

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมคิบุค-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์
ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง



นาย สุรพล สุรบวรเจ็ดพร


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬากรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-925-6

ลิขสิทธิ์ของ จุฬากรณ์มหาวิทยาลัย

SUITABLE CONDITION IN AN AUTO-SOLDERING MACHINE
FOR A PRINTED WIRING BOARD BY EXPERIMENTAL DESIGN



Mr. Surapol Surabunjerdporn

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

Faculty of Engineerings

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-925-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อนูก-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์
ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

โดย

นาย สุรพล สุบรรณเจตพร

ภาควิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ

ที่ปรึกษาร่วม

นาย สุชาติ ชิวสาธน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรูญ มหิชาฟองกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... ที่ปรึกษาร่วม
(นาย สุชาติ ชิวสาธน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุตินา)

..... กรรมการ
(ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช)

สรุปผล สรุปบรรณเจดพร : การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง (SUITABLE CONDITION IN AN AUTO-SOLDERING MACHINE FOR A PRINTED WIRING BOARD BY EXPERIMENTAL DESIGN) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, ที่ปรึกษาร่วม : นาย สุชาติ ชิวสาธน์, 122 หน้า. ISBN 974-333-925-6.

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม พร้อมพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือ ความเร็วของสายพาน อุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน ค่าความตึงจำเพาะของฟลักซ์ และลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ โดยมุ่งเน้นผลทางด้านคุณภาพที่สอดคล้องในเรื่องจำนวนการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม โดยมุ่งเน้นตรวจสอบลักษณะจุดบกพร่องของรอยเชื่อมประเภท Excessive Solder, Insufficient Solder และ Bridging (or Shorting) เท่านั้น

ผลการวิจัยพบว่า ณ. ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจำนวนจุดบกพร่องคือ ลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ และความเร็วของสายพาน ส่วนปัจจัยทางด้านอุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน และค่าความตึงจำเพาะของฟลักซ์มีอิทธิพลค่อนข้างน้อยต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ในการทดลองค่าของตัวแปรที่ทำให้เกิดผลทางคุณภาพที่ดี คือ การปรับลักษณะการไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ให้มีการเคลื่อนที่ทั้งสองด้าน และความเร็วของสายพานเท่ากับ 108 เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งจะสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องลงได้

ภาควิชา ...วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่อนิสิต ...สรุปผล...สรุปบรรณเจดพร...
สาขาวิชา ...วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา ...2542..... ลายมือชื่อที่ปรึกษาร่วม

4170601921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: EXPERIMENTAL DESIGN / SOLDERING / PCB

SURAPOL SURABUNJERDPORN : SUITABLE CONDITION IN AN AUTO-SOLDERING MACHINE FOR A PRINTED WIRING BOARD BY EXPERIMENTAL DESIGN. THESIS ADVISOR : PROF. SIRICHAN THONGPRASERT, Ph.D. THESIS COADVISON : SUCHART SHEVASATH, 122 pp. ISBN 974-333-925-6.

The objectives of this research was to study factors that had effects on soldering process in an auto-soldering machine on printed wiring board, to determine the suitable condition by experimental design in order to reduce defective joints and improve the efficiency of soldering.


The principle of experimental design was applied to study four factors that were conveyor speed, preheat temperature, specific gravity of flux and solder flow type. The results concentrated on quantity of defective joints that occurred on printed circuit board during soldering process. Three types of defects that could be included in this experiment were excessive solder, insufficient solder and bridging (or shorting).

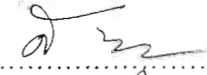
At the significant level of 0.05, the factors which influence the rate of defective joints were solder flow type and conveyor speed. The preheat temperature and specific gravity of flux had less effect comparing with the solder flow type and conveyor speed. Referring to the result of the experiment, the suitable condition was soldering flow type "Both flow" with the conveyor speed 108 centimeters per minute.

ภาควิชา ...วิศวกรรมอุตสาหการ...

สาขาวิชา ...วิศวกรรมอุตสาหการ...

ปีการศึกษา ...2542.....

ลายมือชื่อนิสิต ........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ........

ลายมือชื่อที่ปรึกษาร่วม ........



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ จุฑมณี มหิตาพองกุล ประธานกรรมการ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา และ ดร.จิตรภา รุ้กิจการพานิช ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า ช่วยเหลือให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางการทำงานวิจัย แนวทางแก้ไขปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆที่จะนำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณวิชัย ลัคนาทิน และคุณสุชาติ ชิวสารณ์ อดีตผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายการผลิต และผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายการผลิตคนใหม่ของทางโรงงานตัวอย่างที่ได้ให้การสนับสนุน และคำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ตลอดจน พี่ๆหัวหน้างานทั้งหมด และพนักงานในฝ่ายผลิตทุกคนที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือ ช่วยเหลือให้การทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งให้การอบรมสั่งสอนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลา จนสำเร็จการศึกษา

สุรพล สุรบวรเจตพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 3 การวิเคราะห์สภาพปัญหาเบื้องต้น.....	39
บทที่ 4 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.....	49
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	58
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	122

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขอบเขตการใช้งานของโลหะผสมโซลเดอร์	10
2.2 แสดงจุดเปลี่ยนสถานะของโลหะผสมโซลเดอร์ ณ. ส่วนผสมต่างๆของโลหะ ตามมาตรฐาน Federal Specification QQ-Q-571 and ASTM B-32	11
2.3 แสดงระดับการเจือปนสูงสุดของสารปนเปื้อนที่มักพบโดยทั่วไปในบ่อตะกั่วบัดกรี	12
2.4 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟลักซ์บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ ในด้านคุณสมบัติ และค่าใช้จ่าย	18
2.5 แสดงการเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบความร้อน	20
3.1 แสดงจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมจากการผลิต Model A001 โดยการสุ่มเก็บในช่วงเดือน กันยายน – พฤศจิกายน พ.ศ. 2542	40
3.2 แสดงการแบ่งแยกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในการผลิต Model A001	47
5.1 แสดงผลการทดสอบความเร็วของสายพาน	58
5.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบความเร็วของสายพาน	59
5.3 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน	61
5.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบอุณหภูมิ ในส่วนการอบความร้อน	62
5.5 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์	64
5.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบ ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์	65
5.7 แสดงผลการทดลองการแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพาน กับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ท่อตัวแปรตอบสนอง	69
5.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบการแปรเปลี่ยน ความเร็วของสายพานกับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ท่อตัวแปรตอบสนอง	69
5.9 แสดงผลการทดสอบโมเดล และค่าความคลาดเคลื่อน ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง	73
5.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง	74

ตารางที่

5.11 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง	74
5.12 แสดงผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีกรไหลทั้งสองด้าน	77
5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีกรไหลทั้งสองด้าน	78
5.14 แสดงผลการทดสอบโมเดลกำลัง 2 และค่าความคลาดเคลื่อน	81
5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย	81
5.16 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย	82
5.17 แสดงผลการทดสอบโมเดลกำลัง 3 และค่าความคลาดเคลื่อน	84
5.18 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย	84
5.19 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย	85
5.20 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะการผลิต	88
5.21 แสดงผลการประเมินสภาวะการผลิตในปัจจุบันกับสภาวะที่เหมาะสม	89



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของ Pb-Sn	7
2.2 แสดงการพัฒนาของกระบวนการเชื่อมจาก Solder Dip ไปสู่ Solder Wave	16
2.3 แสดงขั้นตอนการทำงานในเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ	16
2.4 แสดงการทำงานของเครื่องทำฟองฟลักซ์	17
2.5 แสดงการทำงานของส่วนอบความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน	20
2.6 แสดงแผนผังโครงสร้างการเชื่อมโดยใช้คลื่นโลหะผสมไซลเดอร์	22
2.7 แสดงการใช้ Nozzle 2 ตัวในการสร้างคลื่นโลหะผสมไซลเดอร์ 2 ชนิด	22
2.8 แสดงลักษณะของการเกิด shading จากคลื่นโลหะผสมไซลเดอร์	23
2.9 แสดงขั้นตอนในกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วโดยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ	23
2.10 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพ	24
2.11 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Dewetting	28
2.12 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Nonwetting	28
2.13 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Excessive	29
2.14 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Webbing & Bridging	29
2.15 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Icicling	30
2.16 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Blowhole	30
2.17 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Cold or Fracture	30
2.18 แสดงปัจจัย และพารามิเตอร์ของกระบวนการ	31
2.19 แสดงอิทธิพลที่มีผล และอิทธิพลที่ไม่มีผลของปัจจัยต่อผลผลิตภัณฑ์	32
2.20 แสดงผลของอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่เกิดขึ้นต่อผลการทดสอบ	38
3.1 แสดงกราฟสัดส่วนของจุดบกพร่องจากการผลิต Model A001	
ในช่วงเดือน กันยายน - พฤศจิกายน 2542	41
3.2 แสดงมุมสัมผัสของโลหะผสมไซลเดอร์ที่ได้คุณภาพ	42
3.3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ได้คุณภาพ	43
4.1 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Excessive Solder	54 - 55

รูปที่

4.2 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Insufficiency Solder	56 - 57
4.3 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Bridging or Shorting Solder	57
5.1 แสดงกราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน	59
5.2 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ ผลการทดสอบความเร็วของสายพาน	60
5.2 แสดงกราฟตัวแปรตอบสนองของ ผลการทดสอบอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อน	62
5.4 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ ผลการทดสอบอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อน	63
5.5 แสดงกราฟตัวแปรตอบสนองของ ผลการทดสอบระดับความถี่เฉพาะของฟลักซ์	65
5.6 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ ผลการทดสอบระดับความถี่เฉพาะของฟลักซ์	66
5.7 แสดงลักษณะการปรับคลื่นแบบ Lambda waves	68
5.8 แสดงกราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน และ ลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมซิลิคอน	70
5.9 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบความเร็วของสายพาน และลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมซิลิคอน	71
5.10 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน จากการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง	75
5.11 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ สมการถดถอยเชิงเส้นตรง กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง	76
5.12 แสดงกราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมซิลิคอนมีการไหลทั้งสองด้าน	78
5.13 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ของผลการทดสอบความเร็วของสายพานที่ได้ทำการปรับ ให้คลื่นโลหะผสมซิลิคอนมีการไหลทั้งสองด้าน	79

รูปที่

5.14 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง	82
5.15 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน จากการทดสอบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง	83
5.16 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสาม กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง	85
5.17 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน จากการทดสอบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสาม	86
5.18 กราฟแสดงสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสองและกำลังสาม ระหว่างจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง กับความเร็วของสายพานที่ได้ ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมซิลิคอนมีการไหลทั้งสองด้าน	87
5.19 กราฟแสดงจุดต่ำสุดของสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง	87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	ระดับนัยสำคัญ หรือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 1
β	ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 2
μ	ค่าเฉลี่ยของประชากร
σ^2	ค่าความแปรปรวนของประชากร
ε	ความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อน
ν	ขั้นของความอิสระ (Degree of freedom)
χ^2	ตัวสถิติไคสแควร์
ANOVA	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
$^{\circ}\text{F}$	องศาฟาเรนไฮต์
df.	ขั้นของความอิสระ
F	ตัวสถิติเอฟ (Fisher)
cm:min	เซนติเมตรต่อนาที
MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square)
NID (Normal Independent)	รูปแบบของการกระจายแบบแจกแจงปกติที่เป็นอิสระ
NOPP	แผนภูมิตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ
SS	ผลรวมกำลังสอง (Sum Square)
PCB	แผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board)
ITRI	International Tin Research Institute

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น รอยเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว แต่ละจุดบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นชิ้นงาน หรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น โทรทัศน์ วิทยุ โทรศัพท์มือถือ เต้าไมโครเวฟ และอื่นๆ ต่างก็ประกอบไปด้วยรอยเชื่อมเหล่านี้อยู่ประมาณ 5,000 – 10,000 จุด ดังนั้นขั้นตอนการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว (Soldering Process) ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) เป็นอย่างมากเพราะคุณภาพของรอยเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว ณ ตำแหน่งของขาอุปกรณ์ในแต่ละจุดบนแผ่นลายวงจรพิมพ์จะเป็นตัวกำหนดถึงลักษณะคุณภาพ (Quality Characteristic) และความเชื่อมั่นของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ที่จะนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าอีกทอดหนึ่งและจากการพิจารณาทางด้านคุณภาพ คุณภาพของรอยเชื่อมจะประกอบไปด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ของปัจจัย (Factor) ต่างๆในกระบวนการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว

ในปัจจุบันนี้กระบวนการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วด้วย เครื่องเชื่อมอัตโนมัติ (Automatic Soldering Machine) ถือเป็นวิธีที่แพร่หลาย และประหยัดที่สุดในการยึดระหว่างชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ให้ติดกับแผ่นลายวงจรพิมพ์ แต่การควบคุมที่ไม่เหมาะสมก็จะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ซึ่งไม่ได้มาจากความผิดปกติของเครื่องหรือจำนวนรอยเชื่อมที่ไม่ได้มาตรฐานเพิ่มมากขึ้น แต่มักเกิดขึ้นจากค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม, การตรวจสอบรอยเชื่อมที่บกพร่อง และการขาดความเชื่อมั่นในตัวผลิตภัณฑ์ โดยปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมเหล่านี้ยังมีความแปรปรวนในการกำหนดการใช้งานจากเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วทางผู้ผลิตมักจะพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมเท่านั้น เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมโตบส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของดีบุก-ตะกั่ว (Solder) ที่ทางผู้จำหน่าย (Vendor) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ ของตนแล้ว

โดยอัตราส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วในโลหะผสมโซลเดอร์ และการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่แตกต่างกัน ก็จะทำให้คุณสมบัติ และคุณภาพของการเชื่อมที่ต่างกัน พร้อมทั้งการกำหนดสภาวะการผลิตก็ไม่เหมือนกันด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปัจจัยในการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วอย่างจริงจัง

เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตที่มีความเชื่อถือได้จากการศึกษากระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบน แผ่นลายวงจรพิมพ์ ทำให้สามารถคาดการณ์ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมได้ดังนี้

- ความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ หรือสารประสานการเชื่อม (Flux Specific gravity)
- อุณหภูมิของแผ่นลายวงจรพิมพ์ในช่วงก่อนการเชื่อม (Preheat Temperature)
- อุณหภูมิของบ่อโลหะผสมโซลเดอร์ (Solder-Pot Temperature)
- ความเร็วของสายพาน (Conveyor Speed)
- ชนิดของฟลักซ์ หรือสารประสานการเชื่อม (Flux Type)
- ระดับความสูงของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Solder wave depth)
- ความเอียงของสายพาน (Conveyor Angle)
- ชนิดของโลหะผสมโซลเดอร์ (Solder Type)

ซึ่งคุณภาพของรอยเชื่อมที่ดีนั้นจะต้องไม่มีลักษณะดังต่อไปนี้

- Nonwetting and Dewetting (or Insufficient solder)
- Excess Solder
- Bridging
- Icicle Formation
- Blowholes
- Cold on Fractured
- Dull or Grainy Solder Joints

และในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่มีการผลิตแบบสายการประกอบ (Assembly Line) สายการประกอบหนึ่งๆ จะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ต้นจนสิ้นสุดกระบวนการได้ภายในสายการผลิตนั่นเอง ซึ่งถ้าเกิดรอยเชื่อมที่มีลักษณะข้างต้นขึ้น จะส่งผลให้ต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการแก้ไขชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง (Touch-up) ดังกล่าว ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตลดลง นอกจากจะต้องเพิ่มจำนวนพนักงานในสายการผลิตเพื่อทำการแก้ไข ยังจะต้องลงทุนจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ไขมาเพิ่มเติมอีกด้วยเช่น ตะกั่วบัดกรีชนิดบัดกรีด้วยมือ (Wire Solder), หัวแร้งหรือเหล็กบัดกรี (Soldering Iron) ซึ่งการบัดกรีด้วยมือนี้ นอกจากจะต้องอาศัยทักษะฝีมือ และความชำนาญของพนักงานที่ต้องได้รับการอบรมอย่างดีแล้ว จะต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ดี และขั้นตอนการปฏิบัติที่ได้มาตรฐานอีกด้วย และถือว่าเป็นวิธีที่มีความเสี่ยงสูงในการที่จะทำให้เกิด ข้อบกพร่องมากกว่าการบัดกรีด้วยเครื่องอัตโนมัติ พร้อมทั้งอาจส่งผลให้อัตราการผลิตลดลงเนื่องจากการเกิดสายการผลิตติดขัด (Bottle neck) เนื่องจากความไม่แน่นอนของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น และระยะเวลาแก้ไขของพนักงานในแต่ละแผ่นลายวงจรพิมพ์นั่นเอง

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุง และแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพที่เกิดขึ้น เพื่อพัฒนาคุณภาพของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ และเสริมสร้างความเชื่อมั่นให้กับผลิตภัณฑ์ ทางผู้ศึกษาจึงได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) และการวิเคราะห์ (Analytical Studies) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเชื่อม พัฒนากระบวนการเชื่อม ตีบุก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม พร้อมปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมให้เหมาะสมต่อการผลิต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ มีการจำกัดขอบเขตการศึกษาวิจัยไว้ดังนี้

1. ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติในกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญต่อคุณภาพในการเชื่อมทั้ง 3 ปัจจัยดังนี้

- ความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ หรือสารประสานการเชื่อม (Flux specific gravity)
- อุณหภูมิของแผ่นลายวงจรพิมพ์ในช่วงก่อนการเชื่อม (Preheat Temperature)
- ความเร็วของสายพาน (Conveyor Speed)

2. ศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ พร้อมทั้งทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์ Power Supply Unit (ModelA001) โดยเลือกจากแบบที่มีความต้องการการผลิตจำนวนมาก และยังผลิตต่อไปอีกนาน ซึ่งจะสามารถศึกษา รวบรวม และทดลอง วัดผลข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง

3. จำกัดลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมเป็นตัววัดผล โดยอ้างอิงจากมาตรฐานลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพของทางบริษัท เป็นคุณสมบัติที่จะทำการศึกษาอันได้แก่

- Excessive solder
- Insufficient solder
- Bridging (or Shorting)

4. ตัววัดผลคุณภาพของรอยเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง คือจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม (Quantity of Defective joints)

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัยดำเนินงาน

1. สํารวจงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษากระบวนการเชื่อมตํิบุก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติในปัจจุบัน
3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมตํิบุก-ตะกั่ว และพิจารณาเลือกตัวแปรที่จะทำการศึกษา ผลิตภัณฑ์ Power Supply Unit (ModelA001) ในกระบวนการผลิต
4. ศึกษาการออกแบบการทดลอง
5. วางแผนการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม
6. ดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลอง โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพ
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติวิศวกรรม
8. สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ
9. ประเมินผลการทดลองจากกระบวนการผลิต
10. จัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลจากการศึกษาจะทำให้ทราบถึงปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเชื่อมตํิบุก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ พร้อมทั้งทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน
2. ผลจากการศึกษาสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นแนวทางในการตั้งค่าที่เหมาะสมให้กับแบบลายวงจรพิมพ์อื่นๆในการเชื่อมตํิบุก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ
3. ปรับปรุงกระบวนการเชื่อมตํิบุก-ตะกั่วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทศพล เกียรติเจริญผล, 2538

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลือบแลคเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก และ เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง โดยทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพของผิวชิ้นงาน เคลือบแลคเกอร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติจริงให้มากที่สุด พร้อมทั้งพัฒนาให้เกิดมาตรฐานอ้างอิงในการทำงาน

สมควร อติเรกลาภโรดม, 2538

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการนำระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในการแก้ปัญหาของกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมในแนวตั้งของแผ่นลายวงจรมพิมพ์ โดยรวบรวมความรู้เทคนิค และประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติมาจัดให้อยู่ในรูปแบบความรู้ในรูปของกฎ โดยแยกกลุ่มของเสียที่เกิดขึ้นตาม สมมติฐานต่าง ๆ ซึ่งจะเป็แนวทางและพื้นฐานในการพัฒนาความรู้ความชำนาญให้กับผู้ปฏิบัติงานต่อไปได้

ทิพรชัช ปราการพิลาศ, 2541

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการวิเคราะห์ความสามารถในการผลิต โดยมุ่งที่จะลดจุดบกพร่องในการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นลายวงจรมพิมพ์ ภายใต้หลักการจัดการ 3M ได้แก่ คน (Man), วิธีการ (Method) และ เครื่องจักร (Machine) โดยพบว่า ปัญหาส่วนใหญ่มักเกิดจากการออกแบบที่ไม่เหมาะสมกับความสามารถในการผลิต ซึ่งได้ทำการกำหนดแนวทางในการปรับปรุงโดยทำการเปลี่ยนแปลงด้านการออกแบบ และการเปลี่ยนวิธีการทำงาน ซึ่งทำให้สามารถลดเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องลงได้อย่างมาก

KUYUMORI SHIBATA, HITISHI KUME, 1988

บทความนี้ กล่าวถึงการลดเปอร์เซ็นต์ข้อบกพร่องในขั้นตอนการบัดกรีอัตโนมัติ และการลดเปอร์เซ็นต์ข้อบกพร่องการบัดกรีอัตโนมัติในผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยการตั้งทีมงานโครงการซึ่งประกอบด้วย ฝ่ายการผลิต ฝ่ายวิศวกรรม โดยใช้วิธีการตรวจสอบข้อบกพร่องหลังขั้นตอนการผลิตทุกขั้นตอน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิพาราดอต และหาวิธีการแก้ไขปัญหที่รุนแรง พร้อมทั้งติดตามผลของการแก้ไข

C. J. THWAITES, 1972

บทความนี้ กล่าวถึงวิธีในการประกันคุณภาพของกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ โดยจะเริ่มจากการกำหนดจุดที่ยอมรับในรูปเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่อง ที่ได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งผู้ตรวจสอบจะต้องเป็นผู้ที่มีความรู้จัก และคุ้นเคยกับลักษณะของจุดบกพร่องต่าง ๆ นอกจากนั้นจะต้องรู้ถึงสาเหตุและแยกแยะจุดบกพร่องต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี โดยวิธีในการแก้ไขที่ถูกต้องจะรวมไปถึงขั้นตอนในการผลิต และการออกแบบ ซึ่งผู้ผลิตและผู้ออกแบบ จะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่าง ๆ ที่จำเป็นในการผลิตเพื่อก่อให้เกิดความมั่นใจในจตุรอยเชื่อมได้เป็นอย่างดี

MANKO, HOWARD H., 1995

บทความนี้ กล่าวถึงการทำการศึกษาค้นคว้าที่เกิดขึ้นของโลหะผสมโซลเดอร์ จากสายการผลิตจริงในโรงงานต่าง ๆ ทั้งจากโรงงานผลิตแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board Manufacturing) และจากโรงงานการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board Assembly) และได้วิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งได้รวบรวมแนวทางการแก้ไขที่ค้นพบ แล้วจึงเขียนออกมาเป็นคำแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เคยเกิดขึ้น เพื่อช่วยเป็นแนวทางให้ผู้ปฏิบัติสะดวกแก่การแก้ไขปัญหา ลักษณะของของเสียที่ผู้เขียนรวบรวมไว้ ได้จัดแบ่งตามชนิดของของเสียได้ 17 ชนิด ซึ่งจะประกอบด้วยสาเหตุ และแนวทางการแก้ไขปัญหาของกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมโซลเดอร์ทั้งสิ้น 43 หัวข้อ โดยแต่ละหัวข้อจะอธิบายถึงสาเหตุต่าง ๆ นั้นทำให้เกิดของเสียได้อย่างไร แนวทางการแก้ไขปัญหาตามสาเหตุที่เกิดขึ้น รวมถึงความเหมาะสมของการใช้งานจริงของหัวข้อนั้น ๆ ว่าควรจะควบคุม หรือ ปรับแต่งให้อยู่ในสภาพไหนถึงจะเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนไม่ได้ระบุชี้ชัดลงไปว่า ค่าที่เหมาะสม หรือ ค่าที่ควรใช้ควบคุมควรเป็นเท่าไร หรือควรปรับแต่งอย่างไร โดยยังคงเปิดให้เป็นหน้าที่ของผู้ปฏิบัติงาน เป็นผู้ค้นหาค่าที่เหมาะสมอยู่เช่นเดิม เพียงแต่กล่าวถึงแนวทางในลักษณะกว้าง ๆ ว่า ควรจะพิจารณาแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างไรเท่านั้น หรือให้คำแนะนำในลักษณะที่ว่า ควรจะพิจารณาตัวแปรหรือพารามิเตอร์ใดก่อนหลัง ซึ่งการรวบรวมนี้จะครอบคลุมไปถึงกระบวนการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นลายวงจรพิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

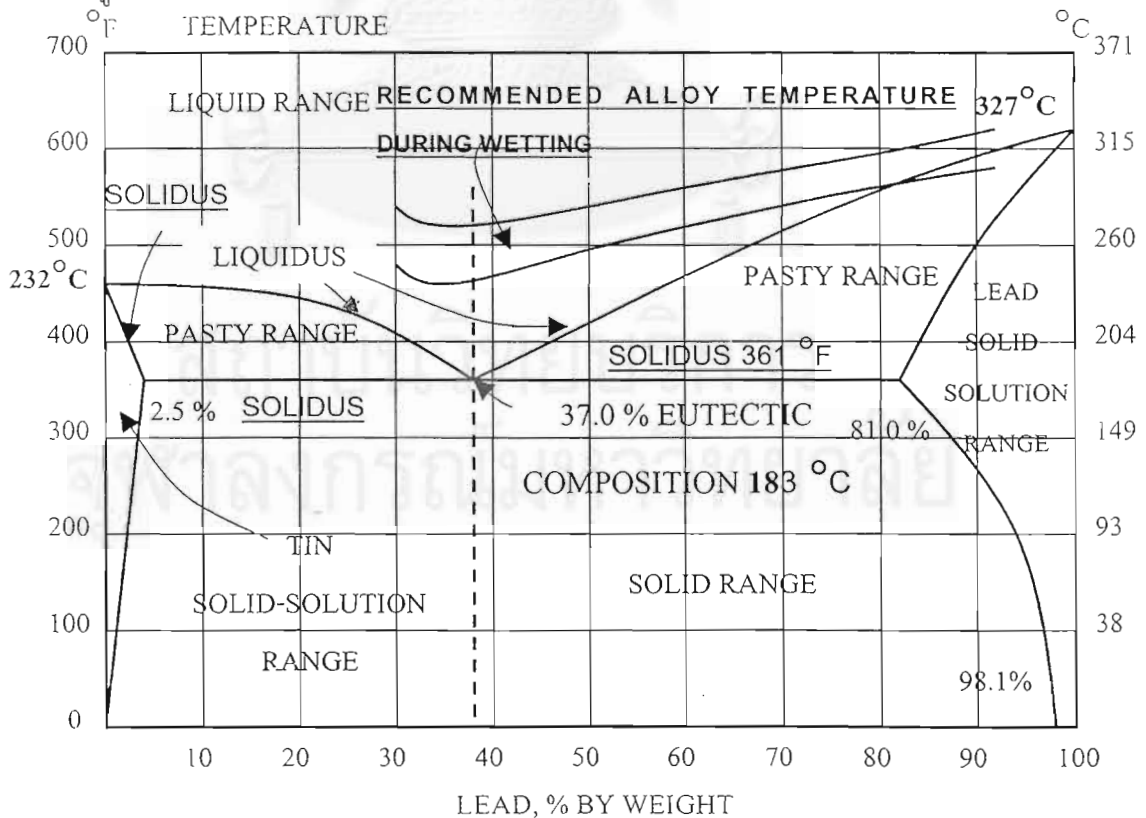
บทที่ 2

หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโลหะผสมโซลเดอ์

2.1.1 ทฤษฎีของโลหะผสมโซลเดอ์

โลหะผสมโซลเดอ์เป็นโลหะผสมที่มีองค์ประกอบระหว่างดีบุกและตะกั่ว ในอัตราส่วนต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งโลหะผสมโซลเดอ์นี้ เมื่อผสมกันแล้ว จะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่นำมาผสม ทำให้มีคุณสมบัติในการเปียก (Wetting) ไปตามพื้นผิวที่เชื่อมต่อกันได้ง่ายและรวดเร็ว ถ้าพิจารณาเฉพาะโลหะผสมโซลเดอ์ที่มีโลหะดีบุก และตะกั่ว 2 ชนิดผสมรวมกัน จะสามารถหาไดอะแกรมสมดุลเชิงโลหะการ (Metallurgical Equilibrium Diagram) ได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของ Pb-Sn

ซึ่งจากไดอะแกรมสมดุลเชิงโลหะการของดีบุก-ตะกั่ว (Tin-Lead) จะพบว่าจุดหลอมเหลวของ ตะกั่ว และดีบุกบริสุทธิ์ จะเท่ากับ 621.50°F และ 449.54°F ตามลำดับ แต่หลังจากผสมดีบุกกับตะกั่ว เข้าด้วยกันแล้ว จุดหลอมเหลวของโลหะผสมจะลดต่ำลง และเกิดจุดหลอมเหลวใหม่ โดยมีจุดหลอม เหลว และจุดเยือกแข็งเป็นจุดเดียวกัน และมีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือ 361.54°F ซึ่งเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) และที่จุดอุณหภูมิยูเทคติกนี้ องค์ประกอบของโลหะผสม โซลเดอร์ จะมีส่วนประกอบเท่ากับ 63% ของดีบุก และ 37% ของตะกั่ว ซึ่งเรียกองค์ประกอบ ณ จุดนี้ว่า องค์ประกอบ ยูเทคติก (Eutectic Composition) หรือจุดยูเทคติก (Eutectic Point)

นอกจากโลหะผสมโซลเดอร์จะประกอบด้วยดีบุกและตะกั่ว ยังอาจมีการผสมโลหะชนิดอื่นเช่น พลวง (Antimony), เงิน (Silver), แคดเมียม (Cadmium), อินเดียม (Indium) และบิสมัท (Bismuth) ฯลฯ ลงไปด้วย เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) และเชิงกล (Mechanical Properties) ของช่วงการหลอมเหลว และความแข็งแรงต่อการดึง (Tensile Strength) และความแข็งแรง ต่อการเฉือน (Shear Strength) ความแข็งแรงและการต่อต้านการสึกกร่อนได้อีกด้วย

2.1.2 การใช้งานทั่วไปของโลหะผสมโซลเดอร์ (วิกิรอม, 2530)

การเลือกใช้โลหะผสมโซลเดอร์นั้น จะดูที่ส่วนประกอบทางเคมีเป็นหลัก ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ปริมาณดีบุก และช่วงการแข็งตัว โดยที่ปริมาณดีบุกจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการเปียก (Wetting) ของโลหะผสมโซลเดอร์ เพราะดีบุกเป็นโลหะ ที่สามารถเปียกพื้นผิวโลหะชนิดต่างๆได้ดี ดังนั้นการเลือกใช้โลหะผสมโซลเดอร์ชนิดใด ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะพื้น และชนิดของฟลักซ์ หรือสาร ประสานการเชื่อม(สารประสานการเชื่อม)ด้วย ถ้าโลหะพื้นที่จะเชื่อมต่อเป็นโลหะที่ถูกเปียกได้ง่าย หรือ ใช้ฟลักซ์ หรือสารประสานการเชื่อมที่มีปฏิกิริยารุนแรง ก็อาจใช้โลหะผสมโซลเดอร์ที่มีปริมาณดีบุกต่ำ ได้เช่น การเชื่อมต่อกระป๋องอาหารที่ทำด้วยแผ่นเหล็กชุบดีบุก ก็อาจใช้โลหะผสมโซลเดอร์เกรด 40% ดีบุก 60%ตะกั่ว หรือการเชื่อมต่อพวกหม้อน้ำรถยนต์ ซึ่งเป็นทองแดงและทองเหลือง แต่ใช้ฟลักซ์ หรือ สารประสานการเชื่อมที่มีความรุนแรงเป็นส่วนผสมของ HCl กับ ZnCl_2 ก็จะใช้โลหะผสมโซลเดอร์เกรด 35%ดีบุก และ 65%ตะกั่ว เป็นต้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

สำหรับช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว ก็มีความสำคัญเช่นกัน จากแผนภูมิสมดุล จะเห็นว่าบริเวณใกล้ จุดยูเทคติก จะมีช่วงการแข็งตัวที่แคบมาก แต่เมื่อส่วนผสมอยู่ห่าง จากจุดยูเทคติกออกมา โดยเฉพาะ ทางด้านที่เป็นตะกั่ว ช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวจะกว้างขึ้น โดยมีส่วนกว้างที่สุดที่ 19%ดีบุก มีช่วง อุณหภูมิการแข็งตัวประมาณ 95°C งานบางประเภทต้องการช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวที่แคบ เพื่อให้เกิด การละลาย และการแข็งตัวที่รวดเร็ว เพื่อมิให้ความร้อนไปทำลายชิ้นงานให้เกิดความเสียหาย เช่นงาน ทางอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้ส่วนผสมใกล้จุดยูเทคติก คือ 60%ดีบุก และ 40%ตะกั่ว หรือ 63%ดีบุก และ

37%ตะกั่ว เป็นต้น แต่งานบางประเภทอาจต้องการให้มีช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวที่กว้าง เพราะระหว่างการแข็งตัว โลหะผสมโซลเดอร์จะมีสภาพเหมือนครีม (Paste) ที่สามารถบดแต่งได้ เช่น การบดแต่งผิวของตัวถังรถยนต์ ก็จะใช้โลหะผสมโซลเดอร์ 30%ดีบุก และ 70%ตะกั่ว ซึ่งจะมีช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวกว้าง (ประมาณ 60 °C) ทำให้สามารถบดแต่งผิวของโลหะผสมโซลเดอร์ให้เรียบไปตามส่วนโค้งเว้าของตัวถังรถยนต์ได้ โดยโลหะผสมโซลเดอร์ชนิดนี้เรียกว่า “โลหะผสมโซลเดอร์สำหรับงานปาด (Wiping Solder)”

สิ่งที่แผนภูมิสมดุลไม่ได้แสดงไว้ก็คือ เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว หรือขณะหลอมละลาย เช่นที่จุดยูเทคติก ซึ่งจุดแข็งตัวหรือจุดหลอมละลาย จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ก็ไม่ได้หมายความว่า จะเกิดได้ทันทีทันใด เพราะเวลาที่ใช้เกี่ยวข้องกับ การดูดซึม หรือคายความร้อน ซึ่งเกี่ยวกับปริมาณด้วย ถ้ามีปริมาณมาก เวลาที่ใช้ก็จะนาน ดังนั้นรอยเชื่อมต่อที่ใหญ่ นอกจากจะไม่ประหยัดแล้ว การแข็งตัวก็จะเกิดขึ้นช้า หากมีความสัมพันธ์ในระหว่างการแข็งตัวก็อาจเกิดรอยแตกร้าวขึ้นได้ นอกจากนี้แล้ว ความร้อนที่สะสมอยู่ ก็อาจไปทำลายชิ้นงานก่อให้เกิดความเสียหายได้ มาตรฐานส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมโซลเดอร์ ที่ใช้กันทั่วไป ตามมาตรฐาน Federal Specification QQ-S-571 E ของสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ผู้ใช้โลหะผสมโซลเดอร์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ยอมรับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

การเชื่อมต่อด้วยการใช้โลหะผสมโซลเดอร์ ก็เพื่อต้องการให้โลหะผสมโซลเดอร์ทำหน้าที่บางหัวข้อ หรือทุกหัวข้อ ดังต่อไปนี้ (Thwaites, 1982)

1. เพื่อเป็นส่วนเชื่อมวงจรไฟฟ้าให้ครบวงจร
2. เพื่อเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันด้วยวิธีเชิงกล
3. เพื่อเป็นสะพานที่จะระบายความร้อน จากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปยังส่วนอื่นๆ ได้ง่าย
4. เพื่อให้จุดเชื่อมต่อ ยังคงมีความแข็งแรงมากพอ ที่จะทำงานได้ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ
5. เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการรั่วซึมของอากาศ และของเหลวในถังปฏิกิริยา (Reaction

Vessel)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Type	Composition	Tensile strength (Tonf/in ²)	General area of use
Common Solders	Tin-Lead	Lead, 60% Tin	3.4	Electronics
		Lead, 20 -50% Tin	2.7 - 2.9	General engineering
	Antimonial Tin-Lead	Lead, 30 - 50% Tin, 1% Antimony	3.1 - 3.6	Avoid high or very low temperature
Special Purpose Solders	Tin-Lead	Lead, 2% Tin	1.8	Tinplate can seams
		Lead, 10% Tin	2.4	
	Tin-Lead-Silver	Lead, 5% Tin, 1.5% Silver	2.5	Cryogenics
		Lead, 1% Tin, 1.5% Silver	1.8	
		Lead, 60% Tin, 1.5% Silver	4.5	
	Tin	Tin	0.9	Creep resistance
	Tin-Antimonial	Tin, 5% Antimony	2.8	
	Tin-Silver	Tin, 2% Silver	1.7	
		Tin, 5% Silver	3.8	
	Tin-Lead-Cadmium	Tin, 30% Lead, 18% Cadmium	2.8	Low melting point Solder

ตารางที่ 2.1 แสดงขอบเขตการใช้งานของโลหะผสมโซลเดอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Composition	Tin, %	Lead, %	Antimony, %	Bismuth, max, %	Silver, %	Copper, max, %	Iron, max, %	Zinc, max, %	Aluminum, max, %	Arsenic, max, %	Cadmium, max, %	Total of all others, max, %	Approximate melting range, °C	
													Solidus	Liquidus
Sn96	Remainder	0.10, max	—	—	3.6-4.4	0.2	—	0.005	—	0.05	0.005	—	221	221
Sn70	69.5-71.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.03	—	0.08	183	193
Sn63	62.5-63.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.03	—	0.08	183	183
Sn62	61.5-62.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	1.75-2.25	0.08	0.02	0.005	0.005	0.03	—	0.08	179	179
Sn60	59.5-61.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.03	—	0.08	183	191
Sn50	49.5-51.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.025	—	0.08	183	216
Sn40	39.5-41.5	Remainder	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	183	238
Sn35	34.5-36.5	Remainder	1.6-2.0	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	185	243
Sn30	29.5-31.5	Remainder	1.4-1.8	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	185	250
Sn20	19.5-21.5	Remainder	0.80-1.2	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	184	270
Sn10	9.0-11.0	Remainder	0.20, max	0.03	1.7-2.4	0.08	—	0.005	0.005	0.02	—	0.1	268	290
Sn5	4.5-5.5	Remainder	0.50, max	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	308	312
Sb5	94.0, min	0.20, max	4.0-6.0	—	—	0.08	0.08	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	235	240
Pb80	Remainder	78.5-80.5	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	183	277
Pb70	Remainder	68.5-70.5	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	183	254
Pb65	Remainder	63.5-65.5	0.20-0.50	0.25	—	0.08	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	183	246
Ag1.5	0.75-1.25	Remainder	0.40, max	0.25	1.3-1.7	0.3	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.08	309	309
Ag2.5	0.25, max	Remainder	0.40, max	0.25	2.3-2.7	0.3	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.03	304	304
Ag5.5	0.25, max	Remainder	0.40, max	0.25	5.0-6.0	0.3	0.02	0.005	0.005	0.02	—	0.03	304	380

ตารางที่ 2.2 แสดงจุดเปลี่ยนสถานะของโลหะผสมโซลเดอร์ ๓. ส่วนผสมต่างๆของโลหะตามมาตรฐาน Federal Specification QQ-Q-571 and ASTM B-32

Contaminant	QQ-S-571-E, % ¹	New solder, % ²	Contamination limits, % ³
Aluminium	0.05	0.003	0.006
Antimony	0.2-0.5	0.3	—
Arsenic	0.03	0.02	0.03
Bismuth	0.25	0.006	0.25
Cadmium	—	0.001	0.005
Copper ⁴	0.08	0.01	0.25
Gold ⁴	—	0.001	0.08
Iron	0.02	0.001	0.02
Silver	—	0.002	0.01
Zinc	0.005	0.001	0.005
Others	0.08	0.01	0.08

หมายเหตุ

- 1 คือขอบเขตที่ยอมรับได้ของโลหะที่ปนเปื้อนในบ่อตะกั่วบัดกรีโดย Federal specification QQ-S-571-E
 - 2 คือปริมาณโลหะปนเปื้อนที่มักพบโดยทั่วไปในโลหะผสมโซลเดอร์บริสุทธิ์ที่ได้รับจากผู้ผลิต
 - 3 คือปริมาณของโลหะปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ในการผลิต ที่กำหนดว่าควรเปลี่ยนแปลงตะกั่วบัดกรีเมื่อถึงปริมาณโลหะสูงถึงระดับดังกล่าว
 - 4 คือปริมาณโลหะปนเปื้อนของทอง และทองแดง รวมกันไม่ควรเกินกว่า 0.300%
- ตารางที่ 2.3 แสดงระดับการเจือปนสูงสุดของสารปนเปื้อนที่มักพบโดยทั่วไปในบ่อตะกั่วบัดกรี

2.1.3 ผลของสิ่งเจือปน (Impurities) ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะผสมโซลเดอร์ (Effects of Impurities on Properties of Solder) (วิกรม, 2530)

สามารถสรุปได้เป็นแต่ละธาตุและดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ดังต่อไปนี้

ก. อลูมิเนียม (Aluminium) เนื่องจากเป็นโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ง่าย จึงทำให้เกิดเศษโลหะ (Dross) โดยอลูมิเนียม 0.005% จะทำให้เกิดการติดที่ไม่ดี ผิวไม่เรียบ และเกิดการสั้นลงด้วยความร้อน (Hot Shortness) ได้ จากการทดลองของ International Tin Research Institute (ITRI) พบว่าถ้ามี อลูมิเนียมเกินกว่า 0.005% จะทำให้เกิดออกไซด์ได้พอสมควร และในการเชื่อมต่อเหล็กกล้า จะทำให้เกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ (Dewetting) เพราะพลังงานระหว่างผิวเหล็กกล้า และโลหะผสมโซลเดอร์สูงมาก จนกระทั่งการมีออกไซด์เพียงเล็กน้อย ระหว่างชั้นของโลหะผสมโซลเดอร์หลอมเหลว และสารประสานการเชื่อม จะทำให้มุมสัมผัสมีค่าสูงจึงเกิดการเปียกที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น

ข. พลวง (Antimony) การทดลองของ ITRI พบว่าการมีพลวงถึง 0.5% ไม่มีผลต่อการเปียกหรือเกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ขึ้น แต่จะมีผลต่อการลดพื้นที่การกระจายตัวของโลหะผสมโซลเดอร์ (Area of Spread) บนโลหะทองแดงและทองเหลือง จึงอาจสรุปได้ว่าการมีพลวงอยู่ โดยเฉพาะที่ปริมาณมากๆ จะมีผลเสียต่อคุณสมบัติการเปียกของโลหะผสมโซลเดอร์ แต่เนื่องจากข้อมูลไม่มากพอจึงสรุปไม่ได้ว่าการกำหนดให้มีพลวง 0.2 – 0.5% ในมาตรฐานต่างๆ จะทำให้เกิดผลเสีย อย่างไรก็ตามการมีพลวงอยู่ด้วยก็มีข้อดีในแง่ที่ช่วยให้เกิดความมั่นใจ ในการใช้โลหะผสมโซลเดอร์ที่อุณหภูมิต่ำ ดังที่กล่าวไปแล้ว และยังช่วยลดข้อเสียของการเกิดออกซิไดซ์จากอลูมิเนียม และอลูมิเนียมรวมกับสังกะสีและแคดเมียม

ค. สารหนู (Arsenic) Heberlein พบว่าสารหนูทำให้เกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ได้กับทองเหลือง เมื่อมีปริมาณสูงกว่า 0.04% ส่วนการบัดกรีทองแดง ปริมาณที่ทำให้เกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ได้คือ 0.08 – 0.10% และ ITRI พบว่าการมีสารหนูทำให้รอยเชื่อมต่อบนทองเหลืองไม่เรียบ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากปฏิกิริยา ระหว่างสารหนูกับสังกะสี เกิดเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ As – Zn ที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะผสมโซลเดอร์กับทองเหลือง อย่างไรก็ตามการเกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ เนื่องจากสิ่งเจือปน (Impurities) ในโลหะผสมโซลเดอร์ยังไม่เป็นที่เข้าใจแน่ชัด นอกจากคาดกันว่าอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดึงผิว หรือพลังงานระหว่างผิว

ง. บิสมัท (Bismuth) เมื่อปริมาณบิสมัทสูงถึง 0.5% จะทำให้สีของโลหะผสมโซลเดอร์เปลี่ยนไป (Discoloration) เป็นสีเทาอมน้ำเงิน (Blue - Gray) และมีลักษณะขุ่นมัว (Cloudy) และการเปลี่ยนสีนี้ จะเป็นมากเมื่อมีปริมาณสูงถึง 1% แต่ไม่พบว่าอัตราการเกิดออกซิไดซ์ เพิ่มขึ้นในโลหะผสมโซลเดอร์หลอมเหลว

จ. แคดเมียม (Cadmium) ทำให้ลดพื้นที่การกระจายตัวของโลหะผสมโซลเดอ์ และลดแรงที่ทำให้เกิดการเปียก (Wetting Force) แต่เพิ่มเวลาการเปียกบนทองแดง การเพิ่มเวลาการเปียกจะเริ่มปรากฏให้เห็นตั้งแต่แคดเมียมเพียง 0–0.1% เท่านั้น และเมื่อมีมากกว่า 0.5% ผิวของโลหะผสมโซลเดอ์จะเริ่มด้าน (Dull) เนื่องจากเกิดผิวออกไซด์ขึ้น ทำให้เพิ่มแรงดึงผิวของโลหะผสมโซลเดอ์ หลอมเหลว การเปียกและการกระจายตัวจึงลดลง เชื่อกันว่า Cd ทำให้เกิดจุดบกพร่องในการเชื่อมต่อที่เรียกว่าบริดจ์ (Bridges) และการเกิดหยดน้ำแข็ง (Icicles)

ฉ. ทองแดง (Copper) พบว่าถ้ามีทองแดงถึง 0.5 % จะมีผลต่อการเปียกน้อยมาก แต่ถ้ามีทองแดง 0.27-2.9% เมื่อทดสอบเชื่อมต่อที่ 250°C พบว่าจะเกิดผิวขรุขระขึ้นเมื่อโลหะพื้นเป็นทองแดง ผิวขรุขระนี้เกิดจากสารประกอบระหว่างโลหะดีบุก – ทองแดง ที่แขวนลอยอยู่ในโลหะผสมโซลเดอ์ เมื่อปริมาณทองแดงเกินกว่าขอบเขตของการละลาย (Solubility Limit) ซึ่งในกรณีของตะกั่วบัดกรี 60/40 ที่ 250 °C จะอยู่ที่ 0.4% ดังนั้นถ้ามีทองแดงต่ำกว่า 0.4 % จะไม่ทำให้เกิดผิวขรุขระเมื่อโลหะพื้นเป็นทองเหลืองหรือเหล็ก แต่ถ้าเมื่อโลหะพื้นเป็นทองแดง การละลายของทองแดงจากพื้นโลหะ จะช่วยทำให้เกิดผิวขรุขระได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ทองแดงเป็นโลหะที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงช่วยลดอุณหภูมิของโลหะผสมโซลเดอ์ ทำให้ขอบเขตของการละลายลดลงด้วย ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งโลหะพื้นมักเป็นทองแดงจะทำให้ทองแดงเข้าไปเจือปนอยู่ในโลหะผสมโซลเดอ์หลอมเหลวได้ง่าย เพื่อป้องกันกาเกิดผิวขรุขระ จึงมักกำหนดให้มีทองแดงเจือปนอยู่ในอ่างโลหะผสมโซลเดอ์ได้ไม่เกิน 0.25% (กำหนดปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในบ่อโลหะผสมโซลเดอ์โดยมาตรฐานของทางบริษัทที่ 0.30% Cu)

ช. ฟอสฟอรัส (Phosphorus) พบว่าถ้ามีปริมาณฟอสฟอรัสเกินกว่า 0.01% ในการเชื่อมต่อทองแดงและเหล็กกล้าจะมุนจะทำให้เกิดการเปียกไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ ส่วนข้อมูลด้านอื่นไม่มีผู้ทดลองไว้

ซ. กำมะถัน (Sulfur) จะทำให้ผิวของโลหะผสมโซลเดอ์ขรุขระ ถ้ามีกำมะถันในอ่างโลหะผสมโซลเดอ์ ที่ใช้กับทองแดงเกินกว่า 0.0015% ส่วนงานเชื่อมต่อทองเหลืองหรือเหล็กกล้า ปริมาณกำมะถันในอ่างโลหะผสมโซลเดอ์ ที่ทำให้เกิดผิวขรุขระจะเป็น 0.0002% จากการตรวจสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) พบว่ากำมะถันจะอยู่ในรูปของ SnS และ PbS ซึ่งมักจะลอยอยู่ที่ผิวของโลหะผสมโซลเดอ์หลอมเหลว กำมะถันในโลหะผสมโซลเดอ์ที่มีดีบุกอยู่ในปริมาณสูงไม่พบว่าทำให้เกิดการเปียกแบบไม่สมบูรณ์ขึ้น แต่ในโลหะผสมโซลเดอ์ที่มีตะกั่วสูงเช่น เกรด 7%Sn - 93%Pb จะทำให้เกิดการเปียกแบบไม่สมบูรณ์ขึ้นได้เมื่อมีกำมะถัน 1.0% อย่างไรก็ตามก็ยังไม่ได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานใด ให้มีการจำกัดปริมาณของกำมะถันในโลหะผสมโซลเดอ์เลย รายงานของ ITRI เสนอว่าโลหะผสมโซลเดอ์ที่มีคุณภาพควรมีกำมะถันไม่เกิน 0.0003%

ฉ. สังกะสี (Zinc) สังกะสีเป็นตัวที่ทำให้เกิดออกไซด์ ถ้ามีไม่เกินกว่า 0.005% จะทำให้ผิวของรอยเชื่อมต่อนทองแดงเสียไป แต่การใช้สารประสานการเชื่อม (Flux) ที่รีแอคทีฟ (Reactive) เช่นซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์ (Zinc Ammonium Chloride) จะช่วยลดผลของการเกิดออกซิไดซ์ (Oxidation Effect) ของสังกะสีลง ทำให้อาจมีสังกะสีในอ่างโลหะผสมโซลเดอร์ได้ถึง 0.01% นอกจากนี้แล้วสังกะสียังทำให้การกระจายตัวของโลหะผสมโซลเดอร์ลดลงด้วย สาเหตุก็เพราะฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีที่เคลือบผิวโลหะผสมโซลเดอร์หลอมเหลวไว้

ญ. เหล็ก (Iron) เหล็กจะรวมตัวกับดีบุก เป็นสารประกอบระหว่างโลหะ FeSn และ FeSn₂ ได้ ถ้ามีเหล็กในโลหะผสมโซลเดอร์ถึง 0.1% จะทำให้ผิวไม่เรียบ แต่เหล็กไม่สามารถละลายลงในโลหะผสมโซลเดอร์ได้สูงขนาดนั้น ที่อุณหภูมิใช้งานทั่วไป ดังนั้นการใช้อ่างโลหะผสมโซลเดอร์ที่ทำด้วยเหล็กหล่อจึงไม่มีผลเสีย แต่เหล็กจะละลายเข้าไปในโลหะผสมโซลเดอร์ได้ ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 427°C ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงไม่ให้มีจุดใดจุดหนึ่งของอ่างโลหะผสมโซลเดอร์ ร้อนเกินกว่าอุณหภูมินี้ สารประกอบระหว่างโลหะที่ทำให้เกิดความขรุขระนี้ปกติจะสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าเป็นเศษโลหะ (Dross) ซึ่งสามารถกวาดออกได้

ฎ. เงิน (Silver) ไม่สามารถละลายในดีบุกและตะกั่วได้เลย แต่สามารถรวมตัวกับดีบุกเป็นสารประกอบระหว่างโลหะได้คือ AgSn เงินจะไม่ถือเป็นสิ่งเจือปน (Impurities) ในโลหะผสมโซลเดอร์ เพราะจะไม่ทำให้เกิดผลเสียในโลหะผสมโซลเดอร์เลย แม้จะมีถึง 2 – 3%ก็ตาม

ฏ. นิกเกิล (Nickel) ไม่สามารถละลายในดีบุกและตะกั่วได้ แต่จะเกิดสารประกอบระหว่างโลหะคือ Ni₃Sn, Ni₃Sn₂ และ Ni₃Sn₄ ได้ ปกติจะไม่พบในโลหะผสมโซลเดอร์ และไม่มีผลเสียอย่างใดกับโลหะผสมโซลเดอร์

2.1.4 คุณสมบัติโลหะผสมโซลเดอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Thwaites, 1982)

คุณสมบัติโลหะผสมโซลเดอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ให้เข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์นั้นโดยปกติต้องมีคุณสมบัติ คือ

1. สามารถเปียกผิวโลหะที่ต้องการทำการเชื่อมได้ง่าย (Wetting)
2. สามารถไหลเข้าไปตามช่องว่างของพื้นผิวที่เหล็อยู่ได้ง่าย (Capillary)
3. สามารถเชื่อมต่อกันเป็นพันธะเชิงโลหะการ (Metallurgical Bonding) ระหว่างผิวโลหะทั้งสองหลังจากแข็งตัวแล้ว

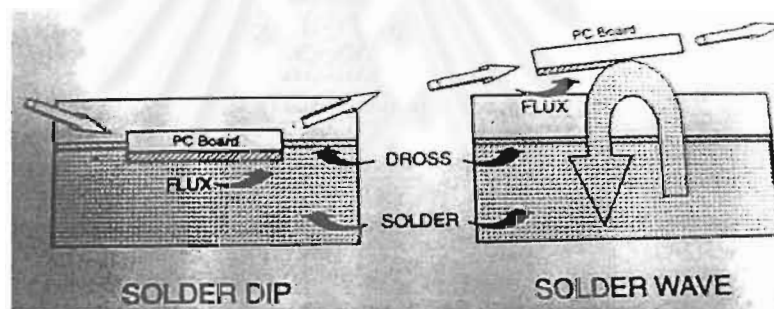
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมตีบ-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

2.2.1 หลักการทำงาน และอุปกรณ์ภายในเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

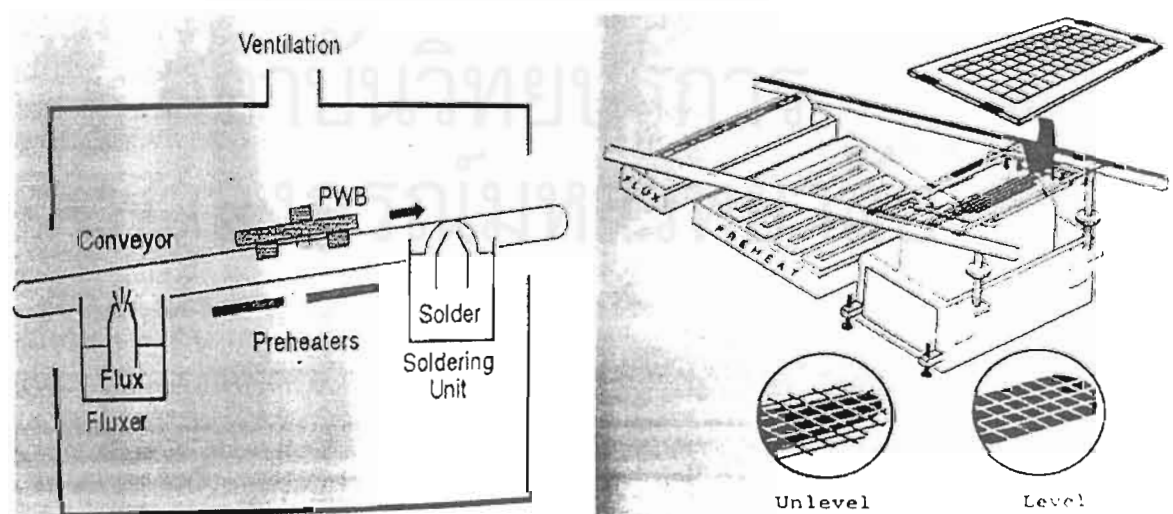
จากการพัฒนา ค้นคว้า วิจัยอย่างต่อเนื่องในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงเข้ามาสู่ยุคของแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) และขั้นตอนการบัดกรีด้วยมือก็ เข้าไปสู่ยุคของการบัดกรีด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ ซึ่งเครื่องเชื่อมอัตโนมัติชนิดที่อาศัยหลักการของการทำคลื่นเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้

- การเคลือบฟลักซ์ หรือน้ำยาประสาน (Fluxing)
- การอบความร้อน (Preheat)
- การบัดกรี (Soldering)

นอกจากนั้นยังประกอบไปด้วยส่วนของระบบเคลื่อนที่ของสายพาน (Conveyor System), ระบบการระบายอากาศ (Ventilation System) และระบบควบคุมอื่นๆ



รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาของกระบวนการเชื่อมจาก Solder Dip ไปสู่ Solder Wave



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการทำงานในเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

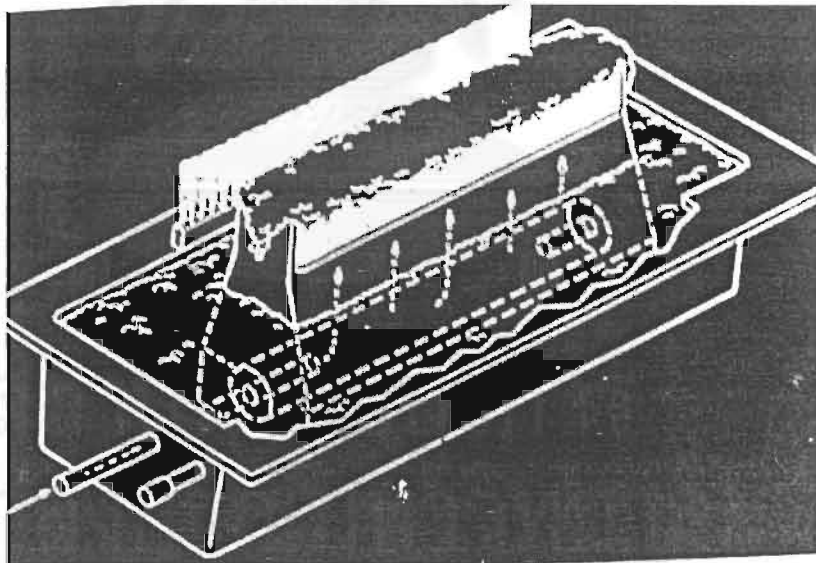
ก. ฟลักซ์ หรือน้ำยาประสาน (Flux) และวิธีการเคลือบฟลักซ์

ในการเลือกใช้ชนิดของฟลักซ์ และวิธีการเคลือบฟลักซ์ลงบนส่วนลายวงจรของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่มีอยู่หลายชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิดเช่น

- ระยะของขบวนการที่ทะลุผ่านแผ่นลายวงจรพิมพ์
- วิธีการ และความจำเป็นในการทำความสะอาดคราบฟลักซ์ ที่เหลือบนแผ่นลายวงจรพิมพ์
- ปริมาณ และความเป็นเนื้อเดียวกันของฟลักซ์ ที่ต้องการใช้ในการผลิต โดยทั่วไปจะพิจารณาในรูปของปริมาณของเนื้อฟลักซ์ (Solid Content)
- ความประหยัด และความต้องการในการเก็บรักษา ที่สามารถพิจารณาได้ในรูปของความปลอดภัยในการทำงาน รวมไปถึงการดูแลรักษา และการบำรุงรักษาเครื่องมืออุปกรณ์
- ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน

ตลอดไปถึงชนิดของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่ทำการเลือกใช้ด้วย ซึ่งฟลักซ์ที่มีขายในทุกวันนี้มีหลายประเภทหลายชนิดขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ เราสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ฟลักซ์อินทรีย์
2. ฟลักซ์อินทรีย์
3. ฟลักซ์ยางเรซิน



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของเครื่องทำฟองฟลักซ์

หน้าที่การทำงานของฟลักซ์ หรือน้ำยาประสาน

- ทำความสะอาด ฝุ่น , คราบสกปรก และชั้นออกไซด์ บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ก่อนทำการเชื่อม
- ลดแรงตึงผิวของโลหะผสมโซลเดอร์ เพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมต่อกับโลหะพื้นได้ง่าย
- ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลายวงจร อันเนื่องมาจากการได้รับความร้อนของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ขณะผ่านเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

โดยในปัจจุบันนี้ได้มีการคิดค้นวิธีการเคลือบฟลักซ์หลายแบบหลายวิธี แล้วแต่การเลือกใช้ของผู้ผลิต ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นก็จะมีประกอบด้วยข้อดี และข้อเสียในตัวเอง ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการสัมผัสของฟลักซ์กับแผ่นลายวงจรพิมพ์เช่น

- Foam Fluxing (อาศัยหลักการของการทำฟองของฟลักซ์ให้สัมผัสกับแผ่นลายวงจรพิมพ์)
 - Wave Fluxing (อาศัยหลักการของการทำคลื่นของฟลักซ์ให้สัมผัสกับแผ่นลายวงจรพิมพ์)
 - Spray Fluxing(อาศัยหลักการของการทำละอองของฟลักซ์ให้สัมผัสกับแผ่นลายวงจรพิมพ์)
- ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติ และค่าใช้จ่ายตามตารางดังนี้

Equipment Type	Maximum Fluxing Height,		Recommended Flux Types	Equipment Cost	Maintenance Cost	Material Usage	Overall Economy Rating
	(in.)	(mm)					
Free foam head	5/8	16	All except no-clean	Low	High	High	Expensive
Supported foam	1.0+	25+	All except no-clean	Low	High	High	Expensive
Wave fluxer	2.0	50	All	Medium	Low	Medium	Low
Rotary spray	Any	Any	All	High	High	Low	Medium
Nozzle spray	Any	Any	All	High	High	Low	Medium
Ultrasonic spray	Any	Any	All	Very High	High	Low	Medium

Source: Copyright 1994 Manko Associates.

^a Assumes similarity of construction materials (e.g., stainless steel versus plastic).

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟลักซ์บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ ในด้านคุณสมบัติ และค่าใช้จ่าย

สำหรับการเชื่อมโดยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่ใช้ในสายการผลิต นิยมใช้วิธีการ Foam Fluxing ซึ่งจะอาศัยท่อลม หรือท่อแก๊ส ในการเป่าลมผ่านหินที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เป็นจำนวนมาก ที่จุ่มอยู่ในถังที่บรรจุฟลักซ์เอาไว้ เพื่อใช้ในการทำฟองฟลักซ์ให้สัมผัสกับส่วนลายวงจรของแผ่นลายวงจรพิมพ์ และในการทำงานด้วยวิธีนี้จะต้องทำการควบคุมปัจจัยต่างๆให้อยู่ในสภาพการทำงานที่เหมาะสมไปตามประเภทของฟลักซ์ (ซึ่งวิธีการ Foam Fluxing นิยมใช้ฟลักซ์ชนิดที่ไม่ต้องการทำความสะอาดหลังจากผ่านการเชื่อม) ดังเช่น

1. ชนิดของตัวทำละลาย จะต้องมีความสัมพันธ์เป็นไปตามชนิดของฟลักซ์ที่ใช้งาน
2. แรงดันอากาศ และความสะอาด จะต้องควบคุมแรงดันให้เหมาะสม รวมไปถึงการปนเปื้อนของน้ำ และน้ำมันในถังที่บรรจุฟลักซ์
3. ระดับความสูงของฟลักซ์ ควรจะมีความสม่ำเสมอ และได้ระดับเดียวกันตลอด
4. อุณหภูมิ เนื่องจากความเข้มข้น และความหนืดของฟลักซ์ จะแปรผันตามอุณหภูมิ

ข. การอบความร้อน (Preheat)

เหตุผลสำคัญของการอบความร้อน

1. เพื่อใช้ในการระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในฟลักซ์ (Flux Volatile Evaporation)

โดยใช้ความร้อนของการอบความร้อน (Preheat) ในการระเหยตัวทำละลายฟลักซ์ ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนของการเชื่อม (ฟลักซ์ที่ใช้โดยมากจะมีส่วนประกอบของทินเนอร์หรือ อัลกอฮอล์เป็นสำคัญ นอกจากนั้นมักจะมีจุดเดือดต่ำกว่าเนื้อฟลักซ์ หรือยางสนมาก) เนื่องจากการเกิดการตกค้างของสารทำละลายของฟลักซ์บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ยังคงสภาพของเหลวนั้น จะทำให้เกิดการแตกตัวของโลหะผสมโซลเดอร์ ขณะที่ทำการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ในขั้นตอนการเชื่อม

2. เพื่อกระตุ้นการทำงานของฟลักซ์ (Flux Activation)

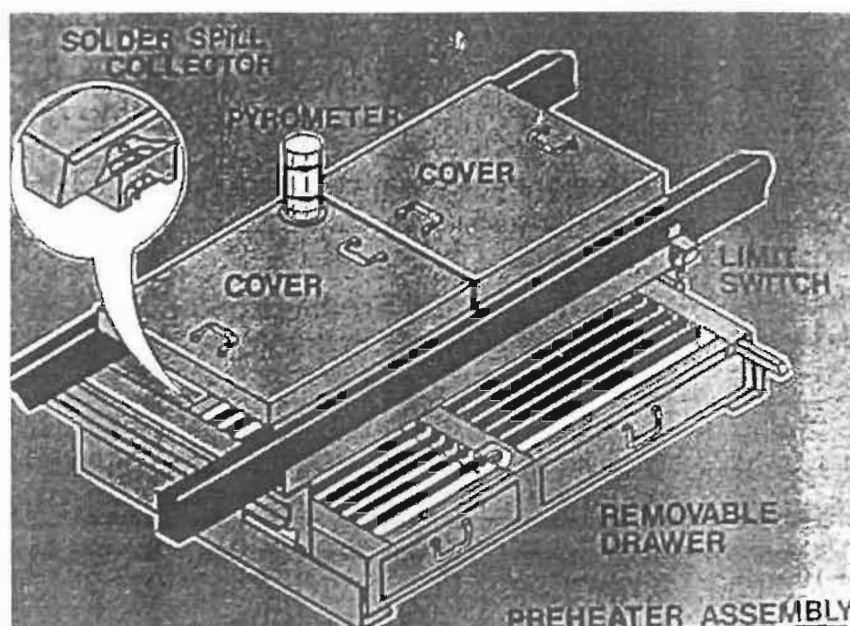
ฟลักซ์ประเภท Rosin-Based จะทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 82°C ดังนั้นการได้รับความร้อนที่ไม่เพียงพอจะทำให้ ฟลักซ์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Reduction of Thermal Shock)

อุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดเช่น เซรามิกชิป จะได้รับความเสียหายแค่เพียง ได้รับความร้อนด้วยอัตรา $2-5^{\circ}\text{C/s}$ ซึ่งการไม่ทำการอบความร้อนก่อนที่จะทำการเชื่อมนั้น จะทำให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมಿಯ่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิห้อง (ประมาณ $25 - 30^{\circ}\text{C}$) ไปถึง อุณหภูมิขณะผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (ที่มีอุณหภูมิประมาณ $245 - 260^{\circ}\text{C}$) ที่มีผลต่างของอุณหภูมิถึง $220 - 230^{\circ}\text{C}$

4. เพื่อลดเวลาในการผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Effect on Soldering Speed)

จากหลักของการเชื่อมที่ถูกต้อง การเชื่อมที่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อขาอุปกรณ์ และลายวงจรทองแดง บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ ได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้โลหะผสมโซลเดอร์สามารถเปียกทองแดงบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ได้ (Wetting Temperature) ซึ่งความร้อนเหล่านี้ได้รับมาจากสองแหล่งด้วยกัน คือ ส่วนของความร้อนจากการอบ (Preheat Step) และ คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Soldering Wave) ฉะนั้นการได้รับความร้อนจากการอบมากขึ้น ก็ทำให้มีความต้องการความร้อนที่ได้จากคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์น้อยลง จึงสามารถใช้เวลาการผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Dip Time) น้อยลงได้ และยังส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์จะถูกปรับให้คงที่ ณ. ค่าๆหนึ่งซึ่งจะเป็นไปตามลักษณะของส่วนผสมของดีบุก-ตะกั่ว ในโลหะผสมโซลเดอร์ที่ใช้)



รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของส่วนอบความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน

Printed Circuit Board Type	Thickness		Preheater Location ^b		Top of Board ^d Temperature Range,	
	(in.)	(mm)	Covered Bottom ^c	Top and Bottom	° F	(° C)
Single-sided and flexible	All	All	Adequate	—	180-200	(80-90)
Double-sided	Max. 0.063	Max. 1.6	Adequate	—	210-230	(100-110)
Multilayer (4-6 layers)	Max. 0.063	Max. 1.6	Possible	Preferred	220-250	(105-120)
Multilayer (6 layers) ^a	Min. 0.093	Min. 2.4	—	Required	230-270	(110-130)
Metal core Multilayer ^a	Min. 0.125	Min. 3.2	—	Required	230-270	(110-130)

ตารางที่ 2.5 แสดงการเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบความร้อน

- ^a Center of layer stack should reach a minimum of 180° F (80° C).
- ^b Selection is also a function of component size and density.
- ^c Covered to reflect back some of the heat and create a convection tunnel.
- ^d Measured on top of board when leaving preheat station. Temperature measured on insulation, in between metallic conductors. In the case of top preheaters, the ideal temperature measurements are in the center layers.

การปรับเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการอบความร้อน

- เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมกับชนิดของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ทำการผลิต จากตารางข้างต้น
- ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการระเหยของฟลักซ์ จากการพิจารณา เสียงการแตกตัวของฟลักซ์ขณะทำการเชื่อม โดยทั่วไปแล้ว อุณหภูมิการอบจะมีช่วงต่ำสุดที่หนึ่งในสาม ของผลต่างของอุณหภูมิห้องกับ อุณหภูมิที่ใช้งานของโลหะชนิดนั้นๆ
- ตรวจสอบความเหมาะสม โดยทดสอบกับแผ่นลายวงจรพิมพ์ ปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิโดยดูจากอัตราการผลิต เปรียบเทียบกับคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้

ค. การบัดกรี (Soldering Station)

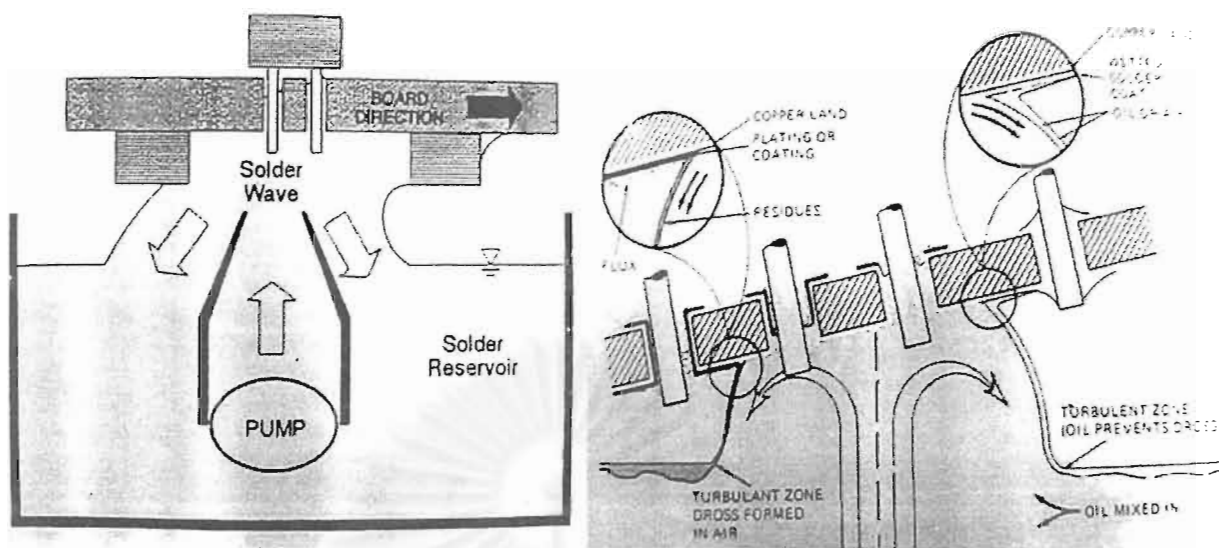
ส่วนของการบัดกรีเป็นส่วนที่เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยทั่วไปประกอบด้วยเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่สำคัญหลายส่วนด้วยกันเช่น

- บ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ (Solder-Pot)
- เครื่องสูบน้ำโลหะ (Solder Pump)
- หัวฉีดน้ำโลหะ (Nozzle)

เครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่ใช้โดยทั่วไปนั้น ส่วนมากจะใช้หลักการของการทำคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Wave Soldering) โดยจะหลอมละลายแท่งโลหะผสมโซลเดอร์บริสุทธิ์ (Solder Bar) ที่มีอัตราส่วนของดีบุกต่อตะกั่วเป็น 63/37 ลงในบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ ที่มีขดลวดทำความร้อนอยู่ภายใน ซึ่งอัตราส่วนผสมดังกล่าวเป็นอัตราส่วนผสม ณ จุดยูเทคติก เพราะนอกจากจะมีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดแล้ว ยังช่วยทำให้โลหะผสมโซลเดอร์เชื่อมติดได้ง่ายยิ่งขึ้น

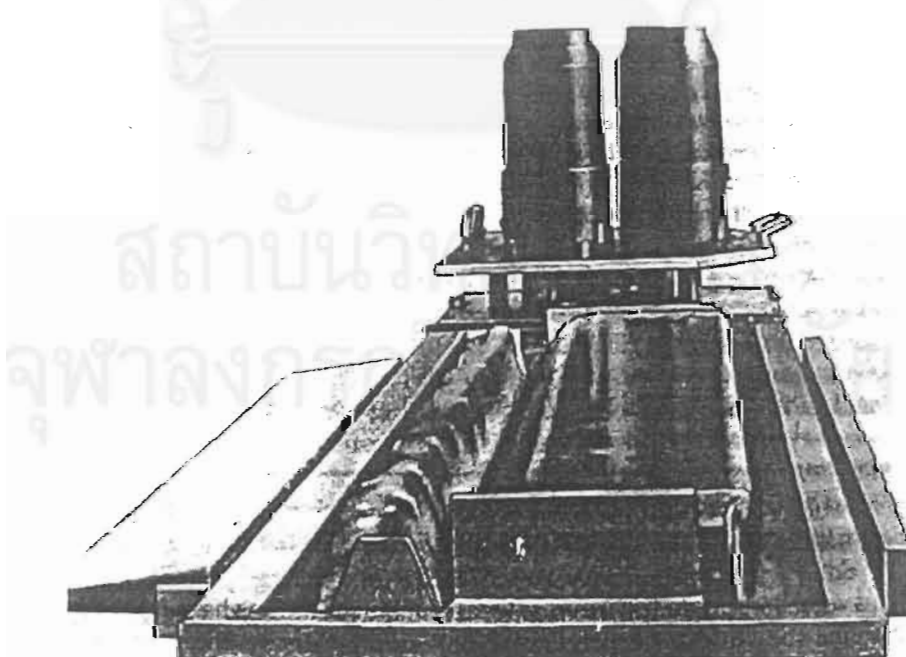
จากนั้นเครื่องสูบจะทำการสูบน้ำโลหะผสมโซลเดอร์ที่หลอมเหลวหมด ผ่านส่วนของแผ่นกรองเศษตะกั่ว (Dross) ที่ติดอยู่กับส่วนของหัวฉีด ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของโลหะผสมโซลเดอร์กับอากาศ ผ่านไปสู่หัวฉีด (Nozzle) ออกมาเป็นลักษณะของคลื่นที่สัมผัสกับส่วนลายวงจรของแผ่นลายวงจรพิมพ์ โดยจะปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ที่ได้เป็นคลื่นที่มีความเรียบของผิวคลื่น และมีลักษณะคล้ายการไหลของน้ำตก โดยเคลื่อนที่ส่วนทางกับทิศการเคลื่อนที่ของสายพาน และแผ่นลายวงจรพิมพ์ เมื่อน้ำโลหะผสมโซลเดอร์ผ่านแผ่นลายวงจรพิมพ์แล้วจะไหลกลับคืนไปสู่บ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ซึ่งจะถูกสูบลูกกลับมาใช้ต่อไปอีก

เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดี ผู้ออกแบบจึงมักนิยมออกแบบให้มีการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ในทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของแผ่นลายวงจรพิมพ์อีกเล็กน้อยด้วย ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการแยกโลหะผสมโซลเดอร์ส่วนเกินที่ติดอยู่บนจุดเชื่อมออกโดยอาศัยน้ำหนักและแรงการไหลของน้ำโลหะผสมโซลเดอร์ ทำให้ช่วยลดการเกิดจุดบกพร่องประเภท Excessive และ Bridging หรือ Shorting บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ได้

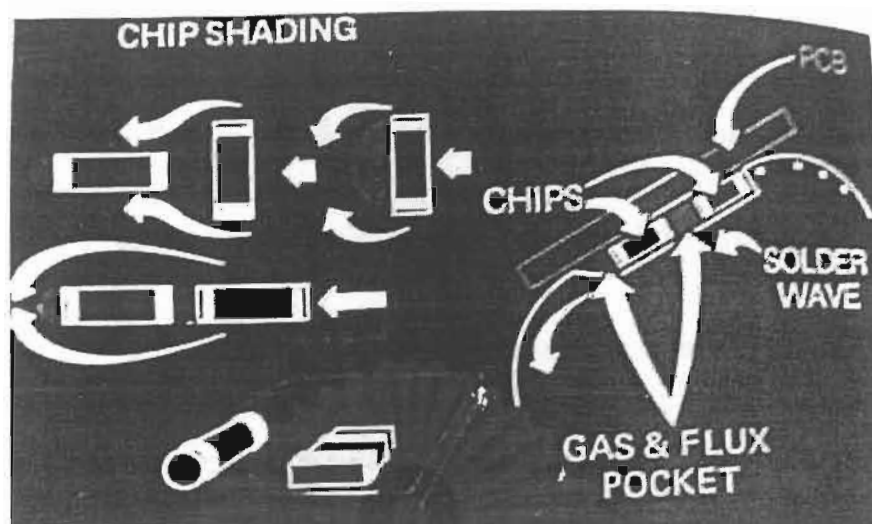


รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังโครงสร้างการเชื่อมโดยใช้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

นอกจากนี้บางบริษัทจะออกแบบบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ ให้มีการเชื่อมโดยใช้หัวฉีดหลายหัว เพื่อให้ได้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มากกว่าหนึ่งคลื่น (Multidirectional Solder Flow Multiple Waves) เพื่อลดการเกิดจุดบกพร่องประเภท Skipping หรือ Shading อันเนื่องมาจาก การเกิดการขัดขวางคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ ที่สัมผัสสายวงจรในทิศทางหลังอุปกรณ์ประเภท SMT (Surface Mounted Technology) ที่ติดตั้งบริเวณด้านสายวงจร ทำให้รอยเชื่อมที่อยู่หลังอุปกรณ์ประเภทนี้ ไม่ได้รับโลหะผสมโซลเดอร์ และไม่เกิดการเชื่อม



รูปที่ 2.7 แสดงการใช้ Nozzle 2 ตัวในการสร้างคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ 2 ชนิด

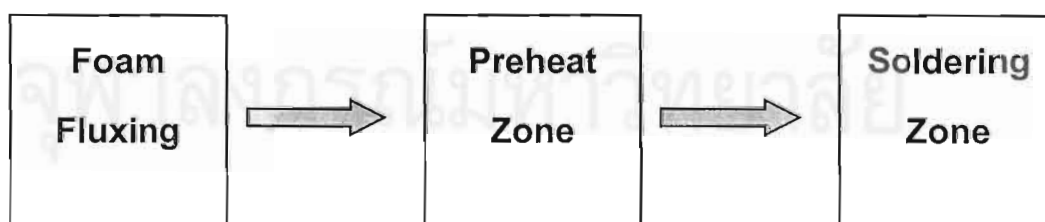


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของการเกิด shading จากคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

2.2.2 ขั้นตอนการบัดกรีอัตโนมัติ

หลังจากขั้นตอนการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่เริ่มตั้งแต่การเสียบอุปกรณ์ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ (Automatic insertion) ผ่านขึ้นมาถึงการเสียบอุปกรณ์ด้วยมือ (Manual Insertion) ตามแบบที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว แผ่นลายวงจรพิมพ์พร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำมาบัดกรีด้วยโซลเดอร์ (Solder) เพื่อเป็นการเชื่อมลายวงจรเข้าไปหาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่ถูกประกอบด้วยเทคโนโลยีทางด้านเชื่อมโยงในรู โดยมีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

1. การเคลือบน้ำยาประสาน (Foam Fluxing)
2. การอบแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Preheat)
3. การบัดกรีหรือการเชื่อม (Soldering)



Auto- Soldering Machine

รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนในกระบวนการเชื่อมตีบูก-ตะกั่วโดยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

บ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอ์ที่ใช้ในการบัดกรีอัตโนมัติปกติจะมี 2 บ่อ ซึ่งในแต่ละบ่อจะมีหน้าที่ต่างกันไป โดย

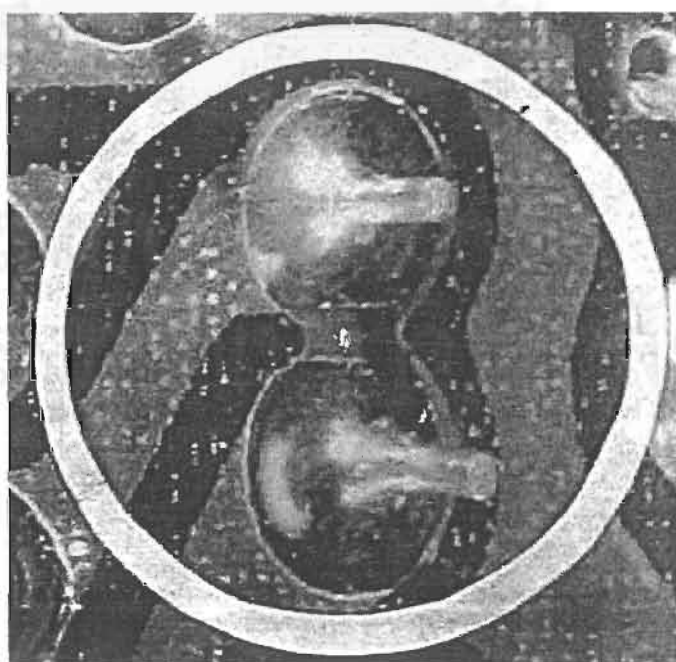
บ่อที่ 1 จะมีการไหลของน้ำโลหะผสมโซลเดอ์แบบ Turbulent ด้วยแรงดันสูง เพื่อให้ น้ำโลหะผสมโซลเดอ์จะสามารถสอดแทรกไปได้ทุกพื้นที่ โดยเฉพาะมุมอับของอุปกรณ์เทคโนโลยีทางด้านวางบนพื้นผิว (Surface Mounted Technology) ซึ่งบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอ์แบบธรรมดาไม่สามารถเข้าถึงได้

บ่อที่ 2 จะมีการไหลของน้ำโลหะผสมโซลเดอ์แบบ Laminar ซึ่งน้ำโลหะผสมโซลเดอ์ที่มีผิวเรียบเหมือนกระจก ทำให้โลหะผสมโซลเดอ์สามารถเชื่อมได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทุกพื้นผิว และยังเป็นตัวช่วยดึงเอาโลหะผสมโซลเดอ์ส่วนที่เกิดจากการเชื่อมในบ่อแรกออกด้วย เพื่อป้องกันปัญหาการลัดวงจร

2.3 ลักษณะข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว

2.3.1 สาเหตุของการเกิดจุดบกพร่องในการเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว (Coombs, 1990)

ภายใต้สภาพของลักษณะของรอยเชื่อมในอุดมคตินั้น ประกอบด้วยความสามารถในการเปียกโลหะผสมโซลเดอ์ที่ดีของขาอุปกรณ์ต่างๆ (Lead Component) และฐานรองลายทองแดง (Copper Pad) บนแผ่นลายวงจรพิมพ์ ซึ่งจะทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีลักษณะของผิวที่เรียบ สว่าง มีสภาพหนูน-เว้า ตามสภาพโครงสร้างของรอยเชื่อมดังแสดงดังรูป



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพ

ซึ่งภายในสภาพการผลิตที่เกิดขึ้นจริงแล้วลักษณะของรอยเชื่อมไม่ได้เป็นไปตามนั้นทั้งหมดเราจึงจำเป็นต้องรู้จักลักษณะ และสาเหตุของการเกิดรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ในแบบต่างๆเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุ พร้อมทำการแก้ไขได้อย่างทันท่วงที โดยทั่วไปลักษณะรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์มักเกิดจากความไม่แน่นอน และการขาดการควบคุมปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการติดโลหะผสมโซลเดอร์ (Solderability) ของแผ่นลายวงจรพิมพ์ และขาอุปกรณ์ของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ (Lead Wire Component)
2. ความสามารถในการตรวจสอบ และควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว (Soldering Process)
3. ความสามารถในการออกแบบแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมดีบุก-ตะกั่ว (Soldering Process)

2.3.2 ลักษณะของจุดบกพร่องชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

ก. Nonwetting and Dewetting

คือการเกิดความไม่พอเพียงของโลหะผสมโซลเดอร์บนรอยเชื่อม (Insufficient Solder) อันเนื่องมาจากความสามารถในการติดโลหะผสมโซลเดอร์ (Solderability) อย่างเพียงพอ ทำให้ได้รอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ โดยการที่รอยเชื่อมมีโลหะผสมโซลเดอร์ที่น้อยเกินไปนั้น จะทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอ หรือเกิดโอกาสในการแตกร้าวได้ง่าย พร้อมทั้งยังทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้า และการนำความร้อนของรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้า และการนำความร้อนของรอยเชื่อมนั้น จะแปรผันตามปริมาณของโลหะผสมโซลเดอร์บนรอยเชื่อม

โดยความแตกต่างระหว่าง Nonwetting กับ Dewetting จะอยู่ที่ Nonwetting จะเป็นการไม่ต่อเนื่องของโลหะผสมโซลเดอร์บนรอยเชื่อม หรือเรียกง่าย ๆ ว่าการไม่ติดของโลหะผสมโซลเดอร์บนฐานรองลายทองแดง ซึ่งถ้าเกิดจากโลหะที่ใช้เป็นฐาน (Base Metal) ก็จะมองเห็นสีของทองแดงผ่านโลหะผสมโซลเดอร์ ในกรณีที่เกิดจากขาอุปกรณ์จะเกิดการแยกส่วนของขาอุปกรณ์กับโลหะผสมโซลเดอร์ ส่วน Dewetting จะเป็นการที่มุมสัมผัสของโลหะผสมโซลเดอร์ที่มากเกินไปเนื่องมาจากความสามารถในการติดโลหะผสมโซลเดอร์ที่ไม่เพียงพอของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ทำให้โลหะผสมโซลเดอร์เชื่อมติดเฉพาะในบางจุดบนรอยเชื่อม แล้วไหลผ่านออกไปก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว ซึ่งส่วนมากแล้ว Nonwetting และ Dewetting มักจะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกันโดยลักษณะความบกพร่องทั้ง 2 มักเกิดขึ้นจาก

- ความไม่พอเพียงของความสามารถในการติดโลหะผสมโซลเดอร์ ที่เกี่ยวเนื่องกับความสามารถของฟลักซ์ (ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของฟลักซ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตด้วย)

- การมีน้ำมัน หรือชั้นไขมัน รวมไปถึงการเกิดชั้นสนิม หรือชั้นออกไซด์ (Tarnish) ที่เกิดขึ้นบนผิวทองแดงของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ที่จะไปทำหน้าที่ขัดขวางการทำงานของฟลักซ์ เนื่องจากความไม่เหมาะสมในการเก็บรักษา

- ความไม่เหมาะสมในการควบคุมเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว

ข. Excessive

คือการที่มีโลหะผสมโซลเดอร์ เชื่อมติดอยู่บนรอยเชื่อมมากเกินไป ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถพิจารณาจากลักษณะรูปทรงของรอยเชื่อม ที่มีความเว้า และนูนผิดปกติจนสามารถสังเกตเห็นได้ โดยการมีโลหะผสมโซลเดอร์ ที่มากเกินไปนั้นจะพิจารณาจากรูปร่างของรอยเชื่อมที่ไม่มีขาอุปกรณ์ผ่านพื้นโลหะผสมโซลเดอร์ออกมา หรือมีก็น้อยมาก เพราะการไม่มีขาอุปกรณ์ไหลออกมา จะทำให้ไม่สามารถแนใจ หรือประกันได้ว่าขาอุปกรณ์นั้นยาวพอ หรือถูกเชื่อมติดกับแผ่นลายวงจรพิมพ์นั้นจริง โดยมักเกิดขึ้นจาก

- การไม่ได้รับฟลักซ์ของจุดเชื่อม (Flux Starvation)
- อุณหภูมิ Preheat หรืออุณหภูมิของโลหะผสมโซลเดอร์ต่ำเกินไป

ค. Bridging (or Shorting)

คือการที่มีโลหะผสมโซลเดอร์เชื่อมติดอยู่บนจุดเชื่อม ตั้งแต่ 2 จุดที่ติดกันขึ้นไป โดยมักเกิดจากการเกิดใย หรือฟิล์มบางๆ ของโลหะผสมโซลเดอร์ ซึ่งถ้าไปจับรวมกับขาอุปกรณ์ที่อยู่กัน ในส่วนลายวงจรอื่นจะทำให้เกิดการลัดวงจร (Shorting)

สาเหตุของการเกิด bridging ส่วนใหญ่มักจะเกิดจากความไม่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อม ได้แก่

- อุณหภูมิในส่วนของ Preheat หรือส่วนของ Soldering ต่ำเกินไป
- น้ำยาประสานหรือฟลักซ์ที่ใช้มีความเข้มข้นน้อยเกินไป
- เกิดชั้นออกไซด์ (Oxide film) ของโลหะผสมโซลเดอร์บนผิวของโลหะหลอมเหลวอย่างหนาแน่น (ซึ่งเกิดเนื่องจากการปนเปื้อนของสังกะสี หรืออลูมิเนียมในปริมาณที่มาก)
- รูปแบบของคลื่น (Solder wave) ไม่สม่ำเสมอ หรือองศาของสายพาน (Conveyor angle) ที่ไม่เหมาะสม
- ลักษณะแบบของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่มีความหนาแน่นมาก หรือระยะห่างระหว่างขาอุปกรณ์น้อยเกินไป

ง. Icicle Formation

คือการเกิดการย่อยของโลหะผสมโซลเดอรืบนรอยเชื่อม โดยมักเกิดจากการลาก หรือ แยกตัวของแผ่นลายวงจรมพิมพ์จากผิวของโลหะผสมโซลเดอรื ที่อยู่บนบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอรื จึง ทำให้เกิดการแยกตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนใหญ่เกิดจากการปนเปื้อนของสังกะสี หรืออลูมิเนียมในปริมาณที่ มาก และมักทำการแก้ไขโดยการเพิ่มมุมในการแยกตัวของแผ่นลายวงจรมพิมพ์ออกจากผิวน้ำโลหะ

จ. Blowhole

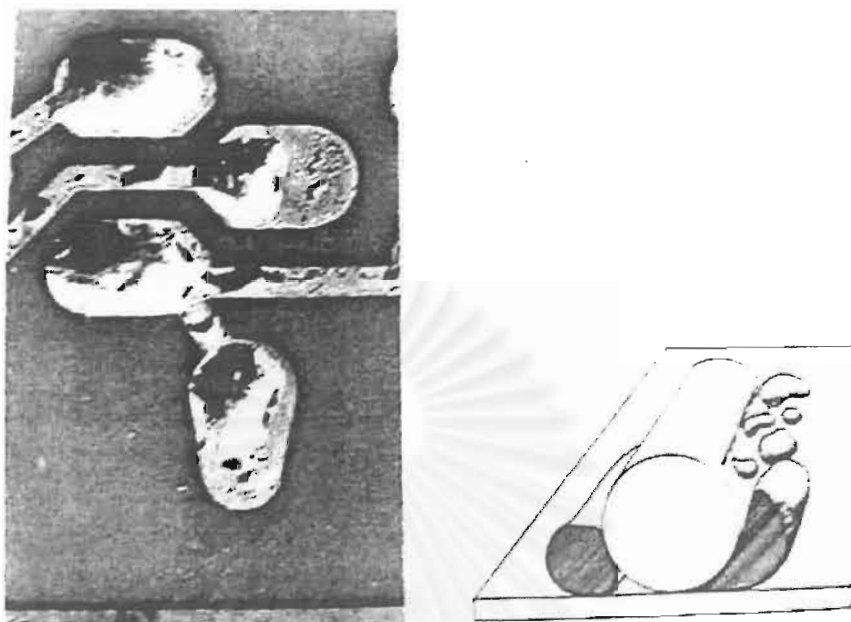
คือการเกิดรู หรือโพรงอากาศภายในรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากการแข็งตัวของโลหะผสม โซลเดอรืที่มีฟองอากาศ หรือไอระเหยของฟลักซ์อยู่ภายในรอยเชื่อม รูที่เกิดขึ้นมักมีขนาดเล็กเนื่องจาก การมีฟลักซ์ที่ตกค้างอยู่บนแผ่นลายวงจรมพิมพ์ หรือส่วน Preheat ที่ขาดประสิทธิภาพในการระเหย ฟลักซ์ที่ตกค้างอยู่บนแผ่นลายวงจรมพิมพ์ได้อย่างเพียงพอ รวมไปถึงปริมาณความชื้นในอากาศที่มาก เกินไป

ฉ. Cold or Fractured Joints

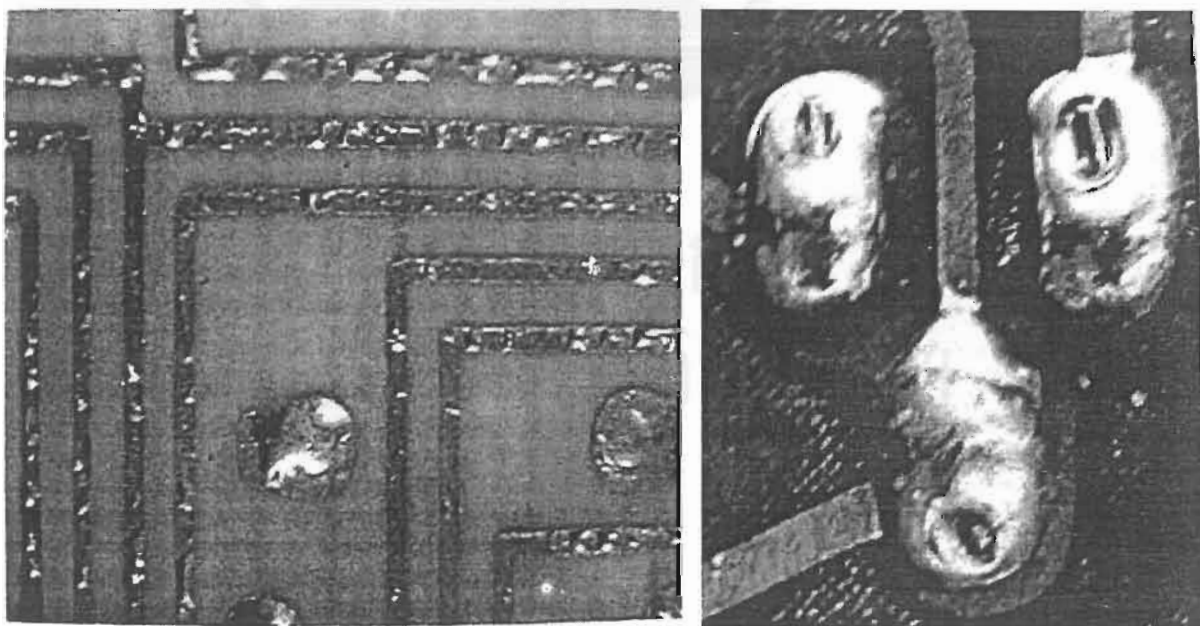
คือการที่ผิวของรอยเชื่อมเกิดการแยก หรือไม่เรียบมีลักษณะเป็นเขย่ง เกิดเนื่องจากการ เคลื่อนที่ของขาอุปกรณ์ (Lead Component) ขณะที่โลหะผสมโซลเดอรืกำลังเย็นตัว หลังจากออกจาก บ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอรืบัดกรีซึ่งทำให้โลหะผสมโซลเดอรืไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อให้เกิดรอยแยก ตามมาภายหลัง

ช. Dull or Grainy Solder Joints

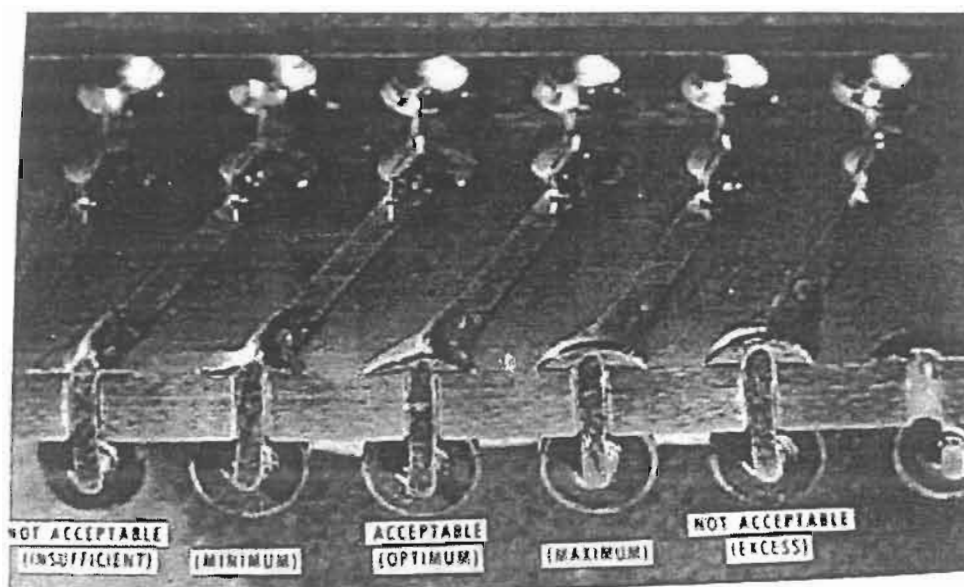
คือการที่รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว มีลักษณะผิดปกติคือ มีสีเทา ทึบ ไม่สะท้อนแสง และเป็นประกาย เกิดเนื่องจากการปนเปื้อนของโลหะในบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอรื บัดกรีในปริมาณที่มาก โดยเฉพาะทอง และทองแดง ซึ่งจะทำให้รอยเชื่อมมีลักษณะดังกล่าวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของทองและทองแดง กับตีบุก ซึ่งทำให้ปริมาณตีบุกในน้ำโลหะผสม โซลเดอรืในบ่อลดลง และอาจเกิดจากการมีเศษโลหะ (Dross Particle) ที่เกิดจากปฏิกิริยาของโลหะผสม โซลเดอรืกับอากาศผสมอยู่ในรอยเชื่อม



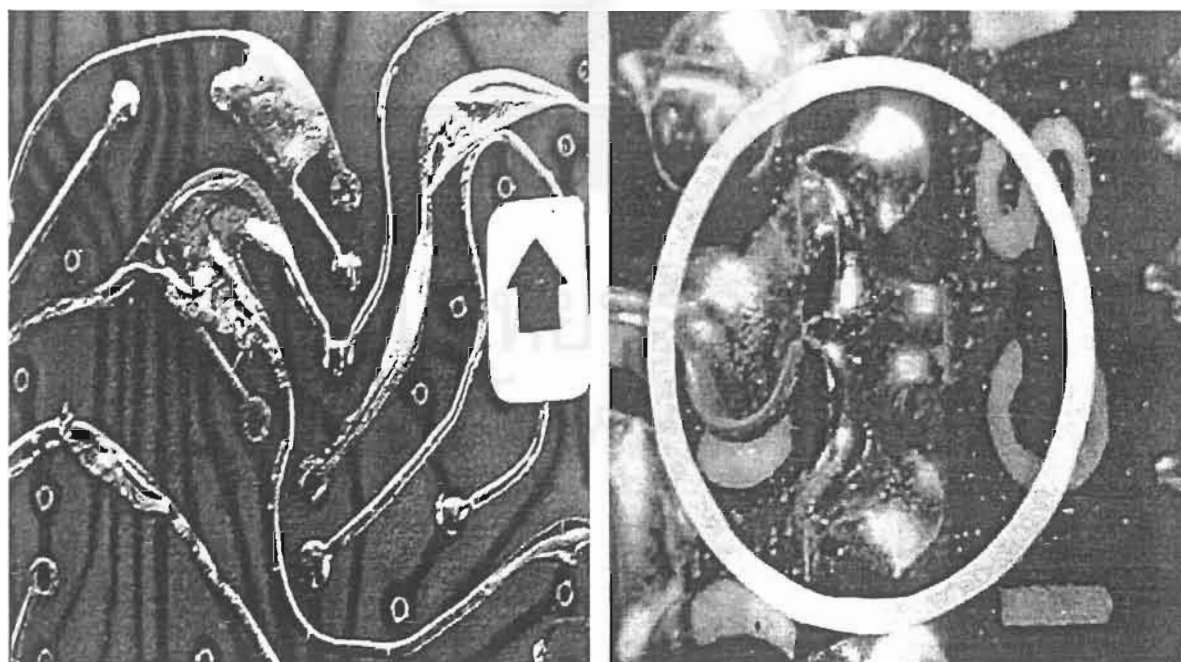
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Dewetting



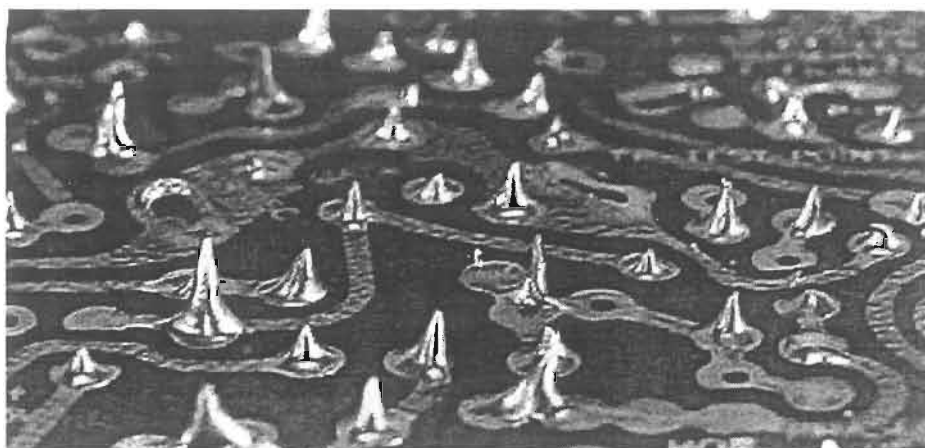
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Nonwetting



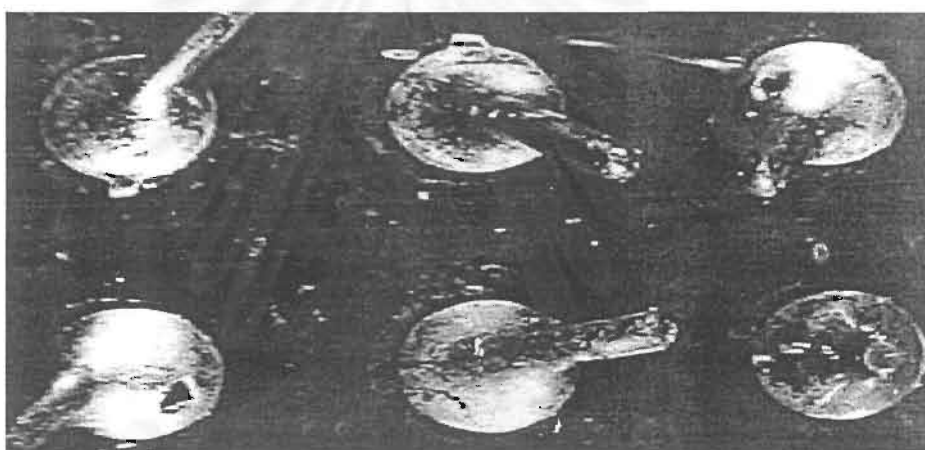
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Excessive



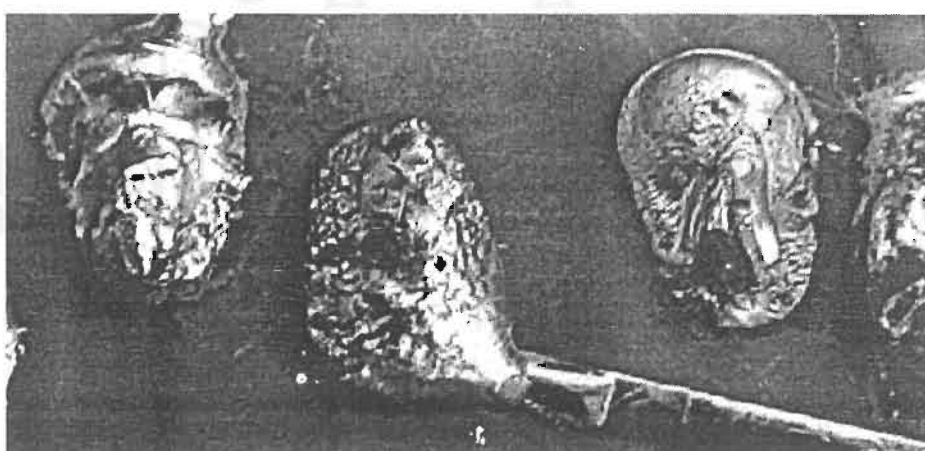
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพประเภท Webbing & Bridging



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพแบบ Icicling



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพแบบ Blowhole



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพแบบ Cold or Fracture

2.4 ทฤษฎีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ

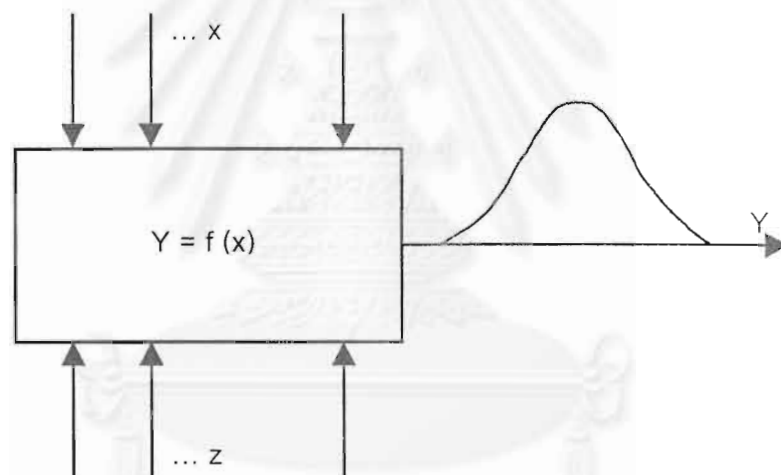
2.4.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่า ปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่มีความสำคัญ(หรือความสนใจ)ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response)

ปัจจัย (Factor) ในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอ ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก หรือไม่มีความสามารถควบคุมเพราะเกิดจากสภาพแวดล้อมในการผลิต ฯลฯ



Y คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์

Z, x คือ ตัวแปรอิสระ หรือปัจจัย

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

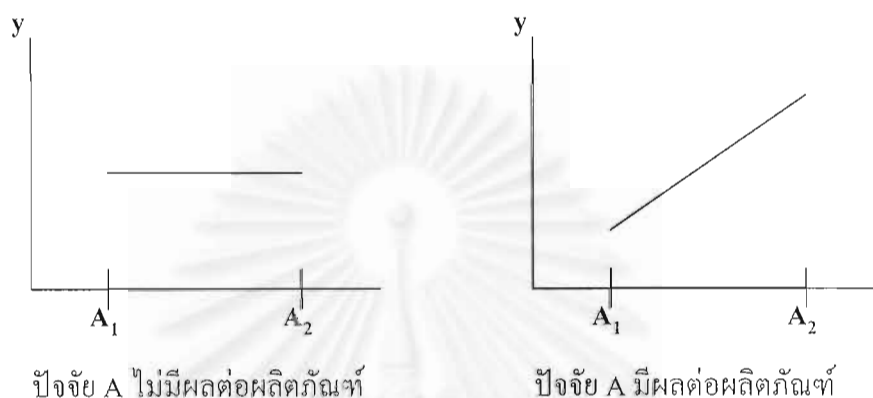
ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 2.18 แสดงปัจจัย และพารามิเตอร์ของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยใดมีผลต่อผลิตภัณฑ์ หรือไม่มีผลนั้น ต้องทำการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์จึงผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ Y หมายถึงค่าความขุ่นและ A หมายถึงค่าความเข้มข้นของสี ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟตัวอย่าง ดังนี้



รูปที่ 2.19 แสดงอิทธิพลที่มีผล และอิทธิพลที่ไม่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.4.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1 เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

2 เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

2.4.3 คำจำกัดความ (Definition)

อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้น(ปัจจัยที่ทราบค่า สามารถกำหนดและเปลี่ยนแปลงได้) ที่มีต่อตัวแปรตาม(คุณลักษณะที่สามารถทราบได้หลังจากการทดลองในแต่ละครั้ง หรือค่าที่ต้องการวัด)

ปัจจัย (Factor) หมายถึง คุณสมบัติใดๆที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณลักษณะในตัวผลิตภัณฑ์

ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่างๆของปัจจัยหนึ่งๆที่กำหนดในการทดลอง

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยในการทดลอง ที่ไม่ทราบลักษณะและ ไม่สามารถควบคุมได้

2.4.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

ก. การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การทำให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลในแต่ละการทดลองเท่าๆกัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ให้กับข้อมูลในทุกๆระดับที่ศึกษาให้เท่ากัน โดยการทำการทดลองแบบสุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 3 วิธี คือ

1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomization)
2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization)
3. การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomization within blocks)

ข. การทำซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูล เพื่อกำจัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ออก

ค. การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงๆ เพื่อลดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการทำเสมอไป

2.4.5 ลำดับขั้นตอนในการออกแบบและ วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่า ความต้องการในการผลิตคืออะไร ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคืออะไร ซึ่งการนิยามปัญหาในที่นี้ จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ในการทดลอง

2. การเลือกปัจจัยที่มีผล และระดับของปัจจัย เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่า มีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้น ควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายคือ ระบุว่าระดับที่ใช้ควรเป็นแบบใด แบบกำหนด (Fixed levels), แบบสุ่ม (Random levels) หรือ แบบผสม (Mixed levels)

2.1 แบบกำหนด (Fixed levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุม หรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.2 แบบสุ่ม (Random levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม หรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.3 แบบผสม (Mixed levels) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้ และแบบสุ่ม

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response variables) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่า นั้น จะต้องมีแม่นยำ รวมทั้งความถูกต้องของเครื่องวัดด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง จะต้องพิจารณาถึงจำนวนข้อมูลที่ทำซ้ำในการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้องทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยง รวมไปถึงต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัยต่างๆ

5. การทำการทดลอง ในขณะที่ทำการทดลอง จะต้องปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือ ต้องมีการสุ่ม การทำซ้ำ และข้อควรระวังในขณะที่ทำการทดลองคือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้ความผิดพลาด (Error) ที่ออกมามีน้อยที่สุด

6. การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะตีความข้อมูลพึงระลึกเสมอว่า วิธีทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดมีผล (Effect) เท่าใดได้แน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผล

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ ซึ่งอาจแสดงในรูปของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

2.4.6 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองนั้น มีความเหมาะสมเพียงไร ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด

$$\text{การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100\%$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) ต่ำ สามารถแก้ไขโดย

1. เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง
2. ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่
3. ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ยังต่ำอยู่

แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise factor) มีมาก จึงควรทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดผลจากปัจจัยรบกวนให้น้อยที่สุด

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking)

$$\text{จากสมการ: } Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปรตอบสนอง) ให้มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) และในการที่ y จะมีการกระจายแบบนี้ได้จะต้องให้ ε (ค่าความคลาดเคลื่อน) มีการกระจายแบบปกติ และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระด้วย คือมี $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$

การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นการแจกแจงปกติ (Normal Distribution)หรือไม่ โดย
 - การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 -goodness of fit test)
 - การทดสอบแบบโคโกโมรอฟ-สเมอร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov test)
 - การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่ใช้แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่ามีการกระจายแบบอิสระหรือไม่
3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (residual) ในแต่ละระดับปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (megaphone) แสดงว่า ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

3. การตั้งสมมุติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing)

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิติ นั้น จะมีความเสี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นการตรวจสอบ และวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องอยู่ภายใต้ความเสี่ยงดังกล่าว

การตั้งสมมุติฐานในการตรวจสอบ จะตั้งสมมุติฐานใน 2 ทางเลือกคือ

H_0 : ระดับของปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : ระดับของปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

ทั้งนี้ภายใต้ความเสี่ยงทั้ง 2 ชนิด คือ α และ β โดย

α หมายถึง ความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมุติฐานหลัก (Null Hypotheses) ทั้งที่สมมุติฐานหลักเป็นจริง

β หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมุติฐานหลัก (Null Hypotheses) ทั้งที่สมมุติฐานหลักไม่เป็นจริง

และจากความเสี่ยงทั้งของทั้ง 2 แบบนี้เอง จึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองไว้ เพื่อให้มีความเชื่อมั่น หรือมีความเสี่ยงในการยอมรับข้อมูล ตามที่กำหนดไว้ และในการวิเคราะห์ ก็มักจะกำหนดให้ค่าของ α มีค่าคงที่ และ ค่าของ β ให้มีค่าน้อยที่สุด

การตั้งสมมุติฐาน แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี

1. กรณีของรูปแบบกำหนด () จะเป็นการตรวจสอบว่า ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการหรือไม่ ดังนั้นสมมุติฐานที่ตั้ง คือ

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

หรือเขียนในรูปแบบสัญลักษณ์ เมื่อ τ คืออิทธิพลของปัจจัย คือ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_a = 0$

$H_1 : \tau_i \neq 0$

2. กรณีของรูปแบบสุ่ม (Random Model) จะเป็นการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ^2) จะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าอิทธิพล (effect) ที่เกิดขึ้นแน่นอนได้ ดังนั้นสมมุติฐาน คือ

$H_0 : \sigma^2 = 0$

$H_1 : \sigma^2 \neq 0$

2.4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

ผู้ที่นำวิธีการนี้มาใช้คือ ฟิชเชอร์ (Fisher) ซึ่งวิธีการนี้จากหลักการที่ว่า ในพิจารณาอิทธิพลของปัจจัย ให้วิเคราะห์ที่ความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของความแปรปรวน (Variance) แล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่า แสดงว่า ปัจจัย หรือระดับของปัจจัย ที่ทำให้เกิดความแตกต่างนั้น มีผลต่อคุณสมบัติที่ทำการวัด โดยตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square, MS) ซึ่ง

$$MS = \frac{SS}{df}$$

เมื่อ SS คือ ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)

$$F = \frac{Var (tr)}{Var (E)}$$

และ df คือ ชั้นของความอิสระ (degree of freedom) จากนั้นจะเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนโดยที่

Var (tr) คือ ความแปรปรวนของทรีทเมนต์

Var (E) คือ ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

และจากการใช้การกระจายแบบแจกแจงเอฟ (F-distribution) เป็นตัวทดสอบดังนั้น

จึงต้องใช้ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$

2.4.8 การเลือกแบบการทดลอง

ก. แผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design)

- ใช้กับการทดลองปัจจัยเดียว (Single factor experiment)
- ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีขนาดไม่มากนัก และไม่มีปัจจัยรบกวน

การทดลองจะทำโดยยึดหลักการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) และการดำเนินการซ้ำ (Replicaton)

ข. แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomized Complete Block Design)

ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยเดียว และทราบว่ามีปัจจัยรบกวน (Nuisance factor) อยู่ใน การทดลองโดยมีหลักการดังนี้

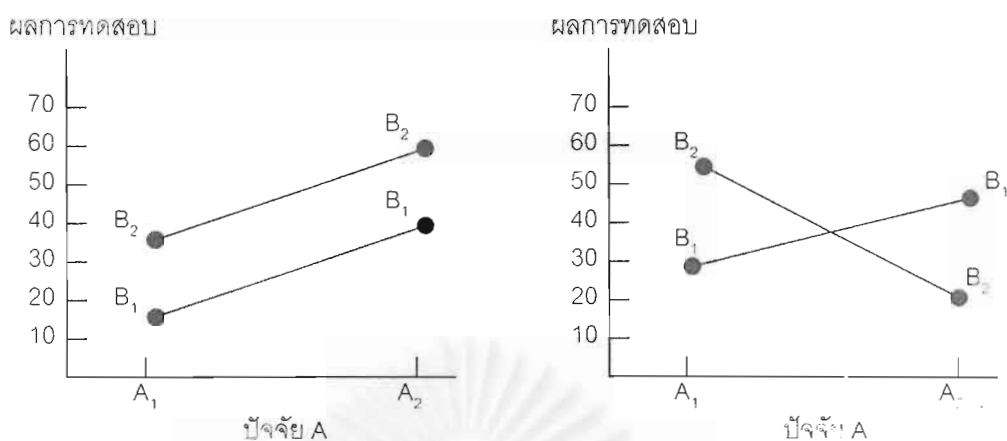
1. ทำการสุ่มทดลองทุกครั้ง (Random)
2. ทำการทดลองซ้ำตามจำนวนซ้ำที่กำหนด (Replicate)
3. ทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน ซึ่งอาจจะทำการบล็อกมากกว่าหนึ่ง

บล็อกก็ได้ขึ้นกับรูปแบบของการทดลอง

ค. แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple factor experiment) ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ได้อีกด้วย

อิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงแล้ว มีผลทำให้อิทธิพล (effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย ดังแสดงตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือ ปฏิสัมพันธ์ดังรูป



(1) ไม่มีผลของอิทธิพลของปัจจัยร่วม

(2) มีผลของอิทธิพลของปัจจัยร่วม

รูปที่ 2.20 แสดงผลของอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่เกิดขึ้นต่อผลการทดสอบ

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลทั่วไป (Factorial Design) มีรูปแบบทั่วไปคือ $A \times B \times C \dots$ แฟกทอเรียล เช่น $3 \times 2 \times 2$ แฟกทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

1. 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 2^2 แฟกทอเรียล, 2^3 แฟกทอเรียล เป็นต้น
2. 3^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้เพียง 3 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 3^2 แฟกทอเรียล, 3^3 แฟกทอเรียล เป็นต้น

เหตุที่ใช้ เนื่องจากการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล นั้นเหมาะสมกับรูปแบบ (Model) ที่มีความเป็นเส้นตรง (Linearity) จึงมีความถูกต้องในการตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์สภาพปัญหาเบื้องต้น

3.1 การวิเคราะห์ปัญหาและจุดบกพร่องของรอยเชื่อม

จากการศึกษาข้อมูล และสภาพปัญหาเบื้องต้นในขั้นตอนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติพบว่า ปัจจุบันมีปัญหาที่เกิดจากการเชื่อมเป็นจำนวนมาก ส่งผลกระทบต่อทางผู้ผลิต ทำให้ต้องจัดหาพนักงาน อุปกรณ์ และเครื่องมือเครื่องใช้ จำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการแก้ไขจุดบกพร่องของรอยเชื่อม (Touch-up) ต่างๆที่ออกจากส่วนการเชื่อมอัตโนมัติ นอกจากนี้จะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มระยะเวลาการผลิต (cycle time) ในส่วนการประกอบ (assembly) แล้วยังส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย เนื่องจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้น นอกจากจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ดีมีคุณภาพ ทั้งยังต้องอาศัยความสามารถ และประสบการณ์ในการเชื่อมด้วยมือ ของพนักงานอย่างมาก เพื่อที่จะให้ได้รอยเชื่อมที่ดี ได้มาตรฐาน ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญมากของการผลิต

โรงงานตัวอย่างที่ทำการศึกษา นี้ เป็นโรงงานที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทแหล่งจ่ายกำลังในวงจร (Power Supply Unit) ซึ่งเป็นแผ่นลายวงจรพิมพ์ ขนาดเล็ก ถึงขนาดกลางที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังของผลิตภัณฑ์อื่นอีกทอดหนึ่ง เช่น เครื่องแฟกซ์ (Fax machine), เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) และเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ เนื่องด้วยในปัจจุบันทางโรงงานได้ทำการเพิ่มกำลังการผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า จึงพยายามที่จะลดเวลาที่สูญเสียต่างๆในขั้นตอนการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้มากที่สุด

ด้วยเหตุนี้คุณภาพของรอยเชื่อมที่ดี ที่ออกจากเครื่องเชื่อมอัตโนมัติจึงเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตที่จะช่วยลดเวลา แรงงาน และวัตถุดิบในการแก้ไขจุดบกพร่องของรอยเชื่อม (Touch-up) และเพิ่มความมั่นใจในกระบวนการผลิตได้มากยิ่งขึ้นดังนั้นผู้ศึกษาจึงร่วมกับทางผู้ผลิต ทำการศึกษาและค้นคว้า หาเงื่อนไข หรือปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม ในขั้นตอนการเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาจากการทำงานในปัจจุบันเพื่อร่วมกันกำหนดระดับการทำงานที่เหมาะสมต่อสภาพการผลิต ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบจากจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่ลดลงจากการเปลี่ยนสภาวะการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

เนื่องจากสภาพการผลิตเดิมของทางโรงงานยังขาดความรู้ ความเข้าใจในขั้นตอน และกระบวนการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ จึงไม่ค่อยได้รับความเอาใจใส่ในการควบคุม ดูแลและป้องกันการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมเท่าที่ควร และทำให้ไม่ค่อยมีการเก็บรวบรวมข้อมูลการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นในแต่ละวันเพื่อทำการศึกษาแต่อย่างใด ดังนั้นทางผู้ศึกษาจึงได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจุดบกพร่องของรอยเชื่อมเบื้องต้นที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุ และวิธีการควบคุมแก้ไข โดยได้ทำการสุ่มเก็บข้อมูลในแต่ละวันและเวลาที่ได้ทำการผลิตโมเดล ซึ่งได้ทำการเลือกไว้ ได้เริ่มทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนกันยายน จนถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2541 เป็นจำนวนทั้งสิ้น 108 ชิ้นงาน ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

ชนิดของจุดบกพร่องของ รอยเชื่อม	จำนวนจุดบกพร่องของ รอยเชื่อม (จุด)	ร้อยละ
Excessive	398	18.99
Bridging or Shorting	771	36.78
Insufficient	760	36.26
Incomplete	167	7.97
Total	2096	100

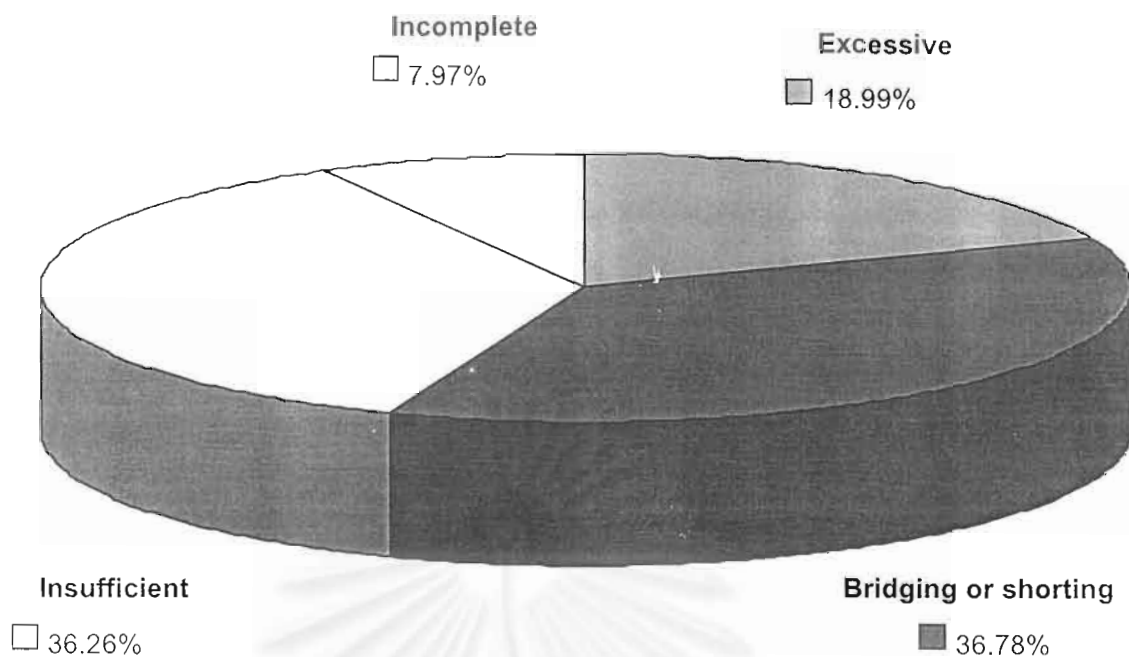
Average Defective joints/ Collected Piece **19.41**

(1 Collected Piece equal to 6 small Pieces)

หมายเหตุ จำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ยต่อแผ่น คำนวณจากจำนวน
ชิ้นงานที่ทำการสุ่มเก็บเป็นจำนวนทั้งหมด 108 ชิ้น

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมจากการผลิต Model A001 โดย
การสุ่มเก็บในช่วงเดือน กันยายน – พฤศจิกายน พ.ศ. 2542

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงสัดส่วนของจุดบกพร่องจากการผลิต Model A001
ในช่วงเดือน กันยายน - พฤศจิกายน 2542

จากกราฟแสดงจำนวนสัดส่วนของจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่พบจากการผลิตในช่วงระหว่างเดือนกันยายนถึง เดือนพฤศจิกายนพบว่า ปัญหาหลักที่พบบนชิ้นงานส่วนใหญ่มีลักษณะของการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมแบบ Insufficient และ Bridging or Shorting ซึ่งพบเป็นจำนวน 73% ของทั้งหมด ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นสามารถตรวจพบได้ด้วยตา โดยทำการพิจารณาควบคู่กับมาตรฐานของรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพของทางบริษัท และจะเกิดขึ้นในจุดที่มักเกิดขึ้นเป็นประจำจึงสามารถตรวจพบได้ง่าย ซึ่งในการผลิตในปัจจุบันยังขาดความเอาใจใส่ในการดูแลป้องกัน และการตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นว่าเป็นส่วนสำคัญของปัญหาทั้งหมด โดยมากแล้วการทำการแก้ไขและป้องกันนั้นจำเป็นจะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในกระบวนการเชื่อมรวมไปถึงวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการผลิต ซึ่งจำเป็นจะต้องได้รับการร่วมมือสนับสนุนจากผู้บริหารระดับสูงจึงจะสามารถทำการแก้ไขและป้องกันการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะโดยส่วนมากแล้วมักจะละเลยในส่วนของการป้องกันปัญหาที่จะมาจากการจัดการวางแผนจากส่วนบนและส่วนของการผลิต

การเปลี่ยนแปลง และการหามาตรการการป้องกันที่ดี เพื่อไม่ให้เกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่าการตรวจสอบ เพราะการตรวจสอบจะเป็นการกระทำที่จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต ในการป้องกันและการแก้ปัญหาที่ดีนั้นคือการควบคุมตัวแปรในการผลิตทุก ๆ ตัวที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยทำการควบคุมและปรับตั้งให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมกับการผลิตนั้นๆ การหาค่า

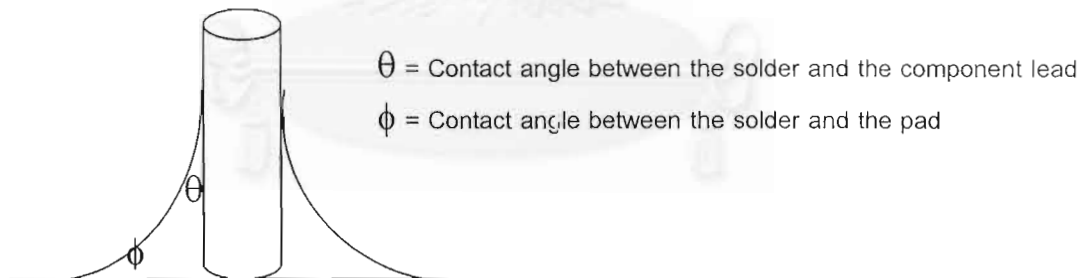
ปรับตั้งที่เหมาะสมนั้นจะต้องกระทำในครั้งแรกของการทดลองการผลิต จนกระทั่งปรับได้ค่าที่เหมาะสม และจะทำการบันทึกค่าควบคุมที่เหมาะสมนั้นเพื่อใช้ในการควบคุมการผลิตในครั้งต่อไป

จากการศึกษาการแก้ปัญหาคุณภาพในการผลิตขั้นต้นมักจะมองในเรื่องของตัวแปรการเชื่อม เบื้องต้น เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ (Flux's Specific Gravity), ความเร็วของสายพาน (Conveyor Speed) เป็นต้น แต่การปรับแก้ในเบื้องต้นนั้นยังคงไม่สามารถแก้ปัญหาได้ทั้งหมดเนื่องจากการไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ของปัญหาและสาเหตุที่เกิดขึ้น ดังนั้นในเบื้องต้นจึงควรทำการศึกษา ปัจจัยพื้นฐานก่อนที่จะหาแนวทางในการป้องกันในลำดับถัดไป

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

ในส่วนของฝ่ายผลิตการตรวจสอบลักษณะของรอยเชื่อมที่ดีนั้น นิยมที่จะใช้รูปลักษณะภายนอก ในการตรวจสอบว่าเป็นรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพหรือไม่ ซึ่งสามารถพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมติดที่ดีของแผ่นลายวงจรพิมพ์ กับขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยอาศัยการตรวจสอบลักษณะฟิลเล็ต (Fillet) ของรอยเชื่อม ซึ่งลักษณะของฟิลเล็ตที่ดีจะต้องมีลักษณะดังนี้

1. ต้องมีลักษณะการเปียกของโลหะผสมโซลเดอร์ที่เต็มแผ่นลายทองแดง (Full Wetting)
2. ต้องมีลักษณะคล้ายกรวยคว่ำที่มีขอบเป็นรูปเว้า (Concave Conical Shape) ซึ่งจะทำให้เห็นถึงมุมสัมผัสที่น้อยของโลหะผสมโซลเดอร์กับแผ่นลายทองแดง และขาอุปกรณ์
3. ต้องมีพื้นผิวสัมผัสที่เรียบเป็นเนื้อเดียวกันตลอดและสว่าง (Smooth and bright)

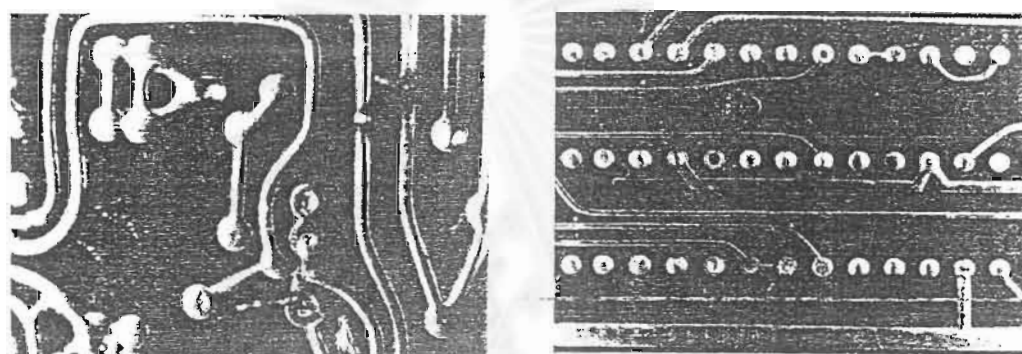


รูปที่ 3.2 แสดงมุมสัมผัสของโลหะผสมโซลเดอร์ที่ได้คุณภาพ

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมนั้นมีมากมาย ซึ่งการที่จะทำให้ได้คุณภาพของรอยเชื่อมออกมาดีนั้น จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยทั้งหมดให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม ความเข้มงวดในการควบคุมจะขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพที่ยอมรับ ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

3.2.1 ความสามารถในการเชื่อมติดโลหะผสมโซลเดอร์ของแผ่นลายวงจรพิมพ์ และขาอุปกรณ์ (Solderability of the printed circuit board and the component lead)

ในการทดสอบความสามารถในการเชื่อมติดโซลเดอร์ (Solderability) มักนิยมใช้ลักษณะพื้นผิวของแผ่นลายวงจรพิมพ์เป็นเกณฑ์ในการวัด เพื่อแสดงให้เห็นถึงแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่มีคุณภาพเหมาะสมกับกระบวนการผลิต



Board with poor solderability.

Board with good solderability.

รูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ได้คุณภาพ

นอกจากแผ่นลายวงจรพิมพ์แล้วยังรวมไปถึงความสามารถในการเชื่อมติดโลหะผสมโซลเดอร์ของขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้กับแผ่นลายวงจรพิมพ์นั้นด้วย โดยทั่วไปขาอุปกรณ์นิยมทำจากลวดทองแดงเคลือบดีบุก ซึ่งถ้าชั้นดีบุกที่เคลือบอยู่นั้นบางลง หรือมีรูพรุนจะทำให้อากาศภายนอกที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับทองแดงภายใน ทำให้ความสามารถในการเชื่อมติดโลหะผสมโซลเดอร์ของขาอุปกรณ์ลดลง และยากต่อการผลิต ขาอุปกรณ์บางชนิดจะทำจากอัลลอยด์ของเหล็กและนิกเกิล (Kovar) ซึ่งมักจะมีความสามารถในการเชื่อมติดโลหะผสมโซลเดอร์ที่น้อย ทำให้จำเป็นจะต้องใช้ฟลักซ์หรือน้ำยาประสานการเชื่อมที่มีสารกระตุ้นในการเชื่อมสูงมาก เพื่อให้เกิดการเชื่อมติดที่ง่ายขึ้น ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมติดโลหะผสมโซลเดอร์ของส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแผ่นลายวงจรพิมพ์ หรืออุปกรณ์จึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่จะได้รับต่อการผลิต

3.2.2 ลักษณะการออกแบบของแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Design of the board)

แบบของแผ่นลายวงจรพิมพ์จะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของฟิลเล็ทที่ได้จากการเชื่อม ซึ่งจะต้องได้รับการพิจารณาเมื่อต้องการถึงคุณภาพเป็นสำคัญดังเช่น

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ใช้เสียบขาอุปกรณ์แต่ละชนิดจะต้องเหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขาอุปกรณ์นั้นๆ โดยพิจารณาถึงหลักของ capillary force ในการออกแบบ
- แผ่นรองลายวงจรของขาอุปกรณ์ และลายเชื่อมลายวงจรทองแดง (pads and wide conductors) ควรออกแบบให้มีขนาดที่มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุดในการเชื่อม นอกจากนี้ผู้ออกแบบควรจะต้องคำนึงถึงความสมมาตร ความสมดุลของน้ำหนักที่กระจายบนแผ่น และขนาดของแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตอีกด้วย

3.2.3 การใช้สารประสานการเชื่อม หรือฟลักซ์ (Fluxing)

จากหน้าที่ของฟลักซ์ที่ได้กล่าวถึงเบื้องต้นในบทที่ 2 แล้วนั้น ฟลักซ์จึงถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม เพราะนอกจากจะทำหน้าที่กำจัดคราบออกไซด์บนแผ่นลายวงจรพิมพ์และขาอุปกรณ์แล้ว ยังป้องกันการเกิดออกไซด์ขึ้นใหม่ขณะทำการเชื่อม โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งชนิดของฟลักซ์ได้เป็น 3 ประเภทตามชนิดของสารกระตุ้นที่เติมลงไปในฟลักซ์ เพื่อเพิ่มความสามารถของฟลักซ์ในการทำปฏิกิริยากับออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น ดังนี้

- *R (Rosin or nonactivated flux)* เป็นฟลักซ์ชนิดที่อ่อนเบา และมีความสามารถในการกำจัดออกไซด์ได้น้อยที่สุด และนิยมใช้น้อยที่สุด
- *RMA (Rosin mildly activated)* มีความสามารถในการกำจัดออกไซด์ได้ดีขึ้นถึงปานกลาง และมักเติมสารเอมีน ไฮโดรคลอไรด์เป็นสารกระตุ้น นิยมใช้มากใน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพราะนอกจากจะไม่กัดกร่อนแผ่นลายวงจรพิมพ์และอุปกรณ์ แล้วยังไม่ทำปฏิกิริยาหลังการเชื่อมอีกด้วย
- *RA (Rosin activated)* เนื่องจากมีการเติมสารกระตุ้นที่มีฤทธิ์มากทำให้สามารถทำงานได้ดีมาก แต่จำเป็นจะต้องล้างออกหลังจากขั้นตอนการเชื่อมแล้ว เพราะถ้าทิ้งไว้จะมีฤทธิ์กัดกร่อนแผ่นลายวงจรพิมพ์

3.2.4 การปรับแต่งส่วนของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ (Adjustment of the Soldering machine)

3.2.4.1 ส่วนการใช้สารประสานการเชื่อม หรือฟลักซ์ (The Flux Station)

ในส่วนของการเคลือบฟลักซ์ลงบนแผ่นลายวงจรพิมพ์นั้น จะต้องถูกควบคุมให้ทำงานได้อย่างถูกต้องไม่ว่าจะเป็น

- ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ (Flux's Specific Gravity) ในที่นี้จะหมายความเดียวกับค่าความเข้มข้นของฟลักซ์ (Flux's Density)
- ค่าความหนืด (Viscosity)
- ชนิดและ ส่วนผสมของตัวทำละลายที่ใช้ (Type and Solvent-to-Flux ratio)
- ความสูงของฟองฟลักซ์ (Liquid Flux)
- ความดันอากาศที่ใช้ (Air Pressure)
- อุณหภูมิขณะใช้งาน (Temperature) เนื่องจากค่าความหนืดและความถ่วงจำเพาะจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

รวมทั้งความสะอาดของลมที่ใช้โดยต้องปราศจากน้ำและน้ำมัน และความถี่บ่อยในการถ่ายเปลี่ยนฟลักซ์รวมไปถึงการทำความสะอาดหินทำฟอง (Stone) และท่อลมต่างๆที่มีคราบ ฟลักซ์เกาะติด

3.2.4.2 ส่วนของการอบความร้อน (Preheating)

ในการที่จะให้แผ่นลายวงจรพิมพ์ได้รับความร้อนที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการเชื่อม ภายได้ช่วงเวลานั้นๆนั้นทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นให้ความร้อนโดยขดลวดความร้อน รังสีอินฟราเรด หรือวิธีใดก็ตามสิ่งที่จะต้องดูแลและควบคุมคืออุณหภูมิของแผ่นลายวงจรพิมพ์ก่อนทำการเชื่อม ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือวัดความร้อนที่แผ่นลายวงจรพิมพ์ได้รับ โดยจะต้องทำการควบคุมให้ได้ตามค่าที่กำหนดตลอดเพื่อให้ส่วนอบความร้อนทำหน้าที่ของตนเองได้อย่างสมบูรณ์ ไม่ว่าจะเป็นการกระตุ้นการทำงานของฟลักซ์ ,การระเหยฟลักซ์ให้แห้ง และการป้องกันเกิด Thermal shock

3.2.4.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเชื่อม (Soldering Temperature and Time)

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมจะถูกปรับและกำหนดไว้แน่นอน และต้องทำการควบคุมให้ได้ค่าที่ถูกต้อง อุณหภูมิของการเชื่อม (อุณหภูมิของน้ำโลหะผสมโซลเดอร์) ที่ใช้ทั่วไปมักจะตั้งไว้ที่ 480 °F หรือ 250 °C และระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมมักจะใช้อยู่ในช่วง 3 – 5 วินาที

3.2.4.4 ส่วนพลศาสตร์ของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ (Soldering Machine Dynamics)

ในส่วนของการใช้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Wave Soldering) เป็นกลไกสำคัญในการเชื่อม ส่วนพลศาสตร์ของเครื่องจะได้แก่ ความสูง, รูปร่าง, ขนาด, ความเรียบ และความเร็วของคลื่นในแต่ละระดับชั้นของความสูง รวมไปถึงระบบสายพานลำเลียง (Conveyor System) ที่จะประกอบไปด้วยลักษณะของส่วนลำเลียง ชนิดและขนาดของซีพิน มุมและองศาความเอียงของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ที่สัมผัสกับหน้าคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ ทั้งนี้ส่วนต่างๆที่กล่าวมาแล้วนั้นจะต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสม พร้อมทั้งต้องดูแลและควบคุมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

3.2.4.5 ปริมาณของสารเจือปนในบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ (Impurities)

โลหะผสมโซลเดอร์ที่ใช้ควรจะต้องได้รับการตรวจสอบเป็นประจำ ไม่ว่าจะเป็นระดับของเหล็ก ทองแดง หรือสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่มักติดมากับแผ่นลายวงจรพิมพ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะถ้ามีปริมาณของสารปนเปื้อนมากเกินไป จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะผิดปกติไปตามชนิดและปริมาณของสารปนเปื้อนนั่นๆ

3.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตในโรงงานตัวอย่าง

จากการศึกษาเบื้องต้นในกระบวนการเชื่อมโดยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติของโรงงานตัวอย่างพบว่า เครื่องที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นเป็นแบบ Wave Soldering Machine ซึ่งมีหลักการ และการทำงานคล้ายคลึงกับเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่นิยมใช้โดยทั่วไป โดยปกติแล้วเครื่องเชื่อมอัตโนมัติมักจะประกอบด้วยส่วนควบคุมต่างๆมากมายตามแต่ทางผู้ผลิต บางชนิดก็เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ จำเป็นจะต้องควบคุมร่วมกับคน แต่บางรุ่นก็ถูกออกแบบให้ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นจะต้องเหมาะสมกับสภาพการผลิตและการลงทุน พร้อมทั้งต้องมีระบบความปลอดภัยที่รัดกุมอีกด้วย

โดยเครื่องเชื่อมตีบุก-ตะกั่วที่ทำการผลิตอยู่เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ ประกอบไปด้วยส่วนควบคุมต่างๆดังนี้

- Electric power system คือส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกจ่ายเข้ามาใช้ในวงจรทั้งหมด
- Flux control system คือส่วนของระบบที่ใช้ควบคุม และตรวจสอบความเข้มข้นของ ฟลักซ์ โดยทำหน้าที่ปรับความเข้มข้นของฟลักซ์ให้ได้ตามค่าที่กำหนด
- Pump & Nozzle system คือส่วนของระบบท่อสูบที่ทำหน้าที่ดึงโลหะผสมโซลเดอร์ไหลผ่านหัวฉีดขึ้นมาสู่แผ่นลายวงจรพิมพ์ ที่อยู่ภายในบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอร์ไหลวน โดยลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของหัวฉีด (Nozzle Dimension)

- Temperature control system คือส่วนของระบบทำความร้อน และระบบควบคุม ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิที่ข้ามขีดจำกัดที่ตั้งไว้ ของทั้งส่วนอบความร้อน ซึ่งเป็นแบบขดลวดทำความร้อน (Preheat) และของส่วนควบคุมอุณหภูมิของบ่อโลหะผสมโซลเดอร์
- Transportation system คือส่วนของสายพานลำเลียง และส่วนควบคุมความเร็ว
- Air Piping system คือส่วนของระบบท่อลมที่ใช้ในการทำฟองฟลักซ์ (Foam Fluxing)
- Ventilation system คือส่วนของระบบท่อดูดอากาศ ที่ใช้กำจัดไอของโลหะหรือฟลักซ์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อม

จากการวิเคราะห์ถึงลักษณะคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากเครื่องเชื่อมอัตโนมัติร่วมกับระบบการทำงานที่เกี่ยวข้องกันของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ เราจึงสามารถคาดหมายปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อคุณภาพของการเชื่อมภายใต้สภาวะการทำงานได้ดังนี้

Controlled Factors	Uncontrolled Factors
Solder Temperature	Flux Type
Preheat Temperature	Solder Type
Conveyor Speed	Conveyor Angle
Flux's Specific Gravity	Solder wave Depth
	Type of Components
	Dimension & Type of PCB

Layout of the Components on the Board

ตารางที่ 3.2 แสดงการแบ่งแยกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในการผลิต Model A001

นอกจากนี้ยังต้องดูแล และควบคุมสภาพการทำงานของส่วนต่างๆให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยสามารถอ้างอิงตามคู่มือการปฏิบัติงาน (Manual Instruction) ของเครื่องที่ได้กำหนดไว้เช่น

- ระดับของโลหะผสมโซลเตอร์ในบ่อบรรจุ
- ระดับของฟลักซ์ในอ่างบรรจุ
- ระดับความดันลม ที่ใช้ในส่วนของการทำฟองฟลักซ์ ฯลฯ

ในส่วนของการทดลอง ได้พิจารณาผลของปัจจัยร่วมอันเนื่องมาจากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยคือ Preheat Temperature, Conveyor Speed และ Flux's Specific Gravity ตามที่กล่าวไว้ในเบื้องต้นแล้ว ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะของปัจจัยทั้งสามที่ทางโรงงานตัวอย่างได้เคยทำการวิเคราะห์หามาก่อนหน้านี้ พบว่าไม่พบผลของปัจจัยร่วมที่เกิดจากปัจจัยทั้งสามดังกล่าวต่อลักษณะการเกิดจุดบกพร่องของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ดังนั้นผู้ทดลองจึงทำการทดลองแต่เพียง Single Factor Experiment ไม่ได้ทำการทดลองแบบ Factorial Experiment ซึ่งจะลดค่าใช้จ่ายในการทดลองครั้งนี้ลงได้อย่างมาก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

4.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นวิธีการหนึ่ง ที่ใช้ในการออกแบบการทดสอบกระบวนการทำงาน หรือกระบวนการผลิตเริ่มต้นโดยกำหนดค่าตัวแปรของระบบ หรือกระบวนการซึ่งทำให้สามารถทราบผลลัพธ์ของระบบ หรือกระบวนการที่เปลี่ยนไป และเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้เกิดการปรับปรุงและ พัฒนารูปแบบของวิธีการผลิต หรือกระบวนการผลิตต่างๆ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะทำการค้นหาและยืนยันข้อเท็จจริง หรือศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อข้อเท็จจริงนั้น นอกจากนี้การวิเคราะห์การทดลองเป็นวิธีการเชิงสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นการสรุปผลของปัจจัยและอิทธิพลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองของตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์ของระบบที่ศึกษา ณ ระดับความเชื่อมั่นหนึ่งๆ หรือที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนด

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณภาพของรอยเชื่อม จากการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ให้เชื่อมติดกับแผ่นลายวงจรพิมพ์ จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสมโซลเดอร์ที่มีอัตราส่วนผสมของโลหะดีบุกและตะกั่วแตกต่างกันออกไปตามหน้าที่การทำงาน หรือตามคุณสมบัติของโลหะผสมโซลเดอร์ที่ต้องการใช้งานในการผลิต รวมไปถึงการควบคุมสภาวะการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ ให้แผ่นลายวงจรพิมพ์ผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ได้อย่างสมบูรณ์

4.1.1. ปัจจัยที่ทำการศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงคุณภาพของรอยเชื่อม ที่สามารถทำการตรวจสอบได้ง่ายๆ ได้ด้วยสายตา (Visual Inspection) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งในการตรวจสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น การตรวจสอบด้วยการฉายรังสี การทดสอบการนำไฟฟ้า หรือการทดสอบแรงเหวี่ยง เป็นต้น ทั้งในด้านค่าใช้จ่าย วิธีการตรวจสอบ และความถูกต้องที่ได้ในการตรวจสอบลักษณะที่ไม่ได้คุณภาพของรอยเชื่อม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยง่ายจากการพิจารณาลักษณะของฟิลเล็ทที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม จากการข้อมูลการศึกษาปัญหาของโรงงานตัวอย่าง พบว่าลักษณะของปัญหาที่พบมากคือ

- Excessive Solder
- Insufficiency Solder
- Bridging or Shorting Solder

หลังจากที่ได้ทำการประมวลข้อมูล ที่ได้จากการค้นคว้าได้ทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ ตลอดจนพิจารณาถึงการควบคุม และวัดค่าที่เป็นไปได้ ทำให้ได้ปัจจัยที่ศึกษาซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมดังนี้

- อุณหภูมิของแผ่นลายวงจรมิมพ์ในช่วงการอบความร้อน (Preheat Temperature)
- ความถ่วงจำเพาะ หรือความเข้มข้นของฟลักซ์ (Flux's Specific Gravity)
- ความเร็วของสายพาน (Conveyor Speed)

และกำหนดปัจจัยที่ควบคุมคือ ชนิดของฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลอง ,ชนิดและอัตราส่วนผสมของโลหะผสมโซลเดอ์ที่ใช้ในการทดลอง ,อุณหภูมิของบ่อบรรจุโลหะผสมโซลเดอ์

4.1.2. การกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษา

จากสมมุติฐานในการออกแบบการทดลอง และข้อมูลจากการผลิต ซึ่งสภาวะการดำเนินการผลิตในปัจจุบัน กำหนด

อุณหภูมิในช่วงการอบความร้อน	105 ± 5	$^{\circ}\text{C}$
ความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์	0.820 ± 0.003	
ความเร็วของสายพาน	100 ± 10	cm /min

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือส่วนแรกจะเป็นส่วนของการศึกษาลักษณะและตรวจหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อปัจจัยตอบสนอง เนื่องจากไม่ทราบลักษณะอิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษา จากคู่มือการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่สามารถทำการผลิตได้ทั้งหมด เพื่อทำการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน ส่วนที่สองคือการดำเนินการทดลองหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงและควบคุมให้เหมาะสมกับสภาพการผลิต ซึ่งช่วงที่ทำการศึกษาของตัวแปรแต่ละตัวจะเป็นจุดที่สนใจในการผลิต ระดับของปัจจัยแบ่งได้ดังนี้

4.1.2.1 อุณหภูมิในช่วงการอบความร้อน

อุณหภูมิในส่วนของการอบความร้อน ซึ่งสภาวะการผลิตที่กำหนดในปัจจุบัน เป็น $100 - 110$ $^{\circ}\text{C}$ และจากความสามารถในการทำความร้อนของเครื่อง จากขดลวดทำความร้อนที่อยู่ในส่วนของการอบความร้อนนั้นสามารถวัดอุณหภูมิที่ได้รับสูงสุดประมาณ 110 $^{\circ}\text{C}$ ณ. ส่วนบนของแผ่นพิมพ์ลายวงจรมิมพ์ ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะสมกับการเชื่อมนั้นถูกอ้างอิงตามทฤษฎีที่ปฏิบัติต่อกันมา กำหนดไว้ที่อุณหภูมิประมาณ $80 - 90$ $^{\circ}\text{C}$ จึงทำการทดลองหาช่วงระดับอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยลดอุณหภูมิทีละ 10 $^{\circ}\text{C}$ จากอุณหภูมิ สูงสุดที่วัดได้ประมาณ 100 $^{\circ}\text{C}$ ทั้งหมด 4 ระดับ คือ 100 , 90 , 80 และ 70 $^{\circ}\text{C}$

4.1.2.2 ความถ่วงจำเพาะ หรือความเข้มข้นของฟลักซ์

ฟลักซ์ที่ทางโรงงานตัวอย่างใช้อยู่เป็นชนิดที่มีอัตราส่วนผสมของยางสนต่อตัวทำละลายในปริมาณที่น้อย จึงไม่ค่อยหลงเหลือคราบฟลักซ์บนแผ่นลายวงจรมพิมพ์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยนิยมเรียกว่า “No Clean Flux” ซึ่งจากการศึกษาสภาวะการผลิตพบว่าด้วยข้อกำหนดของส่วนควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติชนิดนี้ จะสามารถใช้ได้กับฟลักซ์ที่มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.800 – 0.900 เท่านั้น จึงทำการทดลองหาช่วงความถ่วงจำเพาะ หรือความเข้มข้นของฟลักซ์ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยทำการทดลองผลิตเริ่มต้น ณ. ค่าความถ่วงจำเพาะต่างกัน 7 ระดับ คือ 0.800 ,0.810 ,0.820 ,0.830 ,0.840 ,0.850 และ 0.860

4.1.2.3 ความเร็วของสายพาน

ความเร็วของสายพานที่ใช้ในสภาวะการผลิตในปัจจุบันนี้กำหนดไว้ที่ความเร็วประมาณ 90 – 110 cm /min พร้อมกันกับการศึกษาข้อจำกัดและความสามารถในการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติพบว่าความเร็วของสายพานสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วงความเร็วระหว่างระหว่าง 0 – 200 cm /min ซึ่งในการทดลองหาระดับความเร็วของสายพานที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองดังกล่าวจึงทำการทดลองเพิ่มและลดระดับความเร็วของสายพานการผลิตที่ละ 10 cm /min จากความเร็วที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน 100 cm /min เป็นจำนวนทั้งหมด 8 ระดับ ดังนี้ 70 ,80 ,90 ,100 ,110 ,120 ,130 และ 140

4.1.3 การใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง

4.1.3.1 การทำแบบสุ่ม (Randomization) เป็นการให้โอกาสแก่ข้อมูลในการเฉลี่ยและลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป โดยในกระบวนการได้เลือกใช้การทำแบบสุ่มอย่างง่าย

4.1.3.2 การทดลองซ้ำ (Replication) อาจเรียกอีกอย่างได้ว่าการกำหนดจำนวนครั้งในการทดลอง ซึ่งควรมีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งในระดับของปัจจัยต่างๆเหมือนกัน เพื่อเพิ่มความถูกต้อง หรือลดความผิดพลาดของข้อมูลในการเก็บรวบรวมข้อมูล และในช่วงการทดลองอีกด้วย

4.1.4 การเลือกค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้ว คุณลักษณะของตัวแปรที่ถูกนำมาวัดผล และทำการวิเคราะห์ คือค่าเฉลี่ย หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือทั้งสองค่า เพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้องมากที่สุด และจำกัดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นให้น้อยลงเท่าที่จะทำได้

4.1.5 รูปแบบของการทดลอง

การทดลองนี้ใช้การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ เพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอ, ความล่าช้าของทั้งเครื่องมือ และผู้ทำการทดลอง รวมทั้งอคติที่อาจเกิดขึ้นได้ในผู้ทำการทดลอง และการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ก็เพราะต้องการศึกษาถึงอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของบางปัจจัยที่อาจเกิดขึ้นได้ในการทดลอง

4.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ได้ทำการใช้วิธีการเชิงสถิติวิศวกรรมในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการทดลอง และข้อสรุปจากการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ (Model Adequacy Checking) ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้ผลของการวิเคราะห์มีความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ด้วยกราฟของตัวแปรตอบสนอง (Response Plot)

4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

เนื่องจากไม่ทราบถึงลักษณะอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพ ดังนั้นจึงทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ศึกษา จากคู่มือการทำงาน of เครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่สามารถทำการผลิตได้ทั้งหมด เพื่อทำการทดลองศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน โดยในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ในส่วนแรกจะเป็นส่วนของการศึกษาลักษณะและตรวจหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัยตอบสนอง ส่วนที่สองคือการดำเนินการทดลองหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ดำเนินการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ลงบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ Model A001 พร้อมกับตรวจสอบตำแหน่ง และความถูกต้องในการวาง รวมทั้งตรวจสอบความแน่นของชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อป้องกันการกระแทกหลุดออกจากแผ่นลายวงจรพิมพ์ ในขณะที่ทำการเคลื่อนย้ายขณะทำการทดลอง
2. ดำเนินการปรับสภาพและควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อมตลับ-ตะกั่วอัตโนมัติให้ได้ตามสภาพที่กำหนดโดยการออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยจะทำการปรับสภาพปัจจัยไปตามแผนการออกแบบการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย
 - ส่วนที่หนึ่ง คือการทดลองการผลิตที่ทำการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรเพียง ครั้งละหนึ่งตัว เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่ทำการทดลอง ซึ่งปัจจัยที่ทำการเปลี่ยนนั้นก็คือปัจจัยการผลิตทั้งสามที่กล่าวแล้วในข้างต้น ตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย โดยจะทำการทดลองในระดับปัจจัยละ 3 ซ้ำ (3 replicates) ส่วนปัจจัย

ต่างๆที่ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำเป็นจะต้องทำการควบคุมให้อยู่ในสภาพที่ดี และคล้ายคลึงกับสภาพที่ทางโรงงานดำเนินการผลิตอยู่ด้วย

- ส่วนที่สอง คือการทดลองการผลิตที่ทำการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยการผลิตที่ทราบอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยจะทำการทดลองเปลี่ยนค่าของปัจจัยหลายๆชนิดพร้อมกัน ส่วนปัจจัย และสภาวะต่างๆที่ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำเป็นจะต้องทำการควบคุมให้อยู่ในสภาพที่ดี และคล้ายคลึงกับสภาพที่ทางโรงงานดำเนินการผลิตอยู่ด้วย
3. วิเคราะห์ผลของการเชื่อมที่ได้ในแง่ของคุณภาพของรอยเชื่อม โดยพิจารณาลักษณะของฟิลเล็ททุกจุดบนแผ่นลายวงจรมิมพ์ ที่ออกมาจากเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ พร้อมกับบันทึกจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นในทุกๆการทดลอง ซึ่งจะทำการพิจารณาควบคู่กับมาตรฐานรอยเชื่อมที่ได้คุณภาพของทางโรงงานตัวอย่าง
 4. วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดบกพร่อง และแนวโน้มทางด้านคุณภาพ ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการผลิตต่างๆ

4.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 โลหะผสมโซลเดอ์ที่มีอัตราส่วนระหว่างดีบุกกับตะกั่วอยู่ที่ 63/37%โดยน้ำหนัก

4.3.2 สารประสานการเชื่อม หรือฟลักซ์

ฟลักซ์หรือสารประสานการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิด Low Residue และ No Cleaning Type Post Flux โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.825 ± 0.005 ที่อุณหภูมิ 20°C

4.3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อน (Dip Tester)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของแผ่นลายวงจรมิมพ์ ในช่วงส่วนของการอบความร้อน โดยจะใช้เซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับแผ่นลายวงจรมิมพ์ แล้วแสดงผลเป็นตัวเลขทางหน้าจอ นอกจากนั้นยังสามารถใช้วัดอุณหภูมิของน้ำโลหะผสมโซลเดอ์ และใช้วัดช่วงเวลาที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สัมผัสกับน้ำโลหะผสมโซลเดอ์ หรือช่วงเวลาในขณะที่เกิดการเชื่อมนั่นเอง (Dip Time)

4.3.4 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Hydrometer)

เป็นอุปกรณ์อย่างง่ายชนิดซึ่งใช้ในการวัดค่าความถ่วงจำเพาะ หรือค่าความเข้มข้นของฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยการใช้หลอดแก้วชุดฟลักซ์เข้ามาในปริมาณหนึ่ง แล้วอ่านค่าที่กระเปาะซึ่งลอยอยู่ในฟลักซ์ตัวอย่างที่ดูดเข้ามา ถ้าฟลักซ์นั้นมีความเข้มข้นมากก็จะทำให้กระเปาะ

แกวล์อยสูงมาก ค่าที่อ่านก็จะมากตาม โดยค่าที่อ่าน ณ จุดที่ผิวขอบของสารนั้นติดกับตัวระเปาะนั้น หมายถึงค่าความถ่วงจำเพาะของสารนั้นๆ

4.3.5 เครื่องเชื่อมตีบุก-ตะกั่วอัตโนมัติที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องเชื่อมตีบุก-ตะกั่วอัตโนมัติที่ใช้ในการทดลองคือ เครื่องเชื่อมที่ใช้หลักการของการใช้ปั๊มสร้างคลื่นของน้ำโลหะผสมโซลเดอร์ (Wave Soldering) เป็นกลไกหลักในการเชื่อม ใช้ขดลวดทำความร้อน (Core Rod Preheater) ในการสร้างความร้อนจากกระแสไฟฟ้าพร้อมกับแผ่ความร้อนโดยการอาศัยอากาศเป็นตัวกลาง และใช้หลักการทำฟอง (Foam Fluxing) ในการสร้างฟองฟลักซ์ให้สัมผัสกับแผ่นลายวงจรพิมพ์

4.3.6 แวนขยาย

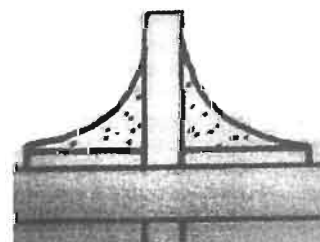
ใช้สำหรับขยายจุดบกพร่องต่างๆ และเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบสำหรับลักษณะของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในการทดลอง ซึ่งต้องการกำลังขยายไม่มากนัก

4.4 วิธีการทดสอบผลการทดลอง

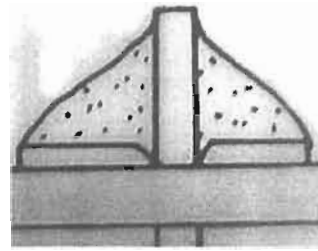
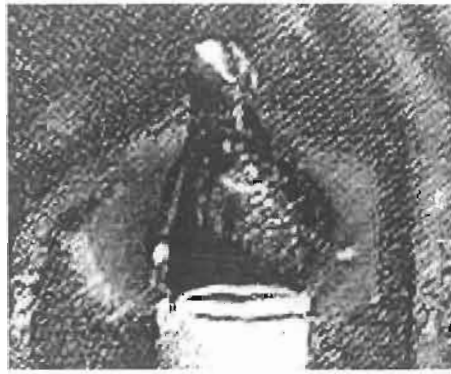
การวิเคราะห์คุณภาพของรอยเชื่อม

การวิเคราะห์ผลทางด้านคุณภาพของรอยเชื่อมนี้สามารถตรวจสอบโดยใช้การสังเกตด้วยสายตา ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งในการตรวจสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น การตรวจสอบด้วยการฉายรังสี การทดสอบการนำไฟฟ้า หรือการทดสอบแรงเฉือน เป็นต้น ทั้งในด้านค่าใช้จ่าย วิธีการตรวจสอบ และความถูกต้องที่ได้ในการตรวจสอบ นอกจากนั้นยังเป็นที่แพร่หลายกันโดยทั่วไป จากการพิจารณาลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพ จึงได้แบ่งเกณฑ์ในการพิจารณาลักษณะของรอยเชื่อมที่ดี กับรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตร่วมกับการพิจารณามาตรฐานรอยเชื่อมของทางโรงงานผู้ผลิต โดยสามารถแบ่งลักษณะของรอยเชื่อมที่จะทำการตรวจสอบออกเป็น 3 ชนิดคือ

4.4.1. Excessive Solder

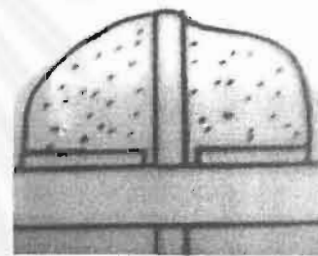


Good Solder (Nice fillet)



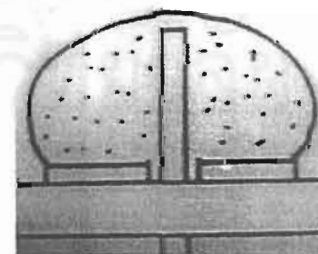
Marginal Soldering

The quantity of solder is marginal fillet. (At most)



Bad Solder

The quantity of solder is too much.

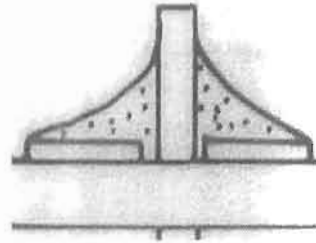
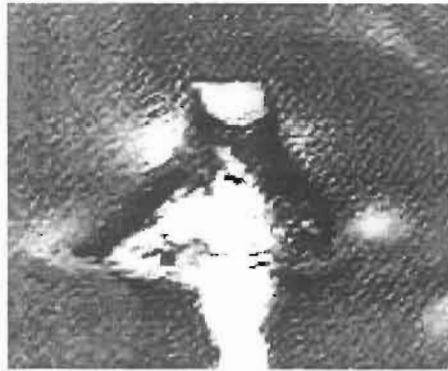


Bad Solder

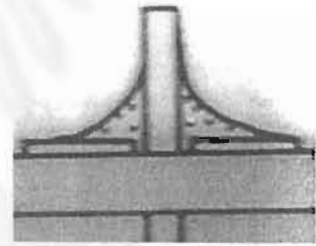
The quantity of solder is too much.

รูปที่ 4.1 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Excessive Solder

4.4.2. Insufficiency Solder

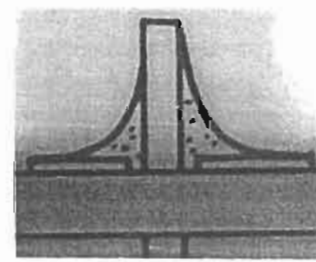


Good Solder (Nice fillet)



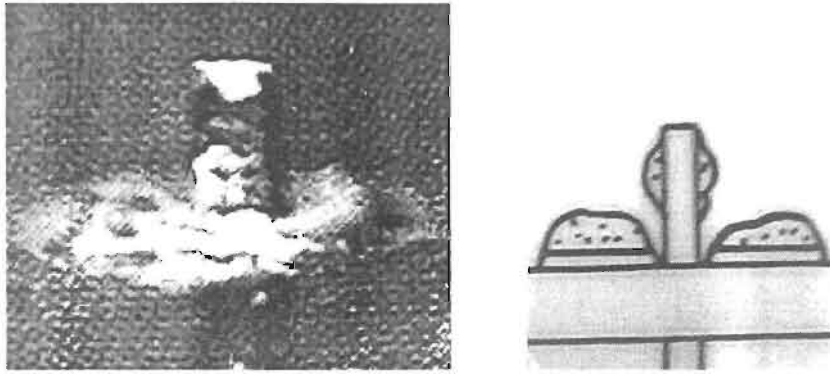
Marginal Soldering

The quantity of solder is marginal fillet. (At least)



Bad Solder

The quantity of solder is too little.



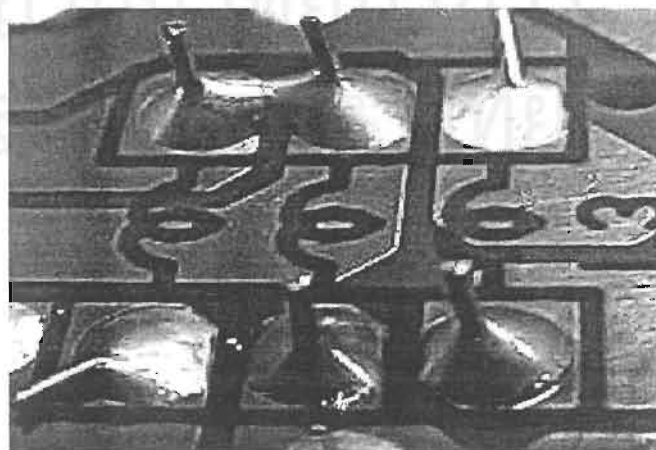
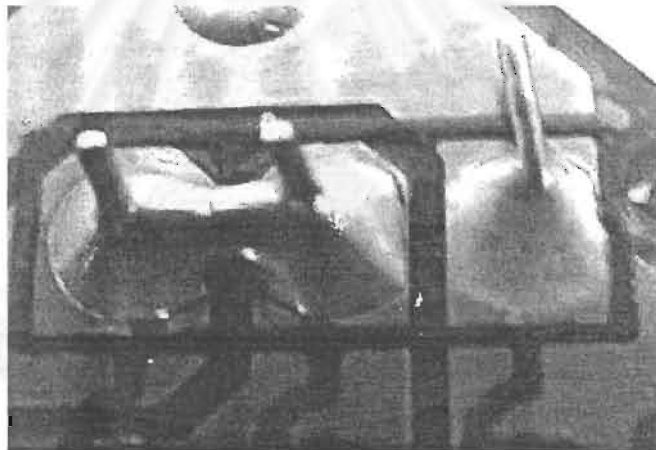
Bad Solder

The quantity of solder is too little.

Pinhole is seen.

รูปที่ 4.2 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Insufficiency Solder

4.4.3. Bridging or Shorting Solder



รูปที่ 4.3 แสดงมาตรฐานเทียบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบ Bridging or Shorting Solder

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลอง

5.1.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1

5.1.1.1 ผลของความเร็วของสายพานต่อตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบความเร็วของสายพาน

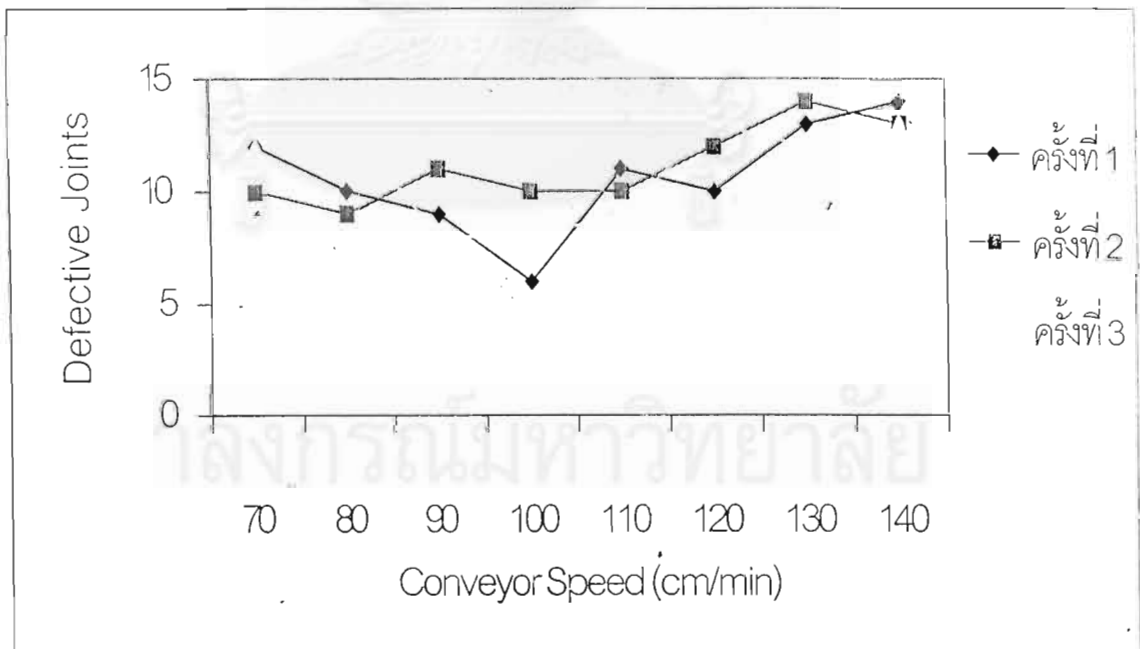
ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	12	10	12
80	10	9	13
90	9	11	8
100	6	10	8
110	11	10	9
120	10	12	13
130	13	14	12
140	14	13	13*

หมายเหตุ *ผลการทดสอบจะถูกวัดออกมาในรูปของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม(จุด) ภายใต้สภาพการทดลอง และพื้นที่ของแผ่นลายวงจรมพิมพ์ A001 ที่เหมือนกัน

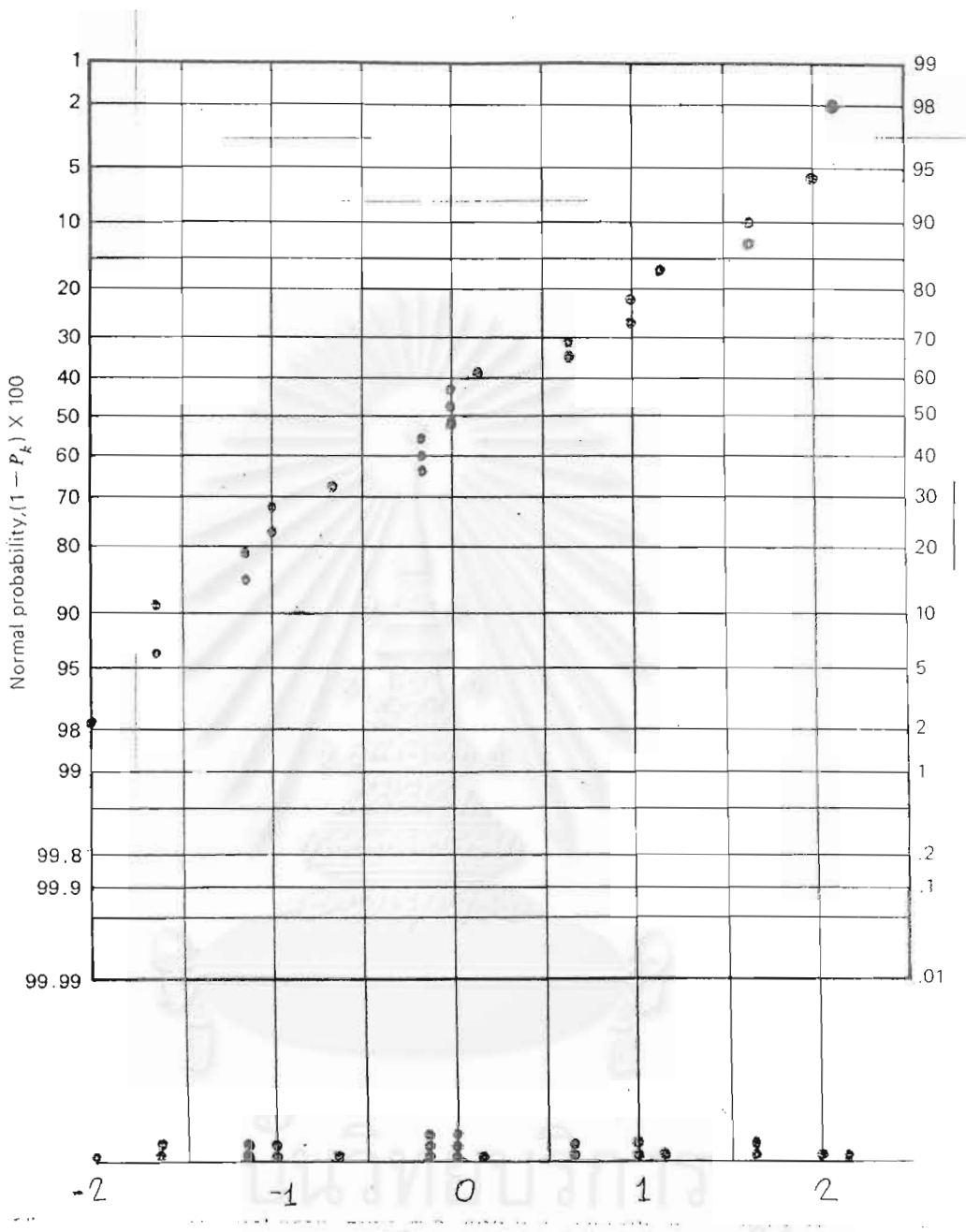
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบความเร็วของสายพาน

ที่มาของความ ผันแปร (Source of Variation)	ผลรวม กำลังสอง, (Sum Square)	ขั้นของ ความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการ ทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า F วิกฤต ($\alpha=0.05$)
ความเร็วของ สายพาน	68.500	7	9.786	4.698	2.66
ความผิดพลาด	33.333	16	2.083		
ผลรวม	101.833	23			

โดยมีค่า Beta = 0.15 (ซึ่งสามารถพิจารณาการคำนวณได้ในภาคผนวก ง.)



รูปที่ 5.1 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน



รูปที่ 5.2 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ ผลการทดสอบความเร็วของสายพาน

การวิเคราะห์ผลทางการทดสอบความเร็วของสายพาน

1. การทดสอบความเร็วของสายพาน เป็นการทดสอบความสามารถในการเกิดจุดบกพร่องของการเชื่อมที่เป็นผลมาจาก การแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพานการผลิตภายในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาว่าจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการผ่านแผ่นลายวงจรพิมพ์ Model A001 ได้ผลดังตารางที่ 5.1 และจากรูปที่ 5.1 แสดงกราฟที่แสดงถึงผลของจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ณ. ความเร็วของสายพานที่ต่างกัน พบว่าที่ความเร็วน้อยๆจะก่อให้เกิดจุดบกพร่องในจำนวนหนึ่ง แล้วมีแนวโน้มที่ลดลงที่ความเร็ว 90 – 110 Cm/min จากนั้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของพีชเชอร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.2 พบว่าในขั้นตอนการเชื่อม ณ.ความเร็วของสายพานที่ต่างกันจะให้ผลในการเกิดจุดบกพร่องที่แตกต่างกันอย่างน้อยระดับหนึ่งด้วย

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากรูปที่ 5.2 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

5.1.1.2 ผลของอุณหภูมิในส่วนของรอบความร้อนต่อตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิในส่วนของรอบความร้อน

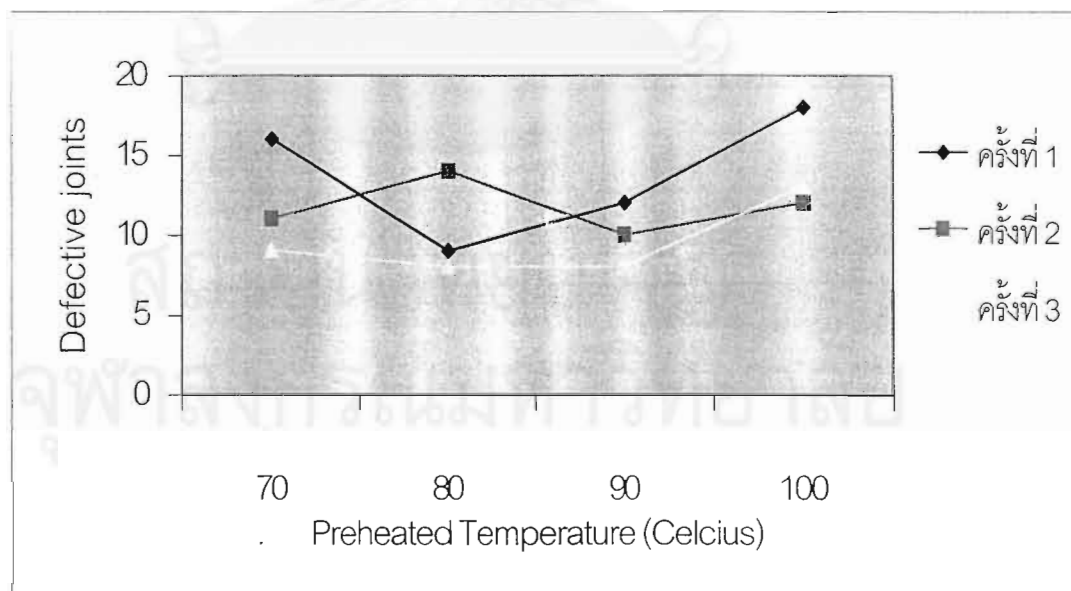
อุณหภูมิในส่วนของรอบ ความร้อน (°C)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	16	11	9
80	9	14	8
90	12	10	8
100	18	12	13*

หมายเหตุ *ผลการทดสอบจะถูกวัดออกมาในรูปของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม(จุด) ภายใต้สภาพการทดลอง และพื้นที่ของแผ่นลายวงจรพิมพ์ A001 ที่เหมือนกัน

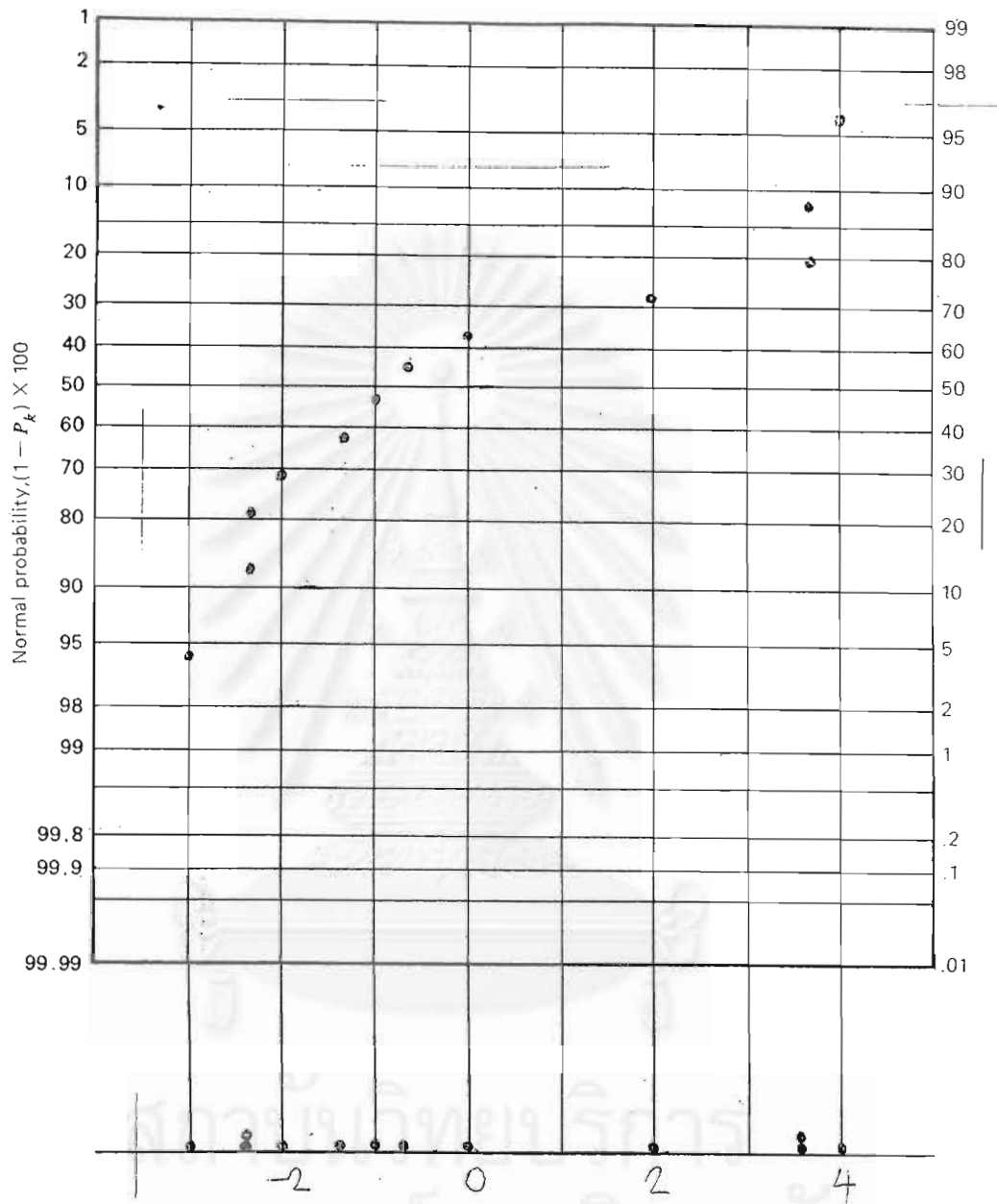
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบอุณหภูมิใน ส่วนการอบความร้อน

ที่มาของความผันแปร (Source of Variation)	ผลรวมกำลังสอง (Sum Square)	ขั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า F วิกฤต ($\alpha=0.05$)
อุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน	35.333	3	11.778	1.251	4.07
ความผิดพลาด	75.333	8	9.417		
ผลรวม	110.667	11			

โดยมีค่า Beta = 0.30 (ซึ่งสามารถพิจารณาการคำนวณได้ในภาคผนวก ง.)



รูปที่ 5.3 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อน



รูปที่ 5.4 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ
ผลการทดสอบอุณหภูมิในสถานการณ์อบความร้อน

การวิเคราะห์ผลการทดสอบอุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อน

1. การทดสอบอุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อน เป็นการทดสอบความสามารถในการเกิดจุดบกพร่องของการเชื่อมที่เป็นผลมาจาก การแปรเปลี่ยนอุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อน ภายในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาว่าจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการ ผ่านแผ่นลายวงจรพิมพ์ Model A001 ได้ผลดังตารางที่ 5.3 และจากรูปที่ 5.3 แสดงกราฟที่แสดงถึงผลของจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ณ. อุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อนที่ต่างกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของจำนวนจุดบกพร่องไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน และมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของพีชเชอร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.4 พบว่าในขั้นตอนการเชื่อม ณ. อุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อนที่ต่างกัน ก็ไม่ทำให้ผลในการเกิดจุดบกพร่องบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่แตกต่างกัน

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากรูปที่ 5.4 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบอุณหภูมิในสถานการณ์รอบความร้อน พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

5.1.1.3 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ต่อตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

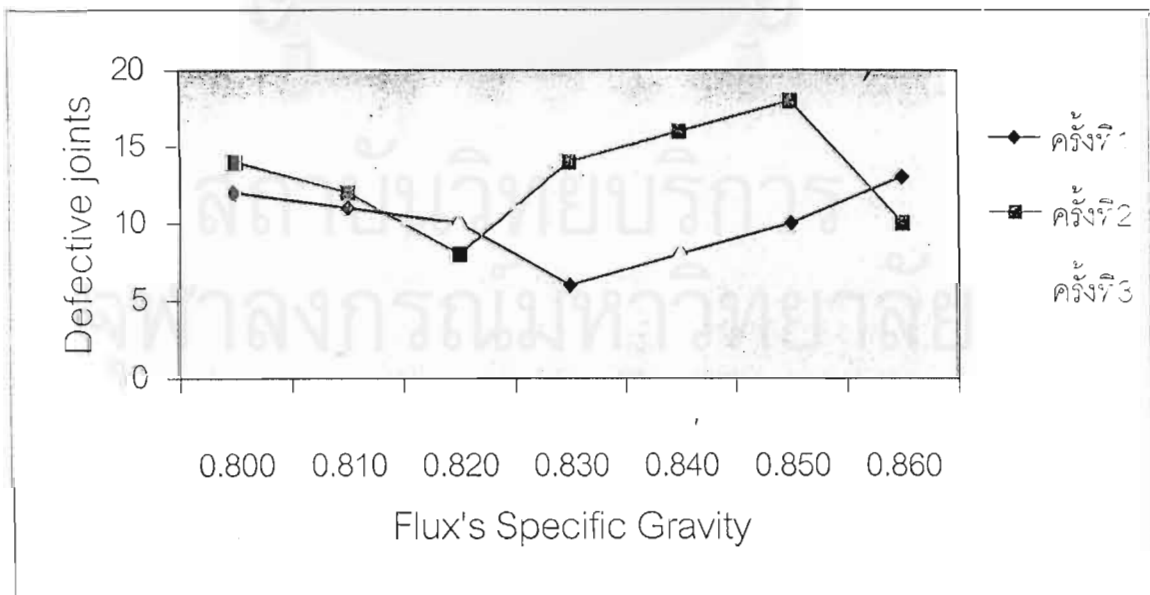
ค่าความถ่วงจำเพาะ ของฟลักซ์	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
0.800	12	14	10
0.810	11	12	10
0.820	10	8	10
0.830	6	14	12
0.840	8	16	8
0.850	10	18	8
0.860	13	10	6*

หมายเหตุ * ผลการทดสอบจะถูกวัดออกมาในรูปของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม(จุด) ภายใต้สภาพการทดลอง และพื้นที่ของแผ่นลายวงจรมีพิมพ์ A001 ที่เหมือนกัน

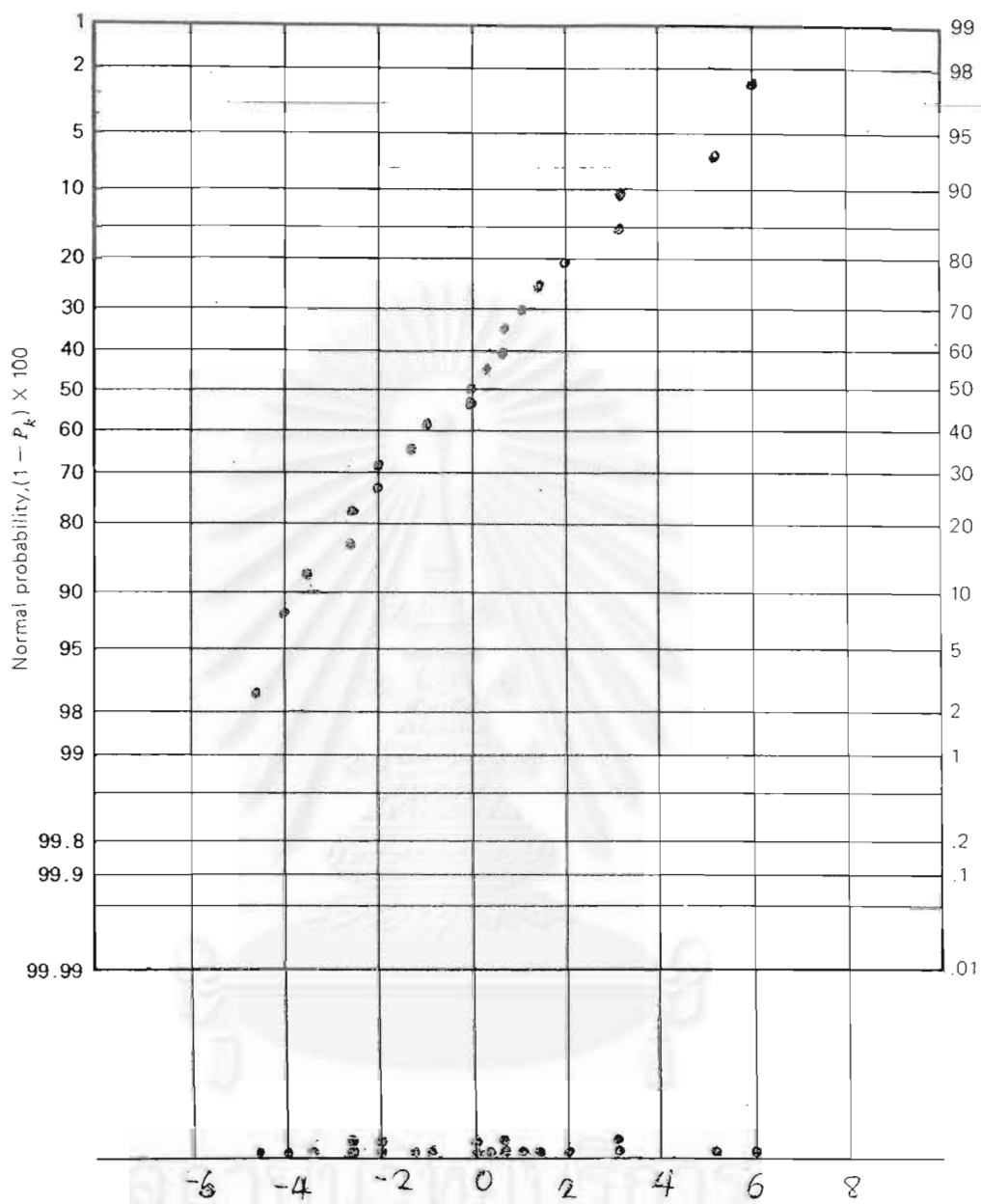
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

ที่มาของความผันแปร (Source of Variation)	ผลรวมกำลังสอง (Sum Square)	ขั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า Fวิกฤต ($\alpha=0.05$)
ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์	19.142	5	3.828	0.3364	2.90
ความผิดพลาด	170.667	15	11.378		
ผลรวม	189.809	20			

โดยมีค่า Beta = 0.32 (ซึ่งสามารถพิจารณาการคำนวณได้ในภาคผนวก ง.)



รูปที่ 5.5 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์



รูปที่ 5.6 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของ
ผลการทดสอบระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

การวิเคราะห์ผลการทดสอบระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

1. การทดสอบระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ เป็นการทดสอบความสามารถในการเกิดจุดบกพร่องของการเชื่อมที่เป็นผลมาจาก การแปรเปลี่ยนระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ ภายในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาว่าจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการ ผ่านแผ่นลายวงจรมิมพ์ Model A001 ได้ผลดังตารางที่ 5.5 และจากรูปที่ 5.5 แสดงกราฟที่แสดงถึงผลของจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ณ. ระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ที่ต่างกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของจำนวนจุดบกพร่องไม่เป็นในแนวทางเดียวกัน และมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของพีชเชอร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.6 พบว่าในขั้นตอนการเชื่อม ณ. ระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ที่ต่างกัน ก็ไม่ทำให้ผลในการเกิดจุดบกพร่องบนแผ่นลายวงจรมิมพ์ที่แตกต่างกัน

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากรูปที่ 5.6 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบระดับความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

5.1.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2

จากการศึกษาถึงลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ พบว่ามีความแตกต่างกันของการเคลื่อนที่ของคลื่นในขั้นตอนการเชื่อมอยู่ 2 แบบ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดจุดบกพร่องจากการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติดังนี้

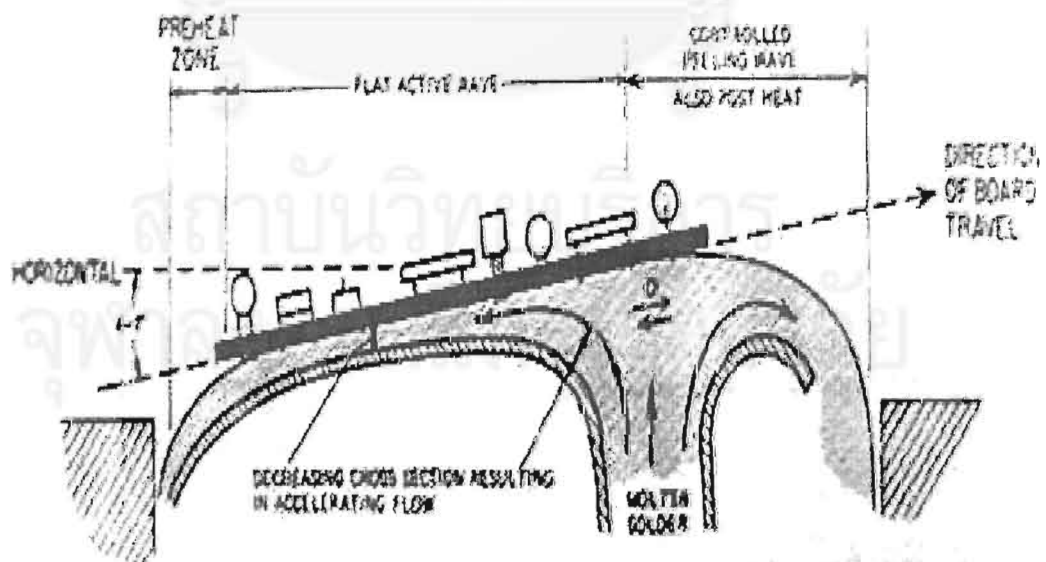
1. การไหลด้านเดียว หมายถึงการปรับระดับของส่วนการทำคลื่น ให้เกิดการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดออกไปในทิศทางเดียว โดยมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสายพาน และแผ่นลายวงจรมิมพ์

2. การไหลสองด้าน หมายถึงการปรับระดับของส่วนการทำคลื่น ให้เกิดการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ เคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดออกไปทั้งสองทิศทาง โดยมีทั้งทิศทางตรงข้าม และทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสายพาน และแผ่นลายวงจรมิมพ์

จากการทดลองพบว่าบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ที่ผ่านการเชื่อมแล้วนั้น สามารถพบจุดบกพร่องชนิดที่ไม่มีการเชื่อมอยู่เลย (Solder skips) กระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งมักเกิดลักษณะของลายวงจรที่แต่ละจุดของรอยเชื่อมนั้น ถูกวางในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมาก และจะแก้ไขได้โดยการเพิ่มความแรงของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ จากการเพิ่มความถี่ของปั๊มในส่วนของการทำคลื่น ซึ่งจะก็ให้เกิดจุดบกพร่องที่มีลักษณะเป็นแบบสะพานเชื่อมของจุดลายวงจรที่ใกล้กัน(Bridging) โดยการแก้ไขในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความแปรปรวนของชั้นความเร็วในคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (Turbulent Flow)

จึงมีผู้ทำการค้นคว้าหาวิธีการแก้ไข ซึ่งต่อมาทางบริษัท Electrovert Consulting Service ได้ทำการคิดค้น Lambda wave เพื่อใช้ในการลดปัญหาดังกล่าวในการผลิต โดยจะทำการปรับflow ให้มีการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ทั้งสองด้าน และใช้หลักการปรับflow แบบ Smooth Laminar flow ในวิธีการปรับดังกล่าวจะสามารถลดจุดบกพร่องประเภท Bridging ได้อย่างมากโดยอาศัยแรงตึงผิวของโลหะผสมโซลเดอร์ และแรงโน้มถ่วงในการดึงโลหะผสมโซลเดอร์ ส่วนเกินออกจากรอยเชื่อม ขณะที่แผ่นลายวงจรพิมพ์เคลื่อนที่ผ่านคลื่นในส่วนหลังที่ไหลในทิศทางเดียวกับสายพาน ซึ่งทำมุมเล็กน้อยกับแนวระดับ

ดังนั้นผู้ทำการศึกษาจึงทำการทดลองเพื่อทดสอบผล และหาระดับที่เหมาะสมในการเชื่อมของปัจจัยทั้งสองอันประกอบไปด้วย ลักษณะการไหลของคลื่น และความเร็วของสายพาน โดยอ้างอิงการทดลองภายใต้ความสามารถของเครื่องเชื่อมตีตุ๊ก-ตะกั่วอัตโนมัติ เนื่องจากในปัจจุบันทางโรงงานตัวอย่างได้ดำเนินการผลิตโดยการปรับให้มีการไหลแต่เพียงด้านเดียว



รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการปรับคลื่นแบบ Lambda waves (Ralph Woodgate, Handbook of Machine Soldering, John Wiley & Sons.)

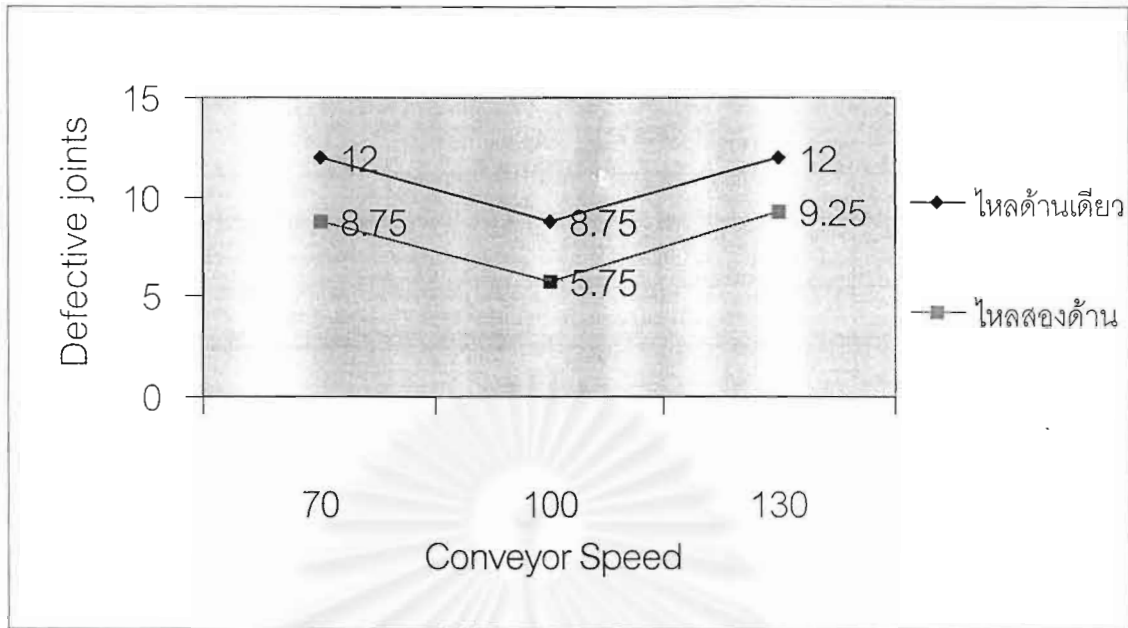
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองการแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพานกับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอ์ต่อตัวแปรตอบสนอง

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	ลักษณะการไหลของคลื่น			
	การไหลด้านเดียว		การไหลสองด้าน	
70	11	13	9	9
	13	11	10	7
100	9	9	5	7
	8	9	5	6
130	12	13	9	10
	13	10	10	8*

หมายเหตุ * ผลการทดสอบจะถูกวัดออกมาในรูปของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม(จุด) ภายใต้สภาพการทดลอง และพื้นที่ของแผ่นลายวงจรมพิมพ์ A001 ที่เหมือนกัน

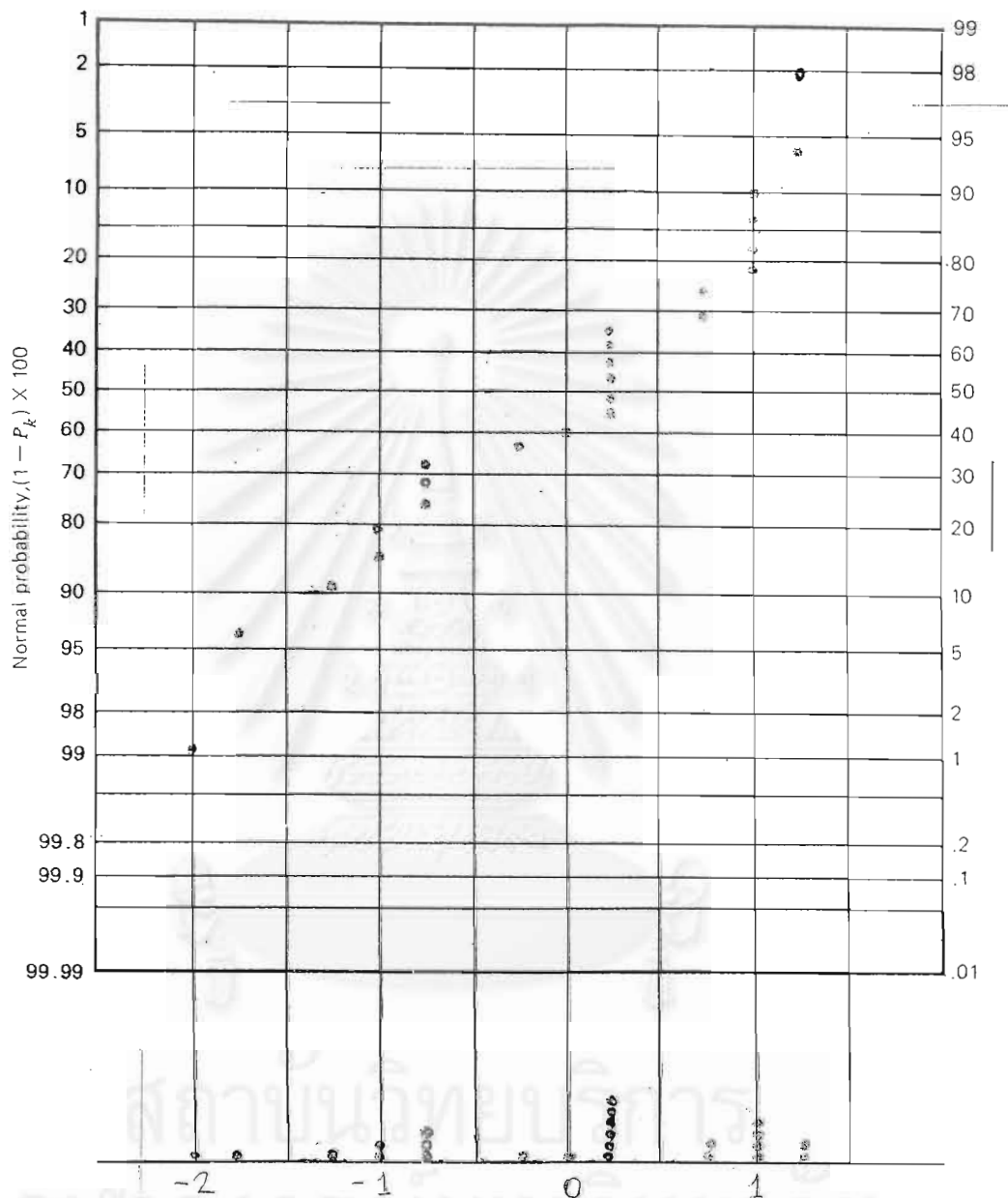
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบการแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพานกับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอ์

ที่มาของความผันแปร (Source of Variation)	ผลรวมกำลังสอง (Sum Square)	ขั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า F วิกฤต ($\alpha=0.05$)
ความเร็วของสายพาน	56.583	2	28.2915	24.243	3.55
ลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอ์	54	1	54	46.272	4.41
อิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย	0.250	2	0.125	0.107	3.55
ความผิดพลาด	20.999	18	1.167		
ผลรวม	131.833	23			



รูปที่ 5.8 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน และลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความเร็วของสายพานและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

5.1.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเร็วของสายพานและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

1. การทดสอบความเร็วของสายพานและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ เป็นการทดสอบความสามารถในการเกิดจุดบกพร่องของการเชื่อมที่เป็นผลมาจาก การแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพานการผลิตและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ ภายในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาว่าจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการผ่านแผ่นลายวงจรมพิมพ์ Model A001 ได้ผลดังตารางที่ 5.7 และจากรูปที่ 5.8 แสดงกราฟที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในการทดลอง ณ. ความเร็วของสายพานและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ที่ต่างกัน พบว่าที่ความเร็วที่น้อยๆจะก่อให้เกิดจุดบกพร่องในจำนวนหนึ่ง แล้วมีแนวโน้มที่ลดลงที่ความเร็วประมาณ 90 – 110 Crn/min จากนั้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก โดยจะมีลักษณะคล้ายกันไม่ว่าจะเป็นลักษณะการไหลแบบใด ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟทั้งสองเส้นที่มีลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ ทั้งการไหลด้านเดียวและทั้งสองด้าน วางตัวในลักษณะที่เกือบจะเรียกได้ว่าขนานกัน (Parallelism of the lines)

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของพีชเชอร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของกรทดสอบที่ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.8 พบว่าในขั้นตอนการเชื่อม ณ.ความเร็วของสายพาน และลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ที่ต่างระดับกัน ก็จะทำให้ผลในการเกิดจุดบกพร่องที่แตกต่างกันด้วย โดยปัจจัยร่วม (Interaction) ของความเร็วของสายพาน และลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ นั้นไม่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องบนแผ่นลายวงจรมพิมพ์ หมายถึงจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะแปรตามความเร็วของสายพานการผลิตไม่ว่าจะเป็นลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์แบบใด แต่จะให้ผลของจำนวนจุดบกพร่องต่างกันด้วย เมื่อใช้การไหลของโลหะผสมโซลเดอร์ในการเชื่อมต่างกัน โดยลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์แบบไหลทั้งสองด้าน จะให้ผลของจำนวนจุดบกพร่องที่น้อยกว่าการไหลเพียงด้านเดียว

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากรูปที่ 5.9 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน และลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

5.1.2.2 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression Analysis)

จากการนำผลการทดลองในส่วนที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 5.7 นำมาคำนวณหารูปแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับการเกิดจุดบกพร่องของแผ่นลายวงจรพิมพ์ในขั้นตอนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และด้วยผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression) เพื่อสร้างรูปแบบที่ใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้ผลเป็นสมการดังนี้

$$\hat{y} = 9.417 + 0.125 X_1 + 1.5 X_2$$

โดย \hat{y} คือจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมคาดการณ์ (Defective joints Predicted)

X_1 คือความเร็วของสายพานที่ใช้ในการทดลอง

X_2 คือลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ (1 หมายถึงการไหลด้านเดียว และ -1 หมายถึงการไหลทั้งสองด้าน)

y คือจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลอง ณ. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ออกแบบ

$\varepsilon = y - \hat{y}$ คือค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ของโมเดลที่สร้างขึ้น โดยประมาณว่ามีค่าเท่ากับ ผลต่างของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลองกับ จำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมคาดการณ์ที่ได้จากการแทนค่าในสมการถดถอยข้างต้น

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงผลการทดสอบโมเดล และค่าความคลาดเคลื่อน

X_1	X_2	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$	X_1	X_2	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$
70	1	11	19.67	-8.67	70	-1	7	16.67	-9.67
70	1	11	19.67	-8.67	70	-1	9	16.67	-7.67
70	1	13	19.67	-6.67	70	-1	9	16.67	-7.67
70	1	13	19.67	-6.67	70	-1	10	16.67	-6.67
100	1	8	23.42	-15.42	100	-1	5	20.42	-15.42
100	1	9	23.42	-14.42	100	-1	5	20.42	-15.42
100	1	9	23.42	-14.42	100	-1	6	20.42	-14.42
100	1	9	23.42	-14.42	100	-1	7	20.42	-13.42
130	1	10	27.17	-17.17	130	-1	8	24.17	-16.17
130	1	12	27.17	-15.17	130	-1	9	24.17	-15.17
130	1	13	27.17	-14.17	130	-1	10	24.17	-14.17
130	1	13	27.17	-14.17	130	-1	10	24.17	-14.17

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง
(Analysis of Variance for Significance of Linear Regression)

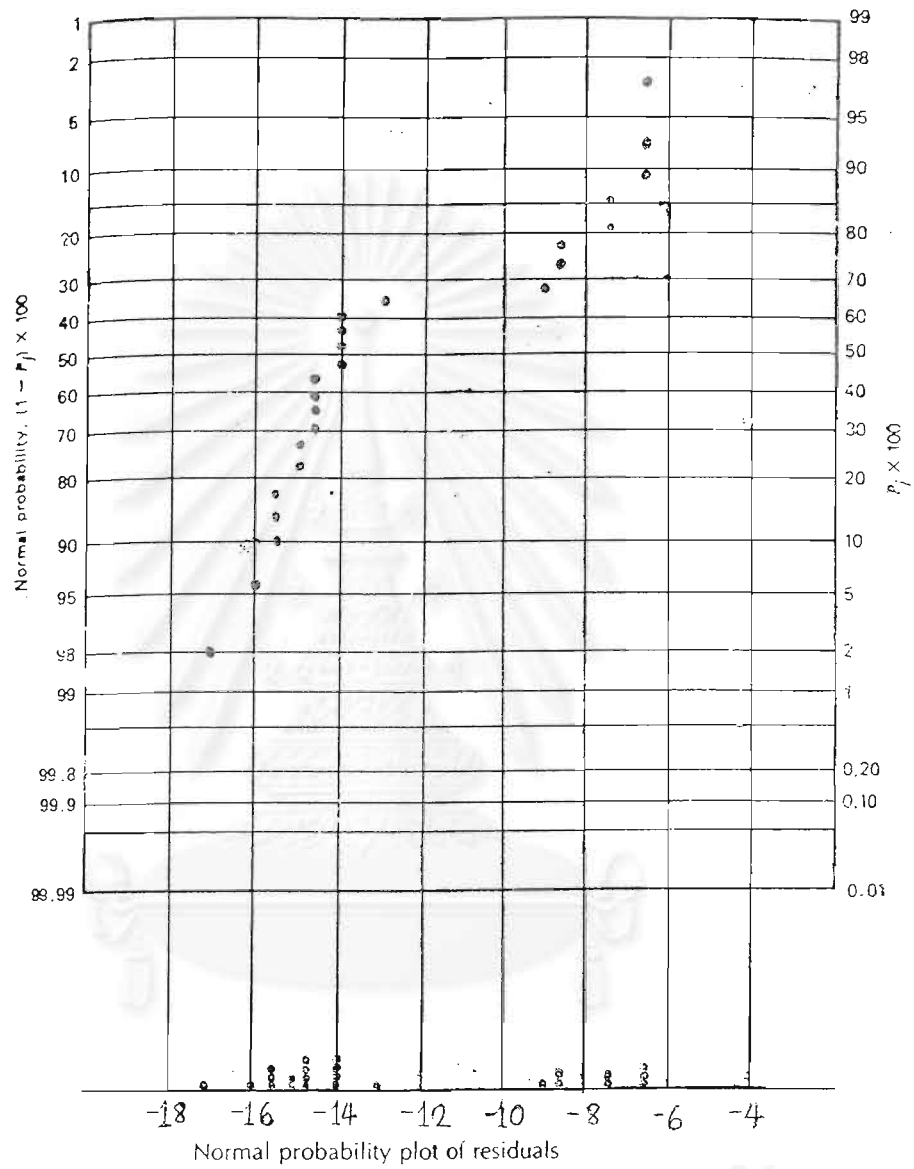
ที่มาของความ ผันแปร (Source of Variation)	ผลรวม กำลังสอง (Sum Square)	ขั้นของ ความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการ ทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า F วิกฤต ($\alpha=0.05$)
Model Regression	54.245	2	27.125	7.342	3.47
Error or Residual	77.583	21	3.694		
Total	131.833	23			

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง
(Parameter Estimates of Linear Regression)

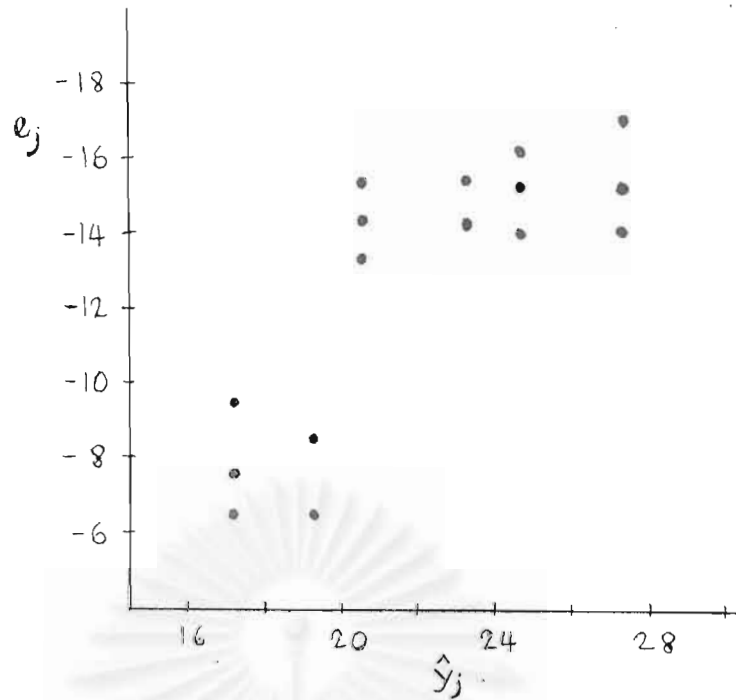
ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	สัมประสิทธิ์ (Coefficient)	Standard Error	ค่าผลการ ทดสอบที (t Value)	ค่า t วิกฤต 0.025 ,21 ($\alpha=0.05$)
Constant	9.417	0.3923	24.001	2.080
Regress Conveyor Speed	0.125	0.4805	0.2601	
Regress Flow Type	1.5	0.3923	3.8232	

R-Square = 0.4115

R-Square Adjusted = 0.3848



รูปที่ 5.10 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 5.11 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง

จากผลการทดสอบความแปรปรวนของสมการที่สร้างขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.10 สรุปได้ว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ยอมรับสมมติฐานที่ว่าสัมประสิทธิ์ของสมการอย่างน้อยหนึ่งตัวที่ไม่เท่ากับศูนย์ และผลจากการทดสอบความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่างๆ ในสมการถดถอยเชิงเส้นตรง ดังแสดงในตารางที่ 5.11 สามารถสรุปได้ว่า ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์เท่านั้นที่สามารถอธิบายด้วยผลการทดลองได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วของสายพานไม่สามารถอธิบายด้วยผลการทดลองได้

ทำให้สมการที่ได้ข้างต้นนี้ไม่สามารถใช้อธิบายจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ ซึ่งสอดคล้องกับ

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R-Square) ที่น้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายความว่าจำนวนข้อมูลที่น้อยกว่า 50% ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอยข้างต้น
2. ผลการตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งสามารถประมาณได้ว่าข้อมูลไม่มีการกระจายแบบปกติ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบนอร์มอล (Normal Distribution)
3. ผลการทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง ดังแสดงในรูปที่ 5.11 โดยผลที่ได้คือข้อมูลไม่มีการกระจายอย่างเป็นอิสระ

5.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมการทดลอง

จากผลการทดลองในส่วนที่ 2 ทำให้ทราบว่าลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม โดยแบบที่มีการไหลทั้งสองด้านจะมีผลในการลดจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม ดังนั้นผู้ศึกษาจึงดำเนินการทดลองใหม่เพื่อทำการหาจุดที่เหมาะสมในการเชื่อม โดยทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน พร้อมกับการแปรค่าความเร็วของสายพานเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมในการผลิต ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน

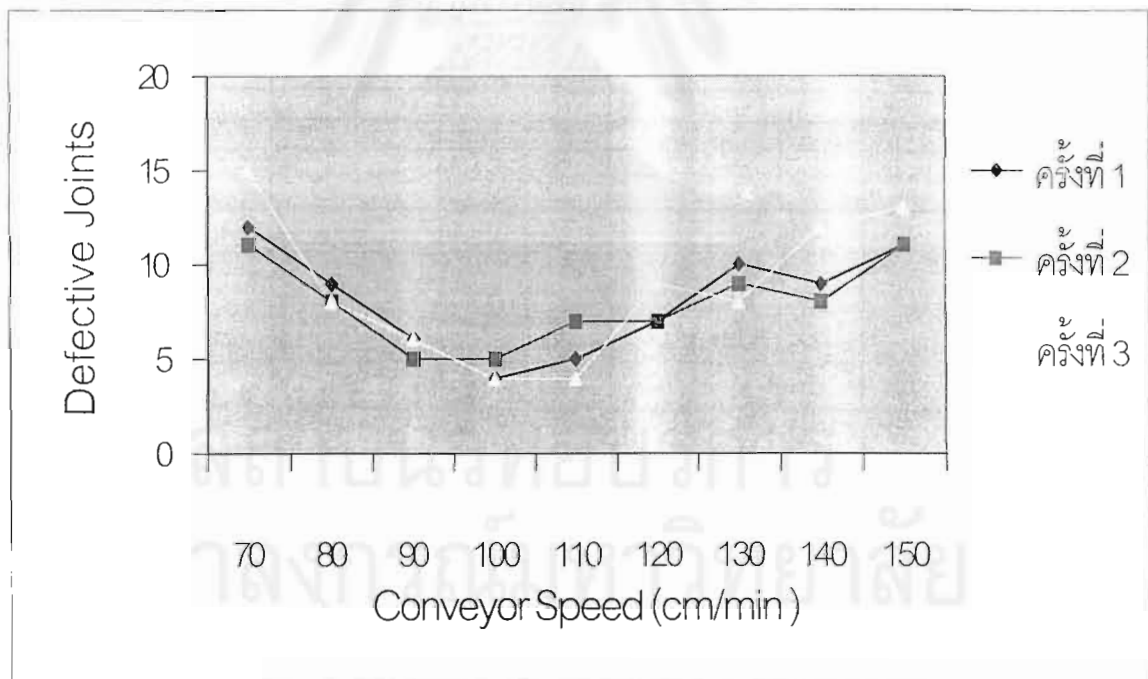
ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนข้อของการทดลอง		
	1	2	3
70	12	11	15
80	9	8	8
90	6	5	6
100	4	5	4
110	5	7	4
120	7	7	9
130	10	9	8
140	9	8	12
150	11	11	13*

หมายเหตุ *ผลการทดสอบจะถูกวัดออกมาในรูปของจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อม(จุด) ภายใต้สภาพการทดลอง และพื้นที่ของแผ่นลายวงจรมพิมพ์ A001 ที่เหมือนกัน

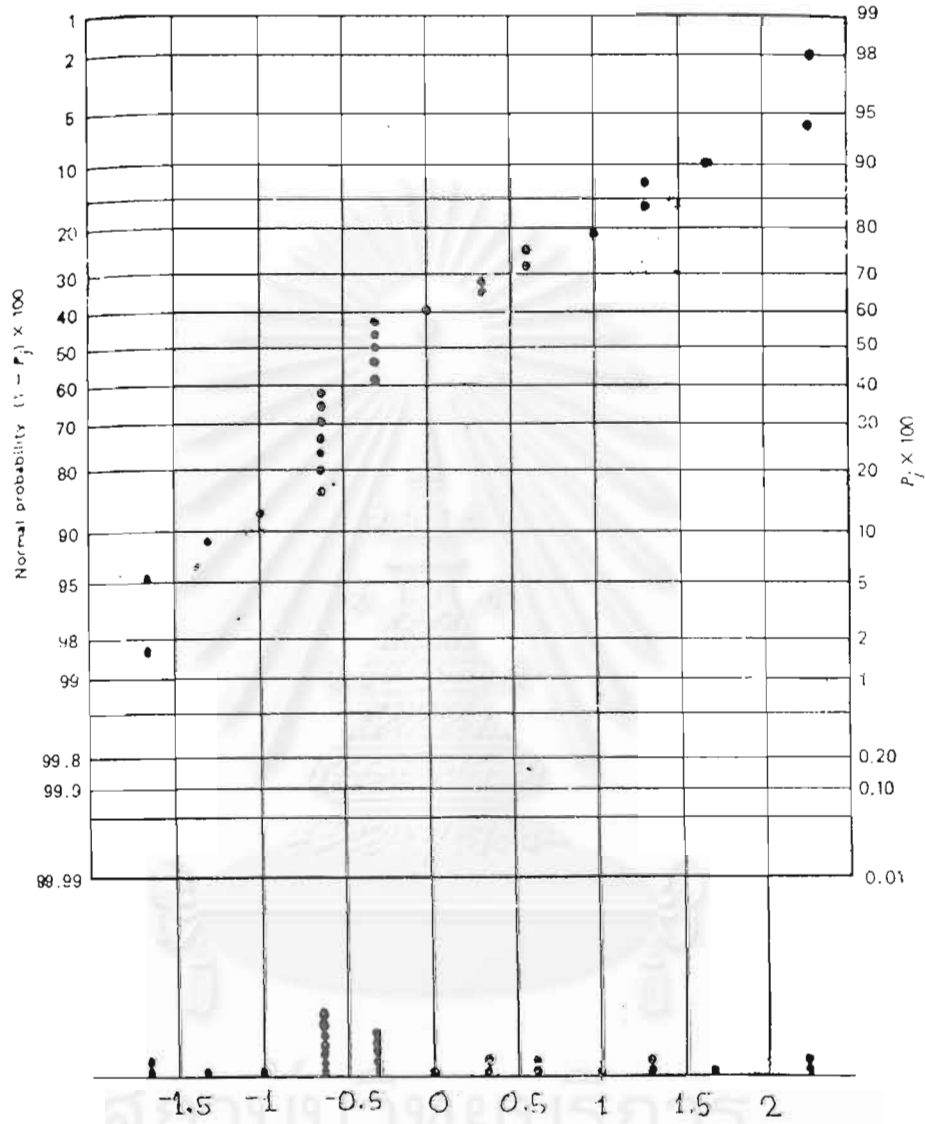
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบความเร็วของสายพาน
ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอ์มีการไหลทั้งสองด้าน

ที่มาของความ ผันแปร (Source of Variation)	ผลรวม กำลังสอง (Sum Square)	ชั้นของ ความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการ ทดสอบเอฟ (F Tested)	ค่า F วิกฤต ($\alpha=0.05$)
ความเร็วของ สายพาน	193.852	8	24.232	13.918	2.51
ความผิดพลาด	31.333	18	1.741		
ผลรวม	225.185	26			



รูปที่ 5.12 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน
ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอ์มีการไหลทั้งสองด้าน



รูปที่ 5.13 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอ์มีการไหลทั้งสองด้าน

5.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้ คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน

1. การทดสอบความเร็วของสายพานและลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ เป็นการทดสอบความสามารถในการเกิดจุดบกพร่องของการเชื่อมที่เป็นผลมาจาก การแปรเปลี่ยนความเร็วของสายพานการผลิต ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน ภายในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ โดยพิจารณาว่าจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการ ผ่านแผ่นลายวงจรพิมพ์ Model A001 ได้ผลดังตารางที่ 5.12 และจากรูปที่ 5.13 แสดงกราฟที่แสดงผลของจำนวนจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ณ. ความเร็วของสายที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน พบว่าที่ความเร็วน้อยๆจะก่อให้เกิดจุดบกพร่องในจำนวนหนึ่งแล้วมีแนวโน้มที่ลดลงที่ความเร็วประมาณ 90 – 110 Cm/min จากนั้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น โดยจะมีลักษณะคล้ายกันกับการทดลองที่แล้ว ซึ่งเป็นการยืนยันลักษณะเฉพาะของผลของปัจจัยความเร็วของสายพานต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟทั้งสามเส้นมีการวางตัวในลักษณะเป็นเส้นโค้ง

