

การกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดของเสียในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี



นางสาววรรณฤดี อินทนะนุก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINE PROPER CONDITIONS TO REDUCE DEFECTIVES
IN A SOLDER PASTE SCREEN PRINTING PROCESS

Miss Wanruedee Intananok



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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

วรรณฤดี อินทนะนง : การกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดของเสียในกระบวนการ
 สกรีนโลหะบัดกรี (DETERMINE PROPER CONDITIONS TO REDUCE DEFECTIVES IN
 A SOLDER PASTE SCREEN PRINTING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.
 วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ, 183 หน้า.

กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเป็นกระบวนการผลิตหลักกระบวนการหนึ่งของการผลิต
 แผงวงจรไฟฟ้าสำหรับเครื่องกระตุ้นหัวใจ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่เบี่ยงเบนไป
 จากขีดจำกัดข้อกำหนดเป็นสาเหตุหลักทำให้ของเสียเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านคุณภาพของ
 แผงวงจรไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีที่เกิด
 ขึ้นกับแผงวงจรไฟฟ้าด้านล่างและด้านบน

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนถูกนำมาใช้เพื่อคัดกรองปัจจัย 6 ปัจจัย
 หลักในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีประกอบด้วย (1) ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (2) แรงที่ใช้ในการ
 สกรีน (3) ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน (4) ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (5)
 ขนาดของใบพัด และ (6) อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบ
 การทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแก่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัว
 แปรตอบสนองของแผงวงจรด้านล่างและด้านบน

การทดลองเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่ได้ พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบน
 แผงวงจรด้านล่างอยู่ที่ 102 เปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนของ
 เสียลดลงจากเดิม 3 เปอร์เซ็นต์มาอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้การทดลองเพื่อยืนยันผลของแผงวงจรด้านบน พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร
 โลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบนอยู่ที่ 105 เปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และมี
 จำนวนของเสียลดลงจากเดิม 2 เปอร์เซ็นต์มาอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670952921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: PRINT CIRCUIT BOARD ASSEMBLY / FRICTIONAL FACTORIAL DESIGN / BOX-BEHNKEN

WANRUEDEE INTANANOK: DETERMINE PROPER CONDITIONS TO REDUCE DEFECTIVES IN A SOLDER PASTE SCREEN PRINTING PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, 183 pp.

Solder paste screen printing process is one of the major processes in print circuit board assembly (PCBA) for defibrillator. The average percentage volume of solder paste deviated from specification limits is the main cause of increasing soldering defects and impacting PCBA quality. The objective of this paper is to reduce defectives from solder paste screen printing process in PCBA bottom and top sides.

Fractional Factorial Design was employed in the experiment of screening six main process factors including (1) Screening Speed (2) Screening Force (3) Snap off Speed (4) Snap off Distance (5) Squeegee Size and (6) Solder paste shelf life. Response Surface Methodology with Box-Behnken experimental design was used to find the best conditions of significant factors that affect the response of PCBA bottom and top sides.

The evaluation was performed to confirm the optimal conditions. The analysis found that the average percentage volume of solder paste on bottom side is 102 percentage closed to the target of 100 percentage and soldering defects reduce from 3 percentage to 1 percentage.

In addition, the evaluation was performed to confirm the optimal conditions of top side found that the average percentage volume of solder paste is 105 percentage closed to the target of 100 percentage and soldering defects reduce from 2 percentage to 0 percentage.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาและช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและสละเวลาในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะทั้งในส่วนทฤษฎีและขั้นตอนการทำวิจัยอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยจึงขอโอกาสนี้กราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ ประธานกรรมการรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานันทะ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการตรวจสอบข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณหัวหน้างาน ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมแผนก Sustaining Engineering ผู้จัดการฝ่ายผลิต และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ช่วยให้ข้อมูล ระดมความคิดเห็น คอยอำนวยความสะดวก และช่วยติดต่อประสานงานให้เป็นอย่างดียิ่งขณะทำการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนพนักงานฝ่ายผลิตในโรงงานกรณีศึกษาที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมให้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่เป็นผู้ให้กำลังใจสำหรับการศึกษาของผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด และอีกหลายคนที่ไม่ได้กล่าวนามที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้เสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา.....	1
1.2. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์	2
1.3. ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	8
1.4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	17
1.5. ขอบเขตของงานวิจัย	17
1.6. วิธีดำเนินการวิจัย	18
1.7. ผลที่ได้รับ	18
1.8. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	19
1.9. แผนการดำเนินการวิจัย	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.1. การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของระบบการวัด	25
2.1.1. การประเมินผลคุณสมบัติด้านความเอนเอียงของระบบการวัด.....	25
2.1.2. การประเมินผลคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด.....	26
2.1.3. การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ	28
2.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง.....	30

2.2.1. ความหมายของการออกแบบการทดลอง.....	30
2.2.2. แนวทางในการออกแบบการทดลอง.....	30
2.2.3. หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง.....	31
2.2.4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking).....	32
2.3. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment).....	33
2.4. วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ.....	37
2.5. ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	40
2.6. แผนภูมิควบคุม.....	42
2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
2.7.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี.....	46
2.7.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง.....	49
บทที่ 3 การระบุสาเหตุของปัญหา.....	51
3.1. การศึกษากระบวนการผลิตและเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง.....	51
3.1.1. แผนวงจรของผลิตภัณฑ์รุ่น B.....	51
3.1.2. กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจร.....	52
3.1.3. เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี.....	53
3.2. กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีก่อนการปรับปรุง.....	55
3.3. การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรี.....	58
3.3.1. การพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีด้วยวิธีระดมความคิด.....	58
3.3.2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อวิเคราะห์.....	69
3.4. สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรี.....	70
บทที่ 4 การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของเครื่องมือวัด.....	72
4.1. หลักการทำงานของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรี.....	72

4.2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรี.....	73
4.3. หลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบแผงวงจร	77
4.4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องตรวจสอบแผงวงจร	77
บทที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	86
5.1. การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	86
5.2. แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design).....	86
5.2.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	87
5.2.2. ตัวแปรตอบสนอง.....	89
5.2.3. การออกแบบการทดลอง	90
5.2.4. ขั้นตอนการทดลอง.....	95
5.2.5. การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองของแผงวงจรด้านล่าง	96
5.2.6. การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองของแผงวงจรด้านบน	107
5.3. วิธีการพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) ของแผงวงจรด้านล่าง.....	119
5.3.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	120
5.3.2. ตัวแปรตอบสนอง.....	120
5.3.3. การทดลอง.....	121
5.3.4. การวิเคราะห์ผลการทดลองของแผงวงจรด้านล่างด้วยวิธีการพื้นผิว.....	122
5.4. วิธีการพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) ของแผงวงจรด้านบน.....	132
5.4.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	133
5.4.2. ตัวแปรตอบสนอง.....	133
5.4.3. การทดลอง.....	134
5.4.4. การวิเคราะห์ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบนด้วยวิธีการพื้นผิว	136
บทที่ 6 การควบคุมและติดตามผล	151

6.1. การทดลองเพื่อยืนยันผลของแผนวงจรด้านล่าง	151
6.2. การทดลองเพื่อยืนยันผลของแผนวงจรด้านบน	152
6.3. การจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมแก่ช่างเทคนิค	153
6.4. การจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการ	157
6.5. แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาณของโลหะบัดกรี	160
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	164
7.1. บทสรุป	164
7.1.1. สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา	164
7.1.2. สรุปสาเหตุของปัญหาที่มีผลกระทบต่อปริมาณโลหะบัดกรี	164
7.1.3. สรุปขั้นตอนการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลอง	165
7.1.4. สรุปขั้นตอนการควบคุมและติดตามผลที่เกิดจากการปรับปรุงแก้ไข	166
7.2. ข้อเสนอแนะ	166
รายการอ้างอิง	167
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	183

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ตัวอย่างของเสียที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์	15
ตารางที่ 2.1	ตารางสรุปความสัมพันธ์ของโครงสร้างแฝง (Alias Structure).....	35
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างตารางการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน	36
ตารางที่ 2.3	ค่าคงที่สำหรับสร้างแผนภูมิควบคุม	45
ตารางที่ 2.4	สรุปสูตรการคำนวณหาขีดจำกัดข้อกำหนด	46
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ B ในช่วงระหว่างเดือน	55
ตารางที่ 3.2	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องแต่ละประเภท	58
ตารางที่ 3.3	สรุปการวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบเพื่อจัดลำดับความสำคัญ	62
ตารางที่ 4.1	ขนาดช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์ของผลิตภัณฑ์รุ่น B	73
ตารางที่ 4.2	ค่าของอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐาน	74
ตารางที่ 4.3	ผลลัพธ์จากการทดสอบ	74
ตารางที่ 4.4	ตารางแจกแจงตัวอย่างและจำนวนคนที่ใช้ในการทดสอบ	78
ตารางที่ 4.5	ตารางแจกแจงอาการเสียของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	78
ตารางที่ 4.6	สรุปผลการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลนับเปรียบเทียบกับเกณฑ์.....	85
ตารางที่ 5.1	ปัจจัยนำเข้า 6 ปัจจัย	86
ตารางที่ 5.2	ระดับของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน	87
ตารางที่ 5.3	ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม.....	90
ตารางที่ 5.4	ลำดับของการทดลองที่ได้จากการสุ่มลำดับ	93
ตารางที่ 5.5	ผลการทดลองของแผงวงจรด้านล่าง.....	96
ตารางที่ 5.6	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง	100
ตารางที่ 5.7	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง	104
ตารางที่ 5.8	ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบน	107

ตารางที่ 5.9	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน.....	112
ตารางที่ 5.10	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน.....	116
ตารางที่ 5.11	ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนของแผงวงจรด้านล่าง.....	120
ตารางที่ 5.12	ตัวแปรตอบสนองของแผงวงจรด้านล่าง.....	120
ตารางที่ 5.13	ลำดับของการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแผงวงจรด้านล่าง.....	122
ตารางที่ 5.14	ผลการทดลองของแผงวงจรด้านล่าง.....	123
ตารางที่ 5.15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง.....	125
ตารางที่ 5.16	เงื่อนไขสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านล่าง.....	129
ตารางที่ 5.17	ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนของแผงวงจรด้านบน.....	133
ตารางที่ 5.18	ตัวแปรตอบสนองของแผงวงจรด้านบน.....	133
ตารางที่ 5.19	ลำดับของการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแผงวงจรด้านบน.....	134
ตารางที่ 5.20	ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบน.....	136
ตารางที่ 5.21	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน.....	140
ตารางที่ 5.22	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน.....	142
ตารางที่ 5.23	การกำหนดเงื่อนไขสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีน.....	146
ตารางที่ 5.24	การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนแผงวงจรด้านบน.....	147
ตารางที่ 6.1	เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง.....	151
ตารางที่ 6.2	ผลการทดลองแผงวงจรด้านล่างเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด.....	151
ตารางที่ 6.3	เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านบน.....	152
ตารางที่ 6.4	ผลการทดลองแผงวงจรด้านบนเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด.....	153

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	แผนผังกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติด	4
รูปที่ 1.2	ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนกรกฎาคม – เดือนธันวาคม 2557.....	9
รูปที่ 1.3	ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนกรกฎาคม 2557 – เดือนมีนาคม 2558	10
รูปที่ 1.4	ชนิดของเสียที่เกิดขึ้นแผงวงจรด้านล่าง.....	11
รูปที่ 1.5	ชนิดของเสียที่เกิดขึ้นแผงวงจรด้านบน.....	12
รูปที่ 1.6	แผนภูมิพาเรโตของแผงวงจรด้านล่าง	13
รูปที่ 1.7	แผนภูมิพาเรโตของแผงวงจรด้านบน	14
รูปที่ 1.8	การหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่เครื่องวัดตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี	16
รูปที่ 2.1	พื้นผิวดอบสนองสามมิติ	38
รูปที่ 2.2	รูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบส่วนผสมกลางกรณี 3 ปัจจัย	39
รูปที่ 2.3	รูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบบ็อกซ์-เบ้นเคนกรณี 3 ปัจจัย.....	39
รูปที่ 2.4	แผนภูมิ X-bar-R กรณีผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม.....	42
รูปที่ 2.5	แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-R/S.....	43
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างแผงวงจรของผลิตภัณฑ์รุ่น B.....	51
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการสกรีนโลหะบัดกรีแต่ละขั้นตอน	52
รูปที่ 3.3	เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี	53
รูปที่ 3.4	ชุดใบปาด	53
รูปที่ 3.5	ชุดผ้าทำความสะอาดแผ่นพิมพ์.....	54
รูปที่ 3.6	ชุดสายพานควบคุมการเคลื่อนของแผงวงจร	55
รูปที่ 3.7	ลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่าง	56
รูปที่ 3.8	ลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน.....	57
รูปที่ 3.9	การเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบ	68

รูปที่ 4.1	การวัดค่าปริมาตรโลหะบัดกรีจากการสะท้อนของแสงที่ส่องผ่านวัตถุ.....	72
รูปที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของความเอนเอียงและคุณสมบัติเชิงเส้นตรง.....	75
รูปที่ 4.3	หลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบแผงวงจรด้วยเทคนิคการสะท้อนของแสง	77
รูปที่ 4.4	รูปแบบของตารางบันทึกผลการวัด	80
รูปที่ 4.5	ผลการประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ	83
รูปที่ 5.1	ตำแหน่งช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์.....	89
รูปที่ 5.2	ปฏิสัมพันธ์ร่วมกับความเสียหายในการคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาด.....	91
รูปที่ 5.3	ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บผลการทดลอง	95
รูปที่ 5.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง.....	98
รูปที่ 5.5	แบบจำลองของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง.....	99
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง.....	102
รูปที่ 5.7	แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง	103
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง.....	106
รูปที่ 5.9	แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง	106
รูปที่ 5.10	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน.....	110
รูปที่ 5.11	แบบจำลองของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน.....	111
รูปที่ 5.12	กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน.....	114
รูปที่ 5.13	แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน	114
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน.....	118
รูปที่ 5.15	แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน	118
รูปที่ 5.16	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง.....	124
รูปที่ 5.17	กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย B*A.....	127
รูปที่ 5.18	กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย D*A	128
รูปที่ 5.19	สภาวะที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแผงวงจรด้านล่าง	130

รูปที่ 5.20	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแกว่งจรด้านบน.....	138
รูปที่ 5.21	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	139
รูปที่ 5.22	กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย B*A.....	145
รูปที่ 5.23	สภาวะที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแกว่งจรด้านบน	149
รูปที่ 6.1	เอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์รุ่น B	154
รูปที่ 6.2	เอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการ	157
รูปที่ 6.3	แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีของแกว่งจรด้านล่าง	160
รูปที่ 6.4	แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีของแกว่งจรด้านบน	160



บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์ทางการแพทย์ประเภทเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า (Defibrillator) เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ได้รับการออกแบบมาให้ภายในบรรจุแผงวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไว้เป็นจำนวนมาก เพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์ทำงานได้อย่างอัตโนมัติและเป็นเครื่องมือที่มีความชาญฉลาดมากขึ้น สามารถช่วยชีวิตผู้ป่วยที่มีภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะให้กลับมาทำงานได้ตามปกติในระยะเวลาอันสั้น เครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีความใกล้ชิดและส่งผลกระทบต่อชีวิตของผู้ป่วยโดยตรง องค์การอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกาจึงเข้ามารับผิดชอบและออกข้อกำหนดเพื่อควบคุมทุกกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานเพื่อให้ผู้บริโภคสามารถนำไปใช้งานและเกิดความปลอดภัยสูงสุด ดังนั้น ในทุกกระบวนการผลิตเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้าจึงต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างเคร่งครัด โดยมุ่งเน้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพ สร้างความเชื่อมั่นและความปลอดภัยสูงสุดแก่ลูกค้า

ในกระบวนการผลิตแผงวงจรนั้น การสกรีนโลหะบัดกรีถือกระบวนการผลิตแรกของการผลิตแผงวงจร และเป็นกระบวนการหลักซึ่งต้องมีการควบคุมคุณภาพ ลดความแปรปรวน และลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจากหากมีการป้องกันการเกิดของเสียตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการผลิตจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ช่วยให้โรงงานประหยัดค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ เวลา และแรงงานที่ใช้ในการซ่อมแซมของเสียลงได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำแนวทางการออกแบบการทดลองมาช่วยในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี และนำเงื่อนไขที่เหมาะสมเหล่านั้นไปใช้ในควบคุมการทำงานของเครื่องจักรเพื่อให้เครื่องจักรสามารถผลิตงานได้อย่างมีคุณภาพและลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตลงได้

1.1. ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า โดยผลิตภายใต้เครื่องหมายทางการค้าของลูกค้าและตามแบบที่ลูกค้ากำหนดมา แบ่งส่วนการผลิตของโรงงานออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนงานผลิตแผงวงจร (Print Circuit Board Assembly; PCBA) และส่วนงานประกอบเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เน้นการส่งออกไปยังต่างประเทศโดยมีลูกค้าหลักเป็นประเทศในทวีปอเมริกาและสหภาพยุโรป

ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษาแบ่งรุ่นการผลิตของเครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าออกเป็น 3 รุ่นได้แก่

- (1) เครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าชนิดทำงานอัตโนมัติ (Automated External Defibrillator; AED) ทำหน้าที่ในการอ่านคลื่นหัวใจในผู้ป่วยที่มีการเต้นของหัวใจผิดปกติและส่งกระแสไฟฟ้ากระตุ้นการทำงานของหัวใจอย่างอัตโนมัติ เน้นการใช้งานในภาวะฉุกเฉินซึ่งผู้ใช้งานอุปกรณ์ไม่มีความเชี่ยวชาญในการช่วยฟื้นคืนชีพผู้ป่วย
- (2) เครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าชนิด DIGITAL เป็นเครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าที่ใช้ในโรงพยาบาลหรือสถานพยาบาลที่มีผู้เชี่ยวชาญในการช่วยฟื้นคืนชีพ อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำการแปลงผลรูปสัญญาณไฟฟ้า (Waveform) ของคลื่นหัวใจออกมาเป็นระบบดิจิทัลผ่านทางหน้าจอแสดงผล
- (3) เครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าชนิด ANALOG เป็นเครื่องกระตุกหัวใจไฟฟ้าที่ใช้ในโรงพยาบาลหรือสถานพยาบาลที่มีผู้เชี่ยวชาญในการช่วยฟื้นคืนชีพเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ชนิดที่ 2 แต่ใช้การแปลงผลสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นหัวใจออกมาเป็นแบบสัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง

1.2. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์

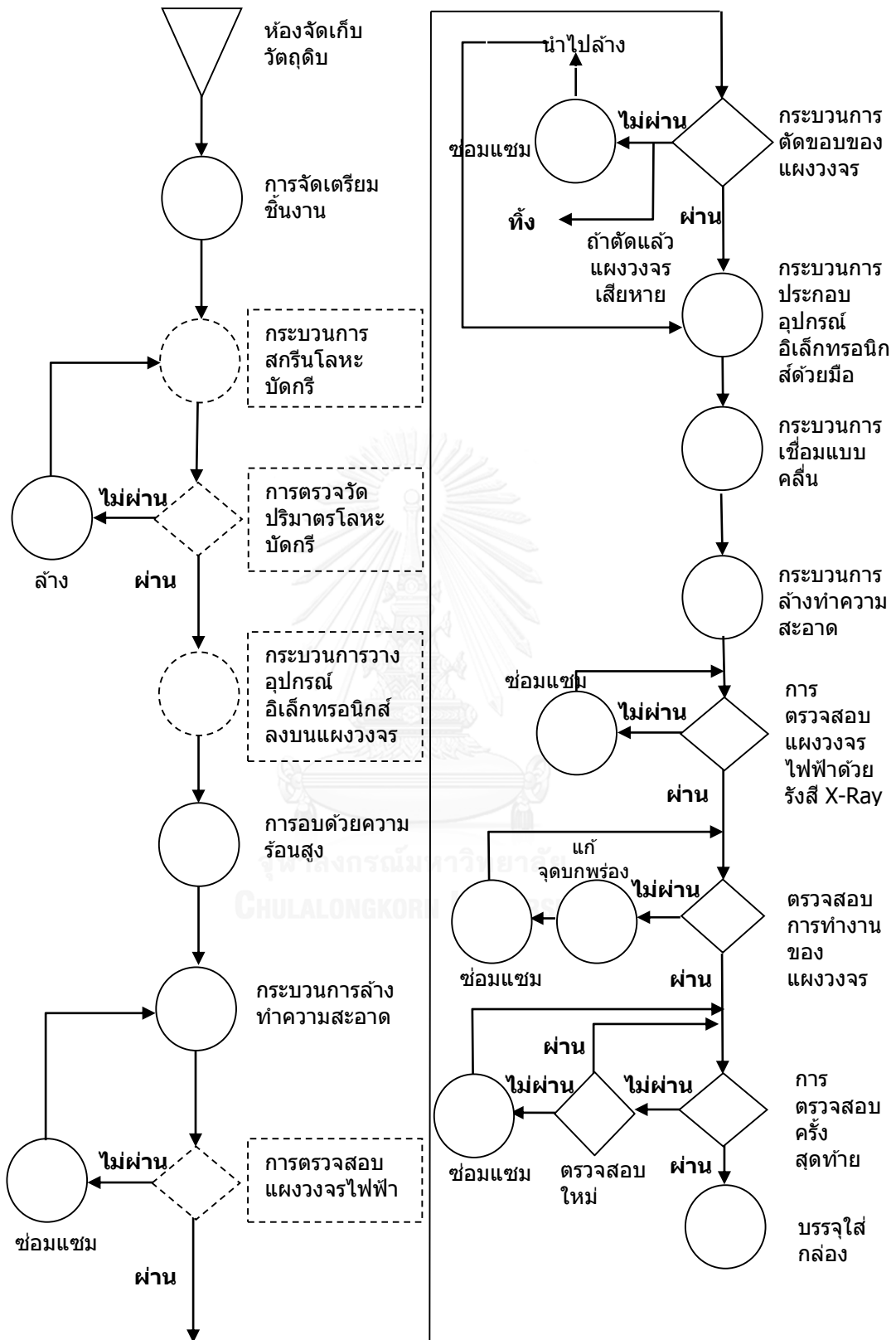
โรงงานกรณีศึกษาแบ่งส่วนของกระบวนการผลิตออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนของกระบวนการผลิตแผงวงจรโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติด (Surface Mount Technology; SMT) และส่วนของการติดตั้งและประกอบชิ้นส่วนเป็นผลิตภัณฑ์ (Box Build Assembly)

สายพานการผลิตประกอบด้วย เครื่องจักรชนิดทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งใช้การลำเลียงผลิตภัณฑ์ให้เคลื่อนที่ไปตามสายพานการผลิตอย่างอัตโนมัติ เครื่องจักรชนิดทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติมีพนักงานฝ่ายผลิตทำหน้าที่ในการควบคุมและป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องจักร และ

กระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยทักษะของพนักงานฝ่ายผลิตในการประกอบผลิตภัณฑ์

กระบวนการผลิตแผงวงจรแบบใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติด ถือเป็นกระบวนการผลิตสำคัญของการผลิตแผงวงจร เพื่อใช้ประกอบเป็นเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้า โดยเป็นกระบวนการยึดติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Surface Mount Device; SMD) เข้ากับแผงวงจรโดยใช้โลหะบัดกรี (Solder Paste) เป็นตัวประสานและเชื่อมติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ติดกับแผงวงจร ก่อนการนำแผงวงจรที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปติดตั้งและประกอบเข้ากับอุปกรณ์อื่นเพื่อผลิตเป็นเครื่องกระตุ้นหัวใจไฟฟ้าต่อไป กระบวนการผลิตแผงวงจรแบบใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติดสามารถแบ่งกระบวนการผลิตย่อยออกเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 1.1





รูปที่ 1.1 แผนผังกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติด

(1) การจัดเตรียมชิ้นงาน (Part Preparation)

หลังจากรับคำสั่งการผลิต ฝ่ายผลิตต้องดำเนินการจัดเตรียมอุปกรณ์ดำเนินการเบิกแผงวงจร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โลหะบัดกรี รวมถึงเครื่องมือต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตให้พร้อมและเพียงพอต่อการผลิตในแต่ละคำสั่งการผลิต

(2) กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี (Solder Paste Screen Printing)

กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเป็นกระบวนการผลิตแรกของแผงวงจร กระบวนการนี้ทำหน้าที่ในการปาดโลหะบัดกรีให้ลงไปยังตำแหน่งของแผ่นพิมพ์ (Stencil) ในตำแหน่งที่ถูกต้อง และมีปริมาตรที่เหมาะสม กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีประกอบด้วยอุปกรณ์และวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิต 3 ส่วน ได้แก่ (1) แผ่นพิมพ์ (Stencil) ได้รับการออกแบบให้มีรูปร่างและขนาดตามชนิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (2) โลหะบัดกรี (Solder Paste) มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ประกอบด้วย ผงโลหะ ฟลักซ์ และตัวทำละลาย (3) ไบปาด (Squeegee) ทำหน้าที่ในการส่งแรงและควบคุมทิศทางของโลหะบัดกรีให้เป็นไปตามที่กำหนด

(3) การตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี (Solder Paste Inspection)

ภายหลังกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี แผงวงจรจะถูกลำเลียงมาทางสายพานการผลิต และเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาตรของโลหะบัดกรีด้วยเครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีเพื่อตรวจสอบปริมาตรของโลหะบัดกรีว่าเป็นตามขีดจำกัดข้อกำหนดหรือไม่ ก่อนการลำเลียงแผงวงจรไปยังกระบวนการผลิตถัดไป

(4) กระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจร (SMD Mounting)

เป็นกระบวนการผลิตหลักของการประกอบแผงวงจร เครื่องจักรทำหน้าที่อย่างอัตโนมัติในการหยิบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสายพานลำเลียงและวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ เครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย กล้องซึ่งทำหน้าที่ในการจับภาพตำแหน่งของแผงวงจร และหัวจับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Pick up nozzle) เคลื่อนที่ในการหยิบและวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามตำแหน่ง X-Y ที่ได้กำหนดไว้

(5) กระบวนการอบด้วยความร้อนสูง (Reflow Soldering)

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนในการให้ความร้อนแก่โลหะบัดกรีจนกระทั่งถึงจุดหลอมละลาย โลหะบัดกรีที่หลอมละลายเป็นของเหลวจะช่วยให้การประสานระหว่างแผงวงจรกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยึดแน่นขึ้น และลดอุณหภูมิลงจนกระทั่งของเหลวคืนกลับมาอยู่ในรูปของแข็งอีกครั้ง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะยึดติดกันอย่างสมบูรณ์กับแผงวงจร

(6) กระบวนการล้างทำความสะอาด (Aqueous Cleaning)

กระบวนการล้างทำความสะอาดเป็นขั้นตอนการล้างทำความสะอาดคราบฟลักซ์และสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผงวงจรหลังจากกระบวนการอบแผงวงจรด้วยความร้อนสูง

(7) การตรวจสอบแผงวงจร (Automated Optical Inspection)

เมื่อกระบวนการล้างทำความสะอาดแผงวงจรสิ้นสุดลง แผงวงจรจะถูกลำเลียงเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบแรกเพื่อตรวจสอบคุณภาพของแผงวงจร โดยใช้เครื่องตรวจสอบแผงวงจรแบบอัตโนมัติ (Automated Optical Inspection; AOI) โดยเครื่องจักรอาศัยหลักการทำงานของกล้องความละเอียดสูง ทำหน้าที่ในการจับภาพและแยกความแตกต่างระหว่างของดีและของเสียของชิ้นงาน ผ่านการตั้งค่าของโปรแกรมโดยโปรแกรมเมอร์ และแสดงของเสียที่ตรวจสอบแล้วพบความผิดปกติขึ้นมาเพื่อให้พนักงานตรวจสอบและยืนยันของเสีย

(8) กระบวนการตัดขอบของแผงวงจร (De-Panel)

ขอบของแผงวงจรที่เกินออกมาจากบริเวณการใช้งานจริง จะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการลำเลียงแผงวงจรผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อนการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมด้วยมือ ดังนั้นกระบวนการสุดท้ายก่อนการนำแผงวงจรไปประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมด้วยมือ คือ กระบวนการตัดขอบของแผงวงจร

(9) กระบวนการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยมือ (Manual Insertion)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางประเภทไม่สามารถประกอบโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบพื้นผิวติดได้ โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนในการประกอบ จึงต้องอาศัยการประกอบชิ้นงานโดยพนักงานฝ่ายผลิต

(10) กระบวนการเชื่อมแบบคลื่น (Wave Soldering)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท Through-hole ขนาดใหญ่ จะไม่สามารถผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบพื้นผิวติดได้ จึงต้องแทนที่ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบคลื่น กระบวนการเชื่อมแบบคลื่นเริ่มต้นขึ้นหลังจากการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท Through-hole ด้วยมือ แล้วลำเลียงแผงวงจรไปบนสายพานให้แผงวงจรเคลื่อนที่ลงไปในอ่างโลหะบัดกรี โลหะบัดกรีที่หลอมละลายเป็นของเหลวจะไหลมาลงเชื่อมติดกับขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

(11) กระบวนการล้างทำความสะอาด (Aqueous Cleaning)

เป็นกระบวนการล้างทำความสะอาดคราบฟลักซ์ และสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผงวงจรอีกครั้ง ภายหลังจากกระบวนการเชื่อมแผงวงจรแบบคลื่น

(12) การตรวจสอบแผงวงจรด้วยรังสี X-Ray (Automated X-Ray Inspection)

ในการตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมประสานระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท Through-hole ขนาดใหญ่กับพื้นผิวของแผงวงจรที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบคลื่นแล้ว ต้องทำการตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมด้วยการยิงรังสี X-ray ผ่านไปยังตำแหน่งของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องตรวจสอบแผงวงจรด้วยรังสี X-Ray (Automated X-Ray Inspection; AXI) โดยเครื่องจักรจะทำหน้าที่ในการจับภาพและแยกความแตกต่างระหว่างของดีและของเสียของชิ้นงาน ผ่านการตั้งค่าของโปรแกรมโดยโปรแกรมเมอร์ และจะแสดงภาพของเสียที่ตรวจพบความผิดปกติขึ้นมาให้พนักงานดำเนินการตรวจสอบ

(13) การตรวจสอบการทำงานของแผงวงจร (In Circuit Test)

แผงวงจรที่ผ่านการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ครบถ้วนแล้ว จะผ่านการตรวจสอบการทำงานของแผงวงจรอีกครั้งด้วยการทดสอบค่าทางไฟฟ้าเพื่อ

ตรวจเช็คความถูกต้องของสัญญาณทางไฟฟ้า ก่อนการนำไปประกอบเป็นเครื่อง
กระตุกหัวใจไฟฟ้า

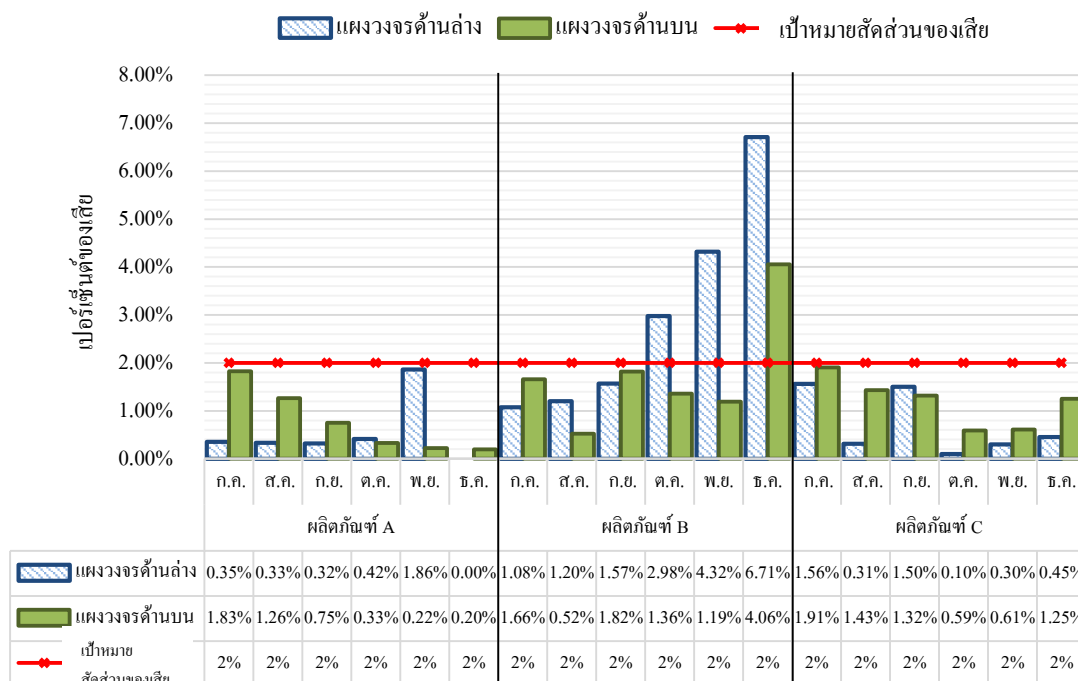
(14) การตรวจสอบครั้งสุดท้าย (Final Inspection)

การตรวจสอบครั้งสุดท้ายประกอบด้วยตรวจสอบยืนยันลักษณะภายนอก
เป็นครั้งสุดท้าย ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล รุ่นการผลิต วันที่ผลิต และออก
เอกสารรับรองคุณภาพ ก่อนการบรรจุแผงวงจรลงกล่อง รอส่งต่อไปยังส่วนงาน
ประกอบเพื่อประกอบเป็นเครื่องกระตุกหัวใจต่อไป

1.3. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สัดส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์เป็นตัวบ่งชี้หนึ่งที่แสดงถึงประสิทธิภาพของ
การผลิตแผงวงจร แม้ว่าของเสียที่เกิดขึ้นจะสามารถแก้ไขได้ภายหลังการตรวจพบ แต่ได้
ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นใหม่ ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานที่ต้องเพิ่ม
เข้ามาเพื่อทำงานแก้ไขของเสียดังกล่าว และทำให้ระยะเวลาในการผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น

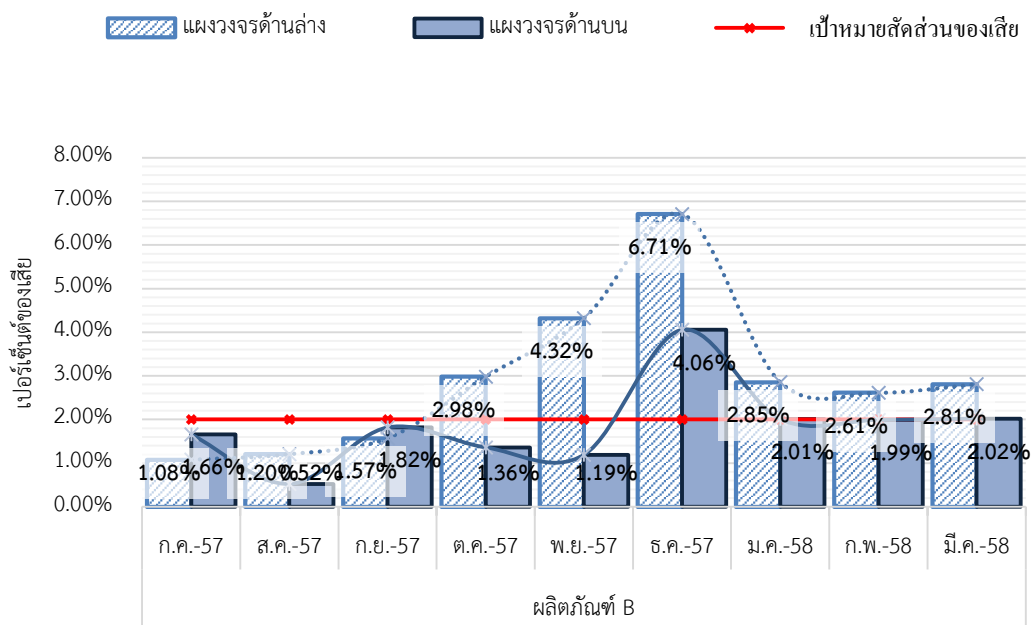
จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียจากเครื่องตรวจสอบแผงวงจร (Automated
Optical Inspection; AOI) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบใช้เทคโนโลยีการผลิต
แบบพื้นผิวติด ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมจนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 โดยจำแนกตามรุ่นของ
ผลิตภัณฑ์ออกเป็น 3 รุ่น ดังรูปที่ 1.2 เพื่อนำมาใช้พิจารณาหาแนวทางปรับปรุงและแก้ไขปัญหา
ของเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1.2 ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนกรกฎาคม – เดือนธันวาคม 2557
ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 รุ่น

จากการเปรียบเทียบของเสียของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 รุ่น พบว่าในระยะเวลา 6 เดือนที่ผ่านมา ผลิตภัณฑ์รุ่น B เป็นรุ่นที่มีของเสียเฉลี่ยเกิดขึ้นมากที่สุดและพบว่าของเสียของผลิตภัณฑ์รุ่น B ในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม-ธันวาคม 2557 มีสูงกว่าค่าเป้าหมายที่โรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้

ทั้งนี้เนื่องจากพบความผิดปกติของอัตราการเกิดของเสียในช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม 2557 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลของเสียเพิ่มเติมในช่วงเวลา ระหว่างเดือนมกราคม – มีนาคม 2558 เพื่อให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของอัตราการเกิดของเสียได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

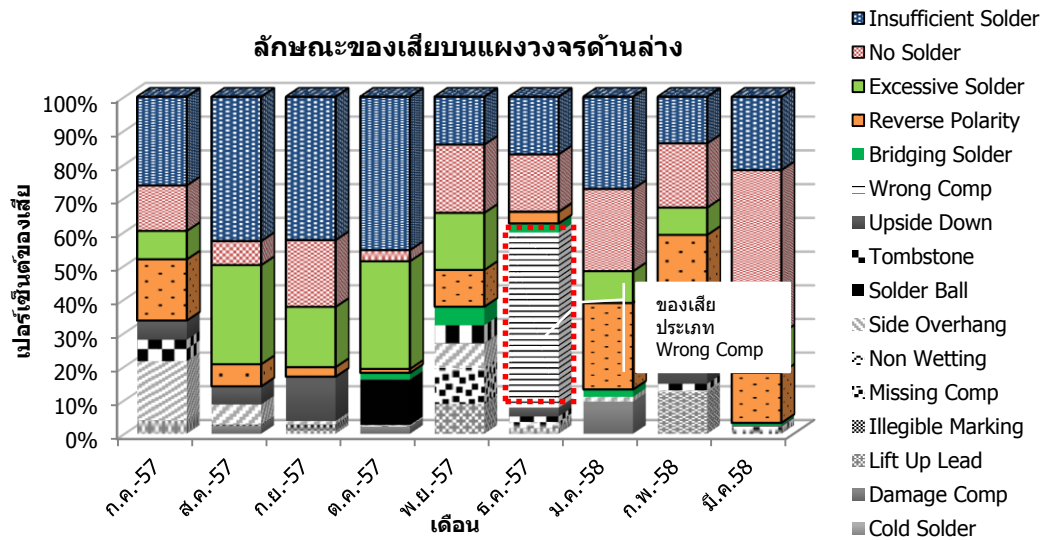


ประเภทแผงวงจร	จำนวนที่ตรวจวัด (ชิ้น)	ข้อมูลรายเดือน								
		ก.ค.-57	ส.ค.-57	ก.ย.-57	ต.ค.-57	พ.ย.-57	ธ.ค.-57	ม.ค.-58	ก.พ.-58	มี.ค.-58
แผงวงจรด้านล่าง	จำนวนที่ตรวจวัด (ชิ้น)	27,615	155,509	6,751	14,261	66,063	47,328	34,821	65,759	30,803
	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	297	1,872	106	425	2,854	3,175	993	1,719	865
	% ของเสีย	1.08%	1.20%	1.57%	2.98%	4.32%	6.71%	2.85%	2.61%	2.81%
แผงวงจรด้านบน	จำนวนที่ตรวจวัด (ชิ้น)	62,959	37,845	1,650	14,622	42,035	60,490	32,068	44,492	25,520
	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	1,044	198	30	199	500	2,454	644	886	516
	% ของเสีย	1.66%	0.52%	1.82%	1.36%	1.19%	4.06%	2.01%	1.99%	2.02%

รูปที่ 1.3 ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนกรกฎาคม 2557 – เดือนมีนาคม 2558
ของผลิตภัณฑ์รุ่น B

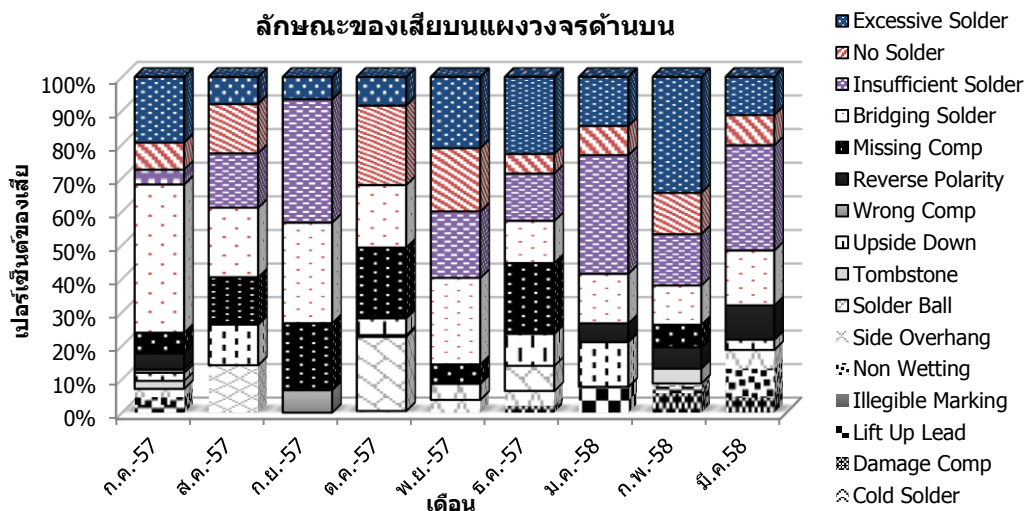
จากรูปที่ 1.3 ของเสียที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างเดือนมกราคม – มีนาคม 2558 ลดลงมาจากในช่วงเดือนธันวาคม 2557 ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์ของเสียเฉลี่ยลดลงมาใกล้เคียงกับในช่วงเดือนตุลาคม 2557 คือ เปอร์เซ็นต์ของเสียของแผงวงจรด้านล่างลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ของเสียของแผงวงจรด้านบนลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม 2557 ผู้วิจัยจึงได้แบ่งชนิดของเสียออกมาเป็นรายเดือน เพื่อให้สามารถตรวจสอบชนิดของเสียที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยของเสียที่เกิดขึ้นกับแผงวงจรด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และของเสียที่เกิดขึ้นกับแผงวงจรด้านบนดังรูปที่ 1.5



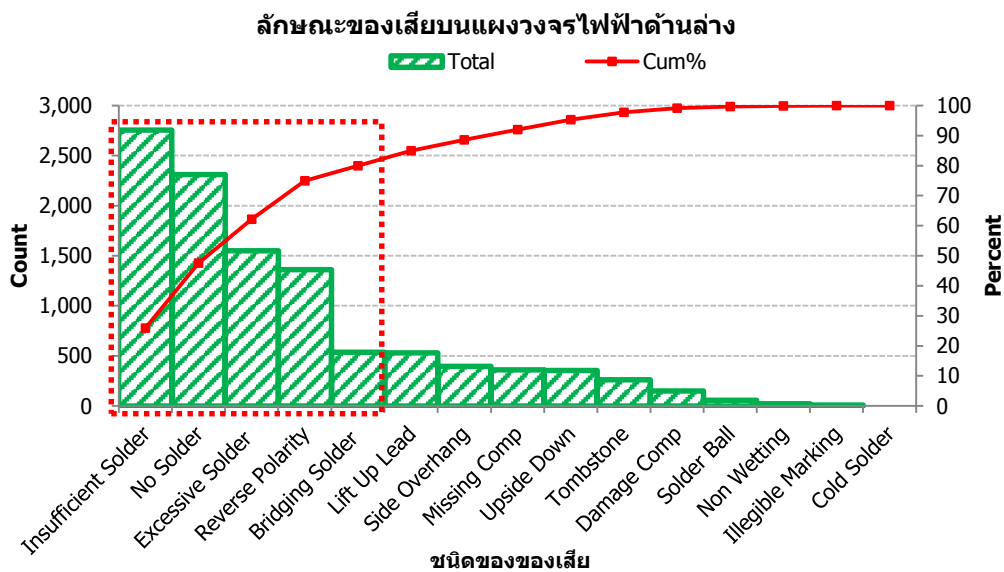
รูปที่ 1.4 ชนิดของเสียที่เกิดขึ้นแผงวงจรด้านล่าง
ช่วงเดือนกรกฎาคม 2557- เดือนมีนาคม 2558

จากรูปที่ 1.4 พบว่า ของเสียที่เกิดขึ้นจนทำให้เปอร์เซ็นต์ของเสียในเดือนพฤศจิกายน 2557 เพิ่มสูงขึ้นเป็น 4.32% นั้น มีหลายชนิดและไม่พบว่ามีของเสียชนิดใดที่มีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากของเสียที่เกิดขึ้นในเดือนธันวาคม 2557 โดยในช่วงเวลาดังกล่าว พบว่ามีของเสียประเภท Wrong Component เพิ่มสูงขึ้นมาอย่างผิดปกติ และเมื่อนำไฟล์บันทึกผลการตรวจสอบของเสีย (Log file) มาตรวจสอบ พบว่าของเสียประเภท Wrong Component เกิดจากการไหลตออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ผิดประเภทในขณะที่ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ของเสียที่เกิดขึ้นกับแผงวงจรด้านบนในรูปที่ 1.5 พบว่าของเสียที่เกิดขึ้นสูงในเดือนธันวาคม 2557 เกิดของเสียหลายชนิดพร้อมกันและไม่พบว่ามีของเสียชนิดใดที่มีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถคัดแยกปัญหาและลำดับความสำคัญของปัญหาของเสียได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้แผนภูมิพาเรโตมาเป็นเครื่องมือช่วยในการคัดเลือกปัญหา โดยแบ่งของเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์รุ่น B ออกเป็น 16 ชนิดและแบ่งตามด้านของแผงวงจรออกเป็นด้านล่างและด้านบน โดยตัดของเสียประเภท Wrong Component ที่เกิดขึ้นกับแผงวงจรด้านล่างในเดือนธันวาคมออกจากการพิจารณาคัดแยกและลำดับความสำคัญของปัญหา เนื่องจากปัญหาดังกล่าวตรวจพบในเดือนธันวาคมเท่านั้นและไม่ตรวจพบเปอร์เซ็นต์ของเสียดังกล่าวในเดือนถัดมา

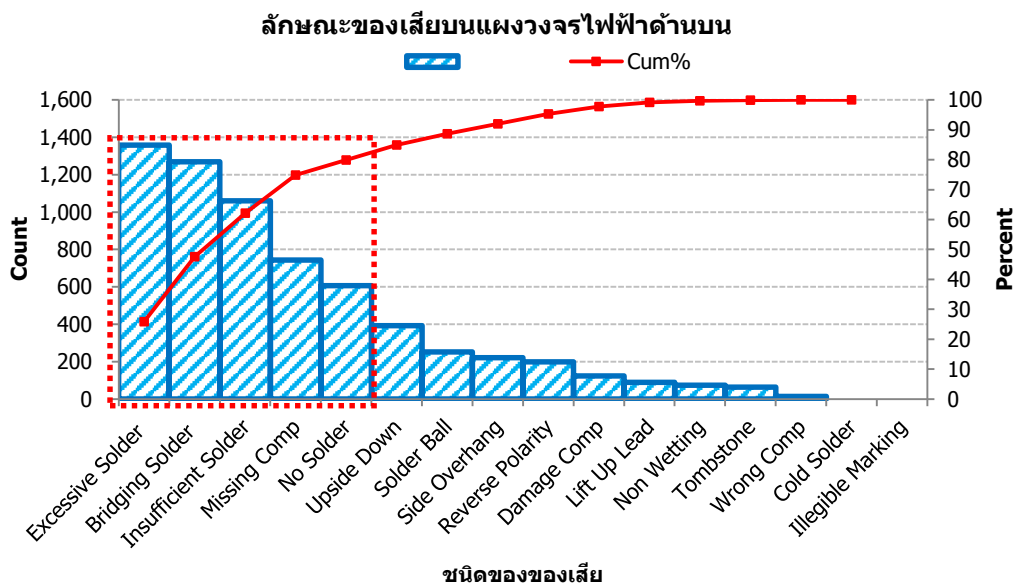
การคัดเลือกปัญหาของเสียที่จะต้องได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน ผู้วิจัยใช้การคัดเลือกลำดับความสำคัญของปัญหาตามคำแนะนำของโจเซฟ จูราน นักเศรษฐศาสตร์ผู้นำแนวคิดของอัลเฟรโด พาเรโตมาประยุกต์ใช้ โดยจูรานแนะนำให้ใช้ตัวเลขหยาบๆกับการตัดสินใจในหลักการพาเรโต คือ 80-20 ซึ่งหมายความว่า “ปัญหาหรือความสูญเสียที่มีความสำคัญมากจำนวน 80% มักจะมีสาเหตุมาจากประมาณ 20% ของสาเหตุทั้งหมด (The Vital Few) ในขณะที่อีกประมาณ 80% ของสาเหตุจะมีผลต่อปัญหาที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยอีกจำนวน 20% ของปัญหาเท่านั้น (The Trivial Many)” [1]



รูปที่ 1.6 แผนภูมิพาเรโตของแผงวงจรด้านล่าง
ระหว่างเดือนกรกฎาคม 2557- เดือนมีนาคม 2558

จากแผนภูมิพาเรโตของแผงวงจรด้านล่างในรูปที่ 1.6 เมื่อลากเส้นตรงที่ความถี่สะสม 80% ไปชนกับกราฟแท่งชนิดของเสียที่อยู่ทางซ้ายมือ พบว่ามีของเสียประมาณ 20% ที่จะต้องได้รับการแก้ไขประกอบไปด้วยของเสีย 5 ชนิดได้แก่

- อันดับที่ 1 คือ ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป (Insufficient Solder)
- อันดับที่ 2 คือ ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี (No Solder)
- อันดับที่ 3 คือ ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป (Excessive Solder)
- อันดับที่ 4 คือ ปัญหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับขั้ว (Reverse Polarity) และ
- อันดับที่ 5 คือ ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)



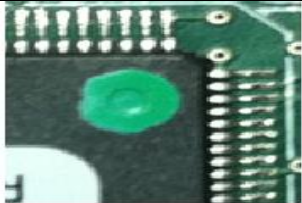
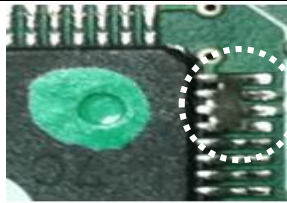

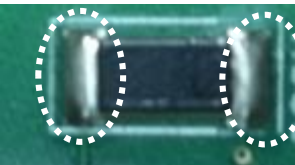
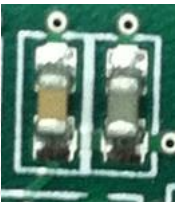
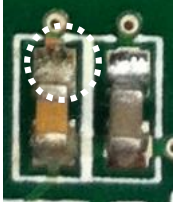



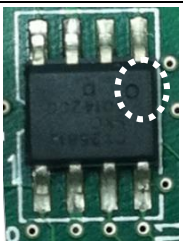
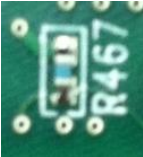
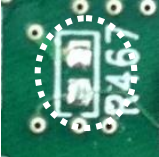
ชนิดของของเสีย
รูปที่ 1.7 แผนภูมิพารेटโตของแผงวงจรด้านบน
ระหว่างเดือนกรกฎาคม 2557- เดือนมีนาคม 2558

และเมื่อพิจารณาแผนภูมิพารेटโตของแผงวงจรด้านบน ในรูปที่ 1.7 พบว่า ของเสียที่เกิดขึ้นกับแผงวงจรด้านบนซึ่งคัดเลือกโดยใช้หลักการพาเรโตมีของเสีย 5 ชนิดที่ควรจะได้รับการแก้ไข ได้แก่

- อันดับที่ 1 คือ ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป (Excessive Solder)
- อันดับที่ 2 คือ ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)
- อันดับที่ 3 คือ ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป (Insufficient Solder)
- อันดับที่ 4 คือ ปัญหาไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Missing Component) และ
- อันดับที่ 5 คือ ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี (No Solder)

ตัวอย่างภาพของเสียทั้ง 6 ประเภท จาก 5 อันดับแรกของแผงวงจรด้านบนและด้านล่างแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างของเสียที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์

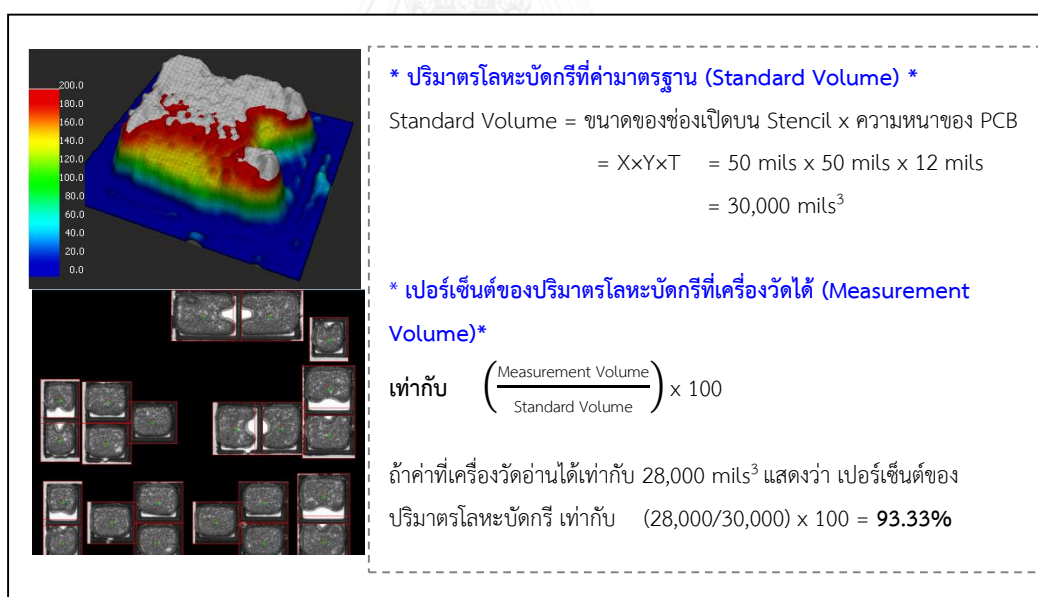
ชนิดของของเสีย	ภาพตัวอย่างงานดี	ภาพตัวอย่างงานเสีย
โลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)		
โลหะบัดกรีมากเกินไป (Excessive Solder)		
โลหะบัดกรีน้อยเกินไป (Insufficient Solder)		
ไม่มีโลหะบัดกรี (No Solder)		
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับขั้ว (Reverse Polarity)		
ไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Missing Component)		

เมื่อพิจารณาจากชนิดของเสียที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งแหล่งที่มาของปัญหาได้เป็น 2 กระบวนการผลิตหลัก คือ (1) กระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจร และ (2) กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลา ผู้วิจัยจึงต้องการนำปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีมาดำเนินการแก้ไขเป็นอันดับแรก เนื่องจากกระบวนการผลิตดังกล่าวมีของเสียเกิดขึ้นหลายชนิด และคาดการณ์ว่าเมื่อลดปริมาณของเสีย

ชนิดดังกล่าวลงได้จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของเสียของผลิตภัณฑ์รุ่น B ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่โรงงานกรณีศึกษาตั้งเป้าหมายไว้

ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี พบว่า ส่วนใหญ่เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปริมาณของโลหะบัดกรี อันเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่างในระหว่างการสกรีนโลหะบัดกรีไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของโลหะบัดกรี อุณหภูมิ ความชื้น การปรับตั้งค่าเครื่องจักร หรือชนิดของแผงวงจร ส่งผลให้ปริมาตรโลหะบัดกรีไม่เป็นไปตามขีดจำกัดข้อกำหนด

ปริมาณของโลหะบัดกรีที่สกรีนลงบนแผงวงจรของโรงงานกรณีศึกษา ต้องผ่านการตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี แต่เนื่องจากแผงวงจรแต่ละแผ่นประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ทำให้การตรวจสอบเพื่ออ่านค่าปริมาตรของแต่ละขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรงมีความยุ่งยาก จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการอ่านค่าใหม่ให้อยู่ในรูปของ “เปอร์เซ็นต์ของปริมาตร (% Volume)” โดยการเปรียบเทียบค่าที่เครื่องจักรอ่านได้เทียบกับพื้นที่เปิดบนแผ่นพิมพ์ของขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดแล้วคำนวณค่าออกมาในรูปเปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 การหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่เครื่องวัดตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี

ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เป็นค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์รุ่น B มีค่าเป้าหมายอยู่ที่ $100 \pm 50\%$ โดยพบว่า เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรสูงกว่า 150% มีโอกาสที่จะทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมาเกิดของเสีย โดยเฉพาะของเสียชนิดโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง และปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป

ในทางกลับกันเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่ำกว่า 50% มีโอกาสที่จะเกิดของเสียชนิดโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี เนื่องจากถ้าปริมาณโลหะบัดกรีน้อยเกินไปจะทำให้แรงยึดติดระหว่างแผงวงจรกับขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยจนเกินไป เมื่อนำมาทดสอบทางไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการเปิดวงจร (Open circuit) ขึ้นที่ขาของอุปกรณ์ตัวนั้นๆ และทำให้แผงวงจรทำงานผิดพลาด

แม้ว่าปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี จะเป็นของเสียที่สามารถซ่อมแซมได้โดยพนักงานฝ่ายผลิต แต่แนวทางการแก้ปัญหาด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ การหามาตรการป้องกันเป็นแนวทางที่เหมาะสมมากกว่าในการแก้ปัญหา

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการศึกษาและหาแนวทางการแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี 4 ชนิด ได้แก่ (1) ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (2) ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป (3) ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไปและ (4) ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี โดยการศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการป้องกันของเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเป็นลำดับแรก โดยต้องลดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการสกรีนและให้ปริมาณของโลหะบัดกรีเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100 % ให้มากที่สุด

1.4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

กำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจรเพื่อลดของเสียโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

1.5. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาเฉพาะค่าปริมาตรของโลหะบัดกรีที่สกรีนลงบนแผงวงจรของแผงวงจรชนิด 2 ด้านที่ใช้ประกอบกับผลิตภัณฑ์รุ่น B และทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรที่หมายเลขการผลิตที่ 17 เท่านั้น
2. ทำการศึกษาลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี 4 ชนิด ได้แก่ ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไปและปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี

1.6. วิธีดำเนินการวิจัย

1. สํารวจงานวิจัยและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง
2. ศึกษาสภาพปัญหา วิธีการดำเนินงานและเก็บรวบรวมสภาพปัญหาในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา
3. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย
4. ระดมความคิดจากผู้มีความรู้ ความเชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยขาเข้าที่มีผลกระทบต่อปริมาณของโลหะบัดกรีโดยใช้ตารางสาเหตุและผล
5. แบ่งประเภทของปัจจัยขาเข้าและตัวแปรตอบสนอง
6. กำหนดระดับของปัจจัยขาเข้าและเลือกรูปแบบของการทดลอง
7. วิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของเครื่องมือวัด ได้แก่ เครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีและเครื่องตรวจสอบแผงวงจร
8. ดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองที่วางไว้
9. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลตามหลักการทางสถิติ
10. ทำการสรุปผลการทดลองและนำปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้จริงในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของผลิตภัณฑ์รุ่น B
11. จัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องสกรีนที่ให้แก่ช่างเทคนิค
12. จัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานที่เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีที่ถูกต้องให้แก่พนักงานปฏิบัติการ
13. จัดทำแผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรี ติดตามผลหลังจากการปรับปรุงและสรุปผลการวิจัย
14. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.7. ผลที่ได้รับ

1. เจื่อนไขที่เหมาะสมในการสกรีนเพื่อให้ค่าปริมาตรของโลหะบัดกรีใกล้เคียงค่าเป้าหมาย

2. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสกรีนเพื่อลดความแปรปรวนของค่าปริมาตรของโลหะบัดกรีที่สกรีนลงบนแผงวงจร
3. เอกสารแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในการปรับตั้งค่าเครื่องสกรีนให้แก่ช่างเทคนิค
4. เอกสารแนะนำวิธีการทำงานปฏิบัติงานที่เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีที่ถูกต้องให้แก่พนักงานปฏิบัติการ
5. แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรี

1.8. ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ผลจากการศึกษาวิจัยเรื่องการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดของเสียในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรที่ใช้สำหรับเครื่องกระตุ้นหัวใจ ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อการปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี และช่วยปรับปรุงผลผลิตของผลิตภัณฑ์ให้เพิ่มสูงขึ้น
2. ลดเวลาที่ต้องสูญเสียไปในระหว่างการซ่อมแซมของเสีย
3. เป็นแนวทางสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบพื้นผิวติดรูอื่นๆต่อไป

1.9. แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	เดือน		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
	เดือน	สัปดาห์																
1.สำรวจงานวิจัยและระดับการศึกษา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการ ออกแบบการทดลอง	2	4	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
2.ศึกษาสภาพปัญหา วิธีการดำเนินงานและเก็บ รวบรวมสภาพปัญหาใน ปัจจุบันของโรงงาน กรณีศึกษา	2	4	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
3.กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของ การวิจัย	2	4	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58

แผนการ	เดือน		ด.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
	57	58																
ดำเนินการวิจัย	2	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
สัปดาห์ที่																		
4.ระดมความคิดจากผู้มีความรู้ ความเชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยเข้าพัที่มีผลกระทบต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีโดยใช้ตารางสาเหตุและผล																		
5.แบ่งประเภทของปัจจัยเข้าและตัวแปรตอบสนอง																		
6.กำหนดระดับของปัจจัยเข้าและเลือกรูปแบบของการทดลอง																		

แผนการ	เดือน	ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.		ก.ม.		ก.พ.		มี.ค.		เม.ย.		พ.ค.		มิ.ย.		ก.ค.		ส.ค.		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.				
		57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58	57	58			
ดำเนินการวิจัย	สัปดาห์ที่	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4			
7.วิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของเครื่องมือวัดได้แก่ เครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีและเครื่องตรวจสอบแผงวงจร																																		
8.ดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองที่วางไว้																																		
9.นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลตามหลักการทางสถิติ																																		

แผนการ	เดือน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
		57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
ดำเนินการวิจัย	สัปดาห์ที่	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
		4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
10.ทำการสรุปผลการทดลองและนำไปวิจัยที่เหมาะสมสมไปใช้จริงในกระบวนการการสกรีนโลหะบัดกรีของผลิตภัณฑ์รุ่น B																	
11.จัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องสกรีนที่ให้แก่ช่างเทคนิค																	

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ทำการศึกษ โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของระบบการวัด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง แผนภูมิควบคุม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของระบบการวัด

กิตติศักดิ์ [2] ชี้ให้เห็นความสำคัญของระบบการวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของระบบการวัดที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ว่า ค่าความผันแปรของค่าวัดจากระบบการวัดที่ได้ทำการวัดผลิตภัณฑ์หนึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจได้ โดยจำแนกเป็น 2 กรณี คือ กรณี ก พบว่าผลิตภัณฑ์ดีแต่การตัดสินใจจากข้อมูลของระบบการวัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์บกพร่อง เป็นความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ 1 (Type I Error) ในงานควบคุมคุณภาพถือว่าเป็นความเสี่ยงของผู้ผลิต สำหรับกรณี ข ที่จะพบว่าเป็นผลิตภัณฑ์บกพร่องแต่มีการตัดสินใจจากข้อมูลของระบบการวัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดี เป็นความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ 2 (Type II Error) ในการควบคุมคุณภาพจะถือว่าเป็นความเสี่ยงของผู้บริโภค

การประเมินระบบการวัดจะช่วยลดความเสี่ยงจากการตัดสินใจผิดพลาดได้ แม้ว่าผลิตภัณฑ์จะมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดของการตัดสินใจก็ตาม

2.1.1. การประเมินผลคุณสมบัติด้านความเอนเอียงของระบบการวัด

ค่าความเอนเอียงของระบบการวัด คือ ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการวัดเทียบกับค่าอ้างอิง โดยค่าอ้างอิงเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการวัดซ้ำด้วยเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงสูงกว่าภายใต้สภาวะควบคุม การประเมินผลค่าความเอนเอียงพิจารณาจาก

$$\text{ค่าความเอนเอียง} = \text{ค่าเฉลี่ยของค่าวัด} - \text{ค่าอ้างอิง} \quad (2.1)$$

และประเมินผลค่าความเอนเอียงเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (ในกรณีใช้ระบบการวัดในการประเมินผลความผันแปรของกระบวนการผลิตเพื่อควบคุมกระบวนการ)

โดยความผันแปรของกระบวนการเป็นสัดส่วนระหว่างขีดจำกัดข้อกำหนดกับค่าจำกัดความคลาดเคลื่อนธรรมชาติ (Natural Tolerance Limits) ซึ่ง Montgomery [3] ได้กล่าว

เพิ่มเติมว่า ค่าจำกัดความคลาดเคลื่อนธรรมชาติเป็นค่าจำกัด 3σ ในแต่ละด้านของค่าเฉลี่ยกระบวนการ โดยค่าจำกัดนี้จะครอบคลุมช่วงส่วนใหญ่กระบวนการผลิต ทั่วไปจึงมักอ้างอิงความกว้างของกระบวนการทั้งหมดด้วย 6σ

$$\text{ความผันแปรของกระบวนการ} = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2.2)$$

โดยที่	USL	=	ขีดจำกัดข้อกำหนดบน
	LSL	=	ขีดจำกัดข้อกำหนดล่าง
	σ	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ดังนั้น

$$\% \text{ ความเอนเอียง} = \frac{\text{ค่าความเอนเอียง}}{\text{ความผันแปรของกระบวนการ}} \times 100\% \quad (2.3)$$

ในกรณีประเมินผลค่าความเอนเอียงของระบบการวัดนั้น จะต้องตัดสินใจภายใต้เกณฑ์การยอมรับ คือ

%ความเอนเอียง < 5%	อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยไม่แก้ไข
5% ≤ %ความเอนเอียง < 10%	อาจจะยอมรับได้ (ให้พิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ อาทิ การประยุกต์ใช้ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ)
%ความเอนเอียง ≥ 10%	ไม่สามารถยอมรับได้ ต้องค้นหาสาเหตุและทำการแก้ไข

2.1.2. การประเมินผลคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด

คุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด คือ การที่ค่าความเอนเอียงของระบบการวัดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตลอดย่านการวัดของระบบการวัดนั้น ในการพิจารณาคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัดจะได้มาจากการเลือกชิ้นงานตลอดช่วงย่านวัด เพื่อศึกษาถึงค่าไบอัสที่แต่ละค่าของค่ามาตรฐาน (ค่าอ้างอิง) แล้วพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความชัน

Montgomery [3] ได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การประเมินผลคุณสมบัติเชิงเส้นตรง จะต้องเริ่มต้นจากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบถดถอย (Adequacy of the Regression Model) ซึ่งการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบถดถอยที่ถูกลำเอียงมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) โดยที่ R^2 เป็นสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y

ดังนั้น ตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรงของคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด คือ การสร้างกราฟแสดงการกระจายให้แกนนอน (X) คือ ค่าอ้างอิง และแกนตั้ง (Y) คือ ค่าความเอน

เอียง แล้วพิจารณาว่า จำนวนตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y เพียงใด และสามารถอธิบายจำนวนความผันแปรระหว่างตัวแปรตาม Y

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_1 S_{XY}}{S_{YY}} \quad (2.4)$$

โดยมีค่าความชัน $\hat{\beta}_1$ เท่ากับ

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.5)$$

$$S_{YY} = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \quad (2.6)$$

$$S_{XY} = \sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n} \quad (2.7)$$

ถ้าค่า R^2 มีค่าสูงพอ นั่นคือ ความแปรปรวนของค่าความเอนเอียง (Y) สามารถอธิบายหรือทำนายค่าอ้างอิง (X) ได้แม่นยำมากขึ้น (โดยทั่วไปแนะนำว่าควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.70)

เมื่อค่าความเอนเอียงและค่าอ้างอิงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญแล้ว ให้ทำการคำนวณสมการถดถอยเชิงเส้นตรง

$$Y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } \hat{\beta}_1 = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.9)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} \quad (2.10)$$

การคำนวณดัชนีเชิงเส้นตรง (Linearity) ของระบบการวัด

$$\text{ดัชนีเชิงเส้นตรง} = \hat{\beta}_1 \times \text{ความผันแปรของกระบวนการ} \quad (2.11)$$

เปอร์เซ็นต์เชิงเส้นตรง (%Linearity)

$$\% \text{เชิงเส้นตรง} = \frac{\text{ดัชนีเชิงเส้นตรง}}{\text{ความผันแปรของกระบวนการ}} \times 100\% \quad (2.12)$$

โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการยอมรับ คือ

%เชิงเส้นตรง < 5% อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยไม่แก้ไข

5% ≤ %เชิงเส้นตรง < 10% อาจจะยอมรับได้ (ให้พิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ อาทิ การ

ประยุกต์ใช้ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ)
 %เชิงเส้นตรง $\geq 10\%$ ไม่สามารถยอมรับได้ ต้องค้นหาสาเหตุและทำการแก้ไข

2.1.3. การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ

การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ เป็นการตัดสินใจด้วยข้อกำหนดเพื่อให้ได้ข้อมูลประเภท ผ่าน หรือไม่ผ่าน หรืออาจแบ่งออกเป็น ดีมาก ดี พอใช้ และ ไม่ดี การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลนับเป็นการวิเคราะห์ความเห็นพ้องกันของพนักงานผู้ประเมิน ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อประเมินความสามารถในการตรวจสอบของพนักงานได้

ในการประเมินความสามารถของพนักงานวัดนั้น อาจประเมินที่พนักงานแต่ละคน (Within Appraiser) หรือการประเมินระหว่างพนักงาน (Between Appraisers) เพื่อพิจารณาว่า พนักงานคนใดมีความสามารถไม่เข้าเกณฑ์ ก็มีความจำเป็นต้องดำเนินการเพิ่มความสามารถให้พนักงานดังกล่าวก่อน

การวิเคราะห์พนักงานแต่ละคน (Within Appraiser)

มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าพนักงานวัดแต่ละคน มีความสามารถในการวัดซ้ำมากน้อยเพียงใด ในการวิเคราะห์พนักงานแต่ละคนใช้การพิจารณาถึงความสามารถในการวัดซ้ำ โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์การวัดซ้ำของพนักงานแต่ละคน} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ตรวจสอบได้ผลเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (2.13)$$

หากเปอร์เซ็นต์การวัดซ้ำของพนักงานแต่ละคนมีค่าต่ำ พนักงานจะขาดความสามารถในการทำซ้ำ ซึ่งมีความเสี่ยงที่พนักงานจะตัดสินใจในแต่ละครั้งแตกต่างกันและให้ผลการตัดสินใจที่ผิดพลาด

การวิเคราะห์ระหว่างพนักงาน (Between Appraisers)

เป็นการวิเคราะห์ถึงระดับของความเห็นพ้องกันระหว่างพนักงาน เนื่องจากการวิเคราะห์พนักงานแต่ละคนทำให้ทราบเพียงว่าพนักงานคนนั้นมีความสามารถในการวัดซ้ำหรือไม่ แต่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าพนักงานคนดังกล่าวตัดสินใจได้เหมือนกับพนักงานคนอื่นที่ร่วมทำการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดหรือไม่ โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเห็นพ้องระหว่างพนักงาน} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่พนักงานตรวจสอบได้ผลเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (2.14)$$

การวิเคราะห์พนักงานวัดแต่ละคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (Each Appraiser vs Standard)

เพื่อให้มาตรฐานการตรวจวัดเป็นไปตามข้อกำหนดที่ลูกค้าระบุไว้ จึงต้องมีการกำหนดชิ้นงานมาตรฐานขึ้น ดังนั้น ถึงแม้ว่าพนักงานแต่ละคนจะมีความสามารถในวัดซ้ำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าพนักงานคนดังกล่าวตัดสินใจได้ถูกต้องตามมาตรฐานหรือไม่ การวิเคราะห์พนักงานวัดแต่ละคนเปรียบเทียบกับมาตรฐานจึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใดที่จะเกิดความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ I คือ ตัดสินใจผลิตภัณฑ์ดี เป็นผลิตภัณฑ์เสีย และความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ II คือ ตัดสินใจผลิตภัณฑ์เสีย ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ดี

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเห็นพ้องเปรียบเทียบกับมาตรฐาน} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผลการตรวจสอบเหมือนกันและถูกต้อง}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (2.15)$$

การวิเคราะห์พนักงานวัดทุกคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (All Appraisers vs Standard)

แม้ว่าพนักงานจะมีระดับของความเห็นพ้องระหว่างพนักงาน แต่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าพนักงานกลุ่มดังกล่าวตัดสินใจได้ถูกต้องตามชิ้นงานมาตรฐานหรือไม่ ดังนั้น การวิเคราะห์พนักงานทุกคนโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใดที่จะเกิดความผิดพลาดของการตัดสินใจผลิตภัณฑ์ดีเป็นผลิตภัณฑ์เสีย และความตัดสินใจผลิตภัณฑ์เสียว่าเป็นผลิตภัณฑ์ดี [4]

$$\begin{aligned} & \text{เปอร์เซ็นต์ความเห็นพ้องพนักงานวัดทุกคน} \\ & \text{เปรียบเทียบกับมาตรฐาน} \end{aligned} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่พนักงานทุกคนตรวจสอบได้ถูกต้องเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (2.16)$$

2.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

2.2.1. ความหมายของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors)” และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables (Factors))”

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุมเนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบ อาจพิจารณาให้เป็น “ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้”) อุณหภูมิในการผลิต เป็นต้น

การออกแบบการทดลองมีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อกำหนดตัวแปรที่ควบคุมที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองให้มีโอกาสที่ตัวแปรตอบสนองนั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด และมีค่าความแปรปรวนต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้มีค่าน้อยที่สุด [5]

2.2.2. แนวทางในการออกแบบการทดลอง

Montgomery [3] ได้แนะนำแนวทางในการออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังนี้

- (1) **การรับรู้และกำหนดปัญหา (Recognition of and statement of the problem)** การระบุปัญหาของการทดลอง เป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมดของการทดลอง การทดลองขนาดใหญ่เพียงครั้งเดียวมักจะไม่สามารถตอบคำถามที่ต้องการได้ทั้งหมด ดังนั้นการแบ่งการทดลองออกเป็นขนาดย่อยๆจึงถือเป็นกลยุทธ์ในการทดลองที่ดีกว่า

- (2) **การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the response variable)** ใน การเลือกตัวแปรตอบสนองพบว่าบ่อยครั้งค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการวัดผลมักจะเป็นตัวแปรตอบสนอง
- (3) **การเลือกปัจจัย ระดับ และช่วงของปัจจัย (Choice of factors, levels and range)** มีปัจจัยมากมายในการทดลอง ปัจจัยที่ไม่ได้สนใจควรกำหนดเป็น ค่าคงที่ ในการคัดเลือกปัจจัยนั้นจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านกระบวนการผลิตมา ช่วยในการตัดสินใจระบุปัจจัย และเมื่อจุดประสงค์ของการทดลองคือการคัด กรองปัจจัยเบื้องต้น การกำหนดระดับของปัจจัย ควรมีระดับของปัจจัยน้อยๆ โดยทั่วไประดับปัจจัยเพียง 2 ปัจจัยถือว่าเหมาะสมกับการศึกษาเพื่อคัดกรอง ปัจจัยเบื้องต้น
- (4) **การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง (Choice of experimental design)** แผนการทดลองขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้เป็นหลัก การเลือกการทดลองขึ้นอยู่กับ การทำซ้ำ แบบการสุ่ม และการบล็อก
- (5) **การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment)** ติดตาม กระบวนการทดลองอย่างระมัดระวัง ความผิดพลาดในขั้นตอนนี้จะทำลายความ เชื่อมั่นของการทดลองได้
- (6) **การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis of the data)** ปัจจุบันมี โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติมากมายช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล แต่ต้องอาศัย ความรู้ทางสถิติบวกกับความรู้ทางวิศวกรรมที่ดี จึงจะช่วยให้สามารถสรุปผลลัพธ์ ได้อย่างถูกต้อง
- (7) **การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (Conclusion and recom- mendations)** เมื่อข้อมูลจากการทดลองได้รับการวิเคราะห์ จะต้องมีการ สรุปผลการทดลอง ติดตามผลและยืนยันผลการทดลองที่ได้ทำการทดลอง

2.2.3. หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ปาริชาติ นาทะสัน [6] ได้สรุปหลักการที่ใช้ในออกแบบการทดลองตามหลักการของ Montgomery และแบ่งหลักการออกแบบการทดลองเป็น 3 แบบ ดังนี้

- (1) **การทำซ้ำ (Replication)** ในการทดลองแต่ละครั้ง อาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการทดลองได้ เพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องการทำซ้ำ เพื่อให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ และข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำถูกต้องมากขึ้น
- (2) **การทำแบบสุ่ม (Randomization)** คือ การสุ่มลำดับการทดลอง ซึ่งจะเป็นการกระจายโอกาสที่จะได้รับความผันแปรจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเที่ยงตรงในการจับเวลาของผู้ทดลอง ทดลองด้วยโอกาสเท่าๆกัน การสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้
 - 1) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
 - 2) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
 - 3) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)
- (3) **การบล็อก (Blocking)** คือ การจัดกลุ่มการทดลองเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น พนักงานไม่สามารถทำการทดลองแต่ละสภาวะในวันเดียวกันได้ อาจจะทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น ความชื้นในแต่ละการทดลองไม่เท่ากัน เพื่อให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

2.2.4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบเพื่อให้ข้อมูลที่มาจากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐาน 3 ข้อ ดังต่อไปนี้หรือไม่

- 1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- 2) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)

3) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values) โดย Montgomery [3] ได้กล่าวว่า ส่วนตกค้างที่มาจาก การออกแบบการทดลองมาจาก

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2.17)$$

โดยที่ e_i คือ ส่วนตกค้างที่เป็นผลต่างระหว่างผลการทดลองและค่าประมาณของผลการทดลองวิธีการที่ i

\hat{y}_i คือ ค่าประมาณของข้อมูล สำหรับการออกแบบที่ทำสุ่มแบบสมบูรณ์ ค่าประมาณของข้อมูลจะเท่ากับค่าเฉลี่ยผลรวมทั้งหมดของผลการทดลองที่อยู่ภายใต้วิธีการทดลองที่ i โดย $\hat{y}_i = \bar{y}_i$

2.3. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการ ออกแบบการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัย (Factor) ได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมี วัตถุประสงค์หลักเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) และการศึกษา ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction)

เมื่อจำนวนของปัจจัยมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จำนวนการทดลองในแต่ละครั้งของการ ทำซ้ำอย่างสมบูรณ์จะมีจำนวนรอบในการทดลองมากขึ้นพร้อมๆกับการใช้ทรัพยากรที่มากขึ้น การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนจึงถูกเลือกมาใช้ ถ้าผู้ทำการทดลองตั้งข้อ สมมติฐานว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีค่าสูงๆ (Higher-Order Interaction) สามารถละเว้นได้ เพราะพบว่าจะมีความสำคัญน้อยลง และเลือกพิจารณาเฉพาะผลกระทบหลักและผลกระทบ ร่วมที่มีความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอันดับต่ำ (Low-order Interactions)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนส่วนใหญ่มักใช้เพื่อการทดลอง เบื้องต้น (Screening Experiment) โดยที่ระบบมีหลายปัจจัยที่จะต้องพิจารณาว่า ปัจจัยใดคือ ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการทดลองในขั้นตอนแรกของการพัฒนา และนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองอย่างสมบูรณ์สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพล ต่อระบบ

รูปแบบทั่วไปของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน คือ 2^{k-p} โดยที่ k คือจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง (Factor) และ p คือ ตัวกำเนิดอิสระ (Independent Generators) การออกแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{k-1} จะมี p เท่ากับ 1 เรียกว่า การทดลองแบบลดครึ่งหนึ่ง (One-Half Fraction Factorial) การเลือกตัวกำเนิดอิสระ p ถือว่ามีความสำคัญมากกับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน เนื่องจากจะเป็นแนวทางเพื่อให้เราได้ความสัมพันธ์ของโครงสร้างแฝง (Alias Structure) ที่ดีที่สุด [3]

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน จะมีหนึ่งหรือสองปัจจัยร่วมกันอยู่ในการออกแบบการทดลอง หากเลือกใช้การออกแบบที่มีผลกระทบหลักมีปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบสี่ทาง (Resolution IV) จะดีกว่าการเลือกใช้การออกแบบซึ่งผลกระทบหลักมีปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบสามทาง (Resolution III) [7] โดยลักษณะของปฏิสัมพันธ์ร่วมเป็นดังต่อไปนี้

- Resolution III ไม่มีผลกระทบหลักแฝงอยู่ในผลกระทบหลักอื่นๆ แต่ผลกระทบหลักจะแฝงอยู่กับผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย
- Resolution IV ผลกระทบหลักปนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัยในสมการแฝง และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยอย่างน้อย 2 เทอมปนอยู่ในสมการแฝง
- Resolution V ผลกระทบหลักปนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 4 ปัจจัยในสมการแฝง และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยปนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ในสมการแฝง [8]

การจำแนกความแตกต่างว่าการออกแบบใดเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดทำได้ค่อนข้างยาก จึงมีการออกแบบตารางสรุปความสัมพันธ์ของการแฝง (Alias) ออกมาโดยสนใจที่ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่าง 2 และ 3 ปัจจัย [3] การเลือกใช้ 2^{k-p} ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเลือกใช้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปความสัมพันธ์ของโครงสร้างแฝง (Alias Structure) [3]

Number of Factors, k	Fraction	Number of Runs	Design Generators
3	2_{III}^{3-1}	4	$C = \pm AB$
4	2_{IV}^{4-1}	8	$D = \pm ABC$
5	2_V^{5-1}	16	$E = \pm ABCD$
	2_{III}^{5-2}	8	$D = \pm AB$ $E = \pm AC$
6	2_{VI}^{6-1}	32	$F = \pm ABCDE$
	2_{IV}^{6-2}	16	$E = \pm ABC$ $F = \pm BCD$
	2_{III}^{6-3}	8	$D = \pm AB$ $E = \pm AC$ $F = \pm BC$
7	2_{VII}^{7-1}	64	$G = \pm ABCDEF$
	2_{IV}^{7-2}	32	$F = \pm ABCD$ $G = \pm ABDE$
	2_{IV}^{7-3}	16	$E = \pm ABC$ $F = \pm BCD$ $G = \pm ACD$
	2_{III}^{7-4}	8	$D = \pm AB$ $E = \pm AC$ $F = \pm BC$ $G = \pm ABC$
8	2_V^{8-2}	64	$G = \pm ABCD$ $H = \pm ABEF$
	2_{IV}^{8-3}	32	$F = \pm ABC$ $G = \pm ABD$ $H = \pm BCDE$
	2_{IV}^{8-4}	16	$E = \pm BCD$ $F = \pm ACD$ $G = \pm ABC$ $H = \pm ABD$
9	2_{VI}^{9-2}	128	$H = \pm ACDFG$ $J = \pm BCEFG$
	2_{IV}^{9-3}	64	$G = \pm ABCD$ $H = \pm ACEF$ $J = \pm CDEF$
	2_{IV}^{9-4}	32	$F = \pm BCDE$ $G = \pm ACDE$ $H = \pm ABDE$ $J = \pm ABCE$
	2_{III}^{9-5}	16	$E = \pm ABC$ $F = \pm BCD$ $G = \pm ACD$

10

 2^{10-3}

128

$$\begin{aligned}
 H &= \pm ABD \\
 J &= \pm ABCD \\
 H &= \pm ABCG \\
 J &= \pm ACDE \\
 K &= \pm ACDF
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการนำใช้งานตารางสรุปความสัมพันธ์ของโครงสร้างแฝง เช่น เมื่อเรามีปัจจัยที่สนใจมาใช้ในการออกแบบการทดลองทั้งหมด 6 ปัจจัย ($k=6$) เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.1 จะพบว่าจำนวนปัจจัย 6 ปัจจัยมีการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ 2_{VI}^{6-1} มีจำนวนในการทดลอง 32 ครั้ง 2_{IV}^{6-2} มีจำนวนในการทดลอง 16 ครั้ง และ 2_{III}^{6-3} มีจำนวนในการทดลอง 8 ครั้ง ถ้าตั้งข้อสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีค่าสูงๆ สามารถละเว้นได้เพราะพบว่าจะมีความสำคัญน้อยลง และเลือกพิจารณาเฉพาะผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมที่มีความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอันดับต่ำลงมา จึงเลือกการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2_{IV}^{6-2} มีจำนวนในการทดลอง 16 ครั้ง จะมีตัวกำเนิดการออกแบบ (Design Generator) เป็น $E = ABC$ และ $F = BCD$

การเขียนระดับการออกแบบทดลองของปัจจัย E จะไม่พิจารณาปัจจัย D แต่พิจารณาเฉพาะระดับของปัจจัย A B C ในแต่ละคอลัมน์ การเขียนระดับการออกแบบทดลองของปัจจัย F จะไม่พิจารณาปัจจัย A แต่พิจารณาเฉพาะระดับของปัจจัย B C D ในแต่ละคอลัมน์

พิจารณาเครื่องหมายบวกลบของแต่ละปัจจัยในแต่ละแถวเป็นเครื่องหมาย - คู่กับเครื่องหมาย - จะได้ระดับของ E เป็นเครื่องหมาย + ในทางกลับกันหากเครื่องหมาย - คู่กับเครื่องหมาย + จะได้ระดับของ E เป็นเครื่องหมาย - โดยการหาระดับการออกแบบทดลองของทั้งปัจจัย E และ F แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างตารางการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน

รอบที่	ปัจจัยเดิม				E = ABC	F = BCD
	A	B	C	D		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	-1	1	1

รอบที่	ปัจจัยเดิม				E = ABC	F = BCD
	A	B	C	D		
6	1	-1	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	-1	1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	1
10	1	-1	-1	1	1	1
11	-1	1	-1	1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	-1	1
16	1	1	1	1	1	1

2.4. วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ (Response Surface Method to Process Optimization) [3]

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมวิธีการทางคณิตศาสตร์และเทคนิคทางสถิติเข้ามาไว้ด้วยกัน เพื่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาที่มีผลตอบสนองที่สนใจหลายๆตัว และมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลตอบสนองเหล่านี้

ปัญหาของวิธีการพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่จะไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกของวิธีการพื้นผิวตอบสนอง คือ การหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่าง y และชุดของตัวแปรอิสระ

ถ้าผลตอบสนองมีลักษณะรูปแบบเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันโดยประมาณจะเป็นแบบจำลองลำดับที่หนึ่ง (First order model) ดังสมการที่ (2.18)

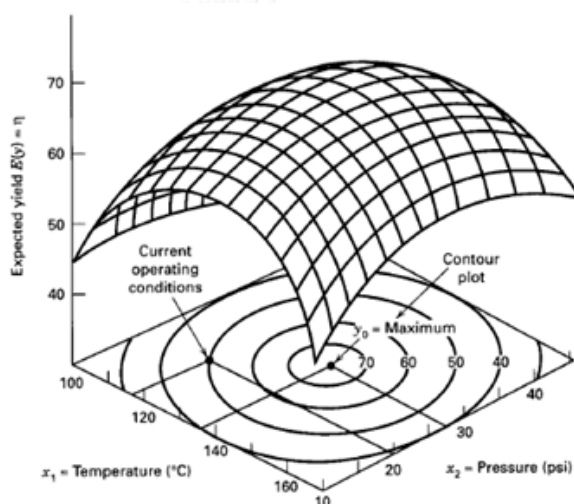
$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \quad (2.18)$$

โดยที่ y คือ ผลตอบสนอง x คือ ตัวแปรที่สนใจ β คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) และ ε คือ สิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในผลตอบสนอง y

ถ้ามีส่วนโค้งในระบบ ฟังก์ชันพหุนามกำลังสูงจะต้องนำมาใช้ตัวอย่างเช่น แบบจำลองลำดับที่สอง (Second-order model) ดังสมการที่ (2.19)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.19)$$

โดยที่ y คือ ผลตอบสนอง x คือ ตัวแปรที่สนใจ β คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) และ ε คือ สิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในผลตอบสนอง y รูปร่างของพื้นผิวตอบสนองมักนำเสนอในรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พื้นผิวตอบสนองสามมิติ [3]

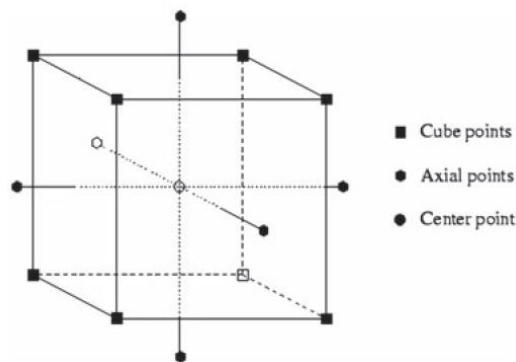
ปัญหาของพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่มักใช้หนึ่งหรือสองรูปแบบจำลองที่กล่าวมาในรูปแบบจำลองพหุนามสามารถนำมาใช้ประมาณการฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระได้ แต่จะให้ได้ผลดีเมื่อเราใช้เปรียบเทียบกับพื้นที่ขนาดเล็กเท่านั้น

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะใช้การจำกัดพื้นผิว (Fitted Surface) ถ้าการจำกัดพื้นผิวสามารถประมาณฟังก์ชันตอบสนองจริงได้ ดังนั้น การวิเคราะห์ด้วยการจำกัดพื้นผิวจะสามารถประมาณได้เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ระบบจริง

การออกแบบการทดลองเพื่อจำกัดพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้ คือ วิธีการแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) และวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

วิธีการแบบส่วนผสมกลาง

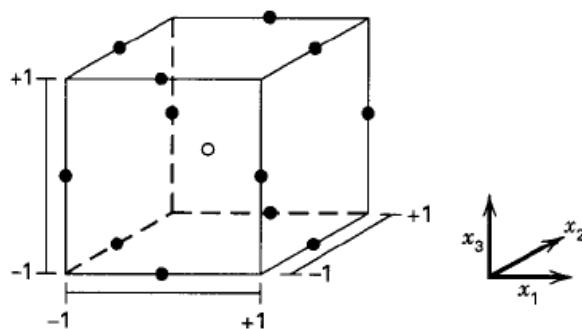
วิธีการแบบส่วนผสมกลางใช้การทดลองที่ระดับปัจจัย 5 ระดับ คือ $-\alpha$ -1 0 $+1$ $+\alpha$ ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบ 2^k แฟคทอเรียลบางส่วน ที่ซึ่ง k คือ จำนวนของปัจจัย โดยแกนของ 2^k การออกแบบแบบดาวทำให้การออกแบบมีความสามารถในการอธิบายส่วนโค้งได้ รูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบส่วนผสมกลางเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากจุดกึ่งกลางเป็นระยะ α เท่ากันและจะเข้าที่จุดกึ่งกลาง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบส่วนผสมกลางกรณี 3 ปัจจัย [9]

วิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

วิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ใช้การทดลองที่ระดับปัจจัย 3 ระดับ ได้แก่ -1 0 $+1$ โดยเป็นการผสมกันระหว่างการออกแบบ 2^k แฟคทอเรียลบางส่วนกับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ การออกแบบด้วยวิธีการนี้มีประสิทธิภาพมากในด้านของจำนวนในการทดลองที่น้อย และสามารถหมุนได้หรือเกือบหมุนได้ ในกรณีที่มี 3 ปัจจัยรูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบของการออกแบบด้วยวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณี 3 ปัจจัย [3]

ในด้านความสามารถของการทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด Zolgharnein และคณะ [9] ให้ความเห็นว่า ผลลัพธ์จากการทำนายทางสถิติระหว่างวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีการแบบส่วนผสมกลางที่ระดับความเชื่อมั่น 95% วิธีการแบบส่วนผสมกลางค่อนข้างให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่า ในขณะที่งานวิจัยของ Ferreira และคณะ [10] กล่าวว่าวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับวิธีการพื้นผิวตอบสนองเพราะทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการกำลังสองและการตรวจสอบความไม่เหมาะสมของแบบจำลองมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการแบบส่วนผสมกลางเล็กน้อย

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการทดลองระหว่างวิธีการแบบส่วนผสมกลางและวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่า เมื่อปัจจัยเท่ากับจำนวน 3 ปัจจัย วิธีการแบบส่วนผสมกลางมีจำนวนครั้งในการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ในขณะที่วิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 ครั้ง โดยหากคำนึงถึงค่าใช้จ่ายและเวลาที่จะต้องสูญเสียไปในการทดลอง วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าและเป็นวิธีการจำกัดแบบจำลองลำดับที่สองที่ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองได้มากกว่า

2.5. ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

กรณีการออกแบบการทดลองมีผลตอบสนองหลายค่า (Multi-response) แนวทางทั่วไปในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่า คือ การรวมผลตอบสนองทุกค่ามาไว้ในฟังก์ชันผลตอบสนองค่าเดียว (Single-response function) โดยผลตอบสนองแต่ละตัวจะจัดรูปให้อยู่ในรูปของ $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$ โดยที่ $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนเข้าอิสระ และ ε คือ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ฟังก์ชันของ f ส่วนใหญ่มักจะไม่ทราบค่า แต่สามารถหาได้จากวิธีการทางสถิติ [11]

มีหลากหลายเทคนิคเกี่ยวกับตัวเลขที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดแก่ผลตอบสนองหลายค่า วิธีการหนึ่งที่มีประโยชน์ในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมแก่ผลตอบสนองหลายค่า คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) วิธีการทั่วไป คือ การเปลี่ยนผลตอบสนอง y_i ไปอยู่ในฟังก์ชันความพึงพอใจ d_i มีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq d_i \leq 1$$

โดยที่ ถ้าผลตอบสนอง y_i อยู่ที่ค่าเป้าหมาย d_i จะเท่ากับ 1 และถ้าผลตอบสนองอยู่นอกเหนือขอบเขตที่ยอมรับได้ d_i จะเท่ากับ 0 ดังนั้น ในการออกแบบควรเลือกค่าความพึงพอใจที่มีค่ามากที่สุด

ถ้าต้องการให้ผลตอบสนอง y ที่มีค่ามากที่สุด

$$d = \begin{cases} 0 & , y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & , L \leq y \leq T \\ 1 & , y > T \end{cases}$$

โดยที่
T คือ ค่าเป้าหมาย
L คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower Limit)
r คือ น้ำหนัก

(2.20)

ถ้าต้องการให้ผลตอบสนอง y ที่มีค่าน้อยที่สุด

$$d = \begin{cases} 1 & , y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & , T \leq y \leq U \\ 0 & , y > U \end{cases}$$

โดยที่
T คือ ค่าเป้าหมาย
U คือ ขีดจำกัดบน (Upper Limit)
r คือ น้ำหนัก

(2.21)

และถ้าต้องการให้ผลตอบสนอง y อยู่ที่ค่าเป้าหมาย

$$d = \begin{cases} 0 & , y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & , L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & , T \leq y \leq U \\ 0 & , y > U \end{cases}$$

โดยที่
T คือ ค่าเป้าหมาย
L คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower Limit)
U คือ ขีดจำกัดบน (Upper Limit)
r คือ น้ำหนัก

(2.22)

หากค่าน้ำหนัก r มีค่าเท่ากับ 1 ฟังก์ชันความพึงพอใจจะเป็นเส้นตรง ถ้าเลือก $r > 1$ แสดงว่ามีความสำคัญมากยิ่งขึ้นที่จะเข้าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย และหากเลือก $0 < r < 1$ แสดงว่ามีความสำคัญน้อย [3]

ในสถานการณ์ที่มีผลตอบสนองหลายค่า ฟังก์ชันความพึงพอใจในทางอุดมคติต้องการให้ฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 1 และฟังก์ชันความพึงพอใจรวมก็มีค่าเท่ากับ 1 ด้วยเช่นกัน ดังนั้นในสถานการณ์จริง เราจึงสนใจที่จะให้ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวมมีค่ามากที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) ของฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละตัว ดังสมการที่ (2.23)

$$D = [d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m]^{1/m} \quad (2.23)$$

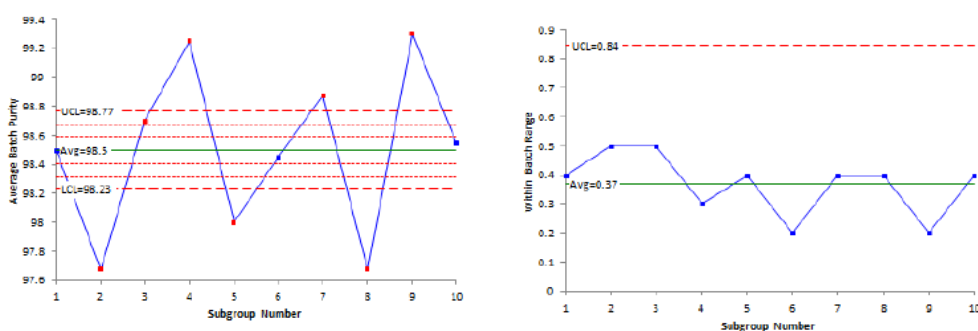
ที่ซึ่ง m คือ จำนวนของผลตอบสนอง และเป็นที่น่าพอใจถ้าฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละตัวไม่เป็นที่พอใจ เช่น $d_i = 0$ จะทำให้ค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับศูนย์เช่นกัน [12]

2.6. แผนภูมิควบคุม

เนื่องจากการสุ่มวัดเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีใช้การวัดในหลายตำแหน่งต่อแผงวงจร 1 แผ่นโดยสนใจความผันแปรที่เกิดขึ้นภายในกลุ่มตัวอย่างด้วยตัวเอง และสนใจความผันแปรระหว่างกลุ่มตัวอย่างด้วย การใช้แผนภูมิควบคุมแบบ X-bar-S จึงไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการผลิตได้ เนื่องจากแผนภูมิควบคุมแบบ X-bar-S ใช้ตรวจจับความผิดปกติในกรณีการวัดชิ้นงานเพียง 1 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน 1 ชิ้นเท่านั้น จึงเป็นการตรวจสอบความผันแปรระหว่างกลุ่มตัวอย่างเท่านั้น

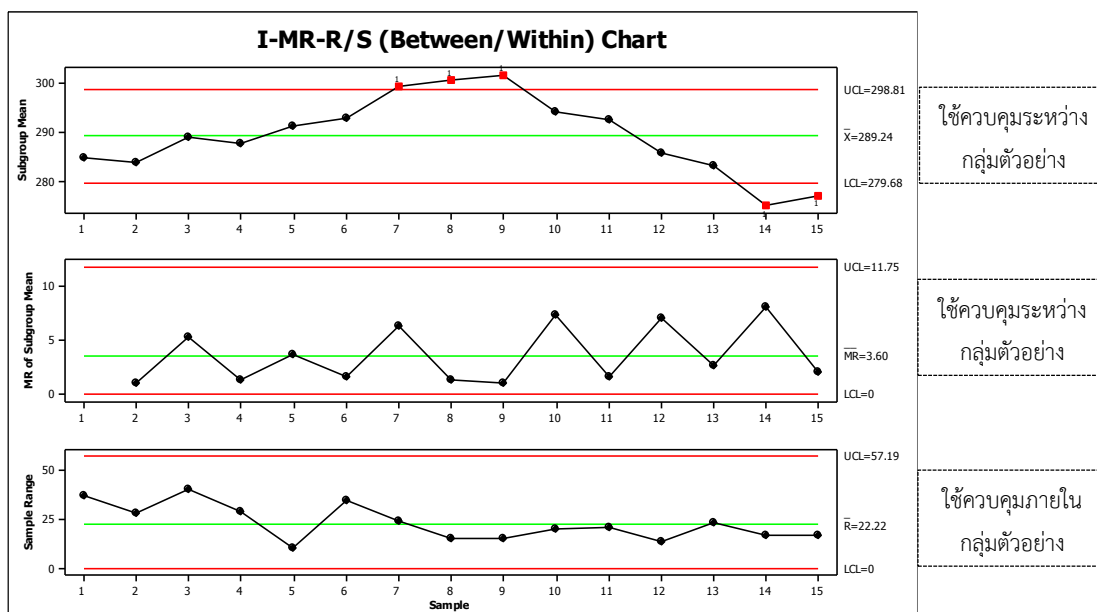
การสุ่มตัวอย่างชิ้นส่วนทุกๆ ชั่วโมง โดยในแต่ละชิ้นต้องทำการวัด 5 ตำแหน่งต่อชิ้น เมื่อเวลาเปลี่ยนไปทำให้ตำแหน่งที่ทำการวัด 5 ตำแหน่งนั้นๆ แตกต่างกันไป บางตำแหน่งให้ค่าการวัดที่ใหญ่มากหรือเล็กมากแตกต่างกันเป็นความผันแปรภายในกลุ่มตัวอย่าง [14]

เมื่อการผลิตแบบกลุ่มย่อยไม่เหมาะสมสำหรับใช้แทนกลุ่มตัวอย่างย่อย เนื่องจากขีดจำกัดของแผนภูมิควบคุมอาจจะกว้างหรือแคบจนเกินไป [15] ส่งผลให้การใช้แผนภูมิ Xbar-R แบบเดิมไม่สามารถใช้ในการเฝ้าติดตามกระบวนการผลิตได้ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งตำแหน่งของค่าเฉลี่ยในแผนภูมิ Xbar-R ทุกจุดอยู่นอกเหนือขีดจำกัดการควบคุม เนื่องจากความผันแปรภายในทำให้ค่าผันแปรแคบ ส่งผลให้การคำนวณหาขีดจำกัดการควบคุมสูงและขีดจำกัดการควบคุมต่ำสุดของแผนภูมิ Xbar-R แคบ [16]



รูปที่ 2.4 แผนภูมิ X-bar-R กรณีผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม และผลกระทบจากตำแหน่งที่ทำการวัด [16]

แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-R/S เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ควบคุมทั้งแบบระหว่างกลุ่มตัวอย่างและแบบภายในกลุ่มตัวอย่างชุดเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างจะถูกแสดงในรูปแบบของค่าเดี่ยว (Individual Value) และระหว่างกลุ่มตัวอย่างจะถูกแสดงในรูปแบบของแผนภูมิช่วง (Range Chart) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-R/S [13]

แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-R/S

แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-R/S จะประกอบด้วยแผนภูมิ 3 ชนิด ได้แก่ แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยว แผนภูมิค่าพิสัยเคลื่อนที่ และแผนภูมิ R หรือ S [13]

(1) แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยว (Individuals Control Chart)

ใช้ในสถานการณ์ซึ่งขนาดตัวอย่างเท่ากับ 1 เช่น ใช้กับเครื่องจักรที่เป็นแบบอัตโนมัติและสามารถตรวจวัดค่าได้ทุกชิ้น แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24

$$\overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=2}^m |X_i - X_{i-1}| \quad (2.24)$$

โดยที่ m คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด และ X_i คือ ค่าที่ตรวจวัด

เส้นกลาง ขีดจำกัดของการควบคุมบน และ ขีดจำกัดของการควบคุมล่าง สำหรับแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียว สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$UCL = \bar{X} + 3 \frac{\overline{mr}}{d_2} = \bar{X} + 3 \frac{\overline{mr}}{1.128} \quad (2.25)$$

$$CL = \bar{X} \quad (2.26)$$

$$LCL = \bar{X} - 3 \frac{\overline{mr}}{d_2} = \bar{X} - 3 \frac{\overline{mr}}{1.128} \quad (2.27)$$

(2) แผนภูมิค่าพิสัยเคลื่อนที่ (Moving Range Chart)

เส้นกลาง ขีดจำกัดของการควบคุมบน และขีดจำกัดของการควบคุมล่าง สำหรับแผนภูมิควบคุมค่าพิสัยเคลื่อนที่ สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$UCL = D_4 \overline{mr} = 3.267 \overline{mr} \quad (2.28)$$

$$CL = \overline{mr} \quad (2.30)$$

$$LCL = D_3 \overline{mr} = 0 \quad (2.29)$$

หมายเหตุ: LCL ของแผนภูมิค่าพิสัยเคลื่อนที่มักจะเป็นศูนย์เสมอ เพราะ $D_3 = 0$ ที่ $n = 2$

(3) แผนภูมิ R หรือ S (R chart or S chart)

ความแปรปรวนของกระบวนการสามารถที่จะควบคุมได้ด้วยแผนภูมิพิสัย (R chart) หรือแผนภูมิส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S chart) โดยขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณขนาดของประชากร

การคำนวณหาค่าพิสัยเฉลี่ยดังสมการด้านล่าง

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=2}^m r_i \quad (2.31)$$

เส้นกลาง ขีดจำกัดของการควบคุมบน และขีดจำกัดของการควบคุมล่าง สำหรับแผนภูมิ R สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$UCL = D_4\bar{r} \quad (2.32)$$

$$CL = \bar{r} \quad (2.34)$$

$$LCL = D_3\bar{r} \quad (2.33)$$

โดยที่

\bar{r} คือ พิสัยเฉลี่ยของตัวอย่าง และค่าคงที่ D_3 และ D_4 ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่าง โดยนำค่าที่ได้จากตารางที่ 2.3 ไปแทนค่าในสมการ

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่สำหรับสร้างแผนภูมิควบคุม [3]

n^*	Factor for Control Limits						
	\bar{X} Chart			R Chart		S Chart	
	A_1	A_2	d_2	D_3	D_4	c_4	n
2	3.760	1.880	1.128	0	3.267	0.7979	2
3	2.394	1.023	1.693	0	2.575	0.8862	3
4	1.880	.729	2.059	0	2.282	0.9213	4
5	1.596	.577	2.326	0	2.115	0.9400	5
6	1.410	.483	2.534	0	2.004	0.9515	6
7	1.277	.419	2.704	.076	1.924	0.9594	7
8	1.175	.373	2.847	.136	1.864	0.9650	8
9	1.094	.337	2.970	.184	1.816	0.9693	9
10	1.028	.308	3.078	.223	1.777	0.9727	10
11	.973	.285	3.173	.256	1.744	0.9754	11
12	.925	.266	3.258	.284	1.716	0.9776	12
13	.884	.249	3.336	.308	1.692	0.9794	13
14	.848	.235	3.407	.329	1.671	0.9810	14
15	.816	.223	3.472	.348	1.652	0.9823	15
16	.788	.212	3.532	.364	1.636	0.9835	16
17	.762	.203	3.588	.379	1.621	0.9845	17
18	.738	.194	3.640	.392	1.608	0.9854	18
19	.717	.187	3.689	.404	1.596	0.9862	19
20	.697	.180	3.735	.414	1.586	0.9869	20
21	.679	.173	3.778	.425	1.575	0.9876	21
22	.662	.167	3.819	.434	1.566	0.9882	22
23	.647	.162	3.858	.443	1.557	0.9887	23
24	.632	.157	3.895	.452	1.548	0.9892	24
25	.619	.153	3.931	.459	1.541	0.9896	25

* $n > 25$: $A_1 = 3/\sqrt{n}$ where n = number of observations in sample.

และสามารถสรุปสูตรในการหาแผนภูมิควบคุมได้ดังตารางที่ 2.4 โดยแบ่งเป็นกรณีของการหาขีดจำกัดข้อกำหนดของพิสัยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ในการเฝ้าติดตาม

ตารางที่ 2.4 สรุปสูตรการคำนวณหาขีดจำกัดข้อกำหนด

ประเภทของแผนภูมิ		UCL	CL	LCL
X-bar-R/S	แผนภูมิ \bar{X} -R	$\bar{\bar{x}} + A_2\bar{r}$	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} - A_2\bar{r}$
		$D_4\bar{r}$	\bar{r}	$D_3\bar{r}$
	แผนภูมิ \bar{X} -S	$\bar{\bar{x}} + 3\frac{\bar{s}}{c_4\sqrt{n}}$	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} - 3\frac{\bar{s}}{c_4\sqrt{n}}$
		$\bar{s} + 3\frac{\bar{s}}{c_4}\sqrt{1-c_4^2}$	\bar{s}	$\bar{s} - 3\frac{\bar{s}}{c_4}\sqrt{1-c_4^2}$
I-MR-R/S	แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยว	$\bar{\bar{x}} + 3\frac{\bar{m}\bar{r}}{d_2}$	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} - 3\frac{\bar{m}\bar{r}}{d_2}$
	แผนภูมิค่าพิสัยเคลื่อนที่	$D_4\bar{m}\bar{r}$	$\bar{m}\bar{r}$	$D_3\bar{m}\bar{r}$
	แผนภูมิ \bar{R}	$D_4\bar{r}$	\bar{r}	$D_3\bar{r}$
	แผนภูมิ \bar{S}	$\bar{s} + 3\frac{\bar{s}}{c_4}\sqrt{1-c_4^2}$	\bar{s}	$\bar{s} - 3\frac{\bar{s}}{c_4}\sqrt{1-c_4^2}$

2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี

แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เน้นการออกแบบให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ มีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงงานแก่การพกพา และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้กระบวนการผลิตแผงวงจรจำเป็นต้องมีความเข้มงวดในกระบวนการผลิต และมี

กระบวนการผลิตที่สลับซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทำความเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี ตลอดจนการควบคุมคุณภาพของการสกรีนโลหะบัดกรี เพื่อป้องกันของเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดตั้งแต่กระบวนการแรกของการผลิต

จากรายงานการศึกษาพบว่าของเสียประมาณ 60% ที่ตรวจพบหลังกระบวนการอบด้วยความร้อนสูง (Reflow Oven) เกิดขึ้นมาจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเนื่องจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี มีปัจจัยอิสระมากมาย ส่งผลผลกระทบต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี [17] - [18]

นอกจากนี้ Huang และคณะ [19] ให้ความสำคัญเห็นเพิ่มเติมว่า เพื่อให้อัตราผลผลิตของกระบวนการ (Process Yield) เป็นไปตามที่กำหนด และมีการเชื่อมติดระหว่างโลหะบัดกรีกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดี มีความจำเป็นจะต้องลดความแปรปรวนของโลหะบัดกรีให้เหลือน้อยที่สุด ถ้ามีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีจะส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังกระบวนการถัดไป ตัวอย่างเช่น กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีที่ไม่ได้รูป สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดของเสียประเภท void ได้ หรือการสกรีนที่เกิดการเชื่อมติดกันของโลหะบัดกรี สามารถเป็นสาเหตุของของเสียประเภทลัดวงจรบนแผงวงจรได้

หากความสามารถในการผลิตมีเพิ่มขึ้นแต่สูญเสียคุณภาพในการผลิต สิ่งเหล่านี้จะเป็นสาเหตุทำให้จำเป็นต้องเพิ่มเติมค่าใช้จ่ายให้สูงขึ้นในภายหลังเนื่องจากต้องแก้ไขและซ่อมแซมของเสียที่เพิ่มขึ้น [20] - [21]

Chen และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาลงถึงปัจจัยด้านการขนถ่ายโลหะบัดกรีในระหว่างกระบวนการสกรีน ในกรณีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดใหญ่และเล็กแตกต่างกันในแต่ละแผงวงจร โดยการสกรีนลงบนแผ่นพิมพ์ที่ออกแบบมาแบบมีขั้น (Step) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ แล้วพิจารณาผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการสกรีน จากจำนวนและอาการของของเสียที่ตรวจสอบหลังกระบวนการอบแผงวงจรด้วยความร้อนแล้ว พบว่าทุกๆของเสียที่ตรวจพบเกี่ยวข้องกับระยะห่างช่องเปิดของแผ่นพิมพ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด ที่ระยะห่างช่องเปิดค่อนข้างชิดกันจะมีปริมาณของเสียเกิดขึ้นสูง

Tsai [23] ทำการศึกษาการปรับปรุงความสามารถของ IC fine-pitch ขนาด 0.4 มิลลิเมตรและ 0.5 มิลลิเมตรเพื่อดูพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีโดยใช้วิธีการ DMAIC และใช้ Taguchi method เพื่อการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยทำการศึกษปัจจัยทั้งหมด 7 ปัจจัยได้แก่ (1) ระยะพิทช์ของ IC fine-pitch (2) ขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรี

(3) แรงดันบนใบปาด (4) ความเร็วของใบปาด (5) การแยกออก (Snap-off) (6) พื้นที่เปิดและความหนาของแผ่นพิมพ์ และ (7) ความหนืดของโลหะบัดกรี จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักของกระบวนการสกรีน IC fine-pitch ที่มีระยะพิทช์ขนาด 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตรที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็วของใบปาดที่ความเร็วปานกลาง คือ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที การแยกออกระดับต่ำที่สุด คือ 2 มิลลิเมตร พื้นที่เปิดของแผ่นพิมพ์ต้องมีความกว้างมากกว่าขนาดของระยะพิทช์ 120% ของพื้นที่ และโลหะบัดกรีมีความหนืดที่ค่าสูง คือ 1300 kcps ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ดัชนีชี้วัดของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น

Tong และคณะ [24] ทำการศึกษาการควบคุมกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจรโดยวิธีการ DMAIC ในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า PSSD โดยเลือกใช้ความสูงของโลหะบัดกรีเป็นตัวชี้วัดคุณภาพ (Critical-to-quality) ในขั้นตอนแรกของการศึกษาผู้ทำการศึกษาได้ให้พนักงานตรวจวัดความสูงของโลหะบัดกรี 5 ตำแหน่งต่อ 1 บอร์ดทุกๆ 4 ชั่วโมงโดยตรวจวัดบนตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท Connector และ BGA จากนั้นนำค่าเหล่านั้นไปบันทึกในตาราง X bar-R เพื่อนำข้อมูลมาเลือกทำการปรับปรุงกระบวนการสกรีนของเครื่องสกรีน โดยใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเป็นเครื่องมือทางสถิติหลักในการปรับปรุงระดับซิกมา โดยเลือกปัจจัยหลักในการทดลอง 5 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความหนืดของโลหะบัดกรี ความเร็วของใบปาด แรงดันที่ใบปาด ทิศทางของแผ่นพิมพ์ และทิศทางของใบปาดมาทำทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ผลหลังจากการศึกษาพบว่า ที่ความหนืดของโลหะบัดกรีต่ำกว่า 150 เมกกะปาสคาล ความเร็วของใบปาดต่ำ 0.4 นิ้วต่อวินาที ปาดไปในทิศทางด้านหน้าด้านเดียวและปาดจากทางด้านขวาของ แผ่นพิมพ์ ทำให้ความแปรปรวนของความสูงมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ระดับของซิกมาของกระบวนการสกรีนได้รับการปรับปรุงจาก 1.162 เป็น 5.924 ซึ่งใกล้เคียงกับระดับความสามารถที่ระดับหกซิกมา

การศึกษาของนักวิจัยหลายท่านที่กล่าวมานั้นทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีส่งต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพิ่มมากขึ้น รวมถึงวิธีการปรับปรุงความประสิทธิภาพของกระบวนการเพื่อให้ผลผลิตในกระบวนการผลิตสูงขึ้น รวมถึงการคาดการณ์อาการของเสียที่เกิดขึ้นหลังการเข้าเครื่องอบความร้อนและการตรวจสอบของเสียด้วยเครื่อง AOI

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าการศึกษาดังกล่าวไม่ได้กล่าวถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประกอบแผงวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดรูปร่างที่หลากหลาย และประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากกว่าหนึ่งพันชิ้นขึ้นไป ซึ่งมีความซับซ้อนที่ยุ่งยาก ซับซ้อนมากกว่า หากแต่กล่าวถึงการศึกษาในระดับของการทดลอง

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสกรีนโลหะบัดกรี และทำการศึกษานอกระบบอิเล็กทรอนิกส์เพียงบางชนิดเท่านั้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรนำการศึกษาของนักวิจัยในอดีตมาประยุกต์ใช้โดยต่อยอดวิธีการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี และวิธีการทดลองมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแผงวงจรสำหรับเครื่องกระดูกหัวใจ เพื่อการควบคุมคุณภาพของการผลิตแผงวงจรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.7.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

ในการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจรหนึ่งแผ่น มีจำนวนตำแหน่งที่เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีต้องตรวจวัดมากกว่าหนึ่งพันตำแหน่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจะออกมาในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ปริมาตร โดยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรจะถูกแบ่งออกเป็นหลายค่าขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด

เมื่อมีการแบ่งจุดวัดค่าของชิ้นงานออกเป็นหลายตำแหน่ง งานวิจัยส่วนใหญ่มักนำค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มาเป็นตัวแปรตอบสนองของการทดลอง ตัวอย่างเช่น

งานวิจัยของ Xi-Ping และคณะ [25] ทำการศึกษาการกระจายความร้อนในขั้นตอนการผลิตพลาสติกของจอ LCD TV แต่เนื่องจากจอภาพมีขนาดใหญ่ การวัดการกระจายความร้อนจึงต้องวัดอุณหภูมิหลายตำแหน่ง ผู้ทำการทดลองใช้การทดลองแบบ Latin Hypercube Design (LHD) ในการค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกับผลลัพธ์ของกระบวนการ โดยแบ่งจุดวัดอุณหภูมิทั้งหมด 12 จุด ตัวแปรตอบสนองจากการทดลอง คือ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้การวิเคราะห์การถดถอยของสมการพหุนามตอบสนองโดยมีฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) คือ สมการ (2.35) การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาจะประสบความสำเร็จ เมื่อค่าของสมการ (2.35) มีค่าน้อยแสดงว่าการกระจายของอุณหภูมิมีค่าต่ำ

$$\min_{x \in \mathbb{R}} F(X) = \min \sum_i^n (T_i - \bar{T})^2 = \min_{x \in \mathbb{R}} (OBJ_f(x_1, x_2))$$

$$\text{subject to } \begin{cases} a_1 \leq x_1 \leq b_1 \\ a_2 \leq x_2 \leq b_2 \end{cases} \quad (2.35)$$

รวมถึงงานวิจัยของ Huang [26] ได้ทำการศึกษากระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อหาแนวทางในการลดจำนวนการตรวจวัดโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้วยวิธีการ Mahalanobis-Taguchi โดยทำการเก็บข้อมูลความหนาของแผงวงจร 203 ตำแหน่ง และให้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นผลตอบสนอง

การนำค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาเป็นตัวแปรตอบสนองของการทดลองทำให้การออกแบบการทดลองมีผลตอบสนองหลายค่า (Multi-response) จึงมีแนวทางทั่วไปในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่า คือ การรวมผลตอบสนองทุกค่ามาไว้ในฟังก์ชันผลตอบสนองค่าเดียว (Single-response function) โดยผลตอบสนองแต่ละตัวจะจัดรูปให้อยู่ในรูปของ $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$ โดยที่ $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนเข้าอิสระ และ ε คือ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ฟังก์ชันของ f ส่วนใหญ่มักจะไม่ทราบค่าแต่สามารถหาได้จากวิธีการทางสถิติ [11]

มีหลากหลายเทคนิคเกี่ยวกับตัวเลขที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดแก่ผลตอบสนองหลายค่า วิธีการหนึ่งที่มีประโยชน์ในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมแก่ผลตอบสนองหลายค่า คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) [3]

งานวิจัยของ Cojocar andคณะ [27] ทำการศึกษากระบวนการแยกสารที่เรียกว่ากระบวนการ Pervaporation โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลและฟังก์ชันความพึงพอใจ โดยมีผลตอบสนองแบบหลายค่า (Multi-response) คือส่วนผสมระหว่าง water/acetonitrile และ water/ethanol ฟังก์ชันความพึงพอใจถูกพัฒนาจากรูปแบบของแฟคทอเรียล แล้วรวมให้อยู่ในรูปฟังก์ชันความพึงพอใจรวม

บทที่ 3

การระบุสาเหตุของปัญหา

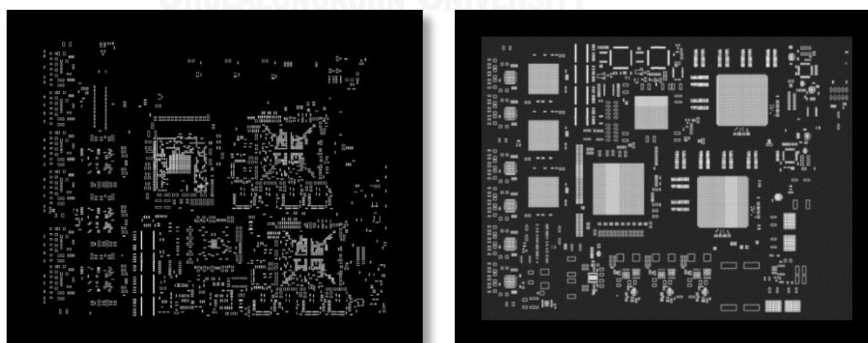
ในบทนี้จะกล่าวถึงการระบุสาเหตุของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี โดยเริ่มต้นตั้งแต่การศึกษากระบวนการผลิต เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต รวมทั้งปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหา จากนั้นทำการคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องและดำเนินการวางแผนการออกแบบการทดลองเพื่อนำปัจจัยเหล่านั้นมาดำเนินการแก้ไขปรับปรุงต่อไป

การแก้ไขปัญหของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ (1) ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (2) ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป (3) ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และ (4) ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรีนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาถึงกระบวนการผลิตเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต รวมทั้งปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหา และนำสาเหตุเหล่านั้นมาแก้ไขปรับปรุง

3.1. การศึกษากระบวนการผลิตและเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง

3.1.1. แผงวงจรของผลิตภัณฑ์รุ่น B

แผงวงจรของผลิตภัณฑ์รุ่น B เป็นชนิด 2 ด้าน ประกอบด้วยแผงวงจรด้านล่างและด้านบน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแผงวงจรของผลิตภัณฑ์รุ่น B

โดยรูปร่างที่ซับซ้อนและการจัดเรียงตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หนาแน่นทำให้มีโอกาสที่จะเกิดของเสียที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีได้ง่าย

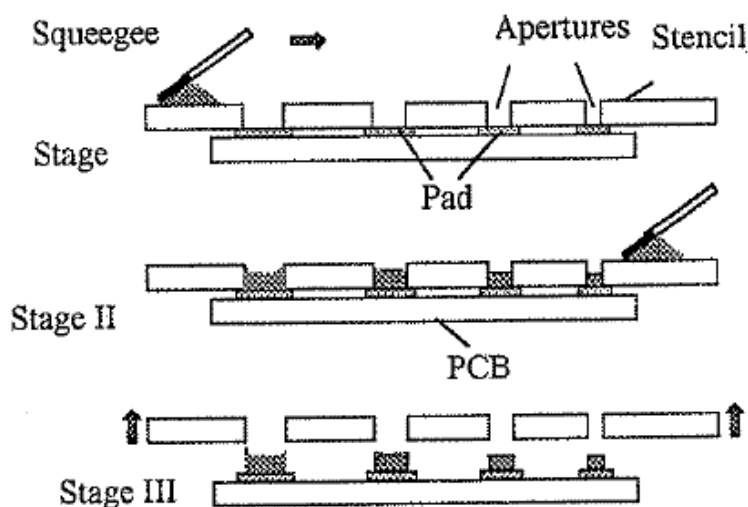
3.1.2. กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจร

กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี คือ กระบวนการที่ทำหน้าที่ในการขนย้ายโลหะบัดกรี (Solder Paste) ไปยังตำแหน่งของแผ่นพิมพ์ (Stencil) ในตำแหน่งที่ถูกต้องและมีปริมาณที่เหมาะสมโดยที่ผลิตภัณฑ์จะต้องมีผลผลิตที่มากที่สุด และมีจำนวนของเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสำเร็จหลัก ได้แก่ ปัจจัยด้านฮาร์ดแวร์ของเครื่องสกรีนโลหะบัดกรี พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ปัจจัยด้านความสะอาด และปัจจัยของสิ่งแวดล้อมภายนอก [28]

กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีประกอบด้วย

- (1) **แผ่นพิมพ์ (Stencil)** แผ่นพิมพ์เป็นตัวกำหนดปริมาตรและรูปร่างของโลหะบัดกรีที่สกรีนลงบนแผงวงจร
- (2) **โลหะบัดกรี (Solder Paste)** โลหะบัดกรีมีหลายประเภทและหลายผู้ผลิตขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โลหะบัดกรีจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ ผงโลหะ ฟลักซ์ และตัวทำละลาย และ
- (3) **ใบปาด (Squeegee)** ทำหน้าที่ในการส่งแรงเพื่อควบคุมโลหะบัดกรีให้ไปในทิศทางที่กำหนด

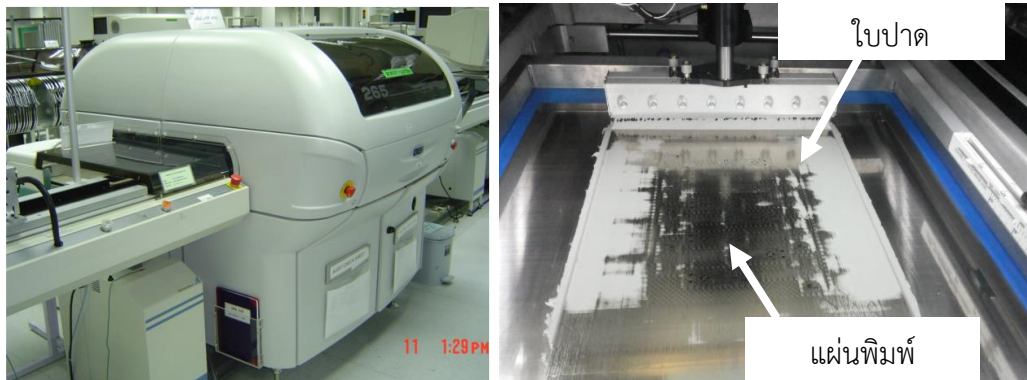
กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่ ระยะที่ 1 คือ ระยะการเคลื่อนที่ของโลหะบัดกรี ระยะที่ 2 คือ ระยะของใบปาดเคลื่อนที่นำโลหะบัดกรีไปเติมยังช่องเปิดของแบบพิมพ์ และระยะที่ 3 คือ โลหะบัดกรีถูกสกรีนลงไปในแผงวงจร ดังขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสกรีนโลหะบัดกรีแต่ละขั้นตอน [29]

3.1.3. เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี

เครื่องสกรีนโลหะบัดกรีเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจร ภายในเครื่องจักรประกอบด้วยชุดควบคุมการทำงานและอุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการผลิต ได้แก่ แผ่นพิมพ์และใบปาด ดังรูปที่ 3.3

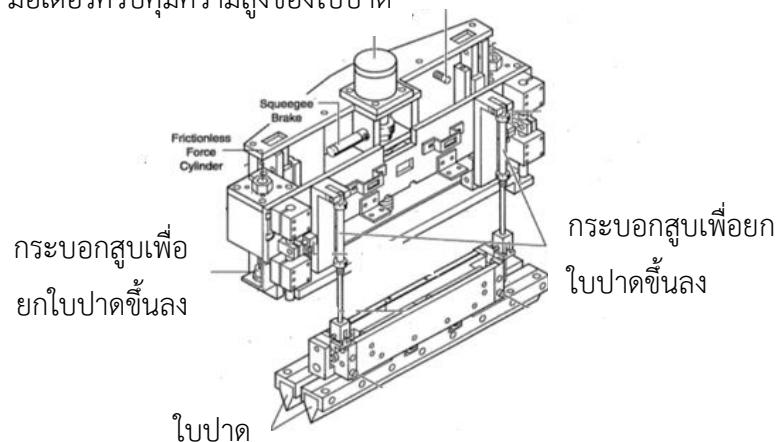


รูปที่ 3.3 เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี

ภายในเครื่องจักรประกอบด้วยชุดควบคุมการทำงาน ได้แก่

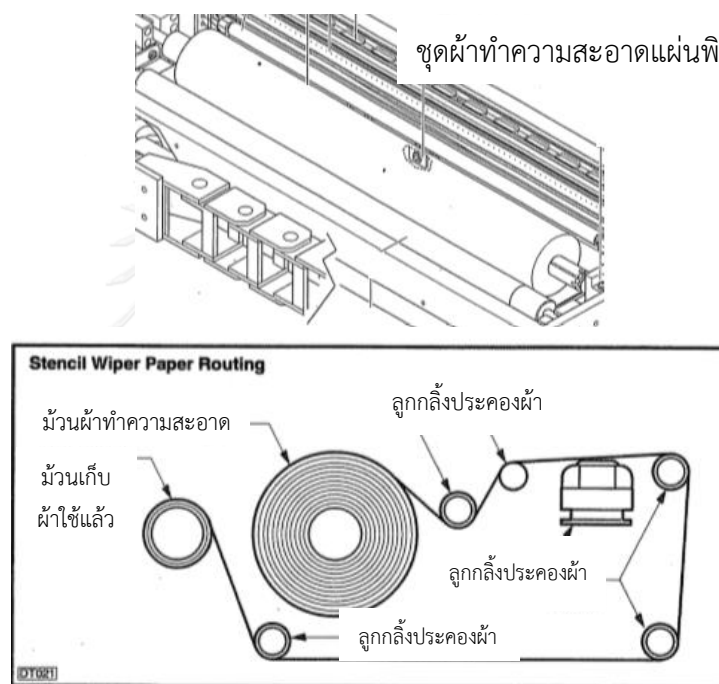
- (1) **ชุดใบปาด** ทำหน้าที่ควบคุมให้ใบปาดเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับแผ่นพิมพ์ และปาดโลหะบัดกรีให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด ชุดใบปาดมีทิศทางในการเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง คือ การเคลื่อนที่จากหน้าไปหลังเพื่อปาดโลหะบัดกรีไปด้านหลัง (Rear) และการเคลื่อนที่จากหลังไปหน้าเพื่อปาดโลหะบัดกรีไปด้านหน้า (Front) ดังรูปที่ 3.4

มอเตอร์ควบคุมความสูงของใบปาด เซ็นเซอร์ตรวจวัดความสูง



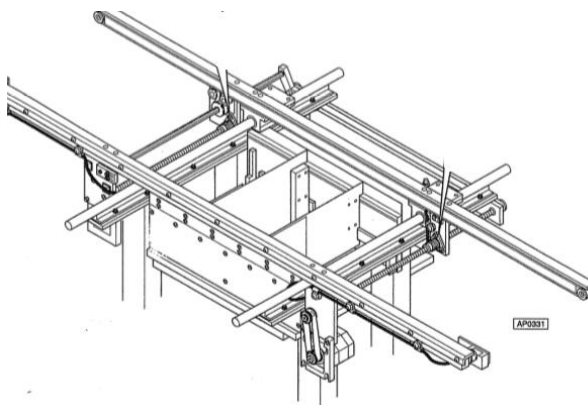
รูปที่ 3.4 ชุดใบปาด [30]

- (1) **ชุดผ้าทำความสะอาดแผ่นพิมพ์** ทำหน้าที่ทำความสะอาดแผ่นพิมพ์อย่างอัตโนมัติ ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสกรีน โดยความถี่ในการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับค่าใช้งานของผู้ใช้งาน ชุดผ้าทำความสะอาดแผ่นพิมพ์จะเคลื่อนที่เข้าไปซึบน้ำยาทำความสะอาด หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่กลับมาทำความสะอาดเศษโลหะบัดกรีที่ติดอยู่บนแผ่นพิมพ์ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของกระบอกลูกสูบและชุดมอเตอร์ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดผ้าทำความสะอาดแผ่นพิมพ์ [30]

- (2) **ชุดสายพานควบคุมการเคลื่อนของแผงวงจร** ชุดสายพานประกอบด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทำหน้าที่ ในการตรวจสอบและควบคุมการหมุนของมอเตอร์สายพานเพื่อให้สายพานลำเลียงแผงวงจรมาหยุดในตำแหน่งที่ถูกต้องและเตรียมพร้อมสำหรับการเริ่มต้นกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี รวมถึงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทำหน้าที่ในการตรวจสอบการลำเลียงแผงวงจรที่สกรีนโลหะบัดกรีเรียบร้อยแล้ว ออกไปยังเครื่องตรวจวัดปริมาตรของโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดสายพานควบคุมการเคลื่อนของแผงวงจร [30]

3.2. กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีก่อนการปรับปรุง

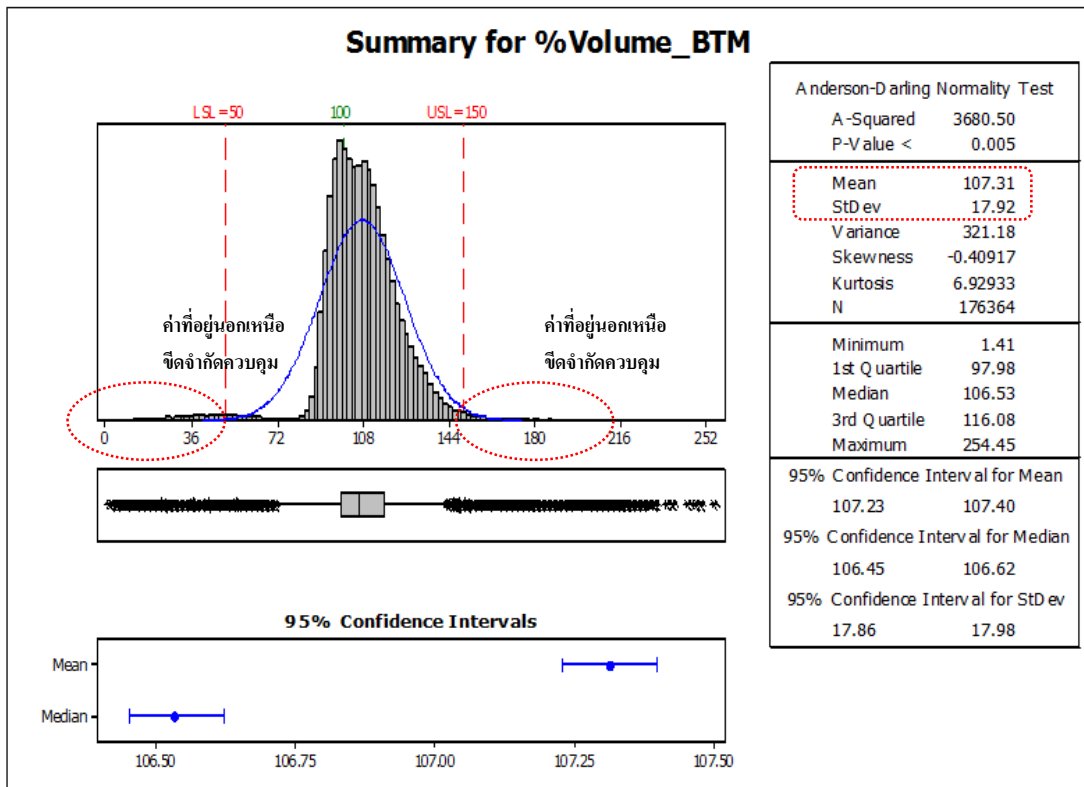
สัดส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ B ในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม – มีนาคม 2558 เป็นของเสียที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าเป้าหมายที่โรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้ ซึ่งปัญหาที่พบบมากที่สุด คือ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปริมาตรของโลหะบัดกรี ดังตารางที่ 3.1 ดังนั้นในขั้นตอนการระบุสาเหตุของปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากโลหะบัดกรี จึงได้ทำการสำรวจเรื่องลักษณะการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีร่วมด้วย

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ B ในช่วงระหว่างเดือน
ตุลาคม 2557-มีนาคม 2558

เดือน	ต.ค.57	พ.ย.57	ธ.ค.57	ม.ค.-58	ก.พ.-58	มี.ค.-58
% ของเสียของแผงวงจร ด้านล่าง	3%	4%	7%	3%	3%	3%
% ของเสียแผงวงจร ด้านบน	1%	1%	4%	2%	2%	2%

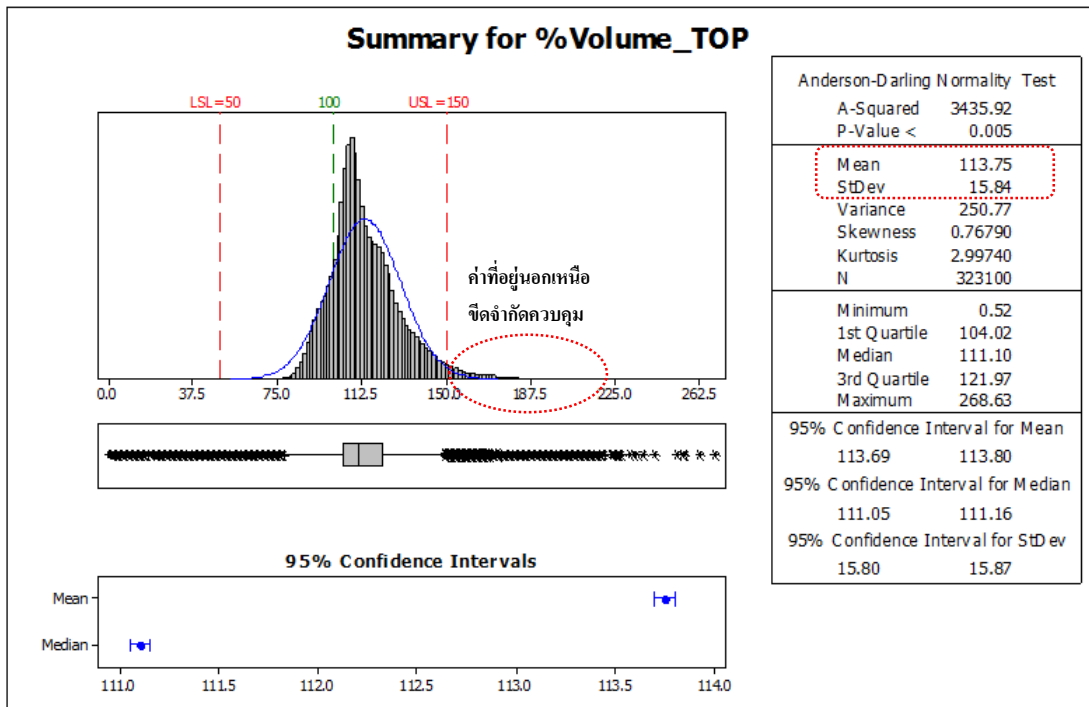
ข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีของผลิตภัณฑ์รุ่น B แสดงจำนวนค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่างและด้านบน โดยนำข้อมูลเหล่านั้นมาหาลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรโลหะบัดกรีในกระบวนการผลิตโลหะบัดกรีปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำนวน 9 วัน สุ่มวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 2 บอร์ด แผงวงจรด้านล่างมีข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีทั้งหมด 176,364 ข้อมูล และแผงวงจรด้านบนมี

ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีจำนวนทั้งหมด 323,100 ข้อมูล ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่าง

จากรูปที่ 3.7 การกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 107.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 17.9 แต่มีการกระจายตัวค่อนข้างสูง โดยพบว่าข้อมูลบางส่วนอยู่นอกเหนือขีดจำกัดข้อกำหนด (Out of specification control) โดยลักษณะอาการดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดของเสียที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีทั้ง 4 ชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้เมื่อทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) ด้วยวิธีการของ Anderson-Darling พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติ อันเนื่องมาจากการกระจายตัวของโลหะบัดกรีในแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างกันมาก ปริมาตรของโลหะบัดกรีจึงกระจายออกเป็นกลุ่มย่อย โดยสังเกตได้จากกราฟฮิสโตแกรมซึ่งมีจำนวนยอดหลายยอดในกราฟเดียวกันและไม่เป็นทรงระฆังคว่ำ ด้วยลักษณะการกระจายตัวดังกล่าวทำให้ต้องมีการปรับปรุงค่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีให้ใกล้เคียงค่าเป้าหมาย และลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่างให้เหลือน้อยที่สุด



รูปที่ 3.8 ลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน

จากรูปที่ 3.8 การกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน มีการกระจายตัวค่อนข้างสูงเช่นกัน ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีมีค่าเฉลี่ยของเท่ากับ 113.75 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 15.84 และเมื่อทดสอบความเป็นปกติด้วยวิธีการของ Anderson-Darling พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวไม่เป็นปกติ อันเนื่องมาจากการกระจายตัวของ ปริมาตรโลหะบัดกรีในแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างกันมาก กราฟฮิสโตแกรมของเปอร์เซ็นต์ ปริมาตรโลหะบัดกรีกระจายออกเป็นกลุ่มย่อย โดยสังเกตได้จากกราฟฮิสโตแกรมไม่เป็นทรง ระฆังคว่ำ นอกจากนี้พบว่าปริมาตรโลหะบัดกรีบางส่วนอยู่นอกเหนือขีดจำกัดข้อกำหนด (Out of specification control) ซึ่งลักษณะอาการดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดของเสียที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรี

ด้วยลักษณะการกระจายตัวดังกล่าวทำให้ต้องมีการปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรให้ ใกล้เคียงค่าเป้าหมายและลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบนให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีอยู่ในขีดจำกัดข้อกำหนดและช่วยลด จำนวนของเสียที่เกิดขึ้น

3.3. การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรี

การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรี ผู้วิจัยใช้วิธีระดมความคิดจากผู้มีความเชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีประกอบด้วย วิศวกรอาวุโสฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายผลิต หัวหน้าช่างเทคนิคและช่างเทคนิค ร่วมกับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยเข้าที่มีผลกระทบต่อปริมาณของโลหะบัดกรีและส่งผลให้เกิดของเสียประเภทโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง โลหะบัดกรีมากเกินไป โลหะบัดกรีน้อยเกินไป และไม่มีโลหะบัดกรี

3.3.1. การพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรีด้วยวิธีระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญ

การพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรีด้วยวิธีระดมความคิดจากผู้มีความเชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีใช้ตารางสาเหตุและผล แบ่งประเภทของสาเหตุออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ สาเหตุที่เกิดขึ้นจากบุคลากร เครื่องจักร วิธีการทำงาน และวัตถุดิบในการผลิต โดยวิเคราะห์ผลกระทบจากของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น

ข้อมูลจากการระดมความคิดสามารถนำมาสรุปเป็นตารางวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องแต่ละประเภท

ประเภทของสาเหตุ	ตัวแปรแทนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
บุคลากร	M-1	เลือกซื้อโปรแกรมของเครื่องสกรีนโลหะบัดกรีไม่สอดคล้องกับแผ่นพิมพ์ที่ติดตั้งไว้ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรไม่เหมาะสมกับแผ่นพิมพ์ชนิดนั้น
บุคลากร	M-2	ใส่แผ่นพิมพ์กลับทิศทางทำให้เมื่อสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจรเกิดปัญหาไม่มีโลหะบัดกรีในตำแหน่งที่แผ่นพิมพ์กลับทิศทาง
บุคลากร	M-3	ช่างเทคนิคใหม่ อาจจะไม่เข้าใจการใช้งานเครื่องจักรอย่างชัดเจน
บุคลากร	M-4	ช่างเทคนิคขาดความรู้ที่เพียงพอโดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ประเภทของสาเหตุ	ตัวแปรแทนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
		การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่จะต้องอาศัยความเข้าใจและมีความรู้เพียงพอเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
บุคลากร	M-5	สร้างโปรแกรมของเครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีผิดพลาด ส่งผลให้การตรวจวัดค่าของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรผิดพลาด และทำให้เครื่องจักรตัดสินใจว่าแผงวงจรที่สกรีนออกมามีปริมาตรโลหะบัดกรีผิดปกติไปจากขีดจำกัดข้อกำหนดที่ตั้งไว้
บุคลากร	M-6	ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดของเสียที่เกี่ยวข้องกับปริมาตรโลหะบัดกรีทั้ง 4 ชนิด ไม่ว่าจะ เป็นปัญหา ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป หรือปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี
บุคลากร	M-7	ออกแบบแผ่นพิมพ์ให้ระยะขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กว้างเกินไป เป็นสาเหตุให้ปริมาตรโลหะบัดกรีที่สกรีนลงมามีปริมาณมากเนื่องจากขนาดของช่องเปิดกว้าง โลหะบัดกรีบางส่วนจะทะลักออกมาไปยึดติดกับขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียงขึ้น
เครื่องจักร	M-8	เครื่องสกรีนโลหะบัดกรีขาดความแม่นยำในการปาดโลหะบัดกรีในแต่ละครั้ง ส่งผลให้ปริมาตรโลหะบัดกรีที่เกิดขึ้นจากการปาดไปด้านหน้ามีปริมาตรไม่เท่ากับการปาดไปด้านหลัง ทำให้การควบคุมปริมาตรโลหะบัดกรีที่สกรีนลงบนแผงวงจรทำได้ยาก เนื่องจากเครื่องจักรขาดความแม่นยำ
เครื่องจักร	M-9	เซ็นเซอร์ทำงานผิดพลาดทำให้แผงวงจรที่ลำเลียงมา

ประเภทของสาเหตุ	ตัวแปรแทนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
		ตามสายพานการผลิตหยุดผิดตำแหน่ง ส่งผลให้ในขณะที่สกรีนโลหะบัดกรีมีโลหะบัดกรีบางส่วนไม่ได้ไหลลงไปยังแผงวงจร
เครื่องจักร	M-10	กล้องจับภาพตำแหน่งจุดอ้างอิงบนแผงวงจรผิดพลาดทำให้ขณะที่สกรีนโลหะบัดกรีมีโลหะบัดกรีบางส่วนไม่ได้ไหลลงไปยังแผงวงจรในปริมาณที่เหมาะสมเกิดของเสียประเภทโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และไม่มีโลหะบัดกรี
เครื่องจักร	M-11	น้ำยาทำความสะอาดแผ่นพิมพ์หมด ทำให้แผ่นพิมพ์ไม่ได้รับการทำความสะอาด จึงมีเศษโลหะบัดกรีติดค้างอยู่บนแผ่นพิมพ์ เมื่อทำการสกรีนครั้งถัดไปเศษโลหะบัดกรีที่ตกค้างอยู่จะลงไปติดบนแผงวงจรทำให้เกิดปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียงได้ง่าย
เครื่องจักร	M-12	ผ้าที่ใช้ทำความสะอาดแผ่นพิมพ์หมด จึงมีเศษโลหะบัดกรีติดค้างอยู่บนแผ่นพิมพ์ เมื่อทำการสกรีนครั้งถัดไปเศษโลหะบัดกรีที่ตกค้างอยู่จะลงไปติดบนแผงวงจรทำให้เกิดปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง
วิธีการทำงาน	M-13	ใช้ใบปาดผิดขนาด
วิธีการทำงาน	M-14	ใช้แรงในการสกรีนน้อยทำให้ใบปาดกดโลหะบัดกรีลงไปเยอะ
วิธีการทำงาน	M-15	ใช้แรงในการสกรีนสูงเกินไปทำให้ใบปาดกดโลหะบัดกรีลงไปน้อย
วิธีการทำงาน	M-16	ใช้ความเร็วในการสกรีนช้าเกินไปทำให้ใบปาดปาดโลหะบัดกรีออกจากช่องเปิดจนหมด
วิธีการทำงาน	M-17	ใช้ความเร็วในการสกรีนเร็วเกินไปทำให้ใบปาดปาดโลหะบัดกรีลงไปเยอะ

ประเภทของสาเหตุ	ตัวแปรแทนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
วิธีการทำงาน	M-18	ใช้ความถี่ในการทำความสะอาดแผ่นพิมพ์น้อยเกินไป แผ่นพิมพ์จึงมีเศษโลหะบัดกรีที่หลุดตกค้างอยู่
วิธีการทำงาน	M-19	ไม่มีเอกสารแนะนำวิธีการทำงานที่ถูกต้อง
วิธีการทำงาน	M-20	กำหนดความเร็วในการแยกออก (Snap off) เร็วเกินไป
วิธีการทำงาน	M-21	กำหนดความเร็วในการแยกออกช้าเกินไป
วิธีการทำงาน	M-22	กำหนดระยะในการพิมพ์ (Print Gap) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์
วิธีการทำงาน	M-23	กำหนดระยะทางในการแยกออกสั้นเกินไป
วัตถุดิบ	M-24	แผ่นพิมพ์ที่ใช้ในการสกรีนชำรุด
วัตถุดิบ	M-25	แผ่นพิมพ์หย่อนทำให้สกรีนไม่ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ
วัตถุดิบ	M-26	แผงวงจรโค้งงอ ทำให้สกรีนไม่ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ
วัตถุดิบ	M-27	โลหะบัดกรีเหลวจนเกินไป เกิดปัญหาโลหะบัดกรีเชื่อมติดกับขาข้างเคียงได้ง่าย
วัตถุดิบ	M-28	โลหะบัดกรีแห้งจนเกินไปเกิดปัญหาไม่มีโลหะบัดกรีได้ง่าย
วัตถุดิบ	M-29	โลหะบัดกรีหมดอายุ ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานน้อยลงโดยเฉพาะโลหะบัดกรีจะมีความชื้นและแห้งมากขึ้น
วัตถุดิบ	M-30	ขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีระยะชิดกันมากทำให้มีโอกาสที่จะเกิดปัญหาโลหะบัดกรีเชื่อมติดกับขาข้างเคียงได้ง่ายขึ้น
วัตถุดิบ	M-31	ผิวของใบปาดชำรุด ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะบัดกรีที่จะสกรีนลงไปบนแผงวงจรพิมพ์ได้

จากนั้นนำข้อมูลมาสรุปเป็นตารางวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบเพื่อจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรี รวมถึงผลกระทบต่ออาการของเสีย

ในขั้นตอนการจัดลำดับความสำคัญของตารางวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบมีเกณฑ์การให้คะแนนตั้งแต่ 0-9 คะแนนของลำดับความสำคัญและผลกระทบเป็นดังนี้

ลำดับความสำคัญ	ระดับผลกระทบ
0	ไม่มีผลกระทบ
1	ผลกระทบน้อย
3	ผลกระทบปานกลาง
9	ผลกระทบมาก

หลังจากนั้นนำคะแนนของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 4 คน ได้แก่ วิศวกรอาวุโสฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายผลิต หัวหน้าช่างเทคนิค และช่างเทคนิคมารวมกันแล้วคิดเป็นค่าเฉลี่ยของคะแนนทั้งหมดสรุปลงไปยังตารางที่ 3.3 และเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยจากปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักสูงที่สุดไปหาปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักต่ำที่สุด โดยปัจจัยที่มีสัญลักษณ์ * คือปัจจัยที่ยังขาดมาตรการในแก้ไขปัญหาที่ชัดเจน

และจัดเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยในรูปของกราฟดังรูปที่ 3.9 เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างของลำดับความสำคัญได้ชัดเจนขึ้น

ตารางที่ 3.3 สรุปการวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบเพื่อจัดลำดับความสำคัญ

อันดับความสำคัญ	10	7	10	10	10	10												
ผลกระทบที่	1	2	3	4	5	6												
	ผลกระทบต่อปริมาตรโลหะบัดกรี		ผลกระทบต่ออาการของเสีย				<table border="1"> <thead> <tr> <th>ลำดับความสำคัญ</th> <th>ระดับผลกระทบ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>ไม่มีผลกระทบ</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>ผลกระทบน้อย</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>ผลกระทบปานกลาง</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>ผลกระทบมาก</td> </tr> </tbody> </table>		ลำดับความสำคัญ	ระดับผลกระทบ	0	ไม่มีผลกระทบ	1	ผลกระทบน้อย	3	ผลกระทบปานกลาง	9	ผลกระทบมาก
ลำดับความสำคัญ	ระดับผลกระทบ																	
0	ไม่มีผลกระทบ																	
1	ผลกระทบน้อย																	
3	ผลกระทบปานกลาง																	
9	ผลกระทบมาก																	
	ค่าเฉลี่ยของปริมาตรของโลหะบัดกรี	ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณโลหะบัดกรี	โลหะบัดกรียึดติดกับช่างข้างเคียง	โลหะบัดกรีมีกลิ่นเกินไป	โลหะบัดกรีน้อยเกินไป	ไม่มีโลหะบัดกรี												

ลำดับ ที่	ปัจจัยที่ เกี่ยวข้อง							ค่าเฉลี่ย ถ่วง น้ำหนัก	เปอร์ เซ็นต์	แนวทางการแก้ไข ในปัจจุบัน
*1	M-23	6.5	6.5	7	7	7	7	390.5	6%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
*2	M-14	7	5	6	6	6	6	345	5%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
3	M-18	6.5	4	4	7	7	7	343	5%	ทำความสะอาด แผ่นพิมพ์ทุกรอบ ของการสกรีน
4	M-26	5	5	5	5.5	5.5	5.5	300	5%	แผนก IOA สุ่ม ตรวจสอบแผงวงจร จากผู้ผลิตก่อน นำมาใช้งาน
*5	M-15	3.5	1.5	7	2.5	7	7	280.5	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
*6	M-6	4.5	4.5	5	5	5	5	276.5	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน

7	M-28	4.5	4.5	5	5	5	5	276.5	4%	ใช้วันหมดอายุของ โลหะบัดกรีเป็นตัว ชี้บอกคุณภาพของ โลหะบัดกรี ซึ่ง โลหะบัดกรีที่เปิด ใหม่จะมีความเหน็ด น้อยกว่าส่วนโลหะ บัดกรีที่ใกล้ หมดอายุจะมีความ เหน็ดมากกว่าและ แห้ง
8	M-22	5	3.5	5	5	5	5	274.5	4%	ในการปรับตั้ง เครื่องทุกครั้งช่าง เทคนิคต้องปรับค่า ระยะในการพิมพ์ ให้เป็นศูนย์
*9	M-21	4.5	3	5	5	5	5	266	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ละคน
10	M-29	5.5	3	8.5	8.5	0.5	0.5	256	4%	สังเกตจากวัน หมดอายุของโลหะ บัดกรีที่ระบุอยู่บน ฉลาก
11	M-27	4.5	4	4	4	4	4	233	4%	ใช้วันหมดอายุของ โลหะบัดกรีเป็นตัว ชี้บอกคุณภาพของ โลหะบัดกรีซึ่งโลหะ บัดกรีที่เปิดใหม่จะ มีความเหน็ดน้อย กว่าส่วนโลหะ บัดกรีที่ใกล้

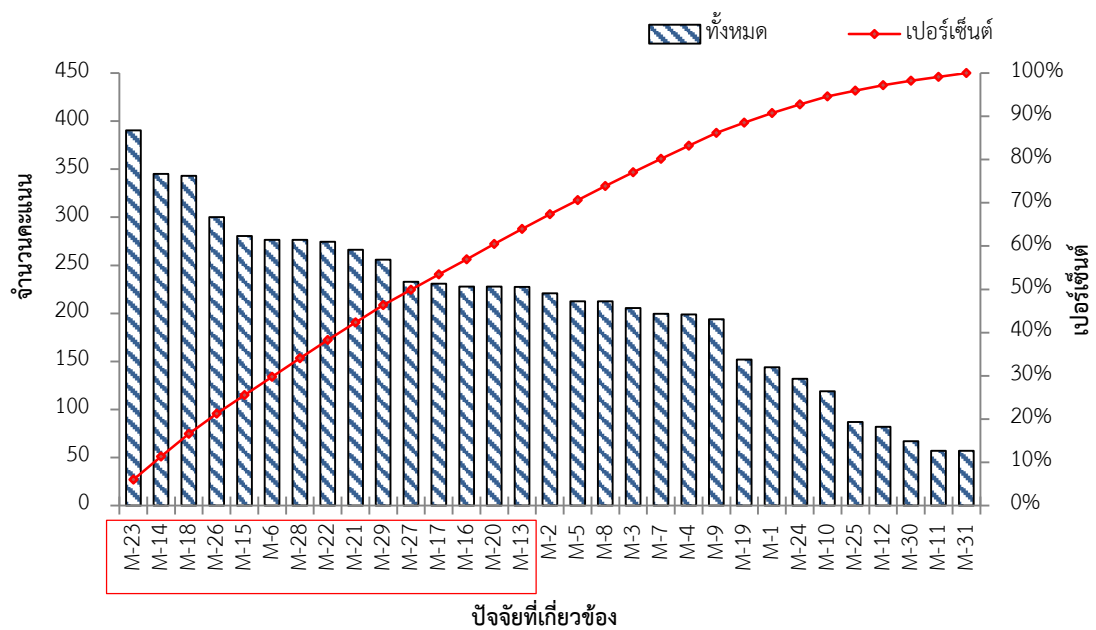
										หมดอายุจะมีความ หนักมากกว่าและ แห้ง
*12	M-17	5	3	1	1	7	7	231	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
*13	M-16	4	4	4	4	4	4	228	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
*14	M-20	4	4	4	4	4	4	228	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
*15	M-13	5	2.5	0	0	8	8	227.5	4%	ปัจจุบันยังขาด มาตรการในแก้ไข ปัญหาที่ชัดเจน อาศัยประสบการณ์ ในการปรับตั้งค่า ของช่างเทคนิคแต่ ละคน
16	M-2	4	3	4	4	4	4	221	3%	ใช้การสังเกต ตำแหน่งช่องบนบน แผ่นพิมพ์

										เปรียบเทียบกับ แผงวงจรในขณะ ทำการติดตั้ง
17	M-5	5.5	2.5	0.5	0.5	6.5	6.5	212.5	3%	สร้างโปรแกรมจาก Gerber file ที่ระบุ หมายเลขเดียวกัน กับที่ระบุอยู่บน แผ่นพิมพ์
18	M-8	3.5	2.5	4	4	4	4	212.5	3%	ตรวจสอบความ พร้อมของการใช้ งานขณะทำการ บำรุงรักษาเชิง ป้องกันในแต่ละ เดือน เมื่อพบความ ผิดปกติจึงติดต่อให้ บริษัทผู้ผลิตเข้ามา สอบเทียบวัดความ แม่นยำของ เครื่องจักร
19	M-3	3.5	1.5	7	7	1	1	205.5	3%	ทางแผนกจัดให้ พนักงานใหม่ ฝึกอบรมและมี พนักงานพี่เลี้ยง คอยสอนงานให้แก่ พนักงานใหม่ ในช่วงระยะเวลา 3 เดือนแรกของการ ทำงาน
20	M-7	5.5	3.5	6	6	0	0	199.5	3%	ออกแบบแผ่นพิมพ์ และกำหนดความ กว้างของขา อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์แต่ ละชนิดตาม มาตรฐานของ IPC

21	M-4	4.5	2	0	0	7	7	199	3%	วางแผนก้จัดให้พนักงานใหม่มีการฝึกอบรมและมีพนักงานพี่เลี้ยงคอยสอนงานให้แก่พนักงานใหม่เป็นระยะเวลาตลอด 3 เดือน
22	M-9	5	2	6.5	6.5	0	0	194	3%	ตรวจสอบความพร้อมของการใช้งานขณะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแต่ละเดือน
23	M-19	5	1	5	1.5	1.5	1.5	152	2%	ปฏิบัติงานตามเอกสารวิธีการใช้งานเครื่องสกรีนโลหะบัดกรีซึ่งบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรเป็นผู้จัดเตรียมไว้
24	M-1	5	2	2	2	2	2	144	2%	ปฏิบัติงานตามเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงาน
25	M-24	4.5	1	2	2	2	2	132	2%	ใช้การตรวจสอบแผ่นพิมพ์ทุกครั้งก่อนการนำมาใช้งาน
26	M-10	2.5	2	2	2	2	2	119	2%	ตรวจสอบความพร้อมของการใช้งานขณะทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันในแต่ละเดือน
27	M-25	2	1	1.5	1.5	1.5	1.5	87	1%	ใช้การตรวจสอบ

										แผ่นพิมพ์ทุกครั้ง ก่อนการนำมาใช้ งาน
28	M-12	1.5	1	1.5	1.5	1.5	1.5	82	1%	เครื่องสกรีนโลหะ บัดกรีแสดง ข้อความแจ้งเตือน
29	M-30	1	1	2	1	1	1	67	1%	ออกแบบช่องเปิด บนแผ่นพิมพ์ให้ แคบกว่าขนาดจริง เล็กน้อย
30	M-11	1	1	1	1	1	1	57	1%	เครื่องสกรีนโลหะ บัดกรีแสดง ข้อความแจ้งเตือน เมื่อน้ำยาทำความ สะอาดแผ่นพิมพ์ หมด
31	M-31	1	1	1	1	1	1	57	1%	เปลี่ยนใบปาดใหม่ ทันทีเมื่อชำรุด

แผนภูมิเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยและผลกระทบ



รูปที่ 3.9 การเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบ

3.3.2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อปริมาตรของโลหะบัดกรี

Huang และคณะ [19] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโลหะบัดกรีกับการเกิดขึ้นของของเสียหลังกระบวนการอบด้วยความร้อน โดยศึกษาจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 37 รุ่นประกอบด้วยแผงวงจรของโน้ตบุ๊ก คอมพิวเตอร์ และสมาร์ตการ์ด ให้ความเห็นว่า อาการโลหะบัดกรีเปิด (Solder Open) มีสาเหตุหลักมาจากปริมาณของโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และอาการโลหะบัดกรีเชื่อมติดกัน (Solder Shorts) มีผลมาจากปริมาตรของโลหะบัดกรีที่มากเกินไป ความหนืดของโลหะบัดกรีต่ำ และมักเกิดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด Fine pitch เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างขาน้อย

Tsai [23] ทำการศึกษาการปรับปรุงความสามารถของ IC fine-pitch ขนาด 0.4 มิลลิเมตรและ 0.5 มิลลิเมตรเพื่อดูพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีโดยใช้วิธีการ DMAIC และใช้ Taguchi method เพื่อการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 7 ปัจจัยได้แก่ (1) ระยะพิทช์ของ IC fine-pitch (2) ขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรี (3) แรงดันบนใบปาด (4) ความเร็วของใบปาด (5) การแยกออก (Snap-off) (6) พื้นที่เปิดและความหนาของแผ่นพิมพ์ และ (7) ความหนืดของโลหะบัดกรี จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักของกระบวนการสกรีน IC fine-pitch ที่มีระยะพิทช์ขนาด 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตรที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็วของใบปาดที่ความเร็วปานกลาง คือ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที การแยกออกระดับต่ำที่สุด คือ 2 มิลลิเมตร พื้นที่เปิดของแผ่นพิมพ์ต้องมีความกว้างมากกว่าขนาดของระยะพิทช์ 120% ของพื้นที่ และโลหะบัดกรีมีความหนืดที่ค่าสูง คือ 1300 kcps ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ดัชนีชี้วัดของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น

Tong และคณะ [24] ทำศึกษาการควบคุมกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจรโดยวิธีการ DMAIC ในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า PSSD โดยเลือกใช้ความสูงของโลหะบัดกรีเป็นตัวชี้วัดคุณภาพ (Critical-to-quality) ในขั้นตอนแรกของการศึกษาผู้ทำการศึกษาได้ให้พนักงานตรวจวัดความสูงของโลหะบัดกรี 5 ตำแหน่งต่อ 1 บอร์ดทุกๆ 4 ชั่วโมงโดยตรวจวัดบนตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภท Connector และ BGA จากนั้นนำค่าเหล่านั้นไปบันทึกในตาราง \bar{X} เพื่อนำข้อมูลมาเลือกทำการปรับปรุงกระบวนการสกรีนของเครื่องสกรีน โดยใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเป็นเครื่องมือทางสถิติหลักในการปรับปรุงระดับซิกมา โดยเลือกปัจจัยหลักในการทดลอง 5 ปัจจัยได้แก่ ค่าความหนืดของโลหะบัดกรี ความเร็วของใบปาด แรงดันที่ใบปาด ทิศทางของแผ่นพิมพ์

และทิศทางของใบปาดมาทำทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ผลหลังจากการศึกษาพบว่า ที่ความหนืดของโลหะบัดกรีต่ำกว่า 150 เมกกะปาสคาล ความเร็วของใบปาดต่ำ 0.4 นิ้วต่อวินาที ปาดไปในทิศทางด้านหน้าด้านเดียวและปาดจากทางด้านขวาของ แผ่นพิมพ์ ทำให้ความแปรปรวนของความสูงมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ระดับของซิกม่าของกระบวนการสกรีนได้รับการปรับปรุงจาก 1.162 เป็น 5.924 ซึ่งใกล้เคียงกับระดับความสามารถที่ระดับหกซิกม่า

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของนักวิจัยหลายท่านสามารถสรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรีได้ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรี
- 2) แรงดันบนใบปาด
- 3) ความเร็วของใบปาด
- 4) ความสูงของการแยกออก
- 5) พื้นที่เปิดของแผ่นพิมพ์
- 6) ความหนาของแผ่นพิมพ์
- 7) ค่าความหนืดของโลหะบัดกรี
- 8) ทิศทางของแผ่นพิมพ์
- 9) ทิศทางของใบปาด

3.4. สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรี

ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของโลหะบัดกรีด้วยวิธีระดมความคิดจากผู้มีความเชี่ยวชาญดังตารางที่ 3.3 สรุปการวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบเพื่อจัดลำดับความสำคัญ พบว่า สาเหตุของปัญหาบางประเภทได้รับการแก้ไขและป้องกันความผิดพลาดไปแล้วดังที่ระบุในส่วนของแนวทางป้องกันในปัจจุบัน ในขณะที่สาเหตุบางส่วนมีความจำเป็นจะต้องได้รับการแก้ไขเพิ่มเติมเพื่อลดโอกาสความผิดพลาดในกระบวนการผลิต และความผิดพลาดในการทำงานให้ลดน้อยลง จากแนวทางการแก้ปัญหาของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน พบว่า ปัญหาที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขและจำเป็นจะต้องแก้ไอนั้น เป็นปัญหาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด ประกอบด้วย

- 1) ปัญหาการปรับความเร็วในการสกรีน

- 2) ปัญหาการปรับแรงที่ใช้ในการสกรีน
- 3) ปัญหาการกำหนดความเร็วในการแยกออกของการสกรีน
- 4) ปัญหาการกำหนดระยะทางในการแยกออกของการสกรีน
- 5) ปัญหาการเลือกใช้ขนาดของใบปาด

ความเร็วในการสกรีน แรงที่ใช้ในการสกรีน ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน และขนาดของใบปาด เป็นค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักร และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ผิดพลาดมักเกิดขึ้นกับช่างเทคนิคที่มีอายุการทำงานน้อยเนื่องจากขาดประสบการณ์ในการทำงาน ทำให้มีโอกาสใช้ค่าผิดและทำให้ผลผลิตงานเสียออกมาเนื่องจากวิธีการแก้ปัญหาของเสียในปัจจุบันยังคงใช้วิธีการลองผิด-ลองถูก ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องสกรีนในแต่ละรอบต้องอาศัยความชำนาญของช่างเทคนิคแต่ละคน ผลลัพธ์จากวิธีการดังกล่าว ทำให้การปรับแต่งเครื่องจักรเพื่อเริ่มต้นการผลิตใหม่ในแต่ละครั้งใช้เวลานานและมีค่าของพารามิเตอร์ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับประสบการณ์ทำงานของช่างเทคนิคแต่ละคน

การค้นหาคำอธิบายจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าพารามิเตอร์จากวิธีระดมความคิดส่วนใหญ่ครอบคลุมค่าพารามิเตอร์ที่นักวิจัยเลือกใช้ และบางพารามิเตอร์ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้เนื่องจากเป็นค่าที่ลูกค้ากำหนดไว้จึงไม่สามารถปรับแก้ได้ ตัวอย่างเช่น ขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรี พื้นที่เปิด ความหนา และทิศทางของแผ่นพิมพ์ ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับเปลี่ยนเองได้ ในทางกลับกันมีปัจจัยหนึ่งซึ่งนอกเหนือจากวิธีระดมความคิด คือ ปัจจัยด้านความหนืดของโลหะบัดกรี ซึ่งนักวิจัยกล่าวว่าความหนืดมีความเกี่ยวข้องกับปริมาตรของโลหะบัดกรีด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยด้านความหนืดเข้ามาเป็นปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการทดลอง

แต่เนื่องจากการวัดค่าความหนืดจำเป็นต้องมีการลงทุนเพื่อจัดซื้อเครื่องมือวัดความหนืด ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวค่อนข้างมีราคาสูง ผู้วิจัยจึงต้องเปลี่ยนวิธีการวัดค่าความหนืดโดยประมาณจากอายุการใช้งานของโลหะบัดกรีแทน เพราะจากการศึกษาคุณสมบัติของโลหะบัดกรีพบว่าโลหะบัดกรีมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว (Thixotropy) โดยโลหะบัดกรีที่เพิ่งเปิดใช้งานจะมีความค่าหนืดต่ำและเหลว หลังจากนั้นจะค่อยๆ มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากโลหะบัดกรีสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีในโลหะบัดกรีทำให้โลหะบัดกรีมีค่าความหนืดสูงขึ้น

บทที่ 4

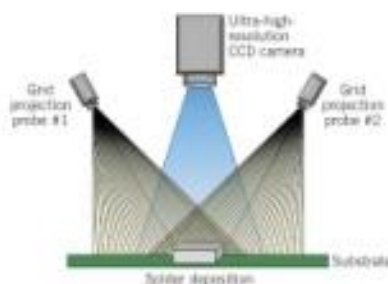
การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของเครื่องมือวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงของระบบการวัดของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีและเครื่องตรวจสอบแผงวงจร โดยจะกล่าวถึงหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องมือวัดทั้งสองชนิด วิธีดำเนินการวัด ตลอดจนผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อนำผลลัพธ์เหล่านั้นมายืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของระบบการวัดก่อนเริ่มต้นการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลและตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย เครื่องมือวัด 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีและเครื่องตรวจสอบแผงวงจร

4.1. หลักการทำงานของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรี

เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี เป็นเครื่องจักรระบบอัตโนมัติ ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่สกรินลงบนแผงวงจรที่ถูกลำเลียงมาตามสายพานการผลิต โดยการใช้ซอฟต์แวร์เปรียบเทียบระหว่างปริมาตรโลหะบัดกรีมาตรฐานกับปริมาตรที่วัดได้จริง เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Moiré phase shift image processing โดยอาศัยหลักการทำงานของการประมวลผลรูปภาพ (Image processing) ซึ่งวัดค่าปริมาตรโลหะบัดกรีจากการสะท้อนของแสงที่ส่องผ่านวัตถุใน 3 ทิศทางดังรูปที่ 4.1 และสร้างแบบจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติขึ้นมา จากนั้นซอฟต์แวร์จึงคำนวณขนาดในแต่ละพิกเซลของภาพและแสดงผลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตร



รูปที่ 4.1 การวัดค่าปริมาตรโลหะบัดกรีจากการสะท้อนของแสงที่ส่องผ่านวัตถุ

4.2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรี

(1) เครื่องมือวัด

เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีมีระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์ที่ต้องการตรวจสอบจะวิ่งผ่านสายพานการผลิตมายังเครื่องจักร ดังนั้น พนักงานฝ่ายผลิตจึงไม่จำเป็นต้องเข้ามาปฏิบัติงานยังเครื่องจักรดังกล่าว การตรวจวัดความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีจึงใช้การประเมินเฉพาะคุณสมบัติด้านความเอนเอียง (Bias) และคุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity)

เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีจะวัดโลหะบัดกรีจากช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์ แผ่นพิมพ์ของผลิตภัณฑ์รุ่น B มีความหนาเท่ากับ 5 มิล (mil) หรือ 0.005 นิ้ว (1 มิล มีค่าเท่ากับ 0.0254 มิลลิเมตร) และช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์ที่เปิดไว้สำหรับบรรจุโลหะบัดกรีมีขนาดเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดดังตารางที่ 4.1 โดยขนาดความกว้างช่องเปิดที่เล็กที่สุดคือ 11 มิล เหมาะสมกับโลหะบัดกรีประเภทที่ 4 ซึ่งมีขนาดของอนุภาคโลหะบัดกรีตั้งแต่ 0.8 - 1.5 มิล

ตารางที่ 4.1 ขนาดช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์ของผลิตภัณฑ์รุ่น B

ขนาดของช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์	ความกว้าง (หน่วย: มิล)	ความยาว (หน่วย: มิล)	ความหนา (หน่วย: มิล)	ปริมาตร (หน่วย: มิล ³)
ช่องเปิดขนาดเล็กที่สุด	11	14	5	770
ช่องเปิดขนาดใหญ่ที่สุด	80	108	5	43200

ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องจักรใช้อุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐาน (Volume Standard Jig) ที่ผ่านการสอบเทียบจากสถาบัน NIST มาใช้ในการทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีเนื่องจากสามารถสอบกลับได้และมีค่าอ้างอิงที่เป็นมาตรฐาน

(2) วิธีการวัด

ค่าของอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐานที่นำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดสอบความแม่นยำแบ่งออกเป็น 3 ขนาด โดยเรียงลำดับจากขนาดเล็กไปหาขนาดใหญ่ ดังตารางที่ 4.2 โดยนำอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐานเหล่านี้มาทำการทดลองยังเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีโดยการวัดซ้ำขนาดละ 10 ครั้ง ภายใต้ระบบการทำงานและวิธีการทดสอบเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าของอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐาน

ขนาด	S	M	L
ปริมาตรทั้งหมด (หน่วย: มิล ³)	641	1855	5846

(3) บันทึกผลการวัด ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3

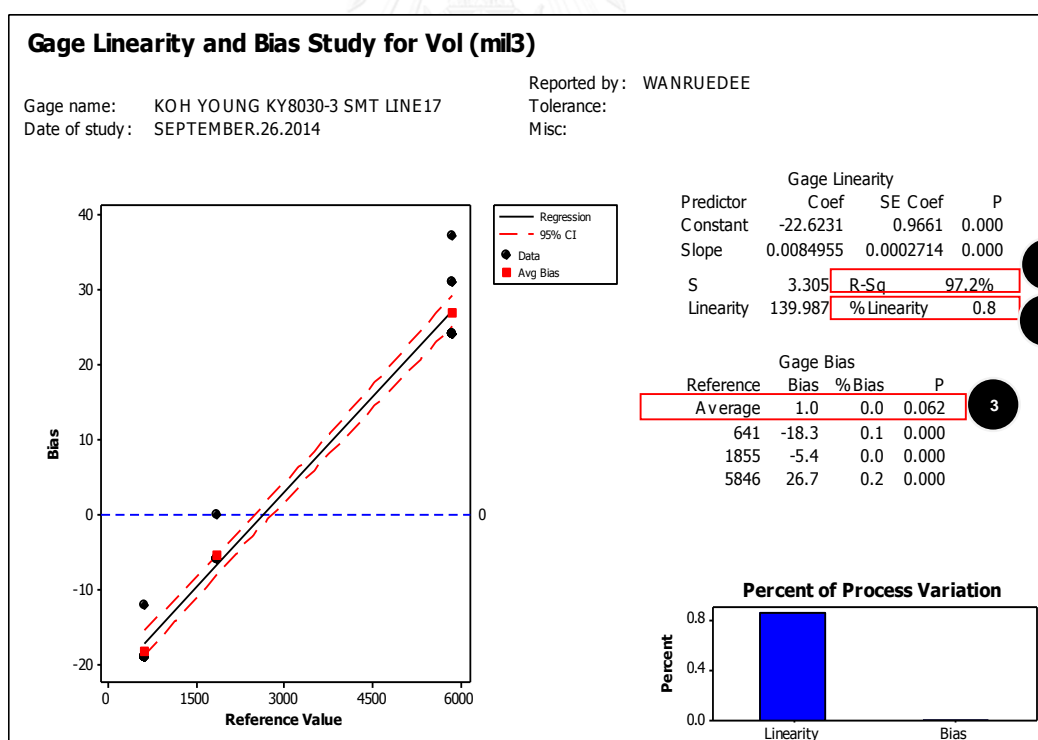
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์จากการทดสอบ

ขนาดอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐาน	ปริมาตรที่วัดได้ (มิล ³)	ค่าปริมาตรอ้างอิง (มิล ³)
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	622	641
S	629	641
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,849	1,855
M	1,855	1,855
L	5,870	5,846
L	5,870	5,846

ขนาดอุปกรณ์วัดปริมาตรมาตรฐาน	ปริมาตรที่วัดได้ (มิล ³)	ค่าปริมาตรอ้างอิง (มิล ³)
L	5,870	5,846
L	5,870	5,846
L	5,870	5,846
L	5,870	5,846
L	5,870	5,846
L	5,877	5,846
L	5,877	5,846
L	5,883	5,846

(4) การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด

เมื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์คุณสมบัติของความเอนเอียงและคุณสมบัติเชิงเส้นตรงได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้



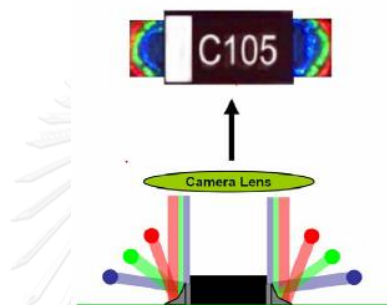
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของความเอนเอียงและคุณสมบัติเชิงเส้นตรง

จากรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของความเอนเอียงและคุณสมบัติเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

- 1) **ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ของคุณสมบัติเชิงเส้นตรง** การประเมินผลคุณสมบัติเชิงเส้นตรงจะต้องเริ่มต้นจากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบถดถอย ซึ่งการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบถดถอยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากผลการวิเคราะห์พบว่าแกนนอน (X) คือ ค่าอ้างอิง และแกนตั้ง (Y) คือ ค่าความเอนเอียง มี R^2 เท่ากับ 97.2% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าความผันแปรที่กระจายตัวอยู่ในค่าเฉลี่ยของความเอนเอียงอยู่ในรูปเชิงเส้น 97.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าค่าโดยทั่วไปที่มักกำหนดให้ R^2 มากกว่า 70% ดังนั้น เครื่องจักรนี้จึงมีผลการวัดอยู่ในรูปเชิงเส้นตรง
- 2) **เปอร์เซ็นต์เชิงเส้นตรง (%Linearity)** มาจากดัชนีเชิงเส้น (Linearity) ทหารด้วยความผันแปรของกระบวนการ ยังมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ความผันแปรของการวัดมีความสอดคล้องกันสูง [2] ดังนั้น เมื่อนำดัชนีเชิงเส้นมาหารด้วยความผันแปรของกระบวนการ พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ของความเป็นเชิงเส้นตรงเท่ากับ 0.8 ซึ่งน้อยกว่า 5% ดังนั้น จึงสรุปได้ระบบการวัดของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรีมีคุณสมบัติเชิงเส้นตรง
- 3) **เปอร์เซ็นต์ของความเอนเอียง (%Bias)** มาจากเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนระหว่างค่าความเอนเอียงและความผันแปรของกระบวนการ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องวัดปริมาตรโลหะบัดกรี พบว่า เปอร์เซ็นต์ของความเอนเอียงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0% ซึ่งน้อยกว่า 10 % และค่าความเอนเอียงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1

4.3. หลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบแผงวงจร

เครื่องตรวจสอบแผงวงจร เป็นเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติถูกออกแบบมาให้สามารถตรวจสอบคุณภาพของแผงวงจร ด้วยเทคนิคการสะท้อนของแสง 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่เรียกว่า LED lighting technology ดังรูปที่ 4.3 ผ่านการมองเห็นด้วยกล้องความละเอียดสูงในการตรวจสอบรอยเชื่อมประสานของโลหะบัดกรีที่ผิดปกติและแจ้งอาการผิดปกติให้พนักงานวัดทราบ [31] พนักงานต้องทำการตรวจสอบและตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธอาการผิดปกติ โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพแผงวงจร ที่เรียกว่า IPC-A-610 Class 3



รูปที่ 4.3 หลักการทำงานของเครื่องตรวจสอบแผงวงจรด้วยเทคนิคการสะท้อนของแสง

4.4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องตรวจสอบแผงวงจร

(1) เครื่องมือวัด

เครื่องตรวจสอบแผงวงจรมีระบบการทำงานเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ ใช้การตรวจสอบและตัดสินใจผลการตรวจสอบคุณภาพของแผงวงจรด้วยพนักงานวัด ดังนั้นก่อนการปฏิบัติงานที่เครื่องตรวจสอบแผงวงจร พนักงานวัดทุกคนจะต้องผ่านการฝึกอบรมการใช้งานเครื่องจนชำนาญและผ่านการประเมินความสามารถในระบบการวัดแบบข้อมูลนับ (Attribute Measurement System) เพื่อประเมินความสามารถในการวัดของพนักงานแต่ละคนก่อนเริ่มต้นการดำเนินการวิจัย

(2) วิธีการวัด

ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบประกอบด้วย ตัวอย่างงานดีและเสีย จำนวน 35 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นตัวอย่างงานดี 10 ตัวอย่างและตัวอย่างงานเสีย 25 ตัวอย่าง ทำการสุ่ม

