

2022

การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

ศตพร คุณาพิสิฐกุล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Industrial Engineering Commons](#), and the [Operational Research Commons](#)

Recommended Citation

คุณาพิสิฐกุล, ศตพร, "การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6613.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6613>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reduction of defective rate from incomplete solder defect
for flexible printed circuit assembly



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

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่
	สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น
โดย	น.ส.ศตพร คุณาพิสิฐกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสธศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสธศิลป์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริศรา เจียมสงวนวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)	

ศตพร คุณาพิสิฐกุล : การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น. (Reduction of defective rate from
incomplete solder defectfor flexible printed circuit assembly) อ.ที่ปรึกษา
หลัก : ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตโดยลดสัดส่วนของเสีย
จากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (Flexible
Printed Circuit Assembly) ด้วยหลักการ DMAIC ของเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) จากการ
วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา (Fish Bone) ก่อนการนำไปวิเคราะห์ลำดับ
ความสำคัญด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects
analysis, FMEA) พบว่ามี 7 ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องที่สนใจ ได้แก่ ชนิดพื้นผิวของ
พื้นที่เปิดแตกต่างกัน 2) การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง 3) การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม 4)
ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป 5) แรงดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม 6) การตั้งค่า Reflow
profile ไม่เหมาะสม และ 7) ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม ผู้วิจัยทำการศึกษาค้น
พื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน (ปัจจัยที่ 1) เพื่อเป็นองค์ประกอบในการปรับปรุงการออกแบบ
แม่พิมพ์ (ปัจจัยที่ 3) สำหรับปัจจัยที่ 2 – 7 ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (OFAT)
และทดสอบทางสถิติเพื่อหาวิธีการทำงานที่ช่วยลดสัดส่วนของเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นได้
ศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ 6 และ 7 ซึ่งประกอบไปด้วย Reflow time, Peak
temperature และ การใช้ N_2 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full
factorial design) หาสมการความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองการถดถอย (Regression equation)
ทำให้สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสม และพบว่า สามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรี
ไม่สมบูรณ์ได้จาก 4.14% เป็น 1.17% หรือลดลง 71.74% จากสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง
ส่งผลให้มูลค่าสูญเสียลดลง 33,041 บาทต่อเดือน จาก 51,753 บาทต่อเดือน เหลือเพียง 18,712
บาทต่อเดือน

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270270021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Incomplete solder defect, Flexible printed circuit assembly, Six sigma technique, OFAT, Full factorial design of experiment

Sataporn Kunapisitkul : Reduction of defective rate from incomplete solder defect for flexible printed circuit assembly. Advisor: Asst. Prof. NAPASSAVONG OSOTHSILP, Ph.D.

This research aims to reduce the defective rate from incomplete solder defect for flexible printed circuit assembly by applying the DMAIC method of Six sigma technique. Fish bone diagram was used to analyze potential causes. Failure Mode and Effects Analysis was performed to analyze the causes of the problem. It was found that there were 7 causes, which highly impacted Incomplete solder defect, which were 1) The difference of opening surfaces 2) Wrong glass cloth attachment 3) Inappropriate stencil design 4) Too thin of stencil thickness 5) Inappropriate squeegee pressure 6) Inappropriate reflow profile setting and 7) Inappropriate oxygen concentration. The factor regarding the difference of opening surfaces (Factor no.1) was studied by comparing solder spreading performance between gold and tin surface for guiding to improve inappropriate stencil design (Factor no.3). For factor 2 – 7, OFAT and hypothesis test were applied to determine the better methods, which significantly reduced the defective rate. The interaction between Reflow time, Peak temperature and N₂ usage from factor no.6 and 7 were studied by applying Full factorial design and Regression analysis to determine optimal setting. It was found that the defective rate from incomplete solder defect was reduced from 4.14% to 1.17% or 71.74% reduction. It is expected that the scrap cost will be reduced 33,041 baht per month.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีภายใต้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ ผู้วิจัยจึงขอใช้โอกาสนี้เพื่อกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงที่เอื้อเฟื้อเวลาอันมีค่าเพื่อประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้อีกทั้งชี้แนะแนวทางและช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริศรา เจียมสงวนวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำชี้แนะข้อบกพร่องทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดถึงคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ คุณอนัญญา กัณห์คุลย์ ที่ช่วยแจ้งข่าวสารและประสานงานในการดำเนินขั้นตอนต่างๆทำให้กระบวนการดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ โรงงานกรณีศึกษาที่ได้กรุณาให้ใช้ข้อมูลและทรัพยากรของโรงงานในการดำเนินงาน ตลอดจนคณะทีมงานและหัวหน้างานทุกท่านที่ได้ให้คำชี้แนะและมีส่วนร่วมในงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องชาย ญาติ และ มิตรสหายทุกท่านที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจโดยเสมอมา มา ณ ที่นี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ศตพร คุณาพิสิษฐกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา	1
1.2. ที่มาและความสำคัญ	1
1.3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4. ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.6. ผลที่ได้รับ.....	10
1.7. ประโยชน์ที่ได้รับ	10
1.8. การดำเนินงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.1. ทฤษฎีเกี่ยวกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น	11
2.1.1. ความหมายและประโยชน์โดยสังเขปของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น	11
2.1.2. ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น	11
2.1.3. ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น	13
2.1.4. กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นและข้อบกพร่องด้านคุณภาพที่สามารถเกิดขึ้น.....	14
2.2. กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder printing process)	18

2.2.1. คุณสมบัติการนำความร้อนของพื้นผิวทองและดีบุกตามการออกแบบลักษณะของ โมเดล A.....	19
2.2.2. โลหะบัดกรี	19
2.2.3. แม่พิมพ์ (Stencil)	21
2.3. กระบวนการบัดกรี (Reflow process).....	21
2.4 ทฤษฎีทฤษฎีซิกมา ซิกมา (Six sigma).....	23
2.4.1 ความหมายและความเป็นมาของทฤษฎีซิกมา ซิกมา (Six sigma).....	23
2.4.2. ทฤษฎีซิกมา ซิกมา (Six sigma) ภายใต้หลักการ DMAIC	23
2.5. ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติและการออกแบบการทดลอง	27
2.5.1. การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-a-Time (OFAT)	27
2.5.2. การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE).....	27
2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.6.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการ DMAIC และ หลักการวิเคราะห์ปัจจัย	27
2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรี	28
บทที่ 3 ระยะกำหนดปัญหา	30
3.1. การจัดตั้งทีมงาน	30
3.2. สภาพปัญหาปัจจุบันและกระบวนการผลิตของโมเดล A.....	31
3.2.1. ลักษณะข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์โมเดล A.....	31
3.2.2. สัดส่วนของเสียและมูลค่าความสูญเสียที่เกิดจากของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่ สมบูรณ์ของโมเดล A.....	32
3.2.3. กระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์โมเดล A	33
3.2.4. กระบวนการที่เกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อคุณภาพโลหะบัดกรี	35
3.3. การกำหนดตัวชี้วัดและเป้าหมายโครงการ.....	38
3.4. สัญญาโครงการ (Project charter).....	39

3.5. สรุประยะกำหนดปัญหา.....	40
บทที่ 4 ระยะวิเคราะห์ระบบการวัด	41
4.1. ขั้นตอนและผลการวิเคราะห์ความมั่นคงและความเที่ยงของระบบการวัด (Attribute Agreement Analysis).....	41
4.2. การคำนวณขนาดตัวอย่างเพื่อใช้วัดสภาพปัญหา.....	48
4.3. สรุประยะวิเคราะห์ระบบการวัด.....	49
บทที่ 5 ระยะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา.....	50
5.1. กระบวนการผลิตและปัจจัยเบื้องต้นที่สามารถก่อให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์. 50	
5.2. วิเคราะห์ลำดับความสำคัญด้วยเกณฑ์การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects analysis, FMEA).....	54
5.3. สรุประยะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา.....	62
บทที่ 6 ระยะปรับปรุงกระบวนการ	63
6.1. สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เรียงตามลำดับกระบวนการผลิต63	
6.2. กำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์	63
6.3. สรุประยะการปรับปรุงกระบวนการ.....	94
บทที่ 7 ระยะควบคุมกระบวนการ.....	95
7.1. การทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุง.....	95
7.1.1. การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดสอบขณะเฝ้าติดตามเพื่อยืนยันผล	96
7.1.2. กำหนดแผนการเฝ้าติดตามและแผนควบคุม	96
7.1.3. ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการเฝ้าติดตามผล 6 เดือนการผลิต.....	101
7.2. สรุประยะควบคุมกระบวนการ.....	102
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	103
8.1. สรุประยะศึกษาข้อมูลและการนิยามปัญหา (Define Phase)	103
8.2. สรุประยะวิเคราะห์ระบบการวัด (Measure Phase)	103

8.3. สรุประยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase).....	104
8.4. สรุประยะปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)	104
8.5. สรุประยะควบคุมกระบวนการ (Control Phase)	105
8.6. ข้อจำกัดสำหรับงานวิจัย	105
8.7. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....	105
8.8. การตีพิมพ์งานวิจัย.....	106
บรรณานุกรม.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	110



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	10
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยสังเขปของโลหะบัดกรี Sn96.5, Ag3.0, Cu0.5 (SAC305)	20
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสัญญาโครงการ (Project Charter)	25
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อจำนวนการผลิตรายเดือน	32
ตารางที่ 3.2 กระบวนการผลิตย่อยในส่วนของกระบวนการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์โมเดล A33	32
ตารางที่ 3.3 สัญญาโครงการ	39
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การกำหนดจำนวนชิ้นงานตรวจสอบชิ้นต่ำของ Fasser and Brettner (1992). 42	42
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของระบบ	42
ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบจากพนักงาน 3 คน ตัวอย่างละ 3 ชิ้น.....	43
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์จากดัชนีชี้วัดระบบ	48
ตารางที่ 5.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Oven dry	50
ตารางที่ 5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ FPC set	51
ตารางที่ 5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Solder print . 51	51
ตารางที่ 5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Reflow	52
ตารางที่ 5.5 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Severity หรือความร้ายแรงของความผิดปกติ.....	55
ตารางที่ 5.6 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Occurrence หรืออัตราการพบความผิดปกติ.....	56
ตารางที่ 5.7 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Detection หรือการมีขั้นตอนการตรวจสอบหรือป้องกันความผิดปกติ.....	56
ตารางที่ 5.8 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ	57
ตารางที่ 6.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์	63
ตารางที่ 6.2 สัดส่วนของเสียจากการปรับระยะรูเปิด.....	69

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะปาด	72
ตารางที่ 6.4 Reflow profile แนะนำเบื้องต้นจาก TDS ตามชนิดของโลหะบัดกรี [18].....	73
ตารางที่ 6.5 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Soak time	74
ตารางที่ 6.6 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Reflow time	76
ตารางที่ 6.7 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Peak temperature.....	77
ตารางที่ 6.8 ผลการทดลองระหว่างการไม่ใช้ และใช้ N ₂	78
ตารางที่ 6.9 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่เป็นค่ารหัส (Coded unit)	80
ตารางที่ 6.10 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่เป็นค่าจริง (Uncoded unit)	80
ตารางที่ 6.11 ผลการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) สำหรับ 3 ปัจจัย.....	82
ตารางที่ 6.12 ผลลัพธ์และวิธีการทำงานใหม่	94
ตารางที่ 7.1 ค่าปรับตั้งใหม่ของแต่ละปัจจัยในระดับที่เหมาะสมหลังการปรับปรุง	95
ตารางที่ 7.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการจัดวางแผ่นวงจร (FPC set process).....	97
ตารางที่ 7.3 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Screen print process)	98
ตารางที่ 7.4 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการบัดกรี (Reflow process).....	99
ตารางที่ 7.5 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จากการติดตามผล	101

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพรวมสัดส่วนของเสียในแต่ละกระบวนการ ปี 2563.....	2
รูปที่ 1.2 ภาพรวมสัดส่วนของเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน ปี 2563.....	2
รูปที่ 1.3 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติที่เกิดจากโมเดลต่าง ๆ ปี 2563.....	3
รูปที่ 1.4 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อปริมาณการผลิตในแต่ละโมเดล ปี 2563.....	4
รูปที่ 1.5 ต้นทุนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อปริมาณการผลิตในแต่ละโมเดล ปี 2563.....	4
รูปที่ 1.6 สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติของโมเดล A รายเดือนในปี 2563.....	5
รูปที่ 1.7 สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติของโมเดล A รายเดือนในปี 2563 หลังการคัดทิ้งค่าผิดปกติ.....	5
รูปที่ 1.8 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวดีบุก (Tin).....	6
รูปที่ 1.9 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวทอง (Gold).....	6
รูปที่ 1.10 โลหะบัดกรีเป็นฟิล์มบาง.....	6
รูปที่ 1.11 โลหะบัดกรีโป่งพอง.....	7
รูปที่ 1.12 สัดส่วนของเสียตามลักษณะจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติในโมเดล A ปี 2563.....	7
รูปที่ 2.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่นชั้นเดียว (Single-Sided FPC) [2].....	12
รูปที่ 2.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่นสองชั้น (Double-Sided FPC) [2].....	12
รูปที่ 2.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่นหลายชั้น (Multi-layer FPC) [2].....	13
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่น.....	14
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่น.....	15
รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง Process flow ย่อยของกระบวนการประกอบชิ้นส่วน (Assembly process)...	17
รูปที่ 2.7 กระบวนการ Solder print และตัวอย่างปัจจัยไม่เหมาะสม.....	18

รูปที่ 2.8 Reflow profile สำหรับโลหะบัดกรีประเภทมีตะกั่ว	22
รูปที่ 2.9 Reflow profile สำหรับโลหะบัดกรีประเภทไม่มีตะกั่ว	22
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างจำลองผลิตภัณฑ์โมเดล A	31
รูปที่ 3.2 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ตึก (ซ้าย) และ โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ทอง (ขวา)....	31
รูปที่ 3.3 กระบวนการ Solder print (Phase III ในโรงงานกรณีศึกษาเครื่องจักรแยก Fixture ออก จาก stencil) [14].....	37
รูปที่ 4.1 % ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ	45
รูปที่ 4.2 % ความไม่แปรปรวนของพนักงานตรวจสอบ	46
รูปที่ 4.3 % ประสิทธิภาพด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ	46
รูปที่ 4.4 % ประสิทธิภาพด้านแปรปรวนของการตรวจสอบ	47
รูปที่ 5.1 แผนผังก้างปลาแสดงการเบี่ยงเบนของปัจจัยที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่ สมบูรณ์	54
รูปที่ 5.2 การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยตามค่า RPN.....	58
รูปที่ 6.1 ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานจาก Minitab.....	64
รูปที่ 6.2 ผลการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน	66
รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 2	67
รูปที่ 6.4 ภาพสมมติแสดงระยะห่างการพิมพ์โลหะบัดกรีบนพื้นที่เปิด	68
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 3	69
รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 4	70
รูปที่ 6.7 ข้อบกพร่องโลหะบัดกรีเป็นสะเก็ด (Solder ball)	70
รูปที่ 6.8 ทิศทางกระทำของปัจจัยต่อแผงวงจร	71
รูปที่ 6.9 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียและผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่ 6	72
รูปที่ 6.10 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Soak time	75
รูปที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Reflow time	76

รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Peak temperature.....	77
รูปที่ 6.13 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียเมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจน	79
รูปที่ 6.14 Box plot ระหว่าง Condition	83
รูปที่ 6.15 แผนภาพลูกบาศก์.....	83
รูปที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอยของสัดส่วนของเสีย	85
รูปที่ 6.17 Histogram	86
รูปที่ 6.18 Normal Probability Plot of Residuals	87
รูปที่ 6.19 Residual vs Fits value	87
รูปที่ 6.20 Residual vs Observation order.....	88
รูปที่ 6.21 ผลกระทบระหว่าง Reflow time กับ Peak temperature	90
รูปที่ 6.22 ผลกระทบระหว่าง Reflow time กับ N ₂	91
รูปที่ 6.23 ผลกระทบระหว่าง Peak temperature กับ N ₂	92
รูปที่ 6.24 ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย.....	93
รูปที่ 7.1 แผนควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ.....	100

บทที่ 1

บทนำ

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาตามเทคโนโลยีสมัยใหม่จากแบบบอร์ดแข็ง (Printed Circuit Board, PCB) เป็นแบบทางเลื้อยกอย่างยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit, FPC) เพื่อตอบสนองต่อการใช้งานที่หลากหลาย คงทน และเป็นไปตามข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์อย่างเรื่อง พื้นที่หรือน้ำหนัก อย่างไรก็ตามแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันถูกผลิตด้วยกระบวนการหลากหลายก่อนการจำหน่ายให้ลูกค้าในภาคส่วนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องตามรูปแบบ (Product design) และข้อกำหนดเฉพาะ (Specification) ต่อไป โดยของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตมักทำให้เกิดมูลค่าการสูญเสียทั้งต้นทุนการผลิต และต้นทุนการกำจัดของเสียหรืออาจรวมไปถึงการสูญเสียในระดับห่วงโซ่อุปทานเมื่อของเสียปะปนไปกับผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายให้แก่ลูกค้า

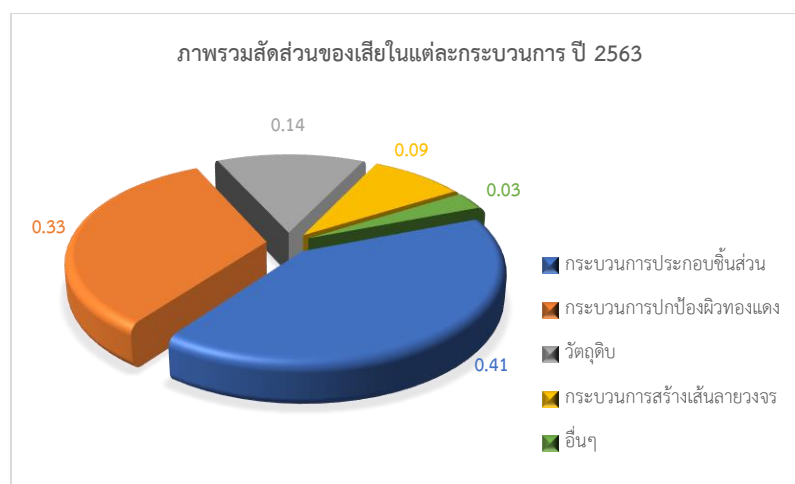
1.1. ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นในกรณีศึกษา ก่อตั้งเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2537 ภายใต้ทุนจดทะเบียนกว่าสองร้อยล้านบาท เพื่อเป็นแหล่งผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นที่ใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ (Wearable device) นาฬิกาอัจฉริยะ (Smart watch) โทรศัพท์มือถือ (Smart phone) คอมพิวเตอร์ (Computer) แท็บเล็ต (Tablet) และกล้องถ่ายรูป (Camera) รวมไปถึงรถยนต์ (Automotive) ผ่านการจัดจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ

1.2. ที่มาและความสำคัญ

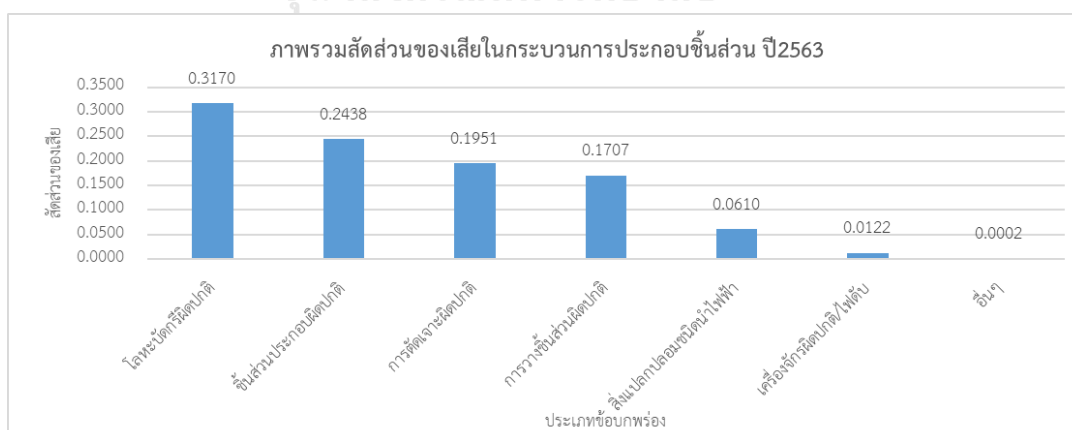
ปี 2563 ที่ผ่านมาโรงงานผู้ผลิตพบปัญหามูลค่าความสูญเสียจากข้อบกพร่องด้านคุณภาพกว่าหลายล้านบาทตามสัดส่วนของเสียในรูปที่ 1.1 โดยพบว่ากว่า 41% ของของเสียและ 6 ข้อร้องเรียนจาก 10 ข้อร้องเรียนตลอดปี (Customer complain) อยู่ที่กระบวนการประกอบชิ้นส่วน (Assembly process) ทั้งนี้ในสัดส่วนของเสีย 41% มี 30% เป็นข้อบกพร่องที่กระทบต่อการใช้งาน (Function effect) เช่น component ยกตัว, component หาย, เส้นลายวงจรขาด เป็นต้น และ

11% เป็นข้อบกพร่องไม่เป็นไปตามลักษณะข้อกำหนด (Character effect) เช่น รอยกด, รอยยับ, พื้นผิวผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสี, ฝ้าขาวหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน เป็นต้น



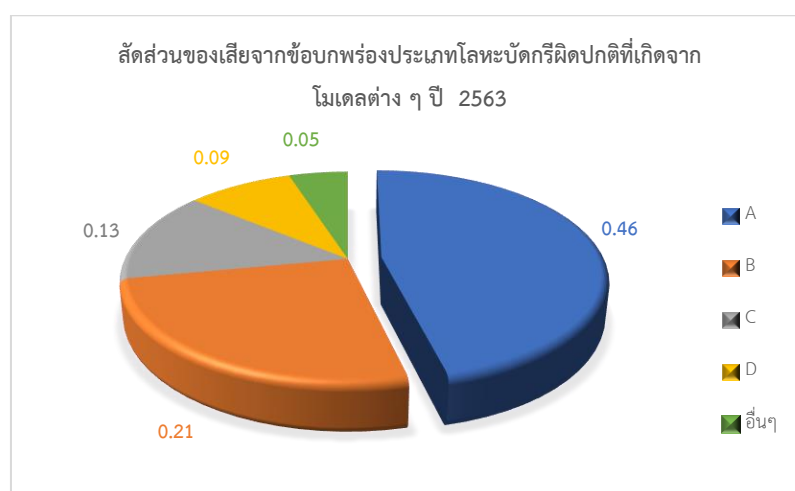
รูปที่ 1.1 ภาพรวมสัดส่วนของเสียในแต่ละกระบวนการ ปี 2563

เพื่อต้องการทราบถึงปัญหาหลักและนำไปสู่การแก้ไขต่อไป ทางโรงงานจึงได้จัดลำดับความสำคัญ โดยนำ 30% ดังกล่าวที่กระทบต่อการใช้งานเป็นหลัก (Function effect) มาวิเคราะห์ จากผลการทวนสอบในรูป 1.2 พบว่าของเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรี ผิดปกติมากที่สุดถึง 31.7% ของจำนวนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องที่กระทบต่อการใช้งาน โดยข้อบกพร่องลักษณะนี้มักมีรูปแบบแตกต่างและขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านรูปแบบของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก



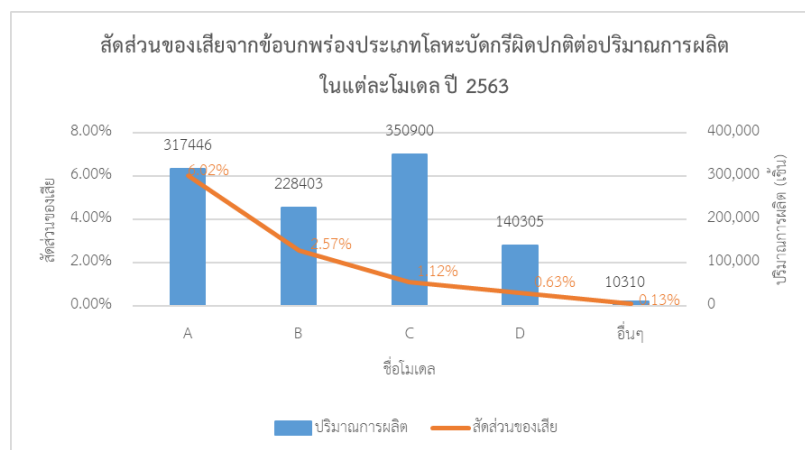
รูปที่ 1.2 ภาพรวมสัดส่วนของเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน ปี 2563

จากนั้นจึงนำปริมาณของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติทั้งหมดมาแยกแยะตามโมเดลเพื่อเลือกโมเดลที่ควรนำไปศึกษาเนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจะมีความแตกต่างกันระหว่างโมเดล ซึ่งเกิดจากการออกแบบของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นสัดส่วนของปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดลเทียบกับปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากทุกโมเดล พบว่าของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติเกิดขึ้นในโมเดล A, B, C, D และอื่นๆตามสัดส่วน 46%, 21%, 13%, 9% และ 5%

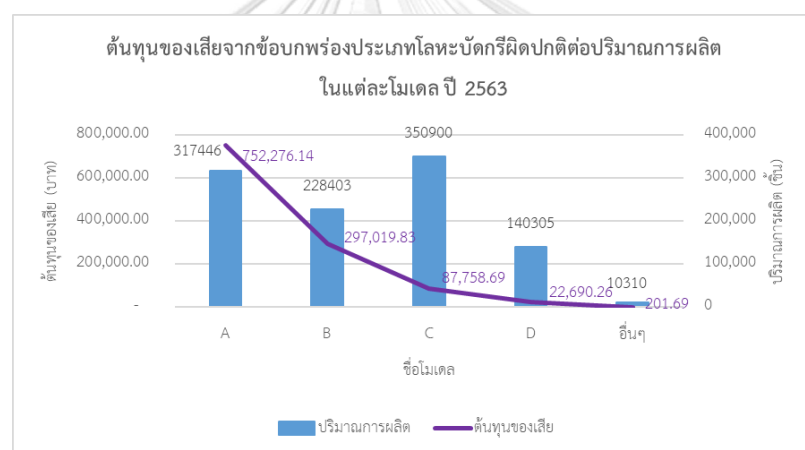


รูปที่ 1.3 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติที่เกิดจากโมเดลต่าง ๆ ปี 2563

ทั้งนี้เพื่อยืนยันการตัดสินใจในการเลือกโมเดล A มาศึกษา จึงได้นำปริมาณการผลิตมาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการวิเคราะห์ตามรูปที่ 1.4 พบว่าโมเดล A มีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับสองแต่มีสัดส่วนของเสียเมื่อเทียบกับปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับหนึ่ง คือ มีสัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติ 6.02% ของปริมาณการผลิตตลอดระยะเวลา 12 เดือน และเมื่อวิเคราะห์ต้นทุนของเสียจากรูปที่ 1.5 เพิ่มเติม พบว่านอกจากโมเดล A จะมีสัดส่วนของเสียมากเป็นอันดับหนึ่งแล้ว ยังมีต้นทุนของเสียมากเป็นอันดับหนึ่งเช่นกัน คือ มีต้นทุนของเสียนับเป็นมูลค่าถึง 752,276 บาท โดยโมเดล A นั้นยังมีแนวโน้มคำสั่งซื้อพยากรณ์ในปี 2564 เพิ่มขึ้นอีกกว่า 1.5 เท่าของปีที่ผ่านมา



รูปที่ 1.4 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อปริมาณการผลิตในแต่ละโมเดล ปี 2563



รูปที่ 1.5 ต้นทุนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อปริมาณการผลิตในแต่ละโมเดล ปี 2563

และหากวิเคราะห์ถัดไปสำหรับสัดส่วนของเสียในแต่ละเดือนจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติในโมเดล A แล้ว ทำให้ทราบว่าสัดส่วนดังกล่าวตลอดปี 2563 เป็นไปตามรูปที่ 1.6 คือ มีสัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติสูงสุด 11.80% ในเดือนเมษายน สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติต่ำที่สุด 4.12% ในเดือนมกราคม โดยมีสัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติเฉลี่ย 12 เดือนอยู่ที่ 6.39%



รูปที่ 1.6 สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติของโมเดล A รายเดือนในปี 2563

แต่เนื่องจากในเดือนมีนาคมและเมษายนมีสัดส่วนของเสียมากกว่าปกติ จึงทำการทวนสอบจากบันทึกการซ่อมบำรุงและพบว่าในช่วงสองเดือนนี้มีความผิดปกติของอุปกรณ์ในเครื่องพิมพ์ (Printer) จึงพิจารณาให้ข้อมูลสองเดือนดังกล่าวเป็นข้อมูลผิดปกติ (Outlier) และถูกตัดทิ้งในการคำนวณสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง รูปที่ 1.7 แสดงสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติในช่วง 10 เดือนหลังจากตัดข้อมูลผิดปกติแล้ว โดยเมื่อนำข้อมูลจาก 10 เดือนนี้มาคำนวณ พบว่ามีสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติเท่ากับ 5.17%

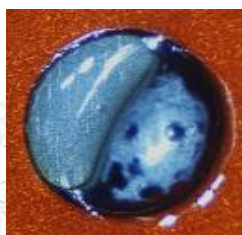


รูปที่ 1.7 สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติของโมเดล A รายเดือนในปี 2563 หลังการตัดทิ้งค่าผิดปกติ

ทั้งนี้สัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติทั้งหมดในโมเดล A เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เชื่อมประสาน (Solder joint) ระหว่างแผงวงจร (FPCA) กับวัสดุติบเสริมความแข็งแรง (Support material) หรือเรียกว่าเป็นพื้นที่ทดสอบวงจร (Test pad) โดยโรงงานสามารถแบ่งลักษณะผิดปกติต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ถึง 6

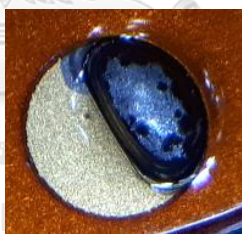
ลักษณะด้วยกัน แต่มีเพียงลักษณะ 4 ประเภทเท่านั้นที่พบในโมเดล A ตลอดการผลิตที่ผ่านมา ได้แก่ โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวดีบุก, โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวทอง, โลหะบัดกรีเป็นฟิล์มบาง และโลหะบัดกรีโป่งพอง โดยมีลักษณะข้อบกพร่องดังนี้

1. โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวดีบุก (Tin) หมายถึง ลักษณะชิ้นงานที่มีเพียงพื้นผิวทอง (Gold) เท่านั้นที่ถูกคลุมด้วยโลหะบัดกรีเต็มพื้นที่ ขณะที่พื้นผิวดีบุก (Tin) มีโลหะบัดกรีคลุมบางส่วนหรือไม่มีเลย



รูปที่ 1.8 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวดีบุก (Tin)

2. โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวทอง (Gold) หมายถึง ลักษณะชิ้นงานที่มีเพียงพื้นผิวดีบุก (Tin) เท่านั้นที่ถูกคลุมด้วยโลหะบัดกรีเต็มพื้นที่ ขณะที่พื้นผิวทอง (Gold) มีโลหะบัดกรีคลุมบางส่วนหรือไม่มีเลย



รูปที่ 1.9 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวทอง (Gold)

3. โลหะบัดกรีเป็นฟิล์มบาง หมายถึง ลักษณะชิ้นงานที่มีโลหะบัดกรีคลุมเป็นฟิล์มบางทั้งสองพื้นผิวหรือพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งเป็นฟิล์มบาง



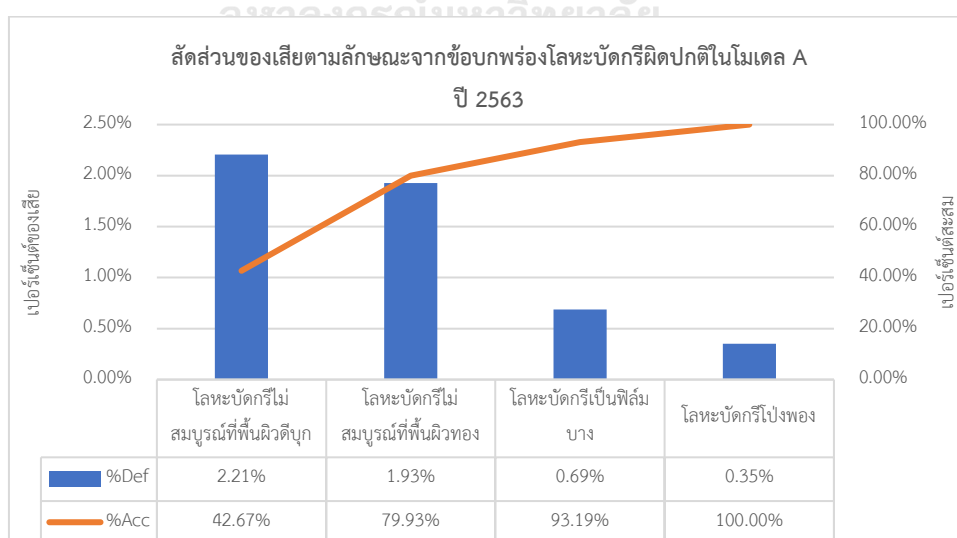
รูปที่ 1.10 โลหะบัดกรีเป็นฟิล์มบาง

4. โลหะบัดกรีโป่งพอง หมายถึง ลักษณะชิ้นงานที่ทั้งสองพื้นผิวมีโลหะบัดกรีคลุมเต็มพื้นที่ แต่มีลักษณะโป่งพองเนื่องจากช่องว่างขนาดใหญ่ข้างใต้



รูปที่ 1.11 โลหะบัดกรีโป่งพอง

จากนั้นได้นำค่าสัดส่วนของเสีย 5.17% ของปริมาณการผลิตมาแจกแจงตามลักษณะข้อบกพร่อง จึงพบว่า โมเดล A มีเปอร์เซ็นต์ของเสียสูงที่สุดเกิดจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ดีบุก 2.21% ของปริมาณการผลิต, เปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ทอง 1.93% ของปริมาณการผลิต, เปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีเป็นฟิล์มบาง 0.69% ของปริมาณการผลิต และเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีโป่งพอง 0.35% ของปริมาณการผลิต จึงตัดสินใจเลือกปรับปรุงข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ดีบุกและโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ทองไปศึกษาตามกฎ 80:20 ตามกราฟพาเรโตรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 สัดส่วนของเสียตามลักษณะจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติในโมเดล A ปี 2563

เนื่องจากสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ทั้งสองชนิดพื้นผิวนั้นเป็นลักษณะข้อบกพร่องแบบเดียวกันคือการไม่มีหรือมีโลหะบัดกรีคลุมเพียงบางส่วนในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเท่านั้น รวมไปถึงชิ้นงานต้องผ่านกระบวนการผลิตเหมือนกันในเวลาเดียวกันและมีปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าวร่วมกัน งานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ทั้งสองชนิดพื้นผิว ทั้งนี้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องทั้งสองนี้คิดเป็นกว่า 4.14% ของปริมาณการผลิตโมเดล A และทำให้เกิดมูลค่าความสูญเสียในช่วง 10 เดือนดังกล่าวกว่า 517,542 บาท หากดำเนินการปรับปรุงนอกจากจะช่วยมูลค่าความสูญเสียของของเสียแล้วยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายวัตถุดิบส่วนเกิน, ค่าใช้จ่ายในกระบวนการคัดทิ้ง, การจัดสรรกำลังการผลิตในระยะยาว และ การเพิ่มความเชื่อมั่นแก่ลูกค้าสำหรับโมเดลใหม่ในอนาคต

1.3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

1.4. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะเฉพาะและกระบวนการผลิตในโมเดล A เท่านั้น
2. ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นผิวที่ขรุขระและทองเท่านั้น

1.5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกดำเนินการภายใต้การคิดวิเคราะห์ตามหลักการ DMAIC โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- ระยะศึกษาข้อมูลและการนิยามปัญหา (Define Phase)
 - รวบรวมข้อมูลและศึกษาสถานการณ์ปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาเพื่อทราบถึงสภาพปัญหา
 - กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา
 - ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพและการออกแบบการทดลอง

- ศึกษาขั้นตอนกระบวนการผลิตและปัจจัยสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น
- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาต่อยอดการคิดวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขและปรับปรุงข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
- จัดตั้งทีมงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือมีความรู้ความเข้าใจในกระบวนการเพื่อร่วมวิเคราะห์และแก้ปัญหา
- ระยะเวลาวิเคราะห์ระบบการวัด (Measure Phase)
 - วิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัดที่ถูกใช้ในการตรวจสอบข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
- ระยะเวลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)
 - วิเคราะห์กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เพื่อแจกแจงปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องด้วยแผนผังก้างปลา
 - ลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยการให้คะแนนด้วยการพิจารณาค่า Risk priority number (RPN)
- ระยะเวลาปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)
 - ออกแบบการทดลองเพื่อหามาตรฐานการตั้งค่าที่เหมาะสมกับการผลิตและให้มาซึ่งผลลัพธ์ตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัยคือการลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
 - ทำการทดลองจริงในสายการผลิตตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปมาตรฐานการตั้งค่าที่เหมาะสมกับการผลิต
- ระยะเวลาควบคุมกระบวนการ (Control Phase)
 - ทดลองใช้มาตรฐานการตั้งค่าที่ได้ถูกปรับปรุงในช่วงระยะเวลาตามขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมทางสถิติ
 - แก้ไขเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Work instruction) และแผนควบคุม (Control plan) ให้เป็นไปตามมาตรฐานการตั้งค่าใหม่
- สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการผลิตโดยลดสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น ทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้จำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจกระบวนการทฤษฎีรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการนำมาประยุกต์ใช้หรือต่อยอดต่อไป

2.1. ทฤษฎีเกี่ยวกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

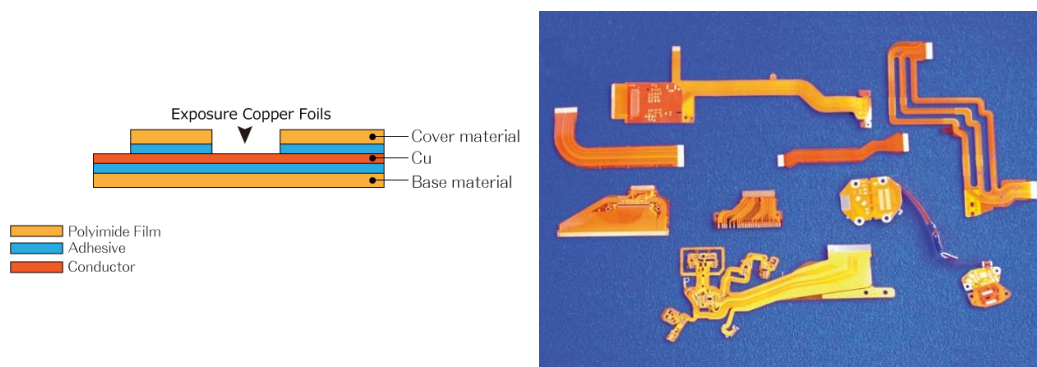
2.1.1. ความหมายและประโยชน์โดยสังเขปของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น หรือ Flexible Printed Circuit หรือชื่อเรียกโดยย่อว่า FPC คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกผลิตเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานที่ต้องการการพับ ดัด งอ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่พื้นที่จำกัด ต้องการน้ำหนักเบา และมีรูปแบบหรือคุณสมบัติเฉพาะ กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นนั้นแตกต่างจากการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบแข็งมากนัก [1] เพียงเปลี่ยนองค์ประกอบหลักจากการสร้างเส้นลายวงจรบนวัสดุติดสนับสนุนแบบบอร์ดแข็งมาเป็นการสร้างเส้นลายวงจรบนวัสดุติดสนับสนุนแบบบางและยืดหยุ่นอย่างแผ่นพอลิเอสเตอร์ (PET) หรือ แผ่นพอลิไอมิด (PI)

2.1.2. ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

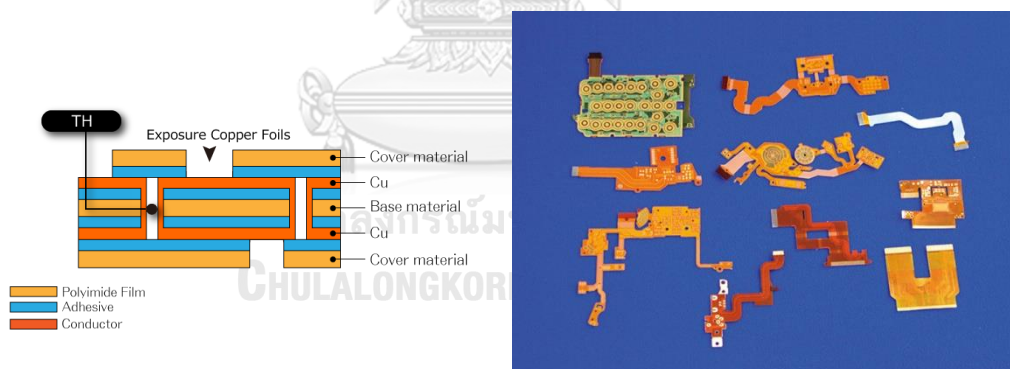
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น สามารถแบ่งออกตามจำนวนชั้นของทองแดงได้เป็น 3 ประเภทหลักดังต่อไปนี้

- แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นชั้นเดียว (Single-Sided FPC) คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชั้นทองแดงและ Cover material เพียงอย่างละ 1 ชั้น เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบวงจรไม่ซับซ้อนหรือต้องการน้ำหนักเบา สามารถรองรับการบัดกรีชิ้นส่วนประกอบ (Component) จำนวนทั่วไป ณ ตำแหน่ง Exposure copper foils ในด้านเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นชั้นเดียว (Single-Sided FPC) [2]

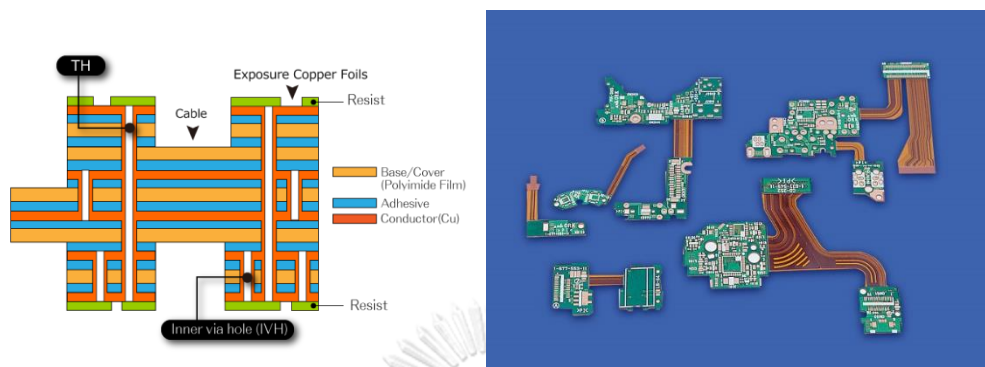
- แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสองชั้น (Double-Sided FPC) คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชั้นทองแดงและ Cover material อย่างละ 2 ชั้น เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบวงจรที่ซับซ้อนมากขึ้นแต่มีพื้นที่จำกัดและยังต้องการคงไว้ซึ่งน้ำหนักที่เบา สามารถรองรับการถูกบัดกรีขึ้นส่วนประกอบได้ทั้งด้านเดียวหรือสองด้านตามการออกแบบ



รูปที่ 2.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสองชั้น (Double-Sided FPC) [2]

- แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นหลายชั้น (Multi-layer FPC) คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชั้นทองแดงมากกว่า 2 ชั้นขึ้นไป เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบวงจรที่ซับซ้อนมากโดยมักถูกประกอบร่วมกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบบอร์ดแข็งหรือ Printed Circuit Board เพื่อรองรับข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์หรือแทนที่บอร์ดแข็งใน

ตำแหน่งหรือรูปแบบที่ต้องการตัดงอ แต่ยังคงการคงไว้ซึ่งความเสถียรและความคงทน ต่อแรงกระทำทางกายภาพหรือความร้อน



รูปที่ 2.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นหลายชั้น (Multi-layer FPC) [2]

ทั้งนี้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นที่ถูกวางชิ้นส่วนประกอบ (Component) แล้ว จะถูกเรียกว่า Flexible Printed Circuit Assembly หรือ FPCA

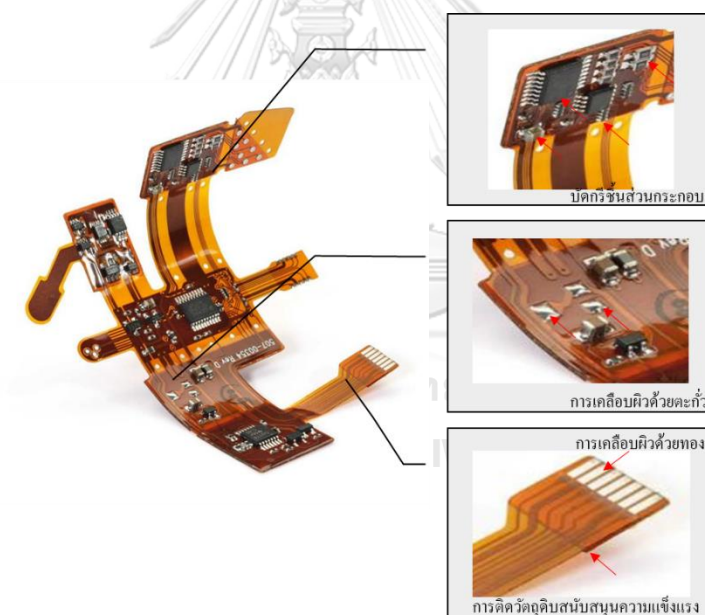
2.1.3. ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

เพื่อตอบสนองต่อการพับ ดัด งอ ส่วนประกอบหลักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น จึงมักมีแผ่นสนับสนุนอย่างแผ่นพอลิเอสเตอร์ (PET) หรือ แผ่นพอลิไมด์ (PI) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยแผ่นสนับสนุนจะถูกยึด (Lamination) แนบตลอดผิวแผ่นทองแดงด้วยชั้นกาวด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับชนิดของกาว ทั้งนี้ผิวทองแดงสามารถประกอบไปด้วยวัสดุเคลือบผิวบนพื้นผิวทองแดง หรือชิ้นส่วนประกอบอื่นตามรูปแบบความต้องการของลูกค้าด้วยกระบวนการเพิ่มเติมได้อีกด้วย ดังตัวอย่างส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นต่อไปนี้

- Base material ประกอบด้วยแผ่นพอลิเอสเตอร์ (PET) หรือ แผ่นพอลิไมด์ (PI) ที่ถูกยึดแนบตลอดผิวแผ่นทองแดงด้วยชั้นกาว มักใช้ชนิด Thermal sensitive adhesive (TSA) หรือ Pressure sensitive adhesive (PSA)
- Cover material หรือ Cover film ที่มาจากแผ่นพอลิเอสเตอร์ (PET) หรือ แผ่นพอลิไมด์ (PI)
- Surface finish หรือ วัสดุเคลือบผิวเพื่อช่วยป้องกันการเกิดสนิม (Oxidation) บนพื้นผิวทองแดง ณ บริเวณที่ใช้เพื่อบัดกรีหรือเชื่อมต่อชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์

ทั้งนี้การเลือกประเภทวัสดุเคลือบผิวมักขึ้นอยู่กับลำดับกระบวนการและความต้องการตามรูปแบบของผลิตภัณฑ์

- Organic Solderability Preventative (OSP)
- Immersion Tin (Sn)
- Immersion Silver (Ag)
- Immersion Gold (Ni/Au)
- Solder
- Component หรือ ชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เช่น Capacitor, Resistor, Ferrite bead, Switch, Connector, LED, Thermistor, Coil, IC เป็นต้น
- Support material หรือ ชิ้นส่วนประกอบที่ใช้เสริมความแข็งแรง ณ บริเวณที่ต้องการ มักเป็นพลาสติกหรือโลหะอย่าง Aluminum alloy และ Stainless steel

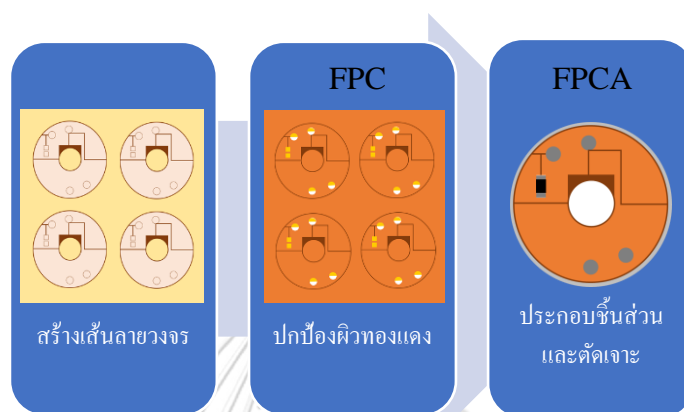


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

2.1.4. กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นและข้อบกพร่องด้านคุณภาพที่สามารถเกิดขึ้น

กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสามารถเพิ่มลดหรือสลับลำดับกระบวนการได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้า (Product design and

Customer requirement) และการออกแบบกระบวนการของผู้ผลิต (Process design) สามารถแบ่งกระบวนการผลิตหลักออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ ได้แก่ กระบวนการสร้างเส้นลายวงจร (Patterning process) กระบวนการปกป้องผิวทองแดง (Attachment/Coating/Plating/Printing) และกระบวนการประกอบชิ้นส่วนรวมไปถึงการทดสอบและตัดเจาะเป็นชิ้นงานสุดท้าย (Assembly process)



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น

ในกระบวนการผลิตใดๆนั้น ผู้ผลิตมักเจอปัญหาด้านคุณภาพไม่มากนักน้อยอันสามารถเกิดได้ทั้งจากกระบวนการผลิต เครื่องจักรหรือแรงงานเอง การออกแบบกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม การออกแบบอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม รวมไปถึงข้อจำกัดที่เป็นไปตามวัตถุดิบและความต้องการของลูกค้า สำหรับกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น ปัญหาคุณภาพที่พบเจอได้บ่อยครั้งของแต่ละกระบวนการสามารถเกิดตามลักษณะต่อไปนี้ โดยกระบวนการการสุดท้ายอย่าง Assembly process มักก่อให้เกิดความสูญเสียมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการก่อนหน้านี้เนื่องจากมูลค่าสะสมของวัตถุดิบและทรัพยากรการผลิต

1. กระบวนการสร้างเส้นลายวงจร (Patterning process) คือการนำแผ่นทองแดงเข้าไปฉายแสงตามรูปแบบที่กำหนด (Artwork) จากนั้นแผ่นทองแดงที่ถูกฉายแสงแล้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการกัดกร่อนด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดพื้นที่ทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยหากเป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสองชั้นขึ้นไปจะมีกระบวนการเพิ่มเติมสำหรับสร้างจุดเชื่อมระหว่างชั้น กระบวนการสร้างเส้นลายสามารถเกิดปัญหาคุณภาพได้ดังต่อไปนี้

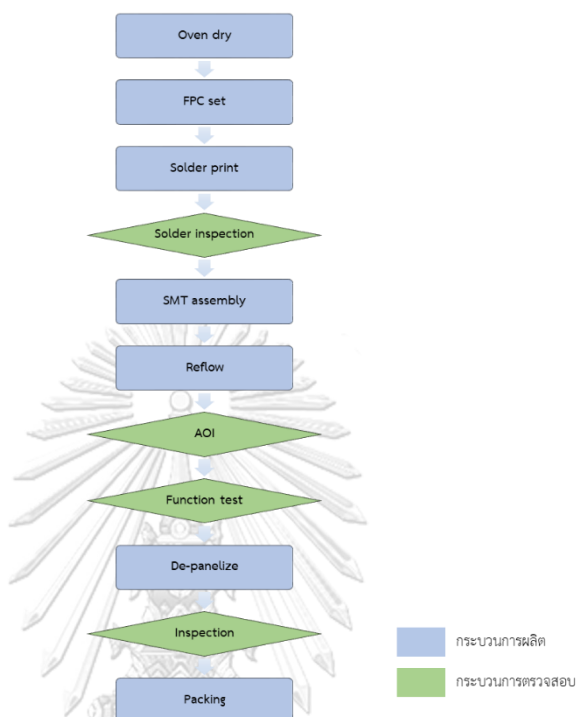
- เส้นลายแตก เสียหาย (Crack, Damage)
- เส้นลายเว้าแหว่ง หรือ ยื่นออกจากรูปแบบตั้งต้น (Copper nicked, Copper protruded)
- เส้นลายบางหรือหนาผิดปกติ (Abnormal thickness)
- การแยกชั้นของเส้นลาย (Inner-layer separation) ซึ่งสามารถเกิดในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นสองชั้นขึ้นไป

2. กระบวนการปกป้องผิวทองแดง (Coating/Plating/Printing/Attachment process)

คือกระบวนการนำแผ่นทองแดงจากกระบวนการสร้างเส้นลายก่อนหน้ามาผ่านขั้นตอนการป้องกันการเกิดสนิม การกัดกร่อน และสิ่งแปลกปลอมที่สามารถเข้าไปรบกวนการทำงานของวงจรโดยการเคลือบด้วยสารเคมี การชุบหรือพิมพ์ด้วยวัสดุนำไฟฟ้าหากบริเวณดังกล่าวต้องถูกใช้งานในกระบวนการถัดไป รวมไปถึงการติดวัสดุที่เป็นฉนวนคลุมผิวทองแดงหากบริเวณดังกล่าวไม่ต้องผ่านการบัดกรีแล้ว เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้แผ่นทองแดงจะถูกเรียกว่า FPC (Flexible printed circuit) ทั้งนี้กระบวนการปกป้องผิวทองแดง สามารถเกิดปัญหาคุณภาพได้ดังต่อไปนี้

- เส้นลายเปลี่ยนสีจากคราบน้ำ สารเคมี หรือ เกิดสนิม (Discoloration, Stain, Oxidization)
- การเผยอ โป่งพอง หรือหลุดลอกของชั้นปกป้อง (Delamination, Blister, Peel off)
- การผิดปกติของชั้นปกป้องผิวทองแดงอื่นๆ อาทิ ชั้นผิวยับย่น เป็นก้อน ผิวเป็นรู เข็มอากาศ ฟองอากาศสะสม เป็นต้น (Wrinkle, Nodule, Pitt, Air bubble or Void)
- กระบวนการประกอบชิ้นส่วนรวมไปถึงการทดสอบการทำงานของวงจรและตัดเจาะเป็นชิ้นงานสุดท้าย (Assembly process) คือการนำ FPC (Flexible printed circuit) เข้าไปบัดกรีเพื่อประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ตามความต้องการของลูกค้าก่อนถูกนำไปตัดเจาะเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามรูปแบบ เป็นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ FPC (Flexible printed circuit) จะถูกเรียกว่า FPCA (Flexible printed circuit assembly) และเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการสุดท้ายก่อนจำหน่ายสู่ลูกค้า โรงงานมักมี

กระบวนการอย่างการทดสอบการทำงานของวงจรว่าสมบูรณ์เป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่



รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง Process flow ย่อยของกระบวนการประกอบชิ้นส่วน (Assembly process)

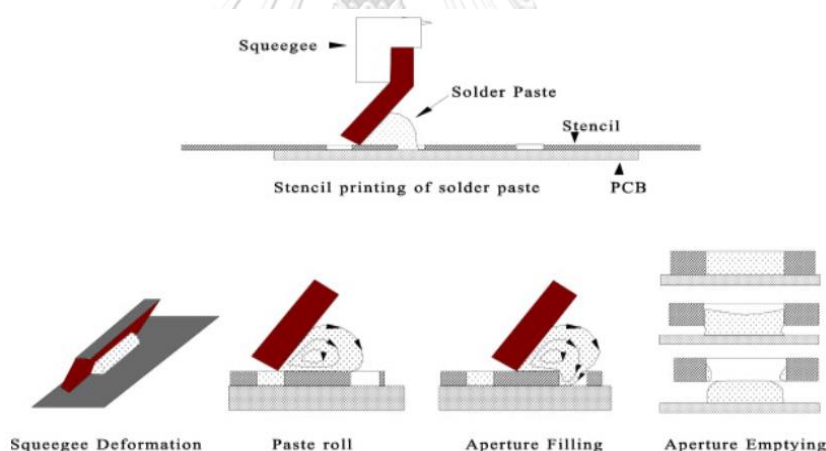
อย่างไรก็ตามกระบวนการประกอบชิ้นส่วนสามารถเกิดปัญหาคุณภาพได้ดังต่อไปนี้

- โลหะบัดกรีมากหรือน้อยเกินไป (Excessive, Insufficient solder)
- ชิ้นส่วนถูกประกอบไม่สมบูรณ์ อาทิ การยกตัวของชิ้นส่วนประกอบ การหลุดหาย การประกอบเอียงจากตำแหน่งที่ต้องการ (In-completed assemble eg. Tombstone, lifted component, missing component, misalignment)
- ไม่ผ่านการทดสอบเมื่อมีการปล่อยกระแสเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของการทำงานของวงจร (Function fail)

- ปัญหาอื่นๆ อย่างสิ่งแปลกปลอม (Contamination) การยับย่นหรือรอยพับจากการจับถือ (Crease) ขอบไม่เรียบหรือเป็นเสี้ยนจากการตัดเฉาะ (Burr, Stringer) รอยกดจากเครื่องมือผลิตหรือกระบวนการทดสอบ (Dent)

2.2. กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder printing process)

กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี หรือ Solder printing process เป็นหนึ่งในกระบวนการย่อยสำคัญของกระบวนการประกอบชิ้นส่วน เนื่องจากเป็นกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรีทำให้กระบวนการนี้มักพบของเสียโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ (ปริมาณน้อยเกินไป, ปริมาณมากเกินไป, หาย) หรือเยื้องผิดตำแหน่งที่เกิดจากปัจจัยการพิมพ์และแม่พิมพ์หรือแม่กระทั่งเครื่องพิมพ์เอง โดยเป็นที่รู้กันว่ามีปัจจัยหลากหลายชนิดที่จำเป็นจะต้องควบคุมขณะดำเนินการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งลักษณะโลหะบัดกรีบนพื้นที่เปิดตามที่ต้องการได้ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ โลหะบัดกรี, แม่พิมพ์, พารามิเตอร์ในการพิมพ์ และ ชนิดของพื้นผิวพื้นที่เปิดรวมไปถึงความหนาของชิ้นงาน [3]



รูปที่ 2.7 กระบวนการ Solder print และตัวอย่างปัจจัยไม่เหมาะสม

การพิมพ์เริ่มจากการพักโลหะบัดกรีบนแม่พิมพ์ เมื่อชิ้นงานถูกส่งเข้าเครื่องจักรมายังตำแหน่งได้แม่พิมพ์โดยแนบรูปเปิดตรงกับพื้นที่เปิดที่ต้องการพิมพ์แล้วตามการตั้งค่า ใบปาดจะปาดโลหะบัดกรีให้ไหลผ่านรูปเปิดไปยังพื้นที่พิมพ์ก่อนการแยกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อไปยังกระบวนการถัดไปดังรูปที่ 2.7 ทั้งนี้การปาดและการแยกจะถูกตั้งค่าตามความเหมาะสมของกระบวนการกับชิ้นงานและโลหะบัดกรี อาทิ ความเร็วในการปาด, ทิศทางในการปาด, แรงดันขณะปาด, ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน, ระยะเวลาในการแยกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามนอกจาก

พารามิเตอร์ที่ใช้จะเหมาะสมแล้ว การออกแบบรูปเปิดและความหนาของแม่พิมพ์ที่สอดคล้องกับปริมาณ, ตำแหน่งและคุณสมบัติของพื้นผิวพื้นที่เปิดก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญ

2.2.1. คุณสมบัติการนำความร้อนของพื้นผิวทองและดีบุกตามการออกแบบลักษณะของโมเดล A

คุณสมบัติการนำความร้อนของพื้นผิวที่ต้องการพิมพ์โลหะบัดกรีมีผลต่อการไหลและกระจายตัวขณะหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเนื่องจากบริเวณที่นำความร้อนได้ดีกว่าทำให้อุณหภูมิของโลหะบัดกรี ณ บริเวณดังกล่าวสูงถึงจุดหลอมเหลวได้เร็วกว่าอีกบริเวณ ทำให้มีระยะเวลามากกว่าในการเชื่อมประสานในระดับชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (IMC, Intermetallic compound)

พื้นผิวทองมีค่าการนำความร้อนจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 27 °C อยู่ที่ 318 W/(m·K) โดยประมาณ ขณะที่พื้นผิวดีบุกมีค่าการนำความร้อนจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 27 °C อยู่ที่ 66.8 W/(m·K) โดยประมาณ ทำให้พื้นผิวทองสามารถทำให้การกระจายตัวของโลหะบัดกรีเกิดขึ้นได้ดีกว่าพื้นผิวดีบุก

2.2.2. โลหะบัดกรี

โลหะบัดกรีเป็นส่วนประกอบสำคัญในเทคโนโลยีเชื่อมประสานของการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยโลหะบัดกรีนี้นั้นมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน อาทิ โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar), โลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder wire), โลหะบัดกรีแบบลูกบอลทรงกลม (Solder balls) และ โลหะบัดกรีแบบเนื้อครีม (Solder paste หรือ Solder cream) เป็นต้น

โลหะบัดกรีแบบเนื้อครีมมักถูกเลือกใช้ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบ SMT (Surface mounting technology) เนื่องจากเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการยึดติดตามและอุณหภูมิจำกัดตามคุณลักษณะชิ้นส่วนประกอบ โดยมีส่วนประกอบสำคัญ คือ โลหะผสม (Solder alloy), ผงโลหะ (Solder powder) และ ฟลักซ์ (Flux) ทั้งนี้โลหะบัดกรีแบบเนื้อครีมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามส่วนประกอบ ได้แก่ โลหะบัดกรีที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ (Lead-free Solder) และ โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ (Lead Solder) [4]

1. โลหะบัดกรีที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ (Lead-free Solder) คือ โลหะบัดกรีที่มีโลหะดีบุก (Tin Ingot) ผสมกับ โลหะเงิน (Silver metal) หรือ โลหะทองแดง (Copper Ingot) โดยปราศจากโลหะตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้ความแตกต่างของโลหะผสมแต่ละชนิดทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีเปลี่ยนไปตามชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในโลหะบัดกรี โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบ Sn-Ag-Cu เป็นชนิดที่นิยมใช้

ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใต้การใช้อุณหภูมิหลอมเหลว ในช่วง $200^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ (จุดหลอมเหลว 218°C) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมของโลหะใน โลหะบัดกรี

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยสังเขปของโลหะบัดกรี Sn96.5, Ag3.0, Cu0.5 (SAC305)

คุณสมบัติ	ข้อมูล
Composition (%)	Sn96.5, Ag3.0, Cu0.5
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	217-218
Shape	Spherical
Particle size (μm)	20-38
Halide content (%)	0
Flux type *IPC J-STD-004B	ROL0
Flux content (%)	$11.7 \pm 0.5\%$
Viscosity (Pa.S) **PCU-205 at 25°C 10rpm	$200 \pm 10\%$
Copper plate corrosion *JIS	Passed
Tack time	> 48 hours

- โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ (Lead Solder) คือ โลหะบัดกรีที่มีโลหะดีบุก (Tin Ingot) ผสมกับ โลหะเงิน (Silver metal) และ โลหะตะกั่ว (Lead Ingot) ใน ปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมใช้งานเนื่องจากขัดต่อข้อกำหนดควบคุมในบางประเทศรวมถึงเป็น พิษต่อสิ่งแวดล้อมแม้ว่าจะมีคุณสมบัติการหลอมเหลวและไหลที่ดีกว่าก็ตาม ทั้งนี้ยังมี ชนิดที่ถูกใช้งานอยู่คือ Sn-Pb-Ag (จุดหลอมเหลว 183°C)

หมายเหตุ* ตามมาตรฐาน IPC J-STD-004B ROL0 คือ ฟลักซ์ประเภทมีเรซินเป็นส่วนประกอบ ไม่ต้องการกระบวนการล้างฟลักซ์หลังกระบวนการบัดกรีเนื่องจาก Flux residue activity levels ต่ำ หรือ มีเปอร์เซ็นต์ Halide by weight $<0.05\%$

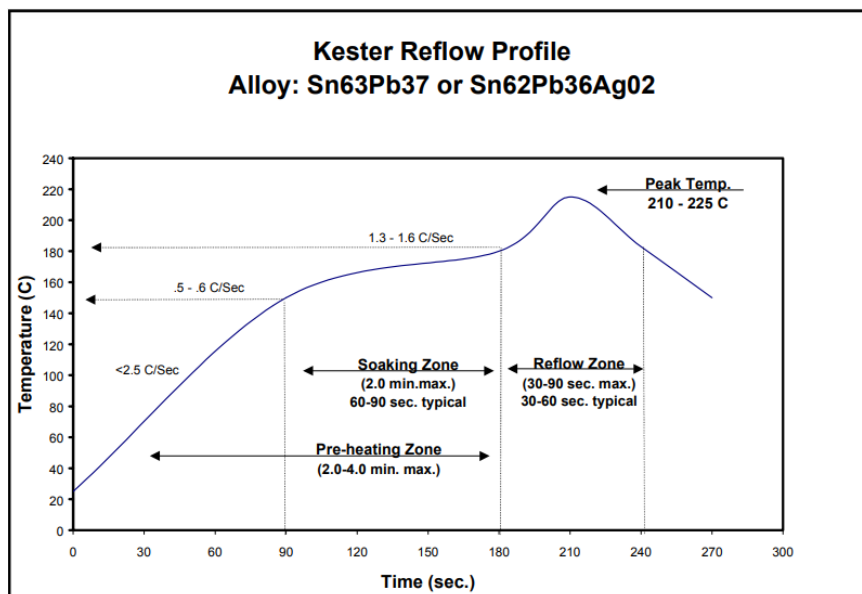
2.2.3. แม่พิมพ์ (Stencil)

ประสิทธิภาพของการพิมพ์โลหะบัดกรีขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการจากการคำนวณ ปริมาณของโลหะบัดกรีกับรูปแบบของรูเปิดต่าง ๆ ที่ถูกดัดแปลงขึ้น หากมีเกิดข้อบกพร่องในการพิมพ์ขณะที่แม่พิมพ์ออกแบบเหมาะสมแล้ว มักเกิดเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น พารามิเตอร์ของเครื่องพิมพ์ อาทิ ทิศทางการปาด, ความเร็วใบปาด, แรงกด, ค่า Snap off เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพโลหะบัดกรีหลังพิมพ์ การออกแบบนั้นมืองค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึง 4 ส่วนด้วยกันในการใช้เลิควัดถุดิบในการทำแม่พิมพ์และการคำนวณเพื่อออกแบบความขนาดและความหนาของรูเปิด คือ

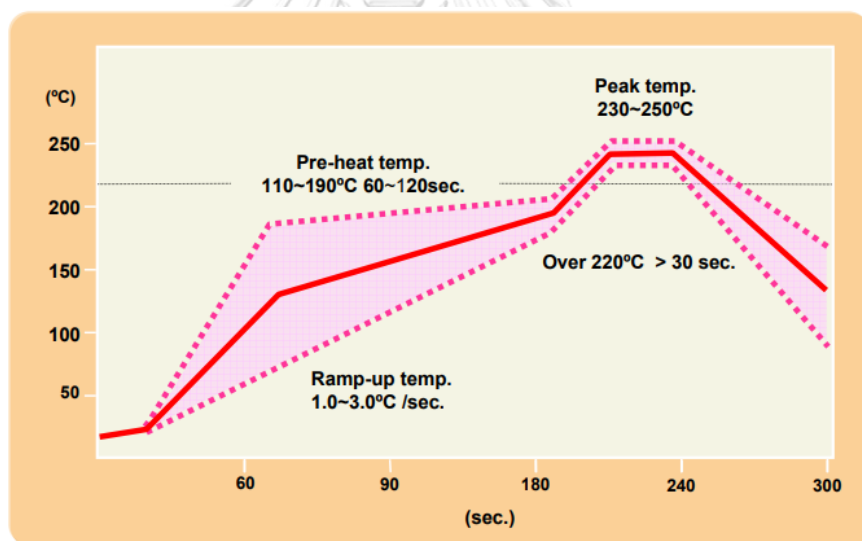
1. ตำแหน่งและขนาดของพื้นที่เปิด (Opening pad)
2. ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์โดยรวมและความหนาสุทธิของผลิตภัณฑ์ขณะพิมพ์
3. มาตรฐานการออกแบบรูปร่างรูเปิดหรือช่องว่างแม่พิมพ์ (Stencil's aperture) ตามคำแนะนำของชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากโดยปกติผู้ขายชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์มักมีขนาดรูเปิดที่เหมาะสมกับจุดเชื่อมต่อ (Component's terminal) ของผลิตภัณฑ์ของตนเอง
4. ชนิดของโลหะบัดกรี เนื่องจากขนาดของผงโลหะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรี โดยขนาดของผงโลหะมีผลต่อการออกแบบมุมของรูเปิดแม่พิมพ์

2.3. กระบวนการบัดกรี (Reflow process)

กระบวนการบัดกรีเป็นกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมติดพื้นที่เปิด (Opening pads) กับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Component's terminal) โดยรูปแบบของค่าความร้อนที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรีที่เลือกใช้ในกระบวนการผ่านการอ้างอิงข้อกำหนดจากเอกสาร TDS ของโลหะบัดกรีที่เลือกด้วยการใช้ช่วงของอุณหภูมิ เวลา และความเร่งแนะนำของการเปลี่ยนความร้อนจากช่วงหนึ่งไปอีกช่วงหนึ่งเพื่อให้โลหะบัดกรีมีความสมบูรณ์ในการเปลี่ยนสถานะโดยความร้อน (Recommend reflow profile)



รูปที่ 2.8 Reflow profile สำหรับโลหะบัดกรีประเภทมีตะกั่ว



รูปที่ 2.9 Reflow profile สำหรับโลหะบัดกรีประเภทไม่มีตะกั่ว

ทั้งนี้ตามข้อกำหนดแนะนำของโลหะบัดกรีชนิด S3X 58-M605H-3 (Sn=96.5, Ag=3.0%, Cu=0.5%) อุณหภูมิจะถูกแบ่งเป็น 4 ช่วงให้เลือกตั้งค่าตามความเหมาะสมของเครื่องจักร คือ

1. ช่วงอุณหภูมิอุ่นฟลักซ์ (Ramp-up temperature) อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1.0 - 3.0°C ต่อวินาที

2. ช่วงอุณหภูมิฟลักซ์ทำความสะอาดผิว (Pre-heat temperature) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 110 - 190°C ระยะเวลาคงอุณหภูมิ 60 – 120 วินาที (Soak time)
3. ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (Peak temperature) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 230 - 250°C ระยะเวลาคงอุณหภูมิ อยู่ที่มากกว่า 30 วินาที
4. ช่วงลดอุณหภูมิ (Cool down) อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -4.0 ถึง -1.0°C ต่อวินาที

และเนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนมีผลต่อการสร้างพันธะของโลหะ ทำให้ในบางโลหะบัดกรี จำเป็นจะต้องปล่อยไนโตรเจนเข้าไปไล่ออกซิเจนในกระบวนการบัดกรี

2.4 ทฤษฎีทฤษฎีซิกซ์ ซิกมา (Six sigma)

2.4.1 ความหมายและความเป็นมาของทฤษฎีซิกซ์ ซิกมา (Six sigma)

ซิกซ์ ซิกมา (Six sigma) คือทฤษฎีการพัฒนาคุณภาพ ประสิทธิภาพ ของกระบวนการผลิต และกระบวนการทำงานเพื่อประโยชน์สูงสุด นั่นก็คือ ผลิตได้คุ้มค่า คุณภาพคงที่ งานบกพร่องและความสูญเปล่าน้อย ทฤษฎีดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1986 โดย Dr. Mikel Harry ร่วมกับ Bill Smith และทีมวิศวกรของบริษัท Motorola ภายหลังได้ถูกจดลิขสิทธิ์เมื่อวันที่ 11 มิถุนายน ค.ศ. 1991 และถูกใช้เป็นแนวทางการผลิตสินค้าของบริษัท ส่งผลให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ของบริษัทจนถึงปี 2005 ได้มากกว่า 17,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ

2.4.2. ทฤษฎีซิกซ์ ซิกมา (Six sigma) ภายใต้หลักการ DMAIC

คำว่าซิกซ์ ซิกมา อ้างอิงถึงเป้าหมายการลดของเสียให้เข้าใกล้ศูนย์ ซิกมา (σ) คือ ตัวอักษรกรีก ในทางสถิติใช้แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร เพื่อบอกให้ทราบถึงความแปรปรวนภายในกลุ่มของประชากร ในมุมมองของสถิตินั้นเป้าหมายของซิกซ์ ซิกมา คือ การลดความแปรปรวนเพื่อให้เกิดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือบริการมีคุณค่ามากกว่าหรือเท่ากับ ความคาดหวังของลูกค้า โดยคุณภาพซิกมาสามารถแบ่งได้ 6 ระดับจากสัดส่วนงานดีที่สามารถผลิตได้หรือตั้งแต่ 68.27% - 99.99998% [5]

กระบวนการมาตรฐานของซิกซ์ ซิกมา ประกอบด้วย 5 ระยะตามหลักการ DMAIC คือ ระยะกำหนดปัญหา (Define Phase), ระยะการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measure Phase), ระยะการ

วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase), ระยะการปรับปรุง กระบวนการ (Improvement Phase) และระยะการควบคุมกระบวนการ (Control Phase) [6] โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. Define Phase (D) หรือระยะกำหนดปัญหา การศึกษาข้อมูลปัจจุบันของบริษัทเพื่อเลือกหัวข้อที่สนใจนำมาปรับปรุง จากนั้นประเมินสภาพปัจจุบันของปัญหาในกำหนดขอบเขตว่าโครงการที่จะปรับปรุงนี้และคาดการณ์ผลลัพธ์ มีการกำหนดทิศทางการปรับปรุงหรือการเปลี่ยนแปลงโดยมีเป้าหมายที่เข้าใจตรงกัน ภายใต้การจัดตั้งทีมที่เป็นผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องและมีความรู้เพียงพอต่อการวิเคราะห์ปัญหาและแก้ไข นอกจากนี้ยังต้องกำหนดระยะเวลาโครงการเพื่อให้เกิดความชัดเจนว่าโครงการนี้จะเข้าไปเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงานในขั้นตอนใดในเวลาใดบ้าง โดยข้อมูลจะถูกรวบรวมไว้ในสัญญาโครงการ (Project Charter) ซึ่ง รายละเอียดโครงการจะประกอบด้วย เหตุผลทางธุรกิจ (Business Case) สภาพปัญหา (Problem Statement) วัตถุประสงค์ของโครงการ (Objective Statement) ตัวชี้วัดของโครงการ (Project Metrics) ขอบเขตโครงการ (Project Scope) ข้อจำกัดของโครงการ (Project Constraints) สมมติฐานของโครงการ (Project Assumptions) สมาชิกในทีม (Team Members) ระยะเวลาในการดำเนินการโครงการ (Project Timeline) แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสัญญาโครงการ (Project Charter)

Project Charter		
Project Title:		
Business Case:	Project Constraints:	
Problem Statement:	Project Assumptions:	
Objective Statement:	Team Members:	
Project Metrics:	Project Timeline:	
Project Scope:	Phase	Begin
	Define	
	Measure	
	Analysis	
	Improve	
	Control	

2. Measure Phase (M) หรือระยะการวิเคราะห์ระบบการวัด เป็นขั้นตอนการประเมินความสามารถของกระบวนการในปัจจุบันอย่างละเอียดโดย Process Capability Analysis เพื่อทราบสภาพปัญหาของโครงการก่อนการปรับปรุง ทั้งนี้ก่อนการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์นั้น เครื่องมือวัดที่ถูกใช้ในวัดหรือตรวจสอบควรผ่านการสอบเทียบเพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัด (ความแม่นยำและเที่ยงของระบบวัด, Measurement System Analysis) เสียก่อน ทำให้ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์และผลจากการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ อย่างไรก็ตามการเก็บข้อมูลจำเป็นต้องเก็บให้ครอบคลุมลักษณะการผลิตหรือตลอดช่วงระยะเวลาหนึ่งในการผลิตจึงควรออกแบบวิธีการและตารางบันทึกข้อมูลให้เรียบร้อย

องค์ประกอบความผันแปรของระบบวัดสามารถจำแนกประเภทออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ความผันแปรของตำแหน่ง (Location Variation) เป็นคุณสมบัติของการเข้าใกล้ค่าเฉลี่ย หรือจากผลการวัดเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Reference Value) สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความเอนเอียง (bias), ความมีเสถียรภาพ (stability) และ คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (linearity)

- ความผันแปรของกว้าง (Width Variation) คือ อิทธิพลโดยรวมของความสามารถในการ แยกความแตกต่าง ความไว และความสามารถในการทำซ้ำตลอดช่วงของการวัด สามารถวิเคราะห์ได้จากค่ารีพีทะบิลิตี้ (repeatability) และรีโพรดูซิบิลิตี้ (reproducibility)
3. Analyze Phase (A) หรือระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ขั้นตอนการระบุสาเหตุหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตโดยวิธีการวิเคราะห์ด้วย ก้างปลา (Fish Bone) หรือวิเคราะห์ด้วยหลักการ 5-WHY ก่อนการนำไปประเมินด้วยวิธี Cause and Effect หรือ FMEA เพื่อที่เมื่อหาปัจจัยเป็นไปแล้วยังนำปัจจัยดังกล่าวมาลำดับความสำคัญสำหรับเลือกไปทำการแก้ไขต่อไป ตลอดกระบวนการวิเคราะห์นี้ทีมงานต้องร่วมระดมความคิดเพื่อให้ปัจจัยเป็นไปได้นำนามาพิจารณาอย่างครอบคลุม
 4. Improve Phase (I) หรือระยะการปรับปรุงกระบวนการ หลังจากที่เราทราบสาเหตุหลักหรือสาเหตุที่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องแล้วยังวางแผนในการปรับปรุงกระบวนการทำงานโดยใช้กระบวนการทางสถิติที่เหมาะสม หรือการออกแบบการทดลองที่เพื่อเห็นถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัยและระหว่างปัจจัย แล้วจึงนำมาประเมินหาค่ามาตรฐานหรือแนวทางที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและโรงงาน รวมไปถึงการได้มาซึ่งสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการนั้นๆ ทั้งนี้ควรจะต้องเลือกดำเนินการตามขอบเขตหรือเงื่อนไขที่มีในปัจจุบันเป็นหลัก เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มหรือการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบต่อลูกค้า เป็นต้น
 5. Control Phase (C) หรือระยะการควบคุมกระบวนการ เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่นำค่ามาตรฐานหรือวิธีการทำงานใหม่ที่เหมาะสมหลังการปรับปรุงมาทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง เพื่อทราบถึงผลลัพธ์ระยะยาวและผลกระทบที่อาจตกหล่นจากการประเมินหรือเกิดขึ้นหลังการเปลี่ยนแปลง โดยหากผลลัพธ์หลังการติดตามเป็นไปตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ ทีมงานต้องจัดทำเอกสารวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) และเอกสารควบคุม (Control Plan) เพื่อใช้ในการอบรมพนักงานและรักษาสภาพหลังการปรับปรุงไว้

2.5. ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติและการออกแบบการทดลอง

2.5.1. การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-a-Time (OFAT)

วิธีนี้เป็นการทดสอบการส่งผลของปัจจัยทีละปัจจัย โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนค่าปัจจัยใด ๆ เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่น ๆ ที่สนใจศึกษาพร้อมกันไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้นจะสามารถสรุปผลได้เพียงทีละปัจจัยเท่านั้น ด้วยรูปแบบของ OFAT จะพบว่าทำให้ไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ และ วิธีนี้จะใช้จำนวนการทดลองและขนาดตัวอย่างมากกว่าการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

2.5.2. การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

วิธีนี้เป็นการทดสอบการส่งผลของปัจจัยใด ๆ ที่ระดับของปัจจัยอื่น ๆ ได้อย่างน้อยสองระดับ โดยสามารถศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษาได้ แม้จะใช้จำนวนการทดลองและขนาดตัวอย่างน้อยกว่าวิธีการแบบ OFAT การออกแบบการทดลองแบบ DOE นั้นสามารถแบ่งได้ 2 แบบการทดลอง คือ 1.การทดลองที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาว่าปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นแบบการทดลองที่มีการทดสอบแต่ละปัจจัยที่สองระดับเท่านั้นเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาจากจำนวนการทดลอง ได้แก่ แบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป หรือแบบ 2^k (Full or 2^k Factorial Design) และแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) 2.การทดลองที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ เรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมนี้แต่ละปัจจัยต้องถูกทดสอบที่มากกว่าสองระดับ ทำให้สามารถเห็นจุดที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดหรือที่ค่าตัวแปรตอบสนองที่ระดับที่ต้องการได้ ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken)

2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการ DMAIC และ หลักการวิเคราะห์ปัจจัย

อรรถพล ฤทธิภักดี [7] วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพด้วยวิธีการ FMEA ในการลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนพลาสติกซึ่งทำให้เกิดข้อบกพร่องบนผิวของชิ้นงาน ได้แก่ ความผิดปกติของสี (เป็นเม็ด, เป็นขนผ้า, เป็นหลุม, บาง,

ไหลย่อย และเป็นรอย) รวมไปถึงความบกพร่องด้านการวางแผนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน, มาตรฐานในการควบคุมคุณภาพ, ความสะอาดในกระบวนการ และประสิทธิภาพในการทำงานของ พนักงาน หลังการปรับปรุงกระบวนการให้มีมาตรฐานพบว่าสัดส่วนของเสียเทียบกับยอดการผลิต ลดลง 57.24% คือจาก 16.37% เหลือ 9.37%

ปวีณสุตา ปานอำไพ [8] ประยุกต์แนวทางในการดำเนินงานของชิคซ์ ซิกม่า 5 ขั้นตอน (DMAIC) ในการปรับปรุงลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตคอยล์เย็น โดยวิเคราะห์ลักษณะ ข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพด้วยวิธีการ FMEA เพื่อเลือกสาเหตุที่มีค่า RPN สูงกว่า 100 คะแนนมาทำการแก้ไข หลังการปรับปรุงด้วยการติดตั้งระบบควบคุมเครื่องจักร, ติดตั้งเซ็นเซอร์วัด ขนาดชิ้นงาน และฝึกอบรมวิธีการทำงานที่ถูกต้องแก่พนักงาน แล้วยังมีการจัดทำบอร์ดชี้ควบคุม ปริมาณของเสียรวมไปถึงเอกสารควบคุมการผลิต โดยพบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการ ผลิตคอยล์เย็น 50.46% คือ จาก 0.216% เหลือ 0.107% หรือลดมูลค่าของเสียกว่า 63.16%

ชนิกานต์ รักธงไทย [9] ประยุกต์แนวทางในการดำเนินงานของชิคซ์ ซิกม่า 5 ขั้นตอน (DMAIC) ในการปรับปรุงลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกในกระบวนการพ่นสี ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์โดยวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบด้านคุณภาพด้วยวิธีการ Cause and Effect เพื่อลำดับความสำคัญของสาเหตุและคัดเลือกเพื่อทำการปรับปรุงต่อไป โดยพบว่าสาเหตุหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าว คือ อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน, ความดันใน การล้างชิ้นงาน, แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED และวิธีการขัดผิวชิ้นงาน หลังทำการปรับปรุงสาเหตุ ข้างต้นในกระบวนการพ่นสีแล้ว พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกจาก 3.82% เหลือ 0.97% หรือ มูลค่าของเสียกว่า 105,295 บาท

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรี

Vesely P. [10] ศึกษาการกระเด็นของฟลักซ์สองชนิด ได้แก่ ROL1 (Halogen free type) และ ROL0 (Halogenated type) ด้วยการใช้โลหะบัดกรี SAC305 บนตัวอย่างทดลองที่มีวัตถุคลุม ผิวสองชนิด (Solder mask) คือ ระหว่างพื้นผิวชนิด Hot air solder leveling (HASL) ที่มี ส่วนประกอบหลักของพื้นผิวเป็นดีบุก 63% และ พื้นผิวชนิด Electroless Nickel immersion gold (ENIG) ที่มีส่วนประกอบหลักของพื้นผิวเป็นทอง ผู้วิจัยยังกำหนดให้ตัวอย่างของแต่ละพื้นผิวมีทั้งแบบ พื้นผิวเงาและพื้นผิวด้าน โดยพบว่าพื้นผิวด้านทำให้เกิดการกระเด็นของฟลักซ์มากกว่าพื้นผิวเงา,

พื้นผิวทองเงาทำให้การกระเด็นของฟลักซ์น้อยกว่าพื้นผิวดิบเงา และใช้ฟลักซ์ ROL0 ทำให้การกระเด็นของฟลักซ์น้อยกว่า ROL1

Francis K.H Lau [11] ศึกษาข้อบกพร่องที่เกิดในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบบอร์ดแข็งที่มักเกิดขึ้นจากกระบวนการ Solder print โดยศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้ด้วยวิธีการ Taguchi 1. ลักษณะรูเปิดจากวิธีการFabrication 2.ความเหมาะสมของชนิดโลหะบัดกรี 3.การส่งผลของระยะเวลาพักโลหะบัดกรี 4.การออกแบบพารามิเตอร์การพิมพ์ และ 5.การออกแบบพารามิเตอร์การบัดกรี พบว่าหลังการปรับปรุงและได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดมาแล้ว สัดส่วนของเสียลดลง 25%

Kamila Piotrowska [12] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโลหะบัดกรีภายใต้สภาพความชื้นของชิ้นงานการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์บัดกรีที่ตกค้าง (Flux residue) สัมพันธ์กับกระบวนการบัดกรีภายใต้สภาวะความชื้นและอุณหภูมิที่แตกต่าง, ศึกษาการกัดกร่อนจากฟลักซ์บัดกรีตกค้างสารตกค้างภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ซ่อนอยู่ของฟลักซ์บัดกรีตกค้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสงและการสแกนพบว่าฟลักซ์บัดกรีตกค้างสามารถวิวัฒนาการให้มีฤทธิ์เป็นกรดหลังกระบวนการบัดกรีเมื่อพื้นที่บัดกรีมีความชื้นสูงและเกิดการกัดกร่อนในเวลาต่อมา โดยอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อปรากฏการณ์นี้

Olivér Krammer และ Balázs Illés [13] กล่าวถึงความแตกต่างของพารามิเตอร์ในการพิมพ์ระหว่างเมื่อใช้โลหะบัดกรีแบบมีสารตะกั่วและแบบไร้สารตะกั่วเนื่องจากแรงยึดเกาะที่มากกว่าในการใช้โลหะบัดกรีแบบมีตะกั่ว ทำให้ต้องนำแม่พิมพ์มาทบทวนรูปแบบใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการพิมพ์ จากการทดลองเพื่อดูความสมบูรณ์หลังโลหะบัดกรีถูกหลอมเหลว (wetting properties), ความสามารถในการเชื่อมประสาน (solderability) และ ความสามารถในการพิมพ์ (printability) โดยศึกษาผลระหว่างพื้นที่รูเปิดของแม่พิมพ์และพื้นที่โลหะบัดกรีหลังพิมพ์ พบว่า electroformed nickel มีผลดีที่สุดแต่มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด สำหรับ laser cut stainless steel,และ laser cut nickel มีผลไม่แตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการพิมพ์ด้วยโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วดีกว่าโลหะบัดกรีแบบมีสารตะกั่วไม่ว่าใช้แม่พิมพ์แบบใดก็ตาม

ระยะกำหนดปัญหา

3.1. การจัดตั้งทีมงาน



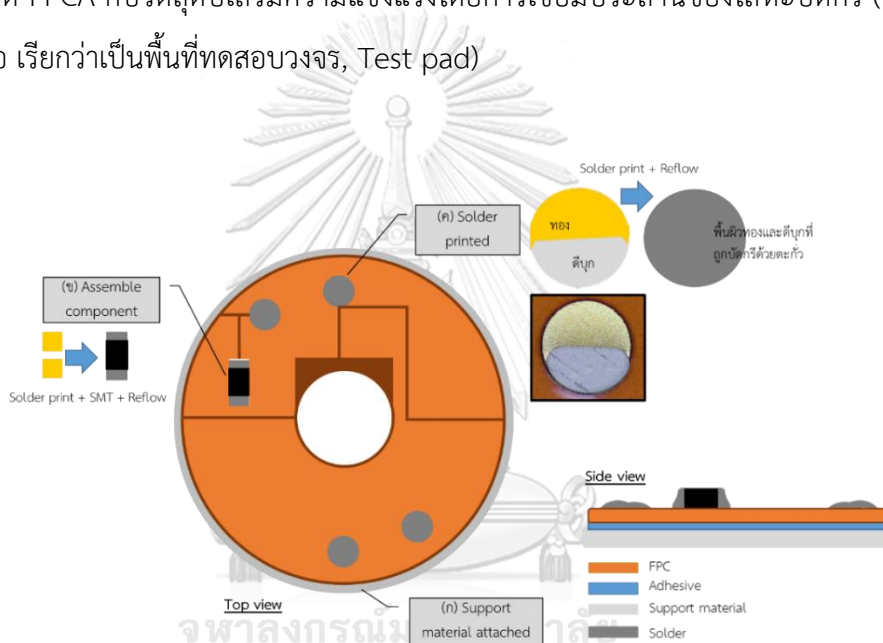
- กรรมการผู้จัดการใหญ่ ตำแหน่ง Executive leader
- ผู้จัดการแผนกวิศวกร ตำแหน่ง Champion
- หัวหน้าวิศวกรดูแลกระบวนการผลิต ตำแหน่ง Black belt
- วิศวกรดูแลกระบวนการผลิต ตำแหน่ง Green belt
- วิศวกรควบคุมคุณภาพ (ผู้วิจัย) ตำแหน่ง Green belt
- วิศวกรเครื่องจักร ตำแหน่ง Green belt
- ช่างเทคนิค ตำแหน่ง Green belt
- ผู้จัดการฝ่ายผลิต ตำแหน่ง Process owner

นอกจากทีมงานวิจัยหลักข้างต้นแล้ว ผู้เชี่ยวชาญในส่วนปลีกย่อยอย่างวิศวกรออกแบบ
เจ้าหน้าที่วางแผน และ เจ้าหน้าที่ผลิตเครื่องมือ ยังมีส่วนร่วมในการแบ่งปันคำแนะนำหรือข้อมูล
เพิ่มเติมเพื่อให้งานวิจัยประสบผลสำเร็จยิ่งขึ้นและกระทบไปยังส่วนที่อาจเป็นผลข้างเคียงในอนาคต
น้อยที่สุด

3.2. สภาพปัญหาปัจจุบันและกระบวนการผลิตของโมเดล A

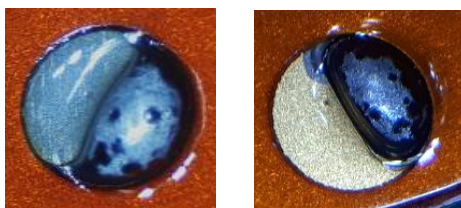
3.2.1. ลักษณะข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์โมเดล A

ผลิตภัณฑ์โมเดล A เป็นผลิตภัณฑ์แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นที่ใช้ในรถยนต์ที่มีเครื่องยนต์ประเภทเครื่องยนต์สันดาป (ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้) โดยลักษณะของโมเดล A หลังเสร็จสิ้นการผลิตจะเป็นไปตามตัวอย่างจำลองในรูปที่ 3.1 คือ แผงวงจร หรือ FPCA ถูกแนบติดอยู่บนวัสดุติดเสริมความแข็งแรง (ก) และบริเวณพื้นที่เปิด (opening pads สำหรับโมเดล A คือพื้นที่ทองทั้งหมด) จะถูกบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีเพื่อวางชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ (ข) และเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของการติด FPCA กับวัสดุติดเสริมความแข็งแรงโดยการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี (ค, Solder joint หรือ เรียกว่าเป็นพื้นที่ทดสอบวงจร, Test pad)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างจำลองผลิตภัณฑ์โมเดล A

โดยจากบทที่ 1 80% ของสัดส่วนโลหะบัดกรีผิดปกติในโมเดล A ตลอดระยะเวลา 12 เดือน คือ ข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในด้านใดด้านหนึ่ง ณ พื้นที่ตำแหน่ง (ค) ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีเพียงพื้นผิวดีบุก (Tin) หรือทอง (Gold) เท่านั้นที่ถูกคลุมด้วยโลหะบัดกรีเต็มพื้นที่ ขณะที่อีกพื้นผิวมีโลหะบัดกรีคลุมบางส่วนหรือไม่มีเลย



รูปที่ 3.2 โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ดีบุก (ซ้าย) และ โลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ทอง (ขวา)

3.2.2. สัดส่วนของเสียและมูลค่าความสูญเสียที่เกิดจากของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ของโมเดล A

จากบทนำ ของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติในผลิตภัณฑ์โมเดล A จะถูกคัดทิ้งเนื่องจากลูกค้าไม่อนุญาตให้มีการซ่อมแซมตัวงาน ผู้วิจัยจึงทำการแจกแจงสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติตลอดปี 2563 และมูลค่าความสูญเสียที่เกิดจากของเสียโดยโรงงานใช้จำนวนชิ้นงานของเสีย x ราคาขายผลิตภัณฑ์ (39.38 บาทต่อชิ้น) เนื่องจากของเสียเกิดขึ้นที่กระบวนการสุดท้ายของกระบวนการผลิตหลักทั้งหมด ดังตารางที่ 3.1 อย่างไรก็ตามหากจำกัดขอบเขตการปรับปรุงข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติตามกฎหมายเรโต 80% ของข้อบกพร่องโลหะบัดกรีผิดปกติ คือ ข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ หรือ 4.14% ของปริมาณการผลิต คิดเป็นมูลค่าความสูญเสียที่เกิดจากของเสียดังกล่าวถึง 517,542 บาท













ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีผิดปกติต่อจำนวนการผลิตรายเดือน

เดือนผลิต	จำนวนผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย ข้อบกพร่องโลหะ ผิดปกติ (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของ เสีย	ราคารวม (บาท)
มกราคม	108,328	4,462	4.12%	175,714
กุมภาพันธ์	6,531	270	4.13%	10,633
มีนาคม	15,403	1,780	11.56%	70,096
เมษายน	25,639	3,026	11.80%	119,164
พฤษภาคม	7,729	331	4.28%	13,035
มิถุนายน	3,661	217	5.93%	8,545
กรกฎาคม	4,663	217	4.65%	8,545
สิงหาคม	35,023	2164	6.18%	85,218
กันยายน	17,715	1338	7.55%	52,690
ตุลาคม	46,428	2799	6.03%	110,225
พฤศจิกายน	39,277	2149	5.47%	84,628
ธันวาคม	7,049	350	4.97%	13,783
รวม	317,446	19,103	6.02%	752,276

3.2.3. กระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์โมเดล A

ผลิตภัณฑ์โมเดล A หลังผ่านกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรและกระบวนการปกป้องผิวทองแดงแล้วจึงถูกส่งเข้าสู่ในส่วนของการประกอบชิ้นส่วนรวมไปถึงการทดสอบการทำงานของวงจรและตัดเจาะเป็นชิ้นงานสุดท้าย (Assembly process) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตส่วนปลายของผลิตภัณฑ์ที่มีกระบวนการย่อยและขั้นตอนการดำเนินงานตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 กระบวนการผลิตย่อยในส่วนของการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์โมเดล A

กระบวนการ	วัตถุดิบ	คน	เครื่องมือ	เครื่องจักร
 Material preparation การเตรียมวัตถุดิบ	FPC, Component, Solder	Y	N	N
 Oven dry การอบวัตถุดิบเพื่อให้ความชื้น	FPC, Component (MSL controlled)	Y	N	Oven
 FPC set การจัด FPC ใน Fixture	N	Y	Fixture, Glass cloth	N
 Solder print การพิมพ์โลหะบัดกรีผ่านแม่พิมพ์	FPC, Solder	N	Stencil, Squeegee	Printer
 Solder paste inspection การตรวจสอบคุณภาพ (เอียง, ปริมาตร, ความสูง) โลหะบัดกรีหลังการพิมพ์	N	N	N	SPI machine
 SMT การวางชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์	Component	N	Nozzle, Feeder	SMT machine
 Reflow การบัดกรีเพื่อเชื่อมประสาน	N	N	N	Reflow machine
 AOI (Automated optical inspection) การตรวจสอบคุณภาพโลหะบัดกรี การเชื่อมและชิ้นส่วนหลังการบัดกรี	N	N	N	AOI machine
 In-circuit/Function test การตรวจสอบคุณภาพวงจร	N	N	Test fixture	Tester
 De-penalization การตัดเจาะเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์	N	Y	Die	Depanal machine
 Final inspection การตรวจสอบสภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์	N	Y	Microscope	N
 Packing การบรรจุผลิตภัณฑ์ลงหีบห่อ	Tray, Bag, Box	Y	N	N

ปัญหาโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ดังกล่าวเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่ไม่สามารถทำการซ่อมแซมได้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะต้องถูกคัดทิ้งเนื่องจากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าซึ่งมีลักษณะที่ต้องการ คือ บริเวณ (ค) จะต้องถูกบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีครอบคลุมทั้งพื้นที่โดยที่โลหะบัดกรีจะต้องไม่แตกร้าวหรือเป็นรูหรือโป่งพอง แม้ว่าวงจรของผลิตภัณฑ์ทำงานได้สมบูรณ์ นับเป็นการสูญเสียในระดับราคาขายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจากตารางลำดับขั้นกระบวนการย่อยใน

กระบวนการประกอบชิ้นส่วนข้างต้นนั้นจะมีกระบวนการ 3 ประเภทหลัก ๆ คือ กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ, กระบวนการผลิต และ กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ

กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ มีกระบวนการย่อย 3 กระบวนการ ดังนี้

1. Material preparation การเตรียมวัตถุดิบที่ถูกต้องตามการออกแบบ (BOM) เพื่อใช้ในกระบวนการผลิต อาทิ FPC sheets, ชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ และโลหะบัดกรี
2. Oven dry การนำ FPC และชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ (Components) บางชนิดที่ไวต่อความชื้นไปอบเพื่อไล่ความชื้นก่อนเข้ากระบวนการผลิต
3. FPC set ก่อนเริ่มการผลิต FPC sheet จะถูกวางลงบน Fixture จากนั้นยึดด้วย Glass cloth เพื่อให้ตัวแผ่น FPC มีความเป็นระนาบและไม่ขยับไปจากตำแหน่งตั้งต้นตลอดการผลิตขณะพิมพ์โลหะบัดกรีลง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ

กระบวนการผลิต มีกระบวนการย่อย 4 กระบวนการ ดังนี้

1. Solder print การพิมพ์โลหะบัดกรีผ่านแม่พิมพ์ (Stencil) โดยใบปาด (Squeegee) จะดันโลหะบัดกรีผ่านช่องบนแม่พิมพ์ (Stencil's aperture) ลงบนพื้นที่เปิดของ FPC (Opening pads)
2. SMT (Surface mounting technology) หรือ Component placement systems หรือ Pick and Place การใช้เครื่องจักรที่มีเครื่องมือจับ (Nozzle) ในการหยิบชิ้นส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผ่าน Feeder แล้วนำไปวางบน FPC ณ ตำแหน่งที่พิมพ์โลหะบัดกรีแล้ว
3. Reflow การบัดกรีด้วยความร้อนเพื่อเชื่อมประสาน Component
4. De-panelization การตัดหรือเจาะบริเวณคัตเอาท์เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามการออกแบบ

กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ มีกระบวนการย่อย 4 กระบวนการ ดังนี้

การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงปริมาณ (Quantitative inspection) 2 กระบวนการ

1. SPI การตรวจสอบคุณภาพโลหะบัดกรีอันได้แก่ การเยื้องในแนวแกน X หรือแกน Y, ความสูงของโลหะบัดกรีหลังการพิมพ์ผ่านแม่พิมพ์ รวมไปถึงการให้เครื่องจักรจำลองปริมาตรต่อพื้นที่การพิมพ์โลหะบัดกรีว่าเป็นไปตามการออกแบบหรือไม่
5. In-circuit / Function test การตรวจสอบคุณภาพวงจรหลังการบัดกรีผ่านทางกรทดสอบจ่ายแรงดันและกระแสทางไฟฟ้า

การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงคุณภาพ (Attribute inspection) อีก 2 กระบวนการ

1. AOI การตรวจสอบคุณภาพโลหะบัดกรีที่เชื่อมประสานระหว่าง FPC กับ Components หลังการบัดกรีว่าเป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดหรือไม่ เช่น Components หาย, ยกตัว หรือเสียรูป เป็นต้น
2. Final inspection การตรวจสอบสภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์โดยการมองผ่าน Microscope

3.2.4. กระบวนการที่เกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อคุณภาพโลหะบัดกรี

จากข้อ 3.2.3. จะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องหรือส่งผลกระทบต่อปัญหาโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ คือ กระบวนการ Oven dry, FPC set, Solder print และ Reflow ด้วยเหตุผลดังนี้

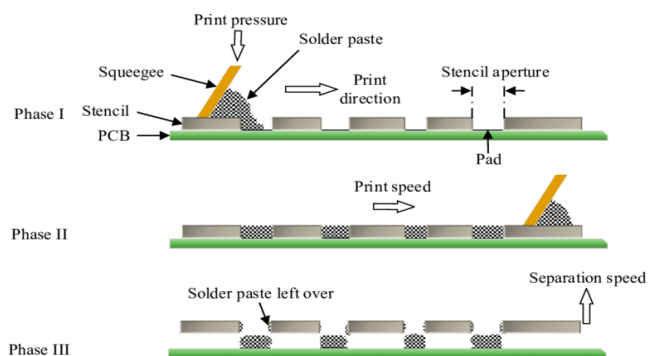
เนื่องจากกระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์ในการอบแผ่นวงจร (FPC) เพื่อไล่ความชื้น ดังนั้นหาก FPC มีความชื้นมากกว่าความชื้นที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดการแยกชั้นหรือการพองออกของ Cover material ตามขอบพื้นที่เปิด (Opening pads) หลังผ่านกระบวนการ Reflow ที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 235-255°C ทำให้โลหะบัดกรีไหลแทรกเข้าใต้ Cover material และเมื่อโลหะบัดกรีไหลออกจากบริเวณที่กำหนดแล้ว บริเวณดังกล่าวจะมีปริมาณโลหะบัดกรีที่น้อยลงทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณโลหะบัดกรีที่เหลืออยู่ไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปกลุ่มพื้นที่พิมพ์ในเวลาต่อมา

- กระบวนการ FPC set

การจัดวางแผ่นวงจรลงบน Fixture แล้วติด Glass cloth ทำให้แผ่นวงจรเป็นระนาบโดยไม่ขยับออกจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้ทำให้เมื่อเข้ากระบวนการ Solder print โลหะบัดกรีจะถูกพิมพ์ลงบนพื้นที่เปิด (Opening pads) ตรงตามตำแหน่งที่ออกแบบแม่พิมพ์เท่านั้น การติด Glass cloth ไม่แน่นสนิท, การลืมนติด Glass cloth ครบทั้งสี่มุมของ FPC หรือการจัดวาง FPC ลงบน Fixture ยึดทำให้ Opening pads ไม่ตรงกับช่องว่างของแม่พิมพ์ ปริมาณโลหะบัดกรีจะถูกพิมพ์ลงบน Opening pad เพียงบางส่วนโดยบางส่วนถูกพิมพ์บน Cover material แทน ดังนั้นปริมาณโลหะบัดกรีจึงถูกพิมพ์ลงบน Opening pads จึงน้อยกว่าที่ออกแบบไว้

- กระบวนการ Solder print

การพิมพ์โลหะบัดกรีมีขั้นตอน คือ Fixture ถูกเครื่องจักรยกขึ้นแนบด้านใต้แม่พิมพ์ จากนั้นใบปาดจะทำการปาดโลหะบัดกรีจากด้านบนให้โลหะบัดกรีไหลเข้าช่องว่างของแม่พิมพ์ (Aperture) ไปยัง opening pads ทำให้หาก aperture ของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม ปริมาณโลหะบัดกรีต่อ opening pads จะไม่พอดีกับพื้นที่, หากใช้ความเร็วขณะปาดมากเกินไปโลหะบัดกรีจะไหลเข้าไม่เต็มปริมาณตาม aperture ขณะที่โลหะบัดกรีจะมีปริมาณมากเกินไปหากความเร็วในการปาดน้อยเกินไป, การใช้แม่พิมพ์ที่มีความเครียดน้อยผิดปกติ (ผิวแม่พิมพ์หย่อน) จะทำให้ได้ปริมาณโลหะบัดกรีมากเกินไปหรือพิมพ์ออกมาไม่เป็นรูปทรงตามการออกแบบ, การมีระยะทางระหว่าง Fixture และแม่พิมพ์มากเกินไปทำให้โลหะบัดกรีไหลลง opening pads มากกว่าปกติเนื่องจากมีพื้นที่ให้โลหะบัดกรีไหลเพิ่มนอกเหนือจากช่องของ aperture หรือ การแยก Fixture ออกจากแม่พิมพ์เร็วเกินไปทำให้โลหะบัดกรีไหลตามแรงแยกของ Fixture เพราะมีแรงยึดระหว่างโลหะบัดกรีกับ opening pads ขณะที่มีความต้านการไหลของผนัง aperture จึงเกิดโลหะบัดกรีรูปทรงสูงหรือผิดรูปจากการออกแบบ เป็นต้น



รูปที่ 3.3 กระบวนการ Solder print (Phase III ในโรงงานกรณีศึกษาเครื่องจักรแยก Fixture ออกจาก stencil) [14]

- กระบวนการ Reflow

การบัดกรีเป็นกระบวนการให้ความร้อนเพื่อเชื่อมประสานในระดับชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (IMC, Intermetallic compound) โดยมีการตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาตามโซนของเครื่องจักร (Reflow profile) ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรีเป็นหลัก โดยระยะเวลาใน Reflow ณ อุณหภูมิสูงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีจะทำให้โลหะบัดกรีเกิดการหลอมเหลวและไหลไปตามผิวของ opening pad เพื่อเกิดการเชื่อมประสาน (Solder joint) และมีศักยภาพในการยึดติด หรือการฟอร์มตัวของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีที่ถูกต้อง (Solder wettability) ดังนั้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ ณ จุดหลอมเหลวนานเกินไปทำให้เกิดการไหลในวงกว้างของโลหะบัดกรีบนผิว opening pads รวมถึงไปพบการเปราะของรอยประสาน

3.3. การกำหนดตัวชี้วัดและเป้าหมายโครงการ

ปัญหาที่จะดำเนินการปรับปรุง คือ ข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในด้านใดด้านหนึ่งของพื้นที่ (ค) หรือพื้นที่เชื่อมระหว่าง FPCA และ Support material ที่มีความแตกต่างของชนิดพื้นผิวเป็นทองและดีบุก โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการให้มีสัดส่วนของเสียลดลงจากเดิม 70% และประเมินประสิทธิผลด้วยตัวชี้วัดคือเปอร์เซ็นต์ของเสีย (%Yield loss) และมูลค่าความสูญเสียที่เกิดจากของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่ลดลง ภายใต้วงระยะเวลาในการสังเกตการณ์ที่เพียงพอครอบคลุมถึงความแปรปรวนของวัตถุดิบ (การแปรปรวนปกติที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเวลาที่กำหนด) ซึ่งได้แก่ ความแปรปรวนของค่าการหดตัวของแผ่นวงจรระหว่างล็อต และความแปรปรวนของค่าความหนืดของโลหะบัดกรีระหว่างล็อต



3.4. สัญญาโครงการ (Project charter)

สัญญาโครงการลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับผลิตภัณฑ์แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นเริ่มจากเดือนกรกฎาคม 2564 ไปจนถึง มิถุนายน 2565

ตารางที่ 3.3 สัญญาโครงการ

Project Charter		
Project Title: การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น		
Business Case: สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในโมเดล A เป็นหนึ่งในสัดส่วนของเสียหลักในกระบวนการผลิตที่มีมูลค่าวัตถุดิบมากที่สุด ทำให้ออกจากสูญเสียค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและการคัดทิ้งแล้ว องค์กรยังต้องสูญเสียความเชื่อมั่นในโมเดล A และ โมเดลใกล้เคียงจากลูกค้าอีกด้วย	Project Constraints: การทดลองในสายการผลิตจริงสามารถทำได้ในวันพุธของทุกสัปดาห์เท่านั้น	
Problem Statement: สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในโมเดล A ตลอดปี 2563 คิดเป็น 4.14% ของปริมาณการผลิตโดยคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียของโรงงาน 517,542 บาท	Project Assumptions: 1. การได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารตามแผน 2. ทีมงานต้องเข้าร่วมการทดลองอย่างน้อย 1 วันต่อสัปดาห์และต้องเข้าร่วมสรุปสถานการณ์ปัจจุบันทุกวันศุกร์	
Objective Statement: เพื่อปรับปรุงการผลิตโดยลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นของโมเดล A จาก 4.14% ลง 70% ภายในเดือนธันวาคม 2565	Team Members: Executive leader Fujiwara Champion Nanasawa Black belt สุรศักดิ์, หริน Green belt กฤษณ์, กรรณกร (วิศวกรดูแลกระบวนการผลิต) นิตยา, ศตพร (วิศวกรควบคุมคุณภาพ) วีรชาติ (วิศวกรเครื่องจักร) คุณากร, น้ำฝน (ช่างเทคนิค) Process owner เพชรรัตน์, ปาลิดา (หัวหน้าฝ่ายผลิต)	
Project Metrics: Business Metric: ความพึงพอใจของลูกค้า Primary Metric: สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นของโมเดล A Secondary Metric: พื้นที่จัดเก็บผลิตภัณฑ์คัดทิ้ง Consequential Metric: ระยะเวลาในการผลิต Financial Metric: ต้นทุนผลิตภัณฑ์คัดทิ้ง	Project Timeline: ก.ค.64 ถึง มิ.ย.65	
Project Scope: 1. ศึกษาลักษณะเฉพาะและกระบวนการผลิตในโมเดล A เท่านั้น 2. ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เท่านั้น	Phase	Begin End
	Define	ก.ค.64 ก.ย.64
	Measure	ต.ค.64 ธ.ค.64
	Analysis	ม.ค.64 มี.ค.65
	Improve	เม.ย.65 มิ.ย.65
	Control	มิ.ย.65 ธ.ค.65

3.5. สรุประยะกำหนดปัญหา

ในระยะกำหนดปัญหา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสภาพปัญหา กระบวนการผลิตของโมเดล A ในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา รวมไปถึงข้อกำหนดของลูกค้า พบว่า สัดส่วนของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในโมเดล A เป็นหนึ่งในสัดส่วนของเสียหลักในกระบวนการผลิตที่มีมูลค่าวัตถุดิบมากที่สุด โดยมีสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องเฉลี่ยเท่ากับ 4.14% ของปริมาณการผลิต หรือมูลค่ากว่า 517,542 บาท จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการผลิตโดยลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นของโมเดล A จาก 4.14% ลง 70% ภายในเดือนธันวาคม 2565



บทที่ 4

ระยะวิเคราะห์ระบบการวัด

การวิเคราะห์ระบบการวัดเป็นขั้นตอนที่จะทำการประเมินความมั่นคงและความเที่ยงของระบบวัดว่าอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้หรือไม่ก่อนการนำมาใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่ได้มาจากระบวนการผลิตจริง โดยหากพบว่าระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอ ระบบการวัดที่นำมาใช้งานจะต้องถูกปรับปรุงก่อนเพื่อผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

4.1. ขั้นตอนและผลการวิเคราะห์ความมั่นคงและความเที่ยงของระบบการวัด (Attribute Agreement Analysis)

การตรวจสอบคุณภาพสำหรับโมเดล A ทางผู้วิจัยกำหนดให้เป็นไปตามกระบวนการในการผลิตจริงของโรงงานที่ใช้ระบบการวัดข้อมูลแบบจำแนก (Attribute data) โดยให้พนักงานตรวจสอบความสมบูรณ์ของโลหะบัดกรีบนชิ้นงานด้วยสายตาผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า และตัดสินใจว่าชิ้นงานดังกล่าวเป็น งานดี (Good, G) หรือ งานเสีย (No good, NG) ภายใต้ขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ผู้ทดสอบเป็นพนักงานตรวจสอบประจำ 3 คนจากสายการผลิตโมเดล A
2. ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีทั้งชิ้นงานที่เป็นงานดีและงานเสียรวม 56 ชิ้น แบ่งออกเป็นชิ้นงานดี 39 ชิ้น และชิ้นงานเสีย 17 ชิ้น คละตำแหน่ง ชิ้นงานเสียตามลักษณะข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จะถูกคัดเลือกและรวบรวมโดยฝ่ายผลิตจากกระบวนการผลิตจริง ทั้งนี้ชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดที่ถูกใช้ทดสอบจะต้องผ่านการตรวจสอบและยอมรับโดยฝ่ายวิศวกรคุณภาพก่อนนำมาทดสอบ
3. กำหนดแผนการทดสอบโดยให้พนักงานทำการตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 56 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นงานจะต้องถูกตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้งภายใต้การตรวจสอบตามลำดับแบบสุ่มอ้างอิงตามเกณฑ์ของ Fasser and Brettner (1992) และทำการการบันทึกผลการตรวจสอบ

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การกำหนดจำนวนชิ้นงานตรวจสอบขั้นต่ำของ Fasser and Brettner (1992)

จำนวนพนักงาน ตรวจสอบ	จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ต่ำ ที่สุด	จำนวนทดลองซ้ำที่ต่ำ ที่สุด
1	24	5
2	18	4
มากกว่าหรือเท่ากับ 3	12	3

4. นำผลการตรวจสอบมาทำการวิเคราะห์หาความสามารถของระบบการวัดด้วยโปรแกรม Minitab ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจจาก AIAG (4th edition, 2008) และ ข้อกำหนดของ ลูกค้า

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การประเมินประสิทธิผลของระบบ

ดัชนี	เกณฑ์การยอมรับ
% ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ (% appraiser score)	$\geq 80\%$
% ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ (% attribute score)	$\geq 80\%$
% ประสิทธิภาพด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการ ตรวจสอบ (% screen effective score)	$\geq 80\%$
% ประสิทธิภาพด้านไบอัสของการตรวจสอบ (% attribute screen effective score)	$\geq 80\%$
Kappa score	≥ 0.75
ดัชนีความมีประสิทธิภาพของพนักงานแต่ละคน (Effectiveness)	$\geq 95\%$
ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับอย่างผิดพลาด (Miss rate)	$\leq 0\%$
ดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธอย่างผิดพลาด (False alarm rate)	$\leq 5\%$

เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ระบบการวัดด้วยโปรแกรม Minitab ได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

- เปอร์เซ็นต์ความสามารถของการวัดซ้ำของพนักงานแต่ละคน ที่แสดงในผล Within Appraisers ดังรูปที่ 4.1

พนักงาน A เท่ากับ เท่ากับ 100%

พนักงาน B เท่ากับ 100%

พนักงาน C เท่ากับ 96.43%

จากผลการวิเคราะห์พบว่าพนักงานทั้งสามคนผ่านเกณฑ์การยอมรับ

Within Appraisers

Assessment Agreement

Appraiser #	Inspected #	Matched	Percent	95% CI
1	56	56	100.00	(94.79, 100.00)
2	56	56	100.00	(94.79, 100.00)
3	56	54	96.43	(87.69, 99.56)

Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.

Fleiss' Kappa Statistics

Appraiser	Response	Kappa	SE Kappa	Z	P(vs > 0)
1	G	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
	NG	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
2	G	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
	NG	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
3	G	0.94542	0.0771517	12.2540	0.0000
	NG	0.94542	0.0771517	12.2540	0.0000

รูปที่ 4.1 % ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ

- เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานแต่ละคน ที่แสดงในผล Each Appraisers vs Standard ดังรูปที่ 4.2

พนักงาน A เท่ากับ เท่ากับ 100%

พนักงาน B เท่ากับ 100%

พนักงาน C เท่ากับ 96.43%

จากผลการวิเคราะห์พบว่าพนักงานทั้งสามคนผ่านเกณฑ์การยอมรับ

Each Appraiser vs Standard

Assessment Agreement

Appraiser #	Inspected #	Matched	Percent	95% CI
1	56	56	100.00	(94.79, 100.00)
2	56	56	100.00	(94.79, 100.00)
3	56	54	96.43	(87.69, 99.56)

Matched: Appraiser's assessment across trials agrees with the known standard.

Assessment Disagreement

Appraiser #	NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent
1	0	0.00	0	0.00	0	0.00
2	0	0.00	0	0.00	0	0.00
3	0	0.00	0	0.00	2	3.57

NG / G: Assessments across trials = NG / standard = G.

G / NG: Assessments across trials = G / standard = NG.

Mixed: Assessments across trials are not identical.

Fleiss' Kappa Statistics

Appraiser	Response	Kappa	SE Kappa	Z	P(vs > 0)
1	G	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
	NG	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
2	G	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
	NG	1.00000	0.0771517	12.9615	0.0000
3	G	0.95886	0.0771517	12.4282	0.0000
	NG	0.95886	0.0771517	12.4282	0.0000

รูปที่ 4.2 % ความไม่ไว้อัสของพนักงานตรวจสอบ

- เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เท่ากับ 96.43% ที่แสดงในผล Between Appraisers ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ

Between Appraisers

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
56	54	96.43	(87.69, 99.56)

Matched: All appraisers' assessments agree with each other.

Fleiss' Kappa Statistics

Response	Kappa	SE Kappa	Z	P(vs > 0)
G	0.974469	0.0222718	43.7536	0.0000
NG	0.974469	0.0222718	43.7536	0.0000

รูปที่ 4.3 % ประสิทธิผลด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ

- เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลด้านไว้อัสของการตรวจสอบ เท่ากับ 96.43% ที่แสดงในผล All Appraisers vs Standard ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
56	54	96.43	(87.69, 99.56)

Matched: All appraisers' assessments agree with the known standard.

Fleiss' Kappa Statistics

Response	Kappa	SE Kappa	Z	P(vs > 0)
G	0.986286	0.0445435	22.1421	0.0000
NG	0.986286	0.0445435	22.1421	0.0000

รูปที่ 4.4 % ประสิทธิภาพด้านไอส์ของการตรวจสอบ

- ความแตกต่างในการตรวจสอบของพนักงานโดยอาศัยสัมประสิทธิ์ Kappa ที่อธิบายถึงระดับความสัมพันธ์ระหว่างกันของพนักงานและค่าการอ้างอิงมาตรฐาน (Reference) ที่ตรวจสอบได้ผลเหมือนกัน (Interrater agreement)
สัมประสิทธิ์ Kappa ของพนักงาน A เท่ากับ 1
สัมประสิทธิ์ Kappa ของพนักงาน B เท่ากับ 1
สัมประสิทธิ์ Kappa ของพนักงาน C เท่ากับ 0.96
จากผลการวิเคราะห์พบว่าพบว่าพนักงานทั้งสามคนผ่านเกณฑ์การยอมรับ
- ประเมินความสามารถของพนักงานแต่ละคนกับมาตรฐาน
ดัชนีความมีประสิทธิภาพของพนักงานแต่ละคน (Effectiveness)

$$\text{System Effectiveness} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ตัดสินใจถูกต้อง}}{\text{จำนวนครั้งที่ตรวจทั้งหมด}}$$

ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับอย่างผิดพลาด (Miss rate)

$$\text{Miss rate} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ตัดสินใจผิดโดยยอมรับงานเสียว่าเป็นงานดี}}{\text{จำนวนครั้งที่ตรวจทั้งหมด}}$$

ดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธอย่างผิดพลาด (False alarm rate)

$$\text{False alarm rate} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ตัดสินใจผิดโดยปฏิเสธงานดีว่าเป็นงานเสีย}}{\text{จำนวนครั้งที่ตรวจทั้งหมด}}$$

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.4 พบว่าพนักงานทั้งสามคนผ่านเกณฑ์การยอมรับ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์จากดัชนีชี้วัดระบบ

ดัชนี	คะแนนประสิทธิผล		
	พนักงาน A	พนักงาน B	พนักงาน C
Effectiveness	$\frac{168}{56 \times 3} \times 100 = 100\%$	$\frac{168}{56 \times 3} \times 100 = 100\%$	$\frac{165}{56 \times 3} \times 100 = 98.21\%$
Miss rate	$\frac{0}{56 \times 3} \times 100 = 0\%$	$\frac{0}{56 \times 3} \times 100 = 0\%$	$\frac{0}{56 \times 3} \times 100 = 0\%$
False alarm rate	$\frac{0}{56 \times 3} \times 100 = 0\%$	$\frac{0}{56 \times 3} \times 100 = 0\%$	$\frac{3}{56 \times 3} \times 100 = 1.79\%$

จึงสามารถสรุปได้ว่าพนักงานตรวจสอบประจำทั้งสามคนมีผลการประเมินคุณภาพการตรวจสอบข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ด้วยข้อมูลแบบจำนวนนับในโมเดล A ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากเกณฑ์การตัดสินใจ AIAG (4th edition, 2008) และ ข้อกำหนดของลูกค้า โดยพบว่าพนักงาน A และ B มีความสามารถในการตรวจสอบดีเยี่ยม แสดงว่าระบบการวัดมีความเชื่อถือได้และไม่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องดังกล่าว

4.2. การคำนวณขนาดตัวอย่างเพื่อใช้วัดสภาพปัญหา

จากข้อมูลสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ตึกและโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ทองในช่วง 10 เดือนของปี 2563 ซึ่งเท่ากับ 4.14% ของปริมาณการผลิตโมเดล A หรือกว่า 517,542 บาท สามารถนำสัดส่วนของเสียดังกล่าวมาคำนวณหาขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อใช้วัดสภาพปัญหาในสถานการณ์เดียวกับการผลิตจริงได้อย่างน่าเชื่อถือโดยใช้สมการ

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 pq}{e^2} = \frac{(1.96)^2 (0.0414)(1-0.0414)}{0.005^2} = 6,098.32 \approx 6,099 \text{ ชิ้น}$$

ขณะที่ n คือ ขนาดตัวอย่าง

$Z_{\alpha/2}$ คือ ค่าปกติมาตรฐานที่สอดคล้องกับระดับความเชื่อมั่น

p คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

q คือ 1 - สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

e คือ ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของค่าที่ประมาณได้จากค่าจริง

ผลลัพธ์จากการคำนวณโดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และความผิดพลาดที่ยอมรับได้ที่ 0.005 พบว่าขนาดตัวอย่างที่ต้องการเป็นอย่างน้อย เท่ากับ 6,099 ขึ้น ซึ่งข้อมูลปริมาณการผลิต โมเดล A จาก 10 เดือนในปี 2563 ที่มีทางผู้วิจัยมีอยู่เท่ากับ 276,404 ขึ้น จึงเพียงพอต่อการใช้วัดสภาพปัญหา

4.3. สรุประยะวิเคราะห์ระบบการวัด

จากการวิเคราะห์ระบบการวัด ณ กระบวนการ Final inspection โดยใช้พนักงานทดสอบ เป็นพนักงานตรวจสอบประจำของโมเดล A 3 คน ผ่านการแผนการตรวจสอบที่กำหนด พบว่าระบบการวัดในปัจจุบันโดยพนักงานประจำสามารถเชื่อถือได้ เนื่องจากผลเปอร์เซ็นต์ความสามารถของการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงานตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพด้านความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพด้านไบอัสของการตรวจสอบ คะแนน Kappa รวมไปถึงดัชนีความมีประสิทธิภาพของพนักงานแต่ละคน ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับอย่างผิดพลาด และดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธอย่างผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด ทั้งนี้ เมื่อกำหนดขนาดตัวอย่างเพื่อใช้วัดสภาพปัญหา พบว่าต้องเก็บขนาดตัวอย่างอย่างน้อย 6,099 ขึ้นจึงจะเหมาะสมในการเป็นตัวแทนของกลุ่มประชากร

บทที่ 5

ระยะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ระยะนี้จะค้นหาปัจจัยเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตที่สามารถก่อให้เกิดปัญหา (Potential cause) เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และกำจัดปัจจัยรากที่แท้จริง (Root cause) โดยงานวิจัยได้ระดมทีมผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์หาปัจจัยเบื้องต้นด้วยแผนผังก้างปลา (Fish Bone) ก่อนการนำไปวิเคราะห์ลำดับความสำคัญด้วยเกณฑ์การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects analysis, FMEA) สำหรับการเลือกปัจจัยที่ควรได้รับการปรับปรุงเป็นสำคัญจะพิจารณาจากเกณฑ์การให้คะแนนตามข้อกำหนด AIAG โดยเลือกปัจจัยที่นำมาปรับปรุงด้วยคะแนน RPN (Severity x Occurrence x Detection) > 100 จากข้อกำหนด AIAG (4th edition, 2008)

5.1. กระบวนการผลิตและปัจจัยเบื้องต้นที่สามารถก่อให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

จากความเป็นไปได้ในการประเมินกระบวนการที่เกี่ยวข้อง สามารถแจกแจงปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของแต่ละกระบวนการได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Oven dry

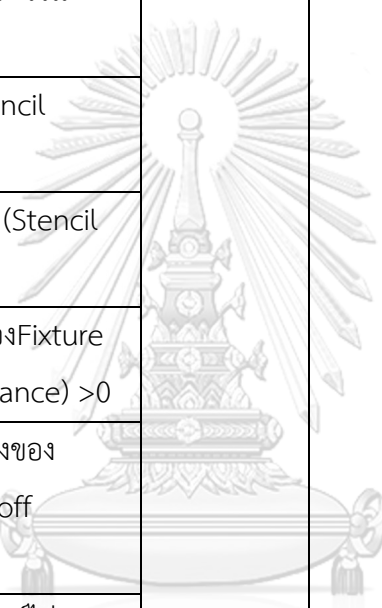
Input	Process	Output
ความชื้นบน FPC มีมากเกินไป	Oven dry	FPC ที่มีความชื้นทำให้ cover material แยกชั้นหลังกระบวนการบัดกรี ปริมาณโลหะบัดกรีจะสูญเสียจากการไหลออกนอกพื้นที่เข้าไปยังช่องว่างใต้ cover material ทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (Baking temperature)		
หากน้อยเกินไปทำให้ยังเหลือความชื้นใน FPC		
เวลาที่ใช้ในการอบ (Baking time) ที่น้อยเกินไปทำให้ยังเหลือความชื้นใน FPC		

ตารางที่ 5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ FPC set

Input	Process	Output
รูโหลต FPC (FPC guide hole) เยื้อง ทำให้แผ่นวงจรถูกจัดวางเยื้อง	FPC set	FPC ถูกวางลงบน Fixture เยื้องออกจากตำแหน่ง ที่ออกแบบไว้ ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการ Solder print โลหะบัดกรี จะถูกพิมพ์บางส่วนลงบนพื้นที่เปิดและบางส่วนลงบน Cover material ซึ่งทำให้ปริมาณและตำแหน่งโลหะบัดกรีไม่เป็นไปตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้และเกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังกระบวนการ Reflow
การออกแบบ Fixture ไม่รองรับต่อลักษณะของชิ้นงานทำให้แผ่นวงจรไม่ถูกวางในแนวระนาบ		
วิธีการติด Glass cloth ไม่เหมาะสม ทำให้แผ่นวงจรขยับได้		
ทักษะของผู้ปฏิบัติงานไม่เพียงพอ การติดไม่เป็นไปตามข้อปฏิบัติทำให้แผ่นวงจรขยับได้		

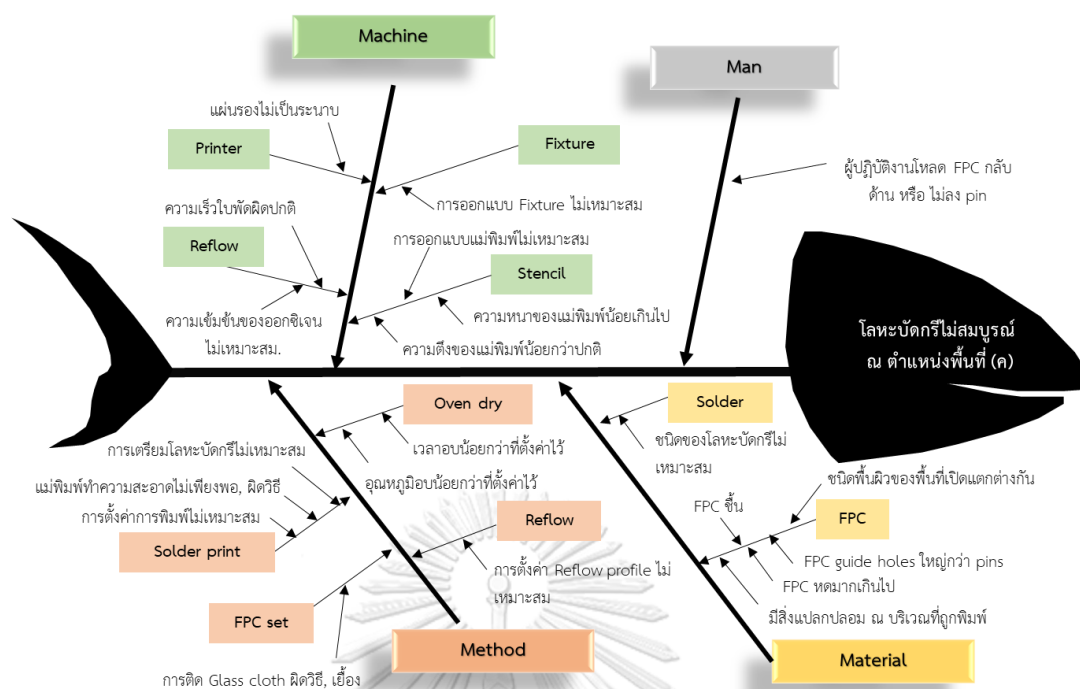
ตารางที่ 5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Solder print

Input	Process	Output
การหัดตัวของ FPC ทำให้ตำแหน่งพื้นที่เปิดเยื้องออกจากตำแหน่งที่ออกแบบแม่พิมพ์ไว้	Solder print	โลหะบัดกรีถูกขัดขวางการพิมพ์ลงตามปริมาณและตำแหน่งที่ออกแบบไว้บนพื้นที่เปิดบน FPC จากปัจจัยต่าง ๆ ทำให้ปริมาณของโลหะบัดกรีน้อยลงและไม่คลุมเต็มพื้นที่ในที่สุด หรือการพิมพ์เยื้องลงบนตำแหน่งฝั่งใดฝั่งหนึ่งทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ตำแหน่งพื้นอีกฝั่ง
ความสะอาดของ FPC (Cleanliness) ไม่เพียงพอ คือมีสิ่งแปลกปลอมบนผิวพิมพ์		
ชนิดของโลหะบัดกรี สำหรับโมเดล A คือประเภทไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) ซึ่งมีคุณสมบัติการไหลต่ำกว่าประเภทมีตะกั่ว		
การเตรียมโลหะบัดกรีที่ไม่เหมาะสม ทำให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมากกว่าปกติเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการจัดเก็บในอุณหภูมิต่ำ		
ความเร็วของใบปาด (Squeegee		

Input	Process	Output
speed) ที่มากเกินไป		
ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ (Squeegee pressure) ที่น้อยเกินไป		
องศาของใบปาด (Squeegee angle) $<60^\circ$		
การออกแบบแม่พิมพ์ (Stencil design) ไม่เหมาะสมกับปริมาณโลหะบัดกรีที่พื้นที่เปิด		
ความหนาของแม่พิมพ์ (Stencil thickness) น้อยเกินไป		
ค่าความเครียดของแม่พิมพ์ (Stencil tension) น้อยผิดปกติ		
ระยะทางในการแยกออกของFixture กับแม่พิมพ์ (Snap off distance) >0		
ความเร็วในการแยกออกของของ Fixtureกับแม่พิมพ์ (Snap off speed) เร็วเกินไป		
วิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม ทำให้มีโลหะบัดกรีหรือสิ่งแปลกปลอมค้างอยู่ภายในช่องว่างของแม่พิมพ์ (Clogging)		
ความเป็นระนาบของแผ่นรองในเครื่องจักร (Base support plane) ผิดปกติ		
การออกแบบและชนิดพื้นที่เปิดของผลิตภัณฑ์ (Pads design) ที่แตกต่างกัน คือ ทำให้มีความคุณสมบัติการนำความร้อนที่แตกต่างกัน		

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตและผลลัพธ์ที่ต้องการได้รับของกระบวนการ Reflow

Input	Process	Output
การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม คือการตั้ง Soak time, Peak temperature และ Reflow time ออกนอกเหนือจากคำแนะนำที่เหมาะสมของโลหะบัดกรี หรืออาจรวมไปถึงการใช้เวลาในขั้นตอนการหลอมเหลวในกระบวนการบัดกรีมากเกินไป	Reflow	เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำให้ผงโลหะและโลหะผสมหลอมเหลวจนสามารถไหลเชื่อมประสานไปตามผิวของพื้นที่เปิดได้ ทำให้โลหะบัดกรีกระจายตัวไปยังพื้นผิวชนิดที่มีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดีกว่าอย่างทองทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ตำแหน่งพื้นที่ดีบุก
ความเข้มข้นของ Oxygen ที่ไม่เหมาะสม หากมากเกินไป ทำให้เกิด Oxide บนผิวของพื้นที่เปิดมากกว่าปกติ		หรือการที่ oxide บนผิวของพื้นที่เปิดที่มากเกินไปทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยลง ทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะไม่สมบูรณ์ในพื้นที่ที่มีคุณสมบัตินำความร้อนที่น้อยกว่าอยู่แล้วอย่างดีบุก
ความเร็วของใบพัด (Blower speed) ที่น้อยเกินไป ทำให้การเย็นตัวช้ากว่าปกติ หรือหมายถึงการให้เวลาที่มากขึ้นในสถานะหลอมเหลวของโลหะบัดกรี		



รูปที่ 5.1 แผนผังก้างปลาแสดงการเบี่ยงเบนของปัจจัยที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

5.2. วิเคราะห์ลำดับความสำคัญด้วยเกณฑ์การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure mode and effects analysis, FMEA)

จากแผนผังก้างปลารูปที่ 5.1 ข้างต้น สาเหตุและปัจจัยทั้งหมดได้ถูกทีมงานให้ความคิดเห็นมาว่าเป็นปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ในการทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีมาสมบูรณ์ ทีมงานจะต้องมาวิเคราะห์ต่อว่าปัจจัยที่แสดงความคิดเห็นมานั้นส่งผลกระทบต่อ การเกิดข้อบกพร่องจริงหรือไม่และมีน้ำหนักความสำคัญอันดับไหนด้วยวิธี FMEA หรือ Failure mode and effect analysis โดยการให้คะแนนแบบ 3 ส่วน คือ Severity หรือความร้ายแรงของความผิดปกติ, Occurrence หรืออัตราการพบความผิดปกติ และ Detection หรือการมีขั้นตอนการตรวจสอบหรือป้องกันความผิดปกติดังกล่าว ทั้งนี้เกณฑ์การให้คะแนนโรงงานได้ประยุกต์มาจากข้อกำหนด AIAG (4th edition, 2008) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Severity หรือความร้ายแรงของความปลอดภัย
ที่มา : เกณฑ์การประเมินของโรงงานการณีสึกษาโดยอ้างอิงจาก ข้อกำหนด AIAG (4th edition, 2008)

Effect	Criteria : Severity of effect on product (customer effect)	Rank	Effect	Criteria : Severity of effect on process
Failure to meet safety and/ or regulatory requirements	Potential failure mode affects safe vehicle operation and/ or involves noncompliance with government regulation <u>without</u> warning	10	Failure to meet safety and/ or regulatory requirements	May endanger operator (machine or assembly) <u>without</u> warning
Loss or degradation of primary function	Potential failure mode affects safe vehicle operation and/ or involves noncompliance with government regulation <u>with</u> warning	9	Major disruption	May endanger operator (machine or assembly) <u>with</u> warning
	<u>Loss</u> of primary function (vehicle <u>inoperable</u> , <u>does not affect safe vehicle</u> operation)	8		100% of product may have to be scrapped. Line shutdown or stop ship
	<u>Degradation</u> of primary function (vehicle <u>operable</u> , <u>but at reduced level</u> of performance)	7	Significant disruption	A portion of the production run may have to be scrapped. Deviation from primary process including decreased line speed or
Loss or degradation of secondary function	<u>Loss</u> of secondary function (vehicle <u>operable</u> , <u>but comfort/ convenience functions inoperable</u>)	6		100% of production run may have to be reworked off line and accepted.
	<u>Degradation</u> of secondary function (vehicle <u>operable</u> , <u>but comfort/ convenience functions at reduced level</u> of performance)	5	Moderate disruption	A portion of the production run may have to be reworked off line and accepted.
Annoyance	Appearance or Audible Noise, vehicle operable, item does not conform and noticed by <u>most customers</u> (> 75%)	4		100% of production run may have to be reworked in station before it is accepted.
	Appearance or Audible Noise, vehicle operable, item does not conform and noticed by <u>many customers</u> (> 50%)	3		A portion of the production run may have to be reworked in-station before it is processed
	Appearance or Audible Noise, vehicle operable, item does not conform and noticed by <u>discriminating customers</u> (> 25%)	2	Minor disruption	Slight inconvenience to process, operation, or operator
No effect	No discernible effect	1	No effect	No discernible effect

การประเมินคะแนนในหมวด Severity หรือความร้ายแรงของความปลอดภัยนั้นสามารถประเมินด้วยความร้ายแรงของผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์หรือลูกค้าและความร้ายแรงของผลกระทบต่อการกระบวนการ หากทราบเพียงอย่างเดียวหนึ่งให้สิ่งนั้นในการให้คะแนนตามเกณฑ์ โดยหากทราบความร้ายแรงของผลกระทบทั้งสองด้านและพบว่าคะแนนที่ได้มีความแตกต่างกัน ให้เลือกใช้คะแนนที่มากกว่าในการใช้คำนวณต่อไปเนื่องจากการประเมินความร้ายแรงของผลกระทบทั้งสองใช้สมมติฐานจากการณีสึกษาที่ดีที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (ในหมวด Severity คะแนนมากขึ้น หมายถึงความร้ายแรงของผลกระทบที่มากขึ้น)

ตารางที่ 5.6 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Occurrence หรืออัตราการพบความผิดปกติ
ที่มา : เกณฑ์การประเมินของโรงงานกรณีศึกษาโดยอ้างอิงจาก ข้อกำหนด AIAG (4th edition, 2008)

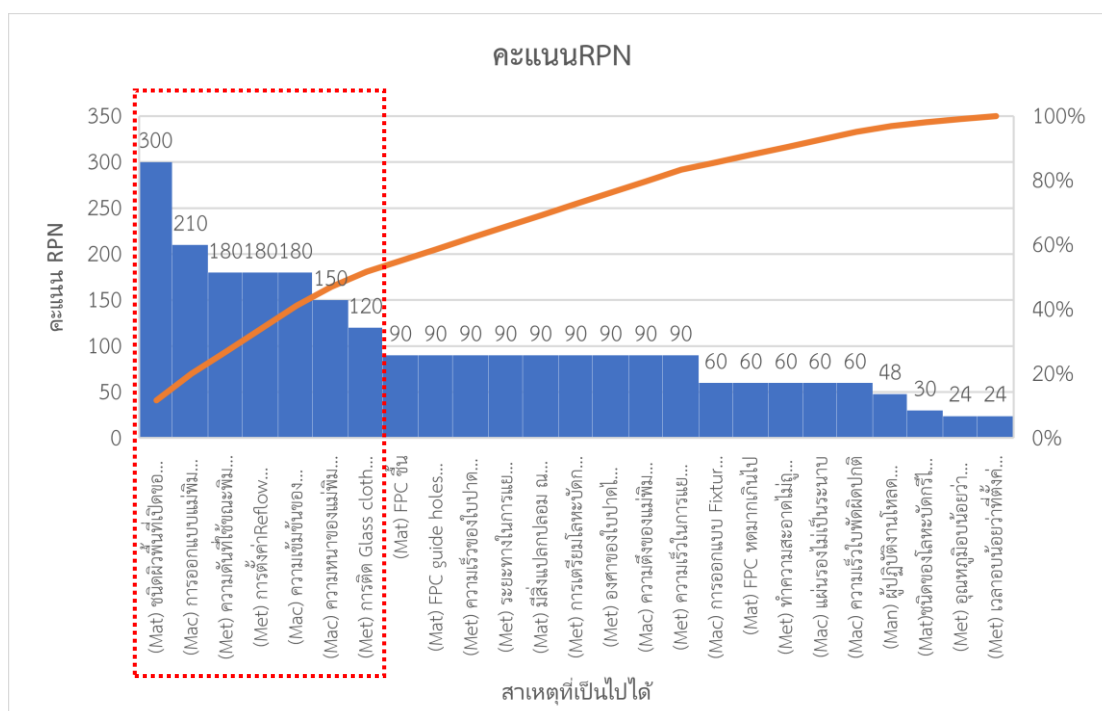
Likelihood of failure	Criteria : Occurrence of cause PFMEA (Incidents per items/ vehicles)	Rank
Very high	≥ 100 per thousand ≥ 1 in 10	10
High	50 per thousand 1 in 20	9
	10 per thousand 1 in 50	8
	10 per thousand 1 in 100	7
Moderate	2 per thousand 1 in 500	6
	0.5 per thousand 1 in 2,000	5
	0.1 per thousand 1 in 10,000	4
Low	0.01 per thousand 1 in 100,000	3
	< 0.001 per thousand 1 in 1,000,000	2
Very low	Failure is eliminated through prevention control	1

ตารางที่ 5.7 เกณฑ์การให้คะแนนในหมวด Detection หรือการมีขั้นตอนการตรวจสอบหรือป้องกันความผิดปกติ
ที่มา : เกณฑ์การประเมินของโรงงานกรณีศึกษาโดยอ้างอิงจาก ข้อกำหนด AIAG (4th edition, 2008)

Opportunity for Detection	Criteria : Likelihood of detection by design control	Rank	Likelihood of detection
No detection opportunity	No current design control, cannot detect or is not analyzed	10	Almost impossible
Not likely to detect at any stage	Failure mode and/ or error (cause) is not easily detected (e.g. random audits)	9	Very remote
Problem detection post processing	Failure mode detection post-processing by operator through visual/tactile/audible means	8	Remote
Problem detection at source	Failure mode detection in-station by operator through visual/tactile/audible means or post-processing through use of attribute gauging (go/no-go, manual torque check/clicker wrench)	7	Very low
Problem detection post processing	Failure mode detection post-processing by operator through use of variable gauging or in-station by operator through use attribute gauging (go/no-go, manual torque check/clicker wrench, etc.)	6	Low
Problem detection at source	Failure mode or error (cause) detection in-station by operator through use of variable gauging or by automated controls in-station that will detect discrepant part and notify operator (light, buzzer, etc) Gauging performed on setup and first-piece check (for set-up causes only)	5	Moderate
Problem detection post processing	Failure mode detection post-processing by automated controls that will detect discrepant part and lock part to prevent further processing	4	Moderately high
Problem detection at source	Failure mode detection in-station by automated controls that will detect discrepant part and automatically lock part in station to prevent further processing	3	High
Error detection and/ or problem prevention	Error (cause) detection in-station by automated controls that will detect error and prevent discrepant part from being made	2	Very high
Detection not applicable Error prevention	Error (cause) prevention as a result of fixture design, machine design or part design. Discrepant parts cannot be made because item has been error-proofed by process/product design	1	Almost certain

ตารางที่ 5.8 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

Process Step	Requirement	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	S E V	Potential Causes	O C C	Current Controls	D E T	R P N
Oven Dry	FPC ที่ไม่มีความชื้น	FPC ยังแห้งไม่เพียงพอ	ผลผลิตต่ำจากปัญหาโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังกระบวนการ Reflow	6	(Met) อุณหภูมิอบน้อยกว่าที่ตั้งค่าไว้	2	การล็อกโปรแกรม และตั้งค่าให้เครื่องจักรร้องเตือนอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิผิดปกติ	2	24
				6	(Met) เวลาอบน้อยกว่าที่ตั้งค่าไว้	2	การล็อกโปรแกรม และตั้งค่าให้เครื่องจักรร้องเตือนอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิผิดปกติ	2	24
				6	(Mat) FPC ชื้น	3	ตรวจสอบด้วย Expired time บน Run card	5	90
FPC set	FPC ถูกวางลงบน Fixture ได้ตรงตำแหน่ง (ไม่เอียง)	FPC เอียง	ส่งผลกระทบต่อกระบวนการถัดไป	6	(Mac) การออกแบบ Fixture ไม่เหมาะสม	2	การทำ Tooling buy-off ก่อนการผลิต	5	60
				6	(Mat) FPC guide holes ใหญ่กว่า pin โหลด	3	การทำ Tooling buy-off ก่อนการผลิต	5	90
				6	(Man) ผู้ปฏิบัติงานโหลด FPC กลับด้าน หรือ ไม่ล็อก pin	8	Pokayoke	1	48
				6	(Met) การติด Glass cloth ผิดวิธี, เอียง	4	การตรวจสอบความเรียบร้อยด้วยตาเปล่า	5	120
Solder print	โลหะบัดกรีถูกพิมพ์ลงบน FPC อย่างสมบูรณ์ คือ พิมพ์ได้ความสูงและปริมาณตามการออกแบบแม่พิมพ์ โดยการพิมพ์นั้นจะต้องไม่เอียงหรือไหลออกจากบริเวณที่กำหนด	โลหะบัดกรีไม่พิมพ์, พิมพ์น้อยเกินไปหรือเอียงออกจากพื้นที่เปิด	ผลผลิตต่ำเนื่องจากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า	6	(Met) ความเร็วของใบปาด ไม่เหมาะสม	3	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	90
				6	(Met) ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ ไม่เหมาะสม	6	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	180
				6	(Mac) การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม	7	การทำ Tooling buy-off ก่อนการผลิต	5	210
				6	(Mat) ชนิดผิวพื้นที่เปิดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน	10	100% inspection	5	300
				6	(Met) ระยะทางในการแยกออกของใบปาดไม่เหมาะสม	3	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	90
				6	(Mat) FPC ทดมากเกินไป	2	100% inspection	5	60
				6	(Mat) มีสิ่งแปลกปลอม ณ บริเวณถูกพิมพ์	3	การตรวจสอบความเรียบร้อยด้วยตาเปล่า	5	90
				6	(Mat) ชนิดของโลหะบัดกรีไม่เหมาะสม	1	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	30
				6	(Met) การเตรียมโลหะบัดกรีไม่เหมาะสม	3	ตรวจสอบด้วย Expired time บน Run card	5	90
				6	(Met) องศาของใบปาดไม่เหมาะสม	3	กำหนดองศาที่ 60° เท่านั้น	5	90
				6	(Mac) ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป	5	การทำ Tooling buy-off ก่อนการผลิต	5	150
				6	(Mac) ความดันของแม่พิมพ์น้อยกว่าปกติ	3	ทำการวัดก่อนการผลิต	5	90
				6	(Met) ความเร็วในการแยกออกของใบปาดไม่เหมาะสม	3	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	90
				6	(Met) ทำความสะอาดไม่ถูกวิธี	2	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	60
				6	(Mac) แผ่นรองไม่เป็นระบบ	2	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet และการทำ first fixture confirmation	5	60
Reflow	โลหะบัดกรีสุกโดยสมบูรณ์ คือ โลหะบัดกรีเป็นเงาวาว, ไม่เป็นรู, ไม่แตก, ขึ้นรูปปกติ และคลุมเต็มพื้นที่เปิด	ข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ (ไม่คลุมเต็มพื้นที่เปิด)	ผลผลิตต่ำเนื่องจากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า	6	(Met) การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม	6	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet, วัด Reflow profile ก่อนการผลิต และการทำ first fixture confirmation	5	180
				6	(Mac) ความเร็วในพัดลมผิดปกติ	2	ตรวจสอบด้วย Daily check sheet	5	60
				6	(Mac) ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม	6	เครื่องจักรร้องเตือนอัตโนมัติ	5	180



รูปที่ 5.2 การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยตามค่า RPN

และจากการประเมินจะได้ว่ามี 7 ปัจจัยที่ควรได้รับการศึกษาและปรับปรุงจากเกณฑ์การให้คะแนนตามข้อกำหนด AIAG โดยการจัดลำดับความสำคัญด้วยคะแนน RPN ($\text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$) > 100 เนื่องจากผลิตภัณฑ์โมเดล A ไม่มีข้อกำหนดเรื่อง Special characteristic points และไม่มีปัจจัยใดส่งผลร้ายแรงด้วยคะแนน 9-10 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อโดยแสดงตามลำดับค่า RPN จากมากไปน้อยได้แก่

- (Material) ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน (พื้นผิวดิบและพื้นผิวทอง)
- (Machine) การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม
- (Method) ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ ไม่เหมาะสม
- (Method) การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม
- (Machine) ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม
- (Machine) ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป
- (Method) การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง

จากปัจจัยข้างต้นสามารถจัดกลุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเดียวกัน ก่อนนำไปจัดลำดับเพื่อทำการปรับปรุงตามลำดับของกระบวนการผลิตได้ดังนี้

1. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผลิตภัณฑ์โมเดล A ได้แก่

- ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน (ปัจจัยที่ 1)

เนื่องจากชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ได้ อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใดๆของผลิตภัณฑ์ไม่ถูกอนุมัติโดยลูกค้า จึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อทราบแนวโน้มของการกระจายตัวบนพื้นผิวที่ส่งผลต่อการไหลขณะหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบรูปร่างรูเปิดและตำแหน่งพิมพ์ต่อไป โดยตำแหน่งพิมพ์ควรจะขยับเข้าหาพื้นที่ที่มีความสามารถด้านการกระจายตัวของโลหะบัดกรีน้อยกว่า จากสมมติฐานตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าความสามารถด้านการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวดึงทองจะดีกว่าบนพื้นผิวดึงบุกซึ่งเป็นพื้นผิวชนิดเดียวกับโมเดลในการณศึกษา งานวิจัยจึงวางแผนที่จะศึกษาความสามารถด้านการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวดึงบุกและทองของโมเดล A โดยการนำโลหะบัดกรีจากกระป๋องเดียวกันหยดลงบนพื้นผิวทั้งสองด้านปริมาณและเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นเท่ากัน ก่อนการนำตัวอย่างการทดลองไปผ่านกระบวนการบัดกรีเพื่อเฝ้าสังเกตผลการกระจายตัว

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดวางแผ่นวงจร (FPC set) ได้แก่

- การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง (ปัจจัยที่ 2)

เนื่องจากการติด Glass cloth ผิดวิธีในกระบวนการ FPC set สามารถทำให้เกิดการเยื้องของแผ่นวงจรหรือแผ่นวงจรขยับขณะเข้ากระบวนการพิมพ์ซึ่งเป็นกระบวนการถัดไป โดยเมื่อแผ่นวงจรเยื้องออกจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้โลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์จะเยื้องออกจากพื้นที่เปิด ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังกระบวนการบัดกรี จากการสอบความเข้าใจและปฏิบัติได้ตามวิธีการทำงานในปัจจุบันของพนักงานประจำกระบวนการ FPC set รวมถึงการรับฟังผลตอบรับของวิธีการทำงานในปัจจุบัน จึงมีแผนที่จะกำหนดเกณฑ์การอบรมใหม่ อาทิ พนักงานที่ผ่านการอบรมและการสอบแล้วเท่านั้นจึงจะสามารถเข้ามาผลิตงานได้ หรือ พนักงานควรจะถูกรับเข้าอบรมใหม่เพื่อทวนความเข้าใจทุกๆ 6 เดือน – 1 ปี ตามระบบ

3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder print) ได้แก่

- การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม (ปัจจัยที่ 3)

เนื่องจากผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากกระบวนการพิมพ์ คือ โลหะบัดกรีที่พิมพ์ลงพื้นที่เปิดได้ตรงตำแหน่งที่ต้องการและเป็นไปตามปริมาณที่ออกแบบไว้ ดังนั้นถ้าแม่พิมพ์ไม่มีความสามารถที่ทำให้การพิมพ์ได้มาซึ่งปริมาณที่เพียงพอต่อการคลุมพื้นที่เปิดหรือพิมพ์เยื้องออกจากตำแหน่งที่ออกแบบ จะเกิดของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังผ่านกระบวนการบัดกรี ทั้งนี้การวางแผนจะใช้ผลการทดลองจากปัจจัยที่ 1 หรือ ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกันในการออกแบบตำแหน่งพิมพ์ คือควรขยับออกจากพื้นผิวที่มีความสามารถในการกระจายตัวได้ดี โดยไม่สามารถเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบในการสร้างแม่พิมพ์ได้เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องวัตถุดิบบังคับใช้ของโรงงาน ทั้งนี้แม่พิมพ์ที่ถูกใช้ทดลองจะต้องถูกควบคุมแรงเครียดของผิวแม่พิมพ์ภายใต้ช่วงค่าที่กำหนด

- ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป (ปัจจัยที่ 4)

เมื่อได้การติด Glass cloth ที่ถูกวิธีและแม่พิมพ์ที่เหมาะสมแล้ว จึงจะศึกษาความหนาที่เพิ่มขึ้นตามสมมติฐานข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หรือไม่คลุมเต็มพื้นที่เนื่องจากปริมาณโลหะบัดกรีไม่เพียงพอ โดยแม่พิมพ์ที่มีความหนามากกว่าจะพิมพ์โลหะบัดกรีได้ปริมาณมากกว่าแม่พิมพ์ที่มีความหนาน้อย ดังนั้นจึงวางแผนที่จะศึกษาการเพิ่มความหนาของแม่พิมพ์ขึ้นอีกหนึ่งระดับตามวัตถุดิบที่มีให้เลือกใช้ในการสร้างอย่างจำกัดของโรงงาน ทั้งนี้ต้องมีการสังเกตการณ์ข้อบกพร่องตรงกันข้ามที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อปริมาณโลหะบัดกรีมักเกินไป อาทิ การเชื่อมระหว่างสองพื้นที่, เม็ดโลหะบัดกรี เป็นต้น

หลังจากปรับปรุงปัจจัยที่ทำให้เกิดการเยื้องของแผ่นวงจรจากปัจจัยที่ 2 ในกระบวนการ FPC set และปัจจัยที่ทำให้โลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ไม่ตรงตามตำแหน่งและได้ปริมาณที่ออกแบบแล้วจากปัจจัย 3-4 ในกระบวนการ Solder print แล้ว มีความเป็นไปได้ที่ยังพบสัดส่วนของเสียเนื่องจากปัจจัยที่ 5-7 ก่อนหน้าไม่ได้ครอบคลุมถึงความแปรปรวนของวัตถุดิบ คือ แผ่นวงจรยืด-หด และ ความหนืดของโลหะบัดกรี แม้ว่าทั้งสองวัตถุดิบนี้ได้ถูกตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงที่กำหนดก่อนปล่อยเข้ากระบวนการผลิตแต่ในกรณีที่หากความแปรปรวนที่เกิดขึ้นและพารามิเตอร์ของการพิมพ์หรือการบัดกรีมีปฏิสัมพันธ์กันแล้วนั้น ข้อบกพร่องอาจเกิดขึ้นได้ เช่น เมื่อแผ่นวงจรมีการหดในทิศทาง

เดียวกับการไหลเข้าสู่กระบวนการทำให้ตำแหน่งพื้นที่เปิดขยับออกจากตำแหน่งออกแบบ ผนวกกับ ความหนืดของโลหะบัดกรีน้อยเข้าใกล้ขอบเขตล่าง เมื่อผ่านกระบวนการพิมพ์ โลหะบัดกรีจะถูกพิมพ์ ขยับออกจากตำแหน่งตั้งต้นและมีรูปร่างแตกต่างจากที่ต้องการตามการออกแบบรูเปิดโดยทำให้ได้ ปริมาณที่มากกว่าปกติ จากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการบัดกรีด้วยพารามิเตอร์การบัดกรีก่ากลางจะทำให้ เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ได้เนื่องจากเมื่อโลหะบัดกรีเหลวกว่าปกติ หมายถึง ความสามารถในการไหลของตัวโลหะบัดกรีเองจะมีมากกว่าปกติผนวกกับการเยื้องของตำแหน่งโลหะ บัดกรีหลังพิมพ์และความสามารถในการกระจายตัวที่ติดบนพื้นผิวทองจึงต้องการการปาดที่เร็วขึ้นและ ความดันขณะปาดที่น้อยลงในกระบวนการพิมพ์เพื่อลดปริมาณของโลหะบัดกรี และอาจต้องการ อุณหภูมิที่ต่ำลงหรือเวลาในกระบวนการที่น้อยลงเพื่อลดการไหลของโลหะบัดกรีไปยังพื้นที่ที่โลหะ บัดกรีกระจายตัวได้ดีกว่าขณะอยู่ในช่วงหลอมเหลว เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยจำเป็นต้องศึกษาและ ปรับปรุงเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในกระบวนการพิมพ์และกระบวนการบัดกรีที่รองรับกับ ความแปรปรวนของวัตถุดิบที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เพราะเป็นส่วนนอกเหนือจากความรับผิดชอบ ของโรงงาน (ผู้ขาย)

- ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ ไม่เหมาะสม (ปัจจัยที่ 5)

จากผลลัพธ์ที่ต้องการของกระบวนการคือโลหะบัดกรีที่พิมพ์ลงพื้นที่เปิดได้ตรงตำแหน่งที่ ต้องการและเป็นไปตามปริมาณที่ออกแบบไว้ โดยจากสมมติฐานในทฤษฎีของกระบวนการ Solder print ในปัจจัยความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ พบว่าปริมาณโลหะบัดกรีแปรผันตรงตาม ความดันที่ใช้ขณะปาด ดังนั้นหลังการปรับปรุงแม่พิมพ์ทีมงานต้องการลดสัดส่วนของเสียใน อีกระดับและรองรับความแปรปรวนของวัตถุดิบในกระบวนการพิมพ์ จึงวางแผนศึกษาการ ส่งผลของความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ต่อสัดส่วนของเสีย เพื่อให้ได้ค่าความดันที่เหมาะสมที่ทำให้ โลหะบัดกรีตามผลลัพธ์ที่ต้องการในกระบวนการพิมพ์ก่อนเข้าสู่กระบวนการบัดกรี

4. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบัดกรี (Reflow) ได้แก่

- การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม (ปัจจัยที่ 6)
- ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม (ปัจจัยที่ 7)

กระบวนการบัดกรีเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีและสามารถเกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ได้ โดยผลลัพธ์ที่ต้องการในกระบวนการนี้ คือ การขึ้นรูปของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีที่ถูกต้อง (Solder wettability) หมายถึง โลหะบัดกรีหลอมเหลวโดยสมบูรณ์ก่อนขึ้นรูปคลุมเต็มพื้นที่ จากการศึกษาพบว่าการชนิดพื้นผิวที่แตกต่างกันทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นแตกต่างกัน ทำให้ช่วงพารามิเตอร์ของกระบวนการบัดกรีควรคำนึงถึงการชะลอการกระจายตัวในขณะที่ยังสามารถหลอมเหลวก่อนจะขึ้นรูปได้อย่างปกติหลังกระบวนการ รวมไปถึงความเข้มข้นของออกซิเจนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกไซด์กับฟลักซ์ (ส่วนประกอบในโลหะบัดกรี) ทำให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวได้ดีกว่าเดิม ดังนั้นงานวิจัยจึงวางแผนการทดลองโดยใช้ขอบเขตของค่าตั้งแนะนำตามชนิดของโลหะบัดกรีในการทดสอบผลของปัจจัยว่ามียุทธศาสตร์สำคัญในทิศทางใด ก่อนการนำมาทดลองหาค่า Reflow profile และ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เหมาะสมที่สามารถรองรับความแปรปรวนของวัตถุดิบ

5.3. สรุประยะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

หลังการทำการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ และได้ทำการจัดลำดับความสำคัญต่อยุทธศาสตร์ FMEA พบว่า 7 ปัจจัยควรถูกนำมาปรับปรุงเป็นอันดับแรกเนื่องจากมีคะแนน RPN >100 โดยสามารถจัดกลุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเดียวกัน ก่อนนำไปจัดลำดับเพื่อทำการปรับปรุงตามลำดับของกระบวนการผลิต ดังนี้ ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม และ ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม

บทที่ 6

ระยะปรับปรุงกระบวนการ

ขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยที่ได้จากบทที่ 5 มาปรับปรุงโดยใช้เทคนิค poka-yoke ในการลดความผิดพลาดของการปฏิบัติงานของพนักงาน รวมไปถึงการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เพื่อเปรียบเทียบและกำหนดวิธีการทำงานหรือปรับปรุงค่าปรับตั้งให้เหมาะสมในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนของเสีย

6.1. สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เรียงตามลำดับกระบวนการผลิต

จากบทที่ 5 ระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่ามี 7 ปัจจัยที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ โดยสามารถจัดกลุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเดียวกันได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

ลำดับปัจจัย	กระบวนการ	ปัจจัย
1	การออกแบบผลิตภัณฑ์	ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน
2	กระบวนการจัดวางแผ่นวงจร (FPC set)	การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง
3	กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder print)	การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม
4		ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป
5		แรงดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม
6	กระบวนการบัดกรี (Reflow)	การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม
7		ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม

6.2. กำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์

ปัจจัยต่าง ๆ นั้นจะถูกปรับปรุงโดยการกำหนดวิธีการทำงานที่สามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ลงได้และทดสอบผลลัพธ์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติหรือไม่ โดยใช้ผลจากการทดสอบแบบที่ละปัจจัยและใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองจากสูตรการคำนวณขนาดตัวอย่างแบบสองประชากรสำหรับทดสอบสัดส่วนดังสมการที่ 1 ผู้วิจัยได้พิจารณาใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และค่ากำลัง (power) ที่ 0.9 จากโปรแกรม Minitab พบว่าควรใช้ขนาดตัวอย่างอย่างน้อยเท่ากับ 533 ขึ้นในการทดสอบสมมติฐาน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 แต่เนื่องจาก 1 บอร์ดของแผงวงจรมีชิ้นงาน 56 ชิ้น ผู้วิจัยจึงใช้ขนาดตัวอย่างในการทดสอบเท่ากับ 560 ชิ้น หรือเท่ากับ 10 บอร์ดต่อการทดสอบ 1 ระดับ

$$n = \frac{Z_{1-\alpha/2}\sqrt{2pq} + Z_{1-\beta}\sqrt{p_1q_1 + p_0q_0}}{(p_1 - p_0)^2} \quad \text{----- (1)}$$

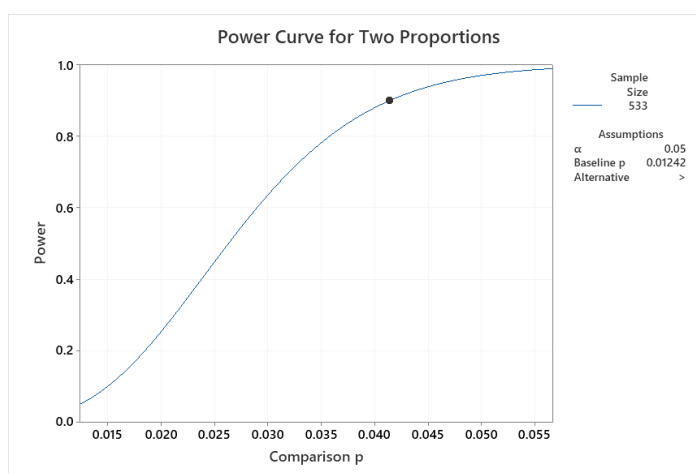
โดยที่ Z คือ ค่าปกติมาตรฐานที่สอดคล้องกับ α เท่ากับ 0.05 หรือ β เท่ากับ 0.01
 p_0 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 0.0414
 p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 0.01242 (ลดลง 70% จาก p_0)
 q_0 คือ $1 - p_0$
 q_1 คือ $1 - p_1$

Results

Comparison p	Sample Size	Target Power	Actual Power
0.0414	533	0.9	0.900407

C

The sample size is for each group.

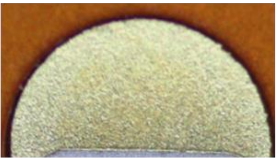
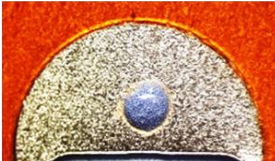
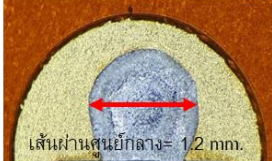

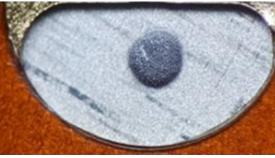
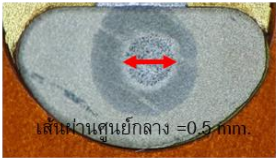


รูปที่ 6.1 ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานจาก Minitab

ผู้วิจัยได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (OFAT) เนื่องจากต้องการทดสอบการลดสัดส่วนของเสียของปัจจัยที่ละปัจจัยจากสองระดับจากมาตรฐานค่าปรับตั้งของรุ่นเครื่องจักรและโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่วของโรงงานกรณีศึกษา โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนระดับของปัจจัยที่ต้องการทดสอบเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่น ๆ ที่สนใจศึกษาไว้ที่ค่าหนึ่ง คือ เมื่อทำการทดสอบปัจจัยที่ 1 ปัจจัยที่ 2 – 7 จะถูกคงค่าปรับตั้งไว้ที่ค่าปัจจุบันก่อนการปรับปรุง โดยเมื่อได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมในปัจจัยที่ 1 แล้ว จึงใช้ค่าปรับตั้งดังกล่าวเป็นค่าคงที่ของปัจจัยที่ 1 ในขณะที่ทำการทดสอบปัจจัยที่ 2 และให้ปัจจัยที่ 3 – 7 คงค่าปรับตั้งไว้ที่ค่าปัจจุบันก่อนการปรับปรุงเช่นเดิม การทดลองจะถูกดำเนินการตามรูปแบบดังกล่าวจนครบทั้ง 7 ปัจจัยตามลำดับกระบวนการผลิต

ปัจจัยที่ 1 ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน

บริเวณที่เกิดข้อบกพร่องในโมเดล A มีพื้นที่ส่วนหนึ่งเป็นผิวทองจากแผงวงจรและอีกส่วนหนึ่งเป็นพื้นที่ผิวดีบุกจากวัตถุดิบเสริมความแข็งแรงที่ถูกนำมาติดกับแผงวงจรภายหลังตาม customer drawing ซึ่งการออกแบบดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากไม่ได้รับการยินยอมจากลูกค้า ผู้วิจัยจึงศึกษาความแตกต่างของการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นที่ทั้ง 2 ชนิด เพื่อเป็นองค์ประกอบในการปรับปรุงปัจจัยที่ 3 (การออกแบบแม่พิมพ์) ต่อไป โดยทำการหยดโลหะบัดกรีชนิดเดียวกับที่ใช้ในการผลิต (SAC305) ลงบนพื้นผิวในปริมาตรที่เท่ากันและทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีก่อนและหลังผ่านกระบวนการบัดกรี พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวทองมีขนาดเท่ากับ 1.2 mm ซึ่งมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวดีบุกที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 mm แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวบนพื้นผิวทองของโลหะบัดกรีดีกว่าการกระจายตัวบนพื้นผิวดีบุกดังผลลัพธ์ในรูปที่ 6.2 เนื่องจากพื้นผิวทองมีค่าการนำความร้อนจำเพาะมากกว่าพื้นผิวดีบุก ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถคาดการณ์ได้ว่าหากออกแบบรูเปิดแม่พิมพ์ตรงกับพื้นที่เปิดทั้งสองชนิดจะพบข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์บริเวณพื้นที่ดีบุก ทำให้ในการปรับปรุงปัจจัยที่ 3 ควรออกแบบรูเปิดแม่พิมพ์ให้เอียงไปทางพื้นผิวดีบุก

พื้นที่ที่สนใจ	ก่อนการทดลอง	หลังการหยดโลหะบัดกรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm	หลังถูกหลอมเหลว
ผิวทอง			 เส้นผ่านศูนย์กลาง = 1.2 mm.
ผิวดีบุก			 เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 mm.

รูปที่ 6.2 ผลการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน

ปัจจัยที่ 2 การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง

การติด Glass cloth เป็นการปฏิบัติงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการ FPC setting โดยจัดวางแผงวงจรบนฟลักซ์เจอร์เพื่อยึดชิ้นงานให้อยู่กับที่ก่อนปล่อยเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป ก่อนการปรับปรุงพนักงานยึดแผงวงจรด้วยการติด Glass cloth หรือเทปชนิดเฉพาะที่ 4 มม.ของแผงวงจรกับฟลักซ์เจอร์ที่ถูกยึดตำแหน่งตาม pin โดยมักพบว่าการปฏิบัติงานของพนักงานไม่เป็นไปตามขั้นตอนการปฏิบัติงานเนื่องจากความเคยชินและความเร่งรีบ ทำให้เกิดปัญหาแผงวงจรไม่เรียบไปกับฟลักซ์เจอร์หรือการติดเยื้องเนื่องจากเทปไม่มีประสิทธิภาพจากการใช้งานซ้ำ ส่งผลให้แผงวงจรที่ไหลไปสู่กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรีขยับออกจากตำแหน่งที่กำหนด โดยโลหะบัดกรีจะถูกพิมพ์เยื้องออกจากพื้นที่เปิดและพบข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังกระบวนการบัดกรี ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนจากการติด Glass cloth เป็นการใช้แผ่นครอบแม่เหล็กที่แนบไปตลอดพื้นผิวของแผงวงจรตามแนวคิด poka-yoke คือสร้างรูปเปิดเฉพาะพื้นที่พิมพ์เท่านั้น และสามารถควบคุมทิศทางการวางแผงวงจรบนฟลักซ์เจอร์ได้ทิศทางเดียว โดยตั้งสมมติฐานการทดลองดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

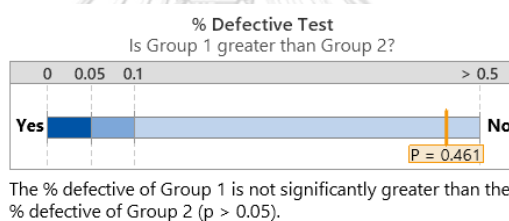
$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้วิธีการยึดแผงวงจรด้วยเทป Glass cloth

p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้วิธีการยึดแผงวงจรด้วยแผ่นครอบแม่เหล็ก

ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยใช้วิธีการยึดแผงวงจรที่แตกต่างกัน พบว่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ลดลงจาก 10.2% เป็น 10.05% โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.461 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.3 แสดงว่าสัดส่วนของเสียเมื่อใช้วิธีการยึดแผงวงจรด้วยแผ่นครอบแม่เหล็กลดลงจากสัดส่วนของเสียเมื่อใช้วิธีการยึดแผงวงจรด้วยเทป Glass cloth อย่างไม่มีนัยสำคัญ ผู้วิจัยคาดว่าเกิดจากการระงับขณะปฏิบัติงานของพนักงานเมื่อทราบถึงการทดลอง อย่างไรก็ตามการปรับปรุงนี้จะถูกใช้เพื่อคงมาตรฐานการทำงานให้เป็นไปตามหลักป้องกันข้อผิดพลาด (poka-yoke) แทนการพึ่งพาความสามารถในการทำงานของพนักงานในระยะยาว



รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 2

ปัจจัยที่ 3 การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม

กระบวนการพิมพ์ (Solder printing) มีองค์ประกอบสำคัญคือ ชนิดพื้นผิวที่ถูกพิมพ์ของแผงวงจร (FPC) โลหะบัดกรี (Solder) การตั้งค่าของเครื่องจักร รวมไปถึงแม่พิมพ์ (Stencil) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบเพื่อจำกัดตำแหน่ง รูปทรง และปริมาตรของโลหะบัดกรี เมื่อพิจารณาแม่พิมพ์เพื่อปรับปรุงปัจจัยที่ 3 พบว่าปัจจุบันรูเปิดของแม่พิมพ์เป็นรูปร่างครึ่งแคบซูลและมีตำแหน่งเอียงไปทางพื้นผิวด้านบนอยู่แล้วโดยมีระยะห่างจากพื้นผิวทอง 0.5 mm โดยแม่พิมพ์ดังกล่าวเมื่อถูกนำมาใช้พิมพ์ โลหะบัดกรีจะถูกพิมพ์ได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 6.4 ซึ่งการออกแบบปัจจุบันมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในปัจจัยที่ 1 แต่เนื่องจากยังพบข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จึงพิจารณาที่จะเปลี่ยนแปลงระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองแทนการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า โดยตั้งสมมติฐานการทดลองดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

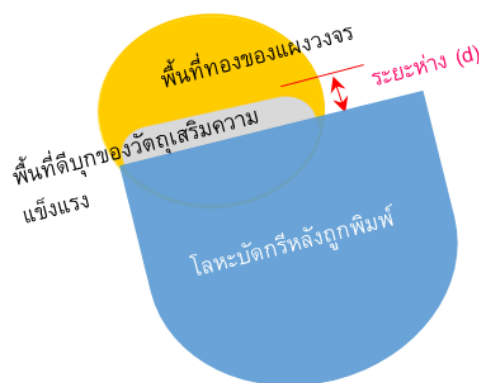
$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองเท่ากับ 0.5 mm

p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองเท่ากับ 0.19 mm

ผลการทดสอบสมมติฐาน

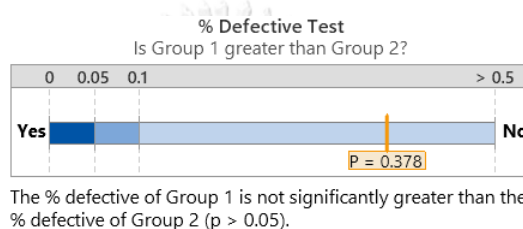
จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองพบว่าได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.2 คือ เมื่อขยับรูเปิดออกจากพื้นผิวทองด้วยระยะห่าง (d) ที่ 0.19 mm หรือ ลดระยะห่างจากเดิมลง 38% สามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ได้มากที่สุดจาก 4.08% เป็น 3.57% คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงเท่ากับ 12.5% จากระดับเดิม โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.378 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.5 แสดงว่า สัดส่วนของเสียเมื่อใช้ระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองเท่ากับ 0.19 mm ลดลงจากสัดส่วนของเสียเมื่อใช้ระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองเท่ากับ 0.5 mm อย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ระยะห่างของรูเปิดแม่พิมพ์ออกจากพื้นที่ทองไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าหรือน้อยกว่า 38% เนื่องจากสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากสัดส่วนของเสียเดิม ดังนั้นจากผลสรุปการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเห็นสมควรที่จะไม่ดำเนินการเปลี่ยนแม่พิมพ์เพื่อลดค่าใช้จ่าย



รูปที่ 6.4 ภาพสมมติแสดงระยะห่างการพิมพ์โลหะบัดกรีบนพื้นที่เปิด

ตารางที่ 6.2 สัดส่วนของเสียจากการปรับระยะรูเปิด

เปอร์เซ็นต์	ระยะ d (mm)	สัดส่วนของเสีย
100% (ค่าปัจจุบัน)	0.5	4.08%
150%	0.75	21.43%
50%	0.25	5.36%
38%	0.19	3.57%
25%	0.13	5.96%



รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 3

ปัจจัยที่ 4 ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป

การเพิ่มความหนาของแม่พิมพ์มีผลต่อปริมาตรโลหะบัดกรีหลังการพิมพ์แบบแปรผันตรง คือ เมื่อความหนาของแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโลหะบัดกรีหลังการพิมพ์เพิ่มมากขึ้น [15] กรณีข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์มีความเป็นไปได้ที่เกิดจากปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ไม่เพียงพอ จึงทำการทดลองโดยการเพิ่มความหนาของแม่พิมพ์จาก 5 mils (127 μm) เป็น 7 mils (177.8 μm) ตามความหนาวัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ที่มีในโรงงาน ทั้งนี้ความหนาที่ถูกเลือกยังคงมีค่าอยู่ในช่วงแนะนำตาม TDS ของโลหะบัดกรี คือ 120-200 μm โดยตั้งสมมติฐานการทดลองดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

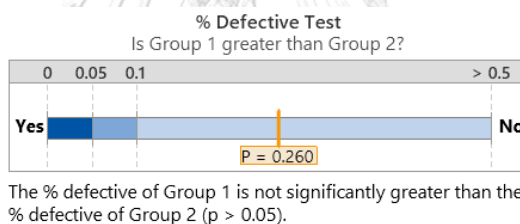
$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ความหนาของแม่พิมพ์เท่ากับ 5 mils

p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ความหนาของแม่พิมพ์เท่ากับ 7 mils

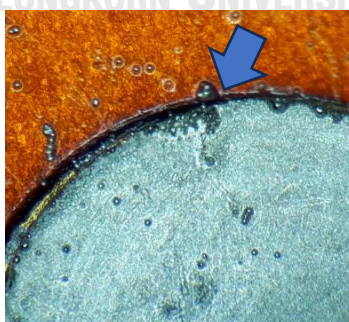
ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยใช้ความหนาของแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มความหนาของแม่พิมพ์สามารถลดสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จาก 9.27% เป็น 7.79% หรือคิดเป็นการลดลง 15.97% ของสัดส่วนของเสียก่อนปรับปรุง โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.260 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.6 แสดงว่า สัดส่วนของเสียเมื่อใช้ความหนาของแม่พิมพ์เท่ากับ 7 mils ลดลงจากสัดส่วนของเสียเมื่อใช้ความหนาของแม่พิมพ์เท่ากับ 5 mils อย่างไม่มีนัยสำคัญ อีกทั้งในขณะเดียวกันพบสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีเป็นสะเก็ด (Solder ball) ลักษณะตามรูปตัวอย่างที่ 6.7 เพิ่มขึ้นกว่า 36.25% เนื่องจากปริมาณของโลหะบัดกรีที่มากเกินไป ผู้วิจัยจึงเห็นสมควรที่จะไม่ดำเนินการเปลี่ยนความหนาแม่พิมพ์จากปัจจัยที่ 4



รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6.7 ข้อบกพร่องโลหะบัดกรีเป็นสะเก็ด (Solder ball)

ปัจจัยที่ 5 แรงดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม

ค่าพารามิเตอร์ในเครื่องพิมพ์ประกอบไปด้วย ความเร็วของใบปาด (Squeegee speed) แรงดันขณะปาด (Pressure) องศาการเอียงของใบปาด (Squeegee angle) ระยะห่างระหว่างใบปาดและแม่พิมพ์ (Snap off) ความเร็วในการแยกตัว (Separation speed) [16] การตั้งค่าอย่างเหมาะสมจึงเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของกระบวนการ โดยเฉพาะแรงดันขณะปาดที่มีทิศทางกระทำต่อแผงวงจรตามรูปที่ 6.8 ตามทฤษฎีของกระบวนการพิมพ์นั้นพบว่าปริมาตรโลหะบัดกรีหลังพิมพ์แปรผันตรงกับแรงดันที่ใช้ขณะปาด (ปัจจัยที่ 5) คือเมื่อต้องการปริมาตรโลหะบัดกรีที่มากขึ้น ควรเพิ่มแรงดันที่ใช้ขณะปาด ผู้วิจัยจึงศึกษาผลการเพิ่มแรงดันขณะปาดว่าจะช่วยลดสัดส่วนของเสียอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ปัจจุบันในการผลิตใช้แรงดันขณะปาดเท่ากับ 80 N จึงเลือกที่จะเพิ่มแรงดันเป็น 100 N และเก็บข้อมูลมาเปรียบเทียบและทดสอบสมมติฐาน ภายใต้การกำหนดให้พารามิเตอร์ที่เหลือคงที่โดยใช้ค่าปัจจุบันเนื่องจากผลการประเมิน FMEA ในค่าเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อปัญหาที่สนใจน้อย คือ กำหนดให้ Snap off เท่ากับ 0 mm, Angle เท่ากับ 60° Separation speed เท่ากับ 0.5 mm/s และความเร็วใบปาดเท่ากับ 60 mm/s โดยตั้งสมมติฐานการทดลองสำหรับปัจจัยแรงดันขณะปาดดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.8 ทิศทางกระทำของปัจจัยต่อแผงวงจร

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้แรงดันขณะปาดเท่ากับ 80 N

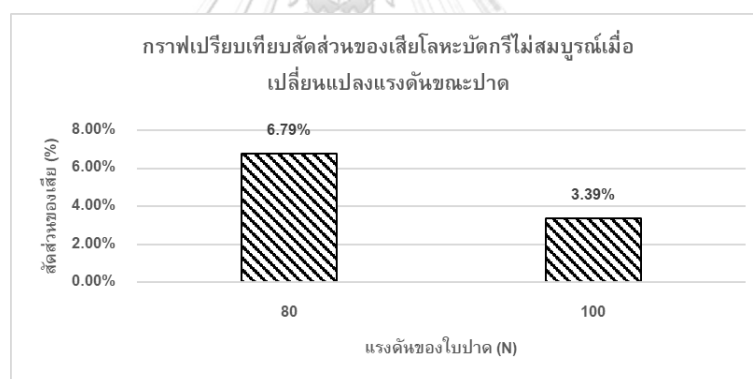
p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้แรงดันขณะปาดเท่ากับ 100 N

ผลการทดสอบสมมติฐาน

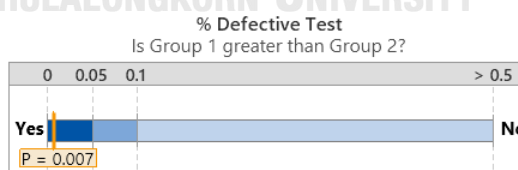
จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะปาด พบว่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ลดลงจาก 6.79% เป็น 3.39% ดังผลการทดลองในตารางที่ 6.3 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.007 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.9 แสดงว่าสัดส่วนของเสียเมื่อใช้แรงดันขณะปาดเท่ากับ 100 N ลดลงจากสัดส่วนของเสียเมื่อใช้แรงดันขณะปาดเท่ากับ 80 N อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะปาด

ค่าปรับตั้ง	จำนวนชิ้นงานนำเข้า	จำนวนของเสีย	สัดส่วนของเสีย
80 N	560	38	6.79%
100 N	560	19	3.39%



CHULALONGKORN UNIVERSITY



The % defective of Group 1 is significantly greater than the % defective of Group 2 ($p < 0.05$).

รูปที่ 6.9 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียและผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่ 6

ปัจจัยที่ 6 และ 7 การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม และความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม

ในกระบวนการบัดกรีนั้น ค่าปรับตั้งที่สำคัญจะต้องอยู่ในช่วงข้อกำหนดตาม TDS ของโลหะบัดกรีชนิดที่ใช้ งาน สำหรับโมเดลกรณีศึกษาซึ่งใช้โลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว SAC305 (Sn=96.5, Ag=3.0%, Cu=0.5%) มีข้อกำหนดในการสร้าง Reflow profile ตามตารางที่ 6.4 ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าว Reflow profile จะถูกสร้างให้เหมาะสมกับจำนวนโซนของเครื่องจักรและความเร็วของสายพานลำเลียง ในปัจจุบันเครื่องจักรมีจำนวนโซนอยู่ที่ 12 โซนและใช้ความเร็วความเร็วของสายเท่ากับ 85 cm/min โดย Reflow profile ครอบคลุมพารามิเตอร์ ได้แก่ Soak time หรือ ระยะเวลาที่ตัวทำละลายในโลหะบัดกรีจะระเหยออกและฟลักซ์จะเริ่มทำงานโดยทำความสะอาดพื้นผิว, Reflow time และ Peak temperature หรือ ระยะเวลาจากอุณหภูมิ 220°C ไปถึงอุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการที่ฟลักซ์จะถูกระเหยออกจากโลหะบัดกรีที่หลอมละลาย ส่วนปัจจัยในเรื่องความเข้มข้นของออกซิเจนไม่เหมาะสมได้กำหนดแนวทางการปรับปรุงโดยการใส่ไนโตรเจน (N₂) โดยคาดว่าจะทำให้ออกซิเจนในกระบวนการลดลงเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกไซด์ที่สามารถเกิดได้ทั้งในช่วง 110 - 190°C ซึ่งส่งผลให้การระเหยของตัวทำละลายในโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ และช่วงอุณหภูมิ >220°C ซึ่งส่งผลให้การหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไม่ดีพอ ซึ่งกระทบต่อการไหลและการเชื่อมประสานต่อไป [17]

ตารางที่ 6.4 Reflow profile แนะนำเบื้องต้นจาก TDS ตามชนิดของโลหะบัดกรี [18]

พารามิเตอร์	ข้อกำหนดตาม TDS
Soak time (110-190°C)	60-120 s
Reflow time (>220°C)	30-60 s
Peak temperature	230-250°C
N ₂	Optional

หมายเหตุ Ramp slope และ Cool down slope ไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นค่าปรับตั้งที่ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนสถานะหรือการสร้างพันธะโดยตรง กล่าวคือเป็นเพียงการควบคุมให้อุณหภูมิค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงควบคุมต่อวินาทีเท่านั้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาข้างเคียงอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รวดเร็วเกินไป ผู้วิจัยจึงเพียงยืนยันค่า Ramp slope ซึ่งอยู่ระหว่าง 1 °C/s ถึง 3 °C/s และ Cool down slope ซึ่งอยู่ระหว่าง -4 °C/s ถึง -1 °C/s ก่อนและหลังการปรับปรุงว่ายังเป็นไปตามข้อกำหนด

ทั้งนี้เพื่อพิสูจน์ผลของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละปัจจัยก่อน จึงได้พิจารณาการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (OFAT) โดยศึกษาผลความแตกต่างของสัดส่วนของเสียเมื่อปัจจัยมีค่าที่ระดับต่ำสุดและสูงสุดของค่าแนะนำจาก TDS และได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

1. Soak time

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Soak time เท่ากับ 60 s

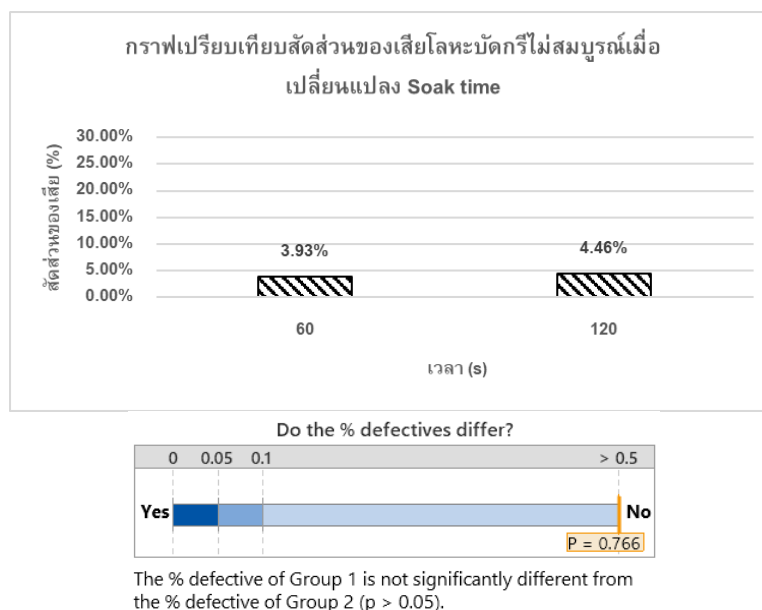
p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Soak time เท่ากับ 120 s

ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยการเปลี่ยนแปลง Soak time พบว่า สัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 3.93% เป็น 4.46% เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังผลการทดลองในตารางที่ 6.5 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.766 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.10 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเวลา Soak time ไม่ส่งผลให้สัดส่วนของเสียเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 6.5 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Soak time

ค่าปรับตั้ง	จำนวนชิ้นงานนำเข้า	จำนวนของเสีย	สัดส่วนของเสีย
60 s	560	22	3.93%
120 s	560	25	4.46%



รูปที่ 6.10 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Soak time

2. Reflow time

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Reflow time เท่ากับ 30 s

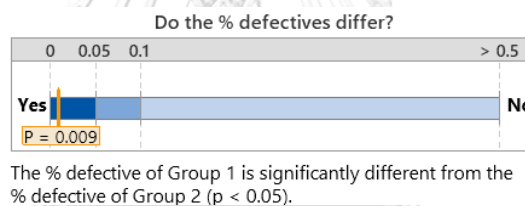
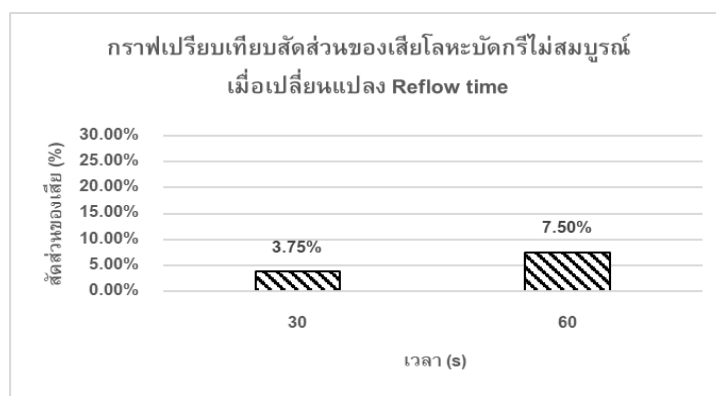
p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Reflow time เท่ากับ 60 s

ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยการเปลี่ยนแปลง Reflow time พบว่าสัดส่วนของเสีย ลดลงจาก 7.50% เป็น 3.75% เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังผลการทดสอบในตารางที่ 6.6 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.009 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.11 แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงเวลา Reflow time ส่งผลให้สัดส่วนของเสียเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 6.6 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Reflow time

ค่าปรับตั้ง	จำนวน ชิ้นงานนำเข้า	จำนวนของ เสีย	สัดส่วนของ เสีย
30 s	560	21	3.75%
60 s	560	42	7.50%



รูปที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Reflow time

3. Peak temperature

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Peak temperature เท่ากับ 230°C

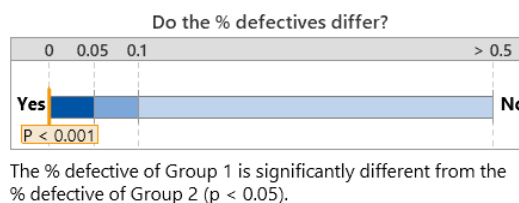
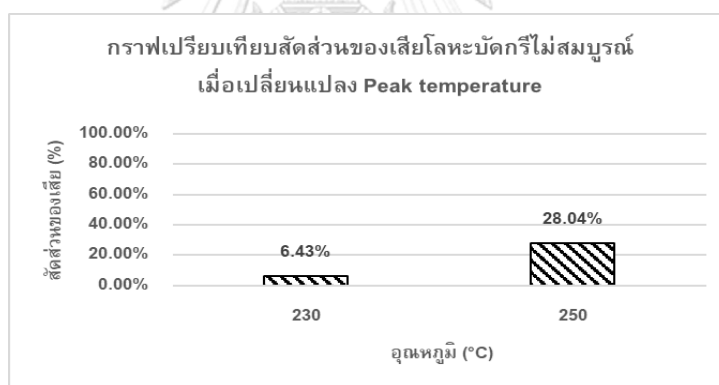
p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ Reflow time เท่ากับ 250°C

ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานโดยการเปลี่ยนแปลง Peak temperature พบว่าสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 3.75% เป็น 7.50% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังผลการทดสอบในตารางที่ 6.7 โดยมีค่า P-value น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.12 แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงเวลา Peak temperature ส่งผลให้สัดส่วนของเสียเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 6.7 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Peak temperature

ค่าปรับตั้ง	จำนวน ชิ้นงานนำเข้า	จำนวนของ เสีย	สัดส่วนของ เสีย
230°C	560	36	3.75%
250°C	560	157	7.50%



รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียจากการเปลี่ยนแปลง Peak temperature

4. การใช้ N_2 เพื่อลดความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการ โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 500 ppm คือ การไม่เปิดใช้ในโตรเจนในกระบวนการ หรือหมายถึงในกระบวนการมีความเข้มข้นของออกซิเจนเหมือนอากาศปกติ และ ค่าความเข้มข้นที่เท่ากับ 4500 ppm คือ การเปิดใช้ในโตรเจนในกระบวนการ หรือหมายถึงความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการอยู่ที่ 300 ppm โดยประมาณ

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2$$

โดยที่ p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อไม่ใช้ N_2 (500 ppm)

p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ N_2 (4500 ppm)

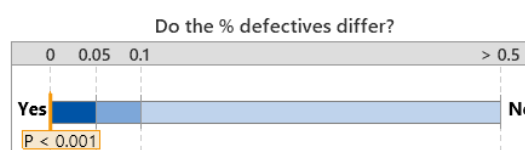
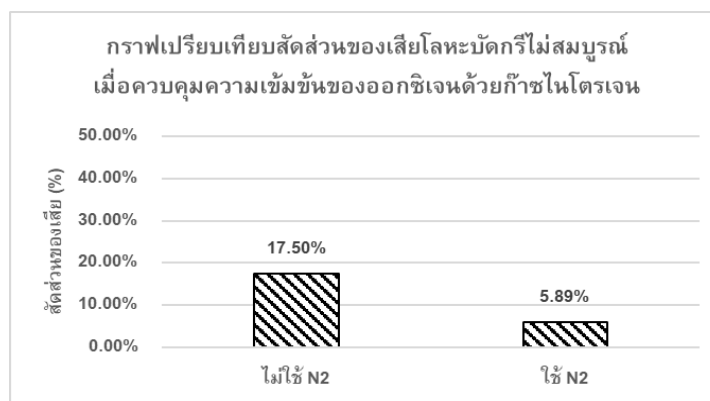
ผลการทดสอบสมมติฐาน

จากการทดสอบตามสมมติฐานระหว่างการใช้และไม่ใช้ N_2 พบว่าสัดส่วนของเสียลดลงจาก 17.50% เป็น 5.89% เมื่อมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการบัดกรีหรือเมื่อมีความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการต่ำ ดังผลการทดสอบในตารางที่ 6.8 โดยมีค่า P-value น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังผลการทดสอบสมมติฐานในรูปที่ 6.13 แสดงว่า การใช้และไม่ใช้ N_2 ส่งผลให้สัดส่วนของเสียเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6.8 ผลการทดลองระหว่างการใช้และไม่ใช้ N_2

ค่าปรับตั้ง	จำนวนชิ้นงานนำเข้า	จำนวนของเสีย	สัดส่วนของเสีย
ไม่ใช้ N_2	560	98	17.50%
ใช้ N_2	560	33	5.89%



The % defective of Group 1 is significantly different from the % defective of Group 2 ($p < 0.05$).

รูปที่ 6.13 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียเมื่อควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจน

จากผลการเปลี่ยนแปลงข้างต้นในข้อ 1 - 4 พบว่ามี 3 ปัจจัยจาก 4 ปัจจัยในกระบวนการบัดกรีที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสียเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย คือ

- Reflow time
- Peak temperature
- การใช้ N₂

ผู้วิจัยและทีมงานจึงได้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) สำหรับ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ($2^3 = 8$ runs) เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยและนำไปสู่การหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของ 3 ปัจจัยนี้เมื่อสามารถพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้ ดังตารางที่ 6.9 ทั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สมการที่ (2) ในการหาจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเนื่องจากตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วนของเสียโดยปัจจุบันค่าปรับตั้งอยู่ในช่วงกึ่งกลางของช่วงการทดลอง

$$n = \frac{(Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2}{N\delta^2} \quad \text{----- (2)}$$

ขณะที่

N คือ จำนวนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่ทำการทดลอง

δ คือ ค่าความแตกต่างของข้อบกพร่องที่ได้ทำการแปลงค่าแล้ว

โดยที่ $\delta = \arcsin\sqrt{p_0 + \Delta/2} - \arcsin\sqrt{p_0 - \Delta/2}$; Δ = สัดส่วนของ
เสียที่ลดลง, p_0 = สัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง

กำหนดให้ $\alpha = 0.05$ และ $\beta = 0.1$

$$n = \frac{(Z_{1-0.05/2} + Z_{1-0.1})^2}{8\delta^2} = \frac{(1.96 + 1.282)^2}{8 \times 0.0739^2} = 240.3 \approx 241 \text{ ชิ้น} ; \delta =$$

$$\arcsin\sqrt{0.0414 + \left(\frac{0.029}{2}\right)} - \arcsin\sqrt{0.0414 - \left(\frac{0.029}{2}\right)} = 0.0739$$

พบว่าควรใช้ขนาดตัวอย่างอย่างน้อยเท่ากับ 241 ชิ้นในการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ตารางที่ 6.9 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่เป็นค่ารหัส (Coded unit)

Std Order	Run Order	Center Pt.	Blocks	Reflow time	Peak temp	N ₂
8	1	1	1	+	+	+
6	2	1	1	+	-	+
3	3	1	1	-	+	-
7	4	1	1	-	+	+
4	5	1	1	+	+	-
1	6	1	1	-	-	-
2	7	1	1	+	-	-
5	8	1	1	-	-	+

สำหรับ Peak temperature อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้ถูกลดจาก 230°C เป็น 225°C และลดจาก 250°C เป็น 245°C ตามค่าพิสัยความเผื่อของเครื่องจักร (tolerance) ที่ $\pm 5^\circ\text{C}$ ได้มาซึ่งตารางออกแบบการทดลองที่เป็นค่าจริงตามตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่เป็นค่าจริง (Uncoded unit)

Std Order	Run Order	Center Pt.	Blocks	Reflow time	Peak temp	N ₂
8	1	1	1	60	245	4500
6	2	1	1	60	225	4500

Std Order	Run Order	Center Pt.	Blocks	Reflow time	Peak temp	N ₂
3	3	1	1	30	245	500
7	4	1	1	30	245	4500
4	5	1	1	60	245	500
1	6	1	1	30	225	500
2	7	1	1	60	225	500
5	8	1	1	30	225	4500

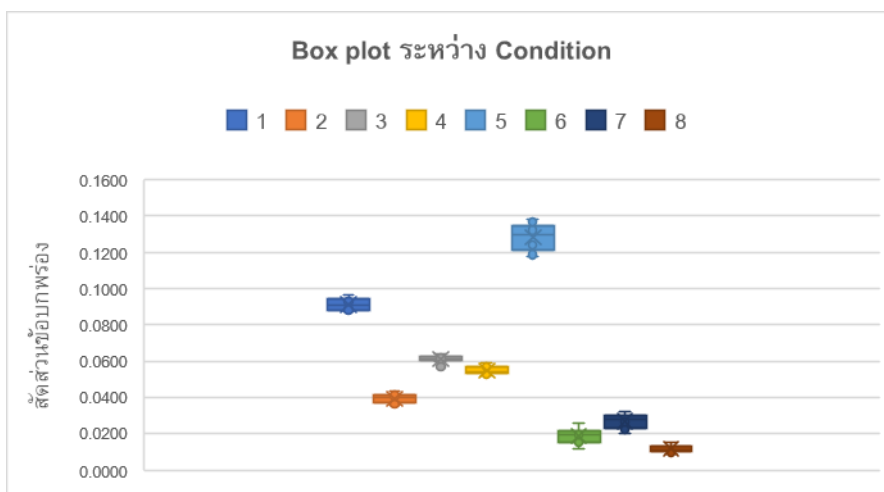
จากการคำนวณขนาดตัวอย่างข้อมูลขั้นต่ำในการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปก่อนการปรับปรุงพบว่า ควรใช้ขนาดตัวอย่างอย่างน้อย $n = \frac{(Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2}{N\delta^2} = 241$ ชิ้น ผู้วิจัยได้ทดลองและเก็บข้อมูล 1 กะการทำงานต่อ 1 คอนดิชัน ซึ่งเท่ากับ 10 ล็อตการผลิต โดยในการทำงานปัจจุบันได้กำหนดให้ล็อตการผลิตมีขนาดล็อตละ 1,120 ชิ้น รวมเป็น 11,200 ชิ้นต่อกะ ทำให้ไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเพิ่มเนื่องจากมีข้อมูลการทดลองที่เพียงพอ

จากการทดลองผ่านการปรับตั้งค่า 3 ปัจจัย ได้แก่ Reflow time, Peak temperature และ N₂ ตามตารางการออกแบบการทดลองที่ 6.10 โดยให้ค่าปรับตั้งในปัจจัยก่อนหน้า คือปัจจัยที่ 1 – 5 และค่า Soak time เป็นค่าคงที่ที่ระดับหลังการปรับปรุง จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.11 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.11 ผลการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) สำหรับ 3 ปัจจัย

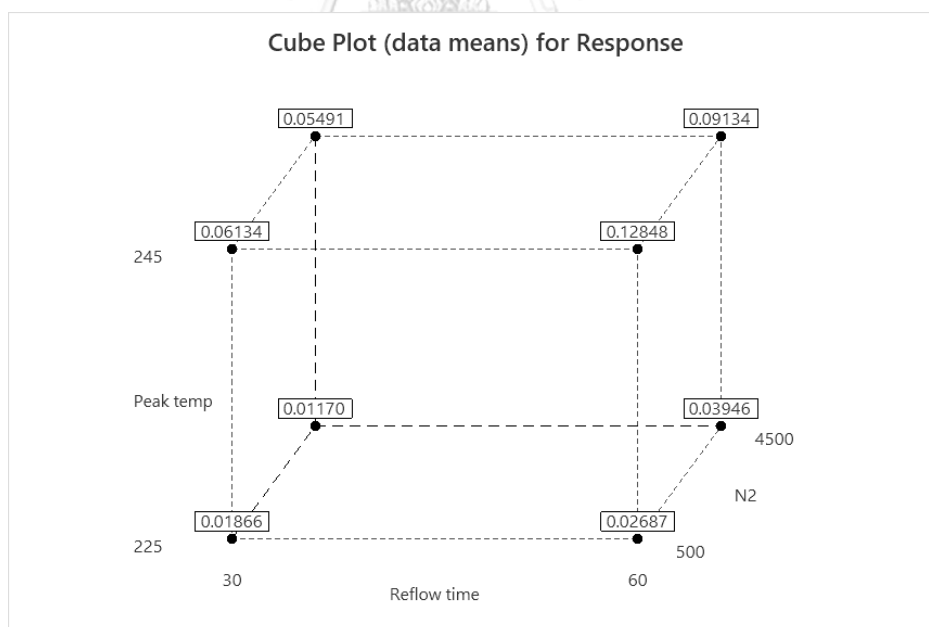
Conditio n	1	2	3	4	5	6	7	8
Reflow time (sec)	30	30	30	30	60	60	60	60
Peak temperat ure (°C)	225	225	245	245	225	225	245	225
N ₂ (ppm)	500	4500	500	4500	500	4500	500	4500
lot1	0.0196	0.0107	0.0616	0.0571	0.0250	0.0402	0.1179	0.0402
lot2	0.0116	0.0098	0.0625	0.0536	0.0295	0.0366	0.1321	0.0366
lot3	0.0214	0.0152	0.0643	0.0536	0.0286	0.0420	0.1384	0.0420
lot4	0.0152	0.0134	0.0571	0.0571	0.0321	0.0402	0.1241	0.0402
lot5	0.0196	0.0089	0.0625	0.0563	0.0304	0.0375	0.1330	0.0375
lot6	0.0152	0.0107	0.0634	0.0589	0.0268	0.0411	0.1339	0.0411
lot7	0.0259	0.0107	0.0607	0.0518	0.0223	0.0357	0.1366	0.0357
lot8	0.0188	0.0125	0.0607	0.0545	0.0205	0.0384	0.1277	0.0384
lot9	0.0214	0.0134	0.0598	0.0527	0.0304	0.0393	0.1188	0.0393
lot10	0.0179	0.0116	0.0607	0.0536	0.0232	0.0438	0.1223	0.0438
Overall	0.0187	0.0117	0.0613	0.0549	0.0269	0.0395	0.1285	0.0913

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลอย่างง่ายด้วย Box plot ดังรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของเสียโดยสังเขปจากการเปลี่ยนแปลงค่าปรับตั้งตาม คอนดิชันที่ 1 - 8



รูปที่ 6.14 Box plot ระหว่าง Condition

และสามารถแสดงผลการทดลองในรูปแบบแผนภาพลูกบาศก์โดยโปรแกรม Minitab เพื่อแสดงผลกระทบของ 3 ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จากค่าปรับตั้งที่ 2 ระดับของแต่ละปัจจัย ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แผนภาพลูกบาศก์

ทั้งนี้จากผลการทดลองในตารางที่ 6.11 สามารถวิเคราะห์ผลโดยใช้ 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง

จากการสร้างแบบจำลองการถดถอยโดยโปรแกรม Minitab ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เป็นตัวแปรตอบสนอง ได้ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญดังรูปที่ 6.16 โดยพบว่าทุกเทอมมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีเทอมดังต่อไปนี้ ได้แก่

- ผลกระทบหลักของ Reflow time
- ผลกระทบหลักของ Peak temperature
- ผลกระทบหลักของ N_2
- ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ Peak temperature
- ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ N_2
- ผลกระทบร่วมระหว่าง Peak temperature และ N_2
- ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ Peak temperature และ N_2

และได้แบบจำลองการถดถอยซึ่งแสดงค่าปัจจัยอยู่ในหน่วยที่เป็นค่าจริง (Uncoded unit) สำหรับการพยากรณ์ค่าสัดส่วนของเสียดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Response} = & 0.2680 - 0.02426 \text{ Reflow time} - 0.001130 \text{ Peak temp} - 0.000150 N_2 + \\ & 0.000109 \text{ Reflow time} * \text{Peak temp} + 0.000005 \text{ Reflow time} * N_2 + \\ & 0.000001 \text{ Peak temp} * N_2 - 0.000000 \text{ Reflow time} * \text{Peak temp} * N_2 \end{aligned}$$

โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ Peak temperature และ N_2 มีค่าเท่ากับ 0.000000 เนื่องจากโปรแกรมสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละเทอมด้วยทศนิยมเพียง 6 ตำแหน่งเท่านั้น จึงสามารถคาดการณ์ได้เพียงว่าทศนิยมตำแหน่งที่ 7 ของเทอมดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 5 เท่านั้น ดังนั้นจึงพิจารณาใช้แบบจำลองการถดถอยในหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded unit) แทน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Response} = & 0.054096 + 0.017444 \text{ Reflow time} + 0.029922 \text{ Peak temp} - 0.004743 \\ & N_2 + 0.008449 \text{ Reflow time} * \text{Peak temp} - 0.001395 \text{ Reflow time} * N_2 - \\ & 0.006150 \text{ Peak temp} * N_2 - 0.006283 \text{ Reflow time} * \text{Peak temp} * N_2 \end{aligned}$$

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.054096	0.000425	127.34	0.000	
Reflow time	0.034888	0.017444	0.000425	41.06	0.000	1.00
Peak temp	0.059844	0.029922	0.000425	70.44	0.000	1.00
N2	-0.009487	-0.004743	0.000425	-11.17	0.000	1.00
Reflow time*Peak temp	0.016897	0.008449	0.000425	19.89	0.000	1.00
Reflow time*N2	-0.002790	-0.001395	0.000425	-3.28	0.002	1.00
Peak temp*N2	-0.012299	-0.006150	0.000425	-14.48	0.000	1.00
Reflow time*Peak temp*N2	-0.012567	-0.006283	0.000425	-14.79	0.000	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0037996	99.06%	98.97%	98.84%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.109819	0.015688	1086.69	0.000
Linear	3	0.097769	0.032590	2257.39	0.000
Reflow time	1	0.024344	0.024344	1686.23	0.000
Peak temp	1	0.071625	0.071625	4961.26	0.000
N2	1	0.001800	0.001800	124.67	0.000
2-Way Interactions	3	0.008891	0.002964	205.29	0.000
Reflow time*Peak temp	1	0.005710	0.005710	395.54	0.000
Reflow time*N2	1	0.000156	0.000156	10.78	0.002
Peak temp*N2	1	0.003025	0.003025	209.56	0.000
3-Way Interactions	1	0.003159	0.003159	218.78	0.000
Reflow time*Peak temp*N2	1	0.003159	0.003159	218.78	0.000
Error	72	0.001039	0.000014		
Total	79	0.110859			

Regression Equation in Uncoded Units

Response = 0.2680 - 0.02426 Reflow time - 0.001130 Peak temp - 0.000150 N2
 + 0.000109 Reflow time*Peak temp + 0.000005 Reflow time*N2 + 0.000001 Peak temp*N2
 - 0.000000 Reflow time*Peak temp*N2

รูปที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการถดถอยของสัดส่วนของเสีย

2. ปรับปรุงแบบจำลองโดยการลดรูปแบบจำลองให้มีเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญ

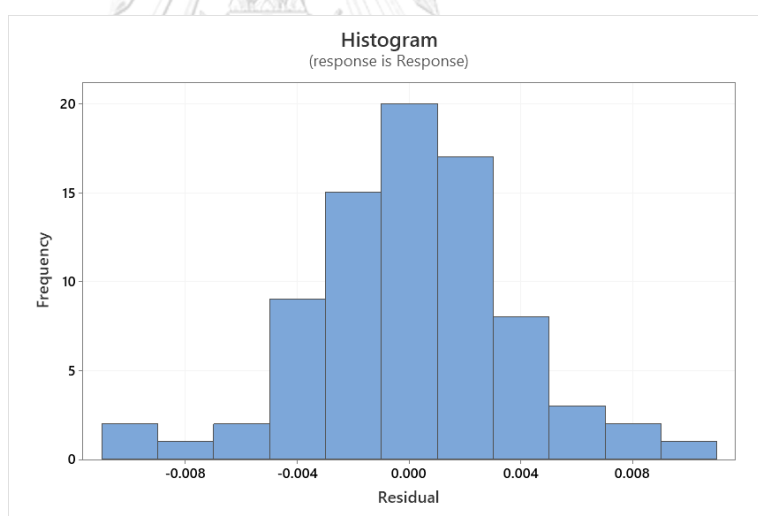
จากข้อที่ 1 พบว่าทุกเทอมในสมการแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญจึงไม่มีความจำเป็นจะต้องลดรูปแบบจำลองลง และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ R-sq ที่ได้จากการวิเคราะห์แล้ว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ R-sq เท่ากับ 99.06% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยดังกล่าวสามารถอธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ดีมาก

3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

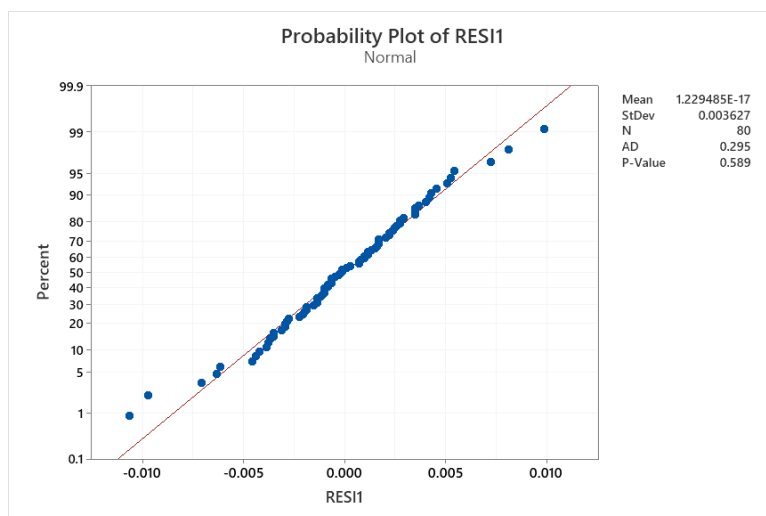
เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำไปใช้งาน จึงทำการทดสอบค่าส่วนตกค้างตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ 1 ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

การกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแผนภาพฮิสโตแกรมดังรูปที่ 6.17 พบว่ามีการกระจายตัวในด้านบวกและลบอย่างสมดุล และเมื่อพิจารณาจากกราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of Residuals) ในรูปที่ 6.18 พบว่ามีลักษณะการจัดเรียงใกล้เคียงเส้นตรง และมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.589 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



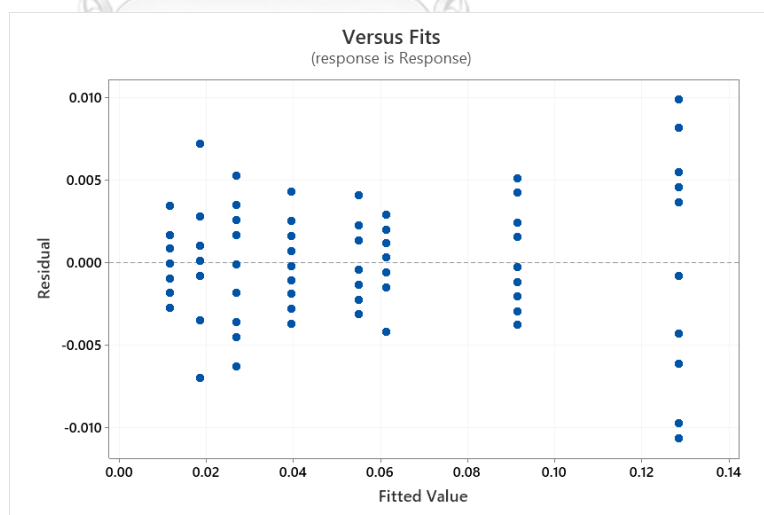
รูปที่ 6.17 Histogram



รูปที่ 6.18 Normal Probability Plot of Residuals

สมมติฐานที่ 2 ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่

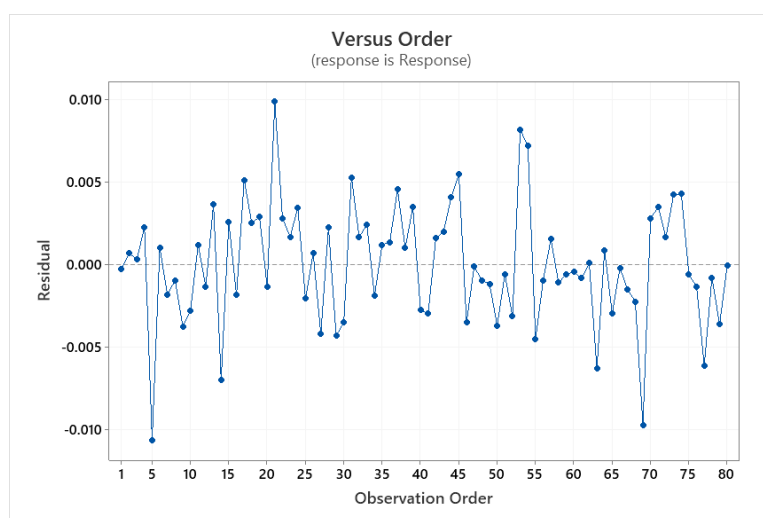
เมื่อพิจารณาจากรูปแบบความแปรปรวนในรูปที่ 6.19 พบว่าค่าส่วนตกค้างกระจายตัวทั้งบวกและลบรอบแนวแกนศูนย์ ด้วยความกว้างที่ใกล้เคียงกันตลอดค่าพิตทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่



รูปที่ 6.19 Residual vs Fits value

สมมติฐานที่ 3 ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน หรือ หมายถึงค่าส่วนตกค้างของการทดลองใดๆจะไม่ขึ้นอยู่กัค่าก่อนหน้า เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างตามลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) จากรูปที่ 6.20 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบแกน 0 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 6.20 Residual vs Observation order

จากการตรวจสอบความถูกต้องของสมการแบบจำลองด้วย 3 สมมติฐานข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสมการแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจาก การกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นแบบปกติ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ และ ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4. อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย อันได้แก่ 1) ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ Peak temperature 2) ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ N_2 3) ผลกระทบร่วมระหว่าง Peak temperature และ N_2 พบว่ามีผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่

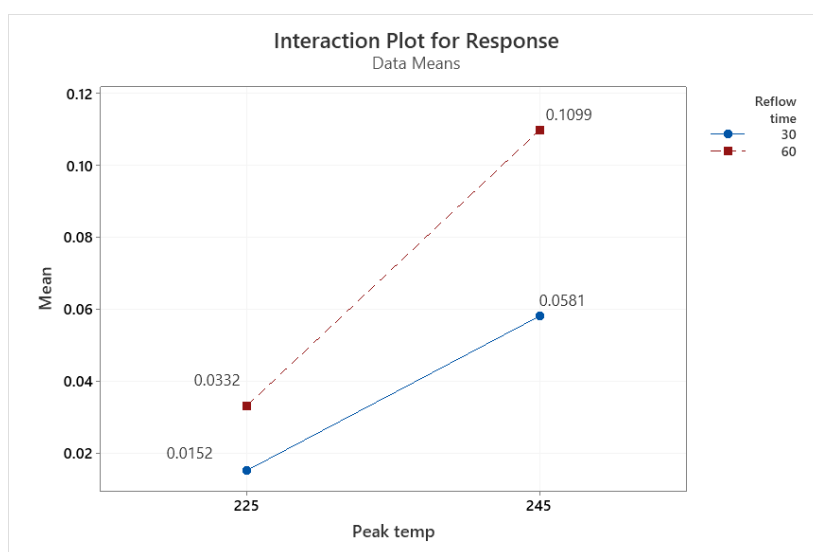
สมบูรณ์เนื่องจากเส้นกราฟสองระดับระหว่างปัจจัยไม่ขนานต่อกัน โดยสามารถอธิบายรายละเอียดและวิจารณ์ผลของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ Peak temperature

จากรูปที่ 6.21 พบว่า เมื่อ Reflow time มีค่า 30 s จะเกิดสัดส่วนของเสียในระดับที่ต่ำกว่าที่ Reflow time มีค่า 60 s ไม่ว่าจะใช้ Peak temperature เป็น 225°C หรือ 245°C ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองการถดถอยในหน่วยที่เป็นค่ารหัสของเทอม Reflow time ที่มีค่าเป็นบวก ($+ 0.017444 \text{ Reflow time}$) คือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับปัจจัยของ Reflow time มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลกระทบร่วมสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อ Peak temperature มีค่า 225°C แล้วทำการเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.0152 เป็น 0.0332 หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.018 ในขณะที่เมื่อ Peak temperature มีค่า 245°C แล้วทำการเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.0581 เป็น 0.1099 หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0518 สามารถสรุปได้อีกว่า เมื่อ Peak temperature มีค่า 225°C จะเกิดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยในระดับที่ต่ำกว่า Peak temperature มีค่า 245°C อีกทั้ง ที่ Peak temperature มีค่า 225°C มีขนาดการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเสียน้อยกว่า Peak temperature มีค่า 245°C เมื่อเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s

โดยสามารถวิจารณ์ผลได้ว่า เนื่องจาก Reflow time เป็นเวลาที่ต้องการควบคุมขณะที่อุณหภูมิของกระบวนการอยู่ที่ $>220^{\circ}\text{C}$ หรือเรียกว่าระยะเวลาหลังช่วงอุณหภูมิที่โลหะบัดกรีเกิดการหลอมเหลว (อุณหภูมิกระบวนการสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ 217°C) โดย Peak temperature คืออุณหภูมิที่สูงที่สุดในช่วงระยะเวลาดังกล่าวซึ่งโลหะบัดกรีจะอยู่ในสถานะเป็นของเหลวโดยสมบูรณ์ (Liquidus) โลหะบัดกรีที่ถูกหลอมเหลวแล้วจะไหลอยู่บนพื้นที่เปิดโดยเริ่มจากตำแหน่งที่ถูกพิมพ์คือไหลจากพื้นผิวตึกไปยังพื้นผิวทอง ก่อนเกิดการเชื่อมประสานในระดับชั้นของสารประกอบเชิงโลหะ (IMC, Intermetallic compound) ดังนั้นเมื่อเวลาในช่วงนี้เพิ่มขึ้น หมายถึงการเพิ่มระยะเวลาให้โลหะบัดกรีไหลไปยังพื้นผิวทองมากขึ้น ประกอบกับความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนพื้นผิวทองดีกว่าพื้นผิวตึกตามผล

การศึกษาในปัจจัยที่ 1 ทำให้พบข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ที่พื้นที่ดีบุกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีสูงขึ้น อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิที่สูงที่สุดเพิ่มขึ้น หมายถึงการที่อุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดการไหลของโลหะบัดกรีมากขึ้น จึงเห็นได้ว่า การเพิ่ม Peak temperature ส่งผลให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีสูงขึ้นเช่นกัน



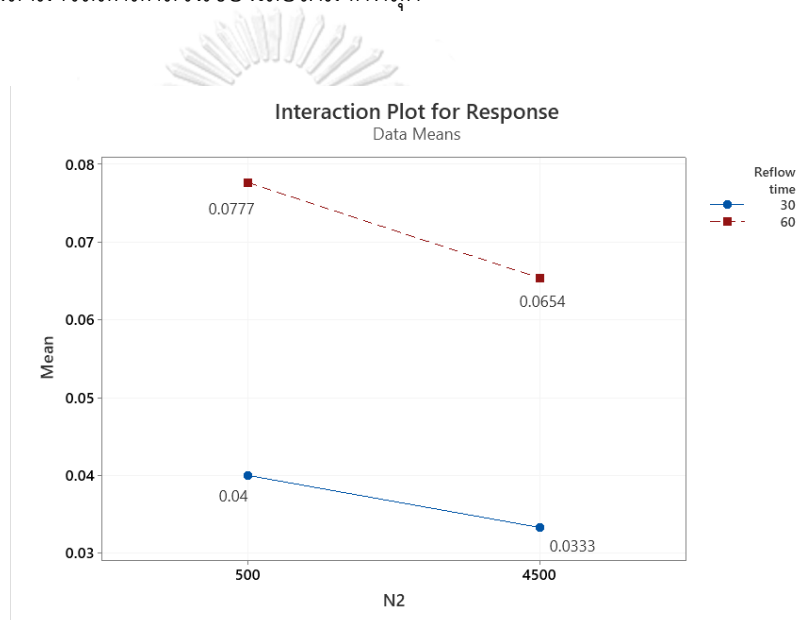
รูปที่ 6.21 ผลกระทบระหว่าง Reflow time กับ Peak temperature

2) ผลกระทบร่วมระหว่าง Reflow time และ N_2

จากรูปที่ 6.22 พบว่า เมื่อ N_2 มีค่า 4500 ppm จะเกิดสัดส่วนของเสียในระดับที่ต่ำกว่าที่ N_2 มีค่า 500 ppm ไม่ว่าจะใช้ Reflow time เป็น 30 s หรือ 60 s ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองการถดถอยในหน่วยที่เป็นค่ารหัสของเทอม N_2 ที่มีค่าเป็นลบ ($-0.004743 N_2$) คือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียจะลดลงเมื่อระดับปัจจัยของ N_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลกระทบร่วมสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อ N_2 มีค่า 500 ppm แล้วทำการเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.0777 หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0377 ในขณะที่เมื่อ N_2 มีค่า 4500 ppm แล้วทำการเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.0333 เป็น 0.0654 หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0321 สามารถสรุปได้อีกว่า เมื่อ N_2 มีค่า 4500 ppm จะเกิดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยใน

ระดับที่ต่ำกว่า N_2 มีค่า 500 ppm โดยที่ มีขนาดการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเสียต่างกัน เพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่ม Reflow time จาก 30 s เป็น 60 s

โดยสามารถวิจารณ์ผลได้ว่า เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนมีบทบาทในการลดก๊าซ ออกซิเจนในกระบวนการบัดกรี การใช้ก๊าซไนโตรเจนมากหมายถึงการทำให้ความเข้มข้น ของออกซิเจนลดลง ส่งผลให้สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อให้ความร้อนสูง เกินจุดหลอมเหลวในกระบวนการ โลหะบัดกรีจึงสามารถหลอมเหลว ไหล และเชื่อม ประสานได้ดีกว่า จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่าปรับตั้ง Reflow time ที่ระดับต่ำและ N_2 ที่ ระดับสูงสามารถลดสัดส่วนของเสียได้มากที่สุด



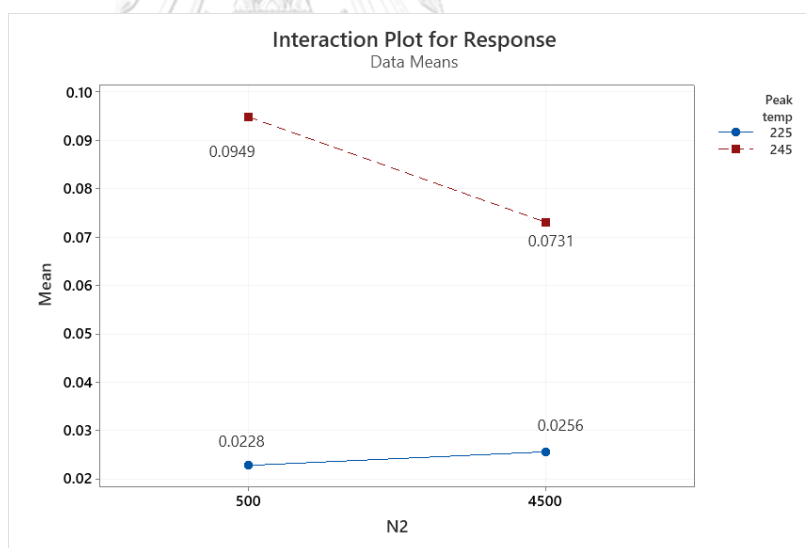
รูปที่ 6.22 ผลกระทบระหว่าง Reflow time กับ N_2

3) ผลกระทบร่วมระหว่าง Peak temperature และ N_2

จากรูปที่ 6.23 พบว่า เมื่อ Peak temperature มีค่า 225°C จะเกิดสัดส่วน ของเสียในระดับที่ต่ำกว่าที่ Peak temperature มีค่า 245°C ไม่ว่าจะใช้ N_2 เป็น 500 ppm หรือ 4500 ppm ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองการถดถอยใน หน่วยที่เป็นค่ารหัสของเทอม Peak temperature ที่มีค่าเป็นบวก (+ 0.029922 Peak temperature) คือค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับปัจจัย Peak temperature มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลกระทบร่วมสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อ Peak temperature มีค่า 225°C แล้วทำการเพิ่ม N_2 จาก 500 ppm เป็น 4500 ppm ส่งผล ให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 0.0228 เป็น 0.0256 หรือ

เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0028 ในขณะที่เมื่อ Peak temperature มีค่า 245°C แล้วทำการเพิ่ม N_2 จาก 500 ppm เป็น 4500 ppm ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียลดลงจาก 0.0949 เป็น 0.0731 หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0218 สามารถสรุปได้อีกว่า เมื่อ N_2 มีค่า 4500 ppm จะเกิดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยในระดับที่ต่ำกว่า N_2 มีค่า 500 ppm อีกทั้ง N_2 มีค่า 4500 ppm มีขนาดการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเสียน้อยกว่า N_2 มีค่า 500 ppm เมื่อเพิ่ม Peak temperature จาก 225°C เป็น 245°C

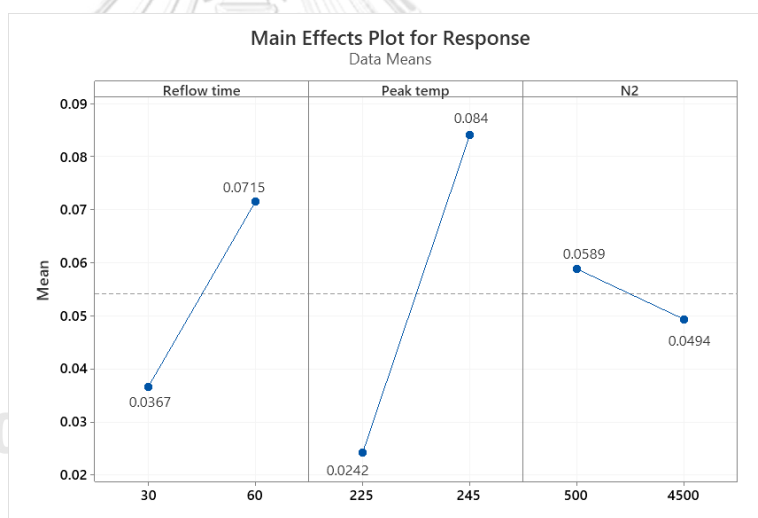
โดยสามารถวิจารณ์ผลได้ว่า เนื่องจากการให้ความร้อนที่มากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของโลหะบัดกรี ขณะที่การไหลของโลหะบัดกรีไม่ถูกรบกวน เนื่องจากได้ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะหลอมเหลวที่เป็นผลจากการใส่ไนโตรเจนเข้าไปลดความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการ จะเห็นได้ว่าสัดส่วนของเสียที่น้อยที่สุดเกิดจากเมื่อ Peak temperature ปรับตั้งให้อยู่ในระดับต่ำ และ N_2 ถูกปรับตั้งให้อยู่ในระดับสูง



รูปที่ 6.23 ผลกระทบระหว่าง Peak temperature กับ N_2

จากการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมข้างต้น สามารถสรุปผลด้วยกราฟผลกระทบหลัก (main effect) อีกครั้งตามรูป 6.24 คือจะเห็นได้ว่า ทั้ง 3 ปัจจัยเป็นผลกระทบหลักต่อสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เนื่องจากเส้นกราฟไม่ขนานไปการแกน X โดยสามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

- 1) ผลกระทบหลักของปัจจัย Reflow time ต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนของเสียจะเพิ่มขึ้นจาก 0.0367 เป็น 0.0715 หรือเพิ่มขึ้น 0.0348 เมื่อมีการเพิ่มเวลาจาก 30 s เป็น 60 s ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองที่มีค่าเป็นบวก (+ 0.017444 Reflow time)
- 2) ผลกระทบหลักของปัจจัย Peak temperature ต่อสัดส่วนของเสียจะเพิ่มขึ้นจาก 0.0242 เป็น 0.084 หรือเพิ่มขึ้น 0.0598 เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 225°C เป็น 245°C ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองที่มีค่าเป็นบวก (+ 0.029922 Peak temperature)
- 3) ผลกระทบหลักของปัจจัย N₂ ต่อสัดส่วนของเสียจะลดลงจาก 0.0589 เป็น 0.0494 หรือลดลง 0.0095 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณก๊าซไนโตรเจนจาก 500 ppm เป็น 4500 ppm ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองที่มีค่าเป็นลบ (- 0.004743 N₂)



รูปที่ 6.24 ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย

จากการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแล้วยังสามารถเลือกค่าปรับตั้งที่เหมาะสมจากการพิจารณากราฟอิทธิพลรวมทั้ง 3 กราฟและดูค่าปรับตั้งที่ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของเสียน้อยที่สุดจากตารางที่ 6.11 พบว่า เมื่อตั้งค่าด้วยคอนดิชันที่ 2 (Reflow time ที่ระดับต่ำเท่ากับ 30 s, Peak temperature ที่ระดับต่ำเท่ากับ 225 °C และ ใช้ N₂ เท่ากับ 4500 ppm) จะได้ค่าสัดส่วนของเสียน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0117

6.3. สรุประยะการปรับปรุงกระบวนการ

ในระยะการปรับปรุงกระบวนการ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ทั้ง 7 ปัจจัย โดยทำการศึกษาชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน (ปัจจัยที่ 1) เพื่อเป็นองค์ประกอบในการปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ (ปัจจัยที่ 3) แล้วจึงทำการปรับปรุงและเปรียบเทียบความสามารถในการลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ในปัจจัยที่ 2 – 7 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ OFAT รวมไปถึงการทดสอบผลลัพธ์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ก่อนนำไปสู่การศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ 6 และ 7 ซึ่งประกอบไปด้วย Reflow time Peak temperature และ การใช้ N_2 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial และการหาสมการความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองการถดถอย ได้มาซึ่งผลลัพธ์ในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 ผลลัพธ์และวิธีการทำงานใหม่

ลำดับ ปัจจัย	กระบวนการ	ปัจจัย	ผลลัพธ์
1	การออกแบบ ผลิตภัณฑ์	ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิด แตกต่างกัน	การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบน พื้นผิวทองดีกว่พื้นผิวดีบุก
2	กระบวนการจัดวาง แผ่นวงจร (FPC set)	การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง	การเปลี่ยนไปใช้แผ่นครอบแม่เหล็กใน การยึดแผงวงจร
3	กระบวนการพิมพ์ โลหะบัดกรี (Solder print)	การออกแบบแม่พิมพ์ไม่ เหมาะสม	ระยะรูเปิดห่างออกจากพื้นผิวทอง 0.5 mm ที่ระดับเดิม
4		ความหนาของแม่พิมพ์น้อย เกินไป	5 mils ที่ระดับเดิม
5		แรงดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่ เหมาะสม	100 N
6	กระบวนการบัดกรี (Reflow)	การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม	Reflow time = 30 s Peak temperature = 225 °C
7		ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่ เหมาะสม	ใช้ N_2 (N_2 =4500 ppm)

บทที่ 7

ระยะควบคุมกระบวนการ

ขั้นตอนนี้จะนำค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุงที่ได้จากบทที่ 6 มาทดสอบผ่านการเฝ้าติดตามเพื่อยืนยันผลโดยการใช้ในกระบวนการผลิตจริงภายใต้ระยะเวลาและแผนการควบคุมที่รัดกุมกว่า แผนการควบคุมการผลิตปกติ (Launch control plan) ทั้งนี้หากผลการทดสอบสามารถยอมรับได้คือ ทำให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ลดลงและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อผลผลิตหรือข้อบกพร่องประเภทอื่น จึงจะทำการทบทวนและปรับปรุงเอกสารที่เกี่ยวข้อง อาทิ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Work instruction) ฟอรมการตรวจสอบในกระบวนการผลิต (Daily check sheet) รวมไปถึง FMEA และ Control plan เพื่อให้การปรับปรุงดังกล่าวส่งผลอย่างยั่งยืน

7.1. การทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุง

ผู้วิจัยจะทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยการเฝ้าติดตามสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์เมื่อใช้ค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุงในกระบวนการผลิตจริง โดยมีระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าปรับตั้งใหม่ของแต่ละปัจจัยในระดับที่เหมาะสมหลังการปรับปรุง

กระบวนการ	ปัจจัย	ค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุง
กระบวนการจัดวางแผ่นวงจร (FPC set)	การติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง	การเปลี่ยนไปใช้แผ่นครอบแม่เหล็กในการยึดแผงวงจร
กระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder print)	การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม	ระยะรูเปิดห่างออกจากพื้นผิวทอง 0.5 mm ที่ระดับเดิม
	ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป	5 mils ที่ระดับเดิม
	แรงดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม	100 N
กระบวนการบัดกรี (Reflow)	การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม	Reflow time = 30 s Peak temperature = 225 °C
	ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม	ใช้ N ₂ (N ₂ =4500 ppm)

7.1.1. การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดสอบขณะเฝ้าติดตามเพื่อยืนยันผล

ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยใช้ขนาดของตัวอย่างในการทดสอบอย่างเหมาะสมต่อการเป็นตัวแทนประชากร สามารถใช้สมการเพื่อคำนวณขนาดตัวอย่างเมื่อไม่ทราบประชากรได้จากสมการเดิมในบทที่ 4 และสัดส่วนของเสียจากคอนดิชันที่ดีที่สุดในบทที่ 6 ได้ผลลัพธ์เท่ากับ $n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 pq}{e^2} = \frac{(1.96)^2 (0.0117)(1-0.0117)}{0.005^2} = 1,776.83$ ขึ้น หรือต้องการขนาดตัวอย่างอย่างน้อย 1,777 ขึ้น ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.005 ทั้งนี้เพื่อในครอบคลุมไปถึงการผลิตทั้งสองกะผลิตและเป็นไปตามระยะเวลาเฝ้าระวังตามข้อกำหนดของลูกค้า ผู้วิจัยจึงใช้ขนาดตัวอย่างในการทดสอบจากแผนการผลิต 6 เดือนต่อเนื่อง หรือ เท่ากับ 243,783 ขึ้น

7.1.2. กำหนดแผนการเฝ้าติดตามและแผนควบคุม

เนื่องจากการทดสอบใช้งานในกระบวนการผลิตจริงตามข้อกำหนดของลูกค้า จำเป็นต้องให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบถึงจุดเปลี่ยนแปลง ผลกระทบที่อาจจะเกิด ระยะเวลา กระบวนการที่ควรเฝ้าระวัง และผู้เกี่ยวข้องสามารถรายงานปัญหาหรือปฏิบัติตามแผนการรองรับเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมในขณะที่ผลิตได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการประชุมผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจากแผนกต่าง ๆ ก่อนทำการเริ่มใช้งานค่าปรับตั้งใหม่ โดยมีแผนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. วิศวกรออกแบบกำหนดโมเดลในการทดสอบด้วยชื่อใหม่ คือ A-1 โดยยังคงใช้วัตถุดิบในการผลิตและการออกแบบการผลิตตามโมเดล A เช่นเดิมยกเว้น ค่าปรับตั้งที่ได้จากการปรับปรุง
2. วิศวกรกระบวนการออกเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานด้วยค่าปรับตั้งใหม่ดังตารางที่ 7.2 – 7.4 อัปเดตโปรแกรมสำหรับเครื่องจักร รวมถึงออกเอกสารต่างๆอย่าง Run card, Daily check sheet และ Visual aid ที่ใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ภายใต้ชื่อโมเดล A-1
3. ทีมงานเข้าร่วมการประเมินเพื่อกำหนดแผนควบคุมในกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปภาพแผนควบคุมรูปที่ 7.1
4. ทีมงานทวนสอบความพร้อมก่อนการเริ่มใช้งานค่าปรับตั้งใหม่ในเดือนกรกฎาคม
5. เก็บข้อมูลสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จากกระบวนการ Final inspection ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม 2565
6. สรุปผลการทดสอบ และ ผลกระทบอื่น ๆ จากการเฝ้าติดตาม โดยหากผลการทดสอบสามารถยอมรับได้จะทำการปรับปรุงเอกสารที่เกี่ยวข้องในโมเดล A ตามโมเดล A-1 อย่างถาวรเพื่อรักษามาตรฐานการปฏิบัติงานในการผลิตและคงระดับสัดส่วนของเสียต่อไป

ตารางที่ 7.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการจัดวางแผ่นวงจร (FPC set process)

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	รายละเอียด
1	การทำ 5ส.	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องทำ 5ส. จากนั้นทำการลงบันทึก
2	การตรวจสอบความเรียบร้อยและความถูกต้องของอุปกรณ์	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องตรวจสอบความเรียบร้อยและความถูกต้องของอุปกรณ์ว่าถูก Part no. และอยู่ในสถานะพร้อมใช้งานหรือไม่ตามแบบฟอร์ม จากนั้นทำการลงบันทึก
3	การโหลดงาน	1) โหลด fixture ให้ตรงกับตำแหน่ง pin ของ jig 2) โหลด FPC sheet ลงบน fixture ตามทิศทางรูโหลดที่ระบุ 3) โหลด magnetic cover ทับลงบนแผ่นแผงวงจร 4) นำงานออกจาก jig เพื่อเข้าสู่กระบวนการถัดไป
4	การจัดเก็บอุปกรณ์	วาง magnetic cover ทับลงบน fixture ก่อนการเก็บเข้าสล็อต

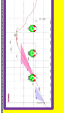
ตารางที่ 7.3 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี (Screen print process)

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	รายละเอียด
1	การทำ 5ส.	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องทำ 5ส. จากนั้นทำการลงบันทึก
2	เลือกโปรแกรมในการผลิต	เลือกโปรแกรมการผลิตภายใต้ชื่อโมเดล A-1 (ใช้แรงดันขณะพิมพ์ = 100 N)
3	การตรวจสอบ Machine condition	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องตรวจสอบ Machine condition ที่หน้าจอเครื่องจักรตามฟอร์ม Master item of condition and tool จากนั้นทำการลงบันทึก
4	การตรวจสอบความเรียบร้อยและความถูกต้องของโลหะบัดกรี	ทุกๆการเปลี่ยนกระป๋องโลหะบัดกรี พนักงานจะต้องตรวจสอบวันและเวลาหมดอายุ รวมไปถึง Part no.ของโลหะบัดกรี จากนั้นทำการลงบันทึก
5	การไหลตงาน	FPC sheet จะถูกส่งจากกระบวนการก่อนหน้านี้เข้าสู่กระบวนการพิมพ์และส่งออกจากกระบวนการพิมพ์อัตโนมัติเมื่อการพิมพ์เสร็จสิ้นด้วยสายพานลำเลียง
6	การตรวจสอบคุณภาพหลังพิมพ์	FPC sheet ทุกชิ้นหลังพิมพ์จะถูกตรวจสอบคุณภาพของโลหะบัดกรีหลังพิมพ์ด้วยเครื่อง SPI

ตารางที่ 7.4 ขั้นตอนการปฏิบัติงานในกระบวนการบัดกรี (Reflow process)

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	รายละเอียด
1	การทำ 5ส.	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องทำ 5ส. จากนั้นทำการลงบันทึก
2	เลือกโปรแกรมในการผลิต	เลือกโปรแกรมการผลิตภายใต้ชื่อโมเดล A-1 (Reflow profile ใหม่ ที่มีค่า Reflow time = 30 s, Peak temperature = 225 °C และ เปิดใช้ N ₂ = 4500 ppm)
3	การตรวจสอบ Machine condition	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องตรวจสอบ Machine condition ที่หน้าจอเครื่องจักรตามฟอร์ม Master item of condition and tool จากนั้นทำการลงบันทึก
4	การตรวจสอบความเรียบร้อยของ Reflow master board	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องตรวจสอบการชำรุดและวันหมดอายุของ Reflow master board จากนั้นทำการลงบันทึก
5	การตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการก่อนเริ่มผลิต	ก่อนเริ่มกะและทุกการเปลี่ยนโมเดลการผลิต พนักงานจะต้องโหลด Reflow master board เข้าสู่กระบวนการก่อนเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการโดยพิจารณาจากค่า %PWI ที่โชว์พร้อมกับ Reflow profile ที่หน้าจอเครื่องจักร (%PWI ที่ยอมรับได้ คือมี %Error ไม่เกิน $\pm 100\%$)
6	การโหลดงาน	FPC sheet จะถูกส่งจากกระบวนการก่อนหน้าเข้าสู่กระบวนการบัดกรีและส่งออกจากกระบวนการบัดกรีอัตโนมัติเมื่อการเชื่อมประสานเสร็จสิ้นด้วยสายพานลำเลียง

รูปที่ 7.1 แผนควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

CONTROL PLAN											
Control Plan Number		Revision:		Key Contact/Phone		Date (Orig.)		Date (Rev.)			
Part Number		CPN:		Core Team		Customer Engineering Approval/Date (If Req'd.)					
M/PIN:											
Part Name/Description		Supplier/Plant Approval/Date		Supplier Code		Customer Quality Approval/Date (If Req'd.)					
FPCA		N/A		N/A		Other Approval/Date (If Req'd.)					
Supplier/Plant											
Item	PART/PROCESS NUMBER	PROCESS NAME/OPERATION DESCRIPTION	CHARACTERISTICS	SPECIAL CHRG CLASS	PRODUCT/PROCESS SPECIFICATION TOLERANCE	EVALUATION MEASUREMENT TECHNIQUE	METHODS		CONTROL METHOD	REACTION & CORRECTION PLAN	
			NO.				SIZE	SAMPLE FREQUENCY			
Others process	3	3100	FPC setting	Rework fixture	1	- Ready to use - part no. XXXX	Visual (Naked eye)	1. Start shift 2. Change model	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X	Inform Supervisor to change	
					LCP	- Ready to use - part no. XXXX	Visual (Naked eye)	1. Start shift 2. Change model	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X	Stop production and call meeting	
Others process	5	3120	Solder Printing (To print solder cream on FPC's opening pads)	Screen printer	1	Refer Master item of condition and tool Doc No. XXXX of model A-1	Visual (Naked eye)	1. Start shift 2. Change model	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X	Hold for disposition by team	
					LCP	100 N	Visual (Naked eye)	1. Start shift 2. Change model	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X	Stop production and call meeting	
					2	Solder cream part no	Visual (Naked eye)	Every bottle (Before use solder)	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X, Solder tag	Inform supervisor Request to change new bottle Hold all deviated part for disposition at WRB	
					3	Solder expiry date (Volume) Solder quality (Bridging, Ball, Misalignment)	SPI machine (on display)	100%	Digital Run card XXXX Form: X Product OCAP XXXX	Inform technician/supervisor Confirm with WI or check sheet Hold all deviated parts for disposition at WRB then perform OCAP doc no. XXXX	
					1	Machine condition (Pressure Speed, Set not part no.)	Display	1. Start shift 2. Change model	Daily Check sheet Doc No. XXXX Form: X		
					2	Machine condition (Temp, Time)	Display	1. Start shift 2. Change model	Daily Check sheet Doc No. XXXX Form: X	Inform technician/supervisor Confirm with WI or check sheet Hold all deviated parts for disposition at WRB then perform OCAP doc no. XXXX	
					3	Rework profile	Memory unit checker	1. Start shift 2. Change model	Profile graph Doc No. XXXX Control chart Doc No. XXXX		
					LCP	New Rework profile	Memory unit checker	1. Start shift 2. Change model		Stop production and call meeting	
					4	Rework master board (Cleanance and signed date)	Visual (Naked eye)	1. Start shift 2. Change model	Daily check sheet Doc No. XXXX Form: X	Inform Supervisor and technician to renew *not allow to start production without masterboard confirmation	
Others process	14	3540	Final inspection (To check appearance)	Microscope 10X	1	FPCA appearance of Backside	Magrifier 10X	Every Lot	Digital Runcard XXXX Form: X	Send defect to WRB	
					2	FPCA appearance of Frontside	Microscope 10X	Every lot	Digital Runcard XXXX Form: X Product OCAP Doc No. XXXX	Perform product OCAP doc no. XXXX	
					LCP	Defective rate of Solder incomplete	Microscope 10X	Every lot	Digital Runcard XXXX Form: X Product OCAP Doc No. XXXX		
Instruction Title:											
Doc. No. :											
Effective Date :											
Rev. No. :											
Page No. :											
Control plan Assy link Ph Free											

7.1.3. ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการเฝ้าติดตามผล 6 เดือนการผลิต

จากการปรับปรุงในเดือนมิถุนายน 2565 ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลสัดส่วนของเสียจากการผลิตต่อเนื่องตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม 2565 จากกระบวนการ Final inspection พบว่า สัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นเป็นไปตามดังผลในตารางที่ 7.5 คือ สัดส่วนของเสียจากการผลิตมีค่าอยู่ในช่วง 0.91% ถึง 1.32% และ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.17% โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของเสียจากการทดลองในบทที่ 6 ที่ทำการทดสอบจากปริมาณการผลิต 10 ล็อต พบว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.17% และเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงที่เท่ากับ 4.14% แล้ว พบว่าสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นลดลงกว่า 71.74% ของสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง โดยเมื่อคำนวณจาก จำนวนชิ้นงานของเสีย x ราคาขายผลิตภัณฑ์ (39.38 บาทต่อชิ้น) คิดเป็นมูลค่าสูญเสีย 112,272 บาทในระยะเวลา 6 เดือนหลังการปรับปรุง หรือเฉลี่ย 18,712 บาทต่อเดือน

ตารางที่ 7.5 สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จากการติดตามผล

เดือนผลิต	จำนวนผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย ข้อบกพร่องโลหะ ผิดปกติ (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย	ราคารวม (บาท)
กรกฎาคม	15,215	201	1.32%	7,915
สิงหาคม	36,720	442	1.20%	17,406
กันยายน	57,493	738	1.28%	29,062
ตุลาคม	112,630	1,235	1.10%	48,634
พฤศจิกายน	11,200	102	0.91%	4,017
ธันวาคม	10,525	133	1.26%	5,238
รวม	243783	2851	1.17%	112,272

7.2. สรุประยะควบคุมกระบวนการ

สำหรับระยะควบคุมกระบวนการ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากระยะการปรับปรุงกระบวนการทั้ง 6 ปีด้วยค่าปรับตั้งที่ระดับที่เหมาะสมภายใต้การวางแผนทดสอบและแผนควบคุมกรณีพบปัญหาในการผลิต พบว่าผลลัพธ์สามารถยอมรับได้จึงนำไปสู่การนำเข้าไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อเข้าสู่ช่วงเฝ้าระวังต่อไปนี้ โดยจากการเฝ้าระวังและติดตามผลตลอด 6 เดือน ในปี 2565 พบว่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์หลังการนำเข้าไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงลดลงจาก 4.14% เป็น 1.17% หรือ ลดลงกว่า 71.74% จากสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง ส่งผลให้มูลค่าสูญเสียลดลงจาก 517,542 บาทจาก 10 เดือนการผลิต หรือคิดเป็น 51,753 บาทต่อเดือน เหลือเพียง 112,272 บาทจาก 6 เดือนการผลิต หรือคิดเป็น 18,712 บาทต่อเดือน แสดงว่าหลังการปรับปรุง สามารถลดมูลค่าสูญเสียจากเดิมต่อเดือนได้ถึง 33,041 บาท



บทที่ 8

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นโมเดล A โดยใช้หลักการ DMAIC ของเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) ซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินการของแต่ละระยะได้ดังต่อไปนี้

8.1. สรุประยะศึกษาข้อมูลและการนิยามปัญหา (Define Phase)

ในระยะศึกษาข้อมูลและการนิยามปัญหา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะและกระบวนการผลิตในโมเดล A ตลอดจนศึกษาสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ (ที่พื้นที่ทองและที่พื้นที่ดีบุก) จากข้อมูลสัดส่วนของเสีย 10 เดือนการผลิตในปี 2563 พบว่าโมเดล A มีสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องทั้งสองนี้คิดเป็นกว่า 4.14% ของปริมาณการผลิต และทำให้เกิดมูลค่าความสูญเสียกว่า 517,542 บาท จึงนำมาสู่การกำหนดตัวชี้วัดที่ต้องการลดสัดส่วนของเสียลง 70% และให้ได้มาซึ่งสัญญาโครงการการเริ่มจากเดือนกรกฎาคม 2564 ไปจนถึง มิถุนายน 2565

8.2. สรุประยะวิเคราะห์ระบบการวัด (Measure Phase)

ในระยะวิเคราะห์ระบบการวัด ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบวัดของพนักงานตรวจสอบคุณภาพ 3 คน ณ กระบวนการ Final inspection ซึ่งใช้ระบบวัดแบบจำนวนนับโดยให้พนักงานตัดสินใจจากการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโลหะบัดกรีบนชิ้นงานด้วยสายตาผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า พบว่าพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คน ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากเกณฑ์การตัดสินใจ AIAG (4th edition, 2008) และ ข้อกำหนดของลูกค้า แสดงว่าระบบวัดเชื่อถือได้และไม่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนของเสีย ทั้งนี้เมื่อคำนวณขนาดตัวอย่างเพื่อใช้วัดสภาพปัญหา พบว่าต้องเก็บขนาดตัวอย่างอย่างน้อย 6,160 ชิ้นจึงจะเหมาะสมในการเป็นตัวแทนของกลุ่มประชากร

8.3. สรุประยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

ในระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ผู้วิจัยได้ค้นหาปัจจัยเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตที่สามารถก่อให้เกิดปัญหา (Potential cause) เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และกำจัดปัจจัยรากที่แท้จริง (Root cause) โดยทำการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุที่สามารถก่อให้เกิดปัญหา ข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ และได้ทำการจัดลำดับความสำคัญต่อด้วย FMEA พบว่า 7 ปัจจัยที่ควรถูกนำมาปรับปรุงเป็นอันดับแรกเนื่องจากมีคะแนน RPN >100 โดยสามารถจัดกลุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเดียวกัน ก่อนนำไปจัดลำดับเพื่อทำการปรับปรุงตามลำดับของกระบวนการผลิต ดังนี้ 1) ชนิดพื้นผิวของพื้นที่เปิดแตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยจากกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ 2) การติด Glass cloth ผิดวิธี/เยื้อง ซึ่งเป็นปัจจัยจากกระบวนการจัดวางแผ่นวงจร 3) การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม 4) ความหนาของแม่พิมพ์น้อยเกินไป และ 5) ความดันที่ใช้ขณะพิมพ์ไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยจากกระบวนการกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี 6) การตั้งค่า Reflow profile ไม่เหมาะสม และ 7) ความเข้มข้นของ Oxygen ไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยจากกระบวนการกระบวนการบัดกรี

8.4. สรุประยะปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase)

ในระยะปรับปรุงกระบวนการ ผู้วิจัยนำปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่สามารถส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์จากระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาทั้ง 7 ปัจจัยมาทำการปรับปรุงโดยเปรียบเทียบความสามารถในการลดสัดส่วนของเสียระหว่างสองระดับของแต่ละปัจจัยด้วยการทดสอบสมมติฐาน ก่อนนำไปสู่การศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ 6 (Reflow time และ Peak temperature) และ 7 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial และการหาสมการความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองการถดถอย พบว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับค่าปรับตั้งใหม่ คือ

- การเปลี่ยนไปใช้แผ่นครอบแม่เหล็กในการยึดแผงวงจรสำหรับปัจจัยการติด Glass cloth ผิดวิธี, เยื้อง ในกระบวนการจัดวางแผ่นวงจร
- คงการออกแบบและความหนาของแม่พิมพ์ไว้ที่ระดับเดิม โดยใช้ความดันขณะปาดที่ 100 N ในกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรี
- ตั้งค่าในกระบวนการบัดกรีด้วย Reflow time 30 s Peak temperature 225 °C และเปิดใช้ N₂

8.5. สรุประยะควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

ในระยะควบคุมกระบวนการ ผู้วิจัยได้ทำค่าปรับตั้งใหม่มาทดสอบผลด้วยโมเดล A-1 (Test run model) และทำการเก็บข้อมูลตามแผนการทดสอบ พบว่าผลจากการทดสอบสามารถลดสัดส่วนของเสียได้จริงและไม่พบผลกระทบหรือปัญหาอื่นจากการทดสอบจึงทำการปรับปรุงเอกสารที่เกี่ยวข้องอย่างวิธีการปฏิบัติงาน ฟอรมการตรวจสอบประจำวัน รวมไปถึงแผนควบคุม กระทั่งมีการติดตามผลในระยะยาว 6 เดือนในปี 2565 พบว่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องโลหะบัดกรีไม่สมบูรณ์ ลดลงจาก 4.14% เป็น 1.17% หรือ ลดลงกว่า 71.74% จากสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง ส่งผลให้มูลค่าสูญเสียลดลง 33,041 บาทต่อเดือน จาก 51,753 บาทต่อเดือน เหลือเพียง 18,712 บาทต่อเดือน

8.6. ข้อจำกัดสำหรับงานวิจัย

- 1) ผลของค่าปรับตั้งที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกศึกษาและปรับปรุงเพียง 7 ปัจจัยเท่านั้น และสามารถนำมาใช้ได้กับโมเดล A เท่านั้น
- 2) รุ่นเครื่องจักรและชนิดของโลหะบัดกรีจะสามารถมีการเปลี่ยนแปลงในอนาคตด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของผลลัพธ์จากการปรับปรุง

8.7. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

- 1) สามารถใช้วิธีการเดียวกันเป็นแนวทางในการปรับปรุงโมเดลอื่นๆ ที่มีลักษณะเฉพาะใกล้เคียงกัน หรือปรับใช้ในสายการผลิตอื่นๆ
- 2) สามารถศึกษาผลกระทบร่วมของปัจจัยความเร็วและแรงดันใบพัดเพิ่มเติมเนื่องจากเป็นการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่ไม่ต้องมีการลงทุนอุปกรณ์ใหม่หรือเพิ่มเติมเพื่อลดสัดส่วนของเสียให้ได้มากที่สุด
- 3) สามารถใช้เป็นบทเรียนในการออกแบบเพื่อการผลิต (DFM) ในโมเดลใหม่

8.8. การตีพิมพ์งานวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการส่งผลงานวิจัยในสาขา Quality management เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการครั้งที่ 41 ประจำปี 2566 โดยผู้วิจัยได้เข้าร่วมรับฟังและนำเสนอผลงาน ในวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้งานวิจัยได้ถูกรวบรวมในหนังสือประมวล บทความ (proceedings) ลำดับที่ 125 หน้า 562 – 568

(ลิงค์: <https://eng.src.ku.ac.th/ienet2023/proceedings.html>)

ผู้วิจัยได้รับประโยชน์จากการเข้าฟังงานวิจัยและได้แลกเปลี่ยนองค์ความรู้เชิงวิชาการจาก อุตสาหกรรมที่หลากหลายภายใต้หัวข้อต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น Operation research, Optimization and Decision Support systems, Automation and Smart technology, Supply chain and Logistics management, Work study, Ergonomics, Safety and Plant design, Production and Operations management, Quality engineering and management, Green technology, Innovation management and technology transfer และ Engineering economy and Industrial cost analysis อีกทั้งยังได้รับความคิดเห็นจากกรรมการและผู้เข้าฟังในเรื่องของการศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในแต่ละกระบวนการแม้ปัจจัยดังกล่าวมีค่า $RPN < 100$ และการศึกษาปัจจัยในกระบวนการบัดกรีเพิ่มเติม ซึ่งในการส่งผลงาน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงเพียงกระบวนการพิมพ์โลหะบัดกรีเท่านั้น ในเล่มวิทยานิพนธ์จึงได้มีการศึกษาเพิ่มในกระบวนการบัดกรี รวมถึงศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยย่อยในกระบวนการนี้อีกด้วย

บรรณานุกรม

1. Hong, S.-J., H.-Y. Kim, and S.-S. Han, *Process Optimization for Flexible Printed Circuit Board Assembly Manufacturing*. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2012. 13(3): p. 129-135.
2. Ltd., M.M.C.T., *Products*. 2021: <https://www.mektec.co.th/>.
3. Durairaj, R., S. Ramesh, S. Mallik, A. Seman, and N. Ekere, *Rheological characterisation and printing performance of Sn/Ag/Cu solder pastes*. Materials & Design, 2009. 30(9): p. 3812-3818.
4. Hwang, J.S., *Solder Paste Technology and Applications*, in *Solder Joint Reliability: Theory and Applications*, J.H. Lau, Editor. 1991, Springer US: Boston, MA. p. 38-91.
5. Bevan, H., N. Westwood, and R. Crowe, *Lean Six Sigma: Some Basic Concepts*, in *Lean Six Sigma: Some Basic Concepts*. 2015.
6. Osothsilp, N., *Overview of Quality and Six Sigma*, in *Overview of Quality and Six Sigma*. 2020. p. 1-16.
7. Ngamsamrong, A., *Defective Reduction from Foreign Material Contamination in Female Connector Plug Manufacturing Process in Industrial Engineering*. 2022, Chulalongkorn University.
8. Panumpai, P. and D. Thawesaengskulthai, *Defect Reduction for Evaporator Product in Automotive Industry Using Six Sigma Approach DMAIC*. Research and Development, 2011. 22: p. 56-64.
9. Rakthongthai, C., *Reduction of Defective Rate from Crack Defects in Painting Process of Motorcycle Parts*. Srinakharinwirot University Engineering Journal, 2021. 16: p. 84-94.
10. Veselý, P., D. Bušek, O. Krammer, and K. Dušek, *Analysis of no-clean flux spatter during the soldering process*. Journal of Materials Processing Technology, 2020. 275.
11. Lau, F.K.H. and V.W.S. Yeung, *A hierarchical evaluation of the solder paste printing process*. Journal of Materials Processing Technology, 1997. 69(1): p. 79-

- 89.
12. Piotrowska, K., F. Li, and R. Ambat, *Transformation of reflow solder flux residue under humid conditions*. Microelectronics Reliability, 2021. 123.
 13. Olivér, K. and I. Balázs, *Lead-Free Soldering Technology Review-Evaluating Solder Pastes and Stencils*. ISSE, 2006. 29: p. 86-91.
 14. Wang, H., T. He, and S.W. Yoon, *Recurrent Neural Network-Based Stencil Cleaning Cycle Predictive Modeling*. Procedia Manufacturing, 2018. 17: p. 86-93.
 15. *Stencils handbook*. Tecan Group Ltd.
 16. Gopal, S., J. Mohd Rohani, S.r. Mohd Yusof, and Z. Abu Bakar, *Optimization of Solder Paste Printing Parameters Using Design of Experiments (DOE)*. Jurnal Teknologi, 2005. 43(1).
 17. *Reflow technology*, in *Reflow technology handbook*. 1992, Norman R. Cox M.S.M.E.
 18. *TDS of Pb free solder*, in *Koki-no clean LEAD FREE solder paste*. 2005, KOKI company Ltd.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศตพร คุณาพิสิฐกุล
วัน เดือน ปี เกิด	26 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดสุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยี นานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	102/163 หมู่บ้านโฮมเพลสร์ตนาธิเบศร์ ถนนบางทราย-ไทรน้อย ตำบลบาง เลน อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี 11140