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการนำอิทธิพลของปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการของพีชเชอร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.10 พบว่าในขั้นตอนการเชื่อม ณ.ความเร็วของสายพานต่างกัน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน ก็จะให้ผลในการเกิดจุดบกพร่องที่แตกต่างกันด้วย

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากรูปที่ 5.11 เมื่อทำการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบความเร็วของสายพาน ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

5.2.2 การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis)

Polynomial Fit Degree 2

$$\hat{y} = 53.364 - 0.887 X_1 + 0.004 X_1^2$$

โดย \hat{y} คือจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมคาดหมาย (Defective joints Predicted)

X_1 คือความเร็วของสายพานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 5.14 ตารางแสดงผลการทดสอบโมเดลกำลัง 2 และค่าความคลาดเคลื่อน

X_1	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$	X_1	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$
70	12	11.45	0.55	110	4	5.58	-1.58
70	11	11.45	-0.45	120	7	6.17	0.83
70	15	11.45	3.55	120	7	6.17	0.83
80	9	8.75	0.25	120	9	6.17	2.83
80	8	8.75	-0.75	130	10	7.58	2.42
80	8	8.75	-0.75	130	9	7.58	1.42
90	6	6.87	-0.87	130	8	7.58	0.42
90	5	6.87	-1.87	140	9	9.81	-0.81
90	6	6.87	-0.87	140	8	9.81	-1.81
100	4	5.81	-1.81	140	12	9.81	2.19
100	5	5.81	-0.81	150	11	12.86	-1.86
100	4	5.81	-1.81	150	11	12.86	-1.86
110	5	5.58	-0.58	150	13	12.86	0.14
110	7	5.58	1.42				

ตารางที่ 5.15 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย
(Analysis of Variance for Significance of Regression)

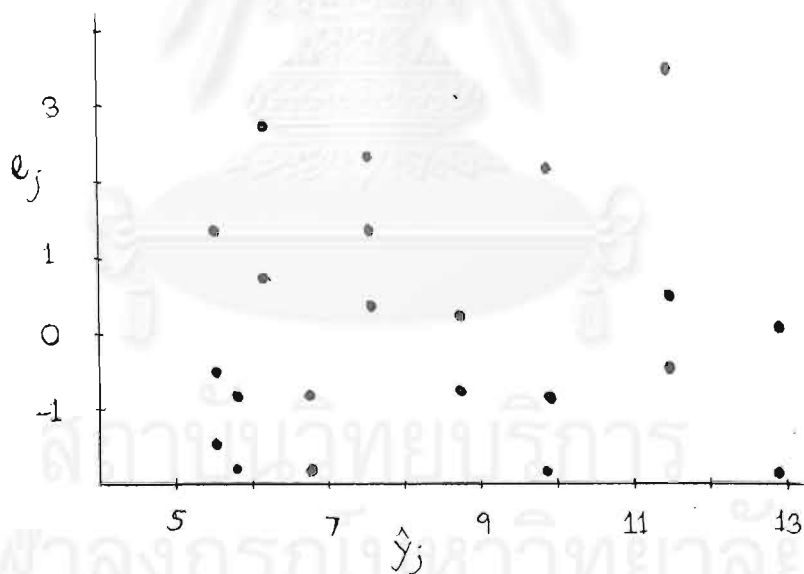
ที่มาของความ ผันแปร (Source of Variation)	ผลรวม กำลังสอง (Sum Square)	ขั้นของ ความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการ ทดสอบเอฟ (F Tested)	Prob > F ($\alpha=0.05$)
Model Regression	160.729	2	80.365	29.923	< 0.0001
Error or Residual	64.456	24	2.686		
Total	225.185	26			

ตารางที่ 5.16 ตารางแสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย
(Parameter Estimates of Regression)

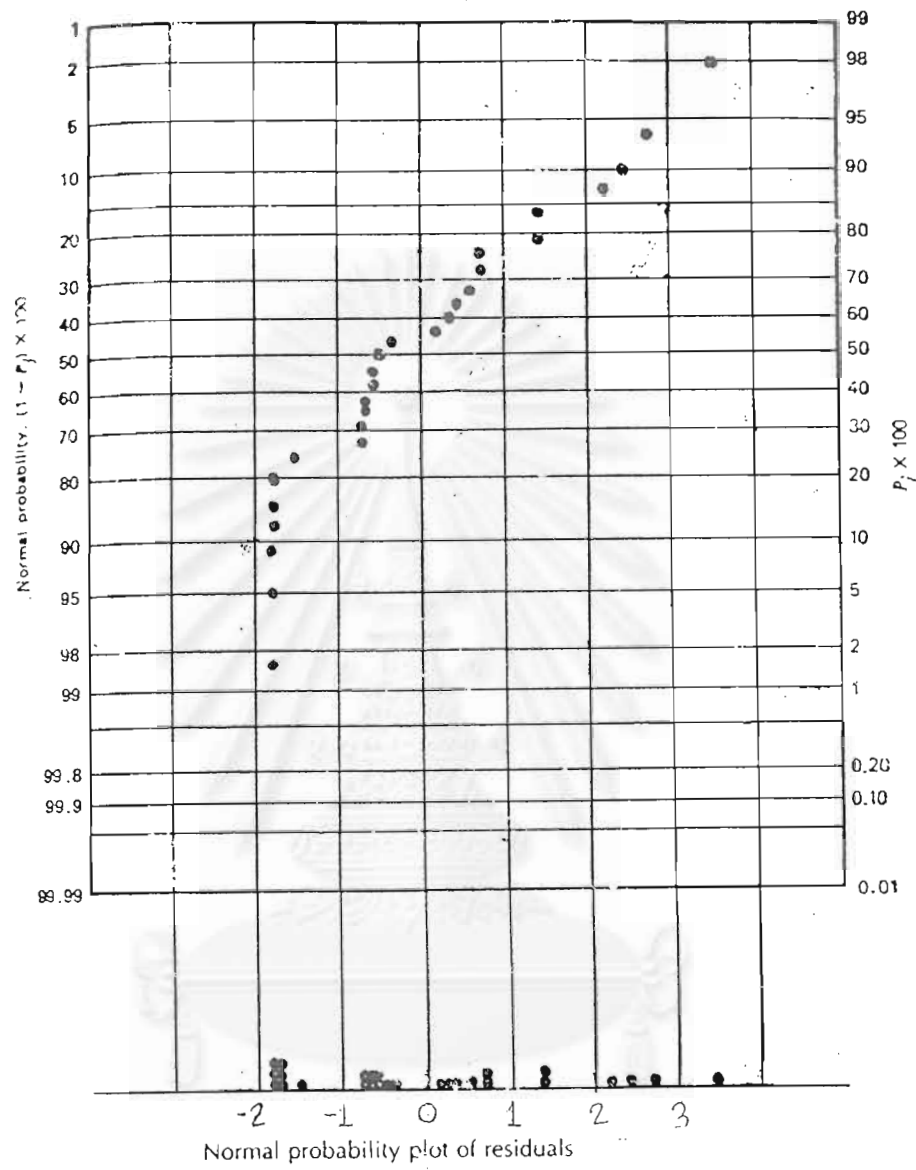
ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	สัมประสิทธิ์ (Coefficient)	Standard Error	ค่าผลการ ทดสอบที่ (t Value)	Prob > t ($\alpha=0.05$)
Constant	53.364	6.317	8.45	< 0.0001
Regress Conveyor Speed	-0.887	0.119	-7.43	< 0.0001
Regress Conveyor Speed ²	0.0041	0.0005	7.61	< 0.0001

R-Square = 0.714

R-Square Adjusted = 0.689



รูปที่ 5.14 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการ
ทดสอบสมการถดถอยพหุนามกำลังสอง กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง



รูปที่ 5.15 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง (Model Adequacy Checking)

Polynomial Fit Degree 3

$$\hat{y} = 151.104 - 3.744 X_1 + 0.031 X_1^2 - 0.00008 X_1^3$$

โดย \hat{y} คือจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมคาดหมาย (Defective joints Predicted)
 X_1 คือความเร็วของสายพานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 5.17 ตารางแสดงผลการทดสอบโมเดลกำลัง 3 และค่าความคลาดเคลื่อน

X_1	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$	X_1	y	\hat{y}	$\varepsilon = y - \hat{y}$
70	12	13.27	-1.27	110	4	7.38	-3.38
70	11	13.27	-2.27	120	7	9.38	-2.38
70	15	13.27	1.73	120	7	9.38	-2.38
80	9	8.75	0.25	120	9	9.38	-0.38
80	8	8.75	-0.75	130	10	11.82	-1.82
80	8	8.75	-0.75	130	9	11.82	-2.82
90	6	6.58	-0.58	130	8	11.82	-3.82
90	5	6.58	-1.58	140	9	14.21	-5.21
90	6	6.58	-0.58	140	8	14.21	-6.21
100	4	6.28	-2.28	140	12	14.21	-2.21
100	5	6.28	-1.28	150	11	16.07	-5.07
100	4	6.28	-2.28	150	11	16.07	-5.07
110	5	7.38	-2.38	150	13	16.07	-3.07
110	7	7.38	-0.38				

ตารางที่ 5.18 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย
 (Analysis of Variance for Significance of Regression)

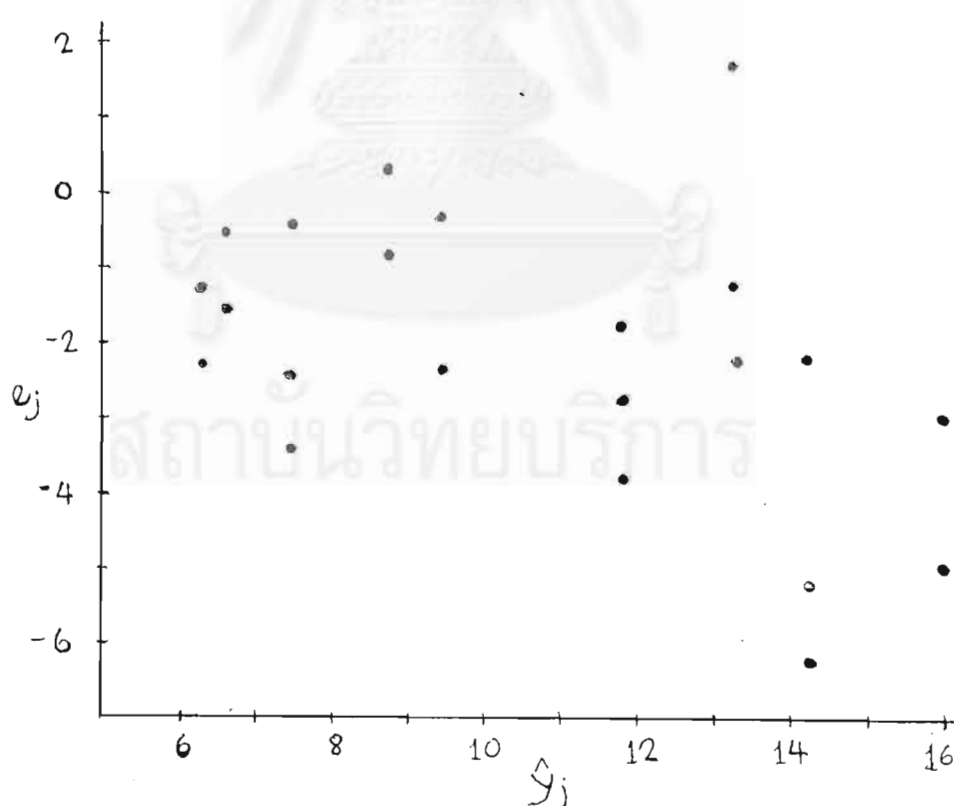
ที่มาของความ ผันแปร (Source of Variation)	ผลรวม กำลังสอง (Sum Square)	ชั้นของ ความอิสระ (Degree of Freedom)	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (Mean Square)	ค่าผลการ ทดสอบเอฟ (F Tested)	Prob > F ($\alpha=0.05$)
Model Regression	3	189.046	63.015	40.104	< 0.0001
Error or Residual	23	36.139	1.571		
Total	26	225.185			

ตารางที่ 5.19 ตารางแสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย
(Parameter Estimates of Regression)

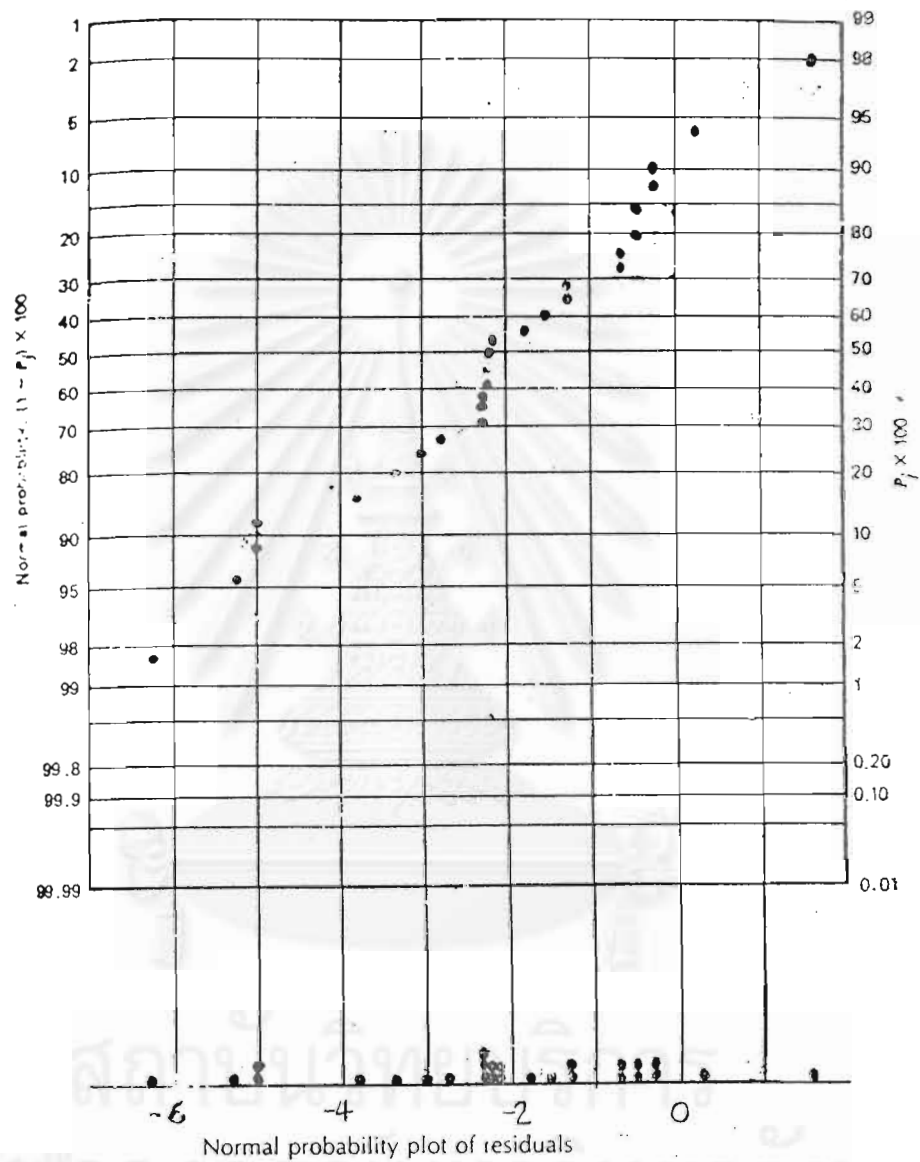
ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	สัมประสิทธิ์ (Coefficient)	Standard Error	ค่าผลการ ทดสอบที่ (t Value)	Prob > t ($\alpha=0.05$)
Constant	151.104	23.5266	6.42	< 0.0001
Regress Conveyor Speed	-3.744	0.67931	-5.51	< 0.0001
Regress Conveyor Speed ²	0.031	0.00634	4.88	< 0.0001
Regress Conveyor Speed ³	-0.00008	0.000019	-4.25	0.0003

R-Square = 0.8395

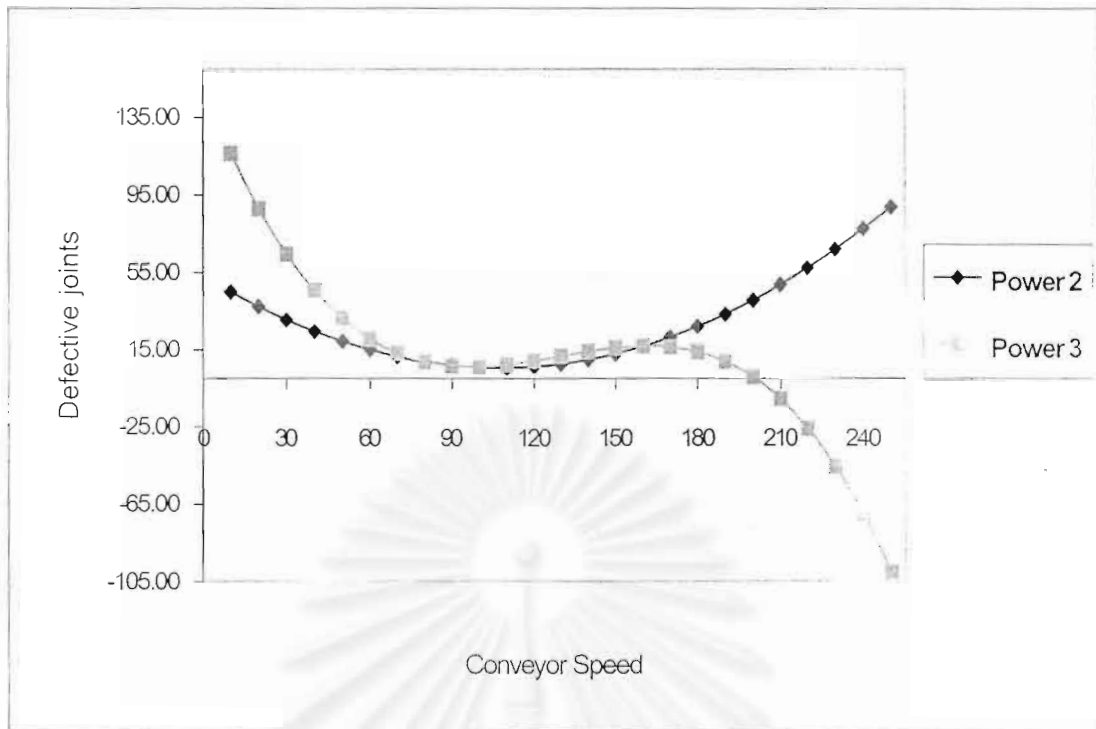
R-Square Adjusted = 0.8188



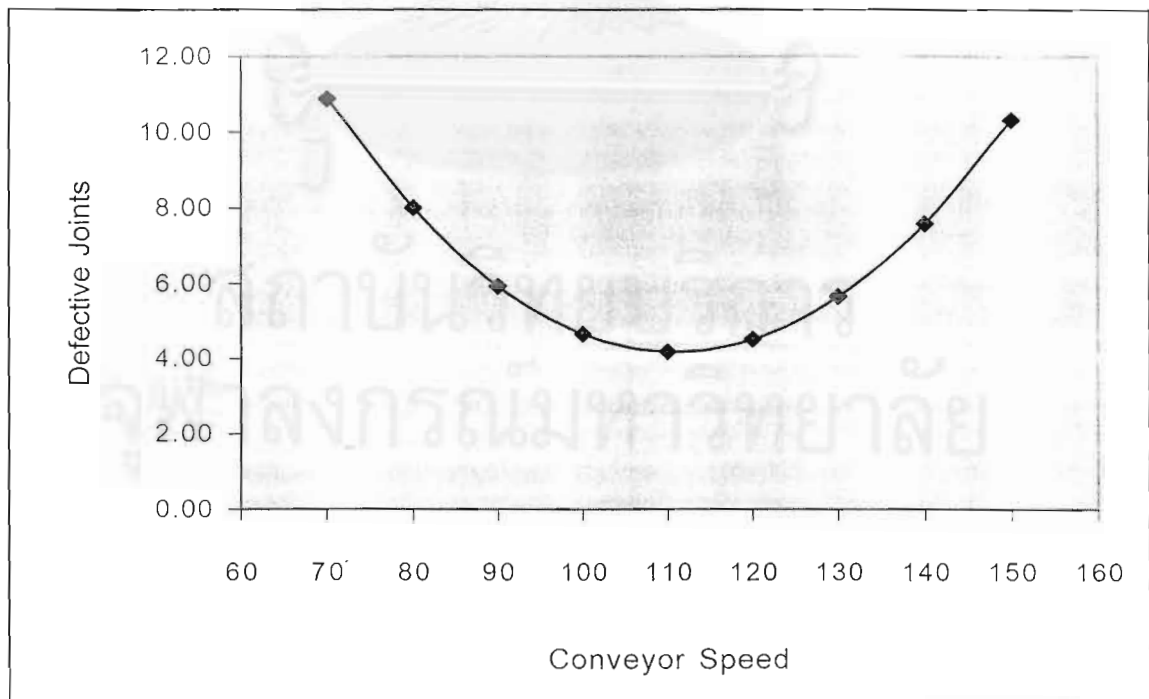
รูปที่ 5.16 การทดสอบการกระจายอย่างอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจากการ
ทดสอบสมการถดถอยพหุนามกำลังสาม กับจำนวนจุดบกพร่องคาดหวัง



รูปที่ 5.17 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสาม (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสองและกำลังสามระหว่างจำนวนจุดบกพร่องกับความเร็วของสายพานที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงจุดต่ำสุดของสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง

จากผลการสร้างรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายลักษณะการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมพบว่ารูปแบบของสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง ถือว่ามีความเหมาะสมกว่าสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสาม จากการพิจารณารูปที่ 5.18 ซึ่งแสดงกราฟของสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสามที่พล็อตระหว่างความเร็วของสายพาน กับจำนวนจุดบกพร่องของรอยเชื่อมพบว่ากราฟจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ณ.ความเร็วศูนย์ cm/min จากนั้นจะกลับเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเกิน 120 cm/min และจะมีการลดลงอีกที่ความเร็วประมาณ 170 cm/min โดยจะลดลงเรื่อยๆเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วการเพิ่มความเร็วของสายพานให้สูงมากขึ้น จะไม่สามารถลดจำนวนการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมลงได้ แต่ในทางตรงกันข้ามจะเป็นการเพิ่มจำนวนจุดบกพร่องขึ้นแทน เพราะ ขณะที่แผ่นพิมพ์ลายวงจรเคลื่อนที่ผ่านคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์อย่างรวดเร็วนั้น ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทมาสู่รอยเชื่อมเพื่อเร่งให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่จะทำให้เกิดการเชื่อมนั้นน้อยลง และไม่เพียงพอที่จะสร้างรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ได้ ดังนั้น ณ.ตำแหน่งของจุดเชื่อมบนลายวงจรพิมพ์ ที่ไม่ได้รับปริมาณความร้อนที่เพียงพอจะทำให้เกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้นำสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสองมาหาจุดต่ำสุดที่เหมาะสมกับการผลิตดังแสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งพบว่า ณ.ความเร็วของสายพานประมาณ 108 cm/min จะทำให้มีจุดบกพร่องของรอยเชื่อมน้อยที่สุด

5.3 การประเมินผลเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน

ในปัจจุบันการดำเนินการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้โลหะผสมโซลเดอร์ที่มีอัตราส่วนผสมของตีบุกกับตะกั่วที่ 63-37 โดยมวล และสภาวะการผลิตในปัจจุบันเปรียบเทียบกับสภาวะที่เหมาะสมเชื่อมจากการทดลอง แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.20 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสภาวะการผลิต

ปัจจัยการผลิต	สภาวะที่เหมาะสม	สภาวะในปัจจุบัน
อุณหภูมิในช่วงการอบความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	105 ± 5	105 ± 5
ความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์	0.817 ± 0.003	0.817 ± 0.003
ความเร็วของสายพาน (cm/min)	108	100 ± 10
ลักษณะการไหลของคลื่น	ไหลสองด้าน	ไหลด้านเดียว

จะเห็นได้ว่า ณ.สภาวะที่เหมาะสม หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมที่ได้จากการทดลอง จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของสายพานเพิ่มขึ้นเป็น 108 cm/min จากเดิมที่ความเร็ว 100 ± 10 cm/min และทำการเปลี่ยนลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์จากการไหลด้านเดียวเป็นการไหลทั้งสองด้าน ส่วนอุณหภูมิในช่วงการอบความร้อน และค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ที่ใช้ ยังคงเหมือนเดิมคือ 105 ± 5 °C และ 0.817 ± 0.003 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ของสภาวะที่เหมาะสม กับผลการเก็บข้อมูลจุดบกพร่องของรอยเชื่อมของสภาวะในปัจจุบันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 ตารางแสดงผลการประเมินสภาวะการผลิตในปัจจุบัน กับสภาวะที่เหมาะสม

ชนิดของ จุดบกพร่อง	สภาวะในปัจจุบัน		สภาวะที่เหมาะสม	
	จำนวนจุดบกพร่อง (จุด)	%	จำนวนจุดบกพร่อง (จุด)	%
Excessive	398	18.99	11	20
Shorting or Bridging	771	36.78	22	40
Insufficient	760	36.26	16	29.09
Incomplete	167	7.97	6	10.91
Total	2096	100	55	100
Average/piece	19.41		2.75	

หมายเหตุ จำนวนจุดบกพร่องโดยเฉลี่ยต่อแผ่น คำนวณจากจำนวนชิ้นงานที่ทำการสุ่มเก็บเป็นจำนวนทั้งหมด 108 ชิ้น

จากการเปรียบเทียบจะพบว่า จากการเก็บจำนวนจุดบกพร่องที่ได้จากการทดลองกับชิ้นงานจริงในสภาวะที่เหมาะสมจำนวน 20 ชิ้น สามารถทำให้จำนวนจุดบกพร่องจากการเชื่อมตีบูก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติลดลงจากเดิม โดยทำให้สามารถลดจำนวนครั้งในการซ่อมแซมจุดบกพร่องในการผลิตลงได้จากจำนวนเฉลี่ย 19.41 จุดต่อแผ่น เป็น 2.75 จุดต่อแผ่น แต่ในด้านเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องที่เกิดในแต่ละประเภท ยังไม่สามารถนำมาพิจารณาเปรียบเทียบได้ เนื่องจากการทดสอบสภาวะที่ได้ทำการปรับนั้น การเก็บข้อมูลไม่ได้เป็นแบบสุ่มและยังไม่เข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady state) ของการผลิต

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมตีบูก-ตะกั่วด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่ได้จากการทดลองทำให้ได้จำนวนจุดบกพร่องที่น้อยลงกว่าในปัจจุบัน นอกจากนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการใช้เพิ่มผลผลิตแล้ว ยังเป็นการเสริมสร้างความมั่นใจให้ผลิตภัณฑ์ในด้านคุณภาพของสินค้าอีกด้วย

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบการทดลองด้วยการพิจารณาปัจจัยทั้ง สี่ปัจจัย และดำเนินการทดลองพร้อมวิเคราะห์ผลของตัวแปรตอบสนอง สามารถสรุปผลตามการวิเคราะห์ความแปรปรวน ($\alpha = 0.05$) ได้ดังนี้

1. ค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ และอุณหภูมิในส่วนของรอบความร้อนไม่มีผล หรือมีผลกระทบน้อยมากต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว ทั้งสามชนิด อันได้แก่ Bridging, Insufficient และ Excessive Solder
2. ลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว โดยจะมีส่วนช่วยในการลดการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมประเภท Bridging
3. ความเร็วของสายพานจะส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว ซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นโค้ง โดยจะเกิดจุดบกพร่องจำนวนน้อยเมื่อมีความเร็วในช่วงระดับหนึ่ง และจะเพิ่มขึ้น ถ้ามีการเพิ่มหรือลดความเร็วของสายพาน

และจากการพิจารณากราฟ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่วเป็นอย่างมาก โดยลักษณะการไหลแบบสองด้านของคลื่นจะช่วยลดจำนวนการเกิดจุดบกพร่องลงได้ ส่วนปัจจัยความเร็วของสายพานก็มีอิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่ว แต่จะมีอิทธิพลน้อยกว่าปัจจัยลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ ซึ่งจากการพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการผลิตสามารถได้เงื่อนไขดังนี้

- | | |
|---------------------------------------|-------------------|
| - ลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์ | การไหลทั้งสองด้าน |
| - ความเร็วของสายพาน | 108 Cm/min |

โดยการผลิตภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมข้างต้นนั้น ก็จำเป็นที่จะต้องควบคุมปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไม่ว่าจะเป็นค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ที่ใช้ หรืออุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน ซึ่งควรกำหนดและควบคุมให้มีความถูกต้องตลอดเวลาอีกด้วย เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพ

6.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย

- การวิจัยเพื่อหาผลกระทบของปัจจัยการควบคุมที่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมในการะบวนการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วโดยเครื่องอัตโนมัติของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แนวความคิดมาจากสภาพการผลิตจริง ๆ ในปัจจุบัน ซึ่งจะพบว่าการแก้ปัญหาคุณภาพของการผลิตในปัจจุบันนั้น อาศัยประสบการณ์ และการแก้ปัญหาจากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งยังขาดการนำเอาหลักการทางทฤษฎีเข้าไปแก้ไข ดังนั้นผู้ศึกษาจึงนำเอาแนวความคิดดังกล่าวมาทดลองและพิจารณาด้วยปัจจัยต่างๆที่สำคัญ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นยังมีตัวแปรอีกหลายตัวที่มีผลกับชิ้นงานในด้านอื่น เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า การนำความร้อน การทนต่อแรงเฉือน และอื่นๆ ดังนั้นผู้ที่สนใจหรือทำการวิจัยในเรื่องที่ใกล้เคียงกันนี้ ควรจะแยกยกพิจารณาให้ประเด็นการศึกษาแคบลง และทำการศึกษากับข้อมูลที่มีมากขึ้น เช่นการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดจุดบกพร่องประเภท Bridging แต่เพียงอย่างเดียว หรือ การพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่เป็นคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของรอยเชื่อมที่ได้ เพื่อจะได้หาทางป้องกันและแก้ไขได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ควรพิจารณาตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้เป็นค่าจริง เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในมุมกว้างได้

- ในระหว่างทำการทดลองนั้นผู้ศึกษาพยายามควบคุมระบบให้เกิดความคงที่ตลอดการทดลอง แต่ในแง่ของความเป็นจริงอาจจะเกิดความเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลองซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลได้ ไม่ว่าจะเป็นการดำเนินการควบคุมเครื่องจักรให้มีความถูกต้องแม่นยำ , การทำการทดลองด้วยจำนวนตัวอย่างที่จำกัดตัวเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ และความต่อเนื่องของชิ้นส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ที่จะส่งผลกระทบต่อผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จึงควรเพิ่มจำนวนข้อมูลหรือประชากรในการทดลอง เพราะนอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มความถูกต้องในส่วนการวิเคราะห์และสรุปผลอีกด้วย

- ถึงแม้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์ และอุณหภูมิในส่วนของ การอบความร้อนจะไม่มีผล หรือมีผลกระทบน้อยมากต่อการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมตีบุก-ตะกั่วทั้งสามชนิด แต่ก็ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิต เพราะด้วยหน้าที่ที่สำคัญของทั้งสองปัจจัย โดยฟลักซ์จะมีหน้าที่หลักในการกำจัดคราบออกไซด์บนสายทองแดงของแผ่นลายวงจรพิมพ์ ก่อนทำการเชื่อม และช่วยให้ความสามารถในการเชื่อมสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณของฟลักซ์ต่อพื้นที่ที่เหมาะสมกับชนิดและพื้นที่ของแผ่นลายวงจรพิมพ์นั้นจึงจำเป็นต่อการผลิต เพื่อจะช่วยให้มีปริมาณฟลักซ์ที่เพียงพอต่อการทำงานเชื่อม ส่วนอุณหภูมิในส่วนของ การอบความร้อนจะทำหน้าที่หลักในการระเหยสารทำละลายในฟลักซ์ที่ใช้ก่อนการเชื่อม และป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock) จึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อนให้พอเหมาะกับการทำหน้าที่ของตนได้อย่างสมบูรณ์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ทิพรชัช ปรากฏการพิลาศ. การลดจุดบกพร่องของการประกอบแผ่นลายวงจรพิมพ์โดยการวิเคราะห์ความสามารถในการผลิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ทศพล เกียรติเจริญผล. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบแล็กเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- สุชาติ ชิวสาธน์. ผลกระทบของปัจจัยการควบคุมที่มีต่อสมบัติของอลูมิเนียมในกระบวนการขึ้นแบบไดแคสติง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- สมควร อติเรกลาภโรดม. ระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการแก้ปัญหาของกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมในแนวตั้งลงบนแผ่นวงจรพิมพ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

- C. J. Thwaites. Optimum Reliability in Printed Circuit Soldering through Quality Assurance. Welding Journal ,October ,1972.
- C. J. Thwaites. The Attainment of Reliability in Modern Soldering Techniques for Electronic Assemblies. Vol. 17 ,1972.
- Clyde F. Coombs ,Jr. Printed Circuit Handbook. Second edition McGraw-Hill Book Company, 1988.
- Howard H. Manko. Solder and soldering. Second edition McGraw-Hill Book Company ,1979.
- Howard H. Manko. Soldering Handbook for Printed circuits and surface mounting. Second edition Van Nostrand Reinhold ,1995.
- Kayunoni Shiabta, Hitoshi Kume. Production Reform Through Quality Improvement. Kenshu. No08, 1988.
- Montgomery, C. D. Design and Analysis of Experiment. Singapore: John Wiley & Sons ,1991.

Ralph W. Woodgate. Handbook of machine Soldering. John Wiley & Sons ,1983.

Stephen W. Hinch. Handbook of Surfacemount Technology. Longman Scientific & Technical ,1988.

W. R. Lewis, B. Sc. (Lond.), F. R. I. C. Notes on Soldering. Tin Research Institute ,1961.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก. แสดงตารางการออกแบบการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 แสดงเมตริกการออกแบบการทดสอบความเร็วของสายพาน

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	1	2	3
80	4	5	6
90	7	8	9
100	10	11	12
110	13	14	15
120	16	17	18
130	19	20	21
140	22	23	24

ตารางที่ ก.2 แสดงลำดับการทดลอง

No.*	หมายเลข ๑	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข
1	8	9	15	17	21
2	18	10	20	18	11
3	10	11	9	19	2
4	23	12	4	20	13
5	17	13	12	21	22
6	5	14	7	22	16
7	14	15	1	23	19
8	6	16	24	24	3

* ลำดับการทดลอง

๑ หมายเลขสภาวะการทดลองในตารางเมตริก

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนการทดสอบความเร็วของสายพาน

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	1.67	-1.33	0.67
80	-0.67	-1.67	2.33
90	-0.33	1.67	-1.33
100	-2	2	0
110	1	0	-1
120	-1.67	0.33	1.33
130	0	1	-1
140	0.67	-0.33	-0.33

ตารางที่ ก.4 แสดงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/24$	Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/24$
1	-2	0.0208	13	0	0.5208
2	-1.67	0.0625	14	0	0.5625
3	-1.67	0.1042	15	0.33	0.6042
4	-1.33	0.1458	16	0.67	0.6458
5	-1.33	0.1875	17	0.67	0.6875
6	-1	0.2292	18	1	0.7292
7	-1	0.2708	19	1	0.7708
8	-0.67	0.3125	20	1.33	0.8125
9	-0.33	0.3542	21	1.67	0.8542
10	-0.33	0.3958	22	1.67	0.8958
11	-0.33	0.4375	23	2	0.9375
12	0	0.4792	24	2.33	0.9792

e_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก.5 แสดงเมตริกการออกแบบการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

ค่าความถ่วงจำเพาะ ของฟลักซ์	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
0.800	1	2	3
0.810	4	5	6
0.820	7	8	9
0.830	10	11	12
0.840	13	14	15
0.850	16	17	18
0.860	19	20	21

ตารางที่ ก.6 แสดงลำดับการทดลอง

No.*	หมาย เลข ๑	No.	หมาย เลข	No.	หมาย เลข
1	10	8	11	15	1
2	7	9	20	16	21
3	3	10	18	17	17
4	12	11	2	18	4
5	14	12	8	19	6
6	9	13	15	20	16
7	5	14	13	21	19

* ลำดับการทดลอง

๑ หมายเลขสภาวะการทดลองในตารางเมตริก

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์

ค่าความถ่วงจำเพาะ ของฟลักซ์	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
0.800	0	2	-2
0.810	0	1	-1
0.820	0.67	-1.33	0.67
0.830	-4.67	3.33	1.33
0.840	-2.67	5.33	-2.67
0.850	-2	6	-4
0.860	3.33	0.33	-3.67

ตารางที่ ก.8 แสดงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/21$	Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/21$
1	-4.67	0.0238	12	0.33	0.5476
2	-4	0.0714	13	0.67	0.5952
3	-3.67	0.1190	14	0.67	0.6428
4	-2.67	0.1667	15	1	0.6905
5	-2.67	0.2143	16	1.33	0.7381
6	-2	0.2619	17	2	0.7857
7	-2	0.3095	18	3.33	0.8333
8	-1.33	0.3571	19	3.33	0.8809
9	-1	0.4047	20	5.33	0.9286
10	0	0.4524	21	6	0.9762
11	0	0.500			

e_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก.9 แสดงเมตริกการออกแบบการทดสอบอุณหภูมิในสัณการอบความร้อน

อุณหภูมิในสัณการอบ ความร้อน (°C)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
80	1	2	3
90	4	5	6
100	7	8	9
110	10	11	12

ตารางที่ ก.10 แสดงลำดับการทดลอง

No.*	หมายเลข	No.	หมายเลข	No.	หมายเลข
1	9	5	10	9	4
2	11	6	8	10	12
3	2	7	3	11	1
4	5	8	6	12	7

* ลำดับการทดลอง

๑ หมายเลขสภาวะการทดลองในตารางเมตริก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนการทดสอบอุณหภูมิใน ส่วนการ
อบความร้อน

อุณหภูมิใน ส่วนการอบ ความร้อน (°C)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	4	-1	-3
80	-0.67	3.67	-2.33
90	2	0	-2
100	3.67	-2.33	-1.33

ตารางที่ ก.12 แสดงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/12$	Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/12$
1	-3	0.0417	7	-0.67	0.5417
2	-2.33	0.1250	8	0	0.6250
3	-2.33	0.2083	9	2	0.7083
4	-2	0.2917	10	3.67	0.7917
5	-1.33	0.3750	11	3.67	0.8750
6	-1	0.4583	12	4	0.9583

e_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก.13 แสดงเมตริกการออกแบบการทดลองของการแปรเปลี่ยนความเร็ว
ของสายพานกับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

จำนวนซ้ำ ของ การทดลอง	1		2		3		4	
	ลักษณะการไหล ของคลื่น		ลักษณะการไหล ของคลื่น		ลักษณะการไหล ของคลื่น		ลักษณะการไหล ของคลื่น	
ความเร็วของ สายพาน (cm / min)	ไหลด้าน เดียว	ไหลสอง ด้าน	ไหลด้าน เดียว	ไหลสอง ด้าน	ไหลด้าน เดียว	ไหลสอง ด้าน	ไหลด้าน เดียว	ไหลสอง ด้าน
70	1	2	3	4	5	6	7	8
100	9	10	11	12	13	14	15	16
130	17	18	19	20	21	22	23	24

ตารางที่ ก.14 แสดงลำดับการทดลอง

No.*	หมาย เลข ๓	No.	หมาย เลข	No.	หมาย เลข
1	12	9	11	17	10
2	24	10	20	18	23
3	3	11	13	19	8
4	7	12	6	20	17
5	21	13	19	21	22
6	1	14	5	22	14
7	16	15	15	23	2
8	9	16	4	24	18

* ลำดับการทดลอง

๓ หมายเลขสภาวะการทดลองในตารางเมตริก

ตารางที่ ก.15 แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของการแปรเปลี่ยน
ความเร็วของสายพานกับลักษณะการไหลของคลื่นโลหะผสมโซลเดอร์

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	ลักษณะการไหลของคลื่น			
	การไหลด้านเดียว		การไหลสองด้าน	
70	-1	1	0.25	0.25
	1	-1	1.25	-1.75
100	0.25	0.25	-0.75	1.25
	-0.75	0.25	-0.75	0.25
130	0	1	-0.25	0.75
	1	-2	0.75	-1.25

ตารางที่ ก.16 แสดงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/24$	Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/24$
1	-2	0.0208	13	0.25	0.5208
2	-1.75	0.0625	14	0.25	0.5625
3	-1.25	0.1042	15	0.25	0.6042
4	-1	0.1458	16	0.25	0.6458
5	-1	0.1875	17	0.75	0.6875
6	-0.75	0.2292	18	0.75	0.7292
7	-0.75	0.2708	19	1	0.7708
8	-0.75	0.3125	20	1	0.8125
9	-0.25	0.3542	21	1	0.8542
10	0	0.3958	22	1	0.8958
11	0.25	0.4375	23	1.25	0.9375
12	0.25	0.4792	24	1.25	0.9792

e_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก.17 แสดงเมตริกการออกแบบการทดสอบความเร็วของสายพาน
ที่ได้ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอรัมีการไหลทั้งสองด้าน

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	1	2	3
80	4	5	6
90	7	8	9
100	10	11	12
110	13	14	15
120	16	17	18
130	19	20	21
140	22	23	24
150	25	26	27

ตารางที่ ก.18 แสดงลำดับการทดลอง

No.*	หมาย เลข ๑	No.	หมาย เลข	No.	หมาย เลข
1	4	10	11	19	15
2	9	11	26	20	22
3	13	12	19	21	20
4	17	13	7	22	24
5	21	14	5	23	14
6	3	15	6	24	27
7	24	16	10	25	2
8	8	17	23	26	16
9	12	18	1	27	18

* ลำดับการทดลอง.

๑ หมายเลขสภาวะการทดลองในตารางเมตริก

ตารางที่ ก.19 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนการทดสอบความเร็วของสายพานที่ได้
ทำการปรับให้คลื่นโลหะผสมโซลเดอร์มีการไหลทั้งสองด้าน

ความเร็วของสายพาน (cm / min)	จำนวนซ้ำของการทดลอง		
	1	2	3
70	-0.67	-1.67	2.33
80	0.67	-0.33	-0.33
90	0.33	-0.67	0.33
100	-0.33	0.67	-0.33
110	-0.33	1.67	-1.33
120	-0.67	-0.67	1.33
130	1	0	-1
140	-0.67	-1.67	2.33
150	-0.67	-0.67	1.33

ตารางที่ ก.20 แสดงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/27$	Order (k)	Residual e_{ij}	$P_k =$ $(k-1/2)/27$
1	-1.67	0.0185	14	-0.33	0.5000
2	-1.67	0.0555	15	-0.33	0.5370
3	-1.33	0.0926	16	-0.33	0.5741
4	-1	0.1296	17	0	0.6111
5	-0.67	0.1667	18	0.33	0.6481
6	-0.67	0.2037	19	0.33	0.6852
7	-0.67	0.2407	20	0.67	0.7222
8	-0.67	0.2778	21	0.67	0.7593
9	-0.67	0.3148	22	1	0.7963
10	-0.67	0.3518	23	1.33	0.8333
11	-0.67	0.3889	24	1.33	0.8704
12	-0.33	0.4259	25	1.67	0.9074
13	-0.33	0.4629	26	2.33	0.9444
			27	2.33	0.9815

e_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ภาคผนวก ข. ข้อมูลด้านเทคนิคของเครื่องมือในการทดลอง



สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 แสดงข้อมูลส่วนผสมของโลหะผสมโซลเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง
(Solder Bar 63%)

Check Item		Standard A Grade	Analysis Result
Chemical Composition			
Lot No.		JIS 3282-1986	19064202
Tin	(Sn)	62-64	63.010
Lead	(Pb)	Balance	Balance
Arsenic	(As)	0.03 Max	0.011
Bismuth	(Bi)	0.05 Max	0.022
Copper	(Cu)	0.05 Max	0.001
Iron	(Fe)	0.03 Max	0.001
Silver	(Ag)		<0.001
Antimony	(Sb)	0.30 Max	0.024
Zinc	(Zn)	0.003 Max	<0.001
Aluminium	(Al)	0.005 Max	<0.001
Cadmium	(Cd)	0.005 Max	<0.001

Note: Analysis Method : Atomic Absorption Spectrophotometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลอง

SPEEDY FLUX AGF-200J-3

Low Residue – No Cleaning Type Post Flux for Chip Component Assembly

Specification	Characteristics	Testing Method
State	Low viscosity liquid	
Color	Light yellow, Transparent	
Specific gravity (at 20 °C)	0.825 ± 0.005	
Solid content	15.0 ± 0.5 by wt%	Dry for 1 Hr, 130 °C
Chlorine content	0.09 ± 0.03 by wt%	JIS Z 3197
Most suitable soldering temperature	230-260 °C	
Spread factor	93%	JIS Z 3197
Copper corrosion test	Not corrosive	JIS Z 3197
Insulation resistance	$1.0 \times 10^{12} \Omega$	JIS Z 3197
Applied voltage fine copper wire corrosion test	No breaking conformable	QQ-S-571d
Water solution resistance	$1.0 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$	JIS Z 3197
Solderability by meniscograph (wetting time T)	Copper plate 0.5 sec Oxidized copper plate 0.8 sec	
Flash point	12 °C	
Ignition point	400 °C	
Exclusive thinner	#5080	

ตารางที่ ข.3 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่อง Dip tester ที่ใช้ในการทดลอง

DIP TESTER MODEL: DS-02

Fundamental Specifications

ITEM	DESCRIPTION
Cold connecting point compensation	Automatically compensated with a platinum temperature-measuring resistor.
Temperature used	Less than 5 min. OK surrounding at 120 °C
Battery used	S-006p. DC9V, 1pc.
Time used	Continuously 10 hours.
Sensor fitting panel, longevity	Solder temperature 250 °C, dip time 5 sec more than 500 times.
Configurational dimensions	95mm (W) × 200mm (L) × 65mm (H)
Tester attaching width	132mm – 162 mm
Weight	800 g (without batteries)

Measuring data Specifications

ITEM	SENSOR	INDICATION METHOD	MEASURING RANGE	Contains/ accuracy
Solder temperature	CA sheath thermocouple	LCD, 3-digit figure	0-300 °C	3 °C (200-300 °C)
Temp.of the under side surface of the PCB	CA thermocouple for surface temp.	Switch is indicated with a rotary SW.	0-200 °C	3 °C (70-200 °C)
Dip time	Electrode		0-10.0 sec.	± 0.2 sec.

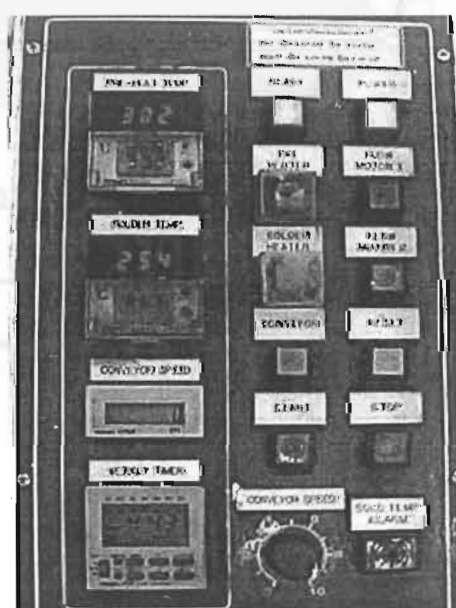


ภาคผนวก ก. รูปภาพประกอบวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

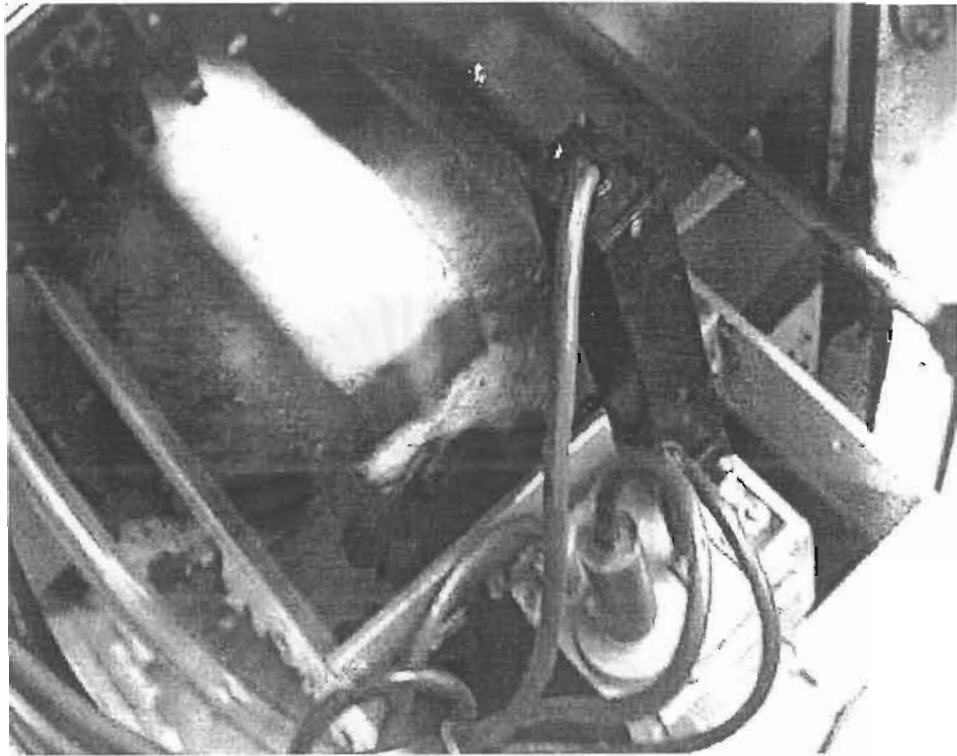
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.1 แสดงเครื่องเชื่อมอัตโนมัติที่ใช้ในการทดลอง



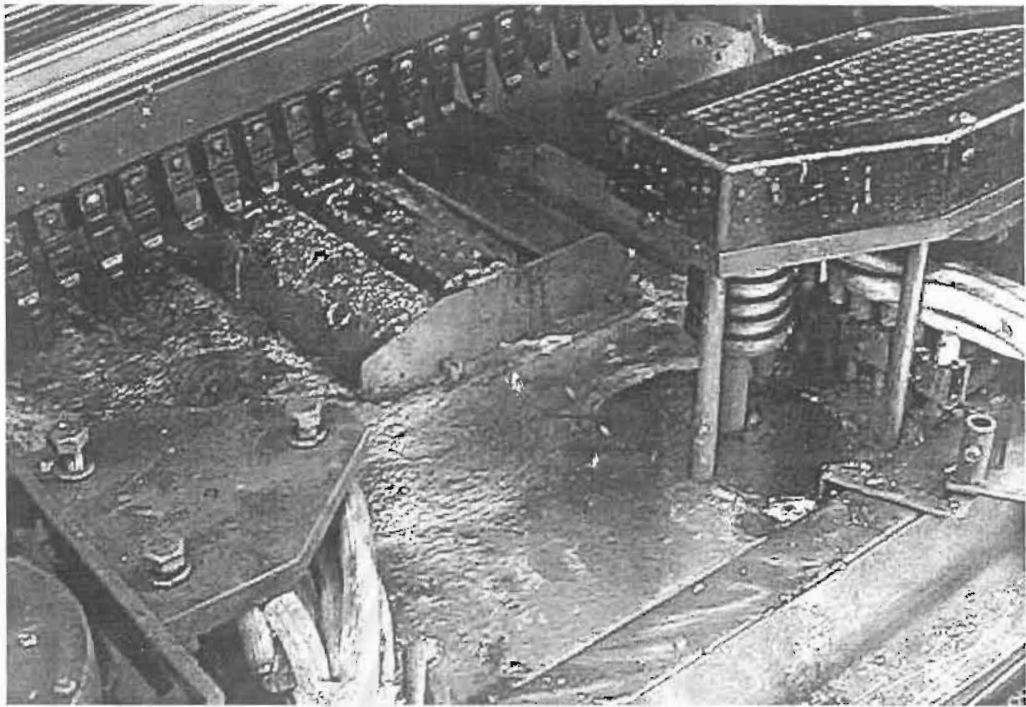
รูปที่ ค.2 แสดงส่วนแผงควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ



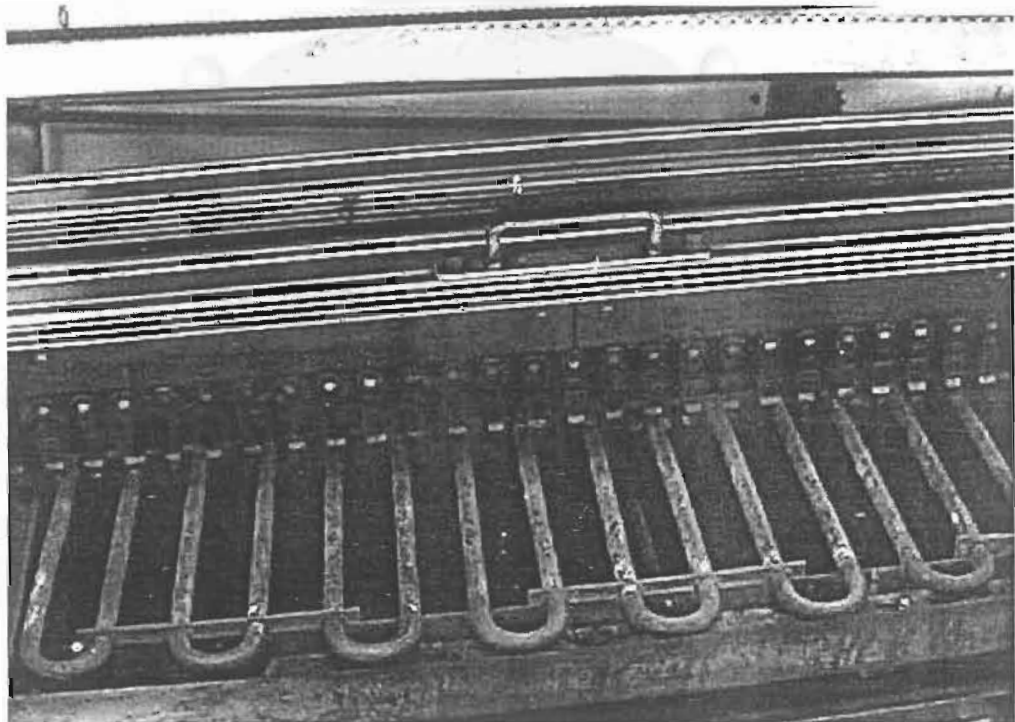
รูปที่ ค.3 แสดงอุปกรณ์ในส่วนทำฟองฟลักซ์พร้อมกับชุดควบคุม



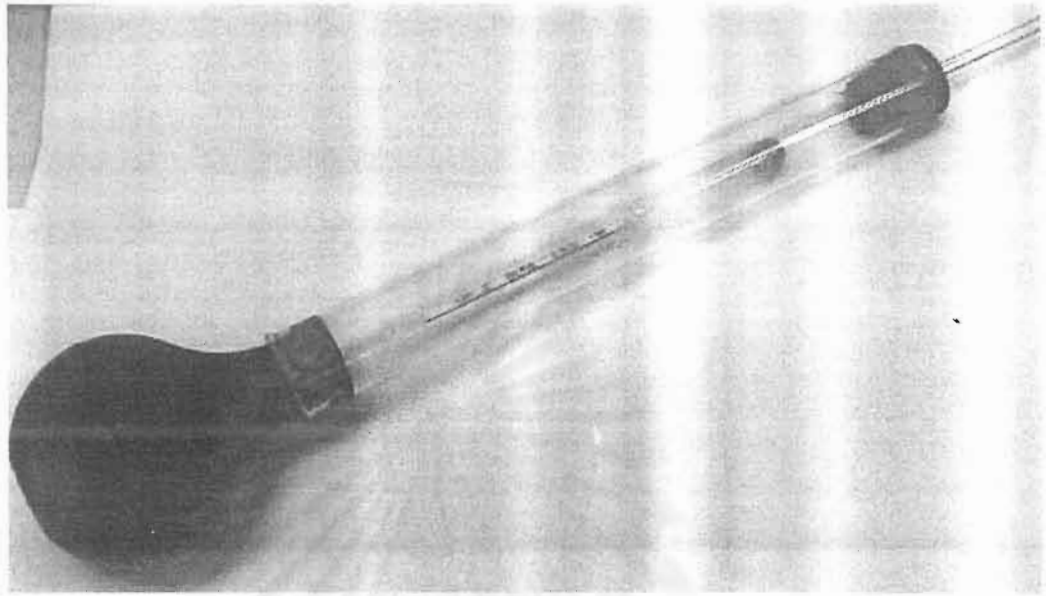
รูปที่ ค.4 แสดงชุดควบคุมการทำงานของส่วนปรับความถี่เฉพาะของฟลักซ์



รูปที่ ค.5 แสดงชุดการสร้างคลื่น และหัวฉีดในบ่อโลหะผสมโซลเดอร์



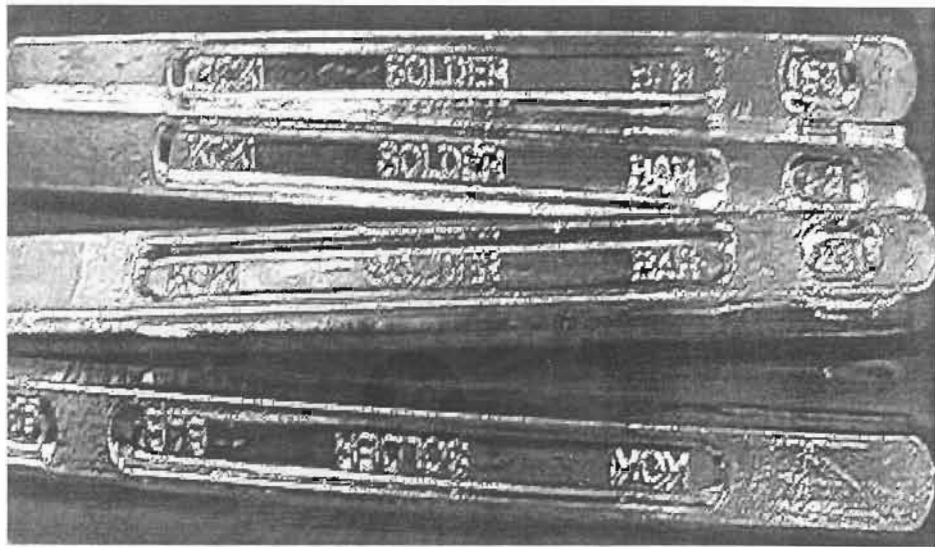
รูปที่ ค.6 แสดงชุดขดลวดทำความร้อนในส่วนการอบความร้อน



รูปที่ ค.7 แสดงHydrometer ที่ใช้ในการวัดความถ่วงจำเพาะของฟลักซ์



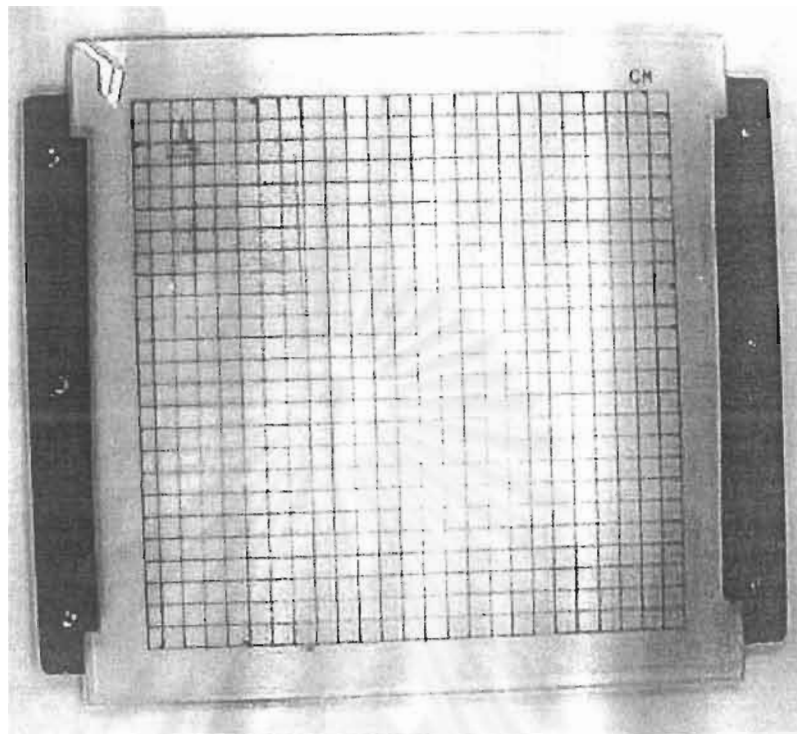
รูปที่ ค.8 แสดงDip Tester ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของส่วนการอบความร้อน



รูปที่ ค.9 แสดงโลหะผสมโซลเดอร์ชนิดแท่งที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.10 แสดงฟลักซ์และตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.11 แสดงกระจกทนความร้อนที่ใช้ในการตรวจสอบความสม่ำเสมอ
ของคลื่นโลหะผสมโซลเดอ์ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง. แสดงที่มาของค่า Beta ในการทดลองส่วนที่หนึ่ง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณค่า Beta ในส่วนของการทดลอง

ในการวิเคราะห์หาค่า Beta หรือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทสอง ซึ่งในที่นี้คือค่าความน่าจะเป็นที่จะยอมรับสมมติฐานของการทดลองต่างๆ ที่สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง โดยในการคำนวณจะหาได้จากกราฟ Operating characteristic curves ที่พล็อตระหว่างค่า Beta และพารามิเตอร์ Φ โดยที่

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2}$$

1. การคำนวณค่า Beta ในการทดสอบความเร็วของสายพาน

จากการประมาณผลของรอยเชื่อมที่บกพร่องคาดว่าในแต่ละระดับของความเร็วจะมีจำนวนจุดบกพร่องเฉลี่ยดังนี้

$$\mu_{70} = 12 \quad \mu_{80} = 11 \quad \mu_{90} = 10 \quad \mu_{100} = 8 \quad \mu_{110} = 10 \quad \mu_{120} = 11 \quad \mu_{130} = 12 \quad \mu_{140} = 13$$

โดยที่ $\tau_i = \mu_i - \bar{\mu}$, $\bar{\mu} = 87/8 = 10.875$, $\alpha = 0.05$, a คือจำนวนชั้นในการทดลอง = 8 และ $\sigma^2 = \text{MSE} = 2.083$ ดังนั้นจะได้

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} = \frac{3(16.875)}{8(2.083)} = 3.038$$

จากนั้นจึงนำค่า Φ ไปเปิดตาราง Operating characteristic curves สำหรับขั้นของความอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ $a-1 = 7$ และ $a(n-1) = 8 \times 2 = 16$ โดยที่ n คือจำนวนซ้ำในการทดลอง ซึ่งจากตารางที่ค่า $\Phi = 1.742$ จะได้ค่าเบต้าที่ประมาณ 0.15

2. การคำนวณค่า Beta ในการทดสอบอุณหภูมิในส่วนของความร้อน

จากการประมาณผลของรอยเชื่อมที่บกพร่องคาดว่าในแต่ละระดับของอุณหภูมิจะมีจำนวนจุดบกพร่องเฉลี่ยดังนี้

$$\mu_{70} = 16 \quad \mu_{80} = 14 \quad \mu_{90} = 11 \quad \mu_{100} = 8$$

โดยที่ $\tau_i = \mu_i - \bar{\mu}$, $\bar{\mu} = 49/4 = 12.25$, $\alpha = 0.05$, a คือจำนวนชั้นในการทดลอง = 4 และ $\sigma^2 = \text{MSE} = 9.417$ ดังนั้นจะได้

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a \sigma^2} = \frac{3(36.75)}{4(9.417)} = 2.927$$

จากนั้นจึงนำค่า Φ ไปเปิดตาราง Operating characteristic curves สำหรับชั้นของความอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ $a-1 = 3$ และ $a(n-1) = 4 \times 2 = 8$ โดยที่ n คือจำนวนซ้ำในการทดลอง ซึ่งจากตารางที่ค่า $\Phi = 1.710$ จะได้ค่าเบต้าที่ประมาณ 0.30

3. การคำนวณค่า Beta ในการทดสอบอนุกรมในสถานการณ์รอบความร้อน

จากการประมาณผลของรอยเชื่อมที่บกพร่องคาดว่าในแต่ละระดับของอุณหภูมิจะมีจำนวนจุดบกพร่องเฉลี่ยดังนี้

$$\mu_{0.800} = 13 \quad \mu_{0.810} = 10 \quad \mu_{0.820} = 8 \quad \mu_{0.830} = 10 \quad \mu_{0.840} = 13 \quad \mu_{0.850} = 15 \quad \mu_{0.860} = 17$$

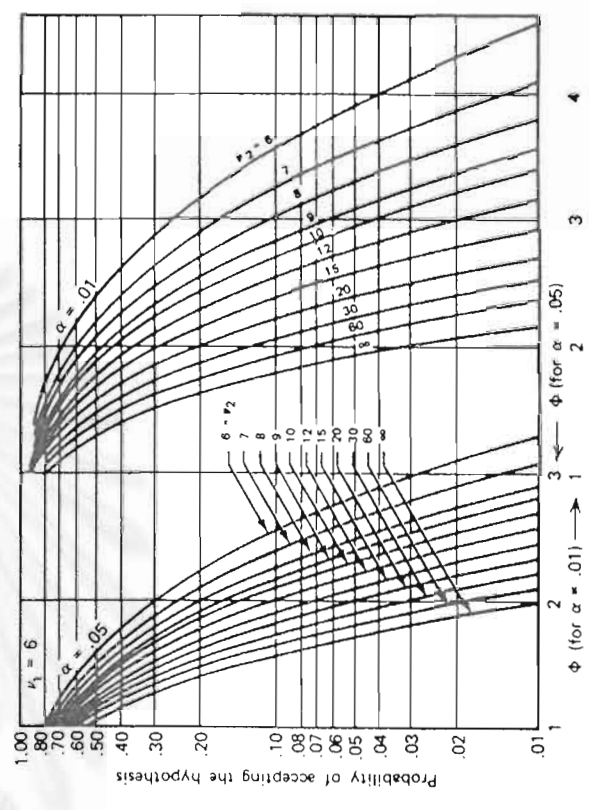
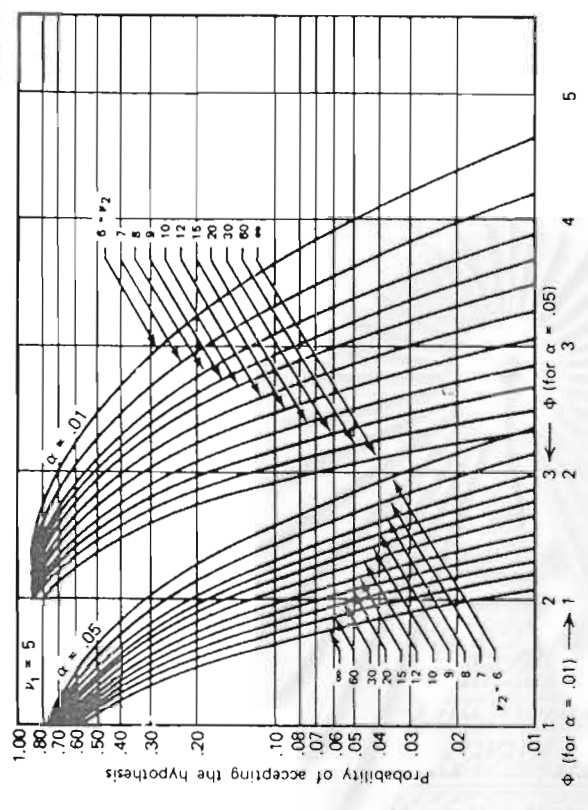
โดยที่ $\tau_i = \mu_i - \bar{\mu}$, $\bar{\mu} = 86/7 = 12.285$, $\alpha = 0.05$, a คือจำนวนชั้นในการทดลอง = 7 และ $\sigma^2 = \text{MSE} = 12.191$ ดังนั้นจะได้

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a \sigma^2} = \frac{3(59.428)}{7(12.191)} = 2.089$$

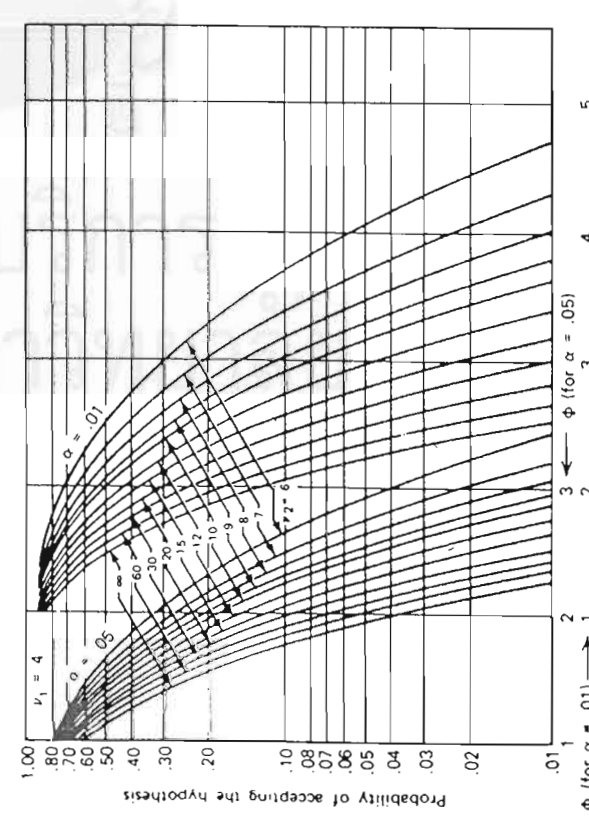
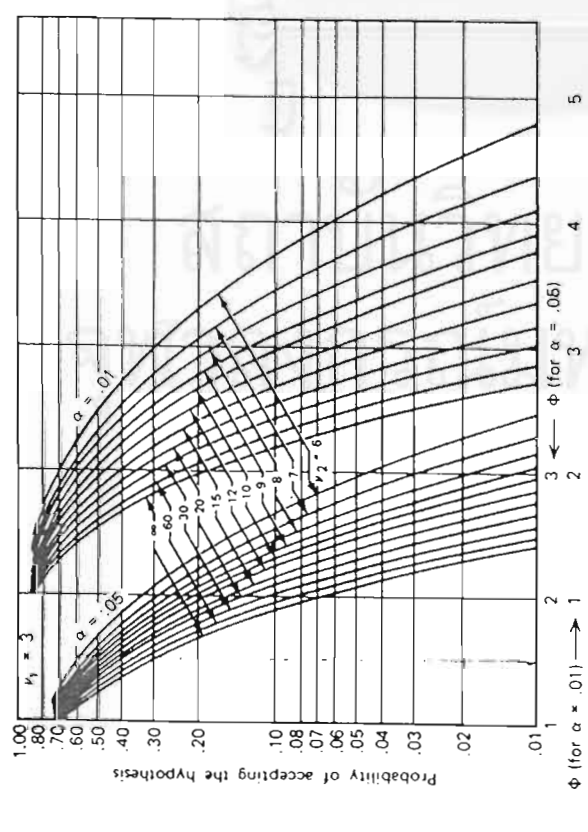
จากนั้นจึงนำค่า Φ ไปเปิดตาราง Operating characteristic curves สำหรับชั้นของความอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ $a-1 = 6$ และ $a(n-1) = 7 \times 2 = 14$ โดยที่ n คือจำนวนซ้ำในการทดลอง ซึ่งจากตารางที่ค่า $\Phi = 1.445$ จะได้ค่าเบต้าที่ประมาณ 0.32

ตารางแสดงกราฟ Operating Characteristic Curves สำหรับ Fixed Effects Model

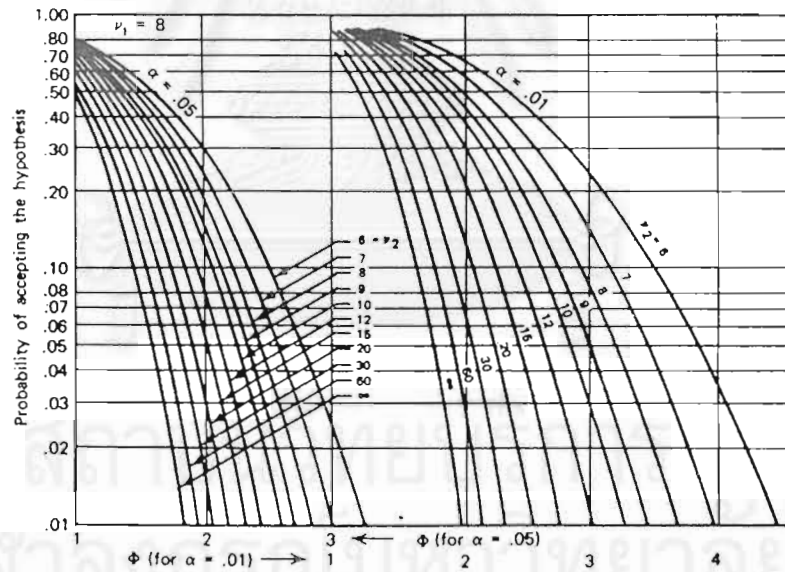
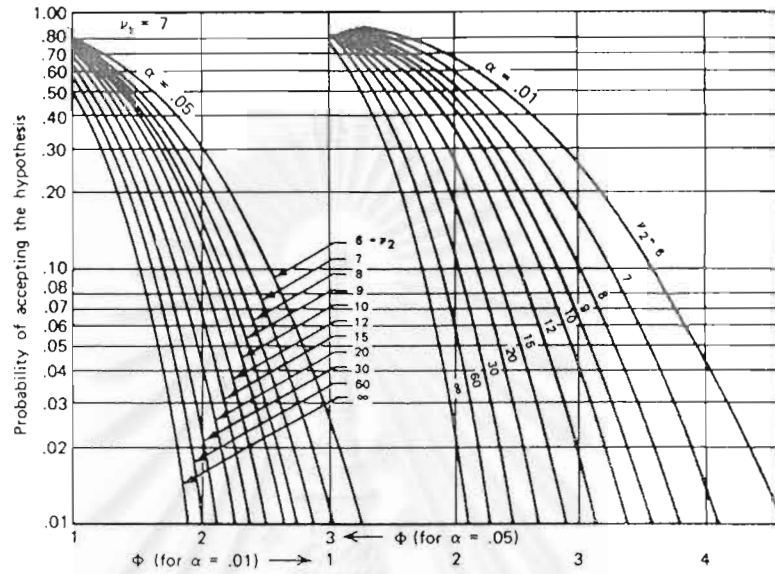
V. Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance (continued)



V. Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance (continued)



V. Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance
(continued)



ประวัติผู้เขียน

นายสุรพล สุรบรรเจิตพร เกิดวันที่ 28 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และได้เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย