

การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ว



นายวิรุทธ์ สิมเสมอ

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

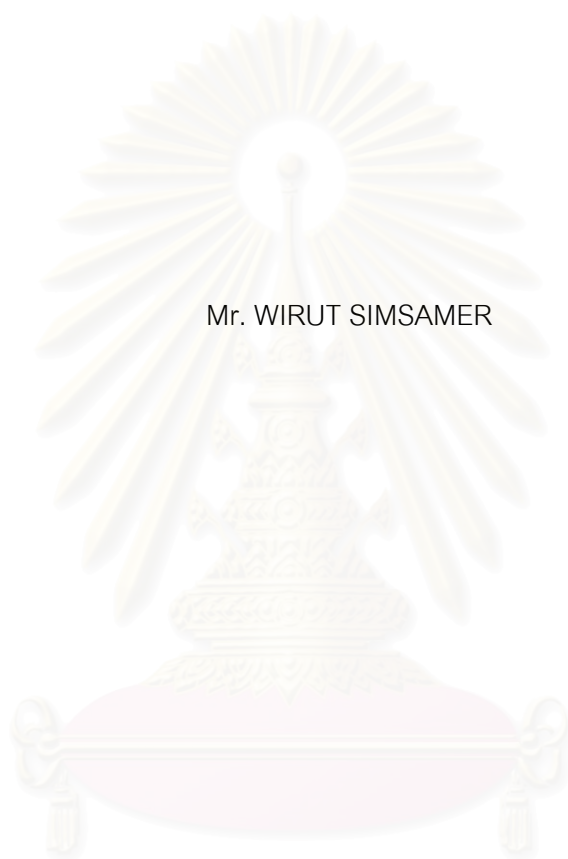
คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# REFLOW MACHINE CAPACITY IMPROVEMENT



Mr. WIRUT SIMSAMER

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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์

โดย

นายวิรุทธิ์ สิมเสมอ

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

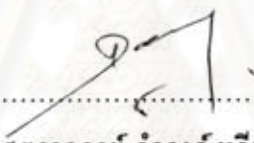
อาจารย์ที่ปรึกษา

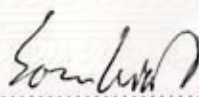
อาจารย์.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์)

วิรุทธิ์ สิมเสมอ : การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์ (REFLOW MACHINE CAPACITY IMPROVEMENT) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, 140 หน้า

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์ ซึ่งใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยมีตัวแปรตอบสนองที่สนใจ 2 ตัวคือ เวลาที่คงอยู่ และอุณหภูมิสูงสุด

เนื่องจากอุณหภูมิของการทำรีโฟลว์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สูงขึ้น ส่งผลให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดของการทำรีโฟลว์ในการผลิตตัวเก็บประจุสูงขึ้นตามไปด้วย โดยการลดความเร็วของสายพานของเครื่องรีโฟลว์ช้าลงจาก 1.0 เมตรต่อนาที เป็น 0.6 เมตรต่อนาที เพื่อเพิ่มเวลาที่คงอยู่จาก 10 วินาที เป็น 30 วินาที โดยที่อุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  แต่ส่งผลต่อกำลังการผลิตของเครื่องลดลงถึงร้อยละ 40 ดังนั้นหากใช้ความเร็วสายพานให้เร็วกว่า 0.6 เมตรต่อนาทีได้ และเวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน  $270^{\circ}\text{C}$  ก็จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์ได้

จากการใช้แผนผังก้างปลาและการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) พบว่า ปัจจัยที่ถูกเลือกและใช้ในการทดลองเบื้องต้นโดยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2<sup>3</sup> มี 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และความเร็วของสายพาน

จากการทดลองข้างต้นพบว่าปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3<sup>3</sup> มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และความเร็วของสายพาน ผลจากการทดลองสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดได้ และสามารถสรุปการตั้งค่าเครื่องรีโฟลว์ใหม่โดยการกำหนดความเร็วของสายพานที่ระดับสูงสุดคือ 1.0 เมตรต่อนาที อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 เปลี่ยนจาก  $225^{\circ}\text{C}$  เป็น  $255^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 เปลี่ยนจาก  $260^{\circ}\text{C}$  เป็น  $265^{\circ}\text{C}$  เมื่อได้ประยุกต์ใช้การตั้งค่าของเครื่องรีโฟลว์นี้ สามารถลดเวลานำในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมแบบ Green series โดยรวมได้ 11.6 % และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตรวมได้ 32 ล้านชิ้นต่อเดือน

ภาควิชา .....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต .....วิรุทธิ์ สิมเสมอ  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ปีการศึกษา .....2549.....

## 4771476521 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : DESIGN OF EXPERIMENT / CAPACITY IMPROVEMENT / REFLOW

WIRUT SIMSAMER : REFLOW MACHINE CAPACITY IMPROVEMENT. THESIS

ADVISOR : SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng., 140 pp.

The Objective of this thesis is to improve Reflow machine capacity. The Design of Experiment, Factorial Design, was carried out based on 2 interesting response variables, Keeping time and maximum temperature.

The increase of Reflow temperature in electronics industrial influences the keeping time extension and the rise in maximum temperature of Reflow process in capacitor manufacturing. To increase the keeping time from 10 sec. to 30 sec. with maximum temperature of less than 270 °C, we must reduce the conveyer velocity from 1.0 m/min to 0.6 m/min. However, this will decrease 40% of machine capacity. Improvement of machine capacity should be done by extending keeping time to be more than 30 sec. while the maximum temperature less than 270 °C at conveyer speed more than 0.6 m/min. By using Fish Bone Diagram and FMEA we found that there are 5 factors applied for screening experiment of 2<sup>k</sup> factorial design, 1-5. There were 1<sup>st</sup>.heater temperature, 2<sup>nd</sup>.heater temperature, 3<sup>rd</sup>.heater temperature, 4<sup>th</sup>.heater temperature and conveyer velocity.

The above experimental result showed that there were 3 effective result for the 3<sup>k</sup> factorial design, 3<sup>th</sup> heater temperature, 4<sup>th</sup> heater temperature and conveyer velocity. From this experimental result we are able to develop the regression model of relation between effective factors and response variables to provide the new Reflow machine setting condition as maximum conveyer velocity at 1.0 m/min.. Temperature of heater 3 has been changed from 225 °C to 255 °C while Temperature of heater 4 has been changed from 260 °C to 265 °C. Production lead time of capacitor manufacturing has been reduced by 11.6 %, capacity has been increased by 32 million piece per month, after modifying reflow machine condition.

Department Industrial Engineering..... Student's signature..... 

Field of Study Industrial Engineering..... Advisor's signature..... 

Academic year..... 2006.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีของอาจารย์.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการศึกษาโดยตลอด นอกจากนี้ยังคอยสอบถามความคืบหน้าของวิทยานิพนธ์สม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา และ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์ ที่ได้ตรวจสอบความสมบูรณ์ และให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองงานกรณีสึกษา ผู้บริหาร หัวหน้าแผนก ทุกคนที่ให้ความร่วมมือ รวมทั้งหัวหน้าพนักงานและวิศวกรฝ่ายผลิตทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ สละเวลา ข้อมูล ความคิดเห็น และมีส่วนร่วมในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา รวมทั้งเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	8
2.2 การทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตประจุชนิดแทนทาลัม.....	12
2.3 การทำเอสเอ็มที (Surface Mount Technology) ในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์.....	14
2.4 ตะกั่วเหลวแบบไร้สารตะกั่ว (Lead free solder paste).....	20
2.5 หลักการออกแบบการทดลอง.....	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables).....	54
3.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	54
3.3 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง.....	57
3.4 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	58
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	59
3.6 ขั้นตอนการปรับปรุงกำลังการผลิต.....	61

บทที่	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัย	
4.1 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด.....	62
4.2 การคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองเบื้องต้น.....	64
4.3 การทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	79
4.4 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	83
4.5 ผลการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลองเบื้องต้น.....	97
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
5.1 การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟลิว.....	98
5.2 ผลการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟลิว.....	101
5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด.....	111
5.4 การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟลิว.....	113
5.5 การประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีไฟลิวสำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต.....	127
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	129
6.2 อุปสรรคในงานวิจัย.....	131
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	131
รายการอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	135
ภาคผนวก ข.....	136
ภาคผนวก ค.....	137
ภาคผนวก ง.....	138
ภาคผนวก จ.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดของการทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	14
2.2 แสดงคุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว.....	23
2.3 ส่วนผสมชนิดต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว.....	24
2.4 ผลการพิจารณาส่วนผสมของตะกั่วบัดกรี.....	26
2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn/Ag กับ Sn/Pb.....	28
2.6 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	44
4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA.....	65
4.2 เกณฑ์การประเมินความถี่ในการเกิด (O) สำหรับ FMEA.....	67
4.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ FMEA.....	68
4.4 การประเมินความถี่ในการเกิดผลกระทบจากปัจจัย.....	73
4.5 FMEA เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัย.....	77
4.6 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น.....	78
4.7 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลองเบื้องต้น.....	78
4.8 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น.....	79
4.9 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น.....	80
4.10 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น.....	83
4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นเวลาที่คงอยู่.....	89
4.12 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผล ต่อเวลาที่คงอยู่ในการทดลองเบื้องต้น.....	91
4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นสำหรับคุณสมบัติสูงสุด.....	94
4.14 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อคุณสมบัติสูงสุด ในการทดลองเบื้องต้น.....	96
4.15 ปัจจัยหลักในการออกแบบการทดลอง.....	97
4.16 ปัจจัยที่ถูกควบคุมเพิ่มเติมในการออกแบบการทดลอง.....	97
5.1 ตารางการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง.....	98
5.2 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง.....	101
5.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่.....	106

ตารางที่	หน้า
5.4 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่.....	107
5.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด.....	110
5.6 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุด.....	111
5.7 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแบบการเข้ารหัส.....	112
5.8 ค่าต่ำสุดและสูงสุดของปัจจัยหลักสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	113
5.9 ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการตั้งค่าเครื่องรีโพลีว.....	116
5.10 ผลการเก็บข้อมูลเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด.....	120
5.11 การตั้งค่าเครื่องรีโพลีวสำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต.....	125
5.12 เวลารุ่นในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม ก่อนและหลังการปรับปรุง.....	127

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงแผงวงจร (Print Circuit Board-PCB).....	1
1.2 เครื่องรีโฟลว์ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.....	2
1.3 แสดงรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (Temperature profile).....	2
1.4 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ของตะกั่วเหลวชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (SnPb) และชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead Free).....	3
1.5 แสดงรูปแบบของการเกิดตัวเสียของตัวเก็บประจุประเภทแทนทาลัม.....	4
1.6 แสดงสาเหตุและกระบวนการเกิดตัวเสียของตัวเก็บประจุประเภทแทนทาลัม.....	4
1.7 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาของขั้นตอนการทำรีโฟลว์แบบเดิมและแบบใหม่ สำหรับการผลิตตัวเก็บประจุ.....	5
2.1 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	8
2.2 การเปรียบเทียบผงแทนทาลัมที่ค่าซีวีต่าง ๆ.....	9
2.3 กระบวนการผลิตผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	10
2.4 ภาพถ่ายภาพถ่ายขยายของชั้นแมงกานีสไดออกไซด์.....	11
2.5 ภาพตัดขวางของชั้นต่าง ๆ ในตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	11
2.6 แสดงเครื่องรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	12
2.7 แสดงเวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ในรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (Temperature profile) ของการทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม.....	13
2.8 แสดงแผงวงจรชนิดด้านเดียว.....	15
2.9 แสดงแผงวงจรชนิดสองด้าน.....	15
2.10 แสดงแผงวงจรก่อนและหลังการปาดตะกั่วเหลว.....	16
2.11 แสดงภาพขยาย 10 เท่าหลังการปาดตะกั่วเหลว.....	16
2.12 แสดงแผงวงจรหลังวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	17
2.13 แสดงแผงวงจรกำลังวางชิปวงจรรวม.....	17

รูปที่	หน้า
2.14 แสดงการบัดกรีโดยใช้ลมร้อน.....	18
2.15 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อน ในเครื่องรีโฟลว์.....	19
2.16 แสดงตะกั่วหลอมละลายหลังผ่านรีโฟลว์.....	19
2.17 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	30
2.18 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	31
2.19 แสดงการออกแบบเชิงแพคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	39
2.20 แสดงการออกแบบเชิงแพคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	39
3.1 แสดงแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram).....	55
3.2 แสดงอุปกรณ์เชื่อมต่อ KEYENCE รุ่น NR-250 PC.....	58
4.1 แสดงแผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด.....	62
4.2 แสดงแผนภูมิพาเรโตของตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงของแต่ละปัจจัย.....	78
4.3 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	87
4.4 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิดในการทดลองเบื้องต้น สำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	87
4.5 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	88
4.6 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	92
4.7 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิดในการทดลองเบื้องต้น สำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	93
4.8 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	93
5.1 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	104
5.2 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิดในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	105
5.3 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ).....	106
5.4 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	108

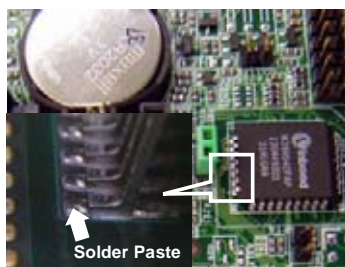
รูปที่	หน้า
5.5 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตค่างกับค่าที่ถูกพิตในการทดลอง สำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	109
5.6 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ).....	110
5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด.....	118
5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ของการตั้งค่างระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 และ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4.....	119
5.9 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.6 เมตรต่อนาที).....	122
5.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.7 เมตรต่อนาที).....	123
5.11 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.8 เมตรต่อนาที).....	123
5.12 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.9 เมตรต่อนาที).....	124
5.13 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (1.0 เมตรต่อนาที).....	124
5.14 เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด ที่ความเร็วสายพาน 0.6 และ 1.0 เมตรต่อนาที.....	126
5.15 ตัวเสียประเภทลัดวงจรที่กระบวนการตรวจสอบ (Inspection).....	128

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระเบียบ RoHS (The restriction of certain hazardous substances) เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้การนำทรัพยากรกลับคืนและการทิ้งซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยระเบียบนี้เสนอให้ใช้สารอื่นทดแทน สารตะกั่ว สารปรอท สารแคดเมียม สารโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr-VI) สารโพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (Poly Brominated Biphenyls - PBB) และสารโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิลอีเทอร์ (Poly Brominated DiphenylEthers -PBDE) ในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภายในวันที่ 1 กรกฎาคม 2549 ทั้งนี้ไม่รวมชิ้นส่วนที่นำเข้าตลาดก่อนปี พ.ศ. 2546 ดังนั้นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ต่างก็หันมาให้ความสนใจกับข้อกำหนดนี้อย่างมาก เนื่องจากสารตะกั่วเป็นส่วนผสมที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการประกอบแผงวงจร (Print Circuit Board-PCB) ที่ต้องใช้ตะกั่วเหลว (Solder paste) ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างดีบุก (Tin) และตะกั่ว (Lead) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และแผงวงจร จากข้อกำหนดของ RoHS ทำให้ต้องมีการยกเลิกการใช้ตะกั่วเป็นส่วนผสมในตะกั่วเหลว และใช้สารอื่นมาทดแทนตะกั่ว เช่น สังกะสี (Zinc) หรือ บิสมัท (Bismuth) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพของตะกั่วเหลวทางด้านความสามารถในการละลายและค่าความแข็ง การที่นำสารอื่นๆมาเป็นส่วนประกอบในตะกั่วเหลวมีผลให้ความสามารถในการหลอมเหลวลดลง ทำให้ใช้เวลาและอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของตะกั่วเหลวมากขึ้น ซึ่งไม่ส่งผลดีในด้านของการผลิตเพราะต้องใช้เวลาและพลังงานความร้อนมากขึ้น



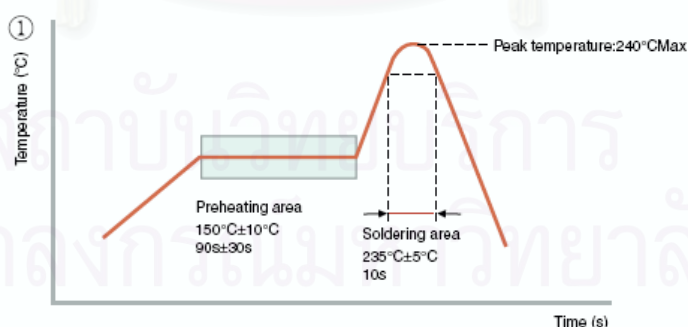
### รูปที่ 1.1 แสดงแผงวงจร (Print Circuit Board-PCB)

จากที่กล่าวมา ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีในการทำเอสเอ็มที (SMT - Surface Mount Technology) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผงวงจร โดยทั่วไปการทำเอสเอ็มที ใช้เครื่องจักรที่เรียกว่า เครื่องรีโฟลว์ (Reflow Machine) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ตะกั่วบัดกรีในการหลอมเหลวเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแผงวงจร



รูปที่ 1.2 เครื่องรีโฟลว์ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

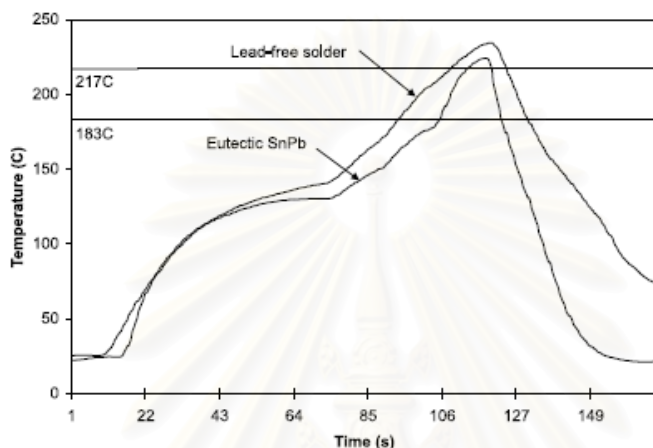
สิ่งสำคัญที่สุดที่ต้องพิจารณาในการใช้เครื่องรีโฟลว์ก็คือ รูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (Temperature profile) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 จากการทำที่มีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบของตะกั่วเหลวจากตะกั่วมาเป็นสังกะสีหรือบิสมาททำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาเพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติเชิงกายภาพของตะกั่วเหลวที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 1.3 แสดงรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (Temperature profile)

จากรูปที่ 1.4 แสดงให้เห็นว่า รูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาของตะกั่วเหลวชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead Free) จะมีอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาที่สูงกว่าของตะกั่วเหลวชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (SnPb) ทั้งนี้รวมไปถึงเวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) ในช่วง

อุณหภูมิสูง (มากกว่า  $183^{\circ}\text{C}$ ) และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ยังมีค่ามากกว่าของตะกั่วเหลืองชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมอีกด้วย การทำเอสเอ็มทีสำหรับตะกั่วเหลืองชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะประกอบลงบนแผงวงจรจะต้องอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงและนานกว่าเดิม ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดตัวเสีย (Failure) จึงมีสูงขึ้น ผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันโอกาสที่จะเกิดตัวเสียมากขึ้น



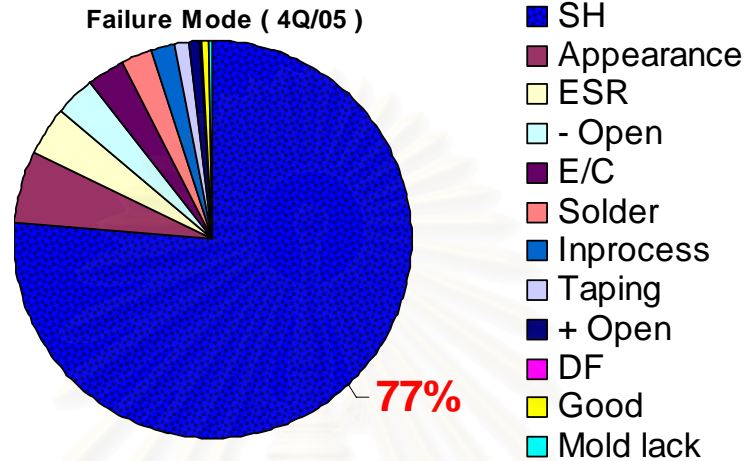
รูปที่ 1.4 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ของตะกั่วเหลืองชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (SnPb) และชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead Free) [1]

ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้ในการเก็บประจุไฟฟ้า มีความน่าเชื่อถือสูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จากรูปที่ 1.5 หากพิจารณารูปแบบของการเกิดตัวเสียของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม พบว่ากว่าร้อยละ 77 รูปแบบของการเกิดตัวเสียคือลัดวงจร (Short circuit) หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ มีกระแสรั่วไหลสูง (Leakage current) โดยส่วนใหญ่ประเภทของตัวเสียนั้น (Field failure mode) ที่พบหลังจากนำอุปกรณ์ที่มีตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบไปใช้ คือตัวเสียประเภทลัดวงจร ตัวเก็บประจุอาจเกิดการเสียหายจากหลายกรณีซึ่งอาจแบ่งได้เป็นสาเหตุภายในที่เกิดจากวัตถุดิบหรือกระบวนการผลิต และสาเหตุภายนอกที่รวมถึงสภาวะการใช้งานและการนำตัวเก็บประจุไปใช้

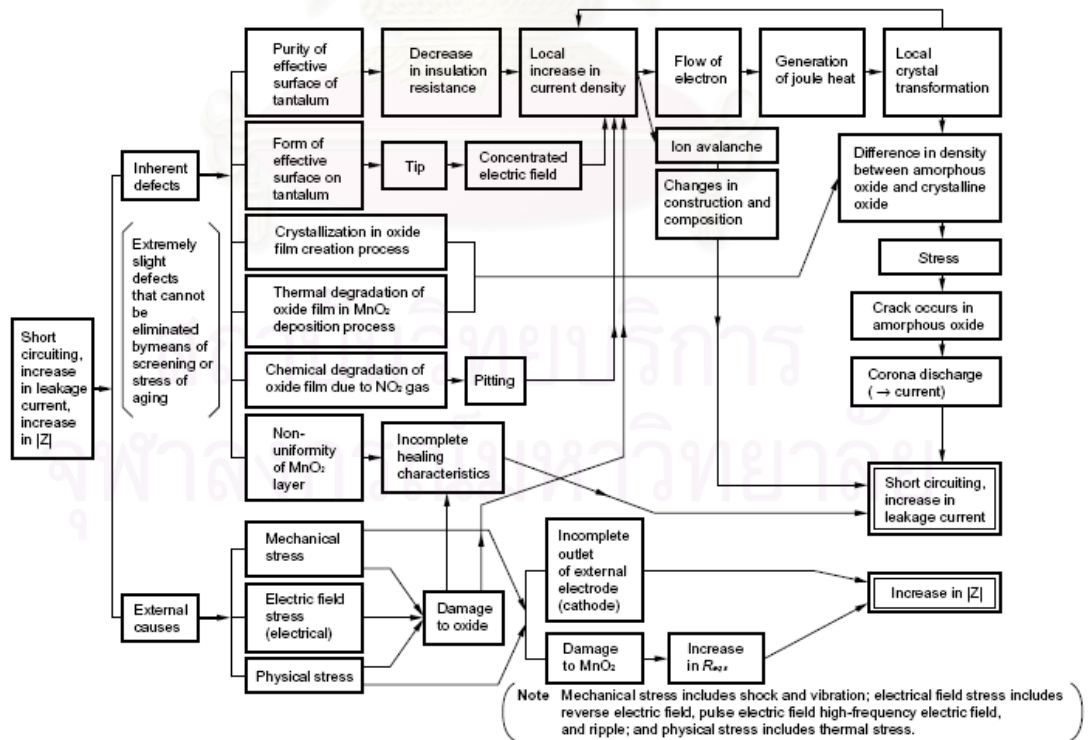
ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของการเสียและกระบวนการของการเกิดของเสีย แสดงในรูปที่ 1.6 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียของตัวเก็บประจุประเภทกระแสรั่วไหลสูงส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสาเหตุภายใน ดังนั้นถ้าสามารถกำจัดสาเหตุเหล่านั้นได้ ตัวเสียของตัวเก็บประจุ ก็จะลดลงโดยปริยาย แต่การจะกำจัดสาเหตุต่าง ๆ ทั้งหมด เช่น การทำวัตถุดิบให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยากและยังใช้ต้นทุนสูงมาก ดังนั้นทางที่เป็นไปได้มากที่สุดคือการกำจัดสาเหตุภายนอก โดยการลดปริมาณของเสียที่จะเกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุดหรือทำการคัดแยกของเสีย (Screening) ตั้งแต่ในกระบวนการ



ผลิตเพื่อช่วยลดปริมาณของเสียที่จะถูกส่งไปยังลูกค้าการคัดแยกของเสียนั้นมีหลายวิธี เช่น การวัดค่าทางไฟฟ้าโดยตรง การทดสอบการใช้งานภายใต้สภาวะที่รุนแรง การให้ความร้อน เป็นต้น [2]



รูปที่ 1.5 แสดงรูปแบบของการเกิดตัวเสียของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมจากการรวบรวมคำร้องเรียนจากลูกค้า (มกราคม 2549 ถึง เมษายน 2549)

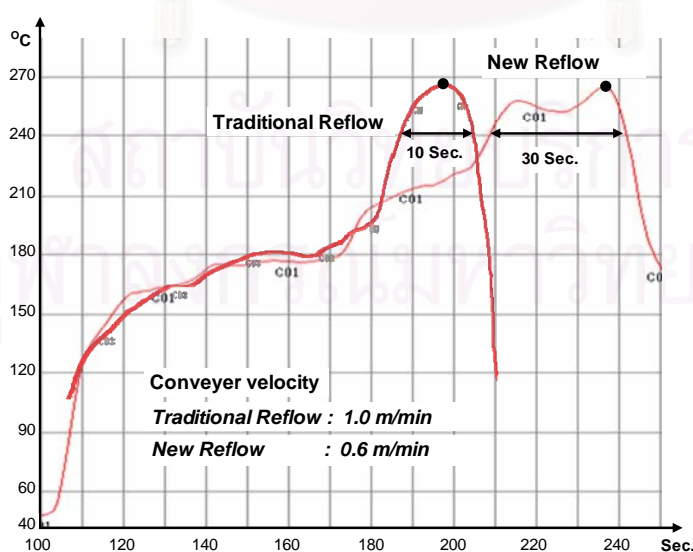


รูปที่ 1.6 แสดงสาเหตุและกระบวนการเกิดตัวเสียของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม (ประเภทลัดวงจร, กระแสรั่วไหลสูง และความต้านทานสูง)

จากการทำการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis) ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมพบว่า กระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อที่ตัวเสียประเภทลัดวงจร หรือกระแสรั่วไหลสูงจะถูกส่งไปยังลูกค้าได้คือ กระบวนการทำรีโฟลว์ ดังนั้นถือได้ว่ากระบวนการทำรีโฟลว์มีความสำคัญต่อการกำจัดสาเหตุภายนอก โดยการคัดแยกของเสียตั้งแต่ในกระบวนการผลิตเพื่อช่วยลดปริมาณของเสียที่จะถูกส่งไปยังลูกค้ามากที่สุด

กระบวนการรีโฟลว์เป็นกระบวนการจำลองการใช้งานในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดนี้เสมือนการทำเอสเอ็มที โดยการใช้ความร้อนในกระบวนการการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นการคัดแยกตัวเก็บประจุที่จะเป็นตัวเสียประเภทลัดวงจร ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จริง [3]

จากการที่อุณหภูมิของรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาสำหรับตะกั่วเหลวชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิและเวลาที่คงอยู่ของขั้นตอนการทำรีโฟลว์ก็ย่อมสูงขึ้น จากรูปที่ 1.7 จะเห็นว่า การที่จะได้ขั้นตอนการทำรีโฟลว์ใหม่นั้น ต้องใช้ความเร็วของสายพานช้าลงถึงร้อยละ 40 จากความเร็วเดิม ส่งผลให้กำลังการผลิตของเครื่องจักรในกระบวนการนี้ลดลงถึงร้อยละ 40 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ของขั้นตอนการทำรีโฟลว์แบบเดิมและแบบใหม่สำหรับการผลิตตัวเก็บประจุ

ในช่วงเริ่มต้นการผลิตตัวเก็บประจุแบบกรีน (Green Series) ซึ่งต้องใช้กระบวนการทำรีโฟลว์ใหม่นี้ มีปริมาณความต้องการเพียงร้อยละ 10 ของการผลิตทั้งหมดและมีลูกค้าสั่งซื้อเพียงแค່รายเดียว แต่ปริมาณความต้องการของตัวเก็บประจุชนิดนี้ก็มีมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดหลังจากการประกาศใช้ระเบียบ RoHS การผลิตตัวเก็บประจุชนิดนี้เกือบทั้งหมดต้องผ่านขั้นตอนการทำรีโฟลว์ใหม่ นั่นก็หมายความว่าต้องมีการสั่งซื้อเครื่องรีโฟลว์ ใหม่เพิ่มเติมเนื่องจากกำลังการผลิตของเครื่องจักรเดิมที่มีอยู่จะลดลงถึงร้อยละ 40 ทำให้กำลังการผลิตของขั้นตอนการทำรีโฟลว์ไม่เพียงพอ ดังนั้นหากวิศวกรสามารถกำหนดการตั้งค่าของเครื่องรีโฟลว์ที่เหมาะสมโดยที่ยังคงสอดคล้องกับข้อกำหนดของขั้นตอนการทำรีโฟลว์ใหม่ แต่ใช้ความเร็วสายพานได้สูงกว่า 0.6 เมตรต่อนาที หรือเท่ากับความเร็วของขั้นตอนการทำรีโฟลว์แบบเดิม นั่นก็หมายความว่าสามารถลดจำนวนการสั่งซื้อเครื่องรีโฟลว์ใหม่ลงหรืออาจไม่ต้องสั่งซื้อเลย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์ด้วยการเพิ่มความเร็วสายพานให้มากกว่า 0.6 เมตรต่อนาที โดยที่เวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ของการทำรีไฟล์ยังคงสอดคล้องกับข้อกำหนดของขั้นตอนการทำรีไฟล์ใหม่

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ของการทำรีไฟล์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อเวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ของการทำรีไฟล์เฉพาะปัจจัยที่สามารถปรับค่าและควบคุมได้เท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลที่อาจมาจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้

1.3.2 ผลของการศึกษาในการวิจัยนี้ มาจากการศึกษาเครื่องรีไฟล์เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น คือ ชนิดใช้ลมร้อน (Hot Air Type)

1.3.3 ตัวเก็บประจุที่กล่าวถึง หมายถึงตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ลดเวลานำในการผลิตตัวเก็บประจุ

1.4.2 เป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องรีไฟล์รุ่นอื่นๆที่ใช้อยู่

1.4.3 ไม่มีความจำเป็นในการสั่งซื้อเครื่องรีไฟล์ใหม่

## บทที่ 2

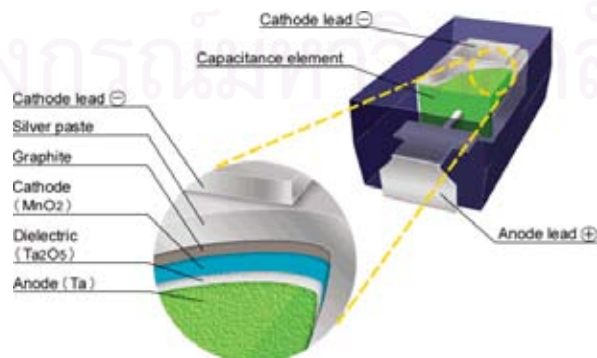
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม [2]

ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม (Tantalum capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ชั้นฟิล์มของแทนทาลัมเพนตะออกไซด์ ( $Ta_2O_5$ ) เป็นชั้นกึ่งฉนวน (Dielectric film) ตัวเก็บประจุชนิดนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการเก็บประจุเป็นค่าความจุต่อปริมาตรของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมกับตัวเก็บประจุชนิดอะลูมิเนียมอิเล็กโทรไลติก พบว่าตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมมีประสิทธิภาพในการเก็บประจุสูงกว่าถึง 3 เท่า และยังมีข้อดีอื่นอีกเช่น ไม่มีของเหลวอยู่ภายใน ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีและสะดวกต่อการเชื่อมต่อในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

##### 2.1.1 โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

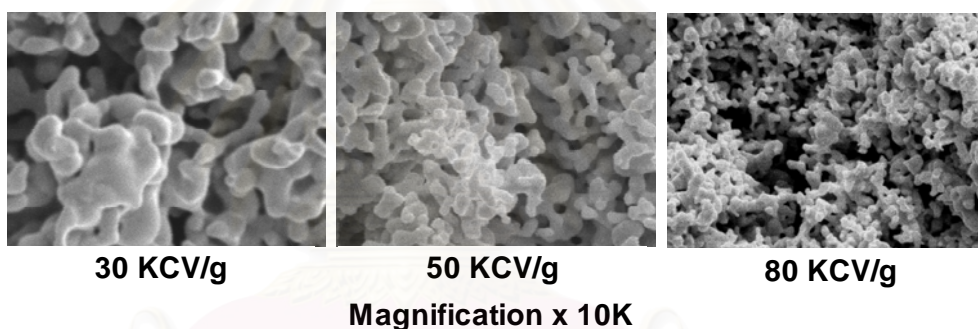
ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมประกอบด้วย ผงแทนทาลัมละเอียดที่ถูกอัดเป็นเม็ดทำหน้าที่เป็นขั้วบวกที่มีความพรุนสูง มีพื้นที่ประสิทธิผล (Effective area) ที่ครอบคลุมด้วยชั้นกึ่งฉนวนของแทนทาลัมเพนตะออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา อาโนไดเซชัน (Anodization) ชั้นขั้วลบประกอบด้วยชั้นแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) ชั้นกราไฟท์ (Graphite) ชั้นซิลเวอร์เพสต์ (Silver paste) ส่วนขั้วภายนอกหรือขางานจะถูกเชื่อมต่อกับชั้นซิลเวอร์เพสต์นี้ โครงสร้างของชิปตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

## 2.1.2 ความรู้พื้นฐานและการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

2.1.2.1 ผงแทนทาลัม (Tantalum Powder) ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมผลิตจากผงโลหะแทนทาลัมบริสุทธิ์ การเลือกขนาดของผงแทนทาลัมขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุที่จะผลิต ผงแทนทาลัมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ใช้สำหรับการผลิตตัวเก็บประจุโวลต์สูง (High voltage capacitor) โดยที่ค่าความจุ (Capacitance) หรือความสามารถในการเก็บประจุ แปรผันตามพื้นที่ผิวของผงแทนทาลัม การผลิตตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูงจำเป็นต้องใช้ผงแทนทาลัมที่มีค่าซีวี (CV - Capacitance / Voltage) สูงขึ้นเพื่อให้ได้ค่าค่าความจุสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาผงแทนทาลัมที่มีค่าซีวีสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามรูปที่ 2.2 แสดงภาพถ่ายขยาย (SEM - Scanning electron microscope) ของผงแทนทาลัมที่มีค่าซีวีต่าง ๆ ซึ่งสามารถเห็นความแตกต่างของขนาดอนุภาคได้ชัดเจน



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบผงแทนทาลัมที่มีค่าซีวีต่าง ๆ

พื้นที่ผิวภายในของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม สามารถแสดงได้โดย

$$C = E E_0 S / d \quad \text{-----} \quad 1.1$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุประจุไฟฟ้า

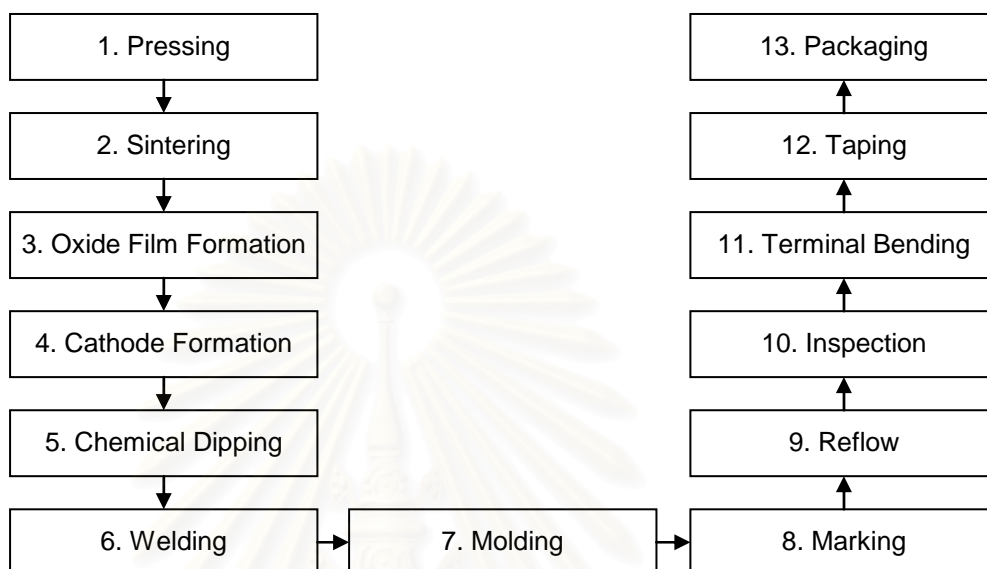
E คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของ แทนทาลัมเพนตะออกไซด์ (มีค่าประมาณ 27)

$E_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของ ช่องว่าง ( $8.855 \times 10^{-12}$  Farad/m)

S คือ พื้นที่ผิว ( $m^2$ )

d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก (m)

### 2.1.2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เก็บประจุชนิดแทนทาลัม



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

- 1) การอัด (Pressing) เป็นกระบวนการขึ้นรูปผงแทนทาลัมโดยการบีบอัดตามขนาดและน้ำหนักที่ถูกระบุไว้
- 2) การเผา (Sintering) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคเล็กๆ ของผงผงแทนทาลัมยึดติดกันเพิ่มความแข็งแรง
- 3) การสร้างชั้นออกไซด์ (Oxide film formation) เป็นกระบวนการสร้างชั้นฉนวนที่ผิวของผงแทนทาลัม
- 4) การสร้างขั้วลบ (Cathode formation) เป็นกระบวนการสร้างชั้นขั้วลบที่ผิวของชั้นออกไซด์
- 5) การจุ่มสารเคมี (Chemical dipping) เป็นกระบวนการสร้างชั้นรอยต่อผิวของขั้วลบ
- 6) การเชื่อม (Welding) เป็นกระบวนการประกอกับขางาน
- 7) การทำโมลด์ (Molding) เป็นกระบวนการสร้างชั้นห่อหุ้มและป้องกันด้วยเรซิน (Resin)

8) การทำเครื่องหมาย (Marking) เพื่อการระบุชนิดของงานโดยการทำเครื่องหมายลงบนผิวภายนอกของตัวเก็บประจุ

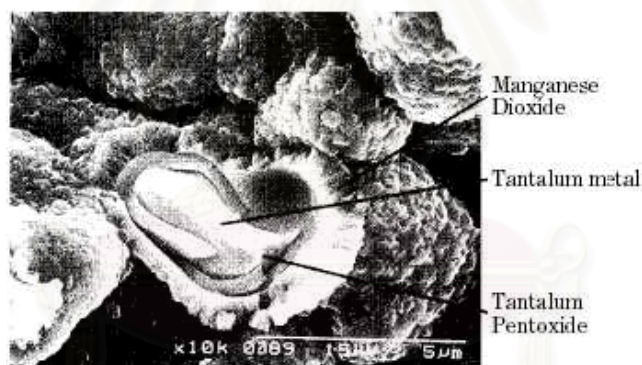
9) การทำรีโฟลว์ (Reflow) เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับงานเพื่อตัดแยกตัวเสียบประเภทลัดวงจร

10) การตรวจสอบ (Inspection) เป็นกระบวนการวัดและคัดงานเสียทิ้ง

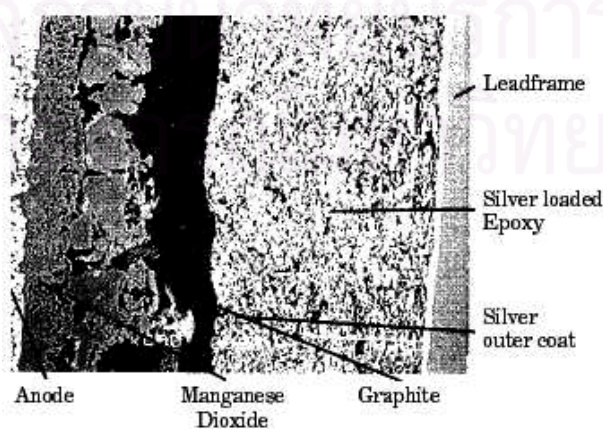
11) การพับขางาน (Terminal bending) เป็นกระบวนการพับขางานเพื่อให้ตัวเก็บประจุอยู่ในรูปแบบที่พร้อมใช้งาน

12) การทำเทป (Taping) เป็นกระบวนการบรรจุชิ้นงานลงในเทป

13) การบรรจุ (Packaging) เป็นกระบวนการสุดท้ายโดยการบรรจุตัวเก็บประจุลงกล่องเพื่อความสะดวกในการขนส่งและเคลื่อนย้าย



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายขยายของชั้นแมงกานีสไดออกไซด์



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของชั้นต่าง ๆ ในตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม



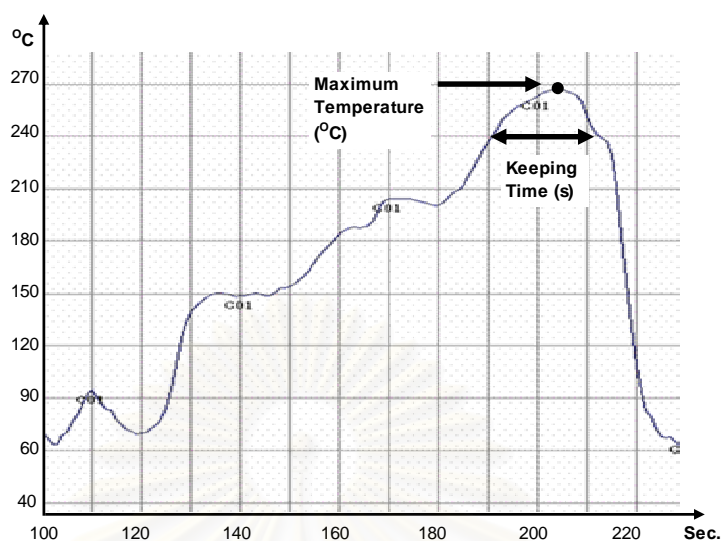
## 2.2 การทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทเอสเอ็มดี (SMD - Surface mount devices) และในขั้นตอนการประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมาก จะต้องใช้เครื่องรีโฟลว์ในการทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆติดกับแผงวงจรด้วยตะกั่วเหลว (Solder Paste) ด้วยความร้อน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันและกำจัดตัวเก็บประจุที่จะกลายเป็นตัวเสีย (Failure) ที่อาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรือหลังจากใช้งานผลิตภัณฑ์เหล่านั้น การทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ยิ่งไปกว่านั้นเงื่อนไขและสภาพแวดล้อมของการทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมต้องใช้ความร้อนที่สูงกว่าและใช้เวลานานกว่าการทำรีโฟลว์ทในการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นการประกันได้ว่าไม่มีตัวเสียของตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมเกิดขึ้นในระหว่างการทำรีโฟลว์ของการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรือหลังจากใช้งานผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

การทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม จะต้องมีการควบคุมเวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า  $240^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) ในรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดในรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาของการทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

### 2.2.1 เวลาที่คงอยู่ (Keeping Time)

คือระยะเวลาทั้งหมดที่อุณหภูมิของการทำรีโฟลว์สูงกว่า  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีหน่วยเป็นวินาที เป็นระยะเวลาที่มีความสำคัญต่อการกำจัดสาเหตุภายนอกโดยการตัดแยกของตัวเสี่ยประเภทลัดวงจร (Short circuit) ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม ในการผลิตตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมจะควบคุมเวลาที่คงอยู่ให้นานกว่า 10 วินาที แต่สำหรับตัวเก็บประจุแบบกรีน (Green Series) เวลาที่คงอยู่จะถูกควบคุมให้มากกว่า 30 วินาที หากเวลาที่คงอยู่มีระยเวลาน้อยกว่าค่าที่ควบคุม จะส่งผลให้ตัวเสี่ยประเภทลัดวงจร หรือกระแสรั่วไหลสูงหลุดไปยังลูกค้าได้

### 2.2.2 อุณหภูมิสูงสุด

คือจุดที่อุณหภูมิค่าสูงที่สุดในการทำรีโฟลว์ โดยที่อุณหภูมิสูงสุดนี้ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการกำจัดสาเหตุภายนอกของตัวเสี่ยประเภทลัดวงจรในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม แต่หากมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดตัวเสี่ยประเภทลัดวงจรและตัวเสี่ยประเภท Appearance เพิ่มขึ้น และยังส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของตัวเก็บประจุให้ลดลงอีกด้วย ดังนั้นในกระบวนการผลิตจะควบคุมอุณหภูมิสูงสุดนี้ไม่ให้มีอุณหภูมิสูงกว่า  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมทุกชนิด

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของการทำรีโฟลว์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

ชนิดของตัวเก็บประจุ	เวลาที่คงอยู่ (วินาที)	อุณหภูมิสูงสุด ( °C)
R-Series	มากกว่า 10	240 ถึง 270
Green Series	มากกว่า 30	240 ถึง 270

ตัวเก็บประจุแบบกรีน (Green Series) คือ ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมแบบใหม่ ถูกออกแบบมาเพื่อนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต้องการให้มีการใช้สารตะกั่ว (Lead Free Products) และต้องเข้ากับตะกั่วเหลวชนิดที่ไม่มีสารตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead Free Solder Paste) ซึ่งจำเป็นต้องใช้การทำรีโฟลว์ที่มีความร้อนสูงกว่าการทำรีโฟลว์ของตะกั่วเหลวแบบดั้งเดิม

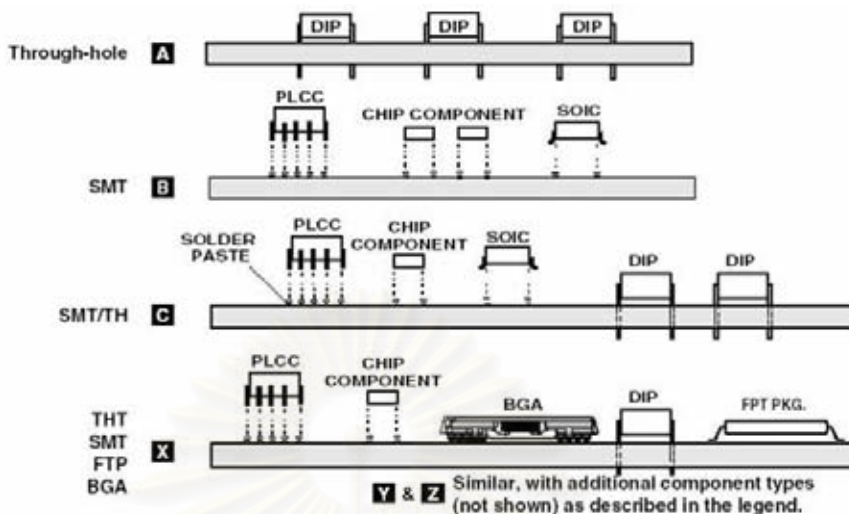
## 2.3 การทำเอสเอ็มที (SMT - Surface Mount Technology) ในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [4]

การทำเอสเอ็มทีคือ การประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยการวางหรือบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรเปล่าให้ถูกต้องตามข้อกำหนดและมาตรฐานที่ออกแบบไว้ นอกจากนั้นอาจจะมีกระบวนการอื่น ๆ เพิ่มเติมเข้ามา เช่น การทดสอบการทำงาน การสุ่มตรวจสอบคุณภาพ สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นเพื่อทำให้งานที่ผลิตออกมามีคุณภาพ ปราศจากข้อบกพร่อง

### 2.3.1 ประเภทของแผงวงจร

#### 2.3.1.1 ชนิดด้านเดียว

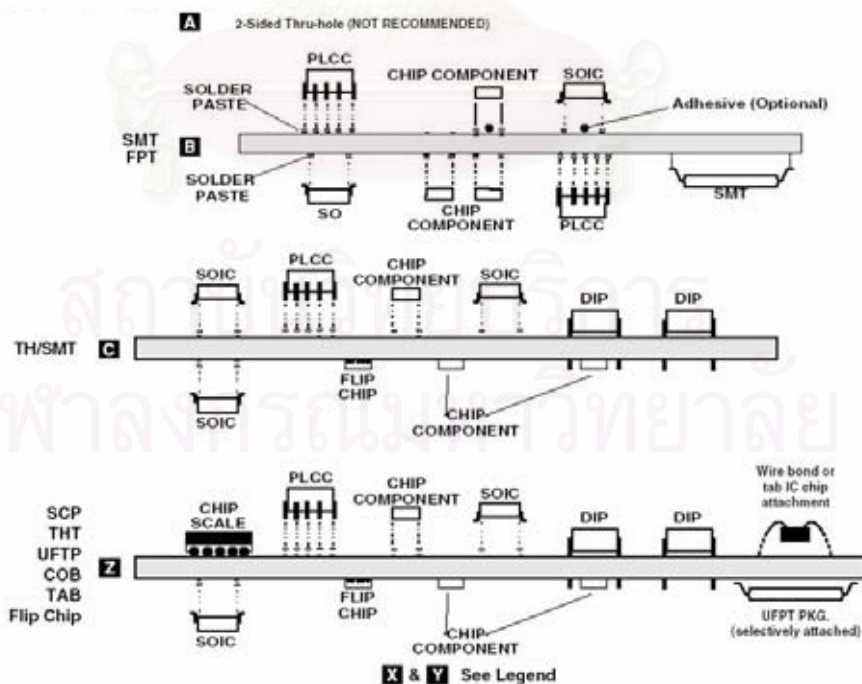
วงจรชนิดด้านเดียว หมายถึงวงจรที่มีการใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดลงบนแผงวงจรเฉพาะด้านบนเท่านั้น ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแผงวงจรชนิดด้านเดียว

### 2.3.1.2 ชนิดสองด้าน

มีความแตกต่างจากชนิดแรก คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ทั้งสองด้านของแผงวงจร ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9

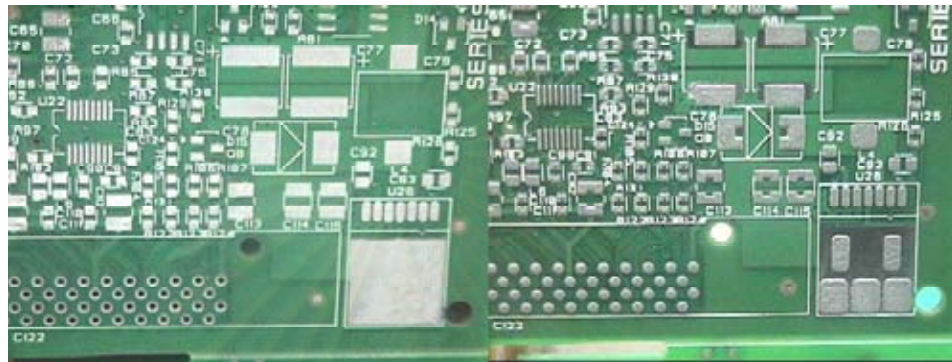


รูปที่ 2.9 แสดงแผงวงจรชนิดสองด้าน

## 2.3.2 ขั้นตอนการทำเอสเอ็มที [5]

### 2.3.2.1 การปาดตะกั่วเหลวลงบนแผงวงจรเปล่า (Printing)

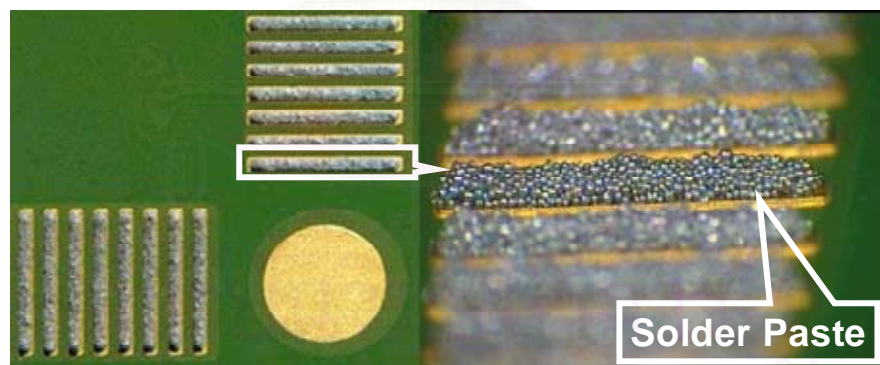
จะทำการป้ายตะกั่วเหลวลงบนตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบลายวงจรนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



แผงวงจรเปล่า

หลังการปาดตะกั่วเหลว

รูปที่ 2.10 แสดงแผงวงจรก่อนและหลังการปาดตะกั่วเหลว

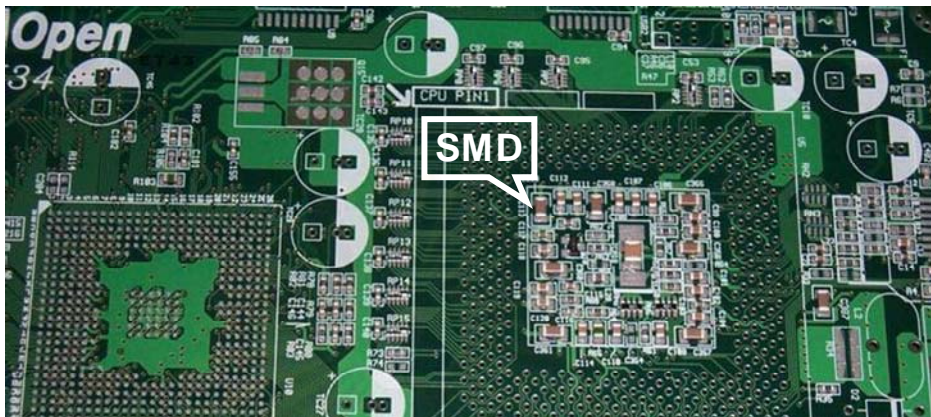


รูปที่ 2.11 แสดงภาพขยาย 10 เท่าหลังการปาดตะกั่วเหลว

### 2.3.2.2 การจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [6]

กระบวนการนี้ ก็คือวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทเอสเอ็มทีลงบนแผงวงจรตามตำแหน่งที่ได้ปาดตะกั่วเหลวไว้ ตามรูปที่ 2.12 การวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้เครื่องทำงานแทนคน เพราะวางได้เร็วและถูกต้องกว่าการใช้คน โดยทั่วไปจะทำการแยกออกเป็นสองเครื่อง คือ เครื่องแรกวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวเล็ก เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ไดโอด เป็น

ต้น จากนั้นจะส่งต่อไปยังเครื่องที่สองเพื่อทำการวางชิปวงจรรวม (IC - Integrate circuit) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13



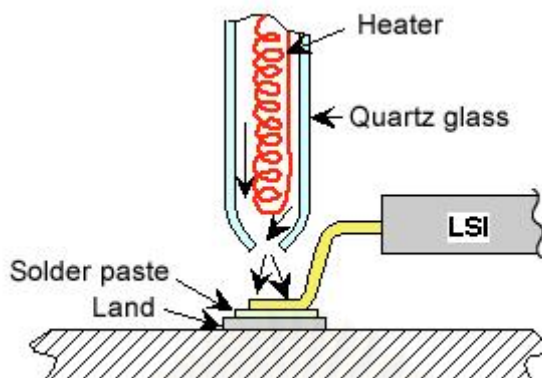
รูปที่ 2.12 แสดงแผงวงจรหลังวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.13 แสดงแผงวงจรกำลังวางชิปวงจรรวม

### 2.3.2.3 การทำรีโฟลว์ของการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [7]

เครื่องรีโฟลว์ จะทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อให้ตะกั่วเหลวซึ่งเป็นเม็ดตะกั่วเล็ก ๆ หลอมละลายเชื่อมระหว่างแผงวงจรกับตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ความร้อนมาทำให้ตะกั่วเหลวหลอมละลาย จากกระบวนการที่ผ่านมาตะกั่วเหลวถูกปาดมาบนแผงวงจรแล้วและเหนือตะกั่วเหลวขึ้นไปก็เป็นขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้น สิ่งที่ต้องการคือ เป่าลมที่มีความร้อนพอเพียงเพื่อให้ตะกั่วหลอมละลาย แล้วน้ำหนักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะกดให้ตัวมันจมลงไปบนตะกั่วที่กำลังเหลวอยู่

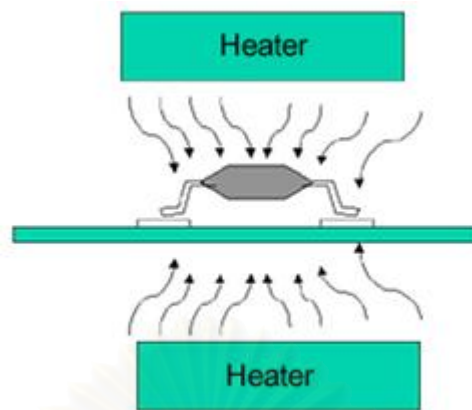


รูปที่ 2.14 แสดงการบัดกรีโดยใช้ลมร้อน

เครื่องรีโฟลว์ก็คือห้องอบความร้อนขนาดใหญ่โดยภายในจะมีแหล่งกำเนิดความร้อน (Heater) หลายแหล่ง แยกออกจากกันเป็นช่วง ๆ แต่ละช่วงสามารถปรับตั้งความร้อนได้แตกต่างกันออกไป ความร้อนนี้จะเป็นตัวทำให้ตะกั่วเหลวหลอมละลาย แหล่งกำเนิดความร้อนในเครื่องรีโฟลว์มีหลายแบบ

- 1) ฮีตเตอร์ธรรมชาติ (Convection reflow soldering)
- 2) อินฟราเรด (Infrared reflow soldering)
- 3) ผสมกันระหว่างแบบแรกกับแบบที่สอง (Convection-Infrared reflow soldering)
- 4) Vapor phase reflow soldering (VPS)

เครื่องรีโฟลว์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบใช้ฮีตเตอร์ธรรมชาติ นอกจากแหล่งความร้อนแล้วภายในแล้วจะมีพัดลมเพื่อทำให้ลมผ่านแหล่งความร้อน ลมร้อนจะช่วยกระจายความร้อนไปยังตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างทั่วถึงเพื่อที่จะให้ตะกั่วติดดี ผู้ผลิตตะกั่วเหลวจะรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาของการทำรีโฟลว์ที่เหมาะสมมาให้ ว่าจะต้องให้ความร้อนอย่างไรแผงวงจรจึงจะออกมาดี คุณภาพดี ดังนั้นจะต้องเอาข้อกำหนดนี้มาทำการปรับตั้งอุณหภูมิภายในเครื่องรีโฟลว์



รูปที่ 2.15 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อน ในเครื่องรีไฟล์

โดยให้ความร้อนกับแผงวงจรเพื่อให้ปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิได้ก่อน ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงพรีฮีต (Pre-heat) จากนั้นจะรักษาให้อุณหภูมิคงที่หรือเกือบคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง เรียกว่าโซค (Soaking) หรือจะเรียกส่วนนี้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของพรีฮีตก็ได้ จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปประมาณ 210-240 °C อย่างรวดเร็ว ช่วงนี้จะเรียกรีไฟล์ ตะกั่วเหลวจะหลอมละลายในช่วงนี้ แล้วอุณหภูมิจะถูกทำให้ลดลง ตะกั่วเหลวจะเริ่มแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง รูปที่ 1.3 แสดงรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาและรูปที่ 1.4 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ของตะกั่วเหลวชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมและชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม



ละลายดี

ละลายไม่ดี

รูปที่ 2.16 แสดงตะกั่วหลอมละลายหลังผ่านรีไฟล์



## 2.4 ตะกั่วเหลวแบบแบบไร้สารตะกั่ว (Lead free solder paste) [8]

ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา วงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกต่างตระหนักถึงความจำเป็นในการนำตะกั่วบัดกรีที่ไม่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบมาใช้งานแทนที่ตะกั่วบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วเป็นหลัก ถึงแม้ว่าปริมาณสารตะกั่วที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมประเภทอื่น เช่น ปริมาณสารตะกั่วบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารตะกั่วในแบตเตอรี่รถยนต์ แต่ถ้าพิจารณาถึงการเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน การเลิกใช้สารตะกั่วก็เป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้าม เหตุผลหลักก็คือเรื่องของการรักษาสภาพแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ ถึงแม้ในปัจจุบันยังไม่มีกฎหมายที่เข้มงวดเกี่ยวกับเรื่องนี้ ออกมาบังคับใช้ แต่ในบางประเทศ เช่น สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น ได้เริ่มมีการวางแผนอย่างจริงจังในการเลิกใช้สารตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดย สหภาพยุโรปมีเป้าหมายในการเลิกใช้สารตะกั่วอย่างเด็ดขาดในปี ค.ศ. 2008

แต่ในประเทศญี่ปุ่นได้ตระหนักถึงความสำคัญก่อนหน้านี้ โดยที่บริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชั้นนำ เช่น โซนี่ โตชิบา ฮิตาชิ และ เอ็นอีซี ได้ร่วมกันทำสัญญายกเลิกใช้สารตะกั่วให้หมดภายในปี ค.ศ. 2002 ทำให้บริษัทอื่นๆ เริ่มเล็งเห็นถึงความเสียเปรียบในการแข่งขันถ้ายังใช้สารตะกั่วต่อไป

### 2.4.1 ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการเลือกใช้ตะกั่วเหลวแบบไร้สารตะกั่ว

ตะกั่วบัดกรีที่เป็นส่วนผสมระหว่าง สารดีบุกและสารตะกั่วโดยส่วนผสมที่นิยมใช้งานคือ 63Sn/37Pb โดยมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดบัดกรีมีความแข็งแรง ความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ดังนั้นการที่จะนำตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วมาใช้งานแทนตะกั่วบัดกรีชนิดเดิมนั้น มีข้อควรพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

2.4.1.1 ราคาของตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่าตะกั่วบัดกรีชนิดเดิมอย่างน้อยร้อยละ 35 ขึ้นไป เนื่องจากโลหะที่จะนำมาแทนสารตะกั่วจะเป็นโลหะที่หายาก และมีอยู่อย่างจำกัด เช่น บิสมาท์ อินเดียม หรือเงิน เป็นต้น จะส่งผลให้ต้นทุนของสินค้าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้ตะกั่วบัดกรีแบบแท่งสำหรับเครื่องรีโฟลว์ หรือตะกั่วบัดกรีแบบเส้นสำหรับการบัดกรีด้วยมือจะมีปริมาณการใช้สูงกว่าตะกั่วเหลว โดยทั่วไปปริมาณตะกั่วบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นที่ใช้จะเป็นส่วนประกอบหลักของต้นทุนการผลิต

2.4.1.2 จุดหลอมเหลวของตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วโดยทั่วไปจะสูงกว่า ตะกั่วบัดกรีชนิดเดิม การที่ตะกั่วบัดกรีมีจุดหลอมเหลวสูง ก็หมายถึงต้องปรับตั้งอุณหภูมิของ เครื่องรีโฟลว์ให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรืออาจทำให้แผงวงจร เกิดการเปลี่ยนสีหรือบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป

2.4.1.3 ความสามารถในการนำไฟฟ้าต้องดีพอที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

2.4.1.4 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ต้องดีพอ

2.4.1.5 มีความเป็นพิษต่อร่างกายต่ำ ซึ่งนี่คือจุดประสงค์หลักของการใช้ตะกั่ว บัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว

2.4.1.6 ต้องใช้ได้กับเครื่องรีโฟลว์ที่มีอยู่ โดยไม่ต้องดัดแปลงมาก หรือต้องซื้อ ระบบใหม่ อาจยอมรับการดัดแปลงโดยเล็กน้อยเช่นเพิ่มระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N2) ในเครื่อง รีโฟลว์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของจุดบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน โดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก

2.4.1.7 คุณสมบัติทางกายภาพ เช่นความแข็งแรง ความทนทานของจุดบัดกรี ต้องไม่ด้อยไปกว่าตะกั่วบัดกรีชนิดเดิม

2.4.1.8 ควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ จะต้องมีการควบคุมความผันแปรต่างๆ ในขบวนการผลิต เพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมี มากเกินไป เป็นที่น่าสังเกตว่า ตะกั่วบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไปจะมีจุด หลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้ ตะกั่วบัดกรีประเภทนี้จะทำให้ประสบปัญหาในขบวนการผลิตได้

2.4.1.9 ความสวยงามของจุดบัดกรี (Solder Joint Cosmetics) ควรจะ ใกล้เคียงกับตะกั่วบัดกรีชนิดเดิม

2.4.1.10 โลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วจะต้องหาได้ง่าย ผู้ผลิตสามารถผลิต ออกมาแข่งขันกันได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจะส่งผลให้ราคาลดลงในอนาคต

2.4.1.11 ถึงแม้กระแสความต้องการตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วกำลังมาแรง ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ยังคงยอมรับว่าผู้ผลิต แผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด ติดตั้งบนพื้นผิวหลายรายยังคงไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ดังนั้นข้อของอุปกรณ์

เอสเอ็มดี หรือลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ ก็ยังคงมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างตะกั่วบัดกรีแบบไม่มีสารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนขั้วของอุปกรณ์เอสเอ็มดีและแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดีก็อาจทำให้จุดบัดกรีนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน หรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว (Reliability)

#### 2.4.2 โลหะทดแทนสารตะกั่ว

ตะกั่วบัดกรีโดยทั่วไปจะเป็นส่วนผสมระหว่างโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น ดีบุกและตะกั่ว ถึงแม้จะมีความพยายามในการเลิกใช้สารตะกั่วโดยการหาโลหะชนิดอื่นมาทดแทน แต่ก็ยังคงต้องใช้ดีบุกเป็นโลหะหลักในส่วนผสมของตะกั่วบัดกรีเนื่องจากดีบุกมีราคาถูกหาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดี นอกจากนี้ ดีบุกยังเป็นส่วนผสมหลักของตะกั่วบัดกรีที่หลายคนคุ้นเคย คือ 63Sn/37Pb โลหะที่มีการพิจารณานำมาทดแทนสารตะกั่วโดยนำมาผสมกับดีบุก ก็มีหลายชนิด เช่น เงิน อินเดียม สังกะสี พลวง ทองแดง และบิสมีท เป็นต้น สาเหตุที่โลหะดังกล่าวถูกนำมาพิจารณา ก็เพราะว่าเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาผสมกับดีบุกแล้ว จุดหลอมเหลวจะมีแนวโน้มที่ต่ำลง และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และกายภาพที่ดีพอ เป็นที่ยอมรับได้ ในตารางที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นคุณสมบัติบางประการของโลหะเหล่านี้ เช่นราคาต่อน้ำหนักหนึ่งปอนด์ ค่าความหนาแน่น จำนวนที่สามารถผลิตได้ต่อปี และความยากง่ายในการหามาใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว

โลหะ	ราคา โดยประมาณต่อ น้ำหนักหนึ่ง ปอนด์	ความหนาแน่นที่ อุณหภูมิ 25°C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)	จำนวนที่สามารถ ผลิตได้ต่อปี (ล้านปอนด์)	ความยากง่าย ในการนำมาใช้ งาน
สังกะสี (Zn)	\$0.50	0.258	1560	หาง่าย
ทองแดง (Cu)	\$0.65 \$0.80	0.324 0.239	4900 100	หาง่าย หาง่าย
พลวง (Sb)	\$3.40	0.354	9	มีจำกัด
บิสมัท (Bi)	\$3.50	0.264	180	หาง่าย
ดีบุก (Sn)	\$84.20	0.379	3.5	มีจำกัด
เงิน (Ag)	\$125.00	0.264	0.2	ขาดแคลน
อินเดียม (In)	\$0.45	0.41		
ตะกั่ว (Pb)				

ข้อมูลในตารางที่ 2.2 จะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาเลือกชนิดของโลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่ว ตัวอย่างเช่น ในปัจจุบันมีการใช้ตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก ประมาณ 100 ล้านปอนด์ต่อปี โดยจะใช้ในสหรัฐอเมริกาประมาณ 35 ล้านปอนด์ ลองคำนวณเล่นๆว่า ถ้าสัก 3% ของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในสหรัฐอเมริกาต้องการเปลี่ยนมาใช้ ดีบุก-อินเดียม โดยใช้ ส่วนผสมดีบุก 77.2% อินเดียม 20% เงิน 2.8% (77.2Sn/20In/2.8Ag) ปริมาณอินเดียมที่จะถูกนำไปใช้ในแต่ละปีจะเท่ากับ 35 ล้านปอนด์ x 3% x 20% = 0.21 ล้านปอนด์ ในขณะที่ทั่วโลกมีความสามารถในการผลิตอินเดียมได้เพียง 0.20 ล้านปอนด์ต่อปี จะเห็นว่าการเลือกใช้อินเดียมเป็นส่วนผสมไม่ใช่ทางเลือกที่ดี นอกจากโลหะชนิดต่างๆดังกล่าว บรรดาผู้ผลิตหลายรายก็ได้มีการเสนอส่วนผสมแบบต่างๆออกมามากมายถึงกว่า 75 ชนิดในปัจจุบัน โดยสรุปมา 12 ชนิด ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมชนิดต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ราคาต่อน้ำหนักหนึ่งปอนด์	ราคาต่อปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์นิ้ว	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25°C(ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)
63Sn/37Pb	183	\$2.37	\$0.75	0.318
42Sn/58Bi	139	\$3.44	\$1.09	0.316
77.2Sn/20In/2.8Ag	179-189	\$30.06	\$8.02	0.267
91Sn/9Zn	199	\$3.23	\$0.85	0.263
91.8Sn/3.4Ag/4.8Bi	208-215	\$6.24	\$1.70	0.272
90Sn/7.5Bi/2Ag/0.5Cu	186-212	\$5.09	\$1.39	0.273
96.2Sn/2.5Ag/0.8Cu/0.5Sb	213-219	\$5.84	\$1.46	0.267
95.5Sn/4Ag/0.5Cu	217-218	\$6.55	\$1.76	0.269
95Sn/3.5Ag/1.5In	218	\$8.15	\$2.18	0.268
93.5Sn/3.5Ag/3Bi	216-220	\$5.92	\$1.59	0.269
96.5Sn/3.5Ag	221	\$6.32	\$2.33	0.368
99.3Sn/0.7Cu	227	\$3.48	\$0.92	0.264
95Sn/5Sb	232-240	\$3.37	\$0.88	0.263

หมายเหตุ:

จะสังเกตว่าส่วนผสมของตะกั่วบัดกรีทุกชนิดในตารางจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลักและราคาต่อปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์นิ้วเป็นราคาที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบราคาของตะกั่วเหลว

### 2.4.3 การเลือกใช้งานตะกั่วเหลวแบบไร้สารตะกั่ว

มีวิธีหลายประการในการเลือกส่วนผสมชนิดใดชนิดหนึ่งจากตารางที่ 2.3 มาใช้งาน เพื่อเป็นการให้แนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมกับขบวนการผลิต จะพิจารณาตัดตัวเลือกบางตัวออกดังนี้

2.4.3.1 อินเดียม (Indium) เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสม (alloy) ลดลงได้ดี เมื่อนำมาผสมกับดีบุก มีคุณสมบัติทางกายภาพ และความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี (Wetting) แต่อินเดียมเป็นโลหะที่มีจำนวนจำกัด และเริ่มขาดแคลนในปัจจุบัน จึงทำให้มีราคาสูง ด้วยเหตุผลนี้ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปไม่พิจารณาเลือกอินเดียมมาใช้งาน

2.4.3.2 สังกะสี (Zinc) เป็นโลหะที่มีราคาถูก ราคาของสังกะสีมีราคาถูกพอๆกับตะกั่ว หามาใช้งานได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือสังกะสีทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เร็ว เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ ซึ่งออกไซด์นี้จะไปลดความสามารถในการเชื่อมประสาน และทำให้เกิดขี้ตะกั่ว (Dross) ปริมาณมากในเครื่อง Wave soldering ถึงแม้ว่าอาจใช้ ก๊าซไนโตรเจนมาลดปัญหาเรื่องออกไซด์ได้ แต่สังกะสีก็ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ต้องมีการทดลองใช้งานกันอีกสักระยะ

2.4.3.3 บิสมัท (Bismuth) เป็นโลหะที่สามารถทำให้จุดหลอมเหลวของส่วนผสม ลดลงได้ดีเหมือนอินเดียม และยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ, ความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่ข้อเสียก็คือ จุดหลอมเหลวของตะกั่วบัดกรีที่มีบิสมัทเป็นส่วนผสมจะต่ำเกินไป โดยเฉพาะถ้าบิสมัทมีการปนเปื้อนกับตะกั่วที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์หรือขั้วของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ จะเกิดเป็นส่วนผสมของ Sn/Pb/Bi ซึ่งจุดหลอมเหลวจะต่ำถึง  $96^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งาน อาจมีผลให้จุดบัดกรีไม่แข็งแรง เกิดมีรอยแตก ร้าวได้ง่าย นอกจากนี้ราคาของบิสมัทในปัจจุบันก็ยังคงสูง

ตะกั่วบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 4 ถึง 5 ชนิด บรรดาผู้ผลิตต่างๆพยายามที่จะทำการทดลองหาส่วนผสมระหว่างโลหะหลากหลายชนิด เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ดีที่สุด แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าส่วนผสมเหล่านี้จะให้จุดหลอมเหลวที่มีค่าเป็นช่วง ซึ่งทำให้การควบคุมขบวนการผลิตทำได้ลำบาก และการผสมโลหะหลากหลายชนิดเข้าด้วยกันให้มีอัตราส่วนที่คงที่แน่นอนในแต่ละครั้งก็ทำได้ยากกว่าการผสมโลหะเพียงแค่ 2 ถึง 3 ชนิด การที่ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย จะทำให้คุณสมบัติโดยรวมเปลี่ยนไปมาก

ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ตะกั่วบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะ 4 ถึง 5 ชนิดยังไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ก็มีบางบริษัทในญี่ปุ่นที่มีการใช้ตะกั่วที่มีส่วนผสมของโลหะ 5 ชนิด

ตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสามารถตัดตัวเลือกบางตัวออกจากตารางที่ 2.3 เหลือส่วนผสมที่ผ่านการพิจารณาในขั้นต้นเพียง 4 ชนิดคือ 1) 95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu มีจุดหลอมเหลว 217 ถึง 218 °C 2) 96.5Sn/3.5Ag มีจุดหลอมเหลว 221 °C 3) 99.3Sn/0.7Cu มีจุดหลอมเหลว 227 °C และ 4) 95Sn/5Sb มีจุดหลอมเหลว 232 ถึง 240 °C โดยแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการพิจารณาส่วนผสมของตะกั่วบัดกรี

ส่วนผสม	ผ่านการพิจารณา ขั้นต้น	เหตุผลที่ถูกตัดทิ้ง
63Sn/37Pb	ไม่ผ่าน	มีตะกั่วเป็นส่วนผสม
42Sn/58Bi	ไม่ผ่าน	มีบิสมาทเป็นส่วนผสม จุดหลอมเหลวต่ำเกินไป
77.2Sn/20In/2.8Ag	ไม่ผ่าน	อินเดียมหายาก และมีราคาแพง
91Sn/9Zn	ไม่ผ่าน	สังกะสีเกิดออกไซด์ได้ง่ายทำให้การเชื่อมประสาน (wetting) ไม่ดี
91.8Sn/3.4Ag/4.8Bi	ไม่ผ่าน	มีบิสมาท และเป็นส่วนผสมของโลหะ 4 ชนิด ช่วงจุดหลอมเหลวกว้าง
90Sn/7.5Bi/2Ag/0.5Cu	ไม่ผ่าน	มีบิสมาท และเป็นส่วนผสมของโลหะ 4 ชนิด ช่วงจุดหลอมเหลวกว้าง
95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu	ผ่าน	-
95Sn/3.5Ag/1.5In	ไม่ผ่าน	อินเดียมหายาก และมีราคาแพง
96.5Sn/3.5Ag	ผ่าน	-

ส่วนผสม	ผ่านการพิจารณา ขั้นต้น	เหตุผลที่ถูกต้อง
93.5Sn/3.5Ag/3Bi	ไม่ผ่าน	มีบิสมีธเป็นส่วนผสม จุดหลอมเหลวจะต่ำมากเมื่อปนเปื้อนกับตะกั่วจากแผ่นวงจรพิมพ์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
99.3Sn/0.7Cu	ผ่าน	-
95Sn/5Sb	ผ่าน	-

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมหลายชนิดถูกคัดออกจากทางเลือกเหลือเพียง 4 ชนิด (ต่อ)

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่ามีส่วนผสมเพียง 4 ชนิดที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขบวนการผลิตที่ใช้เช่นถ้ากรณีเป็น ตะกั่วบัดกรีแบบแท่ง (Solder Bar) หรือ ตะกั่วบัดกรีแบบเส้น (Solder Wire) สำหรับใช้กับเครื่องเวฟโซลเดอร์ (Wave soldering) หรือ การบัดกรีด้วยมือตามลำดับ จะมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

1. อุณหภูมิของบ่อตะกั่ว (Solder Pot) ไม่ควรเกิน  $260^{\circ}\text{C}$
2. ปริมาณงานเสียต่ำ
3. ราคาต่ำ
4. มีขี้ตะกั่วน้อย

ซึ่งส่วนผสมทั้ง 4 ชนิดก็มีคุณสมบัติตามหลักเกณฑ์ข้างบนทั้งหมด แต่ 99.3Sn/0.7Cu และ 95Sn/5Sb จะมีราคาต่ำกว่าตัวเลือกที่เหลือ ถ้าพิจารณาต่อจะเห็นได้ว่า 99.3Sn/0.7Cu จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า 95Sn/5Sb ดังนั้น 99.3Sn/0.7Cu จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการทำเวฟโซลเดอร์ การพิจารณาเลือกตะกั่วบัดกรีสำหรับการบัดกรีด้วยมือก็มีหลักเกณฑ์กันคือในเรื่องราคาและจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงเกินไปทำให้ไม่ต้องปรับอุณหภูมิของหัวแร้งให้สูงตามไปด้วย จึงกล่าวได้ว่า 99.3Sn/0.7Cu ก็เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับตะกั่วเส้นที่บัดกรีด้วยมือเช่นกัน



เป็นเรื่องยากที่จะสรุปว่าส่วนผสมใดมีความเหมาะสมมากกว่าถึงแม้ 95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า แต่ 96.5Sn/3.5Ag ก็มีความได้เปรียบในด้านที่เป็นส่วนผสมของโลหะเพียงแค่ว่า 2 ชนิดซึ่งสามารถควบคุมความแน่นอนของส่วนผสมได้ดีกว่า บริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชั้นนำต่างก็มีการศึกษาส่วนผสมทั้ง 2 ชนิดพอๆ กัน

ส่วนผสม 96.5Sn/3.5Ag ได้มีการนำมาใช้งานจริงจังกแล้ว ในขณะที่ส่วนผสม 95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu ยังอยู่ในระหว่างการทดสอบจากหลายบริษัท ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาก็เป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับตะกั่วบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb ทั้งในด้านคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ความแข็งแรง ความสวยงามของจุดบัดกรี และความสะอาดในการใช้งาน ตารางที่ 2.5 จะแสดงผลเปรียบเทียบของคุณสมบัติบางประการระหว่างส่วนผสม 63Sn/37Pb กับ 96.5Sn/3.5Ag ซึ่งค่าคุณสมบัติต่างๆของ Sn/Ag และ Sn/Pb ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการระหว่าง Sn/Ag กับ Sn/Pb

ส่วนผสม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวด้านความร้อน (ppm/°C)	สภาพการนำไฟฟ้า (%IACS)	สภาพการต้านทานไฟฟ้า ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	สภาพการนำความร้อน (W/[mK])
63Sn/37Pb	183	8400	21.4 @25°C	11.5	14.99	57.9@32.6°C
96.5Sn/3.5Ag	221	7290	22 @ 20°C	14	12.31	55.3@ 23.9°C

#### 2.4.4 ข้อควรพิจารณาบางประการในขบวนการผลิต

ในการใช้งานจริงยังต้องมีการพิจารณาปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสิ่งต่างๆในขบวนการผลิต อีกหลายประการ เช่นการปรับตั้งเครื่องจักรต่างๆ ให้เหมาะสมกับชนิดของตะกั่วที่เลือกใช้ โดยทั่วไปตะกั่วชนิดไม่มีสารตะกั่วจะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าตะกั่ว แบบดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนแผงวงจรได้ ดังนั้นจึงควรเพิ่มความระมัดระวังในเรื่องนี้เป็นพิเศษ

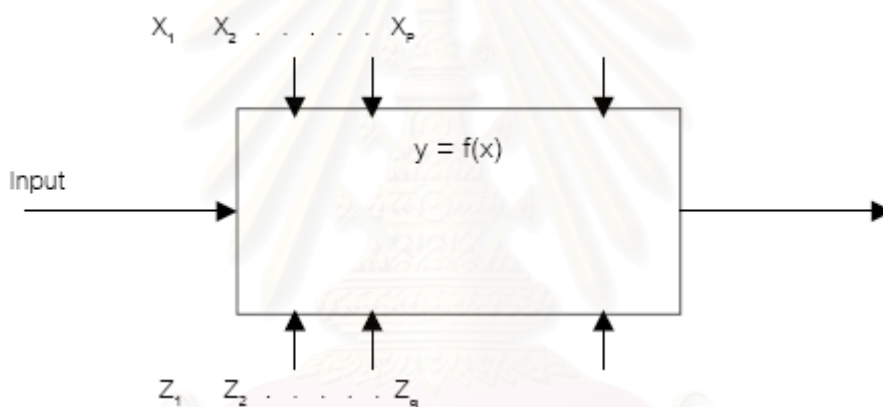
การพัฒนาและฝึกอบรมพนักงานถึงวิธีการบัดกรีด้วยมือและวิธีการซ่อมของเสียก็เป็นสิ่งสำคัญ การบัดกรีตะกั่วชนิดไม่มีสารตะกั่วด้วยมือ โดยทั่วไปจะต้องใช้อุณหภูมิของหัวแร้งที่สูงขึ้น ระยะเวลาของการจี้หัวแร้งนานขึ้น เพื่อให้ตะกั่วมีเวลานานพอที่จะไหลไปเชื่อมกับขั้วของอุปกรณ์ ดังนั้นควรจัดให้มีการฝึกอบรมให้แก่พนักงานที่เกี่ยวข้องถึงวิธีการบัดกรีที่ถูกต้อง บางโรงงานอาจมีการใช้ตะกั่วบัดกรีหลายชนิดทั้งแบบมีและไม่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ก็จำเป็นที่จะต้องมีการระบบแจ้งให้พนักงานที่ทำการซ่อมของเสียได้ทราบชนิดของตะกั่วบัดกรีที่จะนำไปใช้ให้ถูกประเภท

มาตรฐานและเงื่อนไขในการตรวจสอบคุณภาพ ก็ควรจะมีการทบทวนกันใหม่ ต้องมีการพัฒนาความรู้ความเข้าใจในมาตรฐานคุณภาพใหม่ให้แก่พนักงานทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องรวมทั้งผู้บริหาร และลูกค้า

การเปลี่ยนมาใช้ตะกั่วบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนและทบทวนสิ่งต่างๆทั้งในส่วนของ ต้นทุน ขบวนการผลิตและระบบควบคุมคุณภาพอย่างรอบคอบโดยวิศวกรผู้รับผิดชอบ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความราบรื่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และควรที่จะเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่สลับซับซ้อนและมีวงจรชีวิตสั้นเป็นอันดับแรก

## 2.5 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นโดยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรม การทดลองมีบทบาทสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ (Robust Design)



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

$Y$  คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์

$X, Z$  คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

ซึ่ง  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยมีค่าคงที่

$\tau_i$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

$\varepsilon_{ij}$  คือ ความคลาดเคลื่อน

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ ส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input)

สู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งค่าหรือมากกว่า

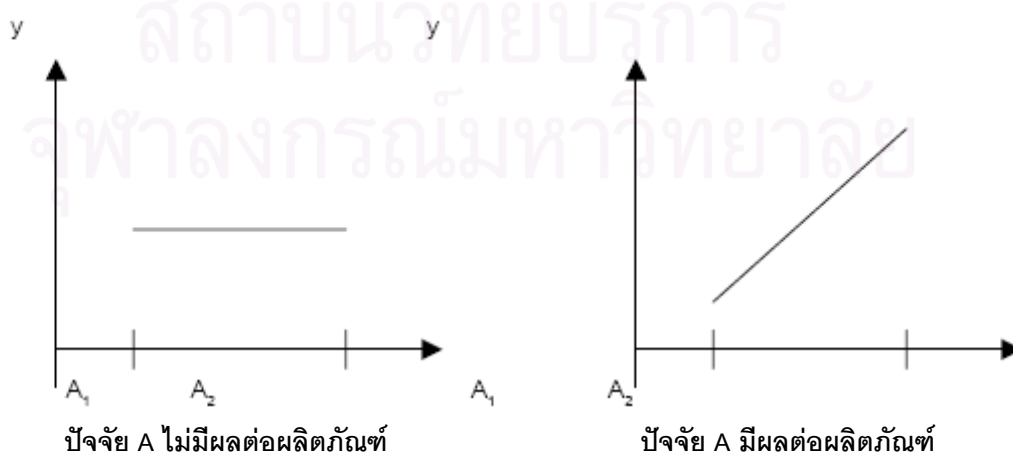
จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ  $X_1, X_2, \dots, X_p$  และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ  $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$

## 2.5.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต

2.5.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

2.5.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมากหรือมีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้อันเปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับแล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้  $y$  เป็นค่าความแข็งเหล็กแท่ง  $A$  เป็นความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

## 2.5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง [9]

- 2.5.2.1 หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  มากที่สุด
- 2.5.2.2 กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
- 2.5.2.3 กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ค่า  $y$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
- 2.5.2.4 กำหนดค่า  $x$  ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors)

$Z_1, Z_2, \dots, Z_q$  มีผลน้อยมาก

## 2.5.3 คำจำกัดความ

- 2.5.3.1 อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีตัวแปรตาม
- 2.5.3.2 ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่เราคิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์
- 2.5.3.3 ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง
- 2.5.3.4 ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดจากผลกระทบเล็กๆ น้อย ๆ และไม่สามารถควบคุมได้

## 2.5.4 หลักในการออกแบบการทดลอง [10]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.5.4.1 การทำซ้ำ (Replication) การทำซ้ำคือการทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2.5.4.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization) การทำแบบสุ่ม คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน

**2.5.4.3 การบล็อก (Blocking)** การบล็อก คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

## 2.5.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง [10]

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการในการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

**2.5.5.1 การนิยามปัญหา** เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

**2.5.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย** เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายคือระบุระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

**2.5.5.2.1 แบบกำหนด** หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

**2.5.5.2.2 แบบสุ่ม** หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

**2.5.5.2.3 แบบผสม** หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

**2.5.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)** ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

**2.5.5.4 การเลือกแบบการทดลอง** การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็น ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

**2.5.5.5 การดำเนินการทดลอง** เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทำการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด เพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้นักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

**2.5.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล** หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์ (Software) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากขึ้น

**2.5.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ** เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง เมื่อสรุปผลแล้ว ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

## 2.5.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง [10]

การใช้หลักการทางสถิติในการทดลองนั้น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.6.1 ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น

2.3.6.2 ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

2.3.6.3 ผู้ทำการทดลอง ควรเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลอง ซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้นไม่สามารถประกันได้ว่า จะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่

2.3.6.4 ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้ถูกต้อง

## 2.5.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing)

### 2.5.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ [11]

สมมติฐาน คือ ความเชื่อของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อหรือสิ่งที่คาดนั้น อาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

### 2.5.7.2 ชนิดของสมมติฐาน [12]

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

2.5.7.2.1 สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์  $H_0$

2.5.7.2.2 สมมติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์  $H_1$

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง



### 2.5.7.3 ประเภทของสมมติฐาน [12]

2.5.7.2.1 สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่กำหนดค่าเฉพาะของพารามิเตอร์ว่าจะลงไปว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด

2.5.7.2.2 สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายๆค่า

สมมติฐานหลักและสมมติฐานอื่นๆ อาจเป็นสมมติฐานประเภทสมมติฐานเดี่ยวหรือสมมติฐานรวมก็ได้ แสดงตามตัวอย่างดังต่อไปนี้

#### ตัวอย่างที่ 1

$$H_0 : \mu = 72$$

$$H_1 : \mu \neq 72$$

ในตัวอย่างนี้ สมมติฐานหลักคือค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 72 ซึ่งเป็นค่าเฉพาะเจาะจง เพราะฉะนั้นสมมติฐานหลักจึงเป็นสมมติฐานเดี่ยว การทดสอบกระทำเพื่อพิสูจน์ว่า  $\mu$  มีค่าเท่ากับ 72 หรือไม่ ส่วนสมมติฐานอื่นๆ เป็นเช่นเดียวกับสมมติฐานหลัก คือเป็นประเภทสมมติฐานเดี่ยว

#### ตัวอย่างที่ 2

$$H_0 : \mu \geq 72$$

$$H_1 : \mu < 72$$

ในตัวอย่างนี้ ทั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานอื่นๆ เป็นประเภทสมมติฐานรวม กล่าวคือค่าเฉลี่ยที่จะทดสอบในสมมติฐานหลักนั้นมีค่าใดๆ ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 72 ส่วนค่าเฉลี่ยในสมมติฐานอื่นๆ มีค่าใดๆ ก็ได้ที่น้อยกว่า 72

#### ตัวอย่างที่ 3

$$H_0 : \mu = 72$$

$$H_1 : \mu < 72$$

ในตัวอย่างนี้ สมมติฐานหลักเป็นประเภทสมมติฐานเดี่ยว ส่วนสมมติฐานอื่นๆ เป็นประเภทสมมติฐานรวม

#### 2.5.7.4 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน [12]

2.5.7.4.1 ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

2.5.7.4.2 ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์  $\beta$  เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานอื่นๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท ( $\alpha$  และ  $\beta$ ) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ  $\alpha$  ลดลง ค่าของ  $\beta$  จะเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าของ  $\alpha$  เพิ่มขึ้น ค่าของ  $\beta$  จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อมๆกัน ทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

#### 2.5.7.5 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง [9]

2.5.7.5.1 การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบบางที่ (Fixed Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \text{ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ}$$

$$H_1 : \text{ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์  $\mu$  เมื่อ  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ } (i,j)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์  $\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

$$H_1 : \tau_i \neq 0 ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } i$$

2.5.7.5.2 การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน ( $\sigma_{\tau}^2$ ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \sigma_{\tau}^2 = 0$$

$$H_1 : \sigma_{\tau}^2 > 0$$

2.5.7.5.3 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effects Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองมีลักษณะเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Levels) และแบบสุ่ม (Random Levels) รวมกันอยู่ จะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

## 2.5.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง [9]

### 2.5.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

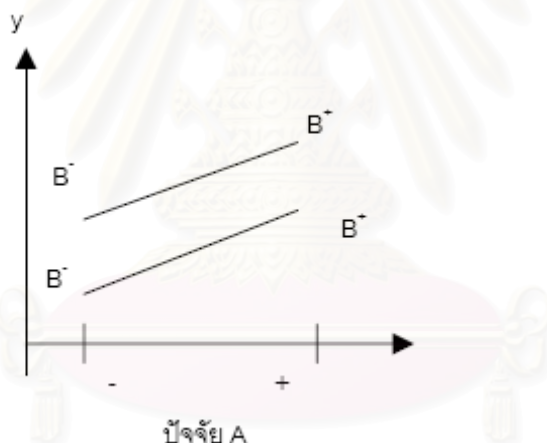
2.5.8.1.1 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัย มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อย และไม่มีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) โดยการทดลองจะใช้หลักการทำแบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

2.5.8.1.2 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง และต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง บางครั้งปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและไม่สามารถควบคุมได้ จึงใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนออกได้

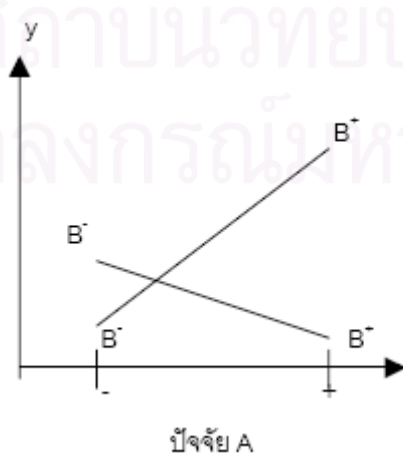
### 2.5.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย C ประกอบด้วย 3 ระดับ ในการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด  $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$  การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.19 แสดงการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



รูปที่ 2.20 แสดงการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

#### 2.5.8.2.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $2^k$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทดลองที่เจาะลึกต่อไป

#### 2.5.8.2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล $3^k$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $3^k$  เป็นการทดลองที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

#### 2.5.8.2.3 การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

### 2.5.8.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

2.5.8.3.1 แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)

2.5.8.3.2 แผนการออกแบบการทดลองเนสเต็ด (Nested Design)

2.5.8.3.3 แผนการออกแบบการทดลองสปีทพล็อต (Split-Plot Design)

2.5.8.3.4 แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

## 2.5.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) [12]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

*ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล*

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลายๆค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบ

ผลกระทบคงที่ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่มรูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E$$

โดยที่

$SS_T$  คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

$SS_{Tr}$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

$SS_E$  คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS - Mean Square) โดยที่ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองสามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS / DF$$

โดยที่

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ (Degree of freedom)

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความแปรผันคือ

$$F = MS_{Tr} / MS_E$$

โดยที่

$MS_{Tr}$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

$MS_E$  คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การเปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า  $F_{\alpha, v_1, v_2}$

ถ้า  $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$

ถ้า  $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

$v_1$  คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

$v_2$  คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

### 2.5.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) [10]

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างรูปแบบเชิงเส้นขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, a$  (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$  (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$  (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$  (จำนวนซ้ำ)

และ  $Y_{ijkl}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

$\beta_j$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

$\gamma_k$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{ik}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{jk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A, B และ C

$\varepsilon_{ijkl}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม



โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณและใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a-1	SS <sub>A</sub> /DF	MS <sub>A</sub> /MS <sub>E</sub>
B	SS <sub>B</sub>	b-1	SS <sub>B</sub> /DF	MS <sub>B</sub> /MS <sub>E</sub>
C	SS <sub>C</sub>	c-1	SS <sub>C</sub> /DF	MS <sub>C</sub> /MS <sub>E</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub> /DF	MS <sub>AB</sub> /MS <sub>E</sub>
AC	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	SS <sub>AC</sub> /DF	MS <sub>AC</sub> /MS <sub>E</sub>
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	SS <sub>BC</sub> /DF	MS <sub>BC</sub> /MS <sub>E</sub>
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	SS <sub>ABC</sub> /DF	MS <sub>ABC</sub> /MS <sub>E</sub>
Error	SS <sub>E</sub>	abc(n-1)	SS <sub>E</sub> /DF	
Total	SS <sub>T</sub>	abcn-1		

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n \frac{y_{ijkl}^2 - y_{...}^2}{abcn}$$

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

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

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c \frac{y_{k...}^2 - y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij...}^2 - y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{ik...}^2 - y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{jk...}^2 - y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk...}^2 - y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ(F-Distribution) โดยกำหนดค่า  $\alpha$  ก่อน หากค่า  $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น  $(1-\alpha)\%$  แต่ถ้าหาก  $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$  นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น  $(1-\alpha)\%$

### 2.5.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

[9]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$\text{สมการเชิงเส้นตรง : } y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

โดยที่  $y_{ij}$  คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

$\tau_i$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย

$\epsilon_{ij}$  คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่มจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติ สมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดย

สามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต  $j$  ของระดับที่  $i$  ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

โดยที่  $\hat{y}_{ij}$  คือค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned}\hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_i - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_i\end{aligned}$$

จากสมการ ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่  $i$  ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.5.9.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยนำค่าส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบ ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

2.5.9.2.1.1 การทดสอบแบบไคร้สแควร์ ( $\chi^2$ -Goodness of Fit Test)

2.5.9.2.1.2 การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ-สเมอร์นอฟ (Kolmogorov - Smirnov Test)

2.5.9.2.1.3 การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2.5.9.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

2.5.9.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจายระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของ

การกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจายระหว่างค่าส่วนตักกับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

### 2.5.10 การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร (Test of Two Parameters) [12]

การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของสองประชากร โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์กับค่าความน่าจะเป็นของการยอมรับสมมติฐานหลักสมมติฐานสำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร มีดังต่อไปนี้

กรณีการทดสอบสองด้าน

$$H_0 : \mu_{\xi} = \mu_{\psi}$$

$$H_1 : \mu_{\xi} \neq \mu_{\psi}$$

กรณีการทดสอบด้านเดียว

$$\text{ก. } H_0 : \mu_{\xi} = \mu_{\psi} \quad \text{หรือ} \quad \mu_{\xi} \leq \mu_{\psi}$$

$$H_1 : \mu_{\xi} > \mu_{\psi}$$

$$\text{ข. } H_0 : \mu_{\xi} = \mu_{\psi} \quad \text{หรือ} \quad \mu_{\xi} \geq \mu_{\psi}$$

$$H_1 : \mu_{\xi} < \mu_{\psi}$$

การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.5.10.1 การทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากร (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal when both standard deviations are known.)

ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสองประชากรมีค่าเท่ากันหรือไม่ โดยทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากร สถิติสำหรับการทดสอบก็คือ  $U$  ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$U = \frac{X - Y}{(\sigma_x^2/nx + \sigma_y^2/ny)^{1/2}}$$

โดยที่

$X$  คือค่าเฉลี่ยของค่าของตัวแปรแบบสุ่มที่มาจากประชากรแรก ซึ่งมี  $\sigma_x^2$  เป็นค่าความแปรปรวน โดยมีจำนวนประชากร  $nx$

$Y$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าของตัวแปรแบบสุ่ม ที่มาจากประชากรที่สอง ซึ่งมี  $\sigma_y^2$  เป็นค่าความแปรปรวน โดยมีจำนวนประชากร  $ny$

2.5.10.2 การทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal, assuming that the standard deviations are unknown but equal.)

ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสองประชากรมีค่าเท่ากันหรือไม่ โดยไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน สถิติสำหรับการทดสอบก็คือ  $t$  ซึ่งคำนวณได้จากสูตรเมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจแสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตามดังนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่นเท่ากับ 0.1 แสดงว่า 10% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 90% ที่เหลือมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่นเท่ากับ 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลือมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

### 2.5.11 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง [10]

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือสำคัญในระบบงานของด้านวิศวกรรม สำหรับการเพิ่มสมรรถนะของกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้ เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการ สามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

2.5.11.1 การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ

2.5.11.2 การลดความผันแปรของกระบวนการ และกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ

2.5.11.3 การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา

2.5.11.4 การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรม ทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรม จะรวมถึงสิ่งต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์
- หาพารามิเตอร์ในการออกแบบที่มีผลต่อสมรรถภาพของผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 ยงยุทธ ธนัญญาพร [13]

การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้ เป็นการศึกษาดัชนีแปรของกรรมวิธีการผลิตฝาปิดถังน้ำมัน เพื่อลดปัญหาการบุบและตุงของชิ้นงานฝาปิดถังน้ำมัน โดยได้นำหลักการออกแบบการทดลองมาทำการวิเคราะห์ศึกษาตัวแปร ซึ่งกำหนดขอบเขต 2 ตัวแปร คือ ความดันเสามี 5 ระดับที่ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และช่องระบายอากาศมี 4 ระดับที่ 0, 3, 5, 7 รู ทำการทดลอง 8 ครั้ง สำหรับแต่ละระดับและใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีสเปคิฟิเคชันเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปมากที่สุด ในฝ่ายผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ของโรงงานตัวอย่าง

จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลคือ ความดันเสาะและช่องระบายอากาศที่ระดับแตกต่างกันไป มีระดับความเชื่อมั่นที่นัยสำคัญร้อยละ 99 โดยที่คุณภาพผิวของชิ้นงานจะดีเมื่อใช้ความดันเสาะที่ระดับ 2.0 และ 2.5 kg/cm<sup>2</sup> และช่องระบายอากาศที่ 5 และ 7 รู เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดของการขึ้นรูป

### 2.6.2 มะลิ แซ่อิง [14]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบดีบุกด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตใหม่ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวม งานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความหนาผิวเคลือบโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล จากการวิเคราะห์แผนภูมิต่างกล่าว ทำให้ทราบว่า 6 ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความหนา ปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ ความสูงของแผ่นกั้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวและความหนาแน่นกระแส การออกแบบการทดลองได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ย และให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนอง

จากการทดลองพบว่าเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ ความเข้มข้นอิเล็กโตรไลต์ เวลาในการเคลือบและความหนาแน่นกระแส ความสูงของแผ่นกั้นที่ 35 มิลลิเมตรให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนอง การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมได้ความหนาผิวเคลือบใกล้ค่ากึ่งกลางและมีความผันแปรน้อยที่สุดโดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วย

ไฟฟ้าและกระบวนการตัดและขึ้นรูปขางานและการทดสอบไซลเดอรัวบีลิตี ผลการทดลองพบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพล คือ เวลาในการเคลือบผิวและความหนาแน่นกระแสด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือ ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร และ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 55 วินาที

### 2.6.3 จันทรา ยอดมนต์ [15]

ในการวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับของอีกปัจจัยหนึ่งได้ นั่นคือสามารถหาอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ขั้นตอนการสร้างชิ้นกึ่งฉนวนที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 6 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความนำไฟฟ้าของไซเดียมเตตระโบเรต, แรงดันไฟฟ้าในขั้นตอนเออาโนไดเซชัน เวลาในขั้นตอนเออาโนไดเซชัน ค่าความนำไฟฟ้าของกรดฟอสฟอริก แรงดันไฟฟ้าในขั้นตอนเออาโนไดเซชัน และ เวลาในขั้นตอนเออาโนไดเซชัน ส่วนขั้นตอนการซ่อมแซมและคัดแยกของเสียที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า เวลา และอัตราเร็วในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

จากผลการวิจัยสามารถทราบความสัมพันธ์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดง ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหลในขั้นตอนการสร้างและซ่อมแซมชิ้นกึ่ง ฉนวนได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุด 5.9 และ 14.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จาก ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถหาสภาวะปฏิบัติการที่ ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าต่ำสุดภายใต้ขอบเขตระยะเวลาในการผลิตที่น้อยที่สุด โดยปริมาณกระแส รั่วไหลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

### 2.6.4 วิชาญ วรรณนา [16]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น และเสนอ เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการพิจารณาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นโดยใช้การระดมสมอง ทำให้สามารถเลือกปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับ กระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย (1) อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง (2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง และ (3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช โดยใช้แผนการทดลอง  $2^k$  แฟกทอเรียลในการทดลองเบื้องต้นโดยทุกระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อ ตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ชนิดมี



ผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น การทดลองแบบแฟคทอเรียลได้ถูกนำมาใช้อีกครั้ง โดยเพิ่มระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด คือ (1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่หนึ่ง 200 ลิตรต่อนาที (2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง 0.9 เมตรต่อนาที และ (3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช 1,530 องศาเซลเซียส จากสภาวะดังกล่าวข้างต้น พบว่าสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ 158 มิลลิเมตร จากความยาวเดิม 681.17 มิลลิเมตร และยังพบว่าสามารถลดความยาวเพื่อตัดของเหล็กปลายสั้นลงได้ 264 มิลลิเมตร จากความยาวเดิม 349 มิลลิเมตร ดังนั้นสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ทั้งหมด 422 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

#### 2.6.5 เอนกพงศ์ สุขมี [17]

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะของพารามิเตอร์ภายในเครื่องบัดกรีแบบอัตโนมัติ ที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานน้อยที่สุดจากผลของการทดลองเบื้องต้นโดยการวิเคราะห์แฟรคชันนอลแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองซึ่งมีพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 6 ตัว

ผลการทดลองพบว่า มุมเอียงของรางเลื่อน แรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นชีพ และแรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นแลมด้า มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานอย่างนัยสำคัญที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  ส่วนอุณหภูมิภายในอ่างส่วนผสมโลหะเหลว อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน และความเร็วในการเคลื่อนที่ของรางเลื่อน ไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน เมื่อนำพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานมาออกแบบและวิเคราะห์การทดลองอีกครั้งโดยใช้เทคนิค

Response Surface Methodology แบบ Box-Behnken Design จะได้สมการถดถอยของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน คือ  $Y=355.425 - 12.35A - 47.25B + 0.9C + 0.175A^2 + 3.5B^2 + 0.009C^2$  โดยได้คำตอบของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน (Y) น้อยที่สุดคือแรงดันไฟฟ้าสร้างคลื่นแลมด้า (C) ที่ 40 Volt. เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า จำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมเฉลี่ย 41,240 จุด เหลือเพียง 9,020 จุด ในจำนวนการผลิตชิ้นงานเฉลี่ย 40,000 ชิ้น/เดือน คิดเป็นจุดบกพร่องที่ลดลงได้ 76.75% และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขจุดบกพร่องจากเดิม 212,880 บาท/ปี เหลือเพียง 46,543 บาท/ปี ซึ่งคิดเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 166,337 บาท/ปี

### 2.6.6 ปริณญา ศรีสัตยกุล. [18]

วิทยานิพนธ์นี้ ภายหลังจากการศึกษาปรับปรุงคุณภาพของการเกิดจุดบกพร่องในกระบวนการพิมพ์ตะกั่วบัดกรีพร้อมหลอมละลายเคลือบแผ่นวงจร (PWB) โดยเน้นผลตอบสนองของจุดบกพร่องแบบผิวตะกั่วบัดกรีไม่เรียบ (Grainy) และแบบผิวตะกั่วบัดกรีด้าน (Cold Solder) ซึ่งพบเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิตในกระบวนการปัจจุบันจากผลการศึกษาเบื้องต้น

การดำเนินการทดลอง ในส่วนแรกเป็นการศึกษากระบวนการพิมพ์ตะกั่วบัดกรี โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยเดียว ซึ่งผลลัพธ์ที่เหมาะสม คือ ปัจจัยแรงดันพิมพ์ตะกั่วบัดกรีควรจะเป็น  $2 \times 10^5$  นิวตันต่อตารางเมตร ส่วนที่สองเป็นการศึกษากระบวนการหลอมละลายเคลือบ โดยใช้การวิเคราะห์แฟร็กชันนอลแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เพื่อกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อกระบวนการออกก่อน มีอุณหภูมิที่ควบคุม 7 ช่วง ซึ่งแบ่งเป็นช่วงที่ 1 และ 2 คือ ช่วงตะกั่วบัดกรีอ่อนตัวพร้อมเคลือบขึ้นชั้น ส่วน ช่วงที่ 3 4 และ 5 คือ ตะกั่วบัดกรีจะไหลเคลือบขึ้นชั้น ส่วน ช่วงที่ 6 และ 7 คือ การอบคลายความเครียดให้กับชิ้นงาน อีกปัจจัยหนึ่ง คือ ความเร็วรอบสายพาน จากการศึกษาเหลือปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอยู่เพียง 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิช่วง 4 5 และ 7 และความเร็วรอบสายพาน จากนั้นนำใช้การวิเคราะห์แฟร็กชันนอลแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เพื่อกรองปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการออกก่อน มีอุณหภูมิที่ควบคุม 7 ช่วงซึ่งแบ่งเป็นช่วงที่ 1 และ 2 คือ ช่วงตะกั่วบัดกรีอ่อนตัวพร้อมเคลือบขึ้นชั้น ส่วน ช่วง 3,4 และ 5 คือ ตะกั่วบัดกรีจะไหลเคลือบขึ้นชั้น ส่วน ช่วงที่ 6 และ 7 คือ การอบคลายความเครียดให้กับชิ้นงาน อีกปัจจัยหนึ่ง คือ ความเร็วรอบสายพานจากการศึกษาเหลือปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอยู่เพียง 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิช่วง 4 5 และ 7 และความเร็วรอบสายพาน จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 4 มาวิเคราะห์เชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบพร้อมเพิ่มค่าที่จุดศูนย์กลางของปัจจัย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยผลที่ได้ คือ การควบคุมระดับอุณหภูมิช่วง 4 5 และ 7 ที่ระดับ 150 165 และ 330 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนความเร็วรอบสายพานที่ระดับ 80 เซนติเมตรต่อนาที

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

กระบวนการการทำรีโพลีเมอร์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมต้องมีการควบคุมตัวแปรตอบสนองที่สำคัญในรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (Temperature profile) ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ในรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.1 คือ

- 1) เวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) ในช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า  $240^{\circ}\text{C}$ )
- 2) อุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature)

ดังนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจคือ

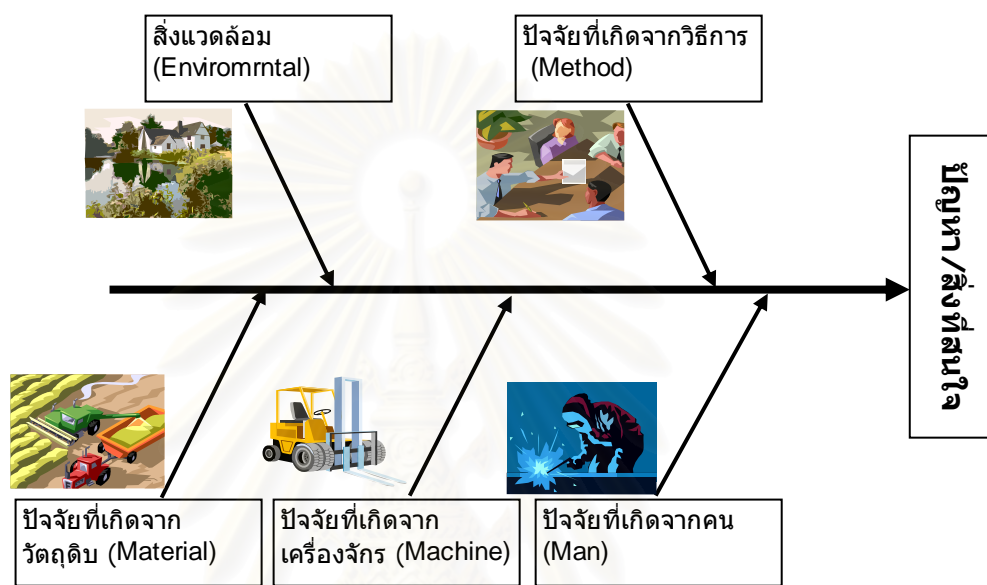
- 1)  $Y_k$  คือ เวลาที่คงอยู่ (Keeping Time) ในช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า  $240^{\circ}\text{C}$ )
- 2)  $Y_m$  คือ อุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature)

#### 3.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ในการทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และ อุณหภูมิสูงสุดจะใช้การระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง โดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เมื่อพิจารณาปัจจัยในการทำรีโพลีเมอร์ พบว่ามีปัจจัยมากมายเข้ามาเกี่ยวข้องและมีอิทธิพลต่อเวลาที่คงอยู่ และอุณหภูมิสูงสุด ดังนั้นในขั้นต้น จึงควรพิจารณาถึงปัจจัยโดยสามารถจำแนกปัจจัยออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักๆ ตามหลักการ 4M 1Eดังต่อไปนี้

- 1) ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
- 2) ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
- 3) ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
- 4) ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
- 5) สิ่งแวดล้อม (Environmental)

โดยการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ที่เกิดจากการระดมสมองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผล กับ ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาสาเหตุที่มาของปัญหา สามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่เป็นรากเหง้า (Root cause) ของปัญหาได้ โดยทั่วไปมักแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุของปัญหาว่าเกิดจาก คน เครื่องจักร วัสดุ วิธีการ และปัจจัยแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)

จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยพิจารณาจากตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยง (RPN – Risk Priority Number) โดยจะเลือกจากปัจจัยที่มีตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงสูงๆ เพื่อทำการทดลองเบื้องต้นต่อไป

### 3.2.1 การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

หลังจากที่ทำการศึกษาคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ และ อุณหภูมิสูงสุด ในหัวข้อที่ 3.2 ขึ้นต่อไปจะทำการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ และ อุณหภูมิสูงสุด โดยการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยและปัจจัยที่ไม่เลือกใช้ในการวิจัยซึ่งจะถูกควบคุมให้คงที่ แล้วนำปัจจัยที่ถูกเลือกเหล่านี้มาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อพิสูจน์ยืนยันถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ปัจจัยเหล่านั้น มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดในกระบวนการการทำรีโฟลว์ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เมื่อทำ

การวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงสถิติแล้ว จะต้องทำการตีความหมายออกมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยผลสรุปที่ได้จากการทดลอง จะสามารถบอกได้ว่า ปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจในกระบวนการที่ทำการศึกษาดูด้วยระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญตามที่ต้องการในการทำการทดลองเพื่อยืนยันสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้น ควรจะมีการออกแบบแผนการทดลองตามลำดับขั้นตอนเพื่อสามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง ตามหลักการของการออกแบบการทดลอง

### 3.2.2 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

เพื่อพิสูจน์ยืนยันถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยที่ถูกกำหนดเหล่านั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ( $Y_k, Y_m$ ) ที่สนใจ ในการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเมื่อปัจจัยมี 2 ระดับ ( $2^k$  Factorial Design) ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมที่จะเป็นการทดลองเบื้องต้น (Factor Screening Experiment) เพื่อที่จะตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดออกไป ข้อดีของการทดลองแบบนี้คือใช้ตัวอย่างน้อยที่สุด ทำให้ประหยัดเวลาในการทดลองและใช้ทรัพยากรต่างๆไม่มาก ส่วนข้อเสียคือให้สารสนเทศไม่มากพอเพราะเป็นการกำหนดปัจจัยไว้เพียง 2 ระดับเท่านั้น โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (+) และค่าต่ำสุด (-) เพื่อเป็นการคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดขนาดและประหยัดเวลาในการทำการออกแบบการทดลองจริง ในการทดลองนี้จะทำการหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจด้วยระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญตามที่ต้องการ

ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะได้รับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า  $\alpha$  ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้การพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effect) และ ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ว่ามีผลกระทบต่อผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นหรือไม่

### 3.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

การกำหนดระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยที่ควบคุมในการทดลองนี้ จะกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) เป็นแบบกำหนดคงที่ (Fixed Level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่กำหนดค่าได้แน่นอน โดยอาศัยความรู้พื้นฐานในกระบวนการการผลิตและประสบการณ์จากพนักงานที่มีความชำนาญทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ควรใช้ในการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 2 ระดับ และเพื่อเป็นการหาเงื่อนไขใหม่ในการตั้งค่าของเครื่องรีโพลีวจึงได้กำหนดระดับของปัจจัยนอกช่วงใช้งานปกติคือ น้อยกว่าค่าต่ำสุด และมากกว่าค่าสูงสุด โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (+) และค่าต่ำสุด (-) และทำการกำหนดระดับกลางเพิ่มอีก 1 ระดับเป็น 3 ระดับ เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน

### 3.3 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง

#### 3.3.1 แผนการออกแบบการทดลอง

หลังจากสามารถคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แล้วจะทำการเลือกแผนการออกแบบการทดลอง คือ ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่เมื่อปัจจัยมี 3 ระดับ ( $3^K$  Factorial Design with Fixed Effect Model) โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (+) ค่ากลาง (0) และค่าต่ำสุด (-) ซึ่งเทอมที่สำคัญของการทดลองแบบนี้ประกอบด้วย

- 1) อิทธิพลหลัก (Main Effect) หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา
- 2) ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) หมายถึงการแสดงผลของระดับต่างๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

#### 3.3.2 หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

- 1) การทำแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการเกลี่ยออก (Balance Out) อิทธิพลแทรกซ้อน (Noise Effect) ต่าง ๆ ที่มีต่อข้อมูล เป็นการทำให้การเก็บข้อมูลนั้นมีการกระจายอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งจะได้ข้อมูลทุกตัวอย่างเท่าเทียมกัน โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization)

2) การทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดออก (Average Out) อิทธิพลแทรกซ้อน (Noise Effect) ต่าง ๆ ที่มีในข้อมูล เป็นการกำหนดจำนวนครั้งในการทดลอง โดยในการทดลองนี้ได้มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ที่ระดับของปัจจัยต่างๆ เหมือนกันเพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นจะนำไปใช้เป็นหลักในการดำเนินการทดลอง โดยมีประเด็นหลักๆที่จะต้องพิจารณาอย่างเคร่งครัด เช่น การเก็บข้อมูลต้องทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม เพื่อให้กระจายของข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติและมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลการทดลองต้องควบคุมให้เป็นไปตามแผนที่ได้วางไว้ ปัจจัยที่ถูกควบคุมต้องทำการควบคุมตามที่ได้กำหนดไว้ในแผนการทดลอง

### 3.4 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในเครื่องรีฟิวระหว่างเทอร์โมคัปเปิลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ทางช่อง PCMCIA ดังนี้

- 1) อุปกรณ์เชื่อมต่อเป็นของบริษัท KEYENCE รุ่น NR-250 PC
- 2) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ซึ่งมีย่านการวัดอยู่ที่  $-270$  ถึง  $1370$  °C มีความละเอียด (Resolution)  $0.1$  °C ในช่วงใช้งาน  $-220$  ถึง  $1370$  °C และจะมีความละเอียด  $0.025$  °C ในช่วงใช้งาน  $-20$  ถึง  $1150$  °C



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์เชื่อมต่อ KEYENCE รุ่น NR-250 PC

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้หลักการทางสถิติ เข้าช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ตามหลักการต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.5.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab Release 14.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลอง โดยการวิจัยนี้จะใช้วิเคราะห์ผลทั้งในส่วนของการทดลองเบื้องต้น การทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ว และการทดลองเพื่อยืนยันผล

#### 3.5.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ซึ่งทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งค่าส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกันทั้งนี้ต้องได้จากการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยจะทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเป็นอิสระรูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (Trend) นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

#### 3.5.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ

โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม  $P_k = (k-1/2)/n$  โดย  $P_k \times 100$  อยู่บนแกนตั้งส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน



### 3.5.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

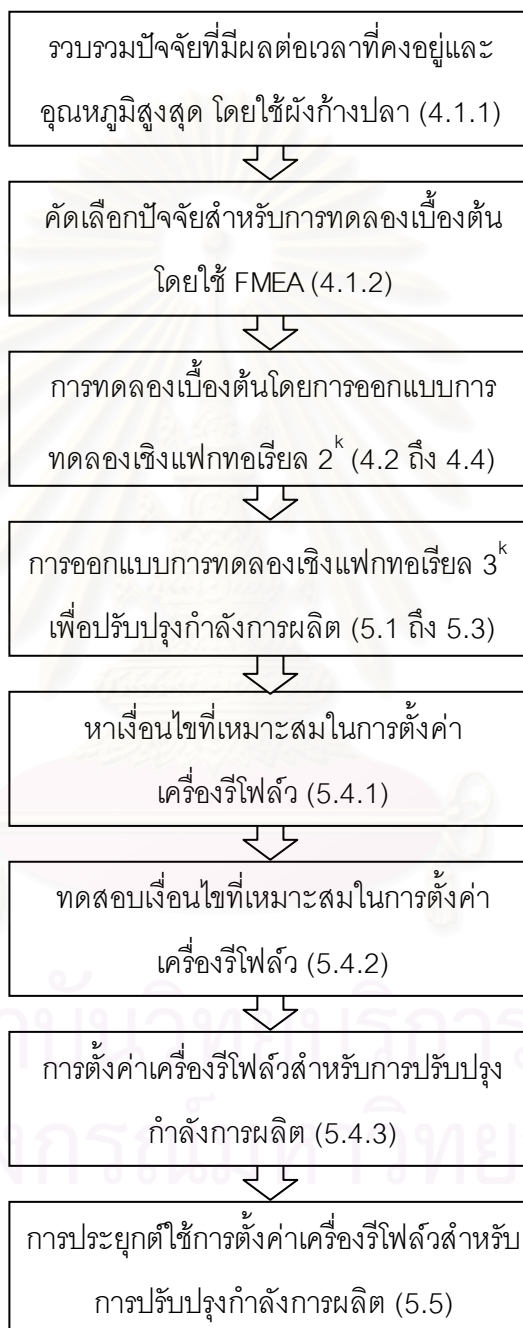
เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอนดังแสดง ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมานี้มีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

### 3.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า  $\alpha$  ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า  $\alpha$  แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้การพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effect) และ ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ว่ามีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองนั้นหรือไม่

### 3.6 ขั้นตอนการปรับปรุงกำลังการผลิต

ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์ว แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



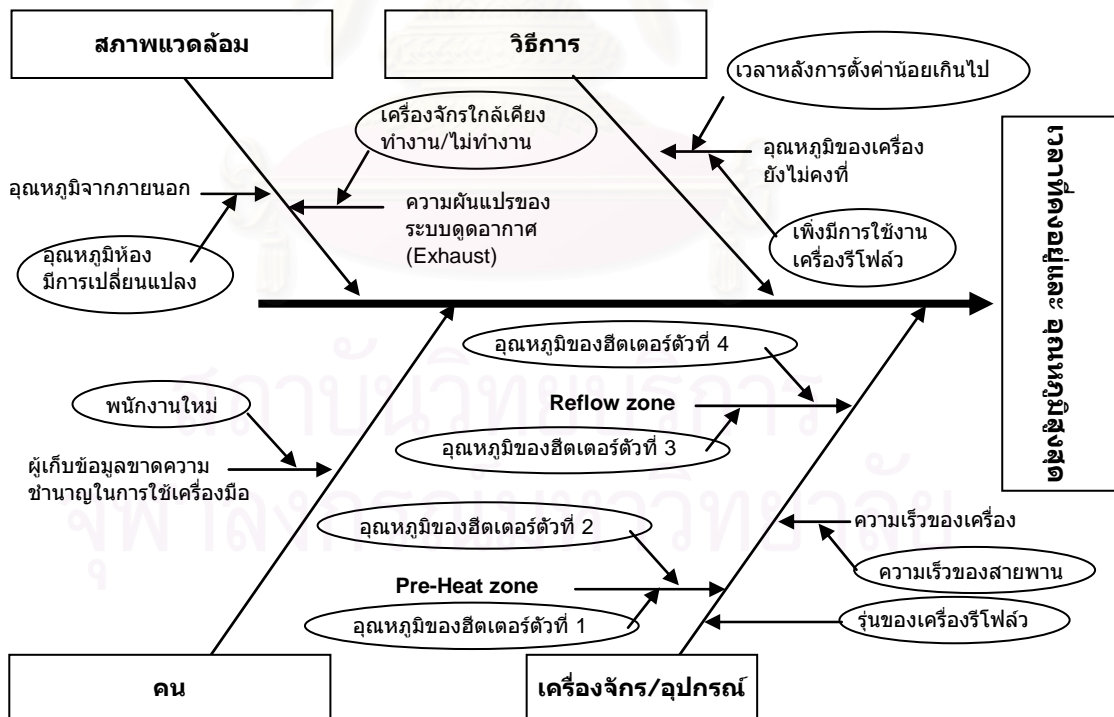
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการปรับปรุงกำลังการผลิต

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัย

#### 4.1 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

ในการรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด โดยใช้การระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเบื้องต้น ผู้เชี่ยวชาญประกอบด้วย วิศวกรฝ่ายผลิต 2 คน วิศวกรฝ่ายเครื่องจักร 2 คน วิศวกรฝ่ายควบคุมคุณภาพ 1 คน หัวหน้างานฝ่ายผลิต 2 คน พนักงานอาวุโสฝ่ายผลิต 3 คน จากรูปที่ 2.6 ได้แสดงว่าเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดเป็นตัวแปรตอบสนองที่มีผลมาจากปัจจัยชุดเดียวกัน ดังนั้นผลการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวกับปัจจัยต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

จากการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาพบว่า ปัจจัยทั้งที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดในการทำรีโฟลว์มีทั้งหมด 11 ปัจจัยดังนี้

**4.1.1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1** คือการตั้งค่าความร้อนของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 ในเครื่องรีโฟลว์ ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงแรก

**4.1.2 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2** คือการตั้งค่าความร้อนของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 ในเครื่องรีโฟลว์ ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงกลาง

**4.1.3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3** คือการตั้งค่าความร้อนของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ในเครื่องรีโฟลว์ ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงกลาง

**4.1.4 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4** คือการตั้งค่าความร้อนของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ในเครื่องรีโฟลว์ ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงสุดท้าย

**4.1.5 ความเร็วของสายพาน** คือการตั้งค่าความเร็วของสายพานในเครื่องรีโฟลว์เป็นตัวกำหนดรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา

**4.1.6 รุ่นของเครื่องรีโฟลว์ (Machine model)** คือชนิดของเครื่องรีโฟลว์ที่มีใช้อยู่ในกระบวนการผลิต มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดได้แก่ 1) แบบใช้ลมร้อน (Hot air type) 2) แบบใช้รังสีความร้อน (Infared) 3) แบบใช้แสงเหนือม่วง (Ultraviolet) เครื่องแต่ละชนิดใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแตกต่างกันตามชนิดของเครื่องแต่โดยพื้นฐานแหล่งกำเนิดความร้อนหลักคือฮีตเตอร์ แต่จะมีรังสีความร้อน (Infared) เพิ่มเข้ามาในส่วนของเครื่องแบบที่ 2 และสำหรับเครื่องแบบสุดท้าย มีหลอดยูวี (UV - Ultraviolet Lamp) ช่วยเพิ่มความร้อน โดยที่เครื่องส่วนใหญ่กระบวนการผลิตคือแบบใช้ลมร้อนซึ่งใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากฮีตเตอร์ทั้ง 4 ตัวเท่านั้น

**4.1.7 เวลารอของการตั้งค่าแต่ละครั้ง (Interval time)** คือระยะเวลาหลังจากการตั้งค่าเครื่องแต่ละครั้ง เนื่องจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของฮีตเตอร์แต่ละครั้ง ต้องใช้เวลาในการเพิ่มหรือลดความร้อนระยะหนึ่งเพื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady state) หากทำการเก็บข้อมูลเร็วเกินไปข้อมูลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง

**4.1.8 ช่วงเวลารอในการเก็บข้อมูล (Waiting time)** มีความหมายใกล้เคียงกับเวลารอของการตั้งค่าแต่ละครั้ง แต่การที่อุณหภูมิยังคงไม่เข้าสู่สถานะคงตัวคือ การใช้งานเครื่องรีโฟลว์ในการผลิตเนื่องจากความร้อนภายในเครื่องต้องสูญเสียให้กับตัวเก็บประจุที่ทำการผลิต ดังนั้นหากทำการเก็บข้อมูลหลังการใช้งานเครื่องไม่นานเพียงพอข้อมูลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง

**4.1.9 เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน** ในกระบวนการผลิตเดียวกันยังมีเครื่องจักรชนิดอื่น ที่ใช้ระบบดูดอากาศ (Exhaust) ด้วยกัน ดังนั้นหากมีเครื่องจักรบางเครื่องหยุดการทำงานจะส่งผลถึงระบบดูดอากาศของเครื่องรีโฟลว์ให้มากเกินไปทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

**4.1.10 ความแปรปรวนของอุณหภูมิห้อง** เนื่องจากเครื่องรีโฟลว์เป็นระบบเปิดและมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความร้อนหรือความเย็นของสิ่งแวดล้อมรอบๆ เครื่องจะส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเครื่อง เช่น การเปิดตู้อบขนาดใหญ่เป็นเวลานานซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณใกล้เคียงสูงขึ้นและอาจส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเครื่อง

**4.1.11 ผู้ทำการเก็บข้อมูล** อาจมีผลต่อความถูกต้องในการเก็บข้อมูล หากผู้ทำการเก็บข้อมูลขาดความชำนาญในการใช้เครื่องมือ

## 4.2 การคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองเบื้องต้น

จากการรวบรวมปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดทั้ง 11 ปัจจัย ได้นำปัจจัยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis) โดยผู้เชี่ยวชาญชุดเดิม เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยพิจารณาจากตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยง (RPN – Risk Priority Number) โดยจะเลือกจากปัจจัยที่มีตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงสูงๆ เพื่อทำการทดลองเบื้องต้นต่อไป โดยการอ้างอิงเกณฑ์การประเมินความรุนแรง (Severity) ในตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความถี่ในการเกิด (Occurance) ในตารางที่ 4.2 และเกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (Detection) ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA

ผลจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลจากข้อบกพร่อง		คะแนน
	ผลกระทบต่อลูกค้า	ผลกระทบต่อกระบวนการผลิต	
ก่อให้เกิดอันตรายโดยไม่มีการเตือน	มีความรุนแรงสูงมากก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงานและ/หรือ ขัดต่อกฎหมาย ข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	หรืออาจก่อให้เกิดอันตรายต่อพนักงานหรือเครื่องจักรโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	10
ก่อให้เกิดอันตรายโดยมีการเตือน	มีความรุนแรงสูงมากก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงาน และ/หรือขัดต่อกฎหมาย ข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยมีการเตือนล่วงหน้า	หรืออาจก่อให้เกิดอันตรายต่อพนักงานหรือเครื่องจักรโดยมีการเตือนล่วงหน้า	9
สูงมาก	ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ มีความสูญเสียในภาระหน้าที่หลัก	หรือผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจจะต้องกำจัดทิ้ง เพราะความไม่มีคุณภาพหรือ อาจต้องมีการซ่อมแซม ผลิตภัณฑ์โดยแผนกซ่อมแซม โดยใช้เวลามากกว่าหนึ่ง ชั่วโมง	8
สูง	ผลิตภัณฑ์สามารถได้รับการไปใช้งานได้ด้วยความสามารถที่ลดลง ลูกค้ามีความไม่พอใจมาก	หรือมีผลต่อผลิตภัณฑ์มาก ผลิตภัณฑ์อาจจะต้องผ่านการตรวจสอบแบบคัดเลือกและ อาจมีผลิตภัณฑ์บางส่วน (<100%) ได้รับการกำจัดทิ้ง เพราะความไม่มีคุณภาพหรือ ต้องมีการซ่อมแซมโดยแผนกซ่อมแซมผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้เวลาระหว่างครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมง	7

ผลจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลจากข้อบกพร่อง		คะแนน
	ผลกระทบต่อลูกค้า	ผลกระทบต่อกระบวนการผลิต	
ปานกลาง	ผลิตภัณฑ์สามารถได้รับการนำไปใช้งานได้แต่ความสะดวกสบายลดน้อย ลงลูกค้ามีความไม่พอใจ	หรือมีผลต่อผลิตภัณฑ์เล็กน้อย (<100%) ผลิตภัณฑ์บางส่วนอาจจะต้องได้รับการกำจัด ที่ซึ่งเพราะความไม่มีคุณภาพ (โดยไม่มีการคัดเลือก) หรือต้องมีการซ่อมแซมผลิตภัณฑ์โดย แผนกซ่อมแซมโดยใช้เวลาน้อยกว่าครึ่งชั่วโมง	6
ต่ำ	ผลิตภัณฑ์สามารถได้รับการนำมาใช้ งานได้ดีแต่ด้านความสะดวกสบาย สามารถดำเนินการได้ด้วยสมรรถนะต่ำลง	หรือผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจต้องได้ รับการนำมาทำใหม่ (Rework) หรือ อาจต้อง มีการซ่อมแซมผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องส่งไปที่แผนกซ่อมแซม	5
ต่ำมาก	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ อาจจะไม่ดีนัก ลูกค้าส่วนใหญ่ (>75%) มักจะถือว่าผลิตภัณฑ์มีตำหนิ	หรือผลิตภัณฑ์อาจจะต้องได้รับการคัดเลือกโดย ไม่มีการทิ้ง และผลิตภัณฑ์บางส่วน (<100%) อาจ อาจต้องได้รับการนำมาทำใหม่	4
เล็กน้อย	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ อาจจะไม่ดีนัก ลูกค้าส่วนใหญ่ (50%) มักจะถือว่าผลิตภัณฑ์มีตำหนิ	หรือมีผลต่อผลิตภัณฑ์เล็กน้อย ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ (<100%) อาจจะได้รับการนำมา ทำใหม่ในสายการผลิตแต่นอกจุดปฏิบัติงาน	3

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA (ต่อ)

ผลจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลจากข้อบกพร่อง		คะแนน
	ผลกระทบต่อลูกค้า	ผลกระทบต่อกระบวนการผลิต	
เล็กน้อยมาก	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ อาจจะ ไม่ดีนัก ลูกค้า (<25%) มักจะถือว่า ผลิตภัณฑ์มีตำหนิ	หรือมีผลต่อผลิตภัณฑ์ เล็กน้อย ส่วนหนึ่งของ ผลิตภัณฑ์ (<100%) อาจจะ ได้รับการนำมา ทำใหม่ใน สายการผลิต	2
ไม่มี		ไม่มีผลกระทบ	1

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรง (S) สำหรับ FMEA (ต่อ)

การพิจารณาคะแนนให้พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นที่ลูกค้าเป็นอันดับแรกหากผลกระทบเกิดขึ้นทั้งที่ลูกค้าและกระบวนการผลิต ให้ใช้เลือกที่ก่อเกิดความรุนแรงมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การประเมินความถี่ในการเกิด (O) สำหรับ FMEA

ความน่าจะเป็นในการเกิดความล้มเหลว	อัตราความล้มเหลวที่น่าจะเกิดขึ้น	Ppk	คะแนน
สูงมาก : เกิดข้อบกพร่องเสมอ	> 100 ต่อ 1000	< 0.55	10
	50 ต่อ 1000	> 0.55	9
สูง : เกิดข้อบกพร่องบ่อย	20 ต่อ 1000	> 0.78	8
	10 ต่อ 1000	> 0.86	7
ปานกลาง : เกิดข้อบกพร่องนานๆ ครั้ง	5 ต่อ 1000	> 0.94	6
	2 ต่อ 1000	> 1.00	5
	1 ต่อ 1000	> 1.10	4
ต่ำ : มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นเล็กน้อย	0.5 ต่อ 1000	> 1.20	3
	0.1 ต่อ 1000	> 1.30	2
ห่างไกล : ไม่เคยเกิดข้อบกพร่อง	< 0.01 ต่อ 1000	> 1.67	1



ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ FMEA

การตรวจจับ	เกณฑ์การตัดสิน	ประเภทของ การ ตรวจสอบ			การควบคุมที่ใช้ เพื่อให้ตรวจพบ	คะแนน
		A	B	C		
เกือบเป็นไป ไม่ได้	ไม่สามารถตรวจจับ ได้อย่างแน่นอน			O	ไม่สามารถตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้	10
ห่างไกลมาก	มีโอกาสน้อยมากที่ วิธีการควบคุมจะ สามารถตรวจจับ ลักษณะข้อบกพร่อง			O	วิธีการควบคุมสามารถ ตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง โดยทางอ้อมหรือการสุ่ม เท่านั้น	9
ห่างไกล	มีโอกาสน้อยกว่า น้อยมากที่วิธีการ ควบคุมจะสามารถ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่อง			O	วิธีการควบคุมสามารถ ตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง โดยการตรวจสอบลักษณะ ภายนอกเท่านั้น	8
น้อยมาก	มีโอกาสน้อยกว่า น้อยมากที่วิธีการ ควบคุมจะสามารถ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่อง			O	วิธีการควบคุมสามารถ ตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง โดยการตรวจสอบลักษณะ ภายนอกซ้ำเท่านั้น	7
น้อย	วิธีการควบคุม อาจจะสามารถ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้		O	O	วิธีการควบคุมสามารถ ตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง โดยแผนภูมิ เช่น การใช้ SPC	6
ปานกลาง	วิธีการควบคุม อาจจะสามารถ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้		O	O	วิธีการควบคุมสามารถ ตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง ได้โดยขึ้นอยู่กับการณ์แปร ของเครื่องมือ	5

การตรวจจับ	เกณฑ์การตัดสิน	ประเภทของ การ ตรวจสอบ			การควบคุมที่ใช้ เพื่อให้ตรวจพบ	คะแนน
		A	B	C		
ค่อนข้างสูง	วิธีการควบคุมมี โอกาสมากที่จะ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้	○	○	○	สามารถตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้หลังการการ ปฏิบัติงานหรือจากการวัด หลังการติดตั้งและจากการ ตรวจงานครั้งแรก	4
สูง	วิธีการควบคุมมี โอกาสมากที่จะ ตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้	○	○		สามารถตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้หลังการการ ปฏิบัติงานหรือขณะทำงาน โดยการคัดเลือกติดตั้งหรือ ทวนสอบซึ่งไม่สามารถ ยอมรับข้อบกพร่องได้	3
สูงมาก	วิธีการควบคุมมี โอกาสเกือบแน่นอน มากที่จะตรวจจับ ลักษณะข้อบกพร่อง ได้	○	○		สามารถตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่องได้ในระหว่างการ ปฏิบัติงานโดยเครื่องมือที่มี หน้าที่การหยุดเพื่อตรวจจับ โดยอัตโนมัติ. ข้อบกพร่องไม่ สามารถผ่านไปได้	2
สูงมาก	วิธีการควบคุมมี โอกาสแน่นอนมากที่ จะตรวจจับลักษณะ ข้อบกพร่อง	○			ไม่สามารถเกิดข้อบกพร่องได้ เนื่องจากถูกป้องกันอย่าง สมบูรณ์โดยการออกแบบ กระบวนการ	1

ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ (D) สำหรับ FMEA (ต่อ)

A = ตัวป้องกันความผิดพลาด

B = ใช้เครื่องมือตรวจสอบ

C = การตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

#### 4.2.1 การประเมินความรุนแรงของผลกระทบจากปัจจัย

4.2.1.1 **อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1** เป็นการตั้งค่าของเครื่องรีโพล์โดยตรง หากมีความผิดพลาดในการตั้งค่าจะมีผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพล์ และเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรหลุดไปถึงลูกค้าได้ ที่สำคัญลูกค้าไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งาน ถือว่าข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

4.2.1.2 **อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2** เป็นการตั้งค่าของเครื่องรีโพล์โดยตรง หากมีความผิดพลาดในการตั้งค่าจะมีผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพล์ และเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรหลุดไปถึงลูกค้าได้ ที่สำคัญลูกค้าไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งาน ถือว่าข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

4.2.1.3 **อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3** เป็นการตั้งค่าของเครื่องรีโพล์โดยตรง หากมีความผิดพลาดในการตั้งค่าจะมีผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพล์ และเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรหลุดไปถึงลูกค้าได้ ที่สำคัญลูกค้าไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งาน ถือว่าข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

4.2.1.4 **อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4** เป็นการตั้งค่าของเครื่องรีโพล์โดยตรง หากมีความผิดพลาดในการตั้งค่าจะมีผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพล์ และเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรหลุดไปถึงลูกค้าได้ ที่สำคัญลูกค้าไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งาน ถือว่าข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

**4.2.1.5 ความเร็วของสายพาน** เป็นการตั้งค่าของเครื่องรีโพลีฟโดยตรง หากมีความผิดพลาดในการตั้งค่า จะมีผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพลีฟและเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรหลุดไปถึงลูกค้ำได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงานที่สำคัญลูกค้ำไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ถือว่าข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

**4.2.1.6 ร้อนของเครื่องรีโพลีฟ** เครื่องแต่ละชนิดใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแตกต่างกันตามชนิดของเครื่องและมีการตั้งค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นหากมีตั้งค่าของเครื่องผิดพลาด จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ทำให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดไม่สอดคล้องตามข้อกำหนด ส่งผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพลีฟ และเป็นสาเหตุให้ตัวเสียประเภทลัดวงจรเพิ่มมากขึ้นหรือหลุดไปถึงลูกค้ำได้ ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงาน ที่สำคัญลูกค้ำไม่สามารถตรวจพบของเสียก่อนการใช้งานได้ถือว่า ข้อบกพร่องเกิดขึ้นโดยไม่มี การเตือน จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 10

**4.2.1.7 เวลาของการตั้งค่าแต่ละครั้ง** การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของฮีตเตอร์ในเครื่องรีโพลีฟแต่ละครั้ง จะต้องใช้เวลาในการเพิ่มหรือลดความร้อนระยะหนึ่งเพื่อเข้าสู่สถานะคงตัว หากมีการใช้งานเครื่องเร็วเกินไปอุณหภูมิที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนบ้างแต่ถ้าไม่มีการตั้งค่าเครื่องผิดพลาด จะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพลีฟ งานบางส่วน อาจจะถูกนำกลับมาทำรีโพลีฟใหม่ จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 2

**4.2.1.8 ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล** มีผลใกล้เคียงกับเวลาของการตั้งค่าแต่ละครั้ง ในการทำงานเครื่องรีโพลีฟในการผลิตแต่ละครั้ง ความร้อนภายในเครื่องจะสูญเสียให้กับตัวเก็บประจุที่ทำการผลิต ดังนั้นหากทำการเก็บข้อมูลหลังการใช้งานเครื่องไม่นานเพียงพอข้อมูลที่ ได้จะมีความคลาดเคลื่อน แต่จะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโพลีฟ จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 2

**4.2.1.9 เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน** หากมีเครื่องจักรบางเครื่องที่ใช้ระบบดูดอากาศเดียวกันหยุดการทำงาน จะส่งผลถึงระบบดูดอากาศของเครื่องรีโฟลว์ให้มากขึ้นไปทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องต่ำกว่าที่ควรจะเป็น แต่จากข้อมูลในอดีตพบว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาน้อยมาก เวลาที่คงอยู่ และอุณหภูมิสูงสุดยังคงสอดคล้องตามข้อกำหนด จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 2

**4.2.1.10 ความแปรปรวนของอุณหภูมิห้อง** มีผลใกล้เคียงกับการที่เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน เนื่องจากเครื่องรีโฟลว์เป็นระบบเปิดและมีขนาดใหญ่ ความร้อนหรือความเย็นของสิ่งแวดล้อมรอบๆ เครื่องจะส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเครื่องบ้างแต่ไม่มากนัก และภายในโรงงานมีระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ดังนั้นจะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโฟลว์ จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 1

**4.2.1.11 ผู้ทำการเก็บข้อมูล** มีผลต่อความถูกต้องในการเก็บข้อมูลเท่านั้น แต่จะไม่ส่งผลต่อรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นจะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการคัดแยกของเสียของการทำรีโฟลว์ จึงเลือกคะแนนแสดงระดับความรุนแรงที่ 1

#### 4.2.2 ความถี่ในการเกิดผลกระทบจากปัจจัย

โดยการอ้างอิงผลการตรวจสอบกระบวนการผลิต (Process patrol) ในรอบ 6 เดือน จากพนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพซึ่งทำการตรวจสอบกระบวนการผลิตทุกกะการทำงานวันละ 1 ครั้ง พบความผิดพลาดหรือความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

จำนวนครั้งที่ตรวจสอบ	1	ครั้ง /กะ
จำนวนกะ	3	กะ /วัน
วันทำงานปกติ	28	วัน /เดือน
จำนวนเครื่องรีโฟลว์	24	เครื่อง
ดังนั้นจำนวนครั้งในการตรวจสอบ คือ	$1 \times 3 \times 28 \times 24 = 672$	ครั้ง /เดือน
ดังนั้นจำนวนครั้งในการตรวจสอบใน 6 เดือน คือ	$672 \times 6 = 4032$	ครั้ง

ตารางที่ 4.4 การประเมินความถี่ในการเกิดผลกระทบจากปัจจัย

ปัจจัย	จำนวนครั้งที่พบ ความผิดพลาด	อัตราความล้มเหลวที่เกิดขึ้น (%)	ระดับ คะแนน
คุณสมบัติของอีตเตอร์ตัวที่ 1	3	$(3 / 4032) \times 100 = 0.074$	3
คุณสมบัติของอีตเตอร์ตัวที่ 2	2	$(2 / 4032) \times 100 = 0.050$	3
คุณสมบัติของอีตเตอร์ตัวที่ 3	5	$(5 / 4032) \times 100 = 0.124$	4
คุณสมบัติของอีตเตอร์ตัวที่ 4	6	$(6 / 4032) \times 100 = 0.149$	4
ความเร็วของสายพาน	1	$(1 / 4032) \times 100 = 0.025$	2
รุ่นของเครื่องรีโพล์	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1
เวลารอของการตั้งค่า	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1
เวลารอในการเก็บข้อมูล	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1
เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1
ความแปรปรวนของ คุณสมบัติห้อง	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1
ผู้ทำการเก็บข้อมูล	ไม่พบ	$(0 / 4032) \times 100 = 0.000$	1

ในหัวข้อปัจจัยที่ไม่พบความผิดพลาดหรือความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนด หมายถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการความสามารถในการตัดแยกของเสียของการทำรีโพล์ ดังนั้นการการประเมินความถี่ในการเกิดผลกระทบจากปัจจัยจึงถือว่าไม่พบความผิดพลาดหรือความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนด

#### 4.2.3 การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบ

หลังจากที่ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการประเมินความรุนแรงของผลกระทบจากปัจจัยและความถี่ในการเกิดผลกระทบจากปัจจัยแล้ว ได้ทำการพิจารณาถึงกระบวนการในปัจจุบันว่ามี การดำเนินการอย่างไร เพื่อป้องกันหรือมีวิธีการในการตรวจพบข้อบกพร่องอย่างไร ดังต่อไปนี้

**4.2.3.1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1** โดยการใช้ใบตรวจสอบประจำวัน (Daily check sheet) สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 ได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือก ระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.2 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2** โดยการใช้ใบตรวจสอบ สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 ได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือก ระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3** โดยการใช้ใบตรวจสอบ สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือก ระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.4 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4** โดยการใช้ใบตรวจสอบ สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือก ระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.5 ความเร็วของสายพาน** โดยการใช้ใบตรวจสอบ สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการตั้งค่าความเร็วของสายพานได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.6 รุ่นของเครื่องรีโพล์** โดยการใช้ใบตรวจสอบ สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการกำหนดรุ่นของเครื่องรีโพล์ได้หลังจากทำการการตรวจสอบก่อนการเริ่มทำงานในแต่ละกะ เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 4

**4.2.3.7 เวลาของการตั้งค่าแต่ละครั้ง** โดยการใช้ใบบันทึกการทำงาน (Work record) สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการรอของหลังจากการตั้งค่าแต่ละครั้งได้แต่ต้องอาศัยความถูกต้องของการบันทึกที่ถูกต้องของผู้ปฏิบัติงาน เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสค่อนข้างน้อยมากที่วิธีการควบคุมจะสามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 7

**4.2.3.8 ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล** โดยการใช้ใบบันทึกการทำงาน (Work record) สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดของการรอในกรณีเครื่องรีโพล์ถูกใช้งานก่อนหน้าได้แต่ต้องอาศัยความถูกต้องของการบันทึกที่ถูกต้องของผู้ปฏิบัติงาน เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสค่อนข้างน้อยมากที่วิธีการควบคุมจะสามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 7

**4.2.3.9 เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน** เป็นการตรวจสอบด้วยสายตา เป็นการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน หากมีเครื่องจักรบางเครื่องที่ใช้ระบบดูดอากาศเดียวกันหยุดการทำงาน จะส่งผลถึงระบบดูดอากาศของเครื่องรีโพล์ให้มากเกินไปทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องต่ำกว่าที่ควรจะเป็น วิธีการควบคุมนี้มีโอกาสค่อนข้างน้อยมากที่วิธีการควบคุมจะสามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 7



**4.2.3.10 ความแปรปรวนของอุณหภูมิห้อง** โดยการใช้เครื่องมือที่มีการปรับอุณหภูมิอัตโนมัติหากอุณหภูมิห้องมีความแปรปรวนเกิดขึ้น สามารถตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องได้ในระหว่างการปฏิบัติงาน ข้อบกพร่องไม่สามารถผ่านไปได้ วิธีการควบคุมมีโอกาสเกือบแน่นอนมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 2

**4.2.3.11 ผู้ทำการเก็บข้อมูล** โดยการกำหนดคุณสมบัติที่แน่นอนของผู้ทำการเก็บข้อมูลและมีบันทึกการฝึกอบรม วิธีการควบคุมนี้จึงมีโอกาสเกือบแน่นอนมากที่จะตรวจจับลักษณะข้อบกพร่อง จึงเลือกระดับคะแนนความเป็นไปได้ในการตรวจพบที่ 2

หลังจากทำการประเมินความรุนแรง ความถี่ในการเกิด และการประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบของปัจจัยทุกตัว นำระดับคะแนนของแต่ละปัจจัยมาคำนวณตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยง (RPN) โดยการคำนวณจาก  $RPN = S \times O \times C$  ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และจากรูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิพาเรโตของตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงของแต่ละปัจจัยพบว่า มีเพียง 5 ปัจจัยเท่านั้นที่ถูกเลือกใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นและแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ส่วนปัจจัยที่เหลือซึ่งไม่ถูกเลือกสำหรับการทดลองเบื้องต้นจะถูกควบคุมให้คงที่เพื่อให้มีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้น้อยที่สุดตามตารางที่ 4.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 FMEA เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัย

Item : Factors for Reflow Process

Process Responsibility : 2nd,3rd Mfg.Sec.

Page 1 of 1

Model Year(s) / Vehicle(s) : ESV (Green) Series

Key Date : Aug 22 '06

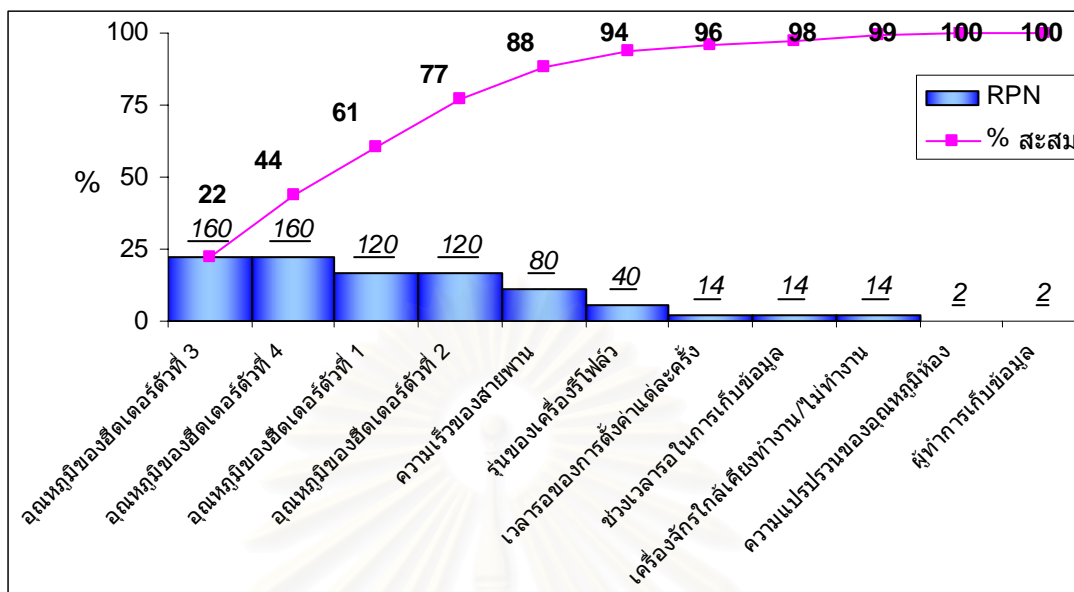
Prepared By : Sub-Team A

Core Team : Mr.Vasuwat, Mr.Mana, Ms.Korwika, Mr.Athit, Mr.Sinuan, Ms.Sudjai, Ms.Suchin,

FMEA Date (Orig.) : Aug 22 '06

Mr.Panupong, Ms.Tantawon, Mr Wirut

Factors	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S	C	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	O	Current Process Controls		D	R	P	N	Recommended Action	Responsibility & Target Completion Date	Action Results				
							Prevention	Detection							Action Taken	S	O	D	R
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1	สูง/ต่ำเกินไป	เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดสูง/ต่ำเกินไป	10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	3		ตรวจสอบประจำวัน	4	120		ไม่ได้พิจารณาในตอนนี้							
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2	สูง/ต่ำเกินไป		10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	3		ตรวจสอบประจำวัน	4	120									
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	สูง/ต่ำเกินไป		10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	4		ตรวจสอบประจำวัน	4	160									
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	สูง/ต่ำเกินไป		10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	4		ตรวจสอบประจำวัน	4	160									
ความเร็วของสายพาน	ช้า / เร็วเกินไป		10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	2		ตรวจสอบประจำวัน	4	80									
รุ่นของเครื่องรีโฟลว์	ตั้งค่าผิดรุ่น		10		ตั้งค่าผิดพลาด /ไม่เหมาะสม	1		ตรวจสอบประจำวัน	4	40									
เวลารอของการตั้งค่าแต่ละครั้ง	น้อยเกินไป		2		ผลล/ไม่รู้	1		บรรที่กการทำงาน	7	14									
ช่วงเวลารอในการเก็บข้อมูล	น้อยเกินไป		2		ผลล/ไม่รู้	1		บรรที่กการทำงาน	7	14									
เครื่องจักรใกล้เคียงทำงาน/ไม่ทำงาน	ระบบดูดอากาศมากเกินไป		2		เครื่องจักรเสียหาย	1		ตรวจสอบด้วยสายตา	7	14									
ความแปรปรวนของอุณหภูมิห้อง	สูง/ต่ำเกินไป		1		การหยุดซ่อมเครื่องขนาดใหญ่	1		ใบบรรที่กการทำงาน	2	2									
ผู้ทำการเก็บข้อมูล	ใช้เครื่องมือผิดพลาด	1		ขาดประสบการณ์	1		บรรที่กการฝึกอบรม	2	2										



รูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิพาเรโตของตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.6 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย	ค่าปัจจุบัน	หน่วย
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1	165	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2	175	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	225	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	260	°C
ความเร็วของสายพาน	0.6	เมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัยที่ถูกควบคุม	เงื่อนไขที่ควบคุม
รุ่นของเครื่องรีโฟลว์ ( Machine model )	ชนิดใช้ลมร้อน (Hot Air Type)
เวลารอของการตั้งค่า (Interval time)	30 นาทีขึ้นไป
ช่วงเวลารอในการเก็บข้อมูล (Waiting time)	หลังการผลิตงานจริง 30 นาที (ถ้ามีการผลิต)
ระบบระบายความร้อน (Exhaust)	ทำงานเต็มที่
อุณหภูมิห้อง	ควบคุมให้คงที่ที่ 25 °C
ผู้เก็บข้อมูล	วิศวกรที่ผ่านการอบรมและมีประสบการณ์การทำงาน 2 ปี

#### 4.3 การทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

เพื่อพิสูจน์ยืนยันถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยที่ถูกเลือกเหล่านั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ( $Y_k, Y_m$ ) ที่สนใจ เพื่อเป็นการคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้เหลือน้อยที่สุด ในการทดลองเบื้องต้นนี้ได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มี 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง และเป็นการทำแบบสุ่มเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการเกลี่ยออกของอิทธิพลแทรกซ้อนต่าง ๆ ที่มีต่อข้อมูล โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 เป็นค่าสูงสุด (+) และค่าต่ำสุด (-) ซึ่งมีช่วงกว้างกว่าค่าปัจจุบันเนื่องจากต้องการศึกษาระดับของปัจจัยที่อยู่นอกช่วงควบคุมปกติ

ตารางที่ 4.8 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าต่ำสุด(-)	ค่าสูงสุด(+)	หน่วย
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1	A	160	190	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2	B	180	220	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	C	220	260	°C
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	D	240	290	°C
ความเร็วของสายพาน	E	0.6	1.0	เมตรต่อนาที

ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นนี้ จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab Release 14.1 เป็นเครื่องมือในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง และเป็นการทำแบบสุ่มตามตารางที่ 4.9 ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทำงานทดลองทั้งสิ้น 64 การทดลอง

ตารางที่ 4.9 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น

หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
49	1	160	180	220	240	1.0		
56	2	190	220	260	240	1.0		
46	3	190	180	260	290	0.6		
7	4	160	220	260	240	0.6		
16	5	190	220	260	290	0.6		
15	6	160	220	260	290	0.6		
41	7	160	180	220	290	0.6		
6	8	190	180	260	240	0.6		
12	9	190	220	220	290	0.6		
42	10	190	180	220	290	0.6		
60	11	190	220	220	290	1.0		
38	12	190	180	260	240	0.6		
14	13	190	180	260	290	0.6		
47	14	160	220	260	290	0.6		
55	15	160	220	260	240	1.0		
51	16	160	220	220	240	1.0		
26	17	190	180	220	290	1.0		
11	18	160	220	220	290	0.6		
2	19	190	180	220	240	0.6		
44	20	190	220	220	290	0.6		
40	21	190	220	260	240	0.6		
29	22	160	180	260	290	1.0		

หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
10	23	190	180	220	290	0.6		
24	24	190	220	260	240	1.0		
45	25	160	180	260	290	0.6		
17	26	160	180	220	240	1.0		
8	27	190	220	260	240	0.6		
23	28	160	220	260	240	1.0		
27	29	160	220	220	290	1.0		
58	30	190	180	220	290	1.0		
18	31	190	180	220	240	1.0		
48	32	190	220	260	290	0.6		
28	33	190	220	220	290	1.0		
21	34	160	180	260	240	1.0		
37	35	160	180	260	240	0.6		
3	36	160	220	220	240	0.6		
64	37	190	220	260	290	1.0		
52	38	190	220	220	240	1.0		
39	39	160	220	260	240	0.6		
9	40	160	180	220	290	0.6		
50	41	190	180	220	240	1.0		
62	42	190	180	260	290	1.0		
54	43	190	180	260	240	1.0		

ตารางที่ 4.9 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
57	44	160	180	220	290	1.0		
43	45	160	220	220	290	0.6		
5	46	160	180	260	240	0.6		
30	47	190	180	260	290	1.0		
35	48	160	220	220	240	0.6		
25	49	160	180	220	290	1.0		
61	50	160	180	260	290	1.0		
31	51	160	220	260	290	1.0		
34	52	190	180	220	240	0.6		
63	53	160	220	260	290	1.0		
4	54	190	220	220	240	0.6		
13	55	160	180	260	290	0.6		
32	56	190	220	260	290	1.0		
1	57	160	180	220	240	0.6		
22	58	190	180	260	240	1.0		
20	59	190	220	220	240	1.0		
59	60	160	220	220	290	1.0		
33	61	160	180	220	240	0.6		
19	62	160	220	220	240	1.0		
36	63	190	220	220	240	0.6		
53	64	160	180	260	240	1.0		

ตารางที่ 4.9 ตารางการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

#### 4.4 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

หลังจากทำการทดลองและเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองในการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ได้ผลการทดลองดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น

หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
49	1	160	180	220	240	1.0	9	258.0
56	2	190	220	260	240	1.0	20	263.1
46	3	190	180	260	290	0.6	54	278.9
7	4	160	220	260	240	0.6	40	272.2
16	5	190	220	260	290	0.6	56	279.7
15	6	160	220	260	290	0.6	54	278.9
41	7	160	180	220	290	0.6	48	276.2
6	8	190	180	260	240	0.6	41	272.6
12	9	190	220	220	290	0.6	44	274.4
42	10	190	180	220	290	0.6	46	275.3
60	11	190	220	220	290	1.0	26	265.9
38	12	190	180	260	240	0.6	40	272.2
14	13	190	180	260	290	0.6	56	279.7
47	14	160	220	260	290	0.6	53	278.4
55	15	160	220	260	240	1.0	22	264.0
51	16	160	220	220	240	1.0	12	259.4
26	17	190	180	220	290	1.0	27	266.3



หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
11	18	160	220	220	290	0.6	44	274.4
2	19	190	180	220	240	0.6	32	268.4
44	20	190	220	220	290	0.6	48	276.2
40	21	190	220	260	240	0.6	41	272.8
29	22	160	180	260	290	1.0	38	271.6
10	23	190	180	220	290	0.6	44	274.4
24	24	190	220	260	240	1.0	17	261.7
45	25	160	180	260	290	0.6	53	278.4
17	26	160	180	220	240	1.0	11	258.9
8	27	190	220	260	240	0.6	41	272.8
23	28	160	220	260	240	1.0	21	263.5
27	29	160	220	220	290	1.0	27	266.3
58	30	190	180	220	290	1.0	27	266.3
18	31	190	180	220	240	1.0	12	259.4
48	32	190	220	260	290	0.6	53	278.4
28	33	190	220	220	290	1.0	29	267.3
21	34	160	180	260	240	1.0	21	263.5
37	35	160	180	260	240	0.6	40	272.4
3	36	160	220	220	240	0.6	31	268.0
64	37	190	220	260	290	1.0	40	272.3
52	38	190	220	220	240	1.0	10	258.4

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
39	39	160	220	260	240	0.6	38	271.3
9	40	160	180	220	290	0.6	46	275.3
50	41	190	180	220	240	1.0	11	258.9
62	42	190	180	260	290	1.0	40	272.2
54	43	190	180	260	240	1.0	18	262.1
57	44	160	180	220	290	1.0	26	265.9
43	45	160	220	220	290	0.6	45	274.9
5	46	160	180	260	240	0.6	40	272.4
30	47	190	180	260	290	1.0	38	271.6
35	48	160	220	220	240	0.6	31	268.0
25	49	160	180	220	290	1.0	30	267.7
61	50	160	180	260	290	1.0	37	271.1
31	51	160	220	260	290	1.0	36	270.5
34	52	190	180	220	240	0.6	32	268.8
63	53	160	220	260	290	1.0	40	272.2
4	54	190	220	220	240	0.6	32	268.8
13	55	160	180	260	290	0.6	54	278.9
32	56	190	220	260	290	1.0	38	271.6
1	57	160	180	220	240	0.6	32	268.4
22	58	190	180	260	240	1.0	22	264.0
20	59	190	220	220	240	1.0	12	259.4

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

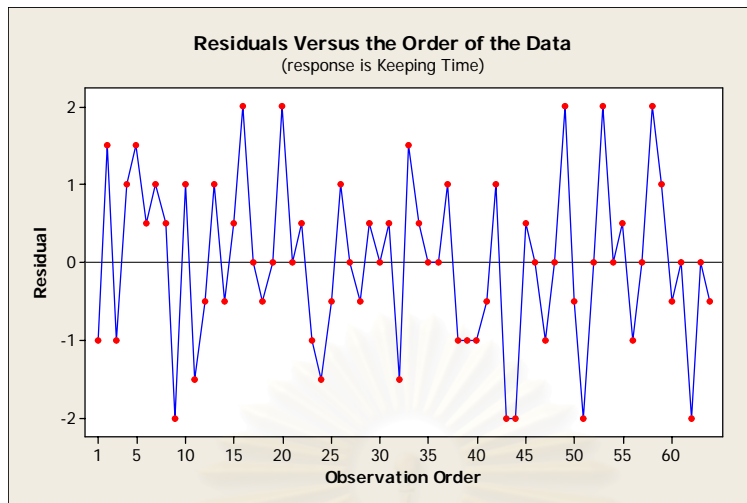
หมายเลข สภาวะ การ ทดลอง	ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย					ตัวแปร ตอบสนอง	
		A	B	C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
59	60	160	220	220	290	1.0	26	265.9
33	61	160	180	220	240	0.6	32	268.8
19	62	160	220	220	240	1.0	8	257.5
36	63	190	220	220	240	0.6	32	268.4
53	64	160	180	260	240	1.0	20	263.1

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

#### 4.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

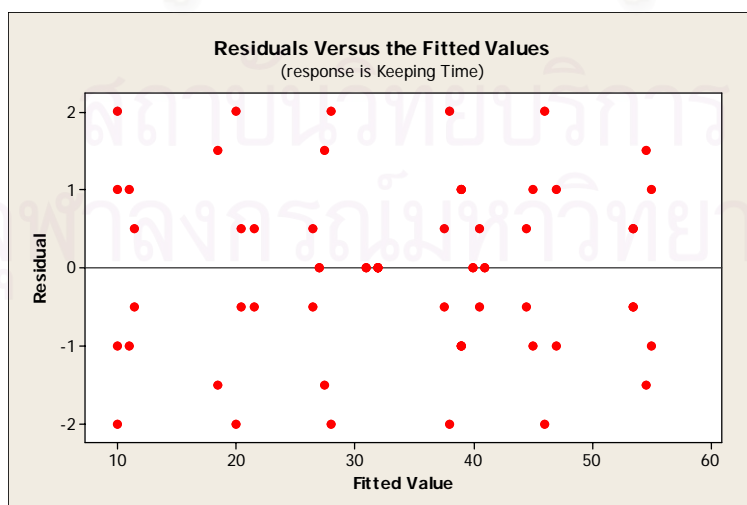
ก่อนทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเบื้องต้นของเวลาที่คงอยู่ จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1.1 ถึง 4.3.1.3 เมื่อสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอและเป็นไปตามหลักการทางสถิติจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและตีความหมายต่อไป

4.4.1.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.3 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



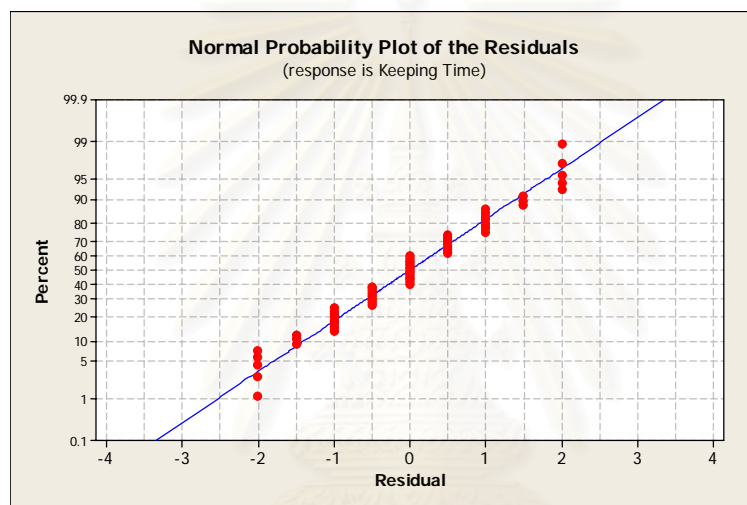
รูปที่ 4.3 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

4.4.1.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการนำข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.4 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.4 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

4.4.1.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม  $P_k = (k-1/2)/n$  นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.5 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.5 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่

( $Y_k$ )

## 4.4.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นเวลาที่คงอยู่

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>o</sub>	P-Value
A	3.060	1	3.060	1.32	0.258
B	1.560	1	1.560	0.68	0.417
C	1406.250	1	1406.250	608.11	0.000
D	3937.560	1	3937.560	1702.73	0.000
E	5662.560	1	5662.560	2448.68	0.000
AB	1.000	1	1.000	0.43	0.516
AC	0.060	1	0.060	0.03	0.870
AD	0.250	1	0.250	0.11	0.744
AE	1.000	1	1.000	0.43	0.516
BC	0.560	1	0.560	0.24	0.625
BD	0.000	1	0.000	0.00	1.000
BE	0.250	1	0.250	0.11	0.744
CD	3.060	1	3.060	1.32	0.258
CE	14.060	1	14.060	6.08	0.019
DE	49.000	1	49.000	21.19	0.000
ABC	4.000	1	4.000	1.73	0.198
ABD	1.560	1	1.560	0.68	0.417
ACD	6.250	1	6.250	2.70	0.110
ABE	3.060	1	3.060	1.32	0.258
ACE	4.000	1	4.000	1.73	0.198
ADE	1.560	1	1.560	0.68	0.417

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>o</sub>	P-Value
BCD	0.250	1	0.250	0.11	0.744
BCE	0.000	1	0.000	0.00	1.000
BDE	0.060	1	0.060	0.03	0.870
CDE	2.250	1	2.250	0.97	0.331
ABCD	1.560	1	1.560	0.68	0.417
ABCE	0.060	1	0.060	0.03	0.870
ABDE	1.000	1	1.000	0.43	0.516
ACDE	3.060	1	3.060	1.32	0.258
BCDE	0.060	1	0.060	0.03	0.870
ABCDE	1.000	1	1.000	0.43	0.516
Error	74.000	32	2.310		
Total	11184.000	63			

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นของเวลาที่คงอยู่ (ต่อ)

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าปัจจัยหลักที่มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ได้แก่ คุณหมุมิของฮีเตอร์ตัวที่3 (C) คุณหมุมิของฮีเตอร์ตัวที่4 (D) และความเร็วของสายพาน (E) ส่วนอันตรกิริยาสองทางที่มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างคุณหมุมิของฮีเตอร์ตัวที่3 กับความเร็วของสายพาน (CE) และอันตรกิริยาระหว่างคุณหมุมิของฮีเตอร์ตัวที่4 กับความเร็วของสายพาน (DE) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองของตัวแรกในการทดลองเบื้องต้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยอื่นๆ ซึ่งไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่ในการทดลองเบื้องต้น

ประเภท ปัจจัย	ผลต่อตัวแปรตอบสนอง	
	มี	ไม่มี
ปัจจัยหลัก	C D E	A B
อันตรกิริยา สองทาง	CE DE	AB AC AD AE BC BD BE CD
อันตรกิริยา สามทาง	-	ABC ABD ACD ABE ACE ADE BCD BCE BDE CDE
อันตรกิริยา สี่ทาง	-	ABCD ABCE ABDE ACDE BCDE
อันตรกิริยา ห้าทาง	-	ABCDE

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

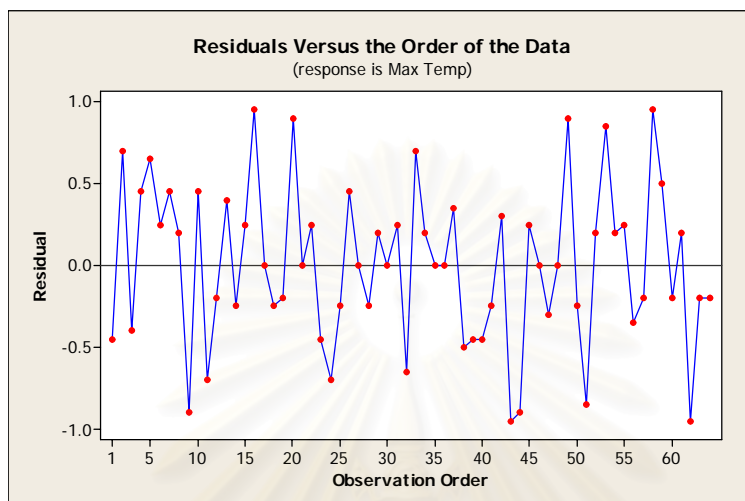
( $Y_m$ )

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.1 ก่อนทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเบื้องต้นของอุณหภูมิสูงสุด จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเพื่อให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ เมื่อสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอและเป็นไปตามหลักการทางสถิติจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและตีความหมายต่อไป

4.4.2.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.6 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือ



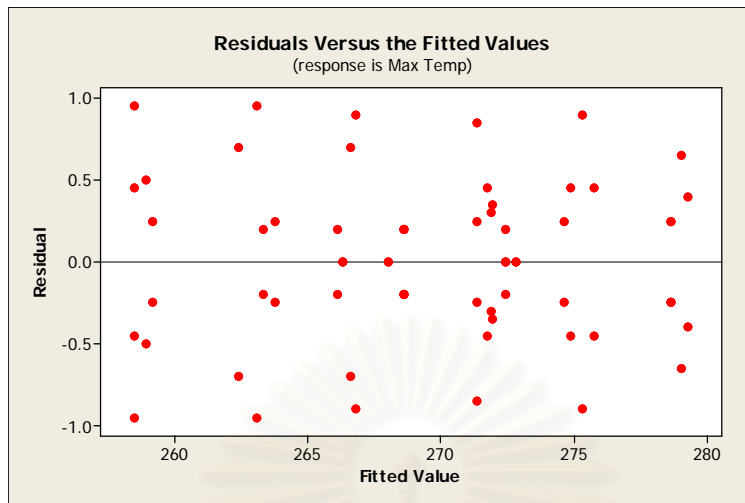
ลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.6 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

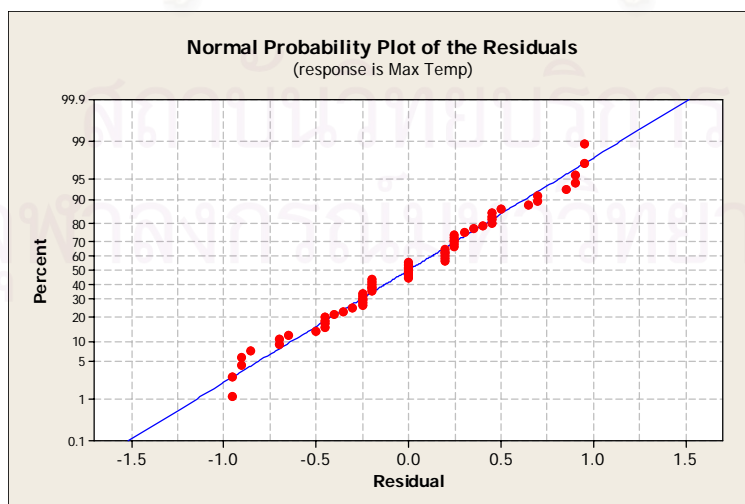
4.4.2.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ในที่นี้คือค่าเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.7 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุด ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในการทดลองเบื้องต้นสำหรับ  
อุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

4.4.2.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการนำค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม  $P_k = (k-1/2)/n$  นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.8 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.8 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด  
( $Y_m$ )

## 4.4.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิ

สูงสุด

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>o</sub>	P-Value
A	0.620	1	0.620	1.31	0.262
B	0.406	1	0.406	0.86	0.362
C	297.131	1	297.131	625.75	0.000
D	869.513	1	869.513	1831.16	0.000
E	1217.138	1	1217.138	2563.24	0.000
AB	0.439	1	0.439	0.92	0.344
AC	0.001	1	0.001	0.00	0.957
AD	0.035	1	0.035	0.07	0.787
AE	0.191	1	0.191	0.40	0.530
BC	0.098	1	0.098	0.21	0.653
BD	0.000	1	0.000	0.00	0.986
BE	0.056	1	0.056	0.12	0.733
CD	0.473	1	0.473	1.00	0.326
CE	3.658	1	3.658	7.70	0.009
DE	8.776	1	8.776	18.48	0.000
ABC	0.620	1	0.620	1.31	0.262
ABD	0.263	1	0.263	0.55	0.462
ACD	1.410	1	1.410	2.97	0.094
ABE	0.660	1	0.660	1.39	0.247
ACE	0.701	1	0.701	1.48	0.233
ADE	0.375	1	0.375	0.79	0.381

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F <sub>o</sub>	P-Value
BCD	0.013	1	0.013	0.03	0.871
BCE	0.004	1	0.004	0.01	0.928
BDE	0.001	1	0.001	0.00	0.957
CDE	0.833	1	0.833	1.75	0.195
ABCD	0.345	1	0.345	0.73	0.400
ABCE	0.013	1	0.013	0.03	0.871
ABDE	0.473	1	0.473	1.00	0.326
ACDE	0.581	1	0.581	1.22	0.277
BCDE	0.008	1	0.008	0.02	0.900
ABCDE	0.289	1	0.289	0.61	0.441
Error	15.195	32	0.475		
Total	2420.320	63			

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าปัจจัยหลักที่มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 (C) อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 (D) และความเร็วของสายพาน (E) ส่วนอันตรกิริยาสองทางที่มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 กับความเร็วของสายพาน (CE) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 กับความเร็วของสายพาน (DE) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองตัวที่สองในการทดลองเบื้องต้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยอื่นๆที่ไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่สรุปไว้ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อคุณภาพสูงสุดในการทดลองเบื้องต้น

ประเภท ปัจจัย	ผลต่อตัวแปรตอบสนอง	
	มี	ไม่มี
ปัจจัยหลัก	C D E	A B
อันตรกิริยา สองทาง	CE DE	AB AC AD AE BC BD BE CD
อันตรกิริยา สามทาง	-	ABC ABD ACD ABE ACE ADE BCD BCE BDE CDE
อันตรกิริยา สี่ทาง	-	ABCD ABCE ABDE ACDE BCDE
อันตรกิริยา ห้าทาง	-	ABCDE

#### 4.5 ผลการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลองเบื้องต้น

จากการทดลองและเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองในการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองพบว่า คุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองใดๆ อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อีกทั้งไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยใดๆ ที่ประกอบด้วยคุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเลย ดังนั้นจึงสามารถตัดคุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 (A) และคุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 (B) ออกและสามารถได้สรุปปัจจัยหลักที่เลือกใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟลว์และเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และคุณณหภูมิสูงสุดในการทำรีไฟลว์ดังตารางที่ 4.15 และปัจจัยที่ถูกควบคุมในการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 4.16 ซึ่งถูกควบคุมเพิ่มจากการทดลองเบื้องต้นในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.15 ปัจจัยหลักในการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าต่ำสุด (-)	ค่ากลาง (0)	ค่าสูงสุด (+)	หน่วย
คุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	C	220	240	260	°C
คุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	D	240	265	290	°C
ความเร็วของสายพาน	E	0.6	0.8	1.0	เมตรต่อ นาที

ตารางที่ 4.16 ปัจจัยที่ถูกควบคุมเพิ่มเติมในการออกแบบทดลอง

ปัจจัยที่ถูกควบคุม	สถานะที่ควบคุม	หน่วย
คุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1	165	°C
คุณณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2	175	°C

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 5.1 การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์

ในการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง และเป็นการทำแบบสุ่มเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการเกลี่ยออกของอิทธิพลแทรกซ้อนต่าง ๆ ที่มีต่อข้อมูล โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 เป็นค่าสูงสุด (+) ค่ากลาง (0) และค่าต่ำสุด (-) ตามตารางที่ 5.1 ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทำงานทดลองทั้งสิ้น 54 การทดลอง

ตารางที่ 5.1 ตารางการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง

หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
25	1	260	290	0.6		
41	2	240	265	0.8		
11	3	240	240	0.8		
24	4	260	265	1.0		
18	5	240	290	1.0		
17	6	240	290	0.8		
15	7	240	265	1.0		
32	8	220	265	0.8		
6	9	220	265	1.0		
42	10	240	265	1.0		
26	11	260	290	0.8		
9	12	220	290	1.0		

หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
23	13	260	265	0.8		
2	14	220	240	0.8		
46	15	260	240	0.6		
40	16	240	265	0.6		
53	17	260	290	0.8		
14	18	240	265	0.8		
4	19	220	265	0.6		
5	20	220	265	0.8		
3	21	220	240	1.0		
21	22	260	240	1.0		
39	23	240	240	1.0		
10	24	240	240	0.6		
16	25	240	290	0.6		
28	26	220	240	0.6		
44	27	240	290	0.8		
22	28	260	265	0.6		
36	29	220	290	1.0		
38	30	240	240	0.8		
19	31	260	240	0.6		
45	32	240	290	1.0		
8	33	220	290	0.8		
51	34	260	265	1.0		

ตารางที่ 5.1 ตารางการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง(ต่อ)



หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
49	35	260	265	0.6		
31	36	220	265	0.6		
7	37	220	290	0.6		
29	38	220	240	0.8		
43	39	240	290	0.6		
34	40	220	290	0.6		
35	41	220	290	0.8		
54	42	260	290	1.0		
33	43	220	265	1.0		
1	44	220	240	0.6		
52	45	260	290	0.6		
30	46	220	240	1.0		
20	47	260	240	0.8		
50	48	260	265	0.8		
27	49	260	290	1.0		
13	50	240	265	0.6		
12	51	240	240	1.0		
48	52	260	240	1.0		
47	53	260	240	0.8		
37	54	240	240	0.6		

ตารางที่ 5.1 ตารางการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง(ต่อ)

## 5.2 ผลการทดลองเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์

หลังจากทำการทดลองและเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองในการเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ ได้ผลการทดลองดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง

หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
25	1	260	290	0.6	70	290.1
41	2	240	265	0.8	38	255.4
11	3	240	240	0.8	33	230.7
24	4	260	265	1.0	34	257.5
18	5	240	290	1.0	34	273.3
17	6	240	290	0.8	45	279.2
15	7	240	265	1.0	27	253.0
32	8	220	265	0.8	33	255.8
6	9	220	265	1.0	20	246.7
42	10	240	265	1.0	30	255.0
26	11	260	290	0.8	52	285.7
9	12	220	290	1.0	29	264.6
23	13	260	265	0.8	43	261.4
2	14	220	240	0.8	22	226.8
46	15	260	240	0.6	54	255.1
40	16	240	265	0.6	55	262.9
53	17	260	290	0.8	53	287.1
14	18	240	265	0.8	39	257.7

หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
4	19	220	265	0.6	46	261.0
5	20	220	265	0.8	31	254.9
3	21	220	240	1.0	10	215.7
21	22	260	240	1.0	26	238.6
39	23	240	240	1.0	17	222.2
10	24	240	240	0.6	43	238.1
16	25	240	290	0.6	63	286.9
28	26	220	240	0.6	33	234.2
44	27	240	290	0.8	48	278.1
22	28	260	265	0.6	63	266.6
36	29	220	290	1.0	29	265.4
38	30	240	240	0.8	33	232.4
19	31	260	240	0.6	54	257.5
45	32	240	290	1.0	37	274.9
8	33	220	290	0.8	37	272.8
51	34	260	265	1.0	33	255.9
49	35	260	265	0.6	64	268.1
31	36	220	265	0.6	47	259.0
7	37	220	290	0.6	56	284.7
29	38	220	240	0.8	21	225.7
43	39	240	290	0.6	65	284.1
34	40	220	290	0.6	54	283.5

ตารางที่ 5.2 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

หมายเลข สภาวะการ ทดลอง	ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง	
		C	D	E	$Y_k$	$Y_m$
35	41	220	290	0.8	38	276.0
54	42	260	290	1.0	40	276.5
33	43	220	265	1.0	20	246.6
1	44	220	240	0.6	30	236.4
52	45	260	290	0.6	71	289.7
30	46	220	240	1.0	9	218.0
20	47	260	240	0.8	33	241.3
50	48	260	265	0.8	43	262.2
27	49	260	290	1.0	39	275.6
13	50	240	265	0.6	55	263.8
12	51	240	240	1.0	20	222.7
48	52	260	240	1.0	24	236.5
47	53	260	240	0.8	35	244.7
37	54	240	240	0.6	46	241.4

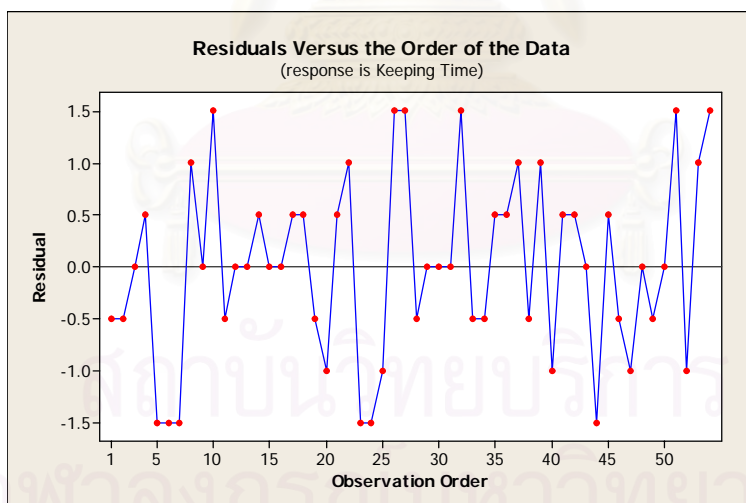
ตารางที่ 5.2 ตารางผลการเก็บข้อมูลในการออกแบบการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

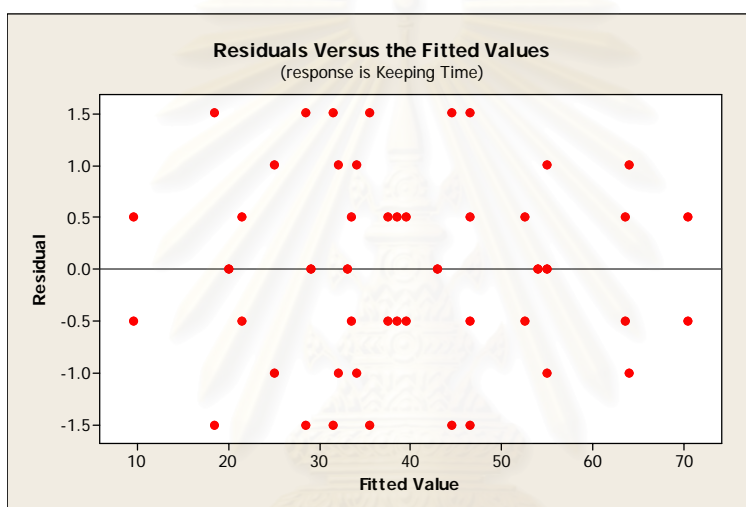
ก่อนทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเมื่อสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอและเป็นไปตามหลักการทางสถิติจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและตีความหมายต่อไป

5.2.1.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 5.1 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



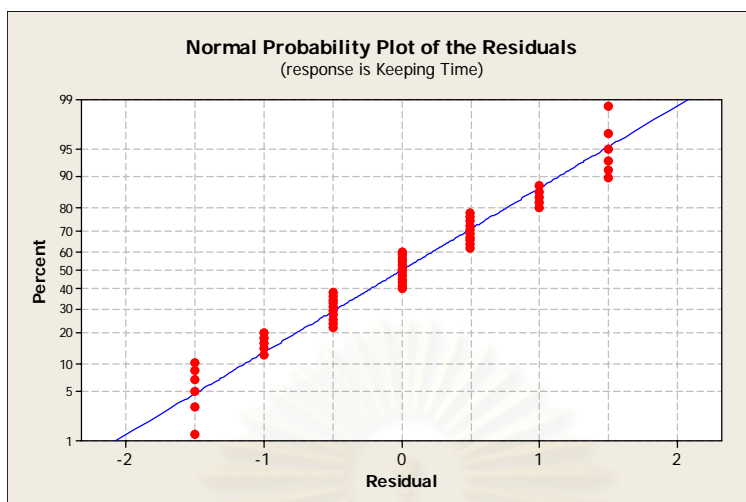
รูปที่ 5.1 แผนภูมิระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

5.2.1.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ในที่นี้คือค่าเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ ) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 5.2 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 5.2 แผนภูมิจะหว่งค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

5.2.1.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม  $P_k = (k-1/2)/n$  นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 5.3 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการเรียงตัวตามแนวตั้งแต่ทั้งหมดยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่ยังพอยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 5.3 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

#### 5.2.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	$F_0$	P-Value
C	1998.780	2	999.39	642.46	0.000
D	2805.440	2	1402.72	901.75	0.000
E	6776.780	2	3388.39	2178.25	0.000
CD	26.440	4	6.61	4.25	0.009
CE	62.440	4	15.61	10.04	0.000
DE	27.780	4	6.94	4.46	0.007
CDE	38.330	8	4.79	3.08	0.013
Error	42.000	27	1.56		
Total	11778.000	53			

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าปัจจัยหลักทุกตัวมีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ซึ่งได้แก่ คุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่3 (C) คุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่4 (D) และความเร็วของสายพาน (E)

ในส่วนของอันตรกิริยาสองทางและอันตรกิริยาสามทางก็เช่นเดียวกัน จากการพิจารณาค่า P-Value พบว่า อันตรกิริยาทั้งหมดมีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ซึ่งได้แก่ อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่3 กับคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่4 (CD) อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่3 กับความเร็วของสายพาน (CE) อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่4 กับความเร็วของสายพาน (DE) และ อันตรกิริยาสามทางระหว่างคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่3 กับคุณหมุมิของฮีดเตอร์ตัวที่4 และความเร็วของสายพาน (CDE) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่

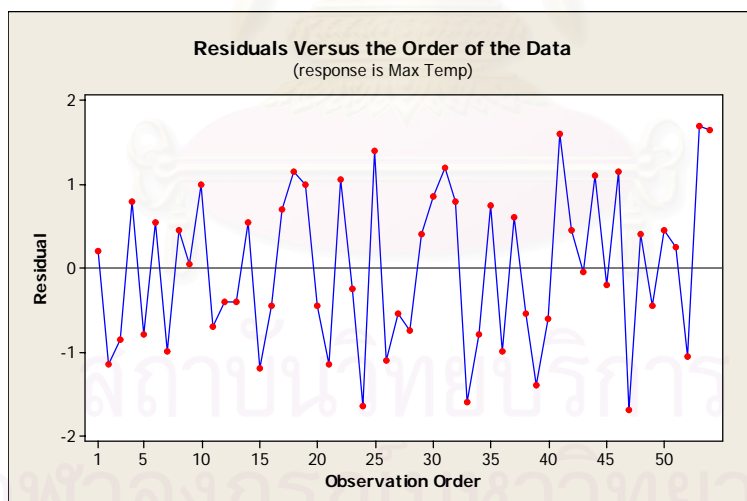
ประเภทปัจจัย	ผลต่อตัวแปรตอบสนอง	
	มีผล	ไม่มีผล
ปัจจัยหลัก	C D E	-
อันตรกิริยาสองทาง	CD CE DE	-
อันตรกิริยาสามทาง	CDE	-



## 5.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

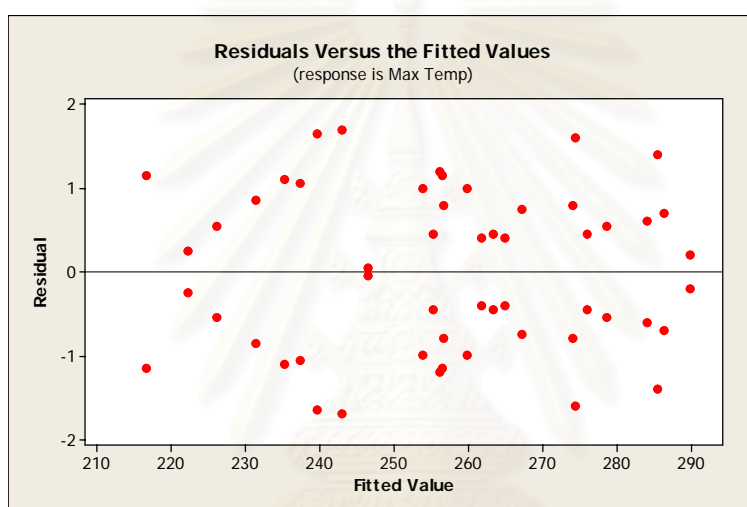
ก่อนทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เมื่อสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอและเป็นไปตามหลักการทางสถิติจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและตีความหมายต่อไป

5.2.2.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 5.4 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



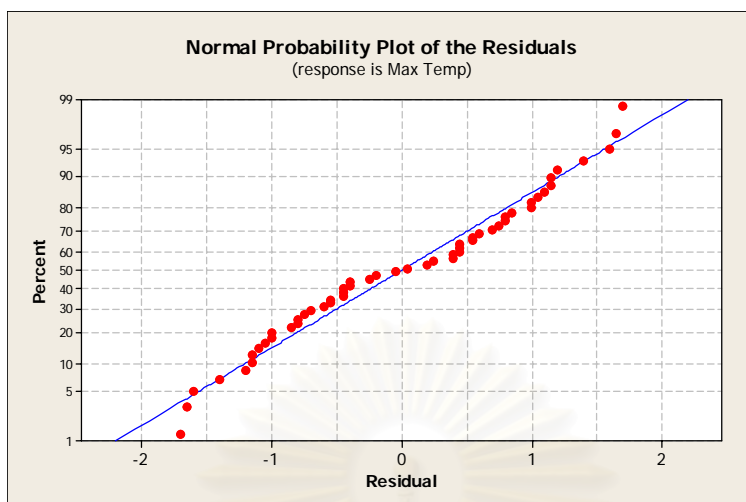
รูปที่ 5.4 แผนภูมิจะหว่งค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

5.2.2.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ในที่นี้คือค่าอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ ) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 5.5 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 5.5 แผนภูมิจากค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

5.2.2.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม  $P_k = (k-1/2)/n$  นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 5.6 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 5.6 แผนภูมิ Normal Probability Plot ในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

#### 5.2.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	$F_0$	P-Value
C	1545.890	2	772.94	403.43	0.000
D	20124.520	2	10062.26	5251.90	0.000
E	2142.510	2	1071.26	559.13	0.000
CD	321.760	4	80.44	41.98	0.000
CE	36.870	4	9.22	4.81	0.005
DE	90.350	4	22.59	11.79	0.000
CDE	55.650	8	6.96	3.63	0.005
Error	51.730	27	1.92		
Total	24369.270	53			

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าปัจจัยหลักทุกตัวมีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ซึ่งได้แก่ คุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่3 (C) คุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่4 (D) และความเร็วของสายพาน (E)

ในส่วนอันตรกิริยาสองทางและอันตรกิริยาสามทางก็เช่นเดียวกัน จากพิจารณาค่า P-Value พบว่าอันตรกิริยาทั้งหมดมีค่า P-Value น้อยกว่าค่า  $\alpha$  ซึ่งได้แก่ อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่3 กับคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่4 (CD) อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่3 กับความเร็วของสายพาน (CE) อันตรกิริยาสองทางระหว่างคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่4 กับความเร็วของสายพาน (DE) และอันตรกิริยาสามทางระหว่างคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่3 กับคุณหมุมิของฮีตเตอร์ตัวที่4 และความเร็วของสายพาน (CDE) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลต่อคุณหมุมิสูงสุด

ประเภทปัจจัย	ผลต่อตัวแปรตอบสนอง	
	มีผล	ไม่มีผล
ปัจจัยหลัก	C D E	-
อันตรกิริยาสองทาง	CD CE DE	-
อันตรกิริยาสามทาง	CDE	-

### 5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และคุณหมุมิสูงสุด

จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab Release 14.1 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะได้สัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่างๆ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งก็คือเวลาที่คงอยู่และคุณหมุมิสูงสุด และจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองได้สรุปว่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวมีผลต่อเวลาที่คงอยู่และคุณหมุมิสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสามารถใช้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้

ทุกตัว สัมประสิทธิ์ที่ได้นี้จะอยู่ในรูปการเข้ารหัส (Coded Units) ดังนั้นตัวแปรของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยจะถูกใช้สัญลักษณ์ ( ' ) แทนตัวแปรเดิมแสดงไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแบบการเข้ารหัส (Coded Units)

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์	
	เวลาที่คงอยู่	อุณหภูมิสูงสุด
C'	7.9444	5.9611
D'	9.1667	24.0333
E'	-14.5000	-7.7722
C'D'	1.3889	2.6500
C'E'	1.5556	-0.9111
D'E'	1.3333	-2.1667
C'D'E'	0.9444	1.2333
ค่าคงที่	39.3333	270.0780

โดยที่ C' D' และ E' จะมีค่าอยู่ระหว่าง - 1 ถึง +1 และสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 และสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดของการทำรีโพลีเมอร์แบบการเข้ารหัส (Coded Units) ได้ตามสมการที่ 5.4 และ 5.5

$$C' = (C - 240) / 20 \quad \text{-----} \quad 5.1$$

$$D' = (D - 265) / 25 \quad \text{-----} \quad 5.2$$

$$E' = (E - 0.8) / 0.2 \quad \text{-----} \quad 5.3$$

**เวลาที่คงอยู่**

$$Y_k = 7.9444 C' + 9.1667D' - 14.5E' + 1.3889C'D' + 1.5556C'E' + 1.3333D'E' + 0.9444C'D'E' + 39.3333 \quad \text{-----} \quad 5.4$$

**อุณหภูมิสูงสุด**

$$Y_m = 5.9611C' + 24.0333D' - 7.7722E' + 2.65C'D' - 0.9111C'E' - 2.1667D'E' + 1.2333C'D'E' + 270.078 \quad \text{-----} \quad 5.5$$

เมื่อ

- C คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 D คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 E คือ ความเร็วของสายพาน (เมตรต่อนาที)  
 C' คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)  
 D' คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)  
 E' คือ ความเร็วของสายพาน ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)

โดยที่ C D และ E มีค่าอยู่ในช่วงต่ำสุดและสูงสุดตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าต่ำสุดและสูงสุดของปัจจัยหลักสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าต่ำสุด (-)	ค่าสูงสุด (+)	หน่วย
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	C	220	260	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	D	240	290	$^{\circ}\text{C}$
ความเร็วของสายพาน	E	0.6	1.0	เมตรต่อนาที

#### 5.4 การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์

จากการที่อุณหภูมิของรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาสำหรับตะกั่ว เหลวชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิและเวลาที่คงอยู่ของขั้นตอนการทำรีโพล์สูงขึ้นตามไปด้วยนั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.7 จะเห็นว่า การที่จะได้ขั้นตอนการทำรีโพล์ใหม่นั้น ต้องใช้ความเร็วของสายพานช้าลงถึงร้อยละ 40 จากความเร็วเดิม ส่งผลให้กำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ลดลงถึงร้อยละ 40 เช่นเดียวกัน ดังนั้นการปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์คือ พยายามใช้ความเร็วสายพานให้เร็วกว่า 0.6 เมตรต่อนาที เนื่องจากกำลังการผลิตของเครื่องมีผลโดยตรงจากความเร็วของสายพาน โดยมีเงื่อนไขว่าเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดยังต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดของการทำรีโพล์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุตามตารางที่ 2.1 จากสมการที่ 5.4 และ 5.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์และความเร็วของสายพานที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

#### 5.4.1 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตั้งค่าเครื่องรีโพล์

ดังนั้นหากทำการกำหนดค่าของความเร็วสายพานให้เร็วขึ้นกว่า 0.6 เมตรต่อนาทีและคำนวณหาการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่เหมาะสม โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ เวลาที่คงอยู่ต้องมีค่ามากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดต้องมีค่ามากกว่า  $240^{\circ}\text{C}$  แต่ต้องไม่เกิน  $270^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นข้อกำหนดของการทำรีโพล์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมแบบ Green Series โดยการใช้การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) ซึ่งเป็นเทคนิคเชิงปริมาณในการแก้ปัญหาทางการจัดสรรทรัพยากรหรือปัจจัย ในที่นี้ทรัพยากรหรือปัจจัยคือการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ทั้งสองตัวและการตั้งค่าความเร็วของสายพาน โดยที่สมการเป้าหมาย (Objective Function) คือ เวลาที่คงอยู่ และข้อจำกัด (Constraints) คือ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และทดลองกำหนดการตั้งค่าความเร็วของสายพานที่เร็วที่สุดคือ 1.0 เมตรต่อนาทีเนื่องจากต้องการเงื่อนไขการตั้งค่าที่มีความเร็วของสายพานมากกว่าค่าเดิมคือ 0.6 เมตรต่อวินาที ดังนี้

#### กำหนดให้

- C คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- D คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- E คือ ความเร็วของสายพาน (เมตรต่อนาที)
- C' คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)
- D' คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)
- E' คือ ความเร็วของสายพาน ในรูปแบบการเข้ารหัส (-1 ถึง +1)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการเป้าหมาย (Objective Function)

ค่าสูงสุด (Maximize) ของเวลาที่คงอยู่ ( $Y_k$ )

$$7.9444C' + 9.1667D' - 14.5E' + 1.3889C'D' + 1.5556C'E' + 1.3333D'E' + 0.9444C'D'E' + 39.3333$$

ข้อจำกัด (Constraints)

1. อุณหภูมิสูงสุด ( $Y_m$ )

$$240 \leq 5.9611C' + 24.0333D' - 7.7722E' + 2.65C'D' - 0.9111C'E' - 2.1667D'E' + 1.2333C'D'E' + 270.078 \leq 270$$

2. อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3

$$220 \leq C \leq 260$$

4. อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4

$$240 \leq D \leq 290$$

5. ความเร็วของสายพาน

$$E = 1$$

6. ข้อจำกัดของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง

$$C, D \text{ และ } E \geq 0$$

7. ข้อจำกัดของการตั้งค่าเครื่องรีโพล์

$$C, D \text{ และ } E \text{ เป็นจำนวนเต็ม}$$

ค่า  $C'$ ,  $D'$  และ  $E'$  ต้องคำนวณมาจากค่า  $C$ ,  $D$  และ  $E$  ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.3



จากการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นตรง ได้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ทั้งสองตัวโดยการตั้งค่าความเร็วของสายพานถูกกำหนดไว้คงที่ที่ 1.0 เมตรต่อนาที โดยที่เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาที และอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 270 °C แสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการตั้งค่าเครื่องรีไฟลว์

C	D	$Y_k$	$Y_m$	C	D	$Y_k$	$Y_m$	C	D	$Y_k$	$Y_m$
245	272	30.3	270.0	253	267	32.0	267.5	257	267	33.9	268.6
246	271	30.4	269.3	253	268	32.5	268.5	257	268	34.4	269.6
247	270	30.4	268.7	253	269	32.9	269.5	258	259	30.4	260.8
247	271	30.9	269.6	254	262	30.0	262.9	258	260	30.9	261.8
248	268	30.0	267.1	254	263	30.5	263.9	258	261	31.4	262.8
248	269	30.5	268.1	254	264	31.0	264.9	258	262	31.9	263.8
248	270	30.9	269.0	254	265	31.5	265.8	258	263	32.4	264.8
248	271	31.4	269.9	254	266	32.0	266.8	258	264	32.9	265.8
249	267	30.0	266.5	254	267	32.5	267.8	258	265	33.4	266.9
249	268	30.5	267.4	254	268	32.9	268.8	258	266	33.9	267.9
249	269	31.0	268.4	254	269	33.4	269.8	258	267	34.4	268.9
249	270	31.4	269.3	255	262	30.5	263.1	258	268	34.9	269.9
250	266	30.0	265.8	255	263	31.0	264.1	259	258	30.3	259.9
250	267	30.5	266.7	255	264	31.5	265.1	259	259	30.8	261.0
250	268	31.0	267.7	255	265	32.0	266.1	259	260	31.3	262.0
250	269	31.4	268.6	255	266	32.4	267.1	259	261	31.8	263.0
250	270	31.9	269.6	255	267	32.9	268.1	259	262	32.3	264.0
251	265	30.1	265.1	255	268	33.4	269.1	259	263	32.8	265.1
251	266	30.5	266.0	256	261	30.5	262.4	259	264	33.3	266.1
251	267	31.0	267.0	256	262	30.9	263.3	259	265	33.9	267.1
251	268	31.5	268.0	256	263	31.4	264.3	259	266	34.4	268.1

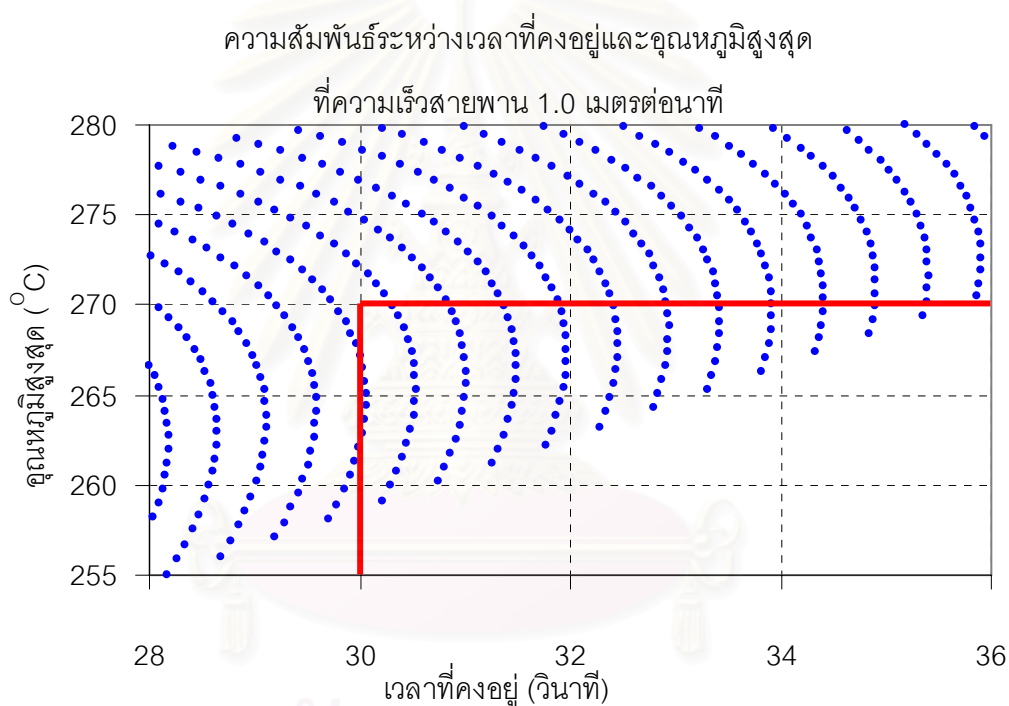
C	D	$Y_k$	$Y_m$	C	D	$Y_k$	$Y_m$	C	D	$Y_k$	$Y_m$
251	269	31.9	268.9	256	264	31.9	265.3	259	267	34.9	269.1
251	270	32.4	269.9	256	265	32.4	266.3	260	257	30.2	259.1
252	264	30.1	264.4	256	266	32.9	267.3	260	258	30.7	260.1
252	265	30.5	265.3	256	267	33.4	268.3	260	259	31.3	261.2
252	266	31.0	266.3	256	268	33.9	269.3	260	260	31.8	262.2
252	267	31.5	267.3	257	260	30.4	261.6	260	261	32.3	263.2
252	268	32.0	268.2	257	261	30.9	262.6	260	262	32.8	264.3
252	269	32.4	269.2	257	262	31.4	263.6	260	263	33.3	265.3
253	263	30.0	263.6	257	263	31.9	264.6	260	264	33.8	266.3
253	264	30.5	264.6	257	264	32.4	265.6	260	265	34.3	267.4
253	265	31.0	265.6	257	265	32.9	266.6	260	266	34.8	268.4
253	266	31.5	266.6	257	266	33.4	267.6	260	267	35.4	269.4

ตารางที่ 5.9 ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการตั้งค่าเครื่องรีโฟลว์ (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4.2 การทดสอบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตั้งค่าเครื่องรีโพล์

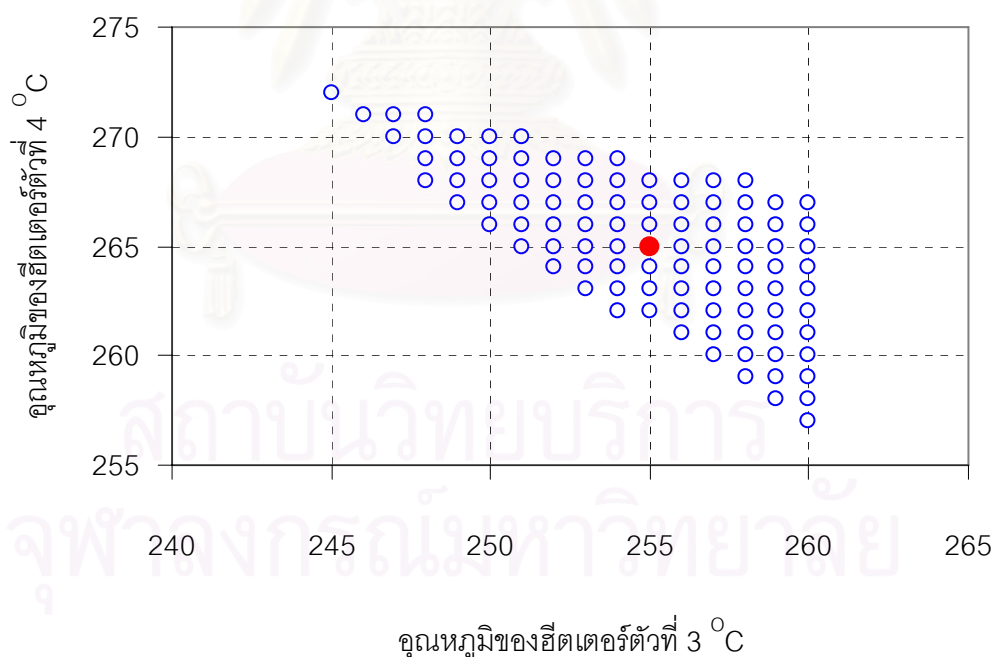
จากข้อมูลในตารางที่ 5.9 นำมาสร้างแผนภูมิโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่ในแกนนอนและอุณหภูมิสูงสุดในแกนตั้ง ตามรูปที่ 5.7 โดยที่เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดที่สอดคล้องตามข้อกำหนดของการทำรีโพล์จะอยู่ด้านล่างของเส้นที่บดตามแกนตั้งและอยู่ทางขวาของเส้นที่บดตามแกนนอน ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเส้นที่บดตามแกนตั้งคือบริเวณที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  และบริเวณที่อยู่ทางซ้ายของเส้นที่บดตามแกนนอนคือบริเวณที่เวลาที่คงอยู่น้อยกว่า 30 วินาที



รูปที่ 5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาถึงการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 โดยการกำหนดความเร็วของสายพานไว้คงที่ที่ 1.0 เมตรต่อนาที และนำมาสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 จากแผนภูมิดังกล่าวพบว่า เพื่อให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดเป็นไปตามข้อกำหนดในการทำรีโฟลด์แบบ Green Series นั้น ต้องมีการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ให้อยู่ระหว่าง 245 °C ถึง 260 °C และตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 อยู่ระหว่าง 257 °C ถึง 272 °C จะเห็นว่ามีทางเลือกในการตั้งค่าได้หลายทาง แต่เพื่อเป็นการยืนยันว่าทางเลือกเหล่านี้จะสามารถทำให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดในการทำรีโฟลด์ได้เสมอ จึงได้ทำการทดลองเลือกการตั้งค่าไว้ที่จุดกึ่งกลาง เพื่อป้องกันความผันแปรที่อาจเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิต หากเลือกการตั้งค่าที่อยู่ในบริเวณขอบมากเกินไปอาจมีความเป็นไปได้ว่า เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดจะไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดดังกล่าว จึงทำการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 ให้อยู่ที่ 255 °C และ ตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ให้อยู่ที่ 265 °C ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของทั้งสองค่า และกำหนดความเร็วของสายพานไว้ที่ 1.0 เมตรต่อนาที จากนั้นทำการเก็บข้อมูลเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด 30 ค่าตามตารางที่ 5.10



รูปที่ 5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ของการตั้งค่าระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ 5.10 ผลการเก็บข้อมูลเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

ครั้งที่	เวลาที่คงอยู่	อุณหภูมิสูงสุด	ครั้งที่	เวลาที่คงอยู่	อุณหภูมิสูงสุด	ครั้งที่	เวลาที่คงอยู่	อุณหภูมิสูงสุด
1	32	264.9	11	35	265.8	21	36	266.6
2	33	265.6	12	35	265.8	22	36	266.7
3	35	266.3	13	36	266.5	23	37	267.3
4	35	267	14	36	266.6	24	39	267.3
5	36	265.1	15	37	267.1	25	32	265.4
6	36	265.8	16	39	267.1	26	33	266.1
7	37	266.4	17	32	265.3	27	35	266.8
9	32	267.1	18	33	265.3	28	35	265.6
8	39	265.1	19	35	266	29	36	266.3
10	33	265.1	20	35	266.1	30	36	266.9

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อยู่ที่  $255^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 อยู่ที่  $265^{\circ}\text{C}$  และ ความเร็วของสายพานที่ 1.0 เมตรต่อนาที จะทำให้เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  จึงทำการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของเวลาที่คงอยู่จะมีค่ามากกว่า 30 วินาทีและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  จริงหรือไม่ โดยการทำการทดสอบที (T-test) และกำหนดให้ค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 0.05 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4.2.1 การทดสอบค่าเฉลี่ยของเวลาที่คงอยู่

ค่าเฉลี่ยของเวลาที่คงอยู่	35.200	วินาที
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.024	วินาที
ค่า $T_{0.05; 29}$	1.699	
สมมติฐานหลัก	$H_0: \mu_{Y_k} \leq 30; \bar{X} \leq 30 + 1.699(2.024/\sqrt{30})$ วินาที	
สมมติฐานรอง	$H_1: \mu_{Y_k} > 30; \bar{X} > 30 + 1.699(2.024/\sqrt{30})$ วินาที	
	$H_0: \mu_{Y_k} \leq 30; \bar{X} \leq 30.629$	วินาที
	$H_1: \mu_{Y_k} > 30; \bar{X} > 30.629$	วินาที

ค่าเฉลี่ยของเวลาที่คงอยู่มีค่ามากกว่า 30.629 วินาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเวลาที่คงอยู่มีค่ามากกว่า 30 วินาที อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

#### 5.4.2.2 การทดสอบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุด

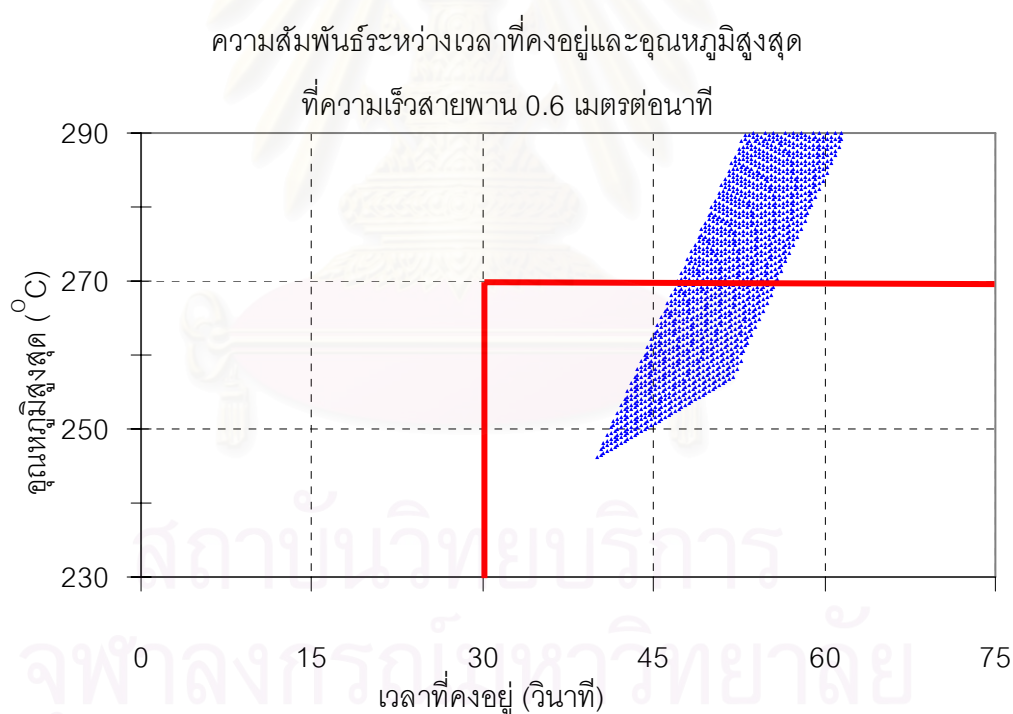
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุด	266.167	$^{\circ}\text{C}$
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.740	$^{\circ}\text{C}$
ค่า $T_{0.05; 29}$	1.699	
สมมติฐานหลัก	$H_0: \mu_{Y_m} \geq 270; \bar{X} \geq 270 - 1.699(0.740/\sqrt{30})$ $^{\circ}\text{C}$	
สมมติฐานรอง	$H_1: \mu_{Y_m} < 270; \bar{X} < 270 - 1.699(0.740/\sqrt{30})$ $^{\circ}\text{C}$	
	$H_0: \mu_{Y_m} \geq 270; \bar{X} \geq 269.771$	$^{\circ}\text{C}$
	$H_1: \mu_{Y_m} < 270; \bar{X} < 269.771$	$^{\circ}\text{C}$

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 269.771  $^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 270  $^{\circ}\text{C}$  อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

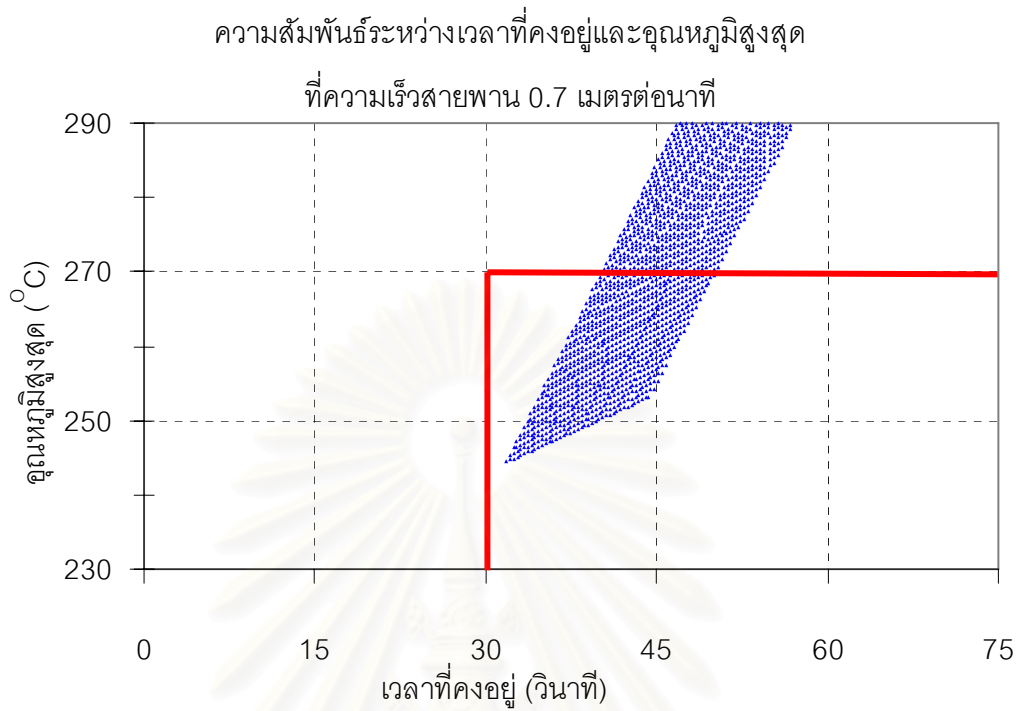
สรุปว่า การตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อยู่ที่ 255  $^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 อยู่ที่ 265  $^{\circ}\text{C}$  และความเร็วของสายพานที่ 1.0 เมตรต่อนาที จะทำให้เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า 270  $^{\circ}\text{C}$  อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

### 5.4.3 การตั้งค่าเครื่องรีโพลีเมอร์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต

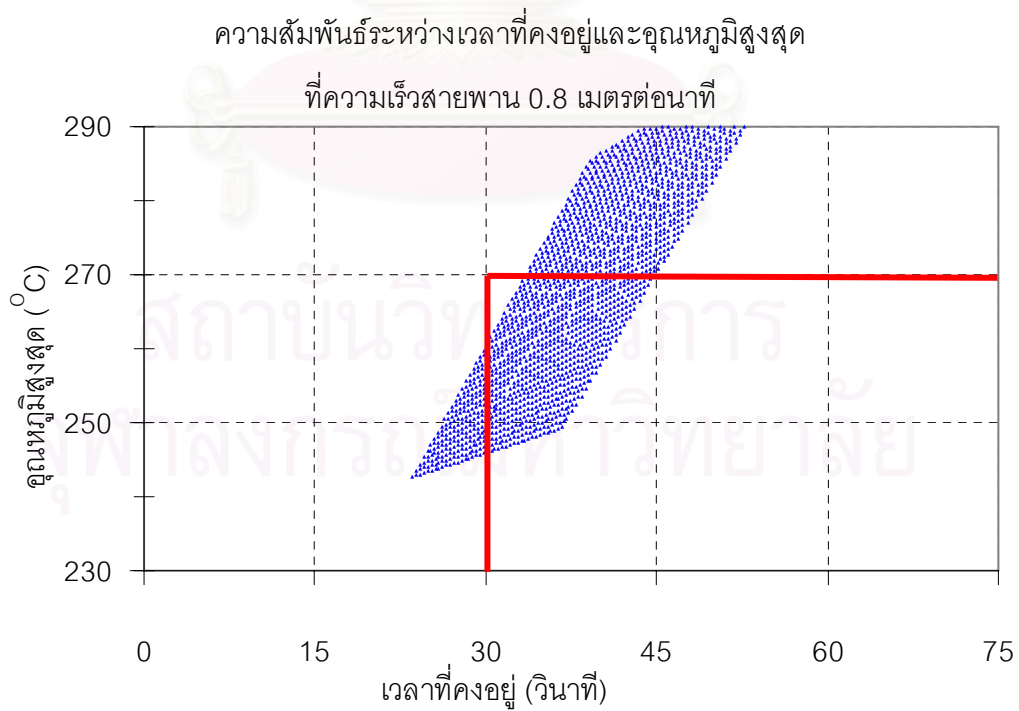
จากการทดลองตั้งค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อยู่ที่  $255^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 อยู่ที่  $265^{\circ}\text{C}$  และ ความเร็วของสายพานที่ 1.0 เมตรต่อนาที ในหัวข้อ 5.4.2 นั้น เป็นเพียงแค่นึ่งทางเลือกจากทางเลือกทั้งหมด 99 ทางเลือกที่ได้จากการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.9 ในการที่จะทำให้เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาที และอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  โดยการกำหนดความเร็วของสายพานที่ 1.0 เมตรต่อนาที แต่หากลองเปลี่ยนความเร็วของสายพานให้น้อยลง แล้วทดลองการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นตรง จะพบว่ายังลดความเร็วของสายพานก็สามารถเพิ่มทางเลือกในการที่จะทำให้เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  ดังที่แสดงไว้ในแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด ตามรูปที่ 5.9 ถึง 5.13



รูปที่ 5.9 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.6 เมตรต่อนาที)

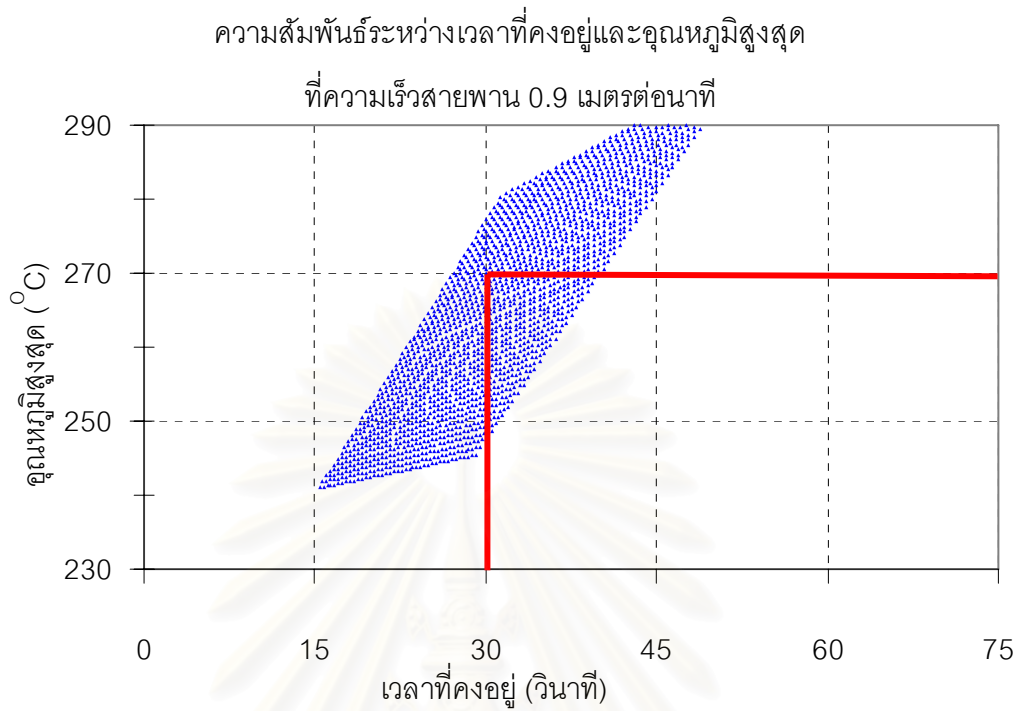


รูปที่ 5.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.7 เมตรต่อนาที)

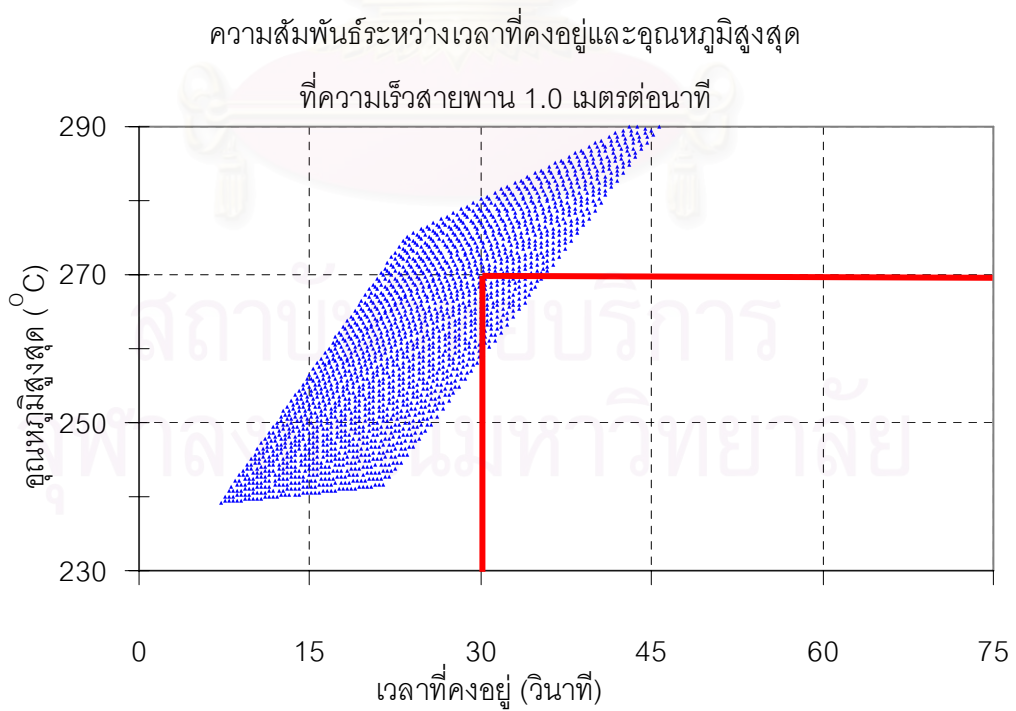


รูปที่ 5.11 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.8 เมตรต่อนาที)





รูปที่ 5.12 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (0.9 เมตรต่อนาที)



รูปที่ 5.13 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด (1.0 เมตรต่อนาที)

โดยที่เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดที่สอดคล้องตามข้อกำหนดของการทำรีไฟล์จะอยู่ด้านล่างของเส้นที่บดตามแกนตั้งและอยู่ทางขวาของเส้นที่บดตามแกนนอน ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเส้นที่บดตามแกนตั้งคือบริเวณที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  และบริเวณที่อยู่ทางซ้ายของเส้นที่บดตามแกนนอนคือบริเวณที่เวลาที่คงอยู่น้อยกว่า 30 วินาที ดังที่กล่าวไว้แล้วว่ายิ่งลดความเร็วของสายพานก็จะสามารถเพิ่มทางเลือกในการที่จะทำให้เวลาที่คงอยู่มากกว่า 30 วินาที และอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  แต่การลดความเร็วของสายพานเป็นการลดกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์โดยตรง

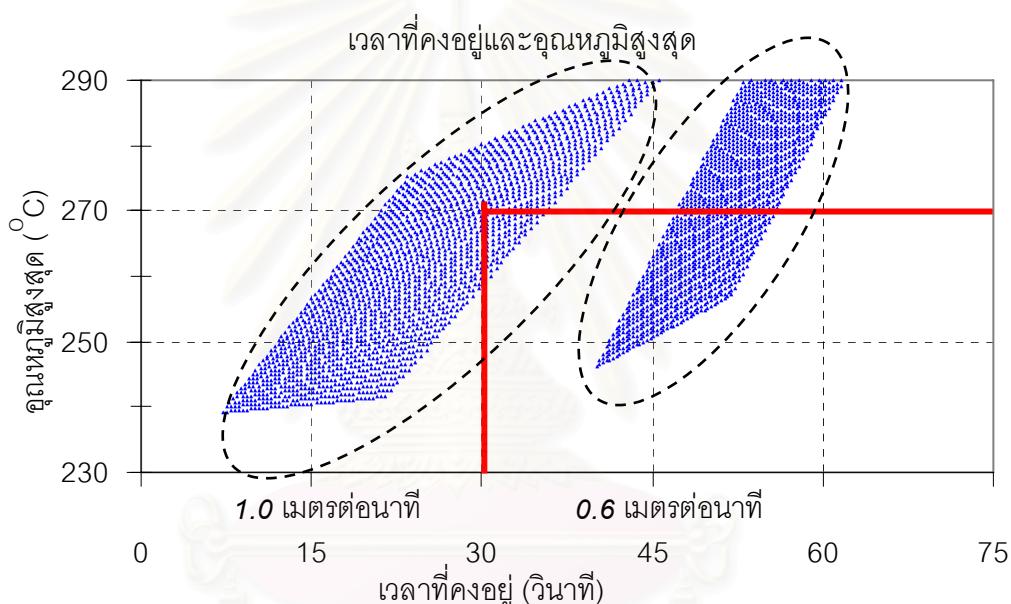
ดังนั้นเพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ คือปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์ จึงควรเลือกเงื่อนไขการตั้งค่าที่สามารถใช้ความเร็วของสายพานได้สูงที่สุด นั่นก็คือที่ความเร็ว 1.0 เมตรต่อนาที ถึงแม้จะเป็นการลดทางเลือกในการตั้งค่าก็ตาม ดังนั้นการตั้งค่าเพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.11 ซึ่งก็คือกำลังการผลิตเต็มของเครื่องนั่นเอง

ตารางที่ 5.11 การตั้งค่าเครื่องรีไฟล์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต

หัวข้อ	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	หน่วย
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1	165	165	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2	175	175	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3	225	255	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4	260	265	$^{\circ}\text{C}$
ความเร็วของสายพาน	0.6	1.0	เมตรต่อนาที

การลดความเร็วสายพานของเครื่องรีไฟล์ลง จะเป็นการเพิ่มทางเลือกในการตั้งค่าเครื่องรีไฟล์เพื่อให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดสอดคล้องตามข้อกำหนดในการทำรีไฟล์สำหรับตัวเก็บประจุชนิด Green series และเมื่อพิจารณาสมการที่ 5.4 พบว่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วสายพานมีค่าสูงสุด ในขณะที่สัมประสิทธิ์ของความเร็วสายพานในสมการที่ 5.5 มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ซึ่งหมายความว่าความเร็วสายพานมีผลต่อเวลาที่คงอยู่มากที่สุดแต่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดไม่มากนัก

ดังนั้นจากวิธีลองผิดลองถูก (Trial and error) จึงพบว่า การลดความเร็วสายพานของเครื่องรีไฟล์ลงจาก 1.0 เมตรต่อนาที ลงเหลือ 0.6 เมตรต่อนาที เป็นวิธีที่ทำให้เวลาที่คงอยู่เพิ่มขึ้น จาก 10 วินาที เป็น 30 วินาทีได้โดยง่าย และยังมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดไม่มากนัก และเป็นไปตามตามข้อกำหนดของการทำรีไฟล์สำหรับตัวเก็บประจุชนิด Green series แต่เป็นสาเหตุให้กำลังการผลิตของเครื่องรีไฟล์ลดลง จากรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่า เวลาที่คงอยู่ทั้งหมดของความเร็วสายพาน 0.6 เมตรต่อนาที มีค่ามากกว่า 30 วินาที และยังมีอุณหภูมิสูงสุดมากมายที่มีค่าน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่มีเวลาที่คงอยู่ส่วนน้อยเท่านั้นที่มีค่ามากกว่า 30 วินาที สำหรับความเร็วสายพาน 1.0 เมตรต่อนาที



รูปที่ 5.14 เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด ที่ความเร็วสายพาน 0.6 และ 1.0 เมตรต่อนาที

ดังนั้นในการปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงกระบวนการผลิต จึงควรใช้วิธีการออกแบบการทดลองและวิธีการทางสถิติ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่จะมีผลต่อสิ่งที่สนใจหรือตัวแปรตอบสนองที่แท้จริงเพื่อให้ได้ผลประโยชน์สูงสุด และเมื่อได้เรียนรู้ว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจมากที่สุด ควรควบคุมเพื่อให้ได้กระบวนการผลิตที่ดี แต่เมื่อพบว่าปัจจัยใดส่งผลน้อยมากหรือไม่ส่งผลเลยแต่ยังถูกควบคุมอยู่ ซึ่งหมายถึงต้นทุนที่สูงเกินไปหรือได้ผลน้อยมาก ก็ทำการยกเลิกหรือลดการควบคุมการและตรวจสอบ ก็จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้

## 5.5 การประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีโพล์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต

### 5.5.1 การลดเวลานำในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

จากการประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีโพล์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิตตามตารางที่ 5.11 นอกเหนือจากการปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์แล้ว ประโยชน์โดยตรงอีกอย่างคือ การลดเวลานำ (Lead time) ในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม เนื่องจากการตั้งค่าเครื่องรีโพล์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิตเป็นการเพิ่มความเร็วของเครื่องรีโพล์ ดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงต่อการลดเวลานำในการผลิต ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลของเวลานำในการผลิตหลังจากการประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีโพล์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิต ในช่วงเดือนธันวาคม 2549 เปรียบเทียบกับเวลานำในการผลิตก่อนหน้านี้ คือในช่วงพฤศจิกายน 2549 โดยแบ่งตามขนาดของตัวเก็บประจุ ดังแสดงในตารางที่ 5.12 และสามารถลดเวลานำโดยรวมได้ 11.6 %

ตารางที่ 5.12 เวลานำในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม ก่อนและหลังการปรับปรุง

ขนาดของ ตัวเก็บประจุ	เวลานำ ( Days/Lot )		
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	อัตราส่วน (%)
A	11.27	10.43	7.41
A2	16.66	14.15	15.06
B2	10.05	8.64	14.07
B3	15.27	13.84	9.35
C	9.34	8.96	4.02
C2	15.58	14.38	7.72
J	15.02	13.48	10.23
P	12.37	10.26	17.07
V	18.20	16.18	11.06
D	18.78	15.70	16.40
<b>รวม</b>	<b>142.53</b>	<b>126.02</b>	<b>11.58</b>

### 5.5.2 การเพิ่มกำลังการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม

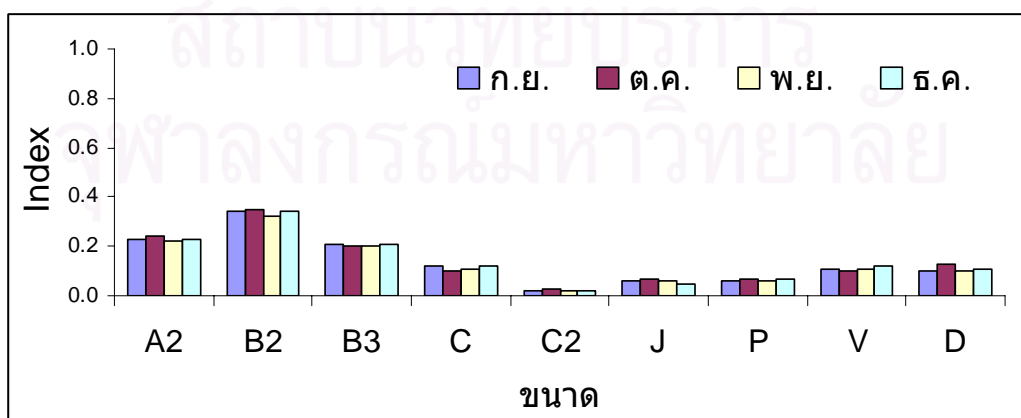
จากการที่สามารถลดเวลานำในการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมได้ 11.6 % ส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตโดยรวมขึ้น 32 ล้านชิ้นต่อเดือน

#### การคำนวณกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น

กำลังการผลิตในเดือนพฤศจิกายน 2549	คือ	280	ล้านชิ้นต่อเดือน
เวลานำที่ลดได้	คือ	11.58	%
ดังนั้นกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น	คือ	$280 \times 0.1158 = 32.42$	ล้านชิ้นต่อเดือน
กำลังการผลิตตั้งแต่เดือนธันวาคม 2549	คือ	$280 + 32.42 = 312.42$	ล้านชิ้นต่อเดือน

### 5.5.3 ผลกระทบต่อการคัดแยกตัวเสียประเภทลัดวงจร

เพื่อเป็นการยืนยันว่ากำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์ที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการคัดแยกตัวเสียประเภทลัดวงจร ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลของตัวเสียประเภทลัดวงจร หลังจากการประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีโฟลว์สำหรับการปรับปรุงกำลังการผลิตที่กระบวนการตรวจสอบ (Inspection process) ซึ่งเป็นกระบวนการวัดและคัดตัวเสียประเภทลัดวงจรทั้งในช่วงเดือนธันวาคม 2549 เปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนหน้า 3 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 5.15 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า อัตราส่วนตัวเสียประเภทลัดวงจรของตัวเก็บประจุทุกขนาดไม่มีแนวโน้มที่จะลดลง หมายถึงความสามารถในการคัดแยกตัวเสียประเภทลัดวงจรกระบวนการรีโฟลว์หลังการปรับปรุงไม่มีการเปลี่ยนแปลง และไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.15 ตัวเสียประเภทลัดวงจรที่กระบวนการตรวจสอบ (Inspection)

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพลีเมอร์ โดยการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการการทำรีโพลีเมอร์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิด จากการศึกษาที่อุณหภูมิของรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และแผนวงจรสำหรับตะกั่วเหลวชนิดที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมสูงขึ้น ทำให้เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดของขั้นตอนการทำรีโพลีเมอร์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุสูงขึ้นตามไปด้วย โดยลดความเร็วของสายพานของเครื่องรีโพลีเมอร์ให้ช้าลงจาก 1.0 เมตรต่อนาที เป็น 0.6 เมตรต่อนาที เพื่อเพิ่มเวลาที่คงอยู่จากเดิม 10 วินาที เป็นมากกว่า 30 วินาที และอุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า  $270^{\circ}\text{C}$  ซึ่งหมายถึงการลดกำลังการผลิตของเครื่องรีโพลีเมอร์ถึงร้อยละ 40 ดังนั้นการปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพลีเมอร์คือ พยายามใช้ความเร็วสายพานให้เร็วกว่า 0.6 เมตรต่อนาที โดยมีเงื่อนไขว่าเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดยังต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดของการทำรีโพลีเมอร์ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิด Green Series

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาสามารถค้นหาปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดได้ทั้งสิ้น 11 ปัจจัย และจากการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบโดยพิจารณาจากตัวเลขแสดงลำดับความเสี่ยงสูงสุด เหลือปัจจัยที่ต้องทำการศึกษาซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าและควบคุมได้ดีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และความเร็วของสายพาน

ในการทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อพิสูจน์ยืนยันถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยนี้มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดจริง ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเมื่อมี 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ( $2^k$  Factorial Design) โดยกำหนดให้ระดับของแต่ละปัจจัยเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด เพื่อเป็นการคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้เหลือน้อยที่สุด จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด คือ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และความเร็ว

ของสายพาน (Xs) ส่วนอันตรกิริยาสองทางที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดมีเพียง 2 ตัว คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 กับความเร็วของสายพาน และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 กับความเร็วของสายพาน ส่วนอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 ไม่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด และไม่พบว่าอันตรกิริยาอื่นๆ ส่งผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด

หลังจากการคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แล้ว ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เมื่อมี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ( $3^k$  Factorial) โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด ค่ากลาง และค่าต่ำสุด เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดในการทำรีไฟล์ จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาทั้งหมดมีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุด ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ความเร็วของสายพาน อันตรกิริยาสองทางระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 กับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 อันตรกิริยาสองทางระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 กับความเร็วของสายพาน อันตรกิริยาสองทางระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 กับความเร็วของสายพาน และอันตรกิริยาสองทางระหว่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 กับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และความเร็วของสายพาน

จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดแล้วทดลองหาเงื่อนไขการตั้งค่าเครื่องรีไฟล์ใหม่โดยการกำหนดความเร็วของสายพานที่ระดับสูงสุดคือ 1.0 เมตรต่อนาที และหาการตั้งค่าของอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 ที่สามารถทำให้เวลาที่คงอยู่มีค่ามากกว่า 30 วินาทีและอุณหภูมิสูงสุดมีค่ามากกว่า  $240^{\circ}\text{C}$  และไม่เกิน  $270^{\circ}\text{C}$  ได้ผลสรุปดังนี้

- 1) อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 คงเดิมที่  $165^{\circ}\text{C}$
- 2) อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 คงเดิมที่  $175^{\circ}\text{C}$
- 3) อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 เปลี่ยนจาก  $225^{\circ}\text{C}$  เป็น  $255^{\circ}\text{C}$
- 4) อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 เปลี่ยนจาก  $260^{\circ}\text{C}$  เป็น  $265^{\circ}\text{C}$
- 5) ความเร็วของสายพาน เปลี่ยนจาก 0.6 เมตรต่อนาที เป็น 1.0 เมตรต่อนาที

และสามารถปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโพล์ให้มีกำลังการผลิตเต็ม 100% ที่ความเร็วของสายพานมากกว่า 0.6 เมตรต่อนาที คือ 1.0 เมตรต่อนาที จากการประยุกต์ใช้การตั้งค่าเครื่องรีโพล์นี้กับเครื่องรีโพล์ที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมแบบ Green series ทั้งหมดพบว่า สามารถลดเวลานำในการผลิตได้ 11.6 % เพิ่มกำลังการผลิตโดยรวมขึ้น 32 ล้านชิ้นต่อเดือน และความสามารถในการคัดแยกตัวเสียประเภทลัดวงจรไม่มีการเปลี่ยนแปลง

## 6.2 อุปสรรคในงานวิจัย

6.2.1 เนื่องจากมีการใช้งานเครื่องรีโพล์ในการผลิตอยู่เสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการแทรกการเวลาทำงานในการผลิตเพื่อเก็บข้อมูล ทำให้การเก็บข้อมูลติดขัดและล่าช้าในบางครั้ง

6.2.2 บางครั้งเครื่องจักรอื่นที่ใช้ระบบดูดอากาศเดียวกันขัดข้อง ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของข้อมูล ทำให้ต้องรอจนกว่าเครื่องจักรนั้นทำงานได้ จึงจะทำการเก็บข้อมูลต่อไป

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเครื่องรีโพล์เพียงรุ่นเดียว คือ ชนิดใช้ลมร้อน (Hot Air Type) ซึ่งเป็นเครื่องส่วนใหญ่ในโรงงานตัวอย่าง แต่ยังมีเครื่องรีโพล์อีกหลายรุ่น ซึ่งควรนำผลการปรับปรุงในการวิจัยครั้งนี้ไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

6.3.2 เมื่อมีการติดตั้งเครื่องรีโพล์รุ่นใหม่ๆ ในอนาคต การตั้งค่าของเครื่องควรได้มาจากการออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อรู้ถึงผลของตัวแปรที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจในการทำรีโพล์ ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือและมีความถูกต้องมากกว่า

6.3.3 ในระหว่างการทำการวิจัย ผู้ทำการวิจัยพบว่า คุณภาพและชนิดของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิของการทำรีโพล์มีผลอย่างยิ่งต่อความแปรปรวนของข้อมูล ดังนั้นจึงควรได้รับการควบคุมและกำหนดเป็นมาตรฐานต่อไป



## รายการอ้างอิง

- [1] Dominique, W., and other. Lead free plastic area array BGAs and polymer stud grid arrays™ package reliability. Microelectronics Reliability 41 (2001): 1829-1839.
- [2] NEC Corporation. NEC Capacitor Data Book. Japan . NEC Corporation. (Unpublished anuscript). 2002
- [3] H. W. Holland. Solid Tantalum Capacitor Dielectric Failure Mechanism and Determination of Failure Rates . United States of America : Kemet Electronics Corporation.
- [4] จุม วัดคารย์. สัปดาห์ที่ 30 ประเภทของ SMT, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [5] จุม วัดคารย์. สัปดาห์ที่ 32 Printing Process (2), มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [6] จุม วัดคารย์. สัปดาห์ที่ 33 Chip Shooter, IC Placement, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [7] จุม วัดคารย์. สัปดาห์ที่ 34 Reflow, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [8] วีรพล พัวพันธ์. Soldering แบบไร้สารตะกั่ว. Industrial Technology Review 92, 2545
- [9] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [10] Montgomery. Design and Analysis of Experiments. 5th edition (n.p.): John Wiley and Sons, 2000.
- [11] กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [12] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, จันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [13] ยงยุทธ ธนัญญาพร. การศึกษาตัวแปรของกรรมวิธีการผลิตฝาปิดถังน้ำมันโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2546.
- [14] มะลิ แซ่เอ็ง. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.

- [15] จันทรา ยอดมนต์. การสร้างแบบจำลองและการถอดปติไมซ์สภาวะการสร้างชั้นกิ่งฉนวน  
ซ่อมแซมและตัดแยกของเสียของกระบวนการผลิตชิปแทนทาลัมคาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมมาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [16] วิชาญ วรรณภา. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่ง  
แบบต่อเนื่อง โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขา  
วิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [17] เอนกพงศ์ สุขมี. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกสนบัดกรีแผ่นวงจรรีเลย์เคิทรอนิกส์ด้วย  
กระบวนการใช้คลื่นน้ำโลหะเหลวโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าพระนครเหนือ. 2546.
- [18] ปริญญา ศรีสัตยกุล. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของ  
กระบวนการพิมพ์ตะกั่วบัดกรีพร้อมหลอมละลายเคลือบแผ่นวงจรร. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าพระนครเหนือ. 2546.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

POTENTIAL  
FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS  
(PROCESS FMEA)

Item : Reflow

Process Responsibility : 2nd,3rd Mfg.Sec.

FMEA Number : 39

Model Year(s) / Vehicle(s) : NR-ST, ESV ,SVZ,FSV,SVS Series

Key Date : Jul 12 '06

Page 23 of 36

Core Team : Mr.Vasuwat, Mr.Mana, Ms.Korwika, Mr.Athit, Mr.Sinuan, Ms.Sudjai, Ms.Suchin, Mr.Panupong, Ms.Tantawon

Prepared By : Sub-Team A

FMEA Date (Orig.) : Sep 8'98

Ms.Vichuda

Process Function Requirement	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S e v e r i t y	C a u s e	Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure	O c c u r r e n c e	Current Process Controls Prevention	Current Process Controls Detection	D e t e r m i n e d	R e p a r t n u m b e r	Recommended Action(s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results				
													Actions Taken	S e v e r i t y	O c c u r r e n c e	D e t e r m i n e d	R e p a r t n u m b e r
To dry  UV-ink on marking side and screen weak LC characteristics	- Incomplete reflow screening	<u>- LC and SH -defect was not screened</u>	7		- Too low Reflow-temperature	2		- 1 time / shift  (M/C daily check) - Check Temp profile 1 time / day - Check frame appearance 2 frame / lot	2	28	None	-	-	-	-	-	
					- High conveyor speed	1		- 1 time / shift  (M/C daily check)	2	14	None	-	-	-	-	-	

## ภาคผนวก ข

ผลการการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้นสำหรับเวลาที่คงอยู่

## General Linear Model: Keeping Time versus A, B, C, D, E

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	2	160, 190
B	fixed	2	180, 220
C	fixed	2	220, 260
D	fixed	2	240, 290
E	fixed	2	0.6, 1.0

## Analysis of Variance for Keeping Time, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	3.06	3.06	3.06	1.32	0.258
B	1	1.56	1.56	1.56	0.68	0.417
C	1	1406.25	1406.25	1406.25	608.11	0.000
D	1	3937.56	3937.56	3937.56	1702.73	0.000
E	1	5662.56	5662.56	5662.56	2448.68	0.000
A*B	1	1.00	1.00	1.00	0.43	0.516
A*C	1	0.06	0.06	0.06	0.03	0.870
A*D	1	0.25	0.25	0.25	0.11	0.744
A*E	1	1.00	1.00	1.00	0.43	0.516
B*C	1	0.56	0.56	0.56	0.24	0.625
B*D	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.000
B*E	1	0.25	0.25	0.25	0.11	0.744
C*D	1	3.06	3.06	3.06	1.32	0.258
C*E	1	14.06	14.06	14.06	6.08	0.019
D*E	1	49.00	49.00	49.00	21.19	0.000
A*B*C	1	4.00	4.00	4.00	1.73	0.198
A*B*D	1	1.56	1.56	1.56	0.68	0.417
A*C*D	1	6.25	6.25	6.25	2.70	0.110
A*B*E	1	3.06	3.06	3.06	1.32	0.258
A*C*E	1	4.00	4.00	4.00	1.73	0.198
A*D*E	1	1.56	1.56	1.56	0.68	0.417
B*C*D	1	0.25	0.25	0.25	0.11	0.744
B*C*E	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.000
B*D*E	1	0.06	0.06	0.06	0.03	0.870
C*D*E	1	2.25	2.25	2.25	0.97	0.331
A*B*C*D	1	1.56	1.56	1.56	0.68	0.417
A*B*C*E	1	0.06	0.06	0.06	0.03	0.870
A*B*D*E	1	1.00	1.00	1.00	0.43	0.516
A*C*D*E	1	3.06	3.06	3.06	1.32	0.258
B*C*D*E	1	0.06	0.06	0.06	0.03	0.870
A*B*C*D*E	1	1.00	1.00	1.00	0.43	0.516
Error	32	74.00	74.00	2.31		
Total	63	11184.00				

S = 1.52069 R-Sq = 99.34% R-Sq(adj) = 98.70%

## ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้นสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

## General Linear Model: Max Temp versus A, B, C, D, E

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	2	160, 190
B	fixed	2	180, 220
C	fixed	2	220, 260
D	fixed	2	240, 290
E	fixed	2	0.6, 1.0

## Analysis of Variance for Max Temp, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	0.620	0.620	0.620	1.31	0.262
B	1	0.406	0.406	0.406	0.86	0.362
C	1	297.131	297.131	297.131	625.75	0.000
D	1	869.513	869.513	869.513	1831.16	0.000
E	1	1217.138	1217.138	1217.138	2563.24	0.000
A*B	1	0.439	0.439	0.439	0.92	0.344
A*C	1	0.001	0.001	0.001	0.00	0.957
A*D	1	0.035	0.035	0.035	0.07	0.787
A*E	1	0.191	0.191	0.191	0.40	0.530
B*C	1	0.098	0.098	0.098	0.21	0.653
B*D	1	0.000	0.000	0.000	0.00	0.986
B*E	1	0.056	0.056	0.056	0.12	0.733
C*D	1	0.473	0.473	0.473	1.00	0.326
C*E	1	3.658	3.658	3.658	7.70	0.009
D*E	1	8.776	8.776	8.776	18.48	0.000
A*B*C	1	0.620	0.620	0.620	1.31	0.262
A*B*D	1	0.263	0.263	0.263	0.55	0.462
A*C*D	1	1.410	1.410	1.410	2.97	0.094
A*B*E	1	0.660	0.660	0.660	1.39	0.247
A*C*E	1	0.701	0.701	0.701	1.48	0.233
A*D*E	1	0.375	0.375	0.375	0.79	0.381
B*C*D	1	0.013	0.013	0.013	0.03	0.871
B*C*E	1	0.004	0.004	0.004	0.01	0.928
B*D*E	1	0.001	0.001	0.001	0.00	0.957
C*D*E	1	0.833	0.833	0.833	1.75	0.195
A*B*C*D	1	0.345	0.345	0.345	0.73	0.400
A*B*C*E	1	0.013	0.013	0.013	0.03	0.871
A*B*D*E	1	0.473	0.473	0.473	1.00	0.326
A*C*D*E	1	0.581	0.581	0.581	1.22	0.277
B*C*D*E	1	0.008	0.008	0.008	0.02	0.900
A*B*C*D*E	1	0.289	0.289	0.289	0.61	0.441
Error	32	15.195	15.195	0.475		
Total	63	2420.320				

S = 0.689089    R-Sq = 99.37%    R-Sq(adj) = 98.76%

## ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองสำหรับเวลาที่คงอยู่

## General Linear Model: Keeping Time versus C, D, E

Factor	Type	Levels	Values
C	fixed	3	220, 240, 260
D	fixed	3	240, 265, 290
E	fixed	3	0.6, 0.8, 1.0

## Analysis of Variance for Keeping Time, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
C	2	1998.78	1998.78	999.39	642.46	0.000
D	2	2805.44	2805.44	1402.72	901.75	0.000
E	2	6776.78	6776.78	3388.39	2178.25	0.000
C*D	4	26.44	26.44	6.61	4.25	0.009
C*E	4	62.44	62.44	15.61	10.04	0.000
D*E	4	27.78	27.78	6.94	4.46	0.007
C*D*E	8	38.33	38.33	4.79	3.08	0.013
Error	27	42.00	42.00	1.56		
Total	53	11778.00				

S = 1.24722    R-Sq = 99.64%    R-Sq(adj) = 99.30%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	39.3333	0.1697	231.75	0.000
C				
220	-7.9444	0.2400	-33.10	0.000
240	1.1111	0.2400	4.63	0.000
D				
240	-9.1667	0.2400	-38.19	0.000
265	0.7222	0.2400	3.01	0.006
E				
0.6	14.5000	0.2400	60.41	0.000
0.8	-1.7222	0.2400	-7.18	0.000
C*D				
220 240	-1.3889	0.3395	-4.09	0.000
220 265	0.7222	0.3395	2.13	0.043
240 240	0.7222	0.3395	2.13	0.043
240 265	-0.5000	0.3395	-1.47	0.152
C*E				
220 0.6	-1.5556	0.3395	-4.58	0.000
220 0.8	0.6667	0.3395	1.96	0.060
240 0.6	-0.4444	0.3395	-1.31	0.201
240 0.8	0.6111	0.3395	1.80	0.083
D*E				
240 0.6	-1.3333	0.3395	-3.93	0.001
240 0.8	1.0556	0.3395	3.11	0.004
265 0.6	0.4444	0.3395	1.31	0.201
265 0.8	-0.5000	0.3395	-1.47	0.152
C*D*E				
220 240 0.6	-0.9444	0.4801	-1.97	0.059
220 240 0.8	0.6667	0.4801	1.39	0.176
220 265 0.6	0.2778	0.4801	0.58	0.568
220 265 0.8	0.7222	0.4801	1.50	0.144
240 240 0.6	-0.2222	0.4801	-0.46	0.647
240 240 0.8	1.0556	0.4801	2.20	0.037
240 265 0.6	-0.1667	0.4801	-0.35	0.731
240 265 0.8	-0.5556	0.4801	-1.16	0.257

## ภาคผนวก จ

ผลการการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองสำหรับอุณหภูมิสูงสุด

## General Linear Model: Max Temp versus C, D, E

Factor	Type	Levels	Values
C	fixed	3	220, 240, 260
D	fixed	3	240, 265, 290
E	fixed	3	0.6, 0.8, 1.0

## Analysis of Variance for Max Temp, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
C	2	1545.89	1545.89	772.94	403.43	0.000
D	2	20124.52	20124.52	10062.26	5251.90	0.000
E	2	2142.51	2142.51	1071.26	559.13	0.000
C*D	4	321.76	321.76	80.44	41.98	0.000
C*E	4	36.87	36.87	9.22	4.81	0.005
D*E	4	90.35	90.35	22.59	11.79	0.000
C*D*E	8	55.65	55.65	6.96	3.63	0.005
Error	27	51.73	51.73	1.92		
Total	53	24369.27				

S = 1.38417 R-Sq = 99.79% R-Sq(adj) = 99.58%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	270.078	0.188	1433.83	0.000
C				
220	-5.9611	0.2664	-22.38	0.000
240	-1.0556	0.2664	-3.96	0.000
D				
240	-24.0333	0.2664	-90.22	0.000
265	0.8000	0.2664	3.00	0.006
E				
0.6	7.7722	0.2664	29.18	0.000
0.8	-0.1167	0.2664	-0.44	0.665
C*D				
220 240	-2.6500	0.3767	-7.03	0.000
220 265	1.7833	0.3767	4.73	0.000
240 240	-2.1889	0.3767	-5.81	0.000
240 265	1.0611	0.3767	2.82	0.009
C*E				
220 0.6	0.9111	0.3767	2.42	0.023
220 0.8	0.5833	0.3767	1.55	0.133
240 0.6	-0.7944	0.3767	-2.11	0.044
240 0.8	-0.5389	0.3767	-1.43	0.164
D*E				
240 0.6	2.1667	0.3767	5.75	0.000
240 0.8	-0.6611	0.3767	-1.75	0.091
265 0.6	-1.9000	0.3767	-5.04	0.000
265 0.8	0.0389	0.3767	0.10	0.919
C*D*E				
220 240 0.6	-1.2333	0.5328	-2.31	0.028
220 240 0.8	0.3111	0.5328	0.58	0.564
220 265 0.6	-0.4333	0.5328	-0.81	0.423
220 265 0.8	0.8944	0.5328	1.68	0.105
240 240 0.6	-0.1944	0.5328	-0.36	0.718
240 240 0.8	1.6167	0.5328	3.03	0.005
240 265 0.6	0.5389	0.5328	1.01	0.321
240 265 0.8	-0.8667	0.5328	-1.63	0.115



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิรุทธิ์ สิมเสมอ เกิดเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดนราธิวาส สำเร็จ  
 การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท  
 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547  
 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งผู้จัดการแผนกวิศวกรรมการผลิต โรงงานผลิตตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย