



การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการตีแผ่วงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบ
เชื่อมแบบบาร์ร้อน

โดย

นางสาวพิไลพร วงษ์กัณหา

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบ
เชื่อมแบบบาร์ร้อน

โดย

นางสาวไพไลพร วงษ์กัณหา



การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

PARAMETER OPTIMIZATION OF THE FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT
BOARD ATTACHMENT PROCESS IN HOT AIR WELDING SYSTEM

BY

MISS PILAIPORN WONGKANHA



AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN
INDUSTRIAL DEVELOPMENT
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2016
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

การค้นคว้าอิสระ

ของ

นางสาวพิไลพร วงษ์กัณหา

เรื่อง

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการตีแผ่ผนังวงจรมิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบเชื่อมแบบบาร์ร้อน

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

ประธานกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรวรรณ คล้อยกยันต์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ



(รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร)

กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรัตน์ กังสัมฤทธิ์)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ วงศ์กาญจน์)

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการตีแผ่ผนังวงจรมิมพ์ แบบยึดหยุ่นในระบบเชื่อมแบบบาร์ร้อน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพิไลพร วงษ์กัณหา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยมุ่งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมประสาน เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดข้อบกพร่องของชิ้นงาน คุณภาพของงานที่ได้ขึ้นอยู่กับ การควบคุมอุณหภูมิให้ เป็นไปตามโปรไฟล์เวลา – อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องมือคุณภาพแผนภาพก้างปลาในการ วิเคราะห์หาเหตุที่มีแนวโน้มที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน วิเคราะห์ข้อบกพร่องและ ผลกระทบ จากนั้นนำปัจจัยที่มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน อุณหภูมิช่วง ตะกั่วหลอมเหลว ช่วงเวลาเตรียมความร้อน และช่วงเวลาตะกั่วหลอมเหลว ไปทำการทดสอบเพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อการออกแบบการ ทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป เพื่อหาความสัมพันธ์และช่วงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของ เครื่องจักร ซึ่งได้ชุดโปรไฟล์เวลา – อุณหภูมิที่เหมาะสมดังนี้ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน 300 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว 500 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาเตรียมความร้อนอยู่ที่ 6 วินาที และช่วงเวลาตะกั่วหลอมเหลวอยู่ที่ 7 วินาที ผลการปรับปรุงพบว่า ค่าความแข็งแรงของการยึดติด แบบดึงลอกของเครื่องจักรที่มีการติดตั้งใหม่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับเครื่องจักรที่ใช้ในปัจจุบัน

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมประสาน Hot air welding system, หลักการออกแบบการทดลอง, หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม, เครื่องมือคุณภาพแผนภาพก้างปลา

Independent Study Title	PARAMETER OPTIMIZATION OF THE FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT BOARD ATTACHMENT PROCESS IN HOT AIR WELDING SYSTEM
Author	Miss Pilaiporn Wongkanha
Degree	Master of Engineering
Department/Faculty/University	Industrial Development Faculty of Engineering Thammasat University
Independent Study Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wuthichai Wongthatsaneorn
Academic Years	2016

ABSTRACT

This research aims to optimize parameters of the flexible printed circuit board attachment process in hot air welding system to improve performance and reduce defect goods. The quality of the flexible printed circuit board attachment process is depended on profile of hot bar, which related to time and temperature. First, the parameters that can possibility affect the product's quality were determined and analyzed using Cause & Effect Diagram. The parameters are pre heat temperature, solder melting temperature, time of pre heat and time during solder melt. Second, full factorials design (2^4) was performed and the proper parameters setting was found using response surface technique. The appropriate setting of pre heat temperature, solder melting temperature, time used at pre and time used during solder melting are 300°C, 500°C, 6 second and 7 second respectively. Then, work procedures were adjusted according to new appropriate parameter settings of each factor. The result showed that new hot air welding system machine yields the average peel strength that is similar to the existing machine.

Keywords: Hot Air welding system, Principles of experimental design, Find optimizing parameters, Cause & effect diagram

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการค้นคว้าอิสระครั้งนี้บรรลุล่วงวัตถุประสงค์อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระที่
กรุณาให้แนวคิดคำปรึกษาตลอดการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบงานวิจัย
ครั้งนี้ คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรัตน์
กังสัมฤทธิ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงที่เป็นประโยชน์สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชมพูนุช พิกุล เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยสนับสนุนและให้การช่วยเหลือในการตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยฉบับ
นี้ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ ให้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ฟาบริเนท จำกัด ที่ให้ทำการค้นคว้าและเก็บข้อมูลงานวิจัย
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกฝ่ายงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องช่วยเหลือให้การวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

นางสาวไพไลพร วงษ์กัณหา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(7)
สารบัญภาพ	(9)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	7
1.3.1 การดำเนินงาน	7
1.3.2 เครื่องมือสำหรับการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน	7
1.3.3 เครื่องมือวัด	7
1.3.4 เกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength)	8
1.3.5 การวิเคราะห์หาปัจจัยเชิงสถิติ	8
1.4 วิธีการดำเนินงาน	8
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	9
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9

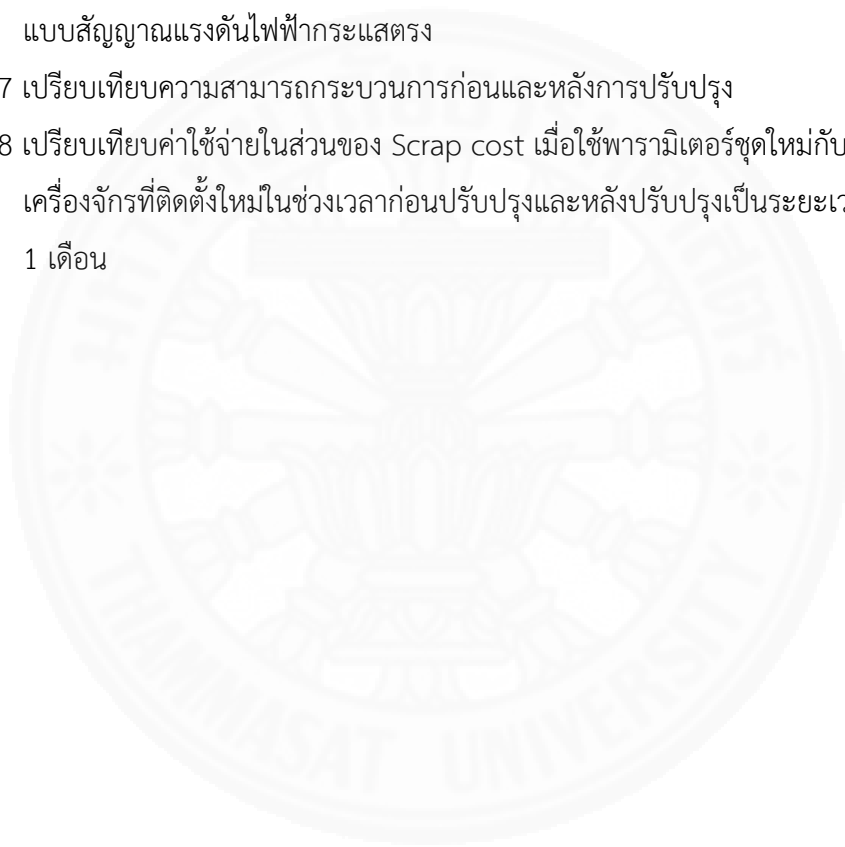
บทที่ 2	วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1	ผลิตภัณฑ์แผ่นวงจรพิมพ์	10
2.1.1	ชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น	11
2.2	พื้นฐานของระบบบาร์ร้อน	12
2.2.1	ระบบบาร์ร้อนคืออะไร	12
2.3	ชุดเครื่องมือในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพ	17
2.3.1	แผนผังสาเหตุและผล	17
2.3.2	แผนภาพพาเรโต	18
2.3.3	แผนภูมิควบคุม	19
2.4	การออกแบบการทดลองคืออะไร	19
2.4.1	ลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง	21
2.4.2	รูปแบบการทดลอง	25
2.5	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	26
2.5.1	การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	26
2.5.2	การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effects Model	28
2.5.3	การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง	30
2.5.4	รูปทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล	31
2.5.5	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ	33
2.5.6	ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล	36
2.6	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	41
3.1	การศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการเพื่อระบุปัญหา	41
3.1.1	กระบวนการผลิตเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ	41
3.1.2	กระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในสายการผลิตปกติ	45
3.1.3	พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการควบคุมเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน	48
3.1.4	คุณสมบัติชิ้นงานที่ดี	49
3.2	การคัดเลือกปัจจัยในการทดลอง	49

3.2.1 การพิจารณาคัดเลือกปัจจัย	50
3.2.2 สรุปปัจจัยที่คัดเลือกมาดำเนินการออกแบบการทดลอง	53
3.3 การกำหนดระดับของปัจจัย	53
3.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้น	54
3.5 การระบุตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง	57
3.6 การวัดตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง	57
3.7 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง	58
3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น	58
3.9 ขั้นตอนการทำการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อตรวจสอบ ความสัมพันธ์ของกระบวนการ	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	59
4.1 บันทึกผลการทดลอง	59
4.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล	61
4.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	70
4.4 การยืนยันผลการทดลอง	72
4.5 การติดตามผลการทดลอง	77
4.6 การควบคุมกระบวนการ	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการวิจัย	82
5.2 สรุป	82
5.3 ข้อเสนอแนะ	83
รายการอ้างอิง	84
ประวัติผู้เขียน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ติดด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อนเครื่องปัจจุบัน และเครื่องที่ติดตั้งใหม่	6
1.2 ระยะเวลาการดำเนินงาน	9
2.1 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน	25
2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเดียวแบบจำลองผลกระทบคงที่	26
2.3 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	27
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบ Fixed Effects Model	30
2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบ Fixed Effects	31
3.1 ค่า Peel Strength ของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนที่นำเคลือบโลหะบัดกรีเองด้วยการ Print Screen Solder Paste	44
3.2 ค่า Peel strength โดยเฉลี่ยของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนที่ใช้อยู่ปัจจุบัน	44
3.3 กราฟแสดงค่าทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก เปรียบเทียบระหว่างเครื่องจักรปัจจุบันกับเครื่องจักรใหม่โดยทดสอบกับชิ้นงานตัวอย่าง 20 ชิ้น	45
3.4 โปรไฟล์ของเครื่อง Hot Bar Soldering System ที่ติดตั้งอยู่ในไลน์การผลิตปัจจุบัน	48
3.5 สรุปการพิจารณาคัดเลือกปัจจัย	52
3.6 ปัจจัยที่ถูกคัดเลือกโดยการพิจารณาจากแผนภาพก้างปลา	53
3.7 ขอบเขตของระดับปัจจัยที่พิจารณา	54
3.8 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้นชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	55
3.9 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้นชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	56
4.1 บันทึกผลการทดลองชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	59
4.2 บันทึกผลการทดลองชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	60

4.3 ผลจากการทดลองเชิงแพทโทเรียลเต็มรูป 2K ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	70
4.4 ผลจากการทดลองเชิงแพทโทเรียลเต็มรูป 2K ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	70
4.5 การทำทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง (n=30) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	72
4.6 การทำทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง (n=30) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	73
4.7 เปรียบเทียบความสามารถกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง	77
4.8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในส่วนของ Scrap cost เมื่อใช้พารามิเตอร์ชุดใหม่กับ เครื่องจักรที่ติดตั้งใหม่ในช่วงเวลาก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงเป็นระยะเวลา 1 เดือน	78



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ผลิตภัณฑ์เครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ	2
1.2 ผลิตภัณฑ์ที่มีการประกอบตัวรับและตัวส่งสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล	2
1.3 กราฟแสดงค่าอัตราผลิตผลดีในการผลิตรอบที่หนึ่ง ของผลิตภัณฑ์เครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ และอัตราจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นเรียงตามประเภทของของเสีย	5
1.4 เครื่องมือสำหรับการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน	7
1.5 เครื่องมือ Peel Test Machine ในการทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก	7
2.1 ตัวอย่างแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น	10
2.2 โครงสร้างพื้นฐานแบบหน้าเดียว	11
2.3 โครงสร้างพื้นฐานแบบสองหน้า	11
2.4 โครงสร้างพื้นฐานแบบหลายชั้น	12
2.5 ระบบบาร์ร้อน	12
2.6 กระบวนการทำงานของระบบบาร์ร้อน	13
2.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีการบัดกรีด้วยระบบบาร์ร้อน	14
2.8 กราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิของเครื่องระบบบาร์ร้อน	14
2.9 ช่วงขณะที่แท่งโลหะเคลื่อนที่ลง	15
2.10 ช่วงบัดกรีอ่อน	16
2.11 โปรไฟล์ของอุณหภูมิมบนหน้าจอบของเครื่องจักร	16
2.12 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผล	17
2.13 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ	20
2.14 ลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง	22
2.15 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	35
2.16 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	35
2.17 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (แบบไม่มีอันตรกิริยา)	36
2.18 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (แบบมีอันตรกิริยา)	36
2.19 การออกแบบที่ละปัจจัย	37
2.20 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ระหว่างการทดลองแบบแฟกทอเรียลต่อการทดลองที่ละปัจจัย	37

3.1 การไหลของกระบวนการ	43
3.2 Peel test ของ DC	46
3.3 Peel test ของ RF	46
3.4 ตัวอย่างของ solder joint break off	47
3.5 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก และวิธีการทดสอบ	48
3.6 แผนภาพก้างปลา	50
3.7 แผนการทดลอง	55
4.1 Residual plots ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป	62
4.2 Residual plots ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป	62
4.3 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของส่วนตกค้างชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	63
4.4 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของส่วนตกค้างชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	64
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	65
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	65
4.7 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	67
4.8 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	67
4.9 ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยกับค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	68
4.10 ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยกับค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	68
4.11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	69

4.12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	69
4.13 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	71
4.14 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	71
4.15 ผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก จากการทดลองเพื่อ ยืนยันผล ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	75
4.16 ผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก จากการทดลองเพื่อ ยืนยันผล ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	76
4.17 ตัวอย่างใบบันทึกกระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น	79
4.18 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เครื่องจักรเก่าชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	79
4.19 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เครื่องจักรใหม่ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ	80
4.20 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เครื่องจักรเก่าชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	80
4.21 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เครื่องจักรใหม่ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	81

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
ANOVA	Analysis of variance
Cpk	Process Capability Index
DOE	Design and Analysis of Experiment
2^k	การทดสอบแบบ k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ
F(x)	ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น
Hypothesis	สมมติฐาน
Main Effect	อิทธิพลหลัก
Model Adequacy Checking	การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล
Normality Test	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล
Residual Analysis	การวิเคราะห์เศษเหลือ
H_0	สมมติฐานหลัก
H_1	สมมติฐานอื่นๆ
n	จำนวนข้อมูล
SS	ผลรวมกำลังสอง
X_i	ค่าวัดของข้อมูลตัวที่ i
\bar{X}	ค่าเฉลี่ย
Y	ค่าของข้อมูลเชิงสถิติ
Z	ตัวแปรสุ่มแบบปกติ
α	ความเสี่ยงของการตัดสินใจผิดพลาดแบบที่ 1
β	ความเสี่ยงของการตัดสินใจผิดพลาดแบบที่ 2

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมมีแนวโน้มจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการนำระบบดิจิทัลมาใช้งาน โดยระบบโทรคมนาคมเป็นเครือข่ายสื่อสารหลักที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกล ในขณะที่เทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารและคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก เทคโนโลยีโทรคมนาคมจึงต้องพร้อมที่จะรองรับการเชื่อมต่อใช้งานของอุปกรณ์ปลายทางที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วให้ได้ นั่นจึงทำให้บริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มธุรกิจการสื่อสารและโทรคมนาคมที่ผลิตอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคมมีอัตราการส่งออกผลิตภัณฑ์ที่สูงมากตามไปด้วย เนื่องด้วยมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นจากตลาดอย่างต่อเนื่อง

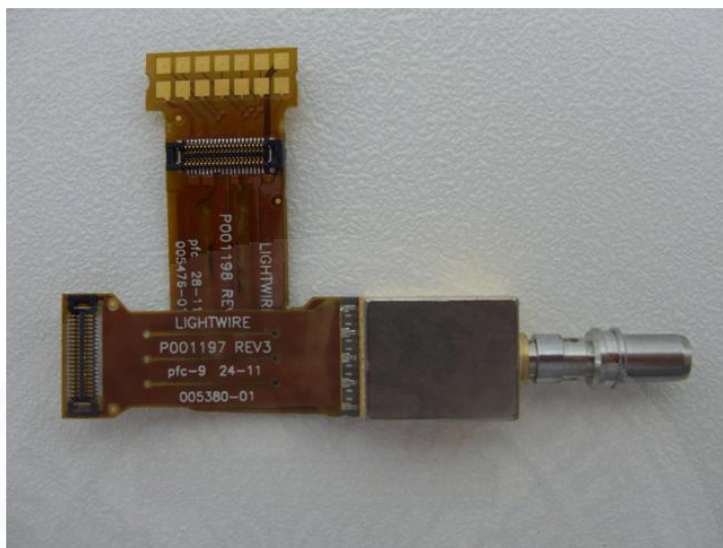
จากเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้เองจึงทำให้วงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ในกลุ่มธุรกิจการสื่อสารและโทรคมนาคมมีระยะเวลาการผลิตแค่ช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนสายการผลิตเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ทันสมัยและสอดคล้องกับเทคโนโลยีที่พัฒนาและก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วเสมอ

และเพื่อให้ธุรกิจประสบความสำเร็จและสามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นได้ กลยุทธ์หนึ่งคือการส่งมอบให้ทันเวลา (On Time Delivery) ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของค่านิยมหลักของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา รวมทั้งต้องมีการบริหารการผลิตที่ดี เพื่อลดความสูญเสียจากกิจกรรมที่ไม่ทำให้เกิดมูลค่าในกระบวนการผลิต ในที่นี้หมายถึง ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั่นเอง ดังนั้น ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องมองหาแนวทางหรือวิธีการในการปรับปรุงกระบวนการผลิต และลดปริมาณของเสีย เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ไม่ควรเกิด พร้อมทั้งพัฒนาและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจอย่างสูงสุดด้วยราคาที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้ผลประโยชน์ของบริษัทมีเสถียรภาพที่ดียิ่งขึ้น

1.1 ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาเป็นหนึ่งในบริษัทที่ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มธุรกิจการสื่อสารและโทรคมนาคม โดยมุ่งเน้นในการร่วมพัฒนาและ/หรือการรับจ้างผลิตและประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จากลูกค้าทั้งในและต่างประเทศ โดยมีการแบ่งสายการผลิตออกเป็นหลายประเภทผลิตภัณฑ์ ในกรณีศึกษานี้ผู้เขียนได้มุ่งสนใจในกระบวนการผลิตตัวผลิตภัณฑ์ที่เป็นเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ ที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าหรือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนข้อมูลที่ต้องการให้เป็นสัญญาณทางแสงและส่งผ่านข้อมูลออกไปทางความยาวคลื่นโดยผ่านระบบของใยแก้วนำแสง

ซึ่งถือเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมในการรับส่งข้อมูลระยะไกลดังแสดงในภาพที่ 1.1 และ 1.2



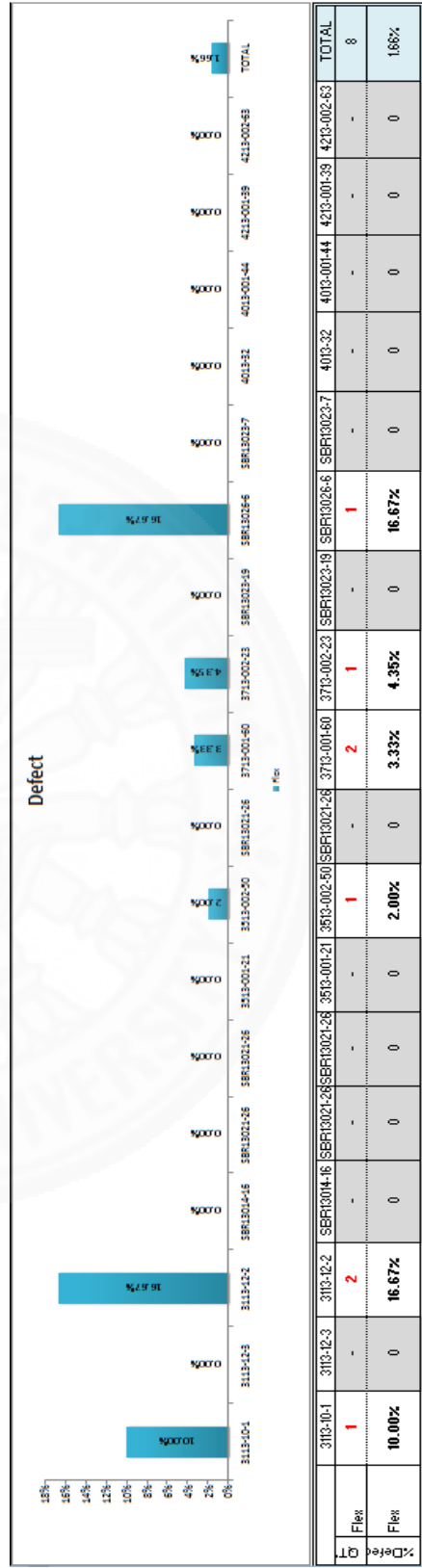
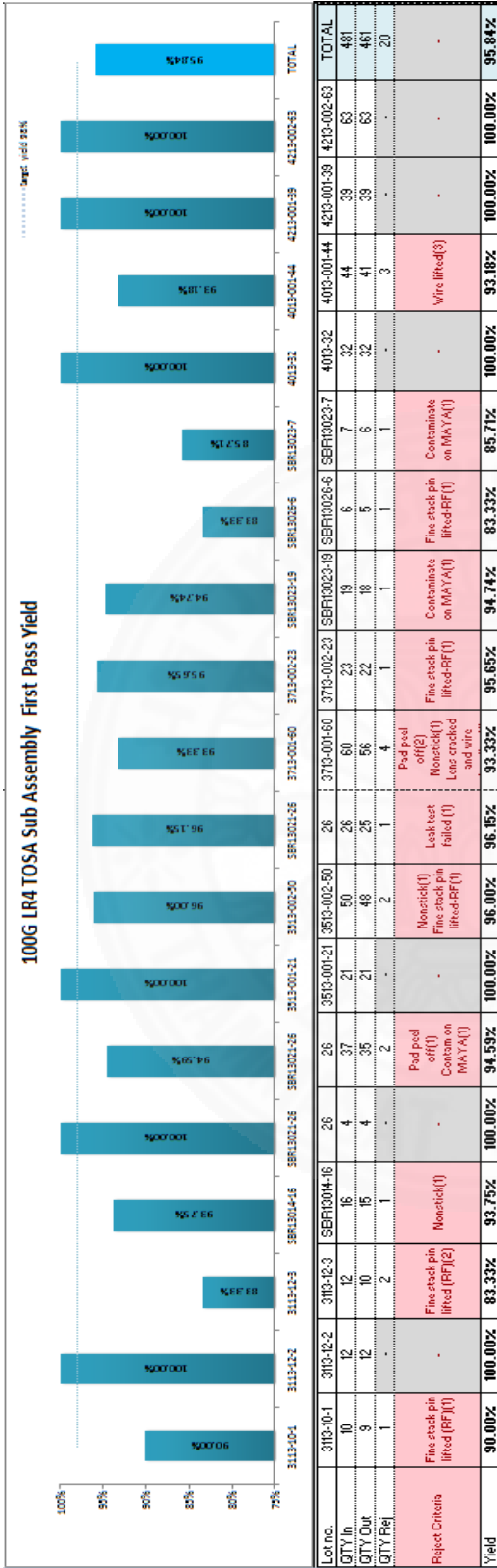
ภาพที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์เครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ



ภาพที่ 1.2 ผลิตภัณฑ์ที่มีการประกอบตัวรับและตัวส่งสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลผ่านระบบใยแก้วนำแสง, (2559), Cisco CPAK 100GBASE Modules Data Sheet. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2559, จาก http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/data_sheet_c78-728110.html

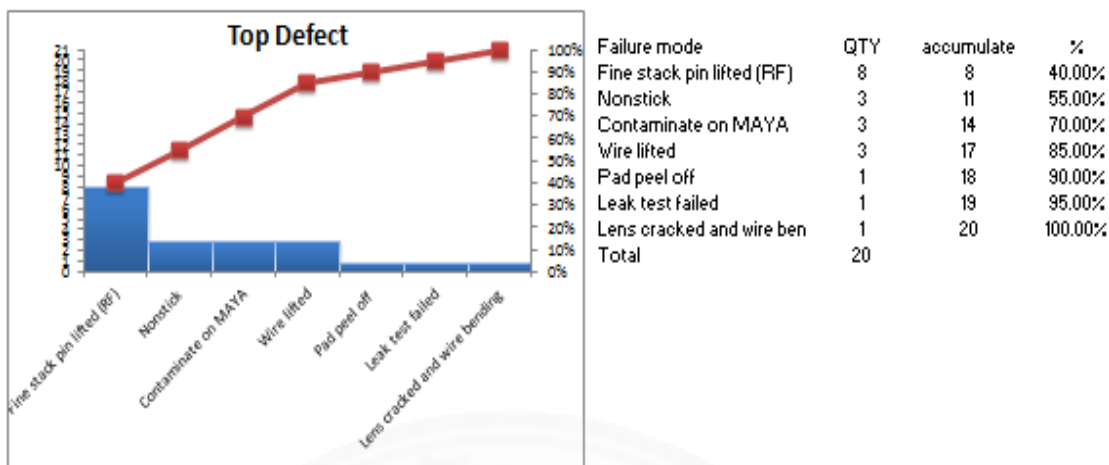
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากเทคโนโลยีที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็วจึงทำให้มียอดการสั่งซื้อของตัวผลิตภัณฑ์มากขึ้น ทางบริษัทกรณีศึกษาจึงต้องเพิ่มกำลังการผลิตตามไปด้วย และในกระบวนการผลิตของตัวผลิตภัณฑ์ที่เป็นเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ ก็มีอยู่หลายส่วนด้วยกันซึ่งหนึ่งในกระบวนการหลัก คือ การประกอบชิ้นส่วนที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยუნกับตัวชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน (Hot Bar Soldering System) ทางบริษัทกรณีศึกษาจึงตัดสินใจที่จะเพิ่มกำลังการผลิตด้วยการซื้อเครื่องจักรมาเพิ่ม โดยเบื้องต้นได้ตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรใหม่ตามค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรเดิมทุกอย่าง แต่พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เหมือนเดิม ทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ได้ไม่เทียบเท่ากับชิ้นงานที่ได้จากเครื่องที่ติดตั้งในไลน์การผลิตปัจจุบัน และทำให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังแสดงในภาพที่ 1.3 ซึ่งพบว่า การผลิตในช่วงเริ่มต้นของการตรวจสอบการติดตั้งเครื่องจักรใหม่ (Qualification) มีของเสียจากกระบวนการเกี่ยวกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนมากเป็นอันดับหนึ่ง โดยสเปคของตัวชิ้นงานคือต้องมีการเชื่อมติดกันทางโลหะของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนกับแผ่นรองของตัวชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ โดยมีการทดสอบกับชิ้นงานเทียมโดยใช้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) เป็นตัวกำหนด และตรวจสอบว่าไม่มีรอยเชื่อมตะกั่วเข้าหากันระหว่างแผ่นรองของตัวชิ้นงานที่อยู่ถัดไป (No solder bridging)



Lot No.	QTY In	QTY Out	QTY Ret	Project Criteria	Yield
3113-10-1	10	10	0	Fine stack pin lifted (PF) (1)	90.00%
3113-12-1	12	12	0	Fine stack pin lifted (PF) (2)	100.00%
3113-12-2	12	12	0	Fine stack pin lifted (PF) (2)	100.00%
3113-12-3	12	10	2	Fine stack pin lifted (PF) (2)	83.33%
3113-12-4	16	15	1	Nonstick (1)	93.75%
3113-12-5	26	26	0	Pod ped off (1) Contam on MAYA (1)	100.00%
3113-12-6	26	25	1	Pod ped off (1) Contam on MAYA (1)	96.15%
3113-001-21	26	25	1	Nonstick (1) Fine stack pin lifted (PF) (1)	96.00%
3113-001-20	50	48	2	Leak test failed (1)	96.00%
3113-001-26	26	25	1	Leak test failed (1)	96.15%
3113-001-40	60	56	4	Pod ped off (2) Nonstick (1) Leak cracked and wire.	93.33%
3113-001-49	23	22	1	Fine stack pin lifted (PF) (1)	95.65%
3113-001-23	19	18	1	Fine stack pin lifted (PF) (1)	94.74%
3113-001-19	6	6	0	Contaminate on MAYA (1)	83.33%
3113-001-25	7	6	1	Fine stack pin lifted (PF) (1)	85.71%
4013-32	32	32	0	Contaminate on MAYA (1)	100.00%
4013-001-44	44	41	3	Wire lifted (3)	93.18%
4013-001-39	39	39	0		100.00%
4013-001-43	63	63	0		100.00%
4013-001-63	461	461	0		95.84%
TOTAL	63	63	0		

Lot No.	Defects	% Defect
3113-10-1	10	10.00%
3113-12-1	0	0.00%
3113-12-2	0	0.00%
3113-12-3	2	16.67%
3113-12-4	0	0.00%
3113-12-5	0	0.00%
3113-12-6	0	0.00%
3113-001-21	0	0.00%
3113-001-20	2	2.00%
3113-001-26	0	0.00%
3113-001-40	3	3.33%
3113-001-49	4	4.35%
3113-001-23	0	0.00%
3113-001-19	16	16.67%
3113-001-25	0	0.00%
4013-32	0	0.00%
4013-001-44	0	0.00%
4013-001-39	0	0.00%
4013-001-43	0	0.00%
4013-001-63	8	1.66%
TOTAL	32	3.33%



ภาพที่ 1.3 กราฟแสดงค่าอัตราผลิตผลดีในการผลิตรอบที่หนึ่ง (First Pass Yield) ของผลิตภัณฑ์เครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ และอัตราจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นเรียงตามประเภทของของเสีย (Top Defect)

ซึ่งเมื่อสอบถามไปยังผู้ผลิตเครื่องจักรถึงอาการที่พบ ทางผู้ผลิตได้แนะนำให้ทำการตรวจสอบระบบตรวจจับอุณหภูมิและชุดทำความร้อนในจุดต่างๆ จึงได้ทำการตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องมือต่างๆ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าอุปกรณ์ทุกอย่างทำงานได้ตามปกติ จึงคิดว่าน่าจะเป็นข้อจำกัดของเครื่องแต่ละรุ่นที่จะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์เป็นของตัวเองเพื่อให้ได้คุณภาพของชิ้นงานออกมาตามที่กำหนด ในที่นี้ยึดตามผลลัพธ์ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก ว่าผ่านค่าที่น้อยที่สุดที่ลูกค้ากำหนดไว้หรือไม่ เพราะการที่ค่าความแข็งแรงของการยึดติดจะมีค่าสูงหรืออย่างน้อยต้องผ่านเกณฑ์ที่กำหนดได้นั้น นั้นหมายถึงว่า โลหะบัดกรีที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นได้ หลอมเหลวและประสานยึดติดกับลายวงจรบนตัวชิ้นงานได้ดี แต่ถ้าค่าที่ได้มีค่าต่ำหรือมีแนวโน้มว่าจะอยู่ในช่วงค่าที่น้อยที่สุดที่จะผ่านเกณฑ์ อาจส่งผลกระทบต่อตัวชิ้นงานในอนาคตเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นอาจหลุดหรือมีการขยับได้ และทำให้ชิ้นงานนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควรจะเป็น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของตัวผลิตภัณฑ์ และบริษัทเอง

และเมื่อนำข้อมูลของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก จากเครื่องจักรเดิมและเครื่องจักรที่อยู่ระหว่างการตรวจสอบการติดตั้งเครื่องจักรใหม่ พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก ด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อนที่ติดตั้งใหม่มีค่าต่ำกว่าเครื่องปัจจุบัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF) ลดลง 1.93 เปอร์เซ็นต์ และในชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ลดลง 3.47

เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 1.3 จึงสรุปเบื้องต้นได้ว่าถ้าสามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก ของเครื่องจักรใหม่ให้ได้ค่าที่มากขึ้นหรือใกล้เคียงกับเครื่องจักรเดิม ชิ้นงานที่ได้ก็ควรจะมีความภาพที่ดีหรือใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผลิตจากเครื่องจักรเดิมและของเสียก็จะมีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 1.1

ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ติดด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อนเครื่องปัจจุบัน และเครื่องที่ติดตั้งใหม่

Current hot bar system			New hot bar system		
unit	RF (kg)	DC (kg)	unit	RF (kg)	DC (kg)
spec	1.200	2.000	spec	1.200	2.000
WO#800-39549-01-3113	4.184	6.850	#1	3.579	3.321
WO#800-39549-01-3113	3.249	4.215	#2	2.653	3.565
WO#800-39549-01-3113	2.546	4.276	#3	3.330	2.090
WO#800-39549-01-3113	2.678	5.125	#4	3.084	2.219
WO#800-39549-01-3113	3.236	4.554	#5	2.157	3.047
WO#800-39549-01-3113	2.348	3.565	#6	1.724	2.320
WO#800-39549-01-3513-001	2.478	3.208	#7	1.682	2.385
WO#800-39549-01-3513-001	2.993	3.572	#8	2.048	2.565
WO#800-39549-01-3513-002	2.472	5.930	#9	2.818	3.170
WO#800-39549-01-3513-002	2.388	4.862	#10	2.511	4.825
WO#800-39549-01-3713-001	2.831	4.784	#11	2.314	2.296
SBR#13004	2.955	4.508	#14	2.064	4.588
SBR#13013	2.368	3.285	#15	2.676	2.328
SBR#13014	2.360	2.252	#16	3.347	2.118
SBR#13015	3.616	4.664	#17	1.218	3.736
SBR#13023	2.743	2.916	#19	2.499	2.074
SBR#13026	2.447	3.073	#20	2.587	6.441
min	2.348	2.252	min	1.218	2.074
max	4.184	6.850	max	3.579	6.441
average	2.817	4.214	average	2.488	3.123

วัตถุประสงค์

1.2.1 หาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในการติดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน

1.2.2 หาค่าที่เหมาะสมของการยึดติดสำหรับแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นติดกับตัวชิ้นงานที่จะทำให้ได้ค่าที่ดีหรือผ่านเกณฑ์ที่กำหนดโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การดำเนินงาน

- ใช้กระบวนการการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานด้วยเครื่อง Hot Bar Soldering System เป็นกรณีศึกษา

1.3.2 เครื่องมือสำหรับการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน

- Hot Bar Soldering System ดังแสดงในภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 เครื่องมือสำหรับการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน

1.3.3 เครื่องมือวัด

- ใช้เครื่อง Peel test machine ในการทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) ของตัวชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.5 เครื่องมือ Peel test machine ในการทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก

1.3.4 เกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก

a) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF) 1.2 kgf (Kilogram force)

b) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 2 kgf (Kilogram force)

1.3.5 การวิเคราะห์หาปัจจัยเชิงสถิติ

- ใช้การออกแบบการทดลองเบื้องต้นในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานของเครื่อง Hot Bar Soldering System ที่มีการจัดซื้อเข้ามาใหม่

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัว

1.4.2 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์หาสาเหตุที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเมื่อประกอบ

เสร็จ

1.4.3 ออกแบบการทดลองเพื่อนำมาซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

1.4.4 ดำเนินการทดลองตามแบบการทดลองที่วางไว้

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2

ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เวลา (เดือน)									
	2559					2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. สํารวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. เก็บข้อมูลและออกแบบวิธีการทดลอง										
3. รวบรวมข้อมูลและกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย										
4. ทำการทดลองตามแผนที่วางไว้										
5. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง										
6. จัดทำรูปเล่มการค้นคว้าอิสระ										

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยต่างๆรวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานด้วยเครื่อง Hot Bar Soldering System
2. นำปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ไปปรับใช้ในกระบวนการจริง
3. สามารถนำผลการทดลองไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาคุณภาพของกระบวนการการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานต่อไป
4. เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาปัจจัยและของเสียที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องจักรรุ่นใหม่ที่มีมีการนำเข้ามาติดตั้งเพิ่มอีกในอนาคต

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลผลิตภัณฑ์แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) [1]

แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards) หรือแผ่นปริ้นต์ เป็นแผ่นพลาสติกที่ผิวด้านหนึ่งถูกเคลือบด้วยแผ่นทองแดงบาง เพื่อใช้ทำลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit) ทำให้เกิดเป็นวงจรต่างๆ ตามต้องการ ในยุคแรกเริ่มของการคิดค้นประดิษฐ์ PCB ขึ้นมานั้น ได้มีการใช้หมึกที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า เช่น หมึกที่เป็นผงคาร์บอนด์ พิมพ์ลงบนแผ่นฉนวนเพื่อการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์แต่ละตัวที่อยู่บนแผ่นฉนวนที่นำมาใช้ แม้ว่าต่อมาจนถึงปัจจุบันนี้ใช้แผ่นทองแดงบางๆ ที่เป็นตัวนำมาเคลือบบนฉนวนแทนแล้วก็ตาม แต่เราก็ยังเรียกขานกันว่า "พีซีบี" (PCB) มาจนทุกวันนี้

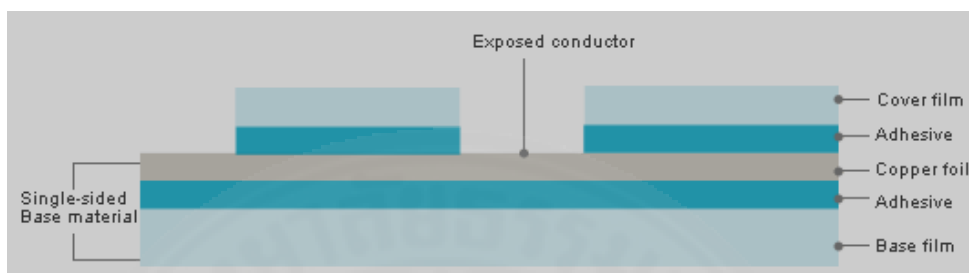
มีการแยกประเภทตามวัสดุที่นำมาเป็นฐานของทองแดง เช่น ฟีนอลิก (Phenolic, FR-2) กลาสอีพอกซี (Glass epoxy, FR-4) เทฟลอน (teflon) เคมีวัน (CEM1) อีกแบบ คือ แบบยืดหยุ่น (flexible) และเรียกตามลักษณะการใช้งาน เช่น แบบหน้าเดียว (Single Side) แบบสองหน้า (Double Side) แบบสองหน้าเพลททรูโฮล (Double Side Plate Through Hole) และแบบมัลติเลเยอร์ (Multi Layer) โดยงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นเพียงชนิดเดียวดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น

2.1.1 ชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น

- แบบหน้าเดียว (Single Side) เป็นประเภทพื้นฐานที่สุดของ FPC โดยประเภทนี้จะมีลายทองแดงเคลือบหน้าเดียว เหมาะสำหรับวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และเป็นที่ยอมรับมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 2.2



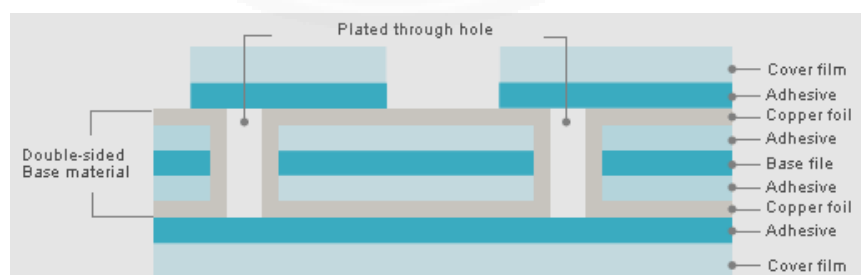
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานแบบหน้าเดียว (2559), Basic Structure - Single-Side.

สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2559, จาก

http://www.mektec.com.tw/english/02_products/02_detail.aspx?MainID=14

- แบบ 2 หน้า (Double Side PCB) แบบนี้จะมีทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้าน ส่วนใหญ่ด้านหนึ่ง มักจะปล่อยให้กลายเป็นลายทองแดงเต็มแผ่น ในลักษณะเป็น กราวนด์เพลน (Ground Plane) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดสัญญาณรบกวน มักใช้ในวงจรเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ

- แบบ 2 หน้า เชื่อมต่อกัน (Double Side Plate Trough Hole PCB) หรือที่มักเรียกกันทับศัพท์ว่า แบบเพลททรูโฮล โดยแบบนี้ จะมีลายทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้าน และมีเชื่อมต่อกันระหว่างทองแดงทั้งสองด้าน ผ่านทางรูที่ทำเป็นพิเศษดังแสดงในภาพที่ 2.3

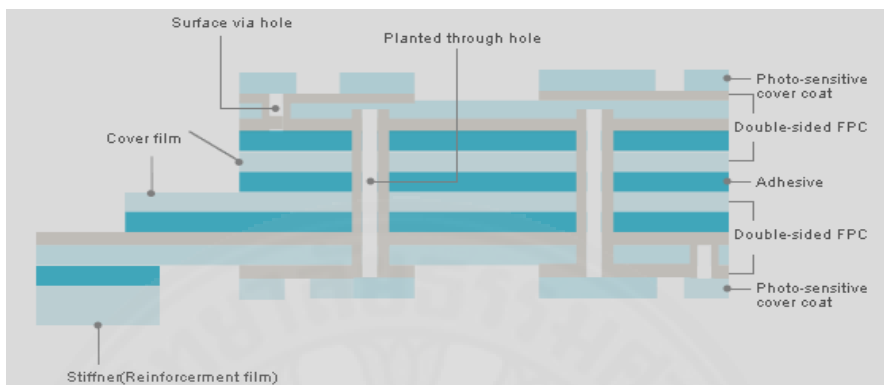


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานแบบสองหน้า (2559), Standard Double-Sided Structure.

สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2559, จาก

http://www.mektec.com.tw/english/02_products/02_detail.aspx?MainID=15

แบบหลายชั้น (Multi Layer PCB) แผ่นวงจรพิมพ์ประเภทนี้จะมีความซับซ้อนมาก โดยจะมีลายทองแดงอยู่ด้านในด้วย และมีการเชื่อมต่อกันผ่านทางรูที่ทำพิเศษดังแสดงในภาพที่ 2.4



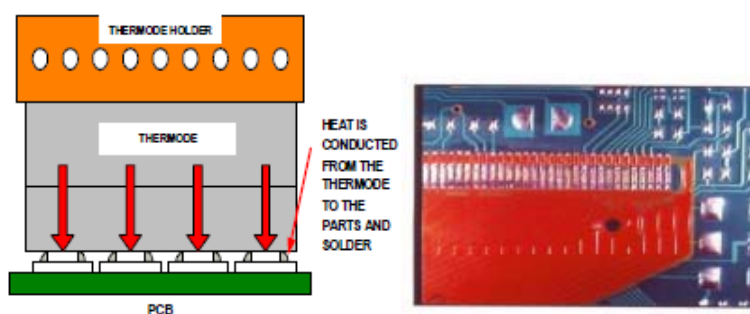
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานแบบหลายชั้น (2559), Multi Layer (Double-sided FPC + Double-sided FPC). สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2559, จาก

http://www.mektec.com.tw/english/02_products/02_detail.aspx?MainID=16

2.2 พื้นฐานของระบบบาร์ร้อน (HOT BAR REFLOW SOLDERING FUNDAMENTALS) [2]

2.2.1 ระบบบาร์ร้อนคืออะไร (What is Hot Bar Reflow Soldering?)

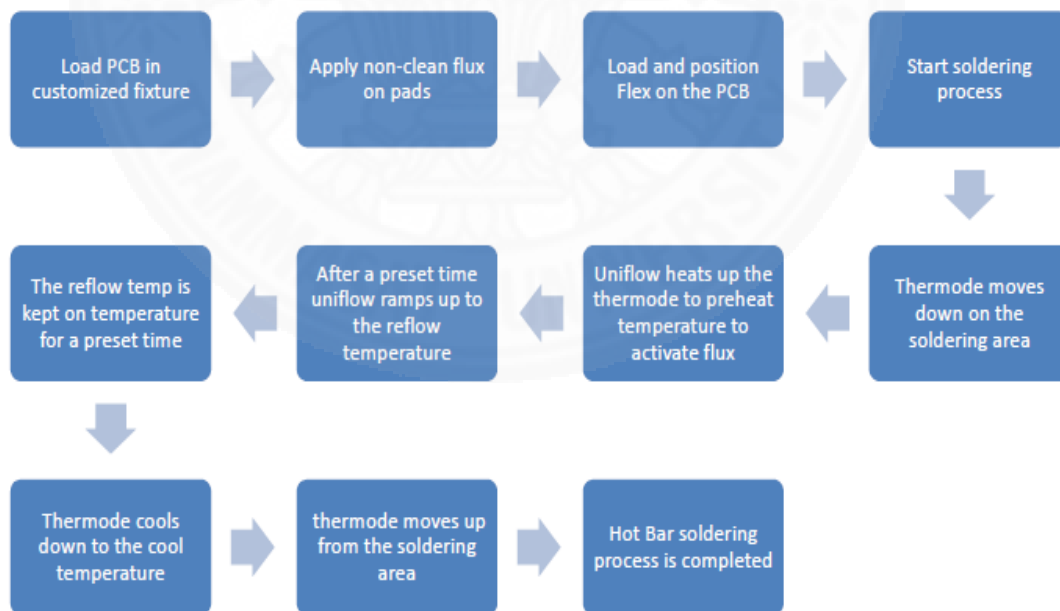
เป็นเทคโนโลยีรูปแบบหนึ่งในการบัดกรีเพื่อสร้างรอยเชื่อมของตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นกับตัวชิ้นงานโดยใช้แท่งโลหะที่เป็นลักษณะบาร์ (Hot bar) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เป็นตัวกวดเพื่อไม่ให้ชิ้นงานตรงจุดที่ต้องการเชื่อมต่อกันสามารถเคลื่อนที่ได้ และถ่ายโอนความร้อนสู่ชิ้นงานทั้งสองชั้น และจากลักษณะรูปร่างของตัวหัวกวดที่มีผิวสัมผัสที่เรียบยังช่วยทำให้รอยกวดมีลักษณะราบเรียบอีกด้วย โดยควบคุมกระบวนการด้วยเวลาและอุณหภูมิ



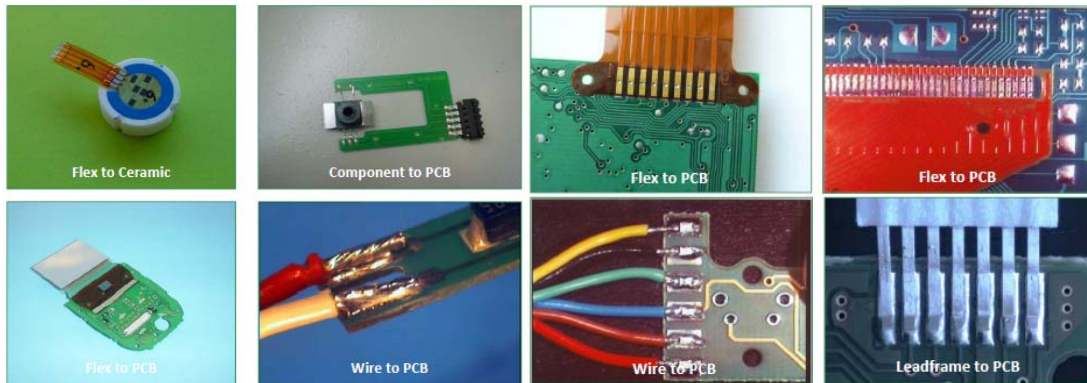
ภาพที่ 2.5 ระบบบาร์ร้อน

กระบวนการทำงานของระบบบาร์ร้อน ดังแสดงในภาพที่ 2.6

1. นำแผ่นวงจรยึดติดกับตัวยึดชิ้นงาน
2. แต้มฟลักซ์ชนิดไม่ต้องล้างบนพื้นที่ที่จะเชื่อมชิ้นงาน
3. นำแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหุ่นวางลงบนแผ่นวงจร
4. เริ่มขั้นตอนการบัดกรี
5. แت่งโลหะเคลื่อนที่ลงสู่บริเวณที่จะบัดกรี
6. เครื่องจักรเริ่มทำความร้อนให้กับตัวแท่งโลหะเพื่อกระตุ้นการทำงานของฟลักซ์
7. ในช่วงเวลาที่กำหนด เครื่องจักรจะค่อยๆทำอุณหภูมิขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่ตะกั่วจะหลอมเหลวได้อย่างสมบูรณ์
8. คงสถานะของอุณหภูมิบัดกรีตามเวลาที่กำหนดไว้
9. เครื่องจักรเริ่มลดอุณหภูมิเพื่อทำให้ความร้อนที่แท่งโลหะลดลง
10. แท่งโลหะเคลื่อนที่ขึ้นจากพื้นที่ที่บัดกรี
11. จบขั้นตอนของการบัดกรีด้วยระบบบาร์ร้อน



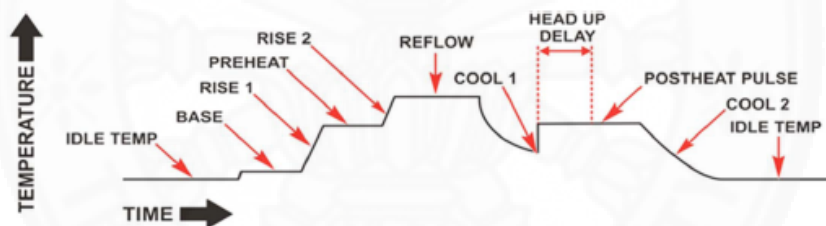
ภาพที่ 2.6 กระบวนการทำงานของระบบบาร์ร้อน



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีการบัดกรีด้วยระบบบาร์ร้อน

อธิบายขั้นตอนที่สำคัญของเครื่องจักรที่ใช้กระบวนการระบบบาร์ร้อนดังแสดงใน

ภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิของเครื่องระบบบาร์ร้อน

จากภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันไป โดยแบ่งได้เป็น 3 ช่วง อุณหภูมิใหญ่ๆ ดังนี้ ช่วงทำความร้อน ช่วงบัดกรีตะกั่วให้หลอมเหลว และช่วงการเย็นตัว

ช่วงทำความร้อน คือ ช่วงขณะที่แท่งโลหะเคลื่อนที่ลง อุณหภูมิของแท่งโลหะยังอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และมีอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่เรียกว่าหน่วยควบคุมการบัดกรี (The solder control unit) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า “SCU” หรือ “แหล่งจ่ายพลังงาน (Power supply)” เป็นตัวเริ่มให้สัญญาณกับระบบในการเริ่มกระบวนการบัดกรี

“SCU” จะส่งกระแสผ่านไปยังตัวแท่งโลหะ ซึ่งตัวแท่งโลหะเองถูกออกแบบมาให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงบริเวณด้านล่างของตัวแท่งโลหะ (ส่วนที่สัมผัสกับตัวชิ้นงาน) ความร้อนเกิดขึ้นจากการรวมกันของกระแสและความต้านทานทางไฟฟ้า มีการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิกับ

แท่งโลหะ ซึ่งตัววัดอุณหภูมิจะส่งค่าอุณหภูมิที่อ่านได้กลับไปยัง “SCU” เป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบวงรอบปิด

ปกติแล้วเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Rise time) จะอยู่ที่ 1.5 ถึง 2 วินาที ซึ่งจะเท่ากับอัตราความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งในเครื่องจักรรุ่นใหม่ “SCU” จะควบคุมอุณหภูมิให้เพิ่มความร้อนเป็นระยะๆ เมื่อถึงจุดอุณหภูมิที่ใกล้จุดหลอมเหลวของตะกั่ว “SCU” จะป้อนคำสั่งให้อัตราความร้อนลดลงเพื่อป้องกันอุณหภูมิเลยจุดที่ตั้งไว้ (Overshoot) ตัว “SCU” และตัวแท่งโลหะที่ดีต้องถ่ายเทความร้อนและชดเชยการทำงานของมันและกันได้ดีถึงแม้จะมีการไหลความร้อนที่แตกต่างกัน



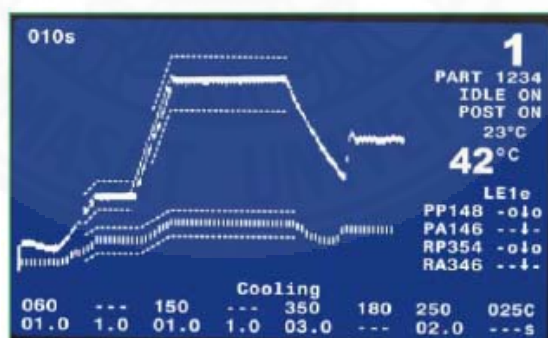
ภาพที่ 2.9 ช่วงขณะที่แท่งโลหะเคลื่อนที่ลง

ช่วงบัดกรีตะกั่วให้หลอมเหลว (Reflow) เป็นช่วงที่ฟลักซ์เริ่มหลอมละลาย และความร้อนผ่านเข้าสู่ตะกั่วและหลอมละลายไปทั่วบริเวณที่ต้องการยึดติด ช่วงนี้ใช้เวลา 3-8 วินาที โดยอุณหภูมิของแท่งโลหะอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส (แท่งโลหะสัมผัสกับขาชิ้นงาน) 400 องศาเซลเซียส (แท่งโลหะสัมผัสกับแคปตัล) หรือ 500 องศาเซลเซียส (เซรามิกและบัดกรีอ่อนของ MC-PCB) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ตะกั่วจะหลอมเหลว คือ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งในทางอุดมคติแล้วอุณหภูมิควรอยู่ที่มากกว่า 220 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้การหลอมเหลวและลักษณะการหลอมเหลวของตะกั่วที่ดีแต่ต้องน้อยกว่า 280 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการไหม้ของตะกั่ว เลยทำให้ต้องตั้งอุณหภูมิของแท่งโลหะให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวเนื่องจากการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งตัวเครื่องจักรเองสามารถตั้งให้ “SCU” เพิ่มเวลา 0.1 วินาที ถ้าอุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.10 ช่วงบัดกรีอ่อน

ช่วงการเย็นตัว (Cooling) เมื่อตะกั่วหลอมเหลวและครอบคลุมบริเวณที่ต้องการยึดติดทั้งหมดแล้ว พลังงานที่ส่งไปยังแท่งโลหะจะหยุดการส่ง จากนั้นตัวแท่งโลหะจะเริ่มเย็นตัวลง โดยช่วงเวลาการเย็นตัวลงจะใช้เวลาสั้น ขึ้นอยู่กับแรงของการทำความเย็น (Forced air-cooling) “SCU” สามารถสลับตัวให้สัญญาณที่ควบคุมการไหลของอากาศในช่วงการหลอมเหลวของตะกั่ว ในช่วงสุดท้าย และเพิ่มการทำความเย็นที่ตรงข้อต่อและแท่งโลหะได้ทันที ในส่วนการควบคุม การเย็นตัวจะทำงานได้ดีถ้ามีการกำหนดอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ตั้งต้องต่ำกว่าอุณหภูมิแข็งตัวของตะกั่ว (Solder solidification) เพราะฉะนั้นเมื่อตะกั่วเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง แปลว่ากระบวนการยึดติดด้วยบัดกรีอ่อนสิ้นสุดลง เพราะมีการเชื่อมต่อของตัวชิ้นงานกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแล้ว



ภาพที่ 2.11 โปรไฟล์ของอุณหภูมิบนหน้าจอของเครื่องจักร

จะเห็นได้ว่าการปรับอุณหภูมิจะต้องไม่ปรับไปที่อุณหภูมิสูงสุด เพราะอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ โดยอาจทำให้เกิดปัญหากับลายวงจรของแผ่นพิมพ์ที่อาจเกิดการพอง (Blister) และการบิดงอ (Warpage) เนื่องจากความร้อน จึงควรต้องมีการออกแบบอุปกรณ์จับยึดที่ดี เพื่อช่วยในการป้องกันปัญหาการบิดงอของแผ่นพิมพ์ลายวงจร

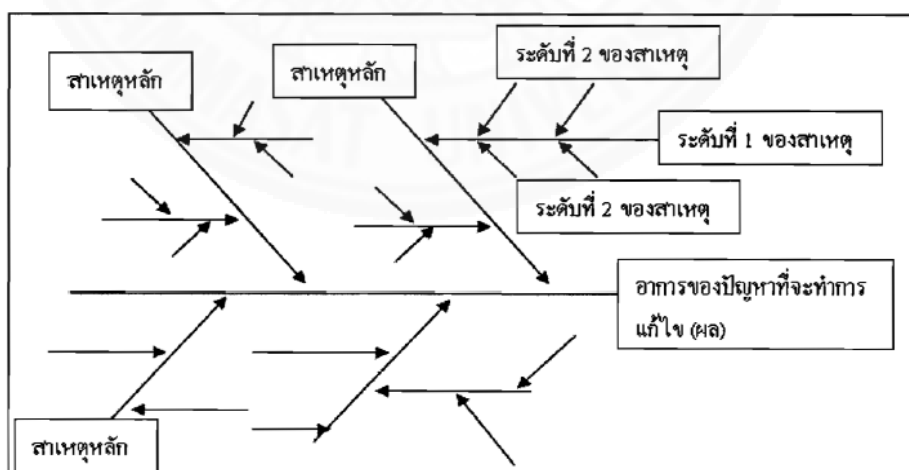
ในการปรับตั้งอุณหภูมิ จะต้องสอดคล้องกับส่วนผสมโลหะที่นำมาใช้ โดยปกติจะปรับตั้งจนได้อุณหภูมิสูงสุด โดยมีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วประมาณ 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ถ้าโลหะผสม 96.5 Sn/4.0 Ag/0.5 Cu ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 217 องศาเซลเซียส ก็จะปรับอุณหภูมิที่เครื่องจนได้อุณหภูมิที่ปรากฏในโปรไฟล์อุณหภูมิ ให้มีค่าสูงสุดประมาณ 237 ถึง 247 องศาเซลเซียส เป็นต้น

นอกจากนี้การทำให้แผ่นพิมพ์ลายวงจรเย็นลง (Cooling) เป็นสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพการผลิตในระยะยาว ทั้งนี้เนื่องจากการทำให้แผ่นพิมพ์ลายวงจรเย็นเร็วเกินไปจะทำให้เกิดเทอร์มัลช็อก (Thermal shock) เช่นเดียวกับการทำให้ร้อนเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้แผ่นพิมพ์ลายวงจรและจุดบัดกรีเกิดการแตกร้าวหรือเกิดความเสียหายได้

2.3 ชุดเครื่องมือในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพ [3]

2.3.1 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effective Diagram)

นิยมใช้ในการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลสำหรับปัญหาที่พิจารณา ลักษณะของโครงสร้างคล้ายกับก้างปลา จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แผนภาพก้างปลา (Fish Bone Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 สามารถใช้อย่างได้ผลกับกิจกรรมการแก้ปัญหาแบบกลุ่มในการจัดลำดับและความสัมพันธ์ของสาเหตุของปัญหา



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผล, กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2550, หลักการควบคุมคุณภาพ, สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

ในการสร้างแผนภาพสาเหตุและผลนี้มีข้อแนะนำ 4 ประการ ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างแผนภาพสาเหตุและผลที่มีประสิทธิภาพ ดังนี้

1. แผนภาพสาเหตุและผลควรสร้างขึ้นจากการรวบรวมความคิดจากทุกคน โดยมุ่งที่ปริมาณความคิด มิใช่คุณภาพความคิด
2. การสร้างแผนภาพสาเหตุและผล ควรจะมีการหมั่นทบทวนเพื่อแก้ไขอย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือ ไม่สร้างภาพให้เสร็จสิ้นภายในช่วงเวลาเดียว ควรจะมีการทำหลายๆ ช่วงเวลา แต่ช่วงไม่ยาวจนเกินไป
3. การใช้ภาษาพูด หรือเขียนในแผนภาพสาเหตุและผล จะต้องมีการระบุเฉพาะเจาะจง อย่าใช้คำที่มีความหมายกว้างๆ
4. หากมีการสร้างแผนภาพด้วยกิจกรรมกลุ่มย่อยแล้ว สมาชิกกลุ่มต้องมีการสานต่อความคิดด้วย เทคนิค 5W1H อย่างต่อเนื่อง จะทำให้ผู้วิเคราะห์มีความคิดที่เป็นระบบ และยังเป็นการเสริมความคิด ซึ่งกันและกันในการระดมสมองด้วย

2.3.2 แผนภาพพาเรโต

เป็นกราฟแท่งที่เรียงลำดับขนาดข้อมูล เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบดูว่าหัวข้อของข้อมูลแต่ละชุดมีความสำคัญมากน้อยแตกต่างกันอย่างไร เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกหัวข้อเรื่องที่สำคัญมาแก้ไขปรับปรุงก่อน แผนภาพพาเรโต มักจะใช้แสดงข้อบกพร่องหรือความเสียหายอันเกิดจากสาเหตุต่างๆ เพื่อจะได้นำมาพิจารณาปรับปรุงแก้ไขต่อไป

2.3.2.1 ขั้นตอนในการสร้างแผนภาพพาเรโต

1. ทำการรวบรวมข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด เช่น 1 สัปดาห์ 1 เดือนหรือมากกว่าแล้วแยกหัวข้อต่างๆ ออกจากกัน
2. เขียนตารางแสดงหัวข้อตามลำดับต่างๆ จากมากไปหาน้อย และคำนวณเปอร์เซ็นต์ของแต่ละหัวข้อ ออกมาโดยกำหนดว่าจำนวนทั้งหมดยกเว้นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และหาเปอร์เซ็นต์สะสมตั้งแต่หัวข้อแรกตามลำดับจนถึงหัวข้อสุดท้าย
3. เขียนกราฟ โดยถือความสูงของแต่ละแท่งเท่ากับเปอร์เซ็นต์ของแต่ละหัวข้อ โดยเริ่มจากหัวข้อที่มีความสำคัญมากที่สุดเรียงลำดับกัน ลงไปและระยะความกว้างของแต่ละแท่งเท่ากัน
4. เขียนกราฟเส้นตรงจากปลายมุมของแท่งแรกตามเปอร์เซ็นต์สะสมจนครบ
5. ลงรายการต่างๆ ตามความมุ่งหมายที่แสดงไว้

2.3.3 แผนภูมิควบคุม (Control Chart)

คือ เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิต เพื่อแก้ไข ปัญหาคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสินค้าที่ผลิต แผนภูมิควบคุมถูกใช้ เพื่อศึกษาความเบี่ยงเบนหรือความแปรปรวนของกระบวนการผลิตที่มีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ ใน กระบวนการ ทั้งที่เป็นสาเหตุที่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ โดยธรรมชาติซึ่งงานที่เกิด จากกระบวนการผลิตใดก็ตามก็มีความผันแปร (Variation) เกิดขึ้นในกระบวนการเสมอ โดยความผันแปร ที่เกิดขึ้นมานั้นมาจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือ ความผันแปรตามธรรมชาติ (Common Cause) และความ ผันแปรจากความผิดปกติ (Special Cause) โดย

1. ความผันแปรตามธรรมชาติ เกิดขึ้นจากความแตกต่างเล็กน้อยที่เกิดจากปัจจัย ในการผลิตต่างๆ เช่น ผู้ปฏิบัติงาน วัตถุดิบ เป็นต้น ไม่มีความรุนแรงและไม่มีผลต่อคุณภาพ ซึ่งเป็น ความแตกต่างที่ยอมรับได้และอยู่ในพิสัยของความเผื่อ (Tolerance) ของชิ้นงาน
2. ความผันแปรจากความผิดปกติ เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของปัจจัยต่างๆ ในการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขจึงจะทำให้คุณภาพของชิ้นงานกลับมาสู่สภาวะปกติอีกครั้ง หนึ่ง

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) คืออะไร [4]

DOE คือ การทดสอบ หรือ ชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพ หรือ Quality Characteristics) โดยการเปลี่ยนระดับของ ปัจจัยนำเข้่าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้มีคำศัพท์ที่ต้องทราบ คือ

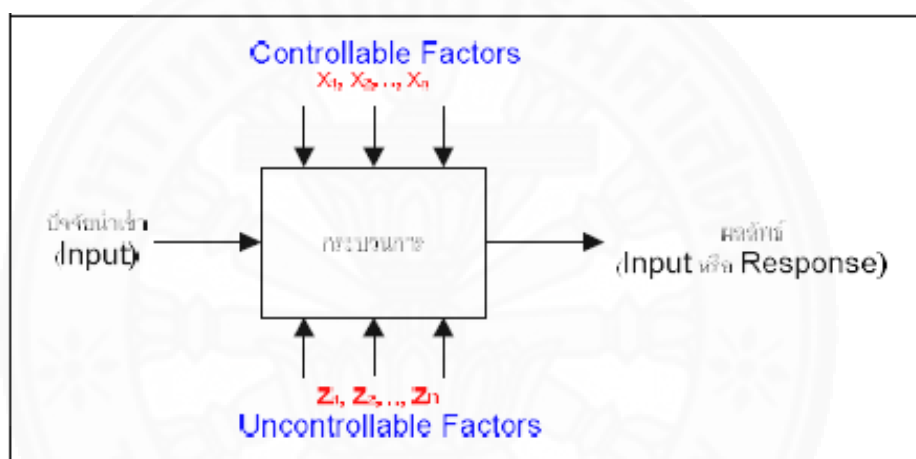
- ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อ ผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor หรือ Noise factor) แทนด้วย z_1, z_2, \dots, z_n และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) แทนด้วย x_1, x_2, \dots, x_n โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อบ่งชี้ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ควบคุมได้ จะเรียกว่า ทริตเมนต์ (Treatment)

- จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วย เงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่งๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัย และจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง

- ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษาคควบคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทริตเมนต์ต่างๆ

- การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของ DOE ที่พยายามให้ผลของ Uncontrollable factors กระจายอย่างสม่ำเสมอเกี่ยวกับค่าของ response ที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้ยังมีคำศัพท์อื่นๆ ซึ่งจะอธิบายสอดแทรกในเนื้อหาตามความจำเป็น ความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัย กระบวนการและผลลัพธ์ แสดงได้ด้วยตัวแบบทั่วไปของกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ บทที่ 11 : การออกแบบการทดลองเบื้องต้น บรรณาญ
 ลีลา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.บูรพา สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม
 2559, จาก <https://www.coursehero.com/file/11650983/4%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97-11-DOE/>

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. บ่งชี้ปัจจัย x's ที่อิทธิพลต่อ Response
2. กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้ Y มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด
3. กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้มีความผันแปรของค่า Y ต่ำ
4. กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้อิทธิพลของ Uncontrollable factor มีน้อยที่สุด

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่น หากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการ Out-of-control ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้อย่างไร หากไม่ทราบว่ามีปัจจัยตัวไหนที่ส่งผลต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้นดังนี้

1. จำนวนผลผลิตจะดีขึ้น
2. ความผันแปรลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคุณลักษณะทางคุณภาพอยู่ในช่วงที่กำหนด และใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ต้องการ
3. ลดเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์
4. ลดต้นทุนโดยรวม

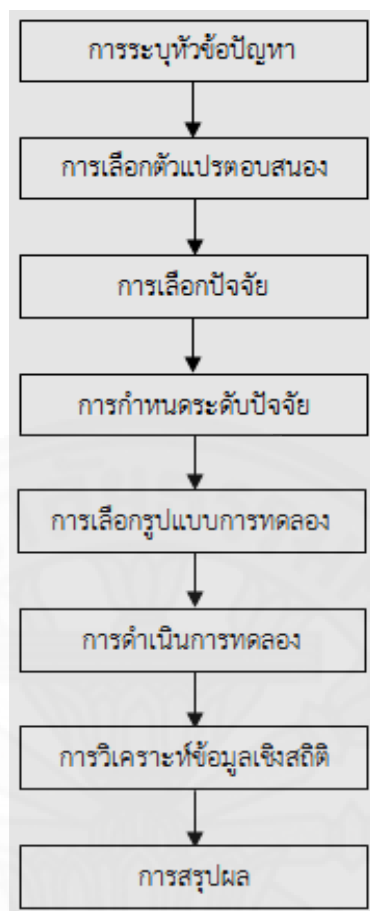
นอกจากนี้การออกแบบการทดลองยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

1. ประเมินและเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบไว้แล้ว
2. ประเมินเลือกวัสดุชนิดต่าง ๆ
3. บ่งชี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้ DOE อย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability) สมรรถนะ (Performance) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ต้นทุน (Cost) และระยะเวลาในการพัฒนา (Development Time) ของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น

2.4.1 ลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง [5]

ในการที่จะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บมาว่า ข้อมูลมีลักษณะอย่างไรมีความเหมาะสมหรือไม่ต่อกระบวนการที่กำลังศึกษา จึงต้องมีการออกแบบขั้นตอนในการทดลอง เพื่อที่จะได้นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยมีลำดับขั้นตอนในการออกแบบดังแสดงในภาพที่ 2.14 ซึ่งแสดงลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



ภาพที่ 2.14 ลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

จากภาพที่ 2.14 แสดงลำดับขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนหลักๆ ทั้งหมด 8 ขั้นตอน โดยที่ในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การระบุหัวข้อปัญหา ขั้นตอนนี้ นับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องระบุหัวข้อของปัญหาให้มีความชัดเจนและครอบคลุมที่สุด โดยเป็นการระบุว่า ความต้องการในกระบวนการคืออะไร ปัญหาที่เกิดขึ้นคืออะไร หรือต้องการอะไรจากกระบวนการ ซึ่งเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วก็จะใช้เป็นวัตถุประสงค์ของการทดลอง การกำหนดปัญหาในการทดลองอาจกำหนดเป็นปัญหาเชิงการควบคุมหรือเป็นเชิงการปรับปรุงก็ได้ โดยทั่วไปการกำหนดปัญหาจะเกิดจากการร่วมกันวิเคราะห์เป็นกลุ่มหรือเกิดจากการจัดตั้งทีมขึ้นมาจากหลายฝ่าย เช่น วิศวกรฝ่ายคุณภาพ ฝ่ายผลิต ฝ่ายการตลาด และลูกค้า เป็นต้น

2. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response – Y, output) ในการเลือกตัวแปรตอบสนองนั้น ควรจะเลือกค่าหรือตัวแปรที่มีประโยชน์ต่อกระบวนการที่สนใจหรือที่กำลังศึกษา หรือเลือกตัวแปรวัดที่มีผลต่อการศึกษิตัวแปรที่สนใจ (Key Process Output Variation : KPOV)

ตัวแปรตอบสนองควรเป็นค่าที่วัดได้ (Variable) ซึ่งอาจวัดได้ในรูปของค่าเฉลี่ย (Average) หรือความเบี่ยงเบน (Standard deviation) หรือเป็นการวัดทั้ง 2 ค่า ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกตัวแปรตอบสนองอีกเรื่อง คือ ระบบการวัด (Measuring system) ของตัวแปรตอบสนองนั้น คือ การวัดควรมีความสามารถในการวัดที่ดี (Gauge Capability) หรือมีความผิดพลาดน้อย (Measurement error) ในกรณีที่ระบบการวัดมี Gauge Capability ไม่เพียงพอ หรือถ้ามีค่าต่ำ การทดลองจำเป็นต้องมีการทำซ้ำมากขึ้น มีการวัดหลายครั้งหรือมีการใช้ค่าเฉลี่ย (Average) ของการวัดเป็นค่าตอบสนองของการทดลอง

3. การเลือกปัจจัยในการทดลอง (Factor – X, Input) ในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องใช้ความรู้ในกระบวนการของผู้ทดลอง หลักการทางทฤษฎี หรือประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้จากการทำงานในกระบวนการ และการทดลองในอดีตเพื่อที่จะพิจารณาว่าปัจจัยใดบ้างที่ควรนำมาพิจารณาว่าควรใช้ในการทดลอง และมีช่วง (Range) ในการทดลองเท่าไร โดยทั่วไปการกำหนดปัจจัยในการทดลองจะใช้ร่วมกับเทคนิคดังต่อไปนี้

3.1 ใช้แผนภาพก้างปลา และการทดลองแบบ OFAT กำหนดตัวปัจจัยที่ต้องการศึกษา

3.2 ทำความเข้าใจกับกระบวนการของเทคโนโลยีที่แท้จริง (Intrinsic technology) เพื่อกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

นอกจากนี้ยังสามารถแยกชนิดของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเป็น 4 ปัจจัยที่ต้องศึกษา

- ปัจจัยออกแบบ (Design Factor) หรือปัจจัยการทดลอง (Experiment Factor) เป็นปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดลองและสามารถควบคุมได้ นั่นคือมีค่าที่สามารถสังเกตได้หรือตั้งค่าได้ควรจะเป็นปัจจัยชนิดที่เป็นค่าต่อเนื่องหรือสามารถตั้งค่าร่วมกันได้

- ปัจจัยคงที่ (Constant Factor) เป็นปัจจัยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดลอง และสามารถควบคุมได้ โดยที่อาจจะเป็นการตั้งค่าให้เท่ากันหรือตั้งค่าให้เท่ากับศูนย์

- ปัจจัยบล็อกกิง (Blocking Factor) เป็นปัจจัยในการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้แต่จะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง นอกจากนี้แล้วยังรวมไปถึงปัจจัยของสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายเช่นกัน เช่น ระบบการวัด หรือเครื่องมือวัด ในการทดลองถ้าทำการจำกัดปัจจัยนี้หรือทำให้มีค่าคงที่ จะทำให้การทดลองสมบูรณ์ขึ้น

- ปัจจัยสุ่ม (Random Factor) เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ และอาจจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หรือมีน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง ปัจจัยสุ่มนี้ถ้าสามารถวัดค่าออกมาได้จะมีประโยชน์มากในแง่การวิเคราะห์ข้อมูล

4. การกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment of level) ในการกำหนดระดับของปัจจัยจะขึ้นอยู่กับ ประสบการณ์ จากผลการทดลองที่ผ่านมา หรือขีดจำกัด ช่วงของเครื่องมือในกรณีที่เป็นปัจจัย ที่เกี่ยวกับเครื่องจักร หรือเครื่องมือ อย่างไรก็ตามในกรณีทดลองกับปัญหาเชิงควบคุม มักจะใช้ระดับของปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบัน ในกรณีทดลองกับปัญหาเชิงปรับปรุงใช้ระดับของปัจจัยใหม่ ในการทดลองที่เป็นการกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองโดยทั่วไป จะนิยมกำหนดให้เป็นช่วงกว้างๆ ไว้ก่อน และกำหนดเป็นระดับต่ำ สูงในกรณีมีสองระดับเป็นต้นไป การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งเป็น 3 แบบดังนี้

4.1 แบบกำหนดตายตัว (Fix level) หมายถึง การกำหนดระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้คงที่แน่นอน โดยผู้ทดลองจะกำหนดระดับของปัจจัยขึ้นเอง

4.2 แบบสุ่ม (Random level) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าแน่นอนได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัย ไม่ใช่ระดับใดระดับหนึ่ง

4.3 แบบผสม (Mixed factor) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่เกิดจากแบบกำหนดตายตัวและแบบสุ่มรวมกัน

5. การเลือกรูปแบบการทดลอง ควรพิจารณาถึงจำนวนตัวอย่าง (Sample size) การเลือกลำดับ การทดลองที่เหมาะสม (Ran order) การเลือกจำนวนทำซ้ำ (Replication) ที่เหมาะสมข้อจำกัด ในการสุ่ม (Randomization) และการทำบล็อก (Blocking) นอกจากนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือค่าใช้จ่ายในการทดลองรวมถึง ผลกระทบ หรือความเสี่ยงต่อกระบวนการ

6. การดำเนินการทดลอง ดำเนินการทดลองภายใต้เมตริกซ์ที่ออกแบบไว้ (Design Matrix) นั่นคือ ต้องมีการสุ่ม การทำซ้ำ และจะต้องพยายามสังเกตกระบวนการทดลองอย่างเฝ้าระวังเพื่อความถูกต้องของการทดลอง (Validity) นอกจากนี้ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของกระบวนการวัดและความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้จะทำลายความถูกต้องของการทดลอง

7. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ หลักการทางสถิติที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง รวมไปถึงการตัดสินใจถึงความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปวิธีการที่ถูกนำมาใช้ คือ การวิเคราะห์แบบเรสซิดิวล (Residual Analysis) การตรวจสอบความพอเพียงของโมเดลการทดลอง (Model Adequacy Checking) ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R-Square) หรือ Contribution ratio ซึ่งวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง และจะสรุปผลผ่าน ANOVA และ Effect plot วิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยจะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ใน

การสรุปผลการทดลองแต่อย่างไรก็ดีหลักการทางสถิติจะช่วยในการตัดสินใจให้เป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

8. การสรุปผล เมื่อข้อมูลที่ถูกระบุวิเคราะห์จะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ในเชิงกายภาพที่สามารถปฏิบัติได้ ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ หรืออื่นๆ ตลอดจนให้คำแนะนำ หรือ ข้อเสนอแนะจากการทดลองและเมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้ง

2.4.2 รูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลองมีอยู่อย่างหลากหลาย แต่เราจำเป็นต้องเลือกมาเพียงแค่ 1-2 รูปแบบเท่านั้นเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าเราควรเลือกรูปแบบการทดลองแบบไหนขึ้นอยู่กับเกณฑ์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ เวลาที่มีให้เพื่อการวิเคราะห์ ระดับความถูกต้องในการวิเคราะห์ งบประมาณที่มีให้ในการออกแบบการทดลอง เป็นต้น โดยทั้งนี้เราสามารถสรุปรูปแบบของการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1

รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน (วชิรพงศ์, 2545)

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Factor	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงสุด ของปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2^k Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ แต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัย อยู่ที่ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2^{k-p} Design	การทดลองที่มีปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัย แต่ไม่ทำการทดลองเต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	ปานกลาง	ปานกลาง

ปัจจุบันในการออกแบบการทดลองนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านสถิติเข้ามาช่วยซึ่งผู้ทดลอง จะต้องทำการป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม เช่น จำนวนปัจจัย ระดับของปัจจัย จากนั้นโปรแกรมจะทำ การคำนวณเลือกแบบการทดลอง รวมถึง Run order เพื่อให้ดำเนินการทดลองได้

ตารางที่ 2.2

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเดียวแบบจำลองผลกระทบคงที่ (พารเมต, 2545)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
Between Treatment	$SS_{\text{Treatment}}$	$a-1$	$MS_{\text{Treatment}}$	$F_0 = MS_{\text{Treatment}}$
Error (within treatment)	SS_E	$N-a$	MS_E	MS_E
Total	SS_T	$N-1$		

2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) [5]

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลจะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิง แฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่ เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบไปด้วย b ระดับ ในการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะ ประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ Y_{ijk} คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B

อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับเรพลิเคตที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังตาราง 2.3 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้น การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design)

ตารางที่ 2.3

รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (ปารเมศ ชุติมา, 2545, 223)

	Factor B				
		1	2	...	B
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	...				
	A	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear statistic model) คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \square_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด; τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถว (Row) ของปัจจัย A; β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ (Column) ของปัจจัย B; $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j และ \square_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาด แบบสุ่มสมมติว่า ปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment effect) หมายถึงส่วนที่เบี่ยงเบน จากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น

$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรพลิเคต n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn ในการทดลอง

เชิงแพททอเรียล 2 ปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้น เราต้องทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{at least one } \tau_i \neq 0 \quad (2.2)$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$

$$H_1: \text{at least one } \beta_j \neq 0 \quad (2.3)$$

นอกจากนั้นแล้วเรายังสนใจผลที่จะทราบว่ายอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{for all } i, j$$

$$H_1: \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad (2.4)$$

2.5.2 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effects Model

Desof.sh $y_{i.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของปัจจัย A; $y_{.j}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของปัจจัย B; $y_{ij.}$ เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่ ij และ $y_{..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้กำหนดให้ $\bar{y}_{i.}, \bar{y}_{.j}, \bar{y}_{ij.}, \bar{y}_{..}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์ และผลรวมทั้งหมด ซึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2.5)$$

$$y_{.j} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j} = \frac{y_{.j}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (2.6)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b \quad (2.7)$$

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{abn} \quad (2.8)$$

ค่ารวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2.9)$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{..}^2}{abn} \quad (2.10)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{abn} \quad (2.11)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{..}^2}{abn} \quad (2.12)$$

$$SS_{Subtotal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{..}^2}{abn} \quad (2.13)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotal} - SS_A - SS_B \quad (2.14)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2.15)$$

หรือ

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (2.16)$$

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรี ก็จะได้ค่าของค่ากำลังสองเฉลี่ยสังเกตว่าถ้าสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ที่ไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของแถว คอลัมน์ และอันตรกิริยา มีค่าเป็นจริง ดังนั้น MS_A , MS_B , MS_{AB} และ MS_E จะมีค่าประมาณเท่ากับ σ^2 อย่างไรก็ตามถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยของแถว จะได้ว่า MS_A จะมีค่ามากกว่า MS_E เหตุการณ์ทำนองเดียวกัน จะเกิดขึ้นกับ MS_B และ MS_E เช่นกัน ดังนั้นในการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา เราเพียงหารค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า MS_E และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก หมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานว่าง (ปฏิเสธสมมติฐานว่าง) ถ้าสมมติว่าแบบจำลองตามสมการที่ (2.16) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด \square_{ijk} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ โดยมีค่าความแปรปรวนคงตัวเท่ากับ σ^2 ดังนั้นอัตราส่วนของค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก MS_A / MS_E , MS_B / MS_E และ MS_{AB} / MS_E จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น a-1, b-1 และ (a-1)(b-1) และมีระดับขั้นความเสรีของ

ตัวหารคือ $ab(n-1)$ ค่าบริเวณวิกฤต คือ ปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F วิธีการทดสอบจะกระทำโดยอาศัยตาราง การวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร แบบ Fixed Effects Model (ปารเมศ, 2545)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A Treatments	SS _A	a-1	MS _A = SS _A / a-1	F ₀ = MS _A / MS _E
B Treatment	SS _B	b-a	MS _B = SS _B / b-1	F ₀ = MS _B / MS _E
Interaction	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	MS _{AB} = SS _{AB} / (a-1)(b-1)	F ₀ = MS _{AB} / MS _E
Error	SS _E	ab(n-1)		
Total	SS _T	abn-1		

2.5.3 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ส่วนตกค้างสำหรับแบบจำลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad (2.17)$$

และเนื่องจากค่าของ $\hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{ij}$ (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสังเกตในเซลล์ที่ ij) สมการจะกลายเป็น

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij} \quad (2.18)$$

2.5.4 รูปทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

ผลของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นอาจจะขยายไปสู่กรณีทั่วไปได้ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a, ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b, ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเรื่อยๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc \dots n$ และจะต้องมีเรพลิเคตทั้งหมดอย่างน้อย 2 เรพลิเคต ($n \leq 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้ โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้นมา แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณี 2 ปัจจัย) และการทดสอบสมมติฐานจะใช้ F-test แบบทดสอบปลายด้านหนึ่งด้าน จำนวนระดับขั้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใดๆ มีค่าเท่ากับผลคูณของระดับขั้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้นๆ

ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (2.19)$$

สมมติว่า A, B และ C มีค่าตายตัว ตารางสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงได้ดังตารางที่ 2-5 ค่าของ F-test ของผลหลักและอันตรกิริยาหาได้จากค่ากำลังสองเฉลี่ยคาดหวังที่ได้

ตารางที่ 2.5

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบ Fixed Effects (ปารเมต, 2545)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	MS _A	F ₀ = MS _A / MS _E
B	SS _B	b-a	MS _B	F ₀ = MS _B / MS _E
C	SS _C	c-1	MS _C	F ₀ = MS _C / MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	MS _{AB}	F ₀ = MS _{AB} / MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	MS _{AC}	F ₀ = MS _{AC} / MS _E

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	MS _{BC}	F ₀ = MS _{BC} / MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS _{ABC}	F ₀ = MS _{ABC} / MS _E
Error	SS _E	abc(n-1)	MS _E	
Total	SS _T	abcn-1		

การคำนวณด้วยมือสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.5 จะมีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y^2_{ijkl} - \frac{y^2_{...}}{abn} \quad (2.20)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y^2_{i..} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.21)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y^2_{.j.} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.22)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y^2_{...k} - \frac{y^2_{...}}{abcn} \quad (2.23)$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 2 ปัจจัยของอันตรกิริยา เราจะต้องสร้างผลรวมซึ่ง ประกอบไปด้วยเซลล์จำนวน A × B, A × C และ B × C เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูล เบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จาก

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y^2_{ij.} - \frac{y^2_{...}}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotal}(AB)} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} SS_{AC} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y^2_{i.k.} - \frac{y^2_{...}}{abcn} - SS_A - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotal}(AC)} - SS_A - SS_C \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}
 SS_{BC} &= \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk}^2 - \frac{y_{..}^2}{abcn} - SS_B - SS_C \\
 &= SS_{\text{subtotal}(BC)} - SS_B - SS_C
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร

$$SS_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \tag{2.27}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด หาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลัก และอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotal}(ABC)} \tag{2.28}$$

2.5.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัยซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาผลรวมที่มีต่อคำตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือกรณีที่มี k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยเหล่านั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงแรกเมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบการออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการออกแบบการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อจะศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิด ได้อย่างบริบูรณ์โดยการใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้น จึงไม่แปลกใจเลยที่การออกแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้ สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งมาเริ่มต้น

ทำการศึกษาระบบการออกแบบ 2^k ชนิดแรกที่เราจะกล่าวถึง คือ การออกแบบที่ประกอบ 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ตัวอย่างเช่น การทดลองตามรูปที่ 2.5 เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ 8nv ระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ซึ่งจะแทนระดับทั้งสองด้วย เครื่องหมาย “ - ” และ “ + ” ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในคำตอบนี้ คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำ และสูงของปัจจัย A ซึ่งเขียนเป็นตัวเลขได้ว่า

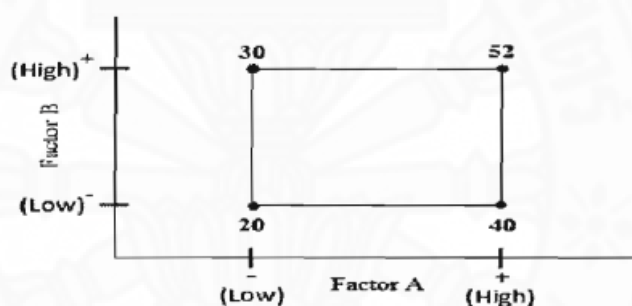
$$A = (40+52)/2 - (20+30)/2 = 21$$

หมายความว่า การเพิ่มของปัจจัย A จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูงจะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาผลหลักของปัจจัย B ได้ คือ

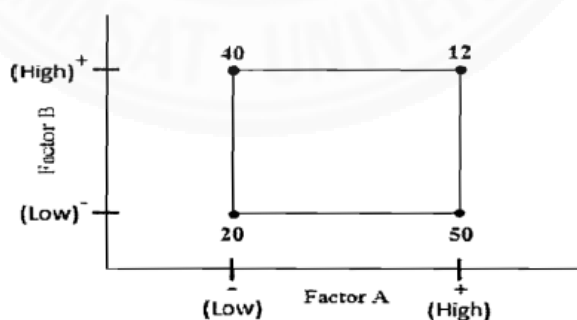
$$B = (30+52)/2 - (20+40)/2 = 11$$

สำหรับกรณีที่ปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย จะต้องมีการดัดแปลงวิธีการคำนวณบางประการซึ่งจะกล่าว โอกาสต่อไป ในการทดลองบางอย่างเราอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่นซึ่งหมายความว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั้นเองและเราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น พิจารณาการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของ ปัจจัย 2 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B ที่อยู่ระดับต่ำ มีค่าเป็น $A = 50-20 = 30$ และผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ระดับสูง มีค่าเป็น $A = 12-40 = -28$ เนื่องจากผลของ ปัจจัย A ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย B ที่ถูกเลือก ดังนั้นเราจะกล่าวได้ว่าปัจจัย A และ B มีอันตรกิริยาต่อกัน ขนาดของอันตรกิริยาจะเท่ากับค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง ของผลของปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B ซึ่งมีค่าเท่ากับ $AB = (-28-30)/2 = -29$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ในที่นี้มีค่าสูง แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยกราฟดังแสดงในภาพที่ 2.16 เป็นกราฟระหว่างผลตอบของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ $-B$ และ $+B$ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกันในภาพที่ 2.17 เป็นการพล็อตข้อมูลของภาพที่ 2.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้น $-B$ และ $+B$ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกันบ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยานอกจากนั้นแล้วยังสามารถใช้ในการรายงานหรือบรรยายให้แก่ผู้บริหารที่ไม่ได้รับการฝึกอบรมทาง

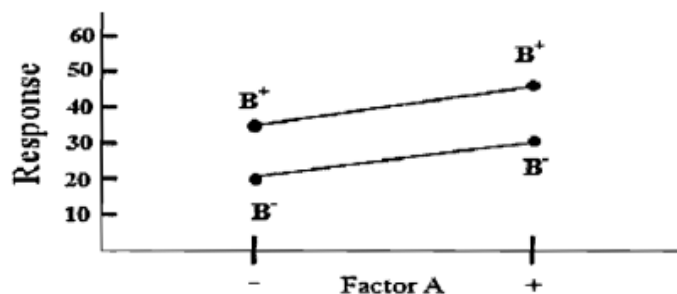
สถิติให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายอีกด้วย อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นอยู่กับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้ ตามปกติแล้วเมื่ออันตรกิริยามีค่าสูง ผลหลักจะมีความหมายน้อยมากในทางปฏิบัติ จากตัวอย่างในภาพที่ 2.16 จะเห็นว่าผลหลักของปัจจัย A มีค่าเท่ากับ $A = (50+12)/2 - (20+40)/2 = -1$ ซึ่งมีค่าต่ำมากและโน้มน้าวให้เราสรุปว่า ผลจากปัจจัย A นั้นไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเหมือนพิจารณาของผลของปัจจัย A ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย B แล้วจะพบว่า ในความเป็นจริงแล้วผลของปัจจัย A มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลของปัจจัย A นั้นจะขึ้นกับระดับของปัจจัย B ดังนั้น การรู้เกี่ยวกับอันตรกิริยา AB จะมีประโยชน์มากกว่าความรู้เกี่ยวกับผลหลักและในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีนัยสำคัญ ผู้ทำการทดลองควรจะต้องพิจารณาผลตอบที่เกิดขึ้นที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่ง (เช่น A) โดยให้ระดับของปัจจัยอื่นคงตัวเพื่อที่จะหาข้อสรุปเกี่ยวกับผลที่เกิดจากปัจจัย A



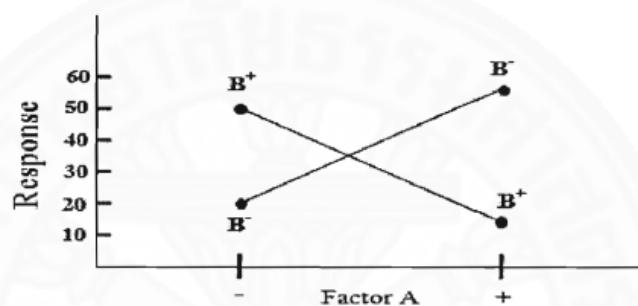
ภาพที่ 2.15 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 219



ภาพที่ 2.16 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (แบบมีอันตรกิริยา)
ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 219)



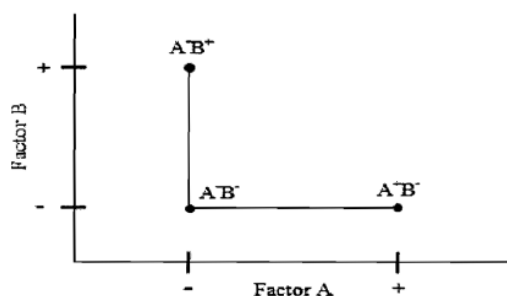
ภาพที่ 2.17 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (แบบไม่มีอันตรกิริยา) ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 220



ภาพที่ 2.18 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (แบบมีอันตรกิริยา) ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 220

2.5.6 ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

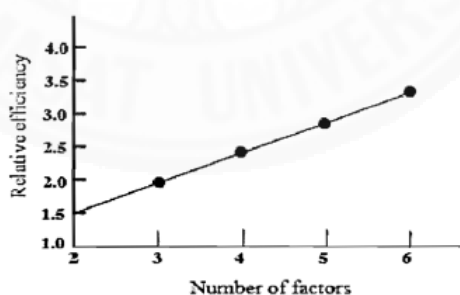
ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสามารถแสดงได้ดังนี้สมมติว่าเรามี 2 ปัจจัย (A และ B) ที่ต้องการศึกษา แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งจะแทนปัจจัยแต่ละระดับด้วย A^+ , A^- , B^+ และ B^- ตามลำดับ ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยทั้งสองสามารถหาได้จากการเปลี่ยนระดับปัจจัยทีละปัจจัย แสดงดังแสดงในภาพที่ 2.19 ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A น้อยไปมากมีค่าเป็น $A^- B^+ - A^- B^-$ เนื่องจากในการทดลองอาจจะมีค่าความผิดพลาด (Error) เกิดขึ้น ดังนั้น เราควรจะทำ การทดลองอย่าง น้อย 2 ครั้ง สำหรับการทดลองร่วมปัจจัย (Treatment Combination) แต่ละจุด และนำผลที่ได้มาเฉลี่ย เพื่อประมาณถึงผลที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะต้องทดลองทั้งหมด 6 ครั้ง (2 ครั้ง จาก $A^+ B^-$, 2 ครั้งจาก $A^- B^-$, และ 2 ครั้งจาก $A^- B^+$)



ภาพที่ 2.19 การออกแบบทีละปัจจัย (One-factor-at-a-time Experiment)

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 200)

ถ้าทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเราจะต้องทำการทดลองร่วมปัจจัย $A^+ B^+$ เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งการทดลองในตอนนี้อาจใช้เพียงแค่ 4 การทดลองเท่านั้นเพื่อหาผลที่เกิดจากปัจจัย A นั่นคือ $A^+ B^- - A^- B^-$ และ $A^+ B^+ - A^- B^+$ และผลที่เกิดจากปัจจัย A หาได้จากการนำค่าประมาณที่ได้ทั้งสองค่ามาเฉลี่ยและหาผลต่างของมันซึ่งก็คือ $(A^+ B^- - A^- B^-)/2 - (A^+ B^+ - A^- B^+)/2$ นั่นเอง และค่าผลที่เกิดจากปัจจัย A ที่ได้ควรจะมีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับการทดลองทีละปัจจัยในทำนองเดียวกันกับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่กล่าวมานี้เราสามารถหาผลที่เกิดจากปัจจัย B ได้เช่นกัน ดังนั้น ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลต่อการทดลองแบบทีละปัจจัยมีค่าเป็น $6/4 = 1.5$ ซึ่งตามปกติแล้วค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของปัจจัยเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ระหว่างการทดลองแบบแฟกทอเรียลต่อการทดลองทีละปัจจัย

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา, 2545, 221

สมมติว่าในการทดลองนี้มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกิดขึ้น ถ้าการทดลองแบบทีละปัจจัยได้ผลออกมาว่า ผลตอบของ $A^- B^+$ และ $A^+ B^-$ ดีกว่า $A^- B^-$ แล้ว ข้อสรุปก็ควรจะเป็นว่าผลตอบของ $A^+ B^+$ ควรจะดียิ่งการนั้นอีก แต่จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าเมื่อใดก็ตามที่มีอันตรกิริยา

ระหว่างปัจจัยเกิดขึ้น ข้อสรุปเช่นนี้อาจจะนำไปสู่ความผิดพลาดอย่างใหญ่หลวงได้ สรุปก็คือ การออกแบบเชิงแพททอเรียลมีประโยชน์หลายประการและเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่า การทดลองแบบที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแพททอเรียลยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของงานวิจัยของ ศิริศักดิ์ รังกลาง ปภากร พิทยชวล และ จิระพล ศรีเสริฐผล (2554) พบว่าวัตถุดิบที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ไฟฟ้าชนิดอ่อนนั้น มีขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ ขั้นตอนการติดแผ่นเคลือบวงจรที่เป็นกรุปคลุมเส้นลายวงจรโดยใช้ความร้อนเชื่อมติดกับแผ่นเคลือบ (cover layer) ขั้นตอนนี้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันสนิมให้กับตัวแผ่นวงจรพิมพ์เอง และส่งผลดีให้กับตัวชิ้นงานที่แผ่นวงจรพิมพ์จะไปประกอบด้วยให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์แบ่งได้เป็น 2 วิธีการ คือ การเคลือบโดยใช้เตารีด (Iron) และการเคลือบด้วยเครื่องจักร (Hot bar machine) ซึ่งมีการวิจัยเปรียบเทียบคุณภาพของแผ่นวงจรพิมพ์จากทั้ง 2 วิธีการโดยใช้ค่า Peel Strength ในการชี้วัดคุณภาพ พบว่าเมื่อควบคุมอุณหภูมิและเวลาเคลือบเท่ากัน การเชื่อมติดแผ่นเคลือบด้วยเครื่องจักรให้ค่า Peel Strength อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และผิวเคลือบเรียบสม่ำเสมอส่วนการเคลือบด้วยเตารีดนั้นส่งผลให้ค่า Peel Strength ต่ำกว่าช่วงที่ยอมรับได้นอกจากนั้นลักษณะผิวเคลือบแผ่นวงจรยังเกิดเป็นรอยยับย่นเกิดเป็นของเสียในการผลิต

ซึ่งองค์ประกอบที่มีผลต่อการเคลือบแผ่นพิมพ์วงจร ได้แก่ กาว อุณหภูมิ และแรงกดที่ใช้เคลือบโดยมีการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบเพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อการยึดเกาะในกระบวนการเชื่อมติดและใช้การออกแบบการทดลองชนิดสุ่มสมบูรณ์และวิธีของทากูเคชิในการศึกษาซึ่งจากงานวิจัยของกฤษฎา สุรวฒนวิเศษ และพีระพงศ์ ตรีเจริญ (2549) มีการยืนยันถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ของตัวกาว ซึ่งในการศึกษาลักษณะจำเพาะของสารประกอบเชิงโลหะที่ใช้ในการบัดกรี (กาว) พบว่าสารประกอบเชิงโลหะมีลักษณะจำเพาะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ยกมาเป็นกรณีศึกษาคือใช้วัสดุที่ใช้เชื่อมติด 2 ชนิด คือ ลูกบอลบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu คู่กับ Ni-Au pad และ OSP pad และใช้อุณหภูมิในการเชื่อมติดลูกบอลบัดกรี 3 ระดับ โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด $(NiCu)_3Sn_4$, $(CuNi)_6Sn_5$ และ Cu_6Sn_5 ที่มีความหนาและรูปร่างแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุที่ใช้เชื่อมติด และอุณหภูมิที่ใช้เชื่อมติด ซึ่งพบว่าสารประกอบเชิงโลหะชนิด Cu_6Sn_5 มีความหนามากที่สุด ในขณะที่ $(NiCu)_3Sn_4$ มีความหนาน้อยที่สุด โดยโลหะที่นำมาทดลอง

เมื่อได้รับความร้อน ความดัน หรือกระบวนการทางเคมี จะเกิดการแพร่ของอะตอม มีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ ได้แก่ ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการเชื่อมติด ความร้อน และความดันที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงสภาวะแวดล้อมของการใช้งานผลิตภัณฑ์วงจรรวม โดยทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะที่มีระดับความหนา รูปร่าง และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันได้ ซึ่งลักษณะของสารประกอบเชิงโลหะที่ต่างกันนี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลที่บริเวณรอยต่อของโลหะบัดกรี เช่น ความแข็งแรง ความเปราะ ความล้า และความทนทานต่อการใช้งาน เป็นต้น

จากการศึกษาของศิริศักดิ์ รังกลาง (2554) ทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์และตัวแผ่นเคลือบเองก็ได้พบว่า การเคลือบแผ่นวงจรด้วยเครื่องนั้น Hot bar machine จะให้ค่า Peel strength ที่สูงกว่าการเคลือบด้วยเตารีดอุตสาหกรรม เนื่องจากเครื่อง Hot bar machine สามารถกระจายความร้อนได้ดีดีกว่าการใช้เตารีดให้ความร้อนที่มุมและขอบของแผ่นวงจร จากการทดลองดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้จริงในกระบวนการผลิต พบว่าการเคลือบแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเครื่อง Hot bar machine สามารถลดเวลาในการผลิตลง 5.77% รวมถึงสามารถลดของเสียลงได้ 87.1% โดยค่าอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามคุณสมบัติของวัสดุแผ่นเคลือบ ดังนั้น จึงต้องควรศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบด้วย

ซึ่งตรงกับในงานวิจัยของวรวิทย์ ก่อวงศ์พาณิชย์ (2547) ที่มุ่งเน้นไปยังการหาค่าพารามิเตอร์ของการเคลือบด้วยเครื่องจักร (Hot bar machine) หรือเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน (Hot Bar Soldering system) ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อลดจำนวนของเสียที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม แต่จะมี 3 ส่วนหลักๆ คือ (1) Soldering Control Unit (SCU) ที่มีหน้าที่ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวแท่งโลหะ (2) Bonding Head ที่ประกอบไปด้วยกลไกต่างๆ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งโลหะ (3) แท่งโลหะ (Hot Bar) ที่เป็นส่วนที่ถูกยึดติดกับส่วนล่างสุดของ Bonding Head ด้วยสกรู ซึ่งมีหน้าที่ในการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อถ่ายเทให้กับบริเวณที่ต้องการจะยึดติด

และจากการศึกษาคูณลักษณะทางความร้อนของแท่งโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เงื่อนไขของตัวแปรควบคุมจากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งปล่อยกระแสไฟฟ้าด้วยขนาดและรูปร่างคลื่นที่ต่างกัน ทำให้ทราบถึงผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะของการป้อนกระแสไฟฟ้า รูปทรงเรขาคณิตและสมบัติวัสดุของแท่งโลหะ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมในการควบคุมการกระจายของอุณหภูมิ และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ อาจไม่เป็นไปตาม

คุณภาพที่ต้องการได้ โดยตัวแปรหนึ่งคือตัวแท่งโลหะเองที่อาจต้องคำนึงถึงการออกแบบและวัสดุที่นำมาใช้ประกอบ เพราะถ้าเลือกใช้สมบัติของวัสดุที่ค่าการแพร่ความร้อนสูงและถ่ายเทความร้อนได้ดี จะช่วยลดระยะเวลาของการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ เพราะการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นอยู่เสมอเมื่อเกิดแท่งโลหะลงบนตัวชิ้นงาน และถ้าใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่งความราบเรียบของตัวแท่งโลหะเองจะเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อความต้านทานความร้อนที่ทำให้การควบคุมคุณภาพอาจไม่เป็นไปตามต้องการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกมลวิภา พิงเจียก ชัยพนม หนูแก้ว กรรณชัย กัลยาศิริ (2556) ที่ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง โดยได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นๆ สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบัดกรีด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่รอยบัดกรีเป็น Cu_6Sn_5 ที่ทุกอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรี และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของการยึดติดตัวชิ้นงาน คือ อุณหภูมิและเวลา

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการประกอบชิ้นงานที่เป็นตัวเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการผลิตก่อนว่ามีขั้นตอนอะไรบ้าง และกระบวนการก่อนหน้ามีผลต่อการติดแผ่นวงจรหรือไม่

3.1 การศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการเพื่อระบุปัญหา

3.1.1 กระบวนการผลิตเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณ

กระบวนการผลิตเครื่องส่งหรือตัวส่งสัญญาณแบ่งออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

1.1) ทดสอบรอยร้าวของตัวชิ้นงาน

1.2) ตรวจสอบวัตถุดิบที่จะนำมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์พร้อมทั้งจัดเตรียม

วัตถุดิบให้พร้อมสำหรับการผลิต

1.3) พิมพ์ตัวอักษรบนตัวชิ้นงานด้วยแสงเลเซอร์

- กระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์

2.1) ติดตัวอุปกรณ์เนื้องานและตัวควบคุมอุณหภูมิลงบนชิ้นงาน

2.2) ติดตัววงจรรวมลงบนชิ้นงาน

2.3) เชื่อมลวดทองคำให้กับตัวอุปกรณ์ที่ติดลงบนชิ้นงาน

2.4) ปิดฝาตัวชิ้นงานด้วยการเชื่อมด้วยไฟฟ้าพร้อมทดสอบรอยร้าว

2.5) ติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นกับตัวชิ้นงาน

2.6) ติดเลนส์กับตัวชิ้นงานด้วยการจัดแนวและเชื่อมติดด้วยแสงเลเซอร์

- กระบวนการทดสอบชิ้นงานและตรวจสอบขั้นสุดท้าย

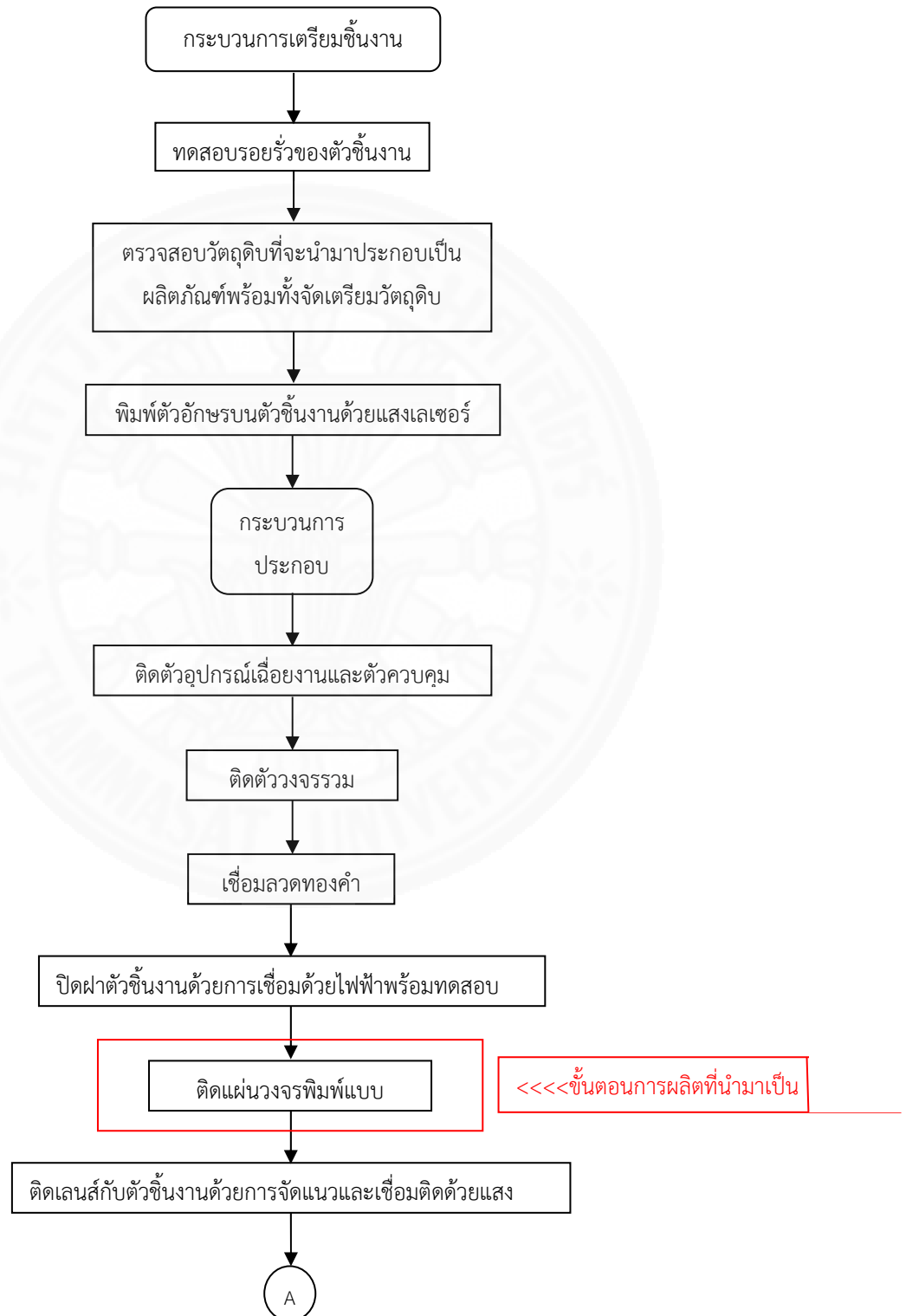
3.1) ทดสอบวงจรภายในตัวชิ้นงาน

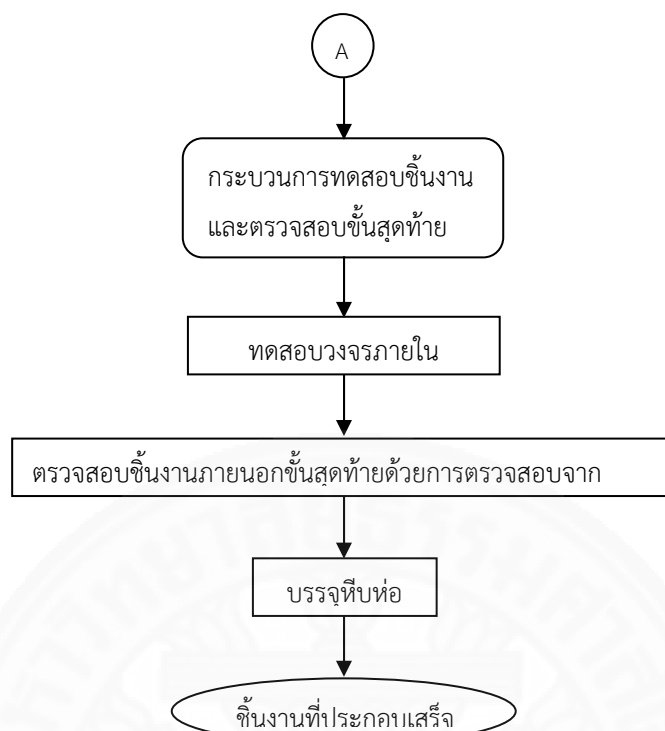
3.2) ตรวจสอบชิ้นงานภายนอกขั้นสุดท้ายด้วยการตรวจสอบจากสายตาบรรจุ

หีบห่อและการจัดส่ง

สัญญาณ

แสดงการไหลของกระบวนการในการประกอบผลิตภัณฑ์เครื่องส่งหรือตัวส่ง





ภาพที่ 3.1 การไหลของกระบวนการ

จากกระบวนการไหลข้างต้นจะพบว่ากระบวนการก่อนหน้าเป็นการติดตั้งงานลงใน Package และปิดฝาบนตัว Package ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับใดๆ กับกระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น และส่วนชิ้นงานที่นำมาประกอบ (แผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น) เป็นวัสดุที่มีการโลหะบัดกรีเคลือบมาที่ลายวงจรของตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นมาอยู่แล้ว (จาก Supplier) จึงไม่สามารถควบคุมตัวแผ่นวงจรนี้ได้ แต่ได้มีการทดสอบการเคลือบโลหะบัดกรีเองด้วยการ Print Screen Solder Paste ลงบนตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแล้วทำการ Reflow Soldering โดยให้ผลลัพธ์ออกมาให้เหมือน FPC ที่ได้รับจาก Supplier มากที่สุด (ดู Appearance, Cross Section) และลองติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นกับตัวชิ้นงานพร้อมทั้งทดสอบค่า Peel Strength พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ทดสอบที่เครื่องจักรปัจจุบัน) ส่วนในตารางที่ 3.2 แสดงค่า Peel Strength โดยเฉลี่ยของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นที่ใช้อยู่ปัจจุบัน

ตารางที่ 3.1

ค่า Peel Strength ของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหย่อนที่นำเคลือบโลหะบัดกรีเองด้วยการ Print Screen Solder Paste

Peel strength test		
unit no.	RF (kgf)	DC (kgf)
#1	3.7574	5.4147
#2	2.0806	2.3509
#3	2.8484	3.0292
#4	2.9365	4.2412
#5	2.4075	2.9015
#6	3.7713	3.8660
#7	3.0076	2.5489
#8	3.8089	3.4462
#9	2.0590	5.8293
#10	3.1395	5.6436
min	2.0590	2.3509
max	3.8089	5.8293
average	2.9817	3.9272

ตารางที่ 3.2

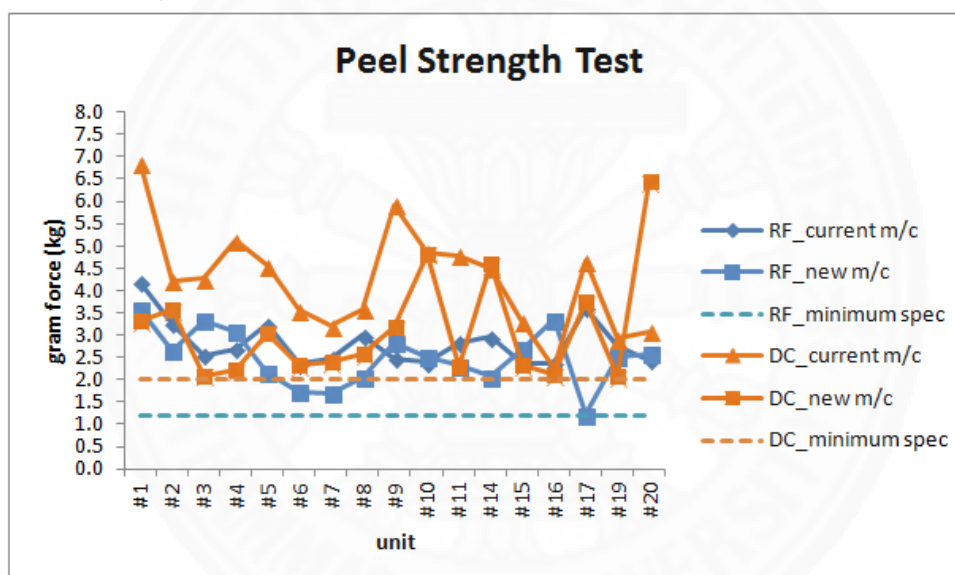
ค่า Peel Strength โดยเฉลี่ยของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหย่อนที่ใช้อยู่ปัจจุบัน Current hot bar system

unit	RF (kgf)	DC (kgf)
spec	1.200	2.000
min	2.3478	2.2522
max	4.1836	6.8500
average	2.8171	4.2140

และจากที่ได้เกริ่นในบทนำว่าหลังจากที่มีการติดตั้งเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อนตัวใหม่เรียบร้อย และได้มีการทดสอบการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานโดยใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกับเครื่องที่มีอยู่แล้ว ผลปรากฏว่าค่าทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอก มีค่าโดยเฉลี่ยลดลงดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งถือเป็นสัญญาณบ่งชี้ว่าชิ้นงานที่ได้จากเครื่องใหม่อาจมีคุณภาพที่ไม่ดีเท่าเดิม และอาจทำให้เกิดของเสียในการผลิตเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.3

กราฟแสดงค่าทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอก (Peel Strength) เปรียบเทียบระหว่างเครื่องจักรปัจจุบันกับเครื่องจักรใหม่โดยทดสอบกับชิ้นงานตัวอย่าง 20 ชิ้น



3.1.2 กระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นในสายการผลิตปกติ

จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้ โดยที่พารามิเตอร์ของส่วนต่างๆ จะเป็นค่าคงที่ตลอดกระบวนการ ยกเว้นในส่วนของอุณหภูมิ และเวลาของเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อนที่สามารถตั้งค่าให้แตกต่างกันได้

- 1) ขั้นตอนการเตรียมพร้อมเป็นการเตรียมสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องจักรให้อยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งาน
- 2) ขั้นตอนการดำเนินงานเป็นการปรับตำแหน่งระหว่าง Pad บน Flex และ Pad บน Package ให้ตรงกัน แล้วเปิดปุ่มของเครื่องให้ความร้อน และกดปุ่ม Start เพื่อเริ่มกระบวนการจนเสร็จเรียบร้อย

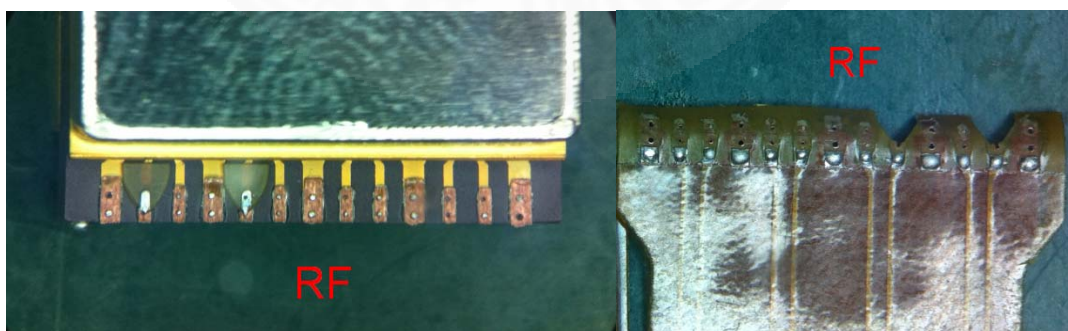
3) ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานหลังติดเสร็จ เป็นการตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตาภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30-50x เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าเห็นตะกั่วไหลเชื่อมกับชิ้นงานหรือไม่ มีรอยหรือคราบสกปรกหรือไม่ ถ้าเจอต้องทำความสะอาดให้เรียบร้อยก่อนส่งชิ้นงานไปกระบวนการถัดไป

โดยก่อนจะเริ่มกระบวนการผลิตของทุกวันจะต้องมีการตรวจสอบกระบวนการโดยทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) 2 ตัวก่อน โดยมีเงื่อนไขการยอมรับดังนี้

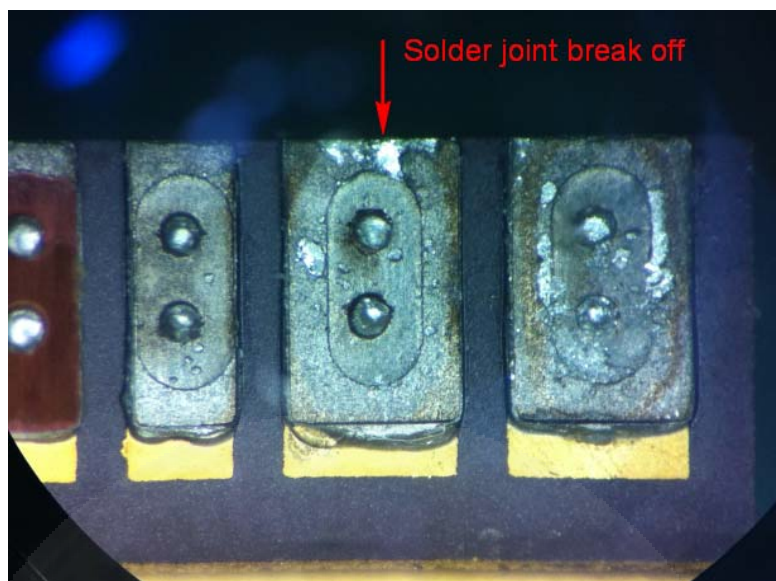
1) มีตะกั่วอยู่บนทุก Pad ของ Package และจะต้องเห็นเศษ Flex เกาะติดอยู่บนบาง Pad ของ Package หรือมองเห็นว่า Solder มีการดึงฉีกขาดออกจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.2 Peel test ของ DC



ภาพที่ 3.3 Peel test ของ RF



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างของ Solder joint break off

2) ค่าทดสอบต้องได้มากกว่าเกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก

a) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF) 1.2 kgf (Kilogram force)

b) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 2 kgf (Kilogram force)

การวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก ทำได้โดยการนำชิ้นงานไหลตเข้าเครื่อง Peel test machine ดังที่ได้แสดงไปในภาพที่ 1.5 บทที่ 1 แล้วทำการดึงแผ่นวงจรยึดหยุ่นออกจากตัวชิ้นงานในแนวแกนตั้ง (ดึงขึ้น) โดยเครื่องจักรจะทำการตรวจจับค่าแรงดึงลอกที่กระทำขณะทดสอบ โดยจะแสดงผลค่าแรงดึงลอกที่มากที่สุดที่ทำให้แผ่นวงจรแบบยึดหยุ่นหลุดออกจากตัวชิ้นงาน



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) และวิธีการทดสอบ

3.1.3 พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการควบคุมเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน

ตารางที่ 3.4

โปรไฟล์ของเครื่อง Hot Bar Soldering System ที่ติดตั้งอยู่ในไลน์การผลิตปัจจุบัน

Hot Bar profile	Normal profile	
	Temperature (°C)	Duration (Second)
Pre Heat	200	0
Ramp Time before Reflow	-	2
Reflow	400	5
Cool Down	180	-

พารามิเตอร์ที่สนใจ

อุณหภูมิ (ช่วงอุณหภูมิเตรียมความร้อน และช่วงอุณหภูมิที่ตะกั่วหลอมเหลว)

เวลา (ช่วงเวลาที่อุณหภูมิเตรียมความร้อน แล้วช่วงเวลาที่ตะกั่วหลอมเหลว)

3.1.4 คุณสมบัติชิ้นงานที่ดี

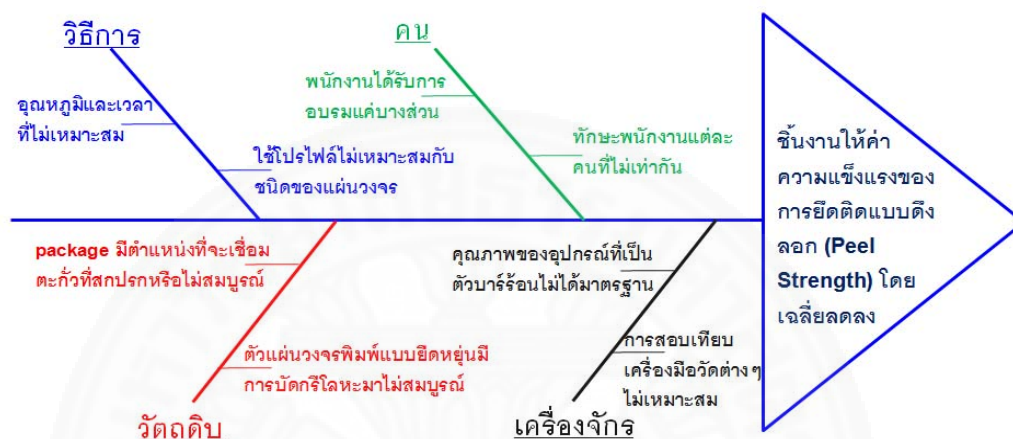
- 1) ตะกั่วต้องมีการเชื่อมติดอย่างสมบูรณ์
- 2) ตะกั่วต้องไม่เกิดการรวมตัวกับออกซิเจนหรือปรากฏคราบสนิม
- 3) ตะกั่วต้องไม่เชื่อมติดกันระหว่าง Pad
- 4) เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจะต้องเห็นเศษ Flex เกาะติดอยู่บนบาง Pad ของ Package หรือมองเห็นว่า Solder มีการดึงฉีกขาดออกจากกัน
- 5) ค่าทดสอบต้องได้มากกว่าเกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก

3.2 การคัดเลือกปัจจัยในการทดลอง

การค้นหาสาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพตัวชิ้นงานให้มีความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกโดยเฉลี่ยลดลงนั้น ได้ใช้เครื่องมือคุณภาพที่เรียกว่า แผนภาพก้างปลา ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หรือหาสาเหตุปัจจัยเหล่านั้น โดยแบ่งกลุ่มการพิจารณาออกเป็น 4 หมวดใหญ่ตามหลักการ 4M ดังนี้

- 1) ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
 - พนักงานได้รับการอบรมหรือเทรนงานแค่บางส่วน ทำให้ชิ้นงานที่ได้ออกมา คุณภาพไม่เหมือนเดิม
 - ทักษะพนักงานแต่ละคนที่ไม่เท่ากัน ทำให้การปฏิบัติงานไม่เหมือนกันและคุณภาพชิ้นงานก็เลยได้ไม่เท่ากันด้วย
- 2) ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
 - การสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ ไม่เหมาะสม ทำให้เครื่องจักรทำงานเพี้ยนไปจากเดิม
 - คุณภาพของอุปกรณ์ที่เป็นตัวบาร์ร้อนไม่ได้มาตรฐานทำให้การเชื่อมตะกั่วไม่สมบูรณ์
- 3) ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
 - ตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นมีการบัดกรีโลหะมาไม่สมบูรณ์
 - ตัวชิ้นงานที่เป็น package ตำแหน่งที่จะเชื่อมตะกั่วสกปรกหรือไม่สมบูรณ์
- 4) ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
 - ใช้โปรไฟล์ให้เหมาะสมกับชนิดของแผ่นวงจรนั้นๆ เพราะในการทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก มีเกณฑ์การพิจารณาแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นออกเป็น 2 ประเภทชัดเจน ดังนั้น ค่าโปรไฟล์จึงควรตั้งให้เหมาะสมกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบนั้นๆ ด้วย

- อุณหภูมิและเวลาที่ไม่เหมาะสม (ช่วงเตรียมความร้อน และช่วงที่ตะกั่วหลอมเหลว) เมื่อเราตั้งอุณหภูมิไว้ค่าๆ หนึ่งกับช่วงเวลาหนึ่งๆ อาจทำให้การเชื่อมตะกั่วได้ผลดี แต่อาจยังไม่ดีที่สุด หรืออาจให้ผลที่ไม่ดีก็ได้ เช่นถ้าตั้งให้มีค่ามากเกินไป ตะกั่วที่ผ่านจุดหลอมเหลวไปแล้วจะเริ่มแข็งจนกรอบและพื้นผิวจะมีลักษณะแตกกลายเป็นริ้วๆ ซึ่งถือเป็นคุณภาพที่ไม่ดี



ภาพที่ 3.6 แผนภาพก้างปลา

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพก้างปลาพบว่า มีปัจจัยที่น่าสนใจอยู่ 8 ปัจจัย ปัจจัยเหล่านี้จำเป็นต้องคัดเลือกก่อนเพื่อนำไปดำเนินการต่อตามแผนการทดลอง โดยอาจใช้ข้อมูลการทดลองที่ได้ทำไปแล้วในอดีต หรือความรู้ทางวิศวกรรมเข้าช่วยในการเลือกเพื่อให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งเกณฑ์ในการเลือกใช้หลักการดังต่อไปนี้

- 1) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องโดยตรงและสามารถปรับค่าได้
- 2) เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมและตรวจสอบได้ในกระบวนการผลิตปกติ
- 3) เป็นปัจจัยที่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านอื่นๆ ในกระบวนการผลิต
- 4) เป็นปัจจัยที่มีการใช้ความรู้เชิงวิศวกรรมและผลการทดลองในอดีตเข้ามาร่วมพิจารณา

3.2.1 การพิจารณาคัดเลือกปัจจัย

การพิจารณาคัดเลือกปัจจัยต่างๆ ว่าควรถูกเลือกเป็นปัจจัยเพื่อใช้ในการทำการศึกษาดูด้วยการออกแบบการทดลองหรือไม่นั้นสามารถอธิบายถึงเหตุผลต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) ปัจจัยที่เกิดจากคน
 - พนักงานได้รับการอบรมหรือเทรนงานแค่บางส่วน ทำให้ชิ้นงานที่ได้ออกมามีคุณภาพไม่เหมือนเดิม

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

- ทักษะพนักงานแต่ละคนที่ไม่เท่ากัน ทำให้การปฏิบัติงานไม่เหมือนกันและคุณภาพชิ้นงานก็เลยได้ไม่เท่ากันด้วย

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

เหตุผล: 2 ปัจจัยนี้ถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยควบคุม โดยการใช้พนักงานชุดเดิมตลอดการทดลอง โดยกำหนดเฉพาะพนักงานที่ได้รับการฝึกอบรมอย่างถูกต้องเท่านั้น

2) ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร

- การสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆไม่เหมาะสม ทำให้เครื่องจักรทำงานเพี้ยนไปจากเดิม

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

- คุณภาพของอุปกรณ์ที่เป็นตัวบาร์ร้อนไม่ได้มาตรฐานทำให้การเชื่อมตะกั่วไม่สมบูรณ์

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

เหตุผล: มีการสอบเทียบเครื่องมือต่างๆ โดยตรวจสอบที่ระบบตรวจจับอุณหภูมิและชุดทำความร้อนในจุดต่างๆ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าอุปกรณ์ทุกอย่างทำงานได้ตามปกติพร้อมสอบถามไปยังผู้ผลิตตัวอุปกรณ์บาร์ร้อนว่ามีอะไรผิดปกติหรือไม่ พบว่า อุปกรณ์มีคุณภาพตรงตามใบสั่งซื้อสินค้า ดังนั้น 2 ปัจจัยนี้จึงไม่ถูกพิจารณา

3) ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)

- ตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นมีการบัดกรีโลหะมาไม่สมบูรณ์

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

- ตัวชิ้นงานที่เป็น package ตำแหน่งที่จะเชื่อมตะกั่วสกปรกหรือไม่สมบูรณ์

ผลการคัดเลือก: ไม่ถูกนำมาพิจารณา

เหตุผล: วัตถุดิบถูกส่งมาจากทางผู้ผลิตอีกเจ้าหนึ่งซึ่งมีผลตรวจที่รับรองถึงคุณภาพของวัตถุดิบที่ส่งมา และในการทดลองมีแผนที่จะควบคุมลดการผลิตของวัตถุดิบ ดังนั้น 2 ปัจจัยนี้จึงไม่ถูกพิจารณา

4) ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)

- ใช้โปรไฟล์ไม่เหมาะสมกับชนิดของแผ่นวงจรนั้นๆ เพราะในการทดสอบค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) มีเกณฑ์การพิจารณาแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นออกเป็น 2 ประเภทชัดเจน ดังนั้นค่าโปรไฟล์จึงควรตั้งให้เหมาะสมกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบนั้นๆ ด้วย

ผลการคัดเลือก: ถูกนำมาพิจารณา

- อุณหภูมิและเวลาที่ไม่เหมาะสม (ช่วงเตรียมความร้อน และช่วงที่ตะกั่วหลอมเหลว) เมื่อเราตั้งอุณหภูมิไว้ค่าๆ หนึ่งกับช่วงเวลาหนึ่งๆ อาจทำให้การเชื่อมตะกั่วได้ผลดี แต่อาจยังไม่ดีที่สุด หรืออาจให้ผลที่ไม่ดีก็ได้ เช่นถ้าตั้งให้มีค่ามากเกินไป ตะกั่วที่ผ่านจุดหลอมเหลวไปแล้วจะเริ่มแข็งจนกรอบและพื้นผิวจะมีลักษณะแตกกลายเป็นริ้วๆ ซึ่งถือเป็นคุณภาพที่ไม่ดี

ผลการคัดเลือก: ถูกนำมาพิจารณา

เหตุผล: 2 ปัจจัยถูกเลือกมาดำเนินการออกแบบการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิและเวลามีผลอย่างมากกับคุณภาพของการเชื่อมตะกั่วที่ได้ ซึ่งถ้าตั้งค่าไม่เหมาะสมการเชื่อมตะกั่วไม่ดี ค่าทดสอบที่ได้ก็จะมีค่าลดลงไปด้วย และเมื่อพิจารณาถึงชนิดของแผ่นวงจรด้วยแล้วจึงควรที่จะมีการกำหนดโปรไฟล์ที่ใช้กับชนิดของแผ่นวงจรนั้นๆ ให้ชัดเจน

ซึ่งสามารถสรุปผลการคัดเลือกปัจจัยได้ตามตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.5

สรุปการพิจารณาคัดเลือกปัจจัย

ประเภท	ปัจจัย	ผลการคัดเลือก
เกิดจากคน	พนักงานได้รับการอบรมหรือทราบงานแค่บางส่วน	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
	ทักษะพนักงานแต่ละคนที่ไม่เท่ากัน	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
เกิดจากเครื่องจักร	การสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆไม่เหมาะสม	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
	คุณภาพของอุปกรณ์ที่เป็นตัวบาร์ร้อนไม่ได้มาตรฐาน	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
เกิดจากวัตถุดิบ	ตัวแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นมีการบัดกรีโลหะมาไม่สมบูรณ์	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
	ตัวชิ้นงานที่เป็น package ตำแหน่งที่จะเชื่อมตะกั่วสกปรกหรือไม่สมบูรณ์	ไม่ถูกนำมาพิจารณา
เกิดจากวิธีการ	ใช้โปรไฟล์ไม่เหมาะสมกับชนิดของแผ่นวงจร	ถูกนำมาพิจารณา
	อุณหภูมิและเวลาที่ไม่เหมาะสม	ถูกนำมาพิจารณา

3.2.2 สรุปปัจจัยที่คัดเลือกมาดำเนินการออกแบบการทดลอง

จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นรวมถึงมีการระดมความคิดกับทีมงานที่เกี่ยวข้องและคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้ในการดำเนินการทดลอง จึงสรุปปัจจัยตามที่แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6

ปัจจัยที่ถูกคัดเลือกโดยการพิจารณาจากแผนภาพกว้างปลา

ปัจจัย	หน่วย
1. อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน	องศาเซลเซียส
2. อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว	องศาเซลเซียส
3. เวลาช่วงเตรียมความร้อน	วินาที
4. เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว	วินาที

3.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

จากการพิจารณาคัดเลือกปัจจัยในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่มีแนวโน้มประกอบด้วย 4 ปัจจัย และจากการศึกษากระบวนการผลิตพบว่ามีข้อกำหนดเฉพาะของเครื่องจักรปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 3.3

ในการทดลองเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่จะทำการทดลอง ได้ทำการทดลองโดยอ้างอิงจากค่าพารามิเตอร์ในปัจจุบันโดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ โดยนำค่าอุณหภูมิและเวลามาพิจารณา โดยอ้างอิงจากอุณหภูมิและเวลาที่เป็นคุณลักษณะจำเพาะของตัวสารตะกั่วเป็นตัวกำหนดขอบเขต ซึ่งจะสามารถอธิบายระดับปัจจัยต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7

ขอบเขตของระดับปัจจัยที่พิจารณา

ปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์	ข้อกำหนด จำเพาะของ ตัวสารตะกั่ว	ค่า ปัจจุบัน	ระดับปัจจัย	
					Low level	High level
1. อุณหภูมิช่วงเตรียม ความร้อน	องศา เซลเซียส	A	200-300	200	200	300
2. อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว	องศา เซลเซียส	B	400-500	400	400	500
3. เวลาช่วงเตรียม ความร้อน	วินาที	C	2-6	2	2	6
4. เวลาช่วงตะกั่ว หลอมเหลว	วินาที	D	3-7	5	3	7

3.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้น

หลังจากมีการกำหนดปัจจัยพร้อมทั้งระดับเรียบร้อยแล้ว จึงมีการออกแบบการทดลองไว้ 10 การทดลอง เพื่อดูความเหมาะสมของค่าปัจจัยและระดับที่เลือก โดยอ้างอิงจากพารามิเตอร์ปัจจุบันแล้วสังเกตถึงผลที่ได้ว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแต่ละปัจจัยมีผลอย่างไรต่อคุณภาพของการยึดติดชิ้นงานด้วยเครื่อง Hot bar soldering system โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ปัจจุบันที่ใช้อยู่ในเครื่องปกติ โดยเริ่มจากเขตค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อนเริ่มที่ 200 องศาเซลเซียส Low level และ High level จะอยู่ที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียสตามลำดับ อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลวเริ่มที่ 400 องศาเซลเซียส Low level และ High level จะอยู่ที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาช่วงเตรียมความร้อนเริ่มที่ 2 วินาที Low level และ High level จะอยู่ที่ 2 และ 6 วินาทีตามลำดับ เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลวเริ่มที่ 5 วินาที ตรงจุดนี้ต้องการทราบถ้าเพิ่มหรือลดเวลาจะเป็นอย่างไรจากค่าเริ่มต้น Low level และ High level จึงอยู่ที่ 3 และ 7 วินาทีตามลำดับ

ซึ่งการทดลองจะมีจำนวนเท่ากับ $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ การทดลอง โดยการวิจัยนี้จะมี การทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประเมินค่าการทดลองได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้

ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 32 การทดลอง และใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ช่วยในจัดลำดับและขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง จะได้แผนการทดลอง ตามภาพที่ 3.7 โดยแยกการทดลองของแต่ละชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นออกจากกัน ซึ่งสรุปพารามิเตอร์ที่ต้องการทดลองเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 3.9 และ 3.9

Full Factorial Design

```
Factors: 4 Base Design: 4, 16
Runs: 32 Replicates: 2
Blocks: 1 Center pts (total): 0
```

All terms are free from aliasing.

ภาพที่ 3.7 แผนการทดลอง ที่มา: Minitab Version 16

ตารางที่ 3.8

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้นชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
12	1	1	1	300	500	2	7
7	2	1	1	200	500	6	3
23	3	1	1	200	500	6	3
17	4	1	1	200	400	2	3
31	5	1	1	200	500	6	7
19	6	1	1	200	500	2	3
26	7	1	1	300	400	2	7
5	8	1	1	200	400	6	3
2	9	1	1	300	400	2	3
8	10	1	1	300	500	6	3
27	11	1	1	200	500	2	7
22	12	1	1	300	400	6	3
9	13	1	1	200	400	2	7
29	14	1	1	200	400	6	7
11	15	1	1	200	500	2	7
3	16	1	1	200	500	2	3
6	17	1	1	300	400	6	3

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
32	18	1	1	300	500	6	7
4	19	1	1	300	500	2	3
10	20	1	1	300	400	2	7
16	21	1	1	300	500	6	7
15	22	1	1	200	500	6	7
1	23	1	1	200	400	2	3
14	24	1	1	300	400	6	7
21	25	1	1	200	400	6	3
28	26	1	1	300	500	2	7
13	27	1	1	200	400	6	7
24	28	1	1	300	500	6	3
18	29	1	1	300	400	2	3
25	30	1	1	200	400	2	7
20	31	1	1	300	500	2	3
30	32	1	1	300	400	6	7

ที่มา: Minitab Version 16

ตารางที่ 3.9

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเบื้องต้นชนิดแผ่นวงจร พิมพ์แบบยืดหยุ่น
แบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
10	1	1	1	300	400	2	7
6	2	1	1	300	400	6	3
21	3	1	1	200	400	6	3
18	4	1	1	300	400	2	3
8	5	1	1	300	500	6	3
2	6	1	1	300	400	2	3
1	7	1	1	200	400	2	3
32	8	1	1	300	500	6	7
9	9	1	1	200	400	2	7
12	10	1	1	300	500	2	7
31	11	1	1	200	500	6	7
29	12	1	1	200	400	6	7
11	13	1	1	200	500	2	7
13	14	1	1	200	400	6	7
24	15	1	1	300	500	6	3
28	16	1	1	300	500	2	7

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D
17	17	1	1	200	400	2	3
7	18	1	1	200	500	6	3
26	19	1	1	300	400	2	7
4	20	1	1	300	500	2	3
14	21	1	1	300	400	6	7
5	22	1	1	200	400	6	3
25	23	1	1	200	400	2	7
19	24	1	1	200	500	2	3
22	25	1	1	300	400	6	3
20	26	1	1	300	500	2	3
23	27	1	1	200	500	6	3
3	28	1	1	200	500	2	3
15	29	1	1	200	500	6	7
30	30	1	1	300	400	6	7
27	31	1	1	200	500	2	7
16	32	1	1	300	500	6	7

ที่มา: Minitab Version 16

3.5 การระบุตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง

ในที่นี้การเลือกตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาแต่ละปัจจัยและแต่ละระดับ ที่ผลต่อตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง คือ ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก มีหน่วยเป็น kgf โดยค่าเป้าหมายต้องมีค่าสูงกว่าหรือผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้

3.6 การวัดตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง

ในการวัดตัวแปรผลลัพธ์ตอบสนอง หรือการวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก ทำได้โดยการนำชิ้นงานโพลีเอทิลีนเข้าเครื่อง Peel test machine ดังที่ได้แสดงไปในภาพที่ 1.5 บทที่ 1 แล้วทำการดึงแผ่นวงจรยึดหยุ่นออกจากตัวชิ้นงานในแนวแกนตั้ง (ดิ่งขึ้น) โดยเครื่องจักรจะทำการตรวจจับค่าแรงดึงลอกที่กระทำขณะทดสอบ โดยจะแสดงผลค่าแรงดึงลอกที่มากที่สุดที่ทำให้แผ่นวงจรแบบยึดหยุ่นหลุดออกจากตัวชิ้นงาน

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^k นำไปวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ทั้งในส่วนของการทดลองเบื้องต้น การทดลองเพื่อยืนยันผล โดยในการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่าความน่าจะเป็น (Pvalue) ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นนั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะทำให้ได้ข้อสรุปว่าปัจจัยใดที่มีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก

3.8 ขั้นตอนการทำการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ

หลังจากที่ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกอย่างมีนัยสำคัญจากการกรองปัจจัยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป 2^k (Full Factorial Design) พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

3.9 ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล

เมื่อได้ระดับของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดลองการยืนยันผลเพื่อเป็นการยืนยันความมีประสิทธิภาพต่อเนื่องจากขั้นตอนที่ผ่านมา ผู้วิจัยจึงได้มีการทดสอบจริงกับตัวชิ้นงานอีกครั้งด้วยการนำเอาปัจจัยและระดับที่สรุปมาแล้วว่าเหมาะสมที่จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับเครื่องปัจจุบัน แล้วจึงทำการสรุปผลการวิจัย

ในบทนี้ได้แสดงถึงขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ตั้งแต่การหาปัจจัยตอบสนองเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การออกแบบหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นกับตัวชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมระบบบาร์ร้อน (Hot Bar Soldering System) ส่วนในบทถัดไป จะเป็นการแสดงให้เห็นผลของการทดลองเบื้องต้น และนำผลข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ได้วางแผนไว้พร้อมกับสรุปผลต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากขั้นตอนการดำเนินงานและรูปแบบการทดลองที่เตรียมไว้ในบทที่ 3 ในบทนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ และทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลดังต่อไปนี้

4.1 บันทึกผลการทดลอง

ทำการทดลองโดยตั้งค่าตามตารางที่ 3.7 และ 3.8 แยกตามชนิดของวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่น โดยที่ลำดับของการทดลองเป็นไปแบบสุ่ม และเรียงลำดับการทดลองในคอลัมน์ Run Order เพื่อลดผลของสิ่งรบกวน (Experimental Error or Residuals) ที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างทำการทดลอง หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบชิ้นงานด้วยการวัดค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก (Peel Strength) ทำได้โดยการนำชิ้นงานโพลดเข้าเครื่อง Peel test machine ดังที่ได้แสดงไปในภาพที่ 1.5 บทที่ 1 โดยค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกเป็นไปตามตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1

บันทึกผลการทดลองชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Peel Strength (kgf)
12	1	1	1	300	500	2	7	3.3471
7	2	1	1	200	500	6	3	2.6763
23	3	1	1	200	500	6	3	2.5531
17	4	1	1	200	400	2	3	2.0806
31	5	1	1	200	500	6	7	2.6783
19	6	1	1	200	500	2	3	2.4466
26	7	1	1	300	400	2	7	2.8181
5	8	1	1	200	400	6	3	2.3602
2	9	1	1	300	400	2	3	2.7433
8	10	1	1	300	500	6	3	3.3791
27	11	1	1	200	500	2	7	2.4783
22	12	1	1	300	400	6	3	2.9547
9	13	1	1	200	400	2	7	2.3141
29	14	1	1	200	400	6	7	2.3879

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Peel Strength (kgf)
11	15	1	1	200	500	2	7	2.5458
3	16	1	1	200	500	2	3	2.4715
6	17	1	1	300	400	6	3	2.9365
32	18	1	1	300	500	6	7	3.6836
4	19	1	1	300	500	2	3	3.2359
10	20	1	1	300	400	2	7	2.8484
16	21	1	1	300	500	6	7	3.7574
15	22	1	1	200	500	6	7	2.4205
1	23	1	1	200	400	2	3	2.1569
14	24	1	1	300	400	6	7	3.0242
21	25	1	1	200	400	6	3	2.4075
28	26	1	1	300	500	2	7	3.2485
13	27	1	1	200	400	6	7	2.3682
24	28	1	1	300	500	6	3	3.6163
18	29	1	1	300	400	2	3	2.831
25	30	1	1	200	400	2	7	2.3478
20	31	1	1	300	500	2	3	3.3298
30	32	1	1	300	400	6	7	2.9927

ที่มา: Minitab Version 16

ตารางที่ 4.2

บันทึกผลการทดลองชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Peel Strength (kgf)
10	1	1	1	300	400	2	7	3.465
6	2	1	1	300	400	6	3	3.808
21	3	1	1	200	400	6	3	2.320
18	4	1	1	300	400	2	3	3.321
8	5	1	1	300	500	6	3	4.784
2	6	1	1	300	400	2	3	3.365
1	7	1	1	200	400	2	3	2.118
32	8	1	1	300	500	6	7	5.238
9	9	1	1	200	400	2	7	2.296
12	10	1	1	300	500	2	7	4.464
31	11	1	1	200	500	6	7	2.873
29	12	1	1	200	400	6	7	2.397
11	13	1	1	200	500	2	7	2.478
13	14	1	1	200	400	6	7	2.385
24	15	1	1	300	500	6	3	4.754

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Peel Strength (kgf)
28	16	1	1	300	500	2	7	4.462
17	17	1	1	200	400	2	3	2.219
7	18	1	1	200	500	6	3	3.208
26	19	1	1	300	400	2	7	3.519
4	20	1	1	300	500	2	3	4.325
14	21	1	1	300	400	6	7	3.572
5	22	1	1	200	400	6	3	2.328
25	23	1	1	200	400	2	7	2.252
19	24	1	1	200	500	2	3	2.516
22	25	1	1	300	400	6	3	3.636
20	26	1	1	300	500	2	3	4.415
23	27	1	1	200	500	6	3	2.947
3	28	1	1	200	500	2	3	2.670
15	29	1	1	200	500	6	7	3.285
30	30	1	1	300	400	6	7	3.676
27	31	1	1	200	500	2	7	2.765
16	32	1	1	300	500	6	7	5.075

ที่มา: Minitab Version 16

หมายเหตุ

A คือ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน

B คือ อุณหภูมิช่วงตากแห้งลอมเหลว

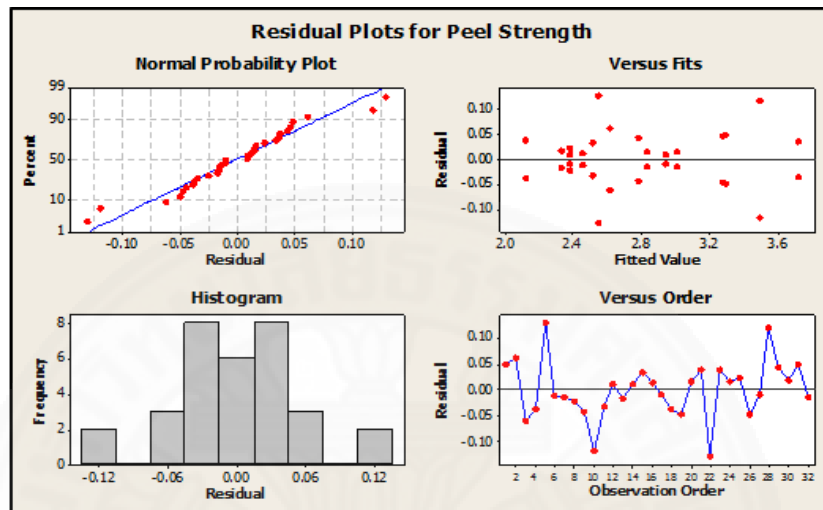
C คือ เวลาช่วงเตรียมความร้อน

D คือ เวลาช่วงตากแห้งลอมเหลว

4.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

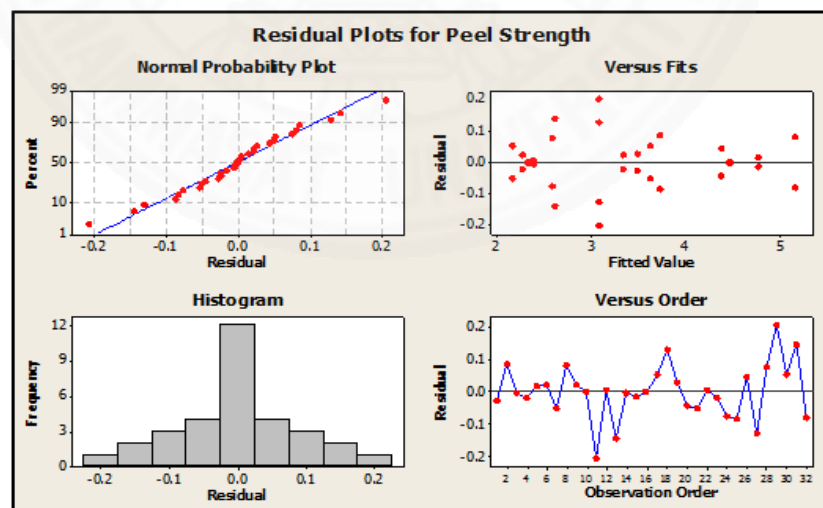
นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 โดยพิจารณาว่าปัจจัยใดมีผลต่อค่า peel strength บ้างนั้น จะวิเคราะห์จากค่าความแปรปรวนโดยดูจากค่า P-value ที่ได้ของแต่ละปัจจัย โดยถ้ามีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) จะพิจารณาว่าปัจจัยนั้นอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติที่ได้ โดยในการพิจารณาจะดูค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ประกอบ ด้วยซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) คือ การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปตามภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 Residual plots ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบ ยึดหุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ที่มา: Minitab

Version 16



ภาพที่ 4.2 Residual plots ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบ ยึดหุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ที่มา: Minitab Version 16

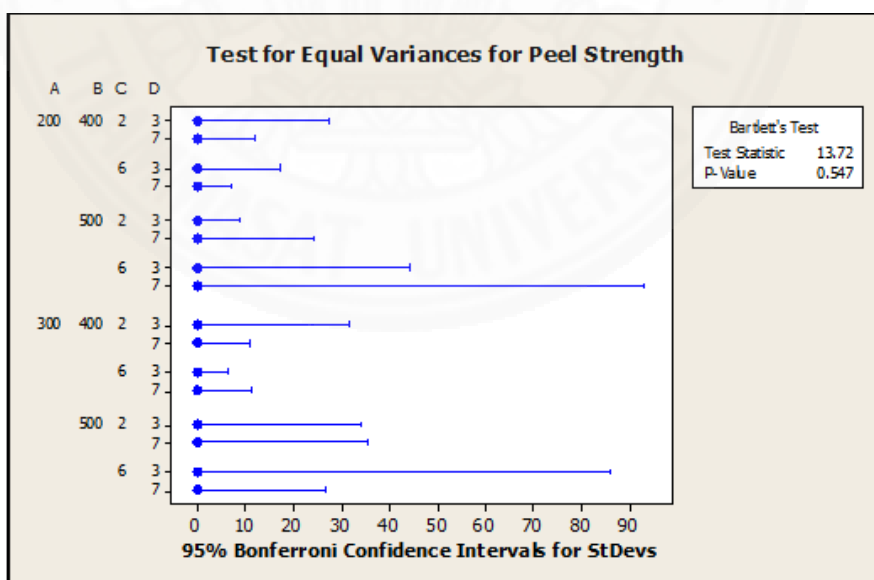
จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะทำให้สรุปได้ดังนี้

- การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่อิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

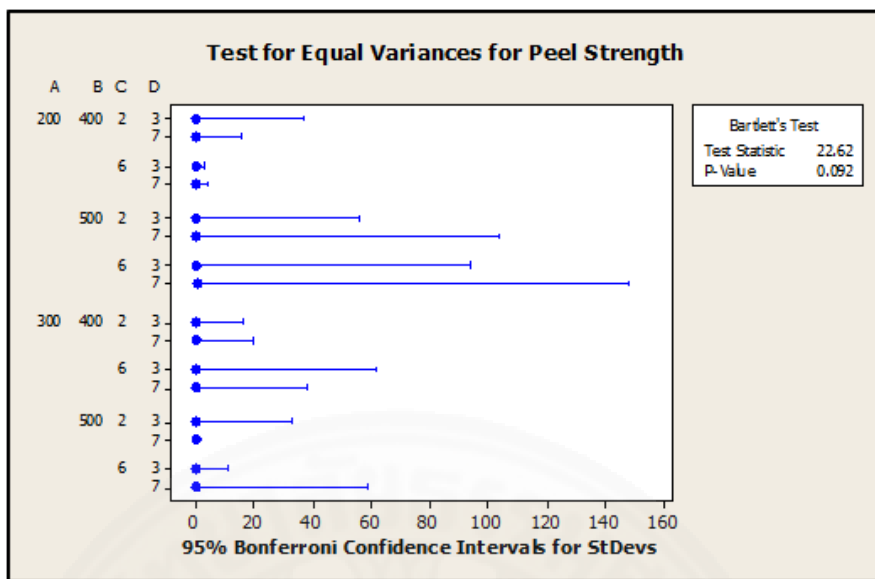
- การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด แต่เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ จึงนำค่า Residual ไปทำการวิเคราะห์ Equal Variances โดยผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งค่า P-value ที่ได้ทั้งหมดมีค่ามากกว่า 0.05

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้



ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของส่วนตกค้างชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบ

ยึดหุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16



ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของส่วนตักข้างชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

(2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha = 0.05$) ได้การวิเคราะห์ดังนี้

- เมื่อพิจารณาค่า R^2 จากภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์กันของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งแต่ละปัจจัยมีความสัมพันธ์กันดีมากในระดับ 98.57% และเมื่อพิจารณาค่า R^2_{adj} แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน ในระดับ 97.23%

- เมื่อพิจารณาค่า R^2 จากภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์กันของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งแต่ละปัจจัยมีความสัมพันธ์กันดีมากในระดับ 99.20% และเมื่อพิจารณาค่า R^2_{adj} แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน ในระดับ 98.45%

Factorial Fit: Peel Strength versus A, B, C, D

Estimated Effects and Coefficients for Peel Strength (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2.79501	0.01350	207.06	0.000
A	0.75331	0.37666	0.01350	27.90	0.000
B	0.39350	0.19675	0.01350	14.58	0.000
C	0.18455	0.09228	0.01350	6.84	0.000
D	0.06760	0.03380	0.01350	2.50	0.023
A*B	0.16260	0.08130	0.01350	6.02	0.000
A*C	0.05825	0.02912	0.01350	2.16	0.047
A*D	0.01908	0.00954	0.01350	0.71	0.490
B*C	0.02309	0.01154	0.01350	0.86	0.405
B*D	-0.01124	-0.00562	0.01350	-0.42	0.683
C*D	-0.01396	-0.00698	0.01350	-0.52	0.612
A*B*C	0.05289	0.02644	0.01350	1.96	0.068
A*B*D	0.04344	0.02172	0.01350	1.61	0.127
A*C*D	0.07011	0.03506	0.01350	2.60	0.019
B*C*D	0.03635	0.01817	0.01350	1.35	0.197
A*B*C*D	0.01142	0.00571	0.01350	0.42	0.678

S = 0.0763586 PRESS = 0.373161
R-Sq = 98.57% R-Sq(pred) = 94.27% R-Sq(adj) = 97.23%

ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผนวงจรมิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ

ที่มา: Minitab Version 16

Factorial Fit: Peel Strength versus A, B, C, D

Estimated Effects and Coefficients for Peel Strength (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.34177	0.02065	161.80	0.000
A	1.55124	0.77562	0.02065	37.55	0.000
B	0.84909	0.42454	0.02065	20.55	0.000
C	0.35230	0.17615	0.02065	8.53	0.000
D	0.09178	0.04589	0.02065	2.22	0.041
A*B	0.29556	0.14778	0.02065	7.16	0.000
A*C	0.04867	0.02434	0.02065	1.18	0.256
A*D	0.04115	0.02057	0.02065	1.00	0.334
B*C	0.15632	0.07816	0.02065	3.78	0.002
B*D	0.03562	0.01781	0.02065	0.86	0.401
C*D	-0.00214	-0.00107	0.02065	-0.05	0.959
A*B*C	-0.01083	-0.00541	0.02065	-0.26	0.797
A*B*D	0.07142	0.03571	0.02065	1.73	0.103
A*C*D	0.01431	0.00716	0.02065	0.35	0.734
B*C*D	0.06924	0.03462	0.02065	1.68	0.113
A*B*C*D	0.06641	0.03321	0.02065	1.61	0.127

S = 0.116837 PRESS = 0.873659
R-Sq = 99.20% R-Sq(pred) = 96.81% R-Sq(adj) = 98.45%

ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผนวงจรมิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณ

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

(3) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึง ลอกจากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้นและข้อมูลที่ได้มีความเชื่อถือ จึงได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha = 0.05$) สามารถสรุปได้ว่า

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผนวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่น วิทญ์

- ปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main effect) ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด คือ A, B, C และ D

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way Interaction Effect) คือ A*B, A*C และปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง คือ A*D, B*C, B*D และ C*D

- ไม่พบปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 3 ทาง (3 Way Interaction Effect) ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงตัดอิทธิพลร่วม 3 ทางออกไป

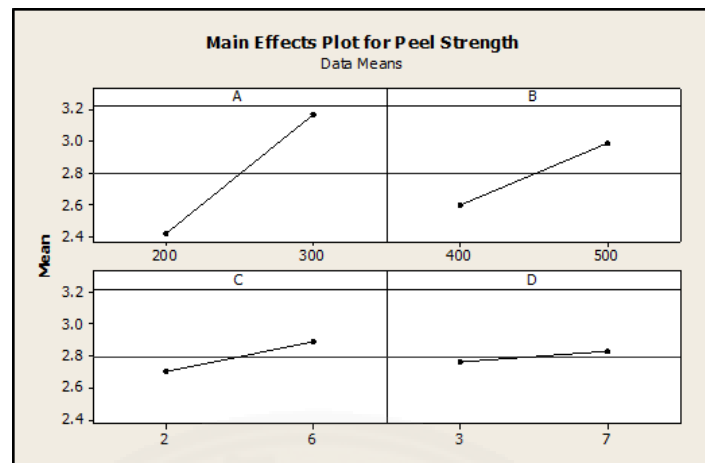
3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนชนิดแผนวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง

- ปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main effect) ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด คือ A, B, C และ D

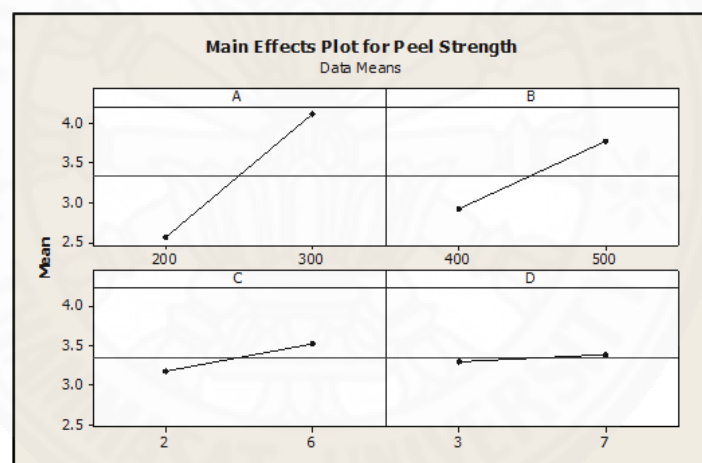
- ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way Interaction Effect) คือ A*B, B*C และปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง คือ A*C, A*D, B*D และ C*D

- ไม่พบปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 3 ทาง (3 Way Interaction Effect) ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงตัดอิทธิพลร่วม 3 ทางออกไป

(4) การวิเคราะห์กราฟของผลหลัก (Main Effect) ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 โดยพบว่าเส้นกราฟของปัจจัย A (อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน) B (อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว) C (เวลาช่วงเตรียมความร้อน) และ D (เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว) จะมีลักษณะชันลง หมายความว่า เมื่อระดับปัจจัยมีค่าต่ำลงจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกต่ำลงไปด้วย ในทางกลับกันหากระดับปัจจัยมีค่าสูงก็จะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกสูงไปด้วย



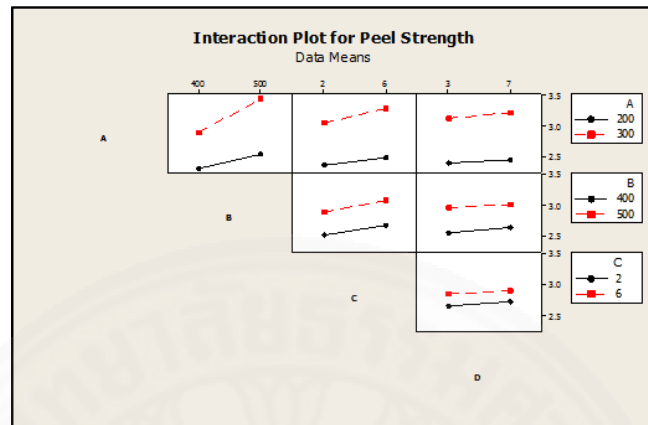
ภาพที่ 4.7 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16



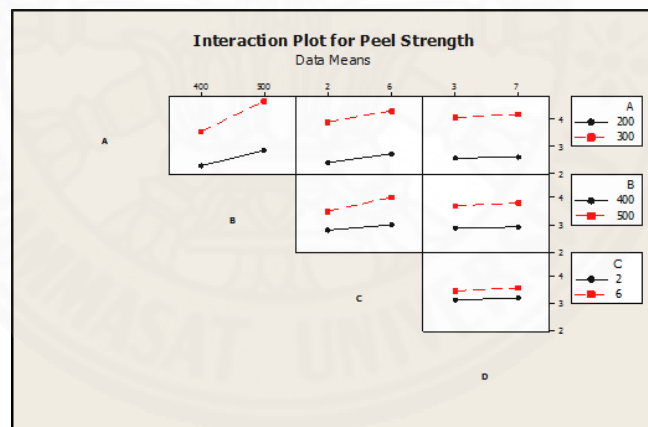
ภาพที่ 4.8 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

(5) การวิเคราะห์กราฟของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 โดยพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way Interaction Effect) ของแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ คือ $A*B$ และ $A*C$ มีผลอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะไม่ขนานกัน และปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way Interaction Effect) ของแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบ

สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คือ $A*B$ และ $B*C$ มีผลอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะไม่ขนานกัน

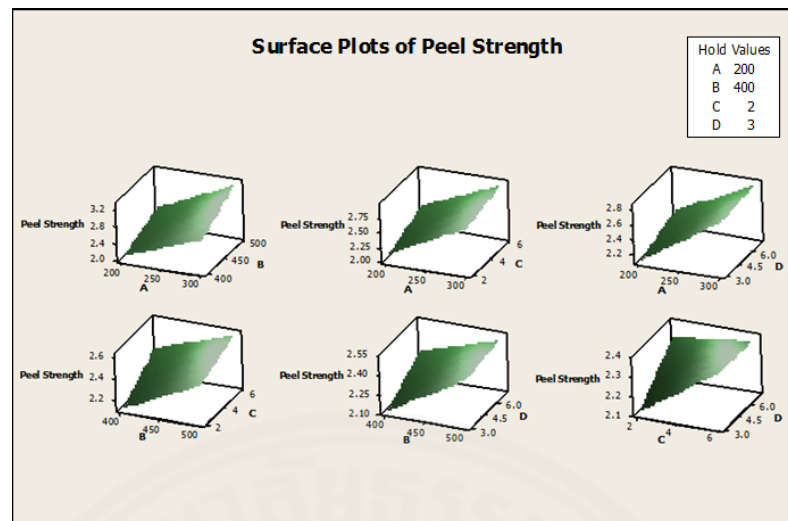


ภาพที่ 4.9 ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยกับค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16

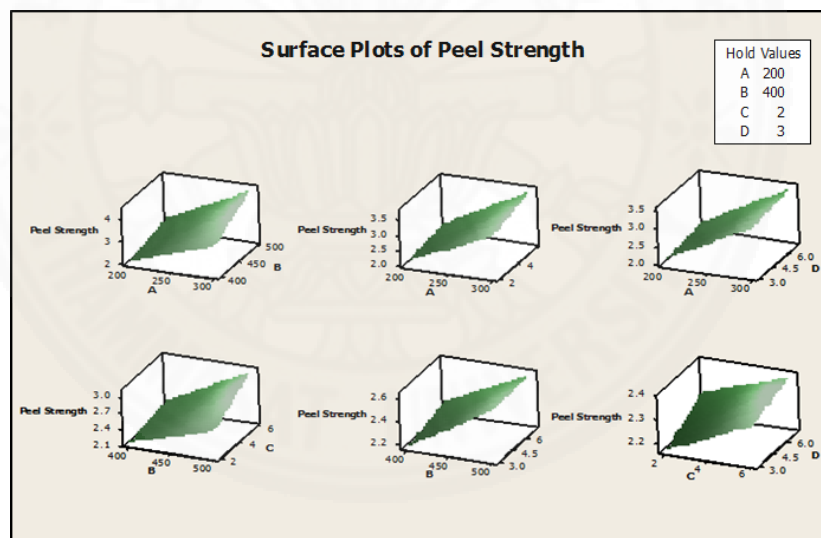


ภาพที่ 4.10 ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยกับค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

(6) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot แสดงดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 เป็นกราฟที่แสดงพื้นที่ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัย คือ A (อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน) B (อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว) C (เวลาช่วงเตรียมความร้อน) และ D (เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว) จากกราฟเมื่อปัจจัยทั้ง 4 มีการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัย จะมีผลโดยตรงกับค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก



ภาพที่ 4.11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยึดหุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16



ภาพที่ 4.12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ แบบยึดหุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

จากผลการทดลองจึงยืนยันได้ว่าปัจจัยที่มีผลโดยตรงที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) กับแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งสองชนิดมี 4 ปัจจัย คือ A (อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน) B (อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว) C (เวลาช่วงเตรียมความร้อน) และ D (เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว) ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3

ผลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ

ปัจจัยหลัก	สัญลักษณ์	P-value	ผล
อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน	A	0.000	Significant
อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว	B	0.000	Significant
เวลาช่วงเตรียมความร้อน	C	0.000	Significant
เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว	D	0.002	Significant

ตารางที่ 4.4

ผลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ปัจจัยหลัก	สัญลักษณ์	P-value	ผล
อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน	A	0.000	Significant
อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว	B	0.000	Significant
เวลาช่วงเตรียมความร้อน	C	0.000	Significant
เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว	D	0.041	Significant

4.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ผู้วิจัยได้มีข้อกำหนดเพื่อให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

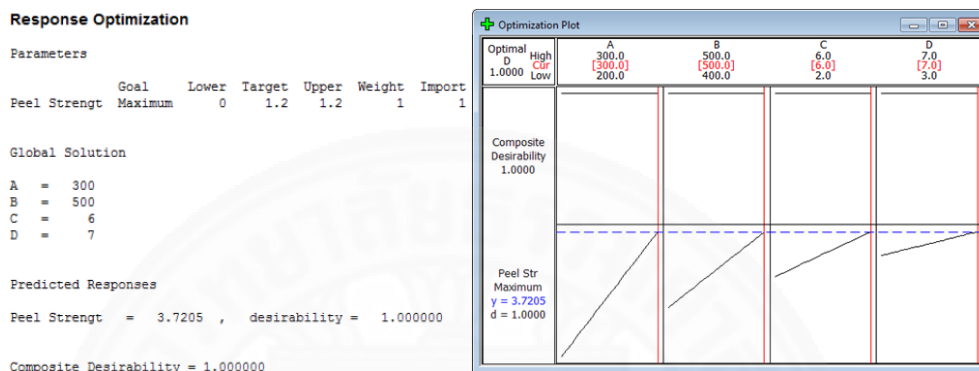
(1) สนใจที่ค่าเป้าหมายหรือให้ค่าที่ดีที่สุดของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก โดยจะแบ่งแยกตามชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์

a) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ 1.2 Kgf

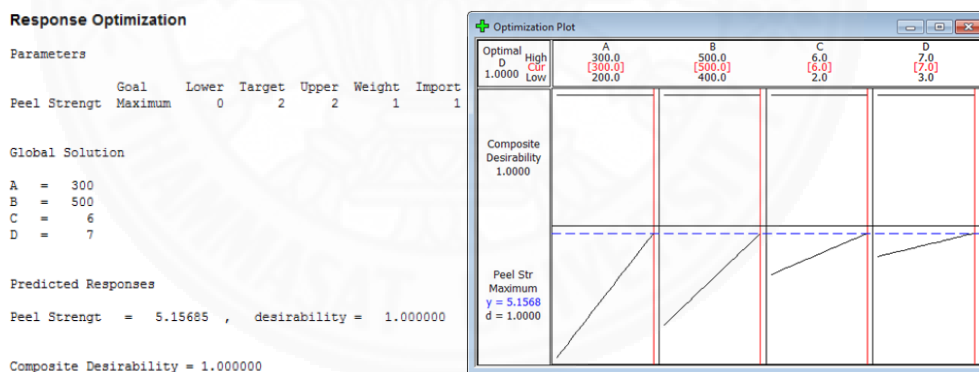
b) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 Kgf

(2) ค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงจะต้องได้ใกล้เคียงหรือมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่ ณ ปัจจุบัน

โดยผู้วิจัยเลือกใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 16 ซึ่ง Peel strength ที่ค่าเป้าหมายนี้จะให้ค่าความพึงพอใจ (Desirability:d) ของผลตอบอยู่ระหว่าง 0 - 1 และหากค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่ได้ระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ดังภาพที่ 4.13 และ 4.14



ภาพที่ 4.13 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบ ยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16



ภาพที่ 4.14 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบ ยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

โดยผลลัพธ์ที่ได้ทั้งสองชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นมีความสอดคล้องกันคือ

1. ปัจจัย A คือ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส
2. ปัจจัย B คือ อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส
3. ปัจจัย C คือ เวลาช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 6 วินาที
4. ปัจจัย D คือ เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 7 วินาที

4.4 การยืนยันผลการทดลอง

หลังจากได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว จึงนำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากหัวข้อที่ 4.3 ไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผล ตามตารางที่ 4.5 และ 4.6 เพื่อพิสูจน์ว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจากการทำงานจริงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากวิธีการทำ Response Optimizer ที่ค่าเฉลี่ยของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ 3.7205 kgf และค่าเฉลี่ยของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5.1568 kgf หรือไม่

โดยใช้การทดสอบ Hypothesis testing เพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก และตัวสถิติทดสอบที่เหมาะสมแล้วหาจุดวิกฤตเพื่อกำหนดบริเวณปฏิเสธ H_0 ให้สอดคล้องกับ H_1 คือ 1 sample T และทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง ($n=30$)

ตารางที่ 4.5

การทำทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง ($n=30$) ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ

ทดลองครั้งที่	อุณหภูมิช่วงเตรียม ความร้อน (Degree C)	อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Degree C)	เวลาช่วงเตรียม ความร้อน (Second)	เวลาช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Second)	ค่าความแข็งแรงของ การยึดติดแบบดึงลอก (Kgf)
1	300	500	6	7	3.5791
2	300	500	6	7	3.2653
3	300	500	6	7	3.3298
4	300	500	6	7	4.0842
5	300	500	6	7	3.1569
6	300	500	6	7	3.7241
7	300	500	6	7	3.6820
8	300	500	6	7	4.0478
9	300	500	6	7	3.8181
10	300	500	6	7	3.5105
11	300	500	6	7	4.3141
12	300	500	6	7	4.6640
13	300	500	6	7	3.6763
14	300	500	6	7	4.3471
15	300	500	6	7	4.2184
16	300	500	6	7	3.4987
17	300	500	6	7	3.1657

ทดลองครั้งที่	อุณหภูมิช่วงเตรียม ความร้อน (Degree C)	อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Degree C)	เวลาช่วงเตรียม ความร้อน (Second)	เวลาช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Second)	ค่าความแข็งแรงของ การยึดติดแบบดึงลอก (Kgf)
18	300	500	6	7	3.8945
19	300	500	6	7	3.5613
20	300	500	6	7	4.0415
21	300	500	6	7	3.2845
22	300	500	6	7	3.7425
23	300	500	6	7	3.2621
24	300	500	6	7	3.0981
25	300	500	6	7	3.7324
26	300	500	6	7	3.5256
27	300	500	6	7	3.9320
28	300	500	6	7	3.1362
29	300	500	6	7	4.4623
30	300	500	6	7	3.4135

ตารางที่ 4.6

การทำทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง ($n=30$) ชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัณฐาน
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ทดลองครั้งที่	อุณหภูมิช่วงเตรียม ความร้อน (Degree C)	อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Degree C)	เวลาช่วงเตรียม ความร้อน (Second)	เวลาช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Second)	ค่าความแข็งแรงของ การยึดติดแบบดึงลอก (Kgf)
1	300	500	6	7	5.7205
2	300	500	6	7	5.3565
3	300	500	6	7	4.4403
4	300	500	6	7	4.7191
5	300	500	6	7	5.0473
6	300	500	6	7	5.3202
7	300	500	6	7	4.8533
8	300	500	6	7	5.5654
9	300	500	6	7	5.9173
10	300	500	6	7	4.4264
11	300	500	6	7	4.5358
12	300	500	6	7	5.5879
13	300	500	6	7	5.3279
14	300	500	6	7	4.5175

ทดลองครั้งที่	อุณหภูมิช่วงเตรียม ความร้อน (Degree C)	อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Degree C)	เวลาช่วงเตรียม ความร้อน (Second)	เวลาช่วงตะกั่ว หลอมเหลว (Second)	ค่าความแข็งแรงของ การยึดติดแบบดึงลอก (Kgf)
15	300	500	6	7	5.2175
16	300	500	6	7	4.9435
17	300	500	6	7	4.4742
18	300	500	6	7	5.2191
19	300	500	6	7	5.5473
20	300	500	6	7	5.3202
21	300	500	6	7	5.3853
22	300	500	6	7	4.5654
23	300	500	6	7	5.7703
24	300	500	6	7	4.9254
25	300	500	6	7	5.6958
26	300	500	6	7	4.7076
27	300	500	6	7	4.6845
28	300	500	6	7	5.4822
29	300	500	6	7	5.8635
30	300	500	6	7	4.5840

นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยมีระดับนัยสำคัญ = 0.05 (α = 0.05) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- (1) พารามิเตอร์ที่สนใจคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก
- (2) สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ

$$H_0: \mu = 3.7205 \text{ kgf}$$

$$H_1: \mu \neq 3.7205 \text{ kgf}$$

ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$H_0: \mu = 5.1568 \text{ kgf}$$

$$H_1: \mu \neq 5.1568 \text{ kgf}$$

เพื่อต้องการทดสอบว่าปฏิเสธ H_0 หรือไม่ (เพื่อดูว่าค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจากการทดลองยืนยันผลมีค่าไม่เท่ากับค่าของผลตอบสนองจากค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทำ Response Optimizer)

- (3) กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) = 0.05

(4) ไม่ทราบค่า σ^2 และ $n = 30$ ดังนั้น $t_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$

(5) ปฏิเสธ $H_0: \mu = 3.7205$ kgf สำหรับชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ

ปฏิเสธ $H_0: \mu = 5.1568$ kgf สำหรับ ชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$\text{ถ้า } t_0 > t_{\alpha/2, n-1} = t_{0.025, 29} = 2.045$$

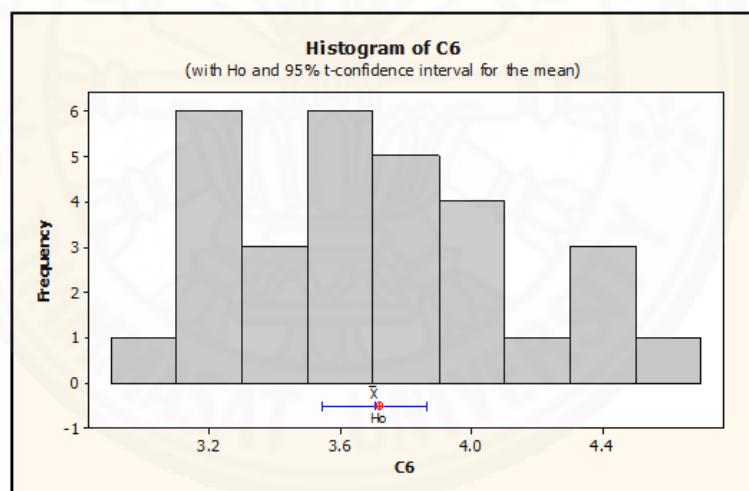
$$t_0 < -t_{\alpha/2, n-1} = -t_{0.025, 29} = -2.045$$

(6) คำนวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยโปรแกรม Minitab จะได้ผลตามภาพที่ 4.15 และ 4.16

One-Sample T: C6

Test of $\mu = 3.7205$ vs not = 3.7205

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
C6	30	3.7056	0.4252	0.0776	(3.5468, 3.8644)	-0.19	0.849

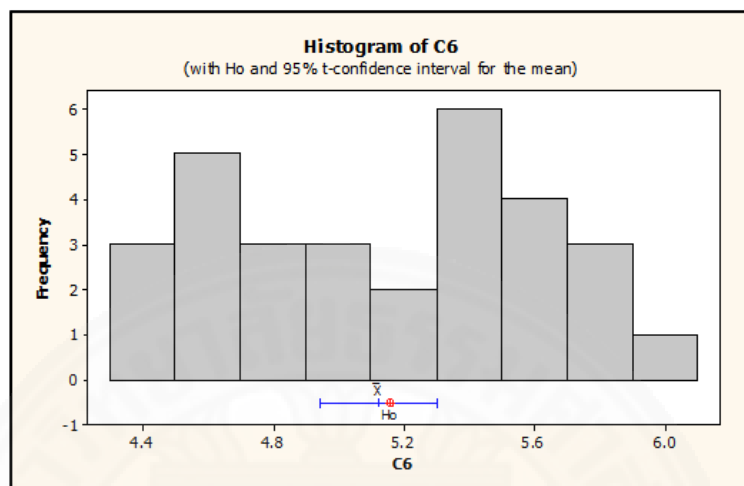


ภาพที่ 4.15 ผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก จากการทดลองเพื่อยืนยันผลชนิดแผ่นวงจรมพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16

One-Sample T: C6

Test of mu = 5.1568 vs not = 5.1568

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
C6	30	5.1240	0.4781	0.0873	(4.9455, 5.3026)	-0.38	0.710



ภาพที่ 4.16 ผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอก จากการทดลองเพื่อยืนยันผล ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกจากการทดลองเพื่อยืนยันผลชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ให้ค่า P-value = 0.849 > $\alpha = 0.05$ และผลค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกจากการทดลองเพื่อยืนยันผลชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้ค่า P-value = 0.710 > $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ และจากกราฟ Histogram จากทั้งสองชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่น จะพบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Minitab จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณจากวิธีการทำ Response Optimizer ดังนี้

- ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Minitab จะอยู่ที่ 3.7056 kgf ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณจากวิธีการทำ Response Optimizer คือ 3.7205 kgf และหากพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ของค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกจากการทดลองเพื่อยืนยันผลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.5468 – 3.8644 kgf ซึ่งครอบคลุมค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิ่งลอกจากการทดลองที่ได้จากการคำนวณ Response Optimizer ที่ 3.7205 kgf

- ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Minitab จะอยู่ที่ 5.1240 kgf ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณจาก

วิธีการทำ Response Optimizer คือ 5.1568 kgf และหากพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น ของค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจากการทดลองเพื่อยืนยันผลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 4.9455– 5.3026 kgf ซึ่งครอบคลุมค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจากการทดลองที่ได้จากการคำนวณ Response Optimizer ที่ 5.1568 kgf

นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกจากการทดลองยืนยันผลให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากวิธีการทำ Response Optimizer

4.5 การติดตามผลการทดลอง

นำปัจจัยจากข้อที่ 4.3 ที่ได้รับการยืนยันผลแล้วว่าเป็นไปตามจุดประสงค์ ไปตั้งค่ากับเครื่องจักรใหม่โดยมีชุดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้กับทั้งแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยუნทั้งสองชนิด

1. ปัจจัย A คือ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส
2. ปัจจัย B คือ อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส
3. ปัจจัย C คือ เวลาช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 6 วินาที
4. ปัจจัย D คือ เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 7 วินาที

และเมื่อนำค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกของชุดข้อมูลหลังปรับปรุงกระบวนการมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของเครื่องจักรพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น 31.54% ในแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยუნแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ และมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น 21.60% ในส่วนของแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยუნแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7

เปรียบเทียบความสามารถกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอก: เครื่องจักรปัจจุบันเปรียบเทียบกับเครื่องจักรใหม่			
ประเภทFlex	เครื่องจักรปัจจุบัน	เครื่องจักรใหม่	เปลี่ยนแปลง
RF flex	2.8170	3.7056	31.54%
DC flex	4.2140	5.1240	21.60%

และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ชุดนี้ไปปรับใช้กับเครื่องจักรใหม่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับเครื่องจักรปัจจุบัน และนั่นจะทำให้ลดข้อบกพร่องจากชิ้นงานที่อาจไม่ผ่านตามเกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอกที่อาจกลายเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ซึ่งทำให้บริษัทกรณีศึกษาลดค่าใช้จ่ายในส่วนของ Scrap cost ลงไปได้ \$89,460 ต่อสัปดาห์ หรือ \$4,651,920 ต่อปีตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8

เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในส่วนของ Scrap cost เมื่อใช้พารามิเตอร์ชุดใหม่กับเครื่องจักรที่ติดตั้งใหม่ในช่วงเวลา ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงเป็นระยะเวลา 1 เดือน

	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
unit price	\$ 223.65	\$ 223.65
demand/week (unit)	1000	1000
% defect	40%	18%
scrap (unit)	400	180
scrap/week (price)	\$ 89,460.00	\$ 40,257.00
scrap/month (price)	\$ 357,840.00	\$ 161,028.00
Estimate scrap/quarter (price)	\$ 1,073,520.00	\$ 483,084.00
Estimate scrap/year (price)	\$ 4,294,080.00	\$ 1,932,336.00

ในระยะเวลา 1 เดือนหลังการปรับปรุงจะลดค่าใช้จ่ายในส่วนของ Scrap cost ได้ถึง \$196,812 หรือคิดเป็น 55%

4.6 การควบคุมกระบวนการ

ได้กำหนดปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับเครื่องจักรใหม่โดยระบุลงไปในการเอกสารที่ไว้ใช้สำหรับการปฏิบัติงานโดยตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาเป็นไปตามข้อที่ 4.3 ไปตั้งค่ากับเครื่องจักรใหม่ โดยช่างเทคนิคจะเป็นคนที่ปรับค่าที่เครื่องจักรโดยมีพนักงานส่วนควบคุมคุณภาพมาทำการตรวจสอบตัวเลขที่หน้าจอของเครื่องจักรว่าเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่พร้อมทำการทดสอบค่า

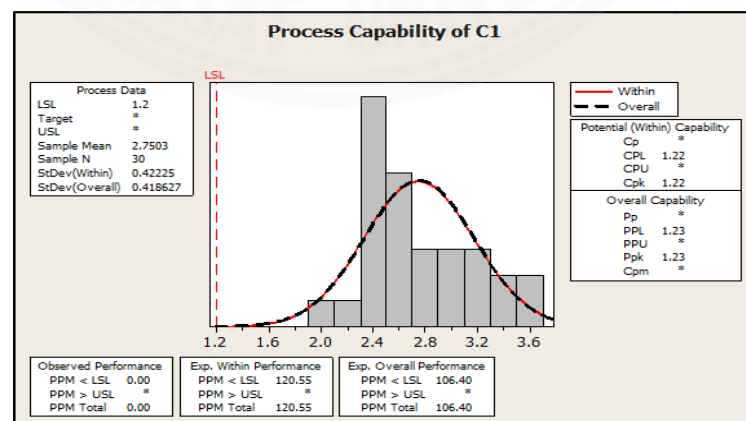
Peel strength ถ้าค่าที่ได้ไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนดจะมีการเรียกวิศวกรเข้ามาตรวจสอบเป็นขั้นตอนต่อไป โดยทุกครั้งก่อนเริ่มกระบวนการผลิตจะมีการบันทึกพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการผลิตทุกครั้ง (ทำการบันทึก 1 ครั้งต่อ 1 วัน ก่อนเริ่มการทำงาน) ตามภาพที่ 4.17

fabrinet				Flex Attachment Process Record Sheet			
FBH Lot No.:	SI:	Date:	EH:				
Screen Printing Process:							
Date:	EN:	DC Flex Lot no:	Qty:	Qty In:			
RF Flex Lot no:	Qty:	TAMURA: TLP-204-111M (ALLOY (SAC): Sn96.5/ Ag3.0/ Cu0.5)	Lot no:	Expired Date:	Qty Out:		
Thawing time (4 Hrs)	From (HH:MM)	To (HH:MM)	Expired Date:	Reject Unit:			
Reflow Machine Temp:	Nitrogen Air Flow:	Water Flow:	Speed Belt:				
Flex Attachment Process:							
Date:	EN:	Package Lot no:	Qty:	Qty In:			
Flux 951 Lot no:	Expired Date:			Qty Out:			
Hot Bar Profile >>>							
Preheat temp:	Preheat duration:	Ramp time:	Reflow duration:	Criteria fail:			
Reflow temp:	Reflow duration:			Criteria fail:			
Cool down temp:							
Buy-Off Serial Unit1:	<input type="checkbox"/> Pass	<input type="checkbox"/> Fail					
Buy-Off Serial Unit2:	<input type="checkbox"/> Pass	<input type="checkbox"/> Fail					
Strain relief Process:							
Date:	EN:	DP-190 Lot no:	Expired Date:	Qty In:			
Mixed Qty:	Start Date:	Start Time:	Tip size:	Qty Out:			
Oven temp:	Expired Date:	Expired Time:		Reject Unit:			
Oven time:	Date In:	Date Out:	Time In:				
			Time Out:				

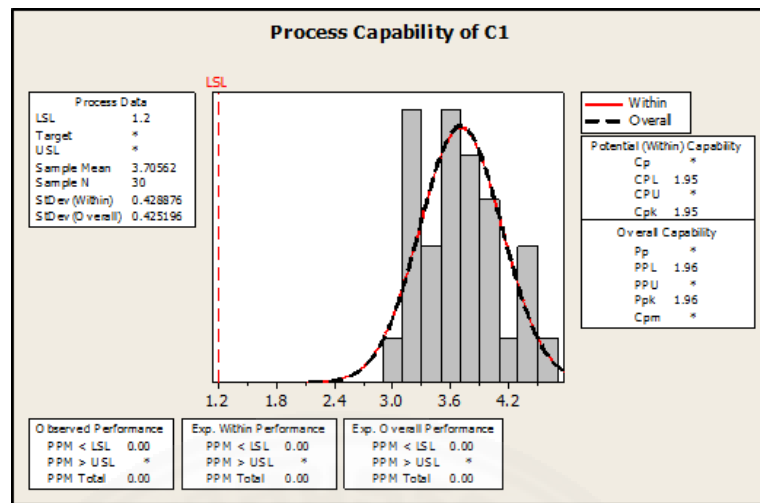
ภาพที่ 4.17 ตัวอย่างใบบันทึกกระบวนการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น

และนำไปใช้กับงานจริงพร้อมทั้งวัดหาค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเปรียบเทียบเครื่องจักรเก่าและเครื่องจักรใหม่ในระยะเวลา 1 เดือนซึ่งได้ค่าดังต่อไปนี้

- ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ เครื่องจักรเดิมอยู่ที่ 1.22 ตามภาพที่ 4.18 ส่วนเครื่องจักรใหม่อยู่ที่ 1.95 ตามภาพที่ 4.19

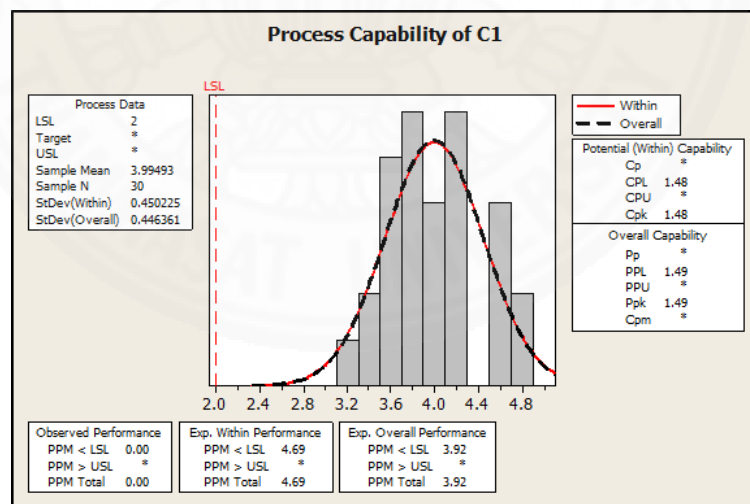


ภาพที่ 4.18 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรเก่าชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16

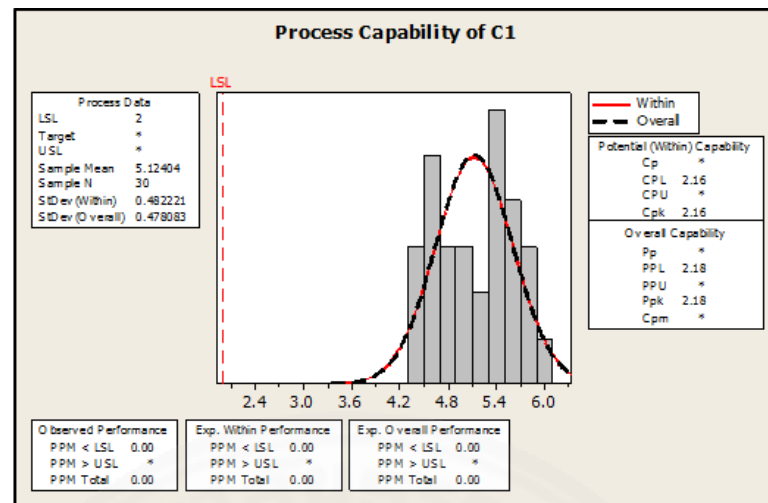


ภาพที่ 4.19 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรใหม่ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่มา: Minitab Version 16

- ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรเดิม อยู่ที่ 1.48 ตามภาพที่ 4.20 ส่วนเครื่องจักรใหม่อยู่ที่ 2.16 ตามภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.20 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรเก่าชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น แบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16



ภาพที่ 4.21 ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรใหม่ชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่มา: Minitab Version 16

จากการบันทึกค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรเก่าและเครื่องจักรใหม่ในระยะเวลา 1 เดือนพบว่า ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของเครื่องจักรที่มีการติดตั้งใหม่มีค่าเฉลี่ยที่ดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรที่ใช้ในปัจจุบัน โดยชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ เครื่องจักรเดิม C_{pk} อยู่ที่ 1.22 ส่วนเครื่องจักรใหม่ C_{pk} อยู่ที่ 1.95 และชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องจักรเดิม C_{pk} อยู่ที่ 1.48 ส่วนเครื่องจักรใหม่ C_{pk} อยู่ที่ 2.16 ซึ่งถือว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียของเครื่องจักรที่ทางบริษัทกรณีศึกษาจัดซื้อใหม่ โดยมุ่งไปที่กระบวนการเชื่อมประสาน Hot Air Welding System โดยใช้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกเป็นตัวชี้วัด โดยงานวิจัยเริ่มตั้งแต่การกำหนดปัญหาและตั้งเป้าหมายในการแก้ไขปัญหา ใช้เครื่องมือทางสถิติมาเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจคัดเลือกปัญหาเพื่อมาทำการทดลอง เริ่มจากการใช้แผนภาพก้างปลาช่วยในการคัดเลือกปัจจัยที่อาจมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อ ซึ่งสามารถสรุปได้ตามนี้คือ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว ช่วงเวลาเตรียมความร้อน และช่วงเวลาตะกั่วหลอมเหลว จากนั้นนำค่าของปัจจัยและระดับต่างๆ มาทำการออกแบบการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สรุปว่า พารามิเตอร์เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรใหม่เป็นดังนี้ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน 300 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลว 500 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาเตรียมความร้อนอยู่ที่ 6 วินาที และช่วงเวลาตะกั่วหลอมเหลวอยู่ที่ 7 วินาที ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นทั้ง 2 ชนิด คือ เหมาะสมทั้งกับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ และแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปทำการกำหนดค่าใหม่ให้กับกระบวนการ แล้วทำการยืนยันผลที่ได้จากกระบวนการโดยผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเป็นไปตามค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการ Response Optimizer ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวไปปรับปรุงกระบวนการและติดตามผลพบว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกของเครื่องจักรที่มีการติดตั้งใหม่มีค่าเฉลี่ยที่ดีขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งถือว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้

5.2 สรุป

5.2.1 สามารถปรับปรุงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของการยึดติดแบบดึงลอกให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณจากวิธีการทำ Response Optimizer คือ 3.7205 kgf ในชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณจากวิธีการทำ Response Optimizer ในชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คือ 5.1568 kgf

5.2.2 สามารถทราบปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอกและหาชุดค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นทั้งสองชนิดได้ดังนี้

- อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส
- เวลาช่วงเตรียมความร้อนเท่ากับ 6 วินาที
- เวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลวเท่ากับ 7 วินาที

5.2.3 สามารถเพิ่มค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ เมื่อเปรียบเทียบจากเครื่องจักรเก่ากับเครื่องจักรใหม่โดยชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณคลื่นวิทยุค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรใหม่อยู่ที่ 1.95 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นมาจากเครื่องจักรเก่าที่มีค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการอยู่ที่ 1.22 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นมาได้ 59.84% และในส่วนชนิดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุ่นแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเครื่องจักรใหม่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 2.16 ในขณะที่เครื่องจักรเก่าค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการอยู่ที่ 1.48 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 45.95%

5.2.4 สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของ Scrap cost เนื่องจากลดข้อบกพร่องจากชิ้นงานที่อาจไม่ผ่านตามเกณฑ์ค่าความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอก ทำให้ไม่มีของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในช่วงระหว่างการติดตามผลเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งทำให้บริษัทกรณีศึกษาลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ไปได้ถึง \$357,840 หรือประมาณการใน 1 ปี บริษัทจะสามารถลดค่าใช้จ่ายส่วนนี้ถึง \$4,651,920 ตามตารางที่ 4.8

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของการยึดติดแบบดิงลอกเท่านั้น ซึ่งกระบวนการการเชื่อมประสาน Hot Air Welding System ยังมีข้อบกพร่องด้านอื่นๆ จึงควรมีการศึกษาการปรับปรุงข้อบกพร่องด้านอื่นๆ เพิ่มเติม

5.3.2 สามารถนำหลักการแก้ไขปัญหาไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ ในการผลิตตัวผลิตภัณฑ์ที่มีความใกล้เคียงกับบริษัทกรณีศึกษา แต่อาจต้องมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยและระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษา เพื่อให้เหมาะสมกับการกระบวนการผลิตตัวผลิตภัณฑ์ของบริษัท

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2550, หลักการควบคุมคุณภาพ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 337-363, 417-533
- บรรพต ธิลา, บทที่ 11: การออกแบบการทดลองเบื้องต้น, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.บูรพา
- ปารเมศ ชูติมา, 2543, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความวารสาร

- ศิริศักดิ์ รังกลาง, ปภากร พิทยชวล, จิระพล ศรีเสริญผล. (2554). การเปรียบเทียบวิธีการเคลือบผิวแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าขึ้นอ่อนภายใต้ค่า Peeling Strength A Comparison of Cover Coat Methods for Electronic Flexible Printed Circuit (E-FPC) Based on Peeling Strength ใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
- กฤษฏา สุรวัดนิเวศ, พีระพงศ์ ตรียเจริญ. การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารประกอบเชิงโลหะ อนุรอยต่อของลูกบอลบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว Study of Characteristics of Intermetallic Compounds on Lead-Free Solder Joints ใน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2549.
- วรวิมล ก่อวงศ์พาณิชย์. (2547). การศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของ Hot Bar Blade สำหรับกระบวนการเชื่อมประสานในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
- กมลวิภา พึ่งเจียม, ชัยพนม หนูแก้ว, กรรณชัย กัลยาศิริ. (2556). การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาบัดกรีที่มีต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับแผ่นรองทองแดง A Study on Influence of Soldering Temperature and Time on Thickness of Intermetallic Compound Layer Between Sn-58Bi Solder and

Copper Substrate ในการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556. 16-18 ตุลาคม 2556. ชลบุรี

วิทยานิพนธ์

น้ำคำ ด่านไทยวัฒนา, (2558), การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยเชื่อม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ธนะวัฒน์ อรรถกรวงศ์, (2556), การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิวด้วยเครื่องเคลือบระบบสูญญากาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

แผ่นปริ้นท์ (PCB = Print Circuit Board), สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2559, จาก <http://wathienddiy.blogspot.com/2010/05/pcb-print-circuit-board.htm>

Copyright © 1999 Unitek Miyachi Corporation, *HOT BAR REFLOW SOLDERING FUNDAMENTALS A high quality Selective Soldering Technology*, สืบค้นเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2559, from http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01580000001d0T

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวไพไลพร วงษ์กัณหา
วันเดือนปีเกิด	24 กันยายน พ.ศ. 2528
ตำแหน่ง	วิศวกรกระบวนการ สังกัดกลุ่มวิศวกรรม
ผลงานทางวิชาการ	“การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการติดแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบเชื่อมแบบบาร์ร้อน” การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. หน้า 117-123
ประสบการณ์ทำงาน	2553 : วิศวกรกระบวนการ บริษัท Fabrinet Co., Ltd. 2552 : วิศวกรผลิตภัณฑ์ บริษัท Western Digital (Thailand) Co., Ltd.