profiletracking&utm_meDium=sssite&utm_source=ssslideview.

ปาโก้ เอ็นจิเนียริ่ง. (2560). **เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด(7 Qc Tools)**. สืบค้นเมื่อ เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.pakoengineering.com/blog/2017/เครื่องมือคุณภาพ-7-ชนิด-7-qc-tools/

ปาพจนี ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา. (2561). **การออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์**. วศ.บ.,การจัดการงานวิศวกรรม,คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีฯ. มหาวิทยาลัยศิลปากร. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/2110.

ปารเมศ ชุติมา. (2545). **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประจักษ์ อ่างบุญตา. (2547). **การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเหนียวด้วยอะคูสติกอิมิชชั่น**.. วศ.ม.,วิศวกรรมการเชื่อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก https://tdc.thailis.or.th/tdc/dccheck.php?Int_code=54&RecId=8431&obj_id=23969&showmenu=no

พัชระ กัญจนกาญจน์. (2549). **การลดจำนวนชิ้นงานเกิดครีบในกระบวนการเชื่อมโปรเจ็คชั่น ของชิ้นส่วนรถยนต์**.. วศ.ม.,วิศวกรรมคุณภาพ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,.มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก http://newtdc.thailis.or.th/docview.aspx?tdcid.=75258.

พิชิตพล อยู่พะเนียด. (2561). **การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการลดของเสียของกระบวนการอบนึ่งยางล้อรถยนต์กรณีศึกษา บริษัทตัวอย่าง**. วศ.ม.การจัดการงานวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีฯ, มหาวิทยาลัยศิลปากร, สืบค้นเมื่อ เดือนเมษายน พ.ศ. 2563.สืบค้นได้จาก http://ithesisir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/2111

มนตรี พิพัฒน์ไพบูลย์และและพชร หงษาครประเสริฐ. (2559). **การลดของเสียในโรงงานผลิตอุปกรณ์ต่อพ่วงรถแทรกเตอร์โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง.** วารสารนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 12 : วิจัยและนวัตกรรมกับการพัฒนาประเทศ, หน้า 318-329. สืบค้นเมื่อ เดือนเมษายน พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.conference.nu.ac.th/nrc12 / downloadPro.php?pID=65&file=65.pdf

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. (2539). **งานเชื่อมจุด กระแสไฟและเวลาที่ใช้.** กรุงเทพฯ: สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น.

โยธิน จันทร์ทอง, ภูวเมษวร์ แสงระยับ และกรรณชัย กัลป์ยาศิริ. (2556). **การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มสำหรับการเชื่อมน๊อตขนาด*M*8กับเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด*SPHC*270.** การประชุมวิชาการขายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2556, วันที่ 12-18 ตุลาคม พ.ศ.2556. ชลบุรี. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/TWIT015.pdf.

เรืองลักษณ์ บุตรเพ็ชร, จุฑาวรรณ อ้นสุวรรณ และธิดาเดียว มยุรีสวรรค์. (2560). **เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด (7 Quality Control Tools).** สืบค้นเมื่อ เดือนเมษายน พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก http://sc2.kku.ac.th/stat/statweb/images/Eventpic/60/Seminar/02_13_-7-.pdf.th

วันเฉลิม วรรณสถิตย์. (2559). **เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tools).** สืบค้นเมื่อ เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก http://econs.co.th/index.php/2016/07/29/7-qc-tools/

วิทยาลัยเทคโนโลยีมิตรพลบริหารธุรกิจ. (ม.ป.ป.). **การนำเสนอข้อมูลด้วยแผนภูมิหรือกราฟ**. [เว็บบล็อก].สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก www.totomoji7.weebly.com/

วรรณา ยงพิศาลพบ. (2562). **แนวโน้มเศรษฐกิจ ตอน อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์.** สืบค้นเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2563.สืบค้นได้จาก https://www.krungsri.com/bank/getmedia/352ec633-d54a-45ef-ae6d-d3b8c3602417/IO_Auto_Parts_190816_TH_EX.aspx.

ศุภชัย นาทะพันธ์. (2551). **การควบคุมคุณภาพ**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น บมจ.

สถาบันยานยนต์. (2561). **การส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์โต15.5% มูลค่า1.9หมื่นล้านเหรียญสหรัฐฯ**. สืบค้นเมื่อ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2563. สืบค้นได้จาก http://www.thaiauto.or.th/2012/th/news/news-detail.asp?news_id=4101.

สมบรูณ์ เต็งหงส์เจริญ, เจริญ พรหมคชสุต และบัณฑิต ใจชื่น. (2532). **การเชื่อมโลหะ1**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.

สุชาดา มะโนชัย และสมเกียรติ จงประสิทธิ์พร. (2556). **การพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการเชื่อมแบบจุดโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาฐานโช๊คอัพ.** การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12, วันที่ 28 มกราคม 2554. ขอนแก่น. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563. .สืบค้นได้จาก https://gsbooks.gs.kku.ac.th/55/cdgrc13/files/pmo4.pdf.

สุประดิษฐ์ วังพฤกษ์. (ม.ป.ป). **หลักการเชื่อมไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก http://supradit.in.th/contents/metal/Data/2/2.html.

อาทิตย์ ติรณสวัสดิ์. (2554). **การออกแบบการทดลองเพื่อลดปริมาณข้อบกพร่องประเภทน๊อตเชื่อมหลุดในกระบวนการเชื่อความต้านทานแบบจุด**. วศ.ม.วิศวกรรมระบบการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์,. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. สืบค้นเมื่อ เดือนมีนาคม พ.ศ.

2563.สืบค้นได้จาก http://newtdc.thailis.or.th/docview.aspx?tdci d=78
284

เอบีออลเทคโน. (ม.ป.ป.). **แรงบิด (Torque) คืออะไร.** สืบค้นเมื่อ เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2563 สืบค้นได้จาก www.aballtechno.com/article/35/แรงบิด-torque-คืออะไร.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวจิดาภา เบ้าบัวเงิน
วัน เดือน ปี เกิด	27 มิถุนายน พ.ศ. 2540
สถานที่เกิด	จ.ชลบุรี อ.ศรีราชา
วุฒิการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา :โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงเสนี) ๒ 333 ถนนนวมินทร์ แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม จ.กรุงเทพมหานคร ระดับอุดมศึกษา : วศ.บ. อุตสาหการ มหาวิทยาลัยศิลปากร เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อ.เมือง จ.นครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	7/111 หมู่บ้านมโนรมย์ 4 ซอย 1 แขวงคลองสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10510
ผลงานตีพิมพ์	A Critical Study of Transportation Cost in Inland Road Transportation Business (TCI 2020) A Study of the Machinery Characteristics Requirement for the Food processing and Pharmaceutical Industries using Quality Function Deployment Technique (TCI 2018)
รางวัลที่ได้รับ	-

มหาวิทยาลัยศิลปากร