เลือกพนักงานวัด 3 คนจากพนักงานประจำเครื่องตรวจสอบแผงวงจร ทำการวัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง
ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแจกแจงตัวอย่างและจำนวนคนที่ใช้ในการทดสอบ

	จำนวนตัวอย่าง (ชิ้น)	จำนวนการทำวัดซ้ำ (ครั้ง)	จำนวนพนักงาน (คน)
ตัวอย่างงานดี	10	2	3
ตัวอย่างงานเสีย	25	2	3

อาการเสียที่ต้องตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจสอบแผงวงจรมีหลายชนิด พนักงานผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องมีทักษะในการจำแนกอาการเสียออกเป็นชนิดต่างๆได้ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้การแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสามารถแก้ปัญหาได้รวดเร็วขึ้น เนื่องจากอาการเสียแต่ละชนิด จะนำไปสู่วิธีการและแนวทางการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน ดังนั้น ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบระบบการวัดแบบข้อมูลนับ จึงต้องถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแจกแจงอาการเสียของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับที่	ตำแหน่งของ ตัวอย่าง	ชนิดของตัวอย่าง	ชื่อย่อใช้เรียก แทนตัวอย่าง
1	C253	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูญหาย (Missing Component)	C01
2	R185	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูญหาย (Missing Component)	C01
3	R267	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูญหาย (Missing Component)	C01
4	R107	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขยับ (Side Overhang)	C07
5	C392	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขยับ (Side Overhang)	C07
6	R283	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขยับ (Side Overhang)	C07
7	Q3	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับขั้ว (Reverse)	C10

ลำดับที่	ตำแหน่งของตัวอย่าง	ชนิดของตัวอย่าง	ชื่อย่อใช้เรียกแทนตัวอย่าง
		Polarity)	
8	L3	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับขั้ว (Reverse Polarity)	C10
9	U24	โลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)	S06
10	U51	โลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)	S06
11	R586	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยกตั้ง (Tombstone)	C12
12	R440	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยกตั้ง (Tombstone)	C12
13	U15	ขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยกขึ้น (Lifted Up Lead)	C21
14	U21	ขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยกขึ้น (Lifted Up Lead)	C21
15	R540	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับด้าน (Upside down)	C25
16	R490	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลับด้าน (Upside down)	C25
17	R461	ไม่มีโลหะบัดกรี (No Solder)	S02
18	R136	ไม่มีโลหะบัดกรี (No Solder)	S02
19	C219	โลหะบัดกรีน้อยเกินไป (Insufficient Solder)	S04
20	R219	โลหะบัดกรีน้อยเกินไป (Insufficient Solder)	S04
21	C253	โลหะบัดกรีมากเกินไป (Excessive Solder)	S05
22	R266	โลหะบัดกรีมากเกินไป (Excessive Solder)	S05
23	U39	โลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)	S06
24	U16	โลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (Bridging Solder)	S06
25	R379	โลหะบัดกรีไม่ขึ้น (Non wetting)	S13
26	R389	งานดี (Good)	P
27	U33	งานดี (Good)	P
28	U26	งานดี (Good)	P
29	C30	งานดี (Good)	P
30	U5	งานดี (Good)	P

ลำดับที่	ตำแหน่งของตัวอย่าง	ชนิดของตัวอย่าง	ชื่อย่อใช้เรียกแทนตัวอย่าง
31	C66	งานดี (Good)	P
32	R223	งานดี (Good)	P
33	C92	งานดี (Good)	P
34	R43	งานดี (Good)	P
35	R312	งานดี (Good)	P

(3) บันทึกผลการวัด

เมื่อพนักงานวัดแต่ละคนทำการตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างโดยการสุ่มเลือกลำดับของตัวอย่างในแต่ละครั้ง ผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูลของเครื่องจักรตั้งตัวอย่างในรูปที่ 4.4 และสามารถศึกษาข้อมูลผลการวัดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก ทำายเล่ม

Sample Number	Inspector	Name	TRIAL	IDate	SN	Code	Defect Type
001	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ศ.ค.-15 10:08:54 AM	phyglo001-c253	C01	Missing Component
011	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ศ.ค.-15 10:27:36 AM	phyglo011-r586	C12	Tombstone
010	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ศ.ค.-15 10:16:00 AM	phyglo010-u51	S06	Bridging Solder
026	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ศ.ค.-15 10:20:07 AM	phyglo026-r389	P	Good
023	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ศ.ค.-15 11:36:35 AM	phyglo023-u39	S06	Bridging Solder
.
.
.
30	b10346	Seenual	Trial#2	18-ศ.ค.-15 3:20:08 PM	PHYGLO030-U5	P	Good
24	b10346	Seenual	Trial#2	18-ศ.ค.-15 3:21:03 PM	PHYGLO024-U16	S06	Bridging Solder
34	b10346	Seenual	Trial#2	18-ศ.ค.-15 3:22:05 PM	PHYGLO034-R43	P	Good
19	b10346	Seenual	Trial#2	18-ศ.ค.-15 3:22:59 PM	PHYGLO019-C219	S04	Insufficient Solder

รูปที่ 4.4 รูปแบบของตารางบันทึกผลการวัด

(4) การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ

การประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลนับแสดงดังรูปที่ 4.5

Attribute Agreement Analysis

Samples:	35	Appraisers:	3
Replicates:	2	Total runs:	210

1

Attribute Agreement Analysis for AOI

Date of study: June 12. 2015
 Reported by: Wanruedee I.
 Name of product: AOI machine
 Misc:

Within Appraisers

Assessment Agreement

Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
a31412	35	35	100.00	(91.80, 100.00)
b10346	35	35	100.00	(91.80, 100.00)
b30148	35	35	100.00	(91.80, 100.00)

2

Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.

Each Appraiser vs Standard

Assessment Agreement

Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
a31412	35	34	97.14	(85.08, 99.93)
b10346	35	35	100.00	(91.80, 100.00)
b30148	35	35	100.00	(91.80, 100.00)

3

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

Between Appraisers

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
35	34	97.14	(85.08, 99.93)

4

Matched: All appraisers' assessments agree with each other.

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement

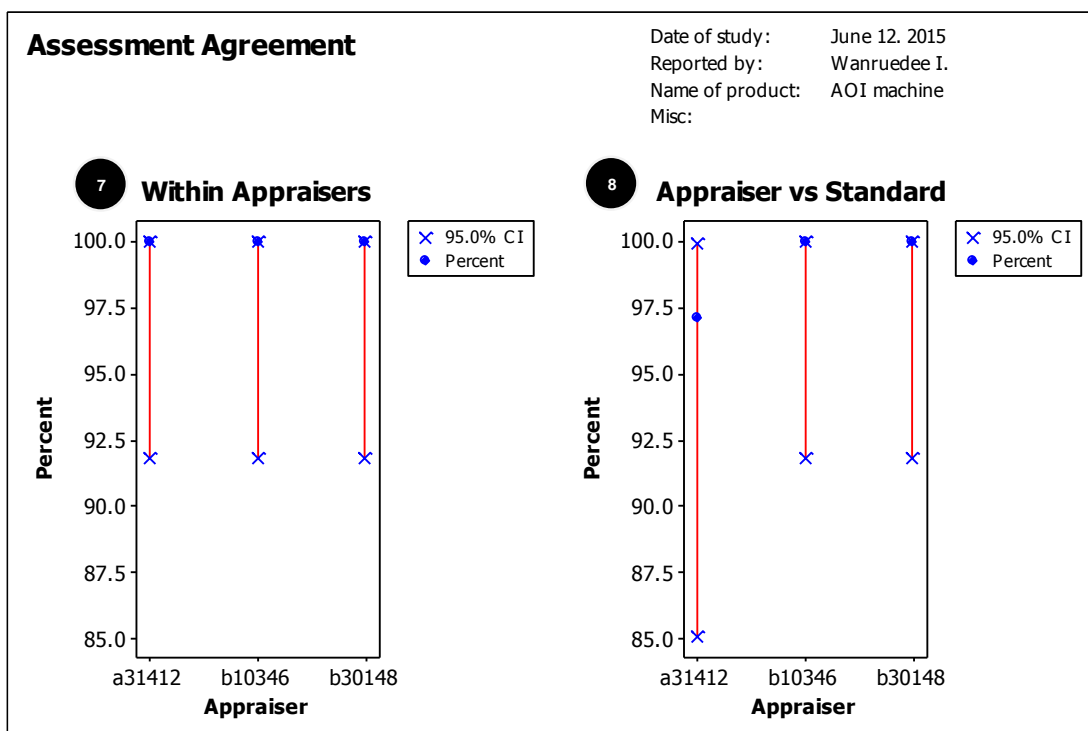
# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
35	34	97.14	(85.08, 99.93)

5

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

Summary of Assessment Disagreement with Standard

Inspector Sample	Standard	a31412		b10346		b30148	
		Count	Percent	Count	Percent	Count	Percent
001	C01	0	0.00	0	0.00	0	0.00
002	C01	0	0.00	0	0.00	0	0.00
003	C01	0	0.00	0	0.00	0	0.00
004	C07	0	0.00	0	0.00	0	0.00
005	C07	0	0.00	0	0.00	0	0.00
006	C07	0	0.00	0	0.00	0	0.00
007	C10	0	0.00	0	0.00	0	0.00
008	C10	0	0.00	0	0.00	0	0.00
009	S06	0	0.00	0	0.00	0	0.00
010	S06	0	0.00	0	0.00	0	0.00
011	C12	2	100.00	0	0.00	0	0.00
012	C12	0	0.00	0	0.00	0	0.00
013	C21	0	0.00	0	0.00	0	0.00
014	C21	0	0.00	0	0.00	0	0.00
015	C25	0	0.00	0	0.00	0	0.00
016	C25	0	0.00	0	0.00	0	0.00
017	S02	0	0.00	0	0.00	0	0.00
018	S02	0	0.00	0	0.00	0	0.00
019	S04	0	0.00	0	0.00	0	0.00
020	S04	0	0.00	0	0.00	0	0.00
021	S05	0	0.00	0	0.00	0	0.00
022	S05	0	0.00	0	0.00	0	0.00
023	S06	0	0.00	0	0.00	0	0.00
024	S06	0	0.00	0	0.00	0	0.00
025	S13	0	0.00	0	0.00	0	0.00
026	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
027	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
028	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
029	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
030	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
031	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
032	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
033	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
034	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00
035	P	0	0.00	0	0.00	0	0.00



รูปที่ 4.5 ผลการประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ
 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) การทดสอบระบบการวัดแบบข้อมูลนับ มีชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 35 ตัวอย่าง ผู้ทำการวัด 3 คน วัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง รวมการทดสอบทั้งหมด 210 ครั้ง
- 2) ผลการวิเคราะห์พนักงานแต่ละคน (Within Appraiser) พบว่าในการวัดซ้ำแต่ละครั้ง พนักงานทั้ง 3 คน ให้ผลการตรวจสอบที่เหมือนกันในทุกกรอบของการวัด ค่าเปอร์เซ็นต์การวัดซ้ำของพนักงานแต่ละคนเท่ากับ 100 ดังผลลัพธ์ในรูปที่ 4.5 กราฟหมายเลข 7
- 3) ผลการวิเคราะห์พนักงานวัดแต่ละคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (Each Appraiser vs Standard) พบว่า มีพนักงานวัด 1 คนจากจำนวนพนักงานวัดทั้งหมด 3 คน มีผลการวัดที่แตกต่างไปจากมาตรฐาน โดยพนักงานคนดังกล่าวมีผลลัพธ์ของความแม่นยำอยู่ที่ 97.14 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังผลลัพธ์ในรูปที่ 4.5 กราฟหมายเลข 8 แต่เนื่องจากพนักงานคนดังกล่าวมีความสามารถในการตัดแยกความแตกต่างระหว่างของดีและของเสียได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการวัดของพนักงานคนดังกล่าวจึงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

- 4) ผลการวิเคราะห์ระหว่างพนักงาน (Between Appraisers) พบว่า พนักงานมีความเห็นพ้องกัน 97.14 เปอร์เซ็นต์ โดยมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์จึงผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้
- 5) ผลการวิเคราะห์พนักงานวัดทุกคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (All Appraisers vs Standard) เท่ากับ 97.14 เปอร์เซ็นต์ โดยมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์จึงผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้
- 6) เมื่อพิจารณาบทสรุปการประเมินความไม่สอดคล้องเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่า ผลการตัดสินใจของพนักงานวัดคนที่ 1 ไม่สอดคล้องกับมาตรฐานของตัวอย่างลำดับที่ 11 โดยพนักงานคนดังกล่าวตัดสินใจผิดพลาดทั้งสองครั้ง

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้พนักงานคนดังกล่าวตัดสินใจผิดพลาดไปจากค่ามาตรฐาน (โดยค่ามาตรฐานคือของเสียชนิด C12 – อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตั้ง) โดยพิจารณาจากข้อมูลของตารางบันทึกผลการวัดและชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งพนักงานคนที่ 1 ตัดสินใจเลือกตัวอย่างลำดับที่ 11 เป็นของเสียชนิด C01-อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูญหาย ทั้ง 2 ครั้งของการทดสอบ เนื่องจากหากพิจารณาลักษณะของตัวอย่างการทดลองลำดับที่ 11 ไม่ละเอียดเพียงพอ ตัวอย่างดังกล่าวจะมีความใกล้เคียงกับตัวอย่างชนิด C01-อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูญหายเป็นอย่างมาก

ผู้วิจัยจึงให้พนักงานคนดังกล่าวตรวจสอบอีกครั้งโดยให้ตรวจสอบทั้งภาพจากหน้าจอคอมพิวเตอร์และตรวจสอบจากแผงวงจรจริงด้วย พบว่า พนักงานสามารถบอกอาการเสียได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้ปรึกษากับส่วนงานฝึกอบรมให้ส่วนงานฝึกอบรมเข้ามาอบรมพนักงานเพิ่มเติมถึงวิธีการทำงานโดยจะต้องให้พนักงานหยิบงานจริงที่น่าสงสัยมาตรวจดูด้วยกล้องส่องขยาย (Magnifier) เพิ่มเติมนอกเหนือจากการตรวจสอบงานผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งในการวัดแต่ละครั้งนอกจากผู้ทำการวัดจะต้องมีประสบการณ์ในการปฏิบัติงานอย่างเพียงพอแล้ว ความละเอียดและความรอบคอบในการตัดสินใจก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเช่นกัน

สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของการประเมินความสามารถของระบบการวัดด้วยข้อมูลนับ โดยพนักงานวัดทั้ง 3 คนผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด ดังตาราง

ที่ 4.6 ดังนั้น พนักงานดังกล่าวจึงมีความสามารถในการยืนยันความถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอในการยอมรับผลการตัดสินใจเลือกของเสียที่จะเกิดขึ้นกับแผงวงจร

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลนับเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้

หลักเกณฑ์การประเมินความสามารถของระบบการวัดด้วยข้อมูลนับ	เกณฑ์ที่ยอมรับได้	ผลการประเมินความสามารถของระบบการวัดของพนักงานแต่ละคน		
		คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3
พนักงานแต่ละคน (Within Appraiser)	มากกว่า 95%	100%	100%	100%
พนักงานวัดแต่ละคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (Each Appraiser vs Standard)	มากกว่า 95%	97%	100%	100%
ระหว่างพนักงาน (Between Appraisers)	มากกว่า 95%	97 %		
พนักงานวัดทุกคนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (All Appraisers vs Standard)	มากกว่า 95%	97%		

บทที่ 5

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำปัจจัยจากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าที่มีอิทธิพลต่อค่าป้อนออกของกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีทั้งแผงวงจรด้านล่างและด้านบน ด้วยวิธีการทางสถิติ และนำปัจจัยเหล่านั้นมาทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์

5.1. การคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปปัจจัยนำเข้าได้ 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะนำมาใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าป้อนออกด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยนำเข้า 6 ปัจจัย

ลำดับที่	ปัจจัย
1	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน
2	แรงที่ใช้ในการสกรีน
3	ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน
4	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน
5	ขนาดของใบปาด
6	อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี

5.2. แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

ด้วยจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีมากถึง 6 ปัจจัย และต้องทำการทดลองบนแผงวงจรทั้งด้านล่างและด้านบน หากใช้แผนการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และทำซ้ำ 2 ครั้งต่อ 1 การทดลอง จะทำให้ต้องทำการทดลองมากถึง 128 ครั้ง และต้องใช้เวลาในการทดลองแต่ละประมาณ 20 ชั่วโมงรวมเวลาทั้งสิ้น 40 ชั่วโมง ซึ่งไม่สามารถ

นำมาใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้ เนื่องจากต้องหยุดสายการผลิตเพื่อทำการทดลองยาวนานเกินไป ส่งผลกระทบต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ออกไปจำหน่ายได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงต้องเปลี่ยนแผนการออกแบบทดลองใหม่เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-p} แฟคทอเรียลบางส่วน โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดจำนวนครั้งและเวลาในการทดลองลง โดยจะเลือกใช้แผนการทดลองดังกล่าวในการคัดกรองว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลมากที่สุดและคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป

5.2.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน แบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระดับของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	หน่วยวัด	ระดับต่ำ	ระดับสูง
A	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน	มิลลิเมตร/วินาที	20	100
B	แรงที่ใช้ในการสกรีน	กิโลกรัม	3	10
C	ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน	มิลลิเมตร/วินาที	1	5
D	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน	มิลลิเมตร	0	3
E	ขนาดของใบปาด	มิลลิเมตร	300	350
F	อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี	ชั่วโมง	1	8

ปัจจัยที่เลือกมาทั้ง 6 ปัจจัยแบ่งระดับของการทดลองเป็น 2 ระดับ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละปัจจัยเป็นดังต่อไปนี้

- (A) ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน คือ อัตราการเคลื่อนที่ของใบปาดจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่ง เพื่อปาดโลหะบัดกรีให้ลงไปตามช่องเปิดของโลหะบัดกรี ความเร็ว

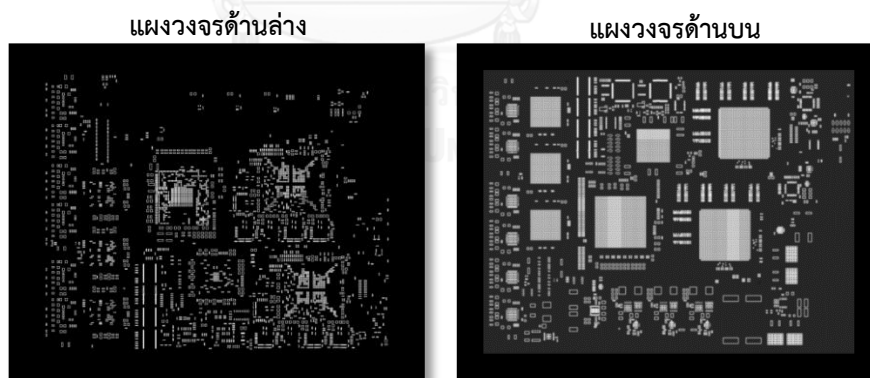
ในการปาดมีผลต่อปริมาณของโลหะบัดกรีที่จะเคลื่อนที่ลงไปในช่วงเปิดของแผ่นพิมพ์ โดยความเร็วของเครื่องจักรของโรงงานกรณีศึกษาที่จะทำการทดสอบอยู่ที่ต่ำสุดคือ 20 มิลลิเมตร/วินาที และสูงสุดอยู่ที่ 100 มิลลิเมตร/วินาที

- (B) แรงที่ใช้ในการสกรีน เป็นแรงที่กระบอกสูบถ่ายลงบนใบปาด เพื่อให้ใบปาดกดโลหะบัดกรีแนบไปกับแผ่นพิมพ์ แรงที่ใบปาดกดลงไปเพื่อปาดโลหะบัดกรีที่สูงจะทำให้โลหะบัดกรีที่สกรีนออกมาโดนขูดออกและมีปริมาตรของโลหะบัดกรีไม่เต็มช่องเปิดของแผ่นพิมพ์ ในทางกลับกันหากใช้แรงในการกดเพื่อปาดโลหะบัดกรีน้อยก็จะให้โลหะบัดกรีไม่ได้อยู่รูปทรง การเลือกระดับของแรงที่ใช้ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้เลือกจากค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้
- (C) ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน คือ ความเร็วในการยกตัวลงของแท่งประกอบแผงวงจรเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการสกรีน ความเร็วในการยกตัวลงของแท่งประกอบแผงวงจรที่เร็วเกินไปจะทำให้โลหะบัดกรีเกิดการสันสะเทือนและโลหะบัดกรีล้นเชื่อมติดกับบริเวณใกล้เคียงได้ ซึ่งค่าความเร็วต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้อยู่ที่ 1 และ 5 มิลลิเมตร/วินาที
- (D) ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน คือ ระยะทางที่ใบปาดเคลื่อนที่เลยออกไปจากความยาวทั้งหมดของแผงวงจร เพื่อให้การสกรีนโลหะบัดกรีสกรีนมีปริมาตรโลหะบัดกรีเต็มพื้นที่ความกว้างของแผงวงจร ค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้อยู่ที่ 0 และ 3 มิลลิเมตร
- (E) ขนาดของใบปาด ความยาวของใบปาดที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การกระจายแรงที่เครื่องสกรีนส่งลงบนใบปาดแตกต่างกัน ใบปาดที่ยาวกว่าจะทำให้แรงกดที่ใช้ในการสกรีนน้อยกว่าใบปาดที่มีขนาดสั้นกว่า

(F) อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี อายุการใช้งานของโลหะบัดกรีมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของโลหะบัดกรี เนื่องจากโลหะบัดกรีมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว (Thixotropy) โลหะบัดกรีใหม่จะมีความหนืดต่ำกว่าโลหะบัดกรีที่เปิดใช้งานเป็นระยะเวลาเวลานาน เนื่องจากโลหะบัดกรีที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นเวลานานจะมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองจึงใช้อายุการใช้งานของโลหะบัดกรีต่ำที่สุดเท่ากับ 1 ชั่วโมงเพราะคุณสมบัติของโลหะบัดกรีอยู่ในสภาวะมีค่าความหนืดต่ำที่สุด และเลือกใช้โลหะบัดกรีที่ผ่านการใช้งานมาแล้วสูงสุดเท่ากับ 8 ชั่วโมงมีค่าความหนืดสูงขึ้น

5.2.2. ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรี แต่เนื่องจากการทดลองใช้การตรวจวัดในทุกตำแหน่งของการสกรีนบนแผงวงจร โดยแผงวงจรด้านล่างมีตำแหน่งที่ต้องสกรีนโลหะบัดกรีลงไปทั้งหมด 2,324 ตำแหน่ง และแผงวงจรด้านบนมีตำแหน่งที่ต้องสกรีนโลหะบัดกรีลงไปทั้งหมด 4,648 ตำแหน่ง จากตัวอย่างในรูปที่ 5.1 พื้นที่เปิดสีขาว คือ ตำแหน่งช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์ที่จะต้องสกรีนโลหะบัดกรีลงไป



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งช่องเปิดบนแผ่นพิมพ์

ด้วยการตรวจวัดในทุกตำแหน่งของการสกรีนบนแผงวงจร ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุมจึงประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีเฉลี่ยบนแผงวงจร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีเพื่อตรวจวัดการกระจายตัวของแต่ละจุดที่แตกต่างกัน ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุมแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	หน่วยวัด	ค่าเป้าหมาย
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่าง	%Volume	100
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน	%Volume	100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านล่าง	%Volume	ใกล้เคียง 0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน	%Volume	ใกล้เคียง 0

5.2.3. การออกแบบการทดลอง

การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนจะมีหนึ่งหรือสองปัจจัยร่วมกันอยู่ในการออกแบบการทดลอง จึงต้องเลือกปฏิสัมพันธ์ร่วม (Resolution) เพื่อให้สามารถได้ความสัมพันธ์ของโครงสร้างแฝง (Alias Structure) ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการเลือกปฏิสัมพันธ์ร่วมโดยเลือกลำดับที่ต่ำเกินไปจะมีความเสี่ยงทำให้การคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดได้มากขึ้น อันเนื่องจากผลกระทบหลักบางตัวไปแฝงอยู่ในผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย [3]

การเลือกใช้ปฏิสัมพันธ์ร่วมของแผนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนของ 6 ปัจจัย ใช้การประเมินจากความเสี่ยงในการคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดจากรูปที่ 5.2 และคำนึงถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง เพื่อให้การทดลองส่งผลกระทบต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปจำหน่ายน้อยที่สุด จากการประเมินพบว่า

- หากใช้ปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ VI ซึ่งมีความเสี่ยงในคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดน้อยที่สุด และทำซ้ำ 2 ครั้งต่อ 1 การทดลอง ต้องใช้การทดลอง 64 ครั้ง แต่จะต้องใช้เวลาในทดลองด้านละประมาณ 10 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งสิ้น 20 ชั่วโมง
- หากใช้ปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ IV มีความเสี่ยงในคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดปานกลาง ทำซ้ำ 2 ครั้งต่อ 1 การทดลอง จะต้องใช้การทดลอง 32 ครั้ง และต้องใช้เวลาในทดลองด้านละประมาณ 5 ชั่วโมงรวมเวลาทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง

- และหากใช้ปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ III มีความเสี่ยงในคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดมากที่สุด ทำซ้ำ 2 ครั้งต่อ 1 การทดลอง จะต้องใช้การทดลอง 16 ครั้ง และต้องใช้เวลาในการทดลอง ด้านละประมาณ 3 ชั่วโมงรวมเวลาทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง

เมื่อประเมินจากความเสี่ยงในการคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาด และระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ลำดับของปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ IV หรือการออกแบบแบบ 1/4 แฟคทอเรียลบางส่วน มีจำนวนในการทดลอง 16 ครั้งและทำซ้ำจำนวน 2 ครั้ง และใช้เวลาในการทดลองด้านละประมาณ 5 ชั่วโมงรวมเวลาทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง

Available Factorial Designs (with Resolution)														
	Factors													
Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Available Resolution III Plackett-Burman Designs					
Factors	Runs	Factors	Runs	Factors	Runs
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

รูปที่ 5.2 ปฏิสัมพันธ์ร่วมกับความเสี่ยงในการคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน

และสามารถอธิบายการออกแบบการทดลองแบบ 2^{6-2} แฟคทอเรียลบางส่วน ได้ดังต่อไปนี้

Fractional Factorial Design

Factors:	6	Base Design:	6, 16	Resolution:	IV
Runs:	32	Replicates:	2	Fraction:	1/4
Blocks:	1	Center pts (total):	0		

1

Design Generators:	E = ABC, F = BCD
--------------------	------------------

2

Defining Relation: $I = ABCE = BCDF = ADEF$

Alias Structure

$I + ABCE + ADEF + BCDF$

$A + BCE + DEF + ABCDF$
 $B + ACE + CDF + ABDEF$
 $C + ABE + BDF + ACDEF$
 $D + AEF + BCF + ABCDE$
 $E + ABC + ADF + BCDEF$
 $F + ADE + BCD + ABCEF$
 $AB + CE + ACDF + BDEF$
 $AC + BE + ABDF + CDEF$
 $AD + EF + ABCF + BCDE$
 $AE + BC + DF + ABCDEF$
 $AF + DE + ABCD + BCEF$
 $BD + CF + ABEF + ACDE$
 $BF + CD + ABDE + ACEF$
 $ABD + ACF + BEF + CDE$
 $ABF + ACD + BDE + CEF$

Design Table (randomized)

Run	A	B	C	D	E	F
1	-	-	-	+	-	+
2	-	-	-	-	-	-
3	-	+	+	+	-	+
4	-	-	+	-	+	+
5	-	+	-	-	+	+
6	-	+	-	+	+	-
7	+	+	+	-	+	-
8	+	-	+	-	-	+
9	+	-	+	-	-	+
10	+	+	-	+	-	-
11	+	-	-	-	+	-
12	+	+	+	+	+	+
13	-	+	-	-	+	+
14	-	-	+	+	+	-
15	-	-	-	-	-	-
16	-	+	-	+	+	-
17	+	-	+	+	-	-
18	+	-	-	+	+	+
19	+	+	-	-	-	+
20	-	+	+	-	-	-
21	+	-	-	-	+	-
22	-	+	+	-	-	-
23	+	+	+	-	+	-
24	+	-	+	+	-	-
25	+	+	+	+	+	+
26	+	+	-	+	-	-
27	+	+	-	-	-	+
28	+	-	-	+	+	+
29	-	+	+	+	-	+
30	-	-	+	-	+	+
31	-	-	+	+	+	-
32	-	-	-	+	-	+

- (1) รูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน ประกอบด้วย ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 6 ปัจจัย รูปแบบของปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ IV ทำการทดลองทั้งหมด 32 ครั้ง โดยทำซ้ำ 2 ครั้ง และรูปแบบการออกแบบการทดลองแบบ $\frac{1}{4}$ แฟคทอเรียลบางส่วน
- (2) การออกแบบการทดลองดังกล่าวมีรูปแบบของ Design Generators คือ $E = ABC$ และ $F = BCD$ โดยปัจจัย E จะแฝง (Confound) อยู่กับผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยแบบสามทาง ABC และปัจจัย F จะแฝงอยู่กับผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยแบบสามทาง BCD ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าหากผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีลำดับสูงเกินกว่า 3 ลำดับสามารถละเว้นได้เพราะจะมีความสำคัญน้อยลง จึงเลือกพิจารณาเฉพาะผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีอันดับต่ำๆ
- (3) แสดง Defining Relation คือ $I = ABCE = BCDF = ADEF$ และแสดงรูปแบบโครงสร้างแฝง (Alias Structure) ของปัจจัย A B C D E และ F
- (4) ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Table) ของปัจจัยแต่ละตัว โดยเครื่องหมาย - บอกระดับของปัจจัยที่มีค่าต่ำ เครื่องหมาย + บอกระดับของปัจจัยที่มีค่าสูง

เพื่อให้ข้อมูลที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกันและเป็นการกระจายโอกาสของความผันแปรที่ได้รับจากปัจจัยภายนอก [3] การออกแบบการทดลองแบบ 2^{6-2} แฟคทอเรียลบางส่วนจึงต้องทำการสุ่มลำดับการทดลอง โดยลำดับการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.4

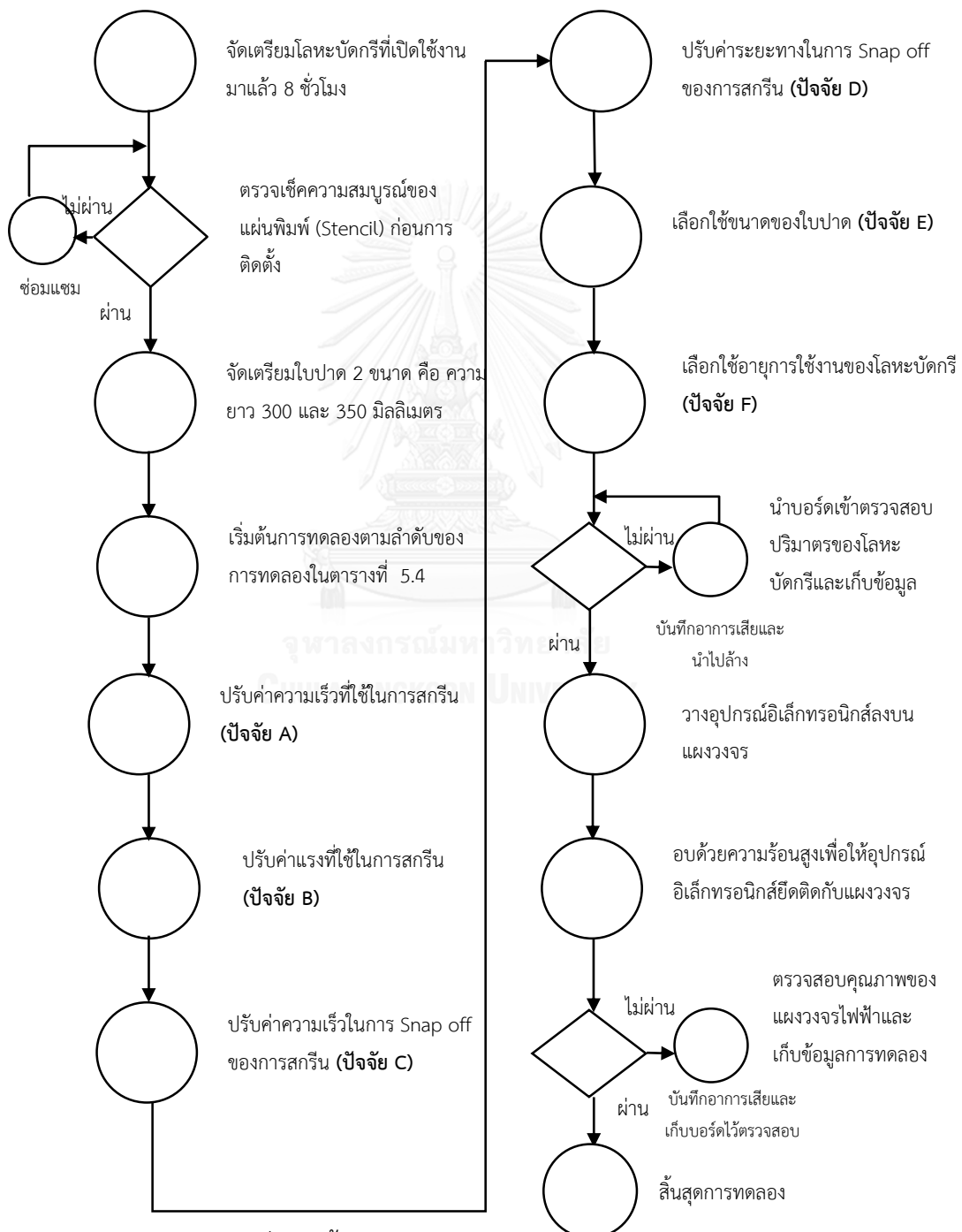
ตารางที่ 5.4 ลำดับของการทดลองที่ได้จากการสุ่มลำดับ

ลำดับของการทดลอง	การทดลองครั้งที่	ปัจจัย					
		A	B	C	D	E	F
25	1	20	3	1	3	300	8
17	2	20	3	1	0	300	1
15	3	20	10	5	3	300	8
5	4	20	3	5	0	350	8

ลำดับของการทดลอง	การทดลองครั้งที่	ปัจจัย					
		A	B	C	D	E	F
3	5	20	10	1	0	350	8
27	6	20	10	1	3	350	1
24	7	100	10	5	0	350	1
6	8	100	3	5	0	300	8
22	9	100	3	5	0	300	8
28	10	100	10	1	3	300	1
18	11	100	3	1	0	350	1
32	12	100	10	5	3	350	8
19	13	20	10	1	0	350	8
13	14	20	3	5	3	350	1
1	15	20	3	1	0	300	1
11	16	20	10	1	3	350	1
14	17	100	3	5	3	300	1
26	18	100	3	1	3	350	8
20	19	100	10	1	0	300	8
23	20	20	10	5	0	300	1
2	21	100	3	1	0	350	1
7	22	20	10	5	0	300	1
8	23	100	10	5	0	350	1
30	24	100	3	5	3	300	1
16	25	100	10	5	3	350	8
12	26	100	10	1	3	300	1
4	27	100	10	1	0	300	8
10	28	100	3	1	3	350	8
31	29	20	10	5	3	300	8
21	30	20	3	5	0	350	8
29	31	20	3	5	3	350	1
9	32	20	3	1	3	300	8

5.2.4. ขั้นตอนการทดลอง

แบ่งการทดลองเป็น 2 ครั้ง คือ การทดลองกับแผงวงจรด้านล่าง และการทดลองกับแผงวงจรด้านบน ทั้งสองการทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 40-80 %RH ขั้นตอนการทดลองและการเก็บผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บผลการทดลอง

5.2.5. การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองของแผนวงจรถ้าด้านล่าง

เพื่อปรับปรุงคุณภาพของการผลิตแผนวงจรถ้า มีตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม 2 ค่า คือ ต้องการให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีเข้าใกล้ 100 % และลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีให้มีการกระจายตัวน้อยที่สุด ผลการทดลองของแผนวงจรถ้าด้านล่างแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองของแผนวงจรถ้าด้านล่าง

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า							ผลตอบสนอง	
	ลำดับการทดลอง	ปัจจัย						ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (แผนวงจรถ้าด้านล่าง)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (แผนวงจรถ้าด้านล่าง)
		A	B	C	D	E	F		
1	25	20	3	1	3	300	8	103.50	8.12
2	17	20	3	1	0	300	1	113.79	9.66
3	15	20	10	5	3	300	8	99.84	8.36
4	5	20	3	5	0	350	8	96.25	7.15
5	3	20	10	1	0	350	8	99.57	8.26
6	27	20	10	1	3	350	1	113.41	9.58
7	24	100	10	5	0	350	1	119.07	11.71
8	6	100	3	5	0	300	8	96.83	8.07
9	22	100	3	5	0	300	8	91.09	6.82
10	28	100	10	1	3	300	1	101.25	8.50
11	18	100	3	1	0	350	1	115.74	11.13
12	32	100	10	5	3	350	8	110.63	10.04
13	19	20	10	1	0	350	8	93.81	8.97
14	13	20	3	5	3	350	1	96.82	7.17
15	1	20	3	1	0	300	1	99.18	8.29
16	11	20	10	1	3	350	1	115.38	10.03
17	14	100	3	5	3	300	1	111.55	11.99

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า							ผลตอบสนอง	
	ลำดับการทดลอง	ปัจจัย						ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณ (แผงวงจรด้านล่าง)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (แผงวงจรด้านล่าง)
		A	B	C	D	E	F		
18	26	100	3	1	3	350	8	119.41	13.82
19	20	100	10	1	0	300	8	101.67	8.01
20	23	20	10	5	0	300	1	100.00	9.14
21	2	100	3	1	0	350	1	105.80	9.05
22	7	20	10	5	0	300	1	97.49	8.38
23	8	100	10	5	0	350	1	104.92	9.14
24	30	100	3	5	3	300	1	112.95	9.78
25	16	100	10	5	3	350	8	65.28	11.18
26	12	100	10	1	3	300	1	113.12	9.66
27	4	100	10	1	0	300	8	127.62	15.25
28	10	100	3	1	3	350	8	114.86	10.09
29	31	20	10	5	3	300	8	89.79	7.63
30	21	20	3	5	0	350	8	117.96	11.90
31	29	20	3	5	3	350	1	113.14	10.95
32	9	20	3	1	3	300	8	100.83	8.79

ผลการวิเคราะห์ของแผงวงจรด้านล่างเป็นดังต่อไปนี้

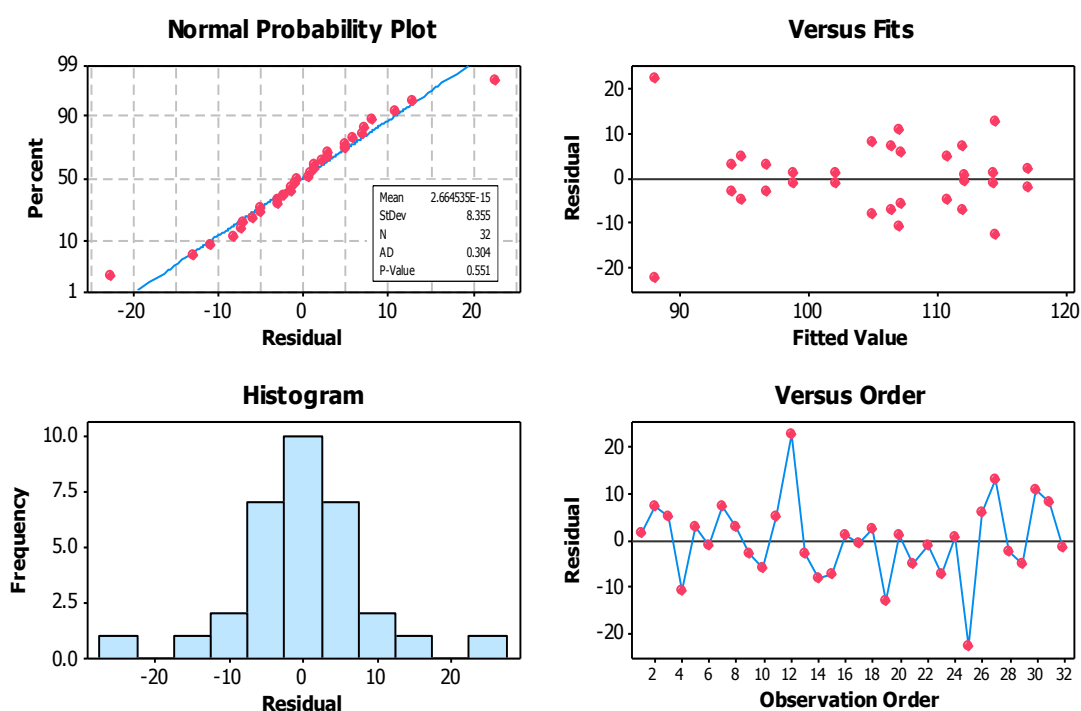
(1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง)

เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

- 1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- 2) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values)
- 3) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)

Residual Plots for %Volume_BTM



รูปที่ 5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง

จากการพิจารณารูปที่ 5.4 กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value ของส่วนตกค้างเท่ากับ 0.551 ซึ่งมีความมากกว่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

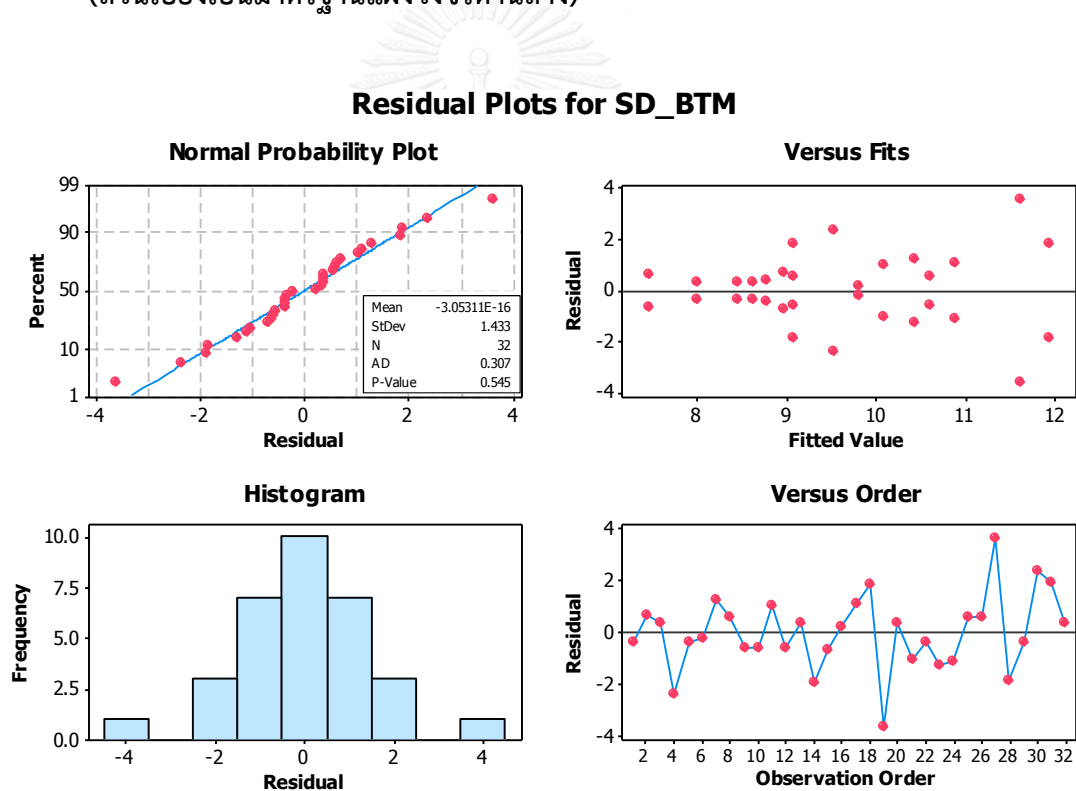
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Residuals Versus Fitted Values) เป็นการตรวจสอบความมีเสถียรภาพในด้านความแปรปรวน จากกราฟลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบการกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างมีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งศูนย์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา (Residuals in Time Sequence) ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

ดังนั้นข้อมูลที่มาจากการทดลองจึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนได้

(2) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง)



รูปที่ 5.5 แบบจำลองของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง

จากการพิจารณารูปที่ 5.5 กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value ของส่วนตกค้างเท่ากับ 0.545 มีค่ามากกว่าค่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Residuals Versus Fitted Values) ซึ่งเป็นการตรวจสอบความมีเสถียรภาพในด้านความแปรปรวน จากกราฟพบว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่มไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างมีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งศูนย์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา (Residuals in Time Sequence) ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนได้

(3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

(ค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง)

ผลการทดลองจากตารางบันทึกผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด และคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป

ตารางที่ 5.6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง

Factor	Name	Low	High
A	Speed	20	100
B	Pressure	3	10
C	Snap-off Speed	1	5
D	Snap-off Pressure	0	3
E	Squeegee	300	350
F	Useful life	1	8

Estimated Effects and Coefficients for %Volume_BTM (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P

Constant		105.079	2.056	51.11	0
A	3.813	1.907	2.056	0.93	0.367
B	-3.553	-1.777	2.056	-0.86	0.4
C	-7.206	-3.603	2.056	-1.75	0.099
D	0.06	0.03	2.056	0.01	0.989
E	2.598	1.299	2.056	0.63	0.536
F	-6.54	-3.27	2.056	-1.59	0.131
A*B	0.47	0.235	2.056	0.11	0.91
A*C	-3.684	-1.842	2.056	-0.9	0.384
A*D	-1.773	-0.886	2.056	-0.43	0.672
A*E	-2.643	-1.322	2.056	-0.64	0.529
A*F	-0.584	-0.292	2.056	-0.14	0.889
B*D	-4.49	-2.245	2.056	-1.09	0.291
B*F	-3.013	-1.506	2.056	-0.73	0.474
A*B*D	-9.547	-4.774	2.056	-2.32	0.034
A*B*F	1.848	0.924	2.056	0.45	0.659

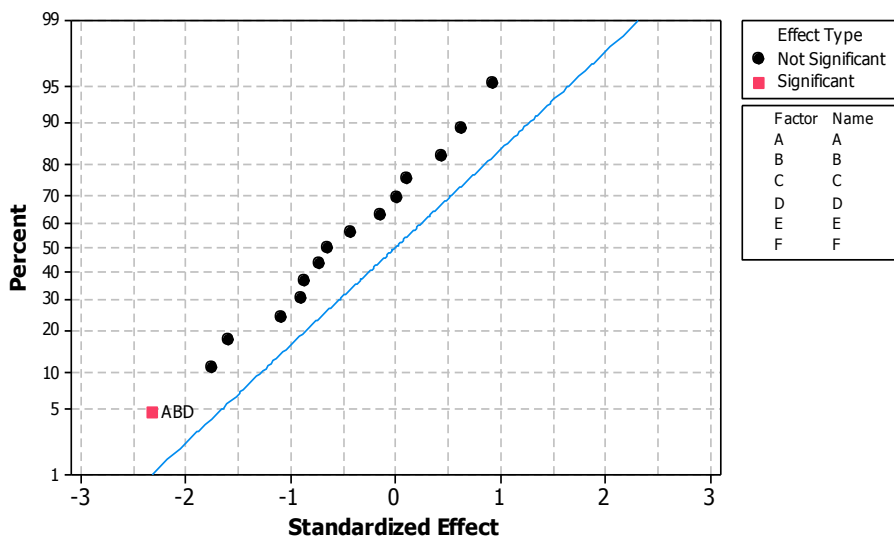
Analysis of Variance for %Volume_BTM (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	1028.99	1028.99	171.498	1.27	0.326
A	1	116.33	116.33	116.333	0.86	0.367
B	1	101.02	101.02	101.015	0.75	0.4
C	1	415.4	415.4	415.404	3.07	0.099
D	1	0.03	0.03	0.029	0	0.989
E	1	53.99	53.99	53.992	0.4	0.536
F	1	342.21	342.21	342.212	2.53	0.131
2-Way Interactions	7	428.03	428.03	61.147	0.45	0.855
A*B	1	1.77	1.77	1.77	0.01	0.91
A*C	1	108.58	108.58	108.578	0.8	0.384
A*D	1	25.14	25.14	25.138	0.19	0.672

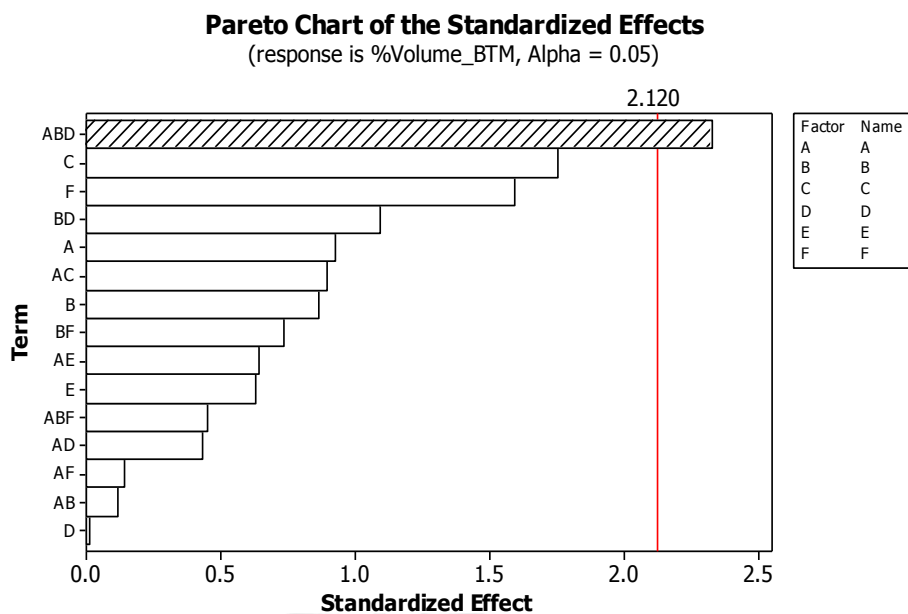
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A*E	1	55.89	55.89	55.893	0.41	0.529
A*F	1	2.73	2.73	2.726	0.02	0.889
B*D	1	161.31	161.31	161.311	1.19	0.291
B*F	1	72.61	72.61	72.615	0.54	0.474
3-Way Interactions	2	756.48	756.48	378.242	2.8	0.091
A*B*D	1	729.17	729.17	729.167	5.39	0.034
A*B*F	1	27.32	27.32	27.316	0.2	0.659
Residual Error	16	2163.8	2163.8	135.237		
Pure Error	16	2163.8	2163.8	135.237		
Total	31	4377.3				

Normal Plot of the Standardized Effects

(response is %Volume_BTM, Alpha = 0.05)



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง



รูปที่ 5.7 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05 พบว่า ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่างที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของปัจจัยทั้ง 15 ปัจจัยในตารางที่ 5.6 และกราฟ Normal effects plot ในรูปที่ 5.6 นั้น ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 2 ทาง (2-Way Interactions) และผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) พบว่า ไม่มีผลกระทบหลักของปัจจัยใดส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ

แต่เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 3 ทาง (3-Way Interactions) พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย $A*B*D$ มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 สรุปได้ว่า ผลกระทบร่วม $A*B*D$ ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ

และเมื่อนำค่าสัมบูรณ์ของตัวสถิติ T (T-statistic) ไปพล็อตด้วยแผนภูมิพาเรโตในรูปที่ 5.7 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย $A*B*D$ มีค่าสัมบูรณ์เท่ากับ 2.32 มากกว่าค่าวิกฤตของการกระจายตัวแบบ T คือ 2.12 จึงสรุปได้ว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย $A*B*D$ ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย $A*B*D$ ได้แก่

ปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน

ปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน และ

ปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน

ทั้ง 3 ปัจจัย จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการหาพื้นผิวสะท้อน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมแก่ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแผงวงจรด้านล่างต่อไป

(4) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง)

เพื่อลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีให้มีการกระจายตัวน้อยที่สุด ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จึงถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป

ตารางที่ 5.7 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง

Factor	Name	Low	High
A	Speed	20	100
B	Pressure	3	10
C	Snap-off Speed	1	5
D	Snap-off Pressure	0	3
E	Squeegee	300	350
F	Useful life	1	8

Estimated Effects and Coefficients for SD_BTM (coded units)

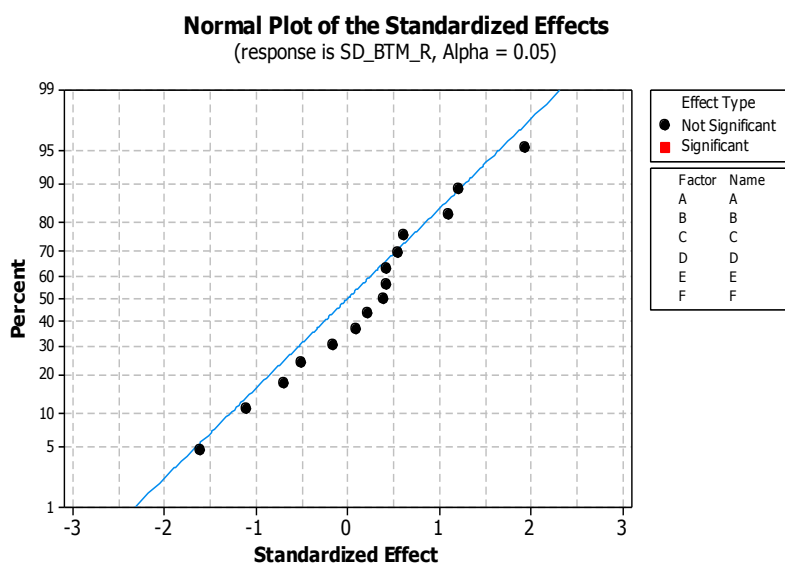
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		9.582	0.3525	27.18	0
A	1.3659	0.683	0.3525	1.94	0.071
B	0.0662	0.0331	0.3525	0.09	0.926
C	-0.4866	-0.2433	0.3525	-0.69	0.5
D	0.2971	0.1486	0.3525	0.42	0.679
E	0.8588	0.4294	0.3525	1.22	0.241

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
F	-0.1093	-0.0547	0.3525	-0.16	0.879
A*B	0.2765	0.1382	0.3525	0.39	0.7
A*C	-0.3608	-0.1804	0.3525	-0.51	0.616
A*D	0.437	0.2185	0.3525	0.62	0.544
A*E	0.1523	0.0762	0.3525	0.22	0.832
A*F	0.395	0.1975	0.3525	0.56	0.583
B*D	-0.7835	-0.3917	0.3525	-1.11	0.283
B*F	0.3015	0.1507	0.3525	0.43	0.675
A*B*D	-1.1349	-0.5675	0.3525	-1.61	0.127
A*B*F	0.7773	0.3887	0.3525	1.1	0.287

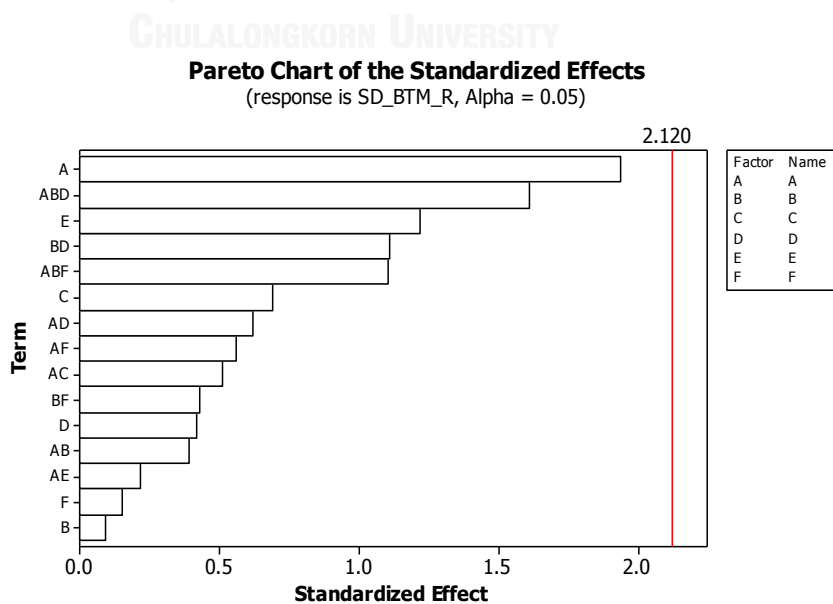
Analysis of Variance for SD_BTM (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	23.558	23.5579	3.9263	0.99	0.466
A	1	14.926	14.9263	14.9263	3.75	0.071
B	1	0.035	0.0351	0.0351	0.01	0.926
C	1	1.894	1.8942	1.8942	0.48	0.5
D	1	0.706	0.7063	0.7063	0.18	0.679
E	1	5.9	5.9005	5.9005	1.48	0.241
F	1	0.096	0.0956	0.0956	0.02	0.879
2-Way Interactions	7	10.251	10.2515	1.4645	0.37	0.908
A*B	1	0.612	0.6116	0.6116	0.15	0.7
A*C	1	1.041	1.0413	1.0413	0.26	0.616
A*D	1	1.528	1.5277	1.5277	0.38	0.544
A*E	1	0.186	0.1856	0.1856	0.05	0.832
A*F	1	1.248	1.248	1.248	0.31	0.583
B*D	1	4.91	4.9104	4.9104	1.23	0.283
B*F	1	0.727	0.727	0.727	0.18	0.675
3-Way Interactions	2	15.138	15.1379	7.569	1.9	0.181

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A*B*D	1	10.304	10.3042	10.3042	2.59	0.127
A*B*F	1	4.834	4.8337	4.8337	1.22	0.287
Residual Error	16	63.635	63.6348	3.9772		
Pure Error	16	63.635	63.6348	3.9772		
Total	31	112.582				



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง



รูปที่ 5.9 แผนภูมิพารेटโตของปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่าง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05 ในตารางที่ 5.7 แสดงกราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านล่างในรูปที่ 5.8 และนำค่าสัมบูรณ์ของตัวสถิติ T (T-statistic) ไปพล็อตด้วยแผนภูมิพาเรโตในรูปที่ 5.9 พบว่า

เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 2 ทาง (2-Way Interactions) ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 3 ทาง (3-Way Interactions) และผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) พบว่า ไม่มีปัจจัยใดมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลกระทบต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ

5.2.6. การวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองของแผงวงจรด้านบน

เพื่อปรับปรุงคุณภาพของการผลิตแผงวงจรด้านบน มีตัวแปรตอบสนอง 2 ค่าที่ต้องการควบคุม คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีต้องเข้าใกล้ 100 % เพื่อลดโอกาสการผลิตงานที่อยู่นอกเหนือขีดจำกัดข้อกำหนดและผลิตงานเสียออกมา นอกจากนี้ยังต้องลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีให้มีการกระจายตัวน้อยที่สุดเพราะการกระจายตัวที่น้อยที่สุดแสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกัน ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบนแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบน

ปัจจัยนำเข้า							ผลตอบสนอง	
ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย						ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร (แผงวงจร ด้านบน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (แผงวงจร ด้านบน)
	A	B	C	D	E	F		
25	20	3	1	3	300	8	106.92	9.81
17	20	3	1	0	300	1	124.41	12.66
15	20	10	5	3	300	8	102.05	8.19

ปัจจัยนำเข้า							ผลตอบสนอง	
ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย						ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ (แผงวงจร ด้านบน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (แผงวงจร ด้านบน)
	A	B	C	D	E	F		
5	20	3	5	0	350	8	110.16	11.11
3	20	10	1	0	350	8	105.53	9.51
27	20	10	1	3	350	1	107.22	9.57
24	100	10	5	0	350	1	111.62	10.93
6	100	3	5	0	300	8	133.53	16.09
22	100	3	5	0	300	8	126.45	14.45
28	100	10	1	3	300	1	106.43	7.96
18	100	3	1	0	350	1	126.27	7.71
32	100	10	5	3	350	8	136.51	9.16
19	20	10	1	0	350	8	105.45	10.61
13	20	3	5	3	350	1	105.72	9.66
1	20	3	1	0	300	1	99.96	8.33
11	20	10	1	3	350	1	118.77	9.58
14	100	3	5	3	300	1	115.28	8.90
26	100	3	1	3	350	8	119.38	10.89
20	100	10	1	0	300	8	107.12	8.50
23	20	10	5	0	300	1	122.26	17.03
2	100	3	1	0	350	1	124.46	13.20
7	20	10	5	0	300	1	122.78	13.90
8	100	10	5	0	350	1	105.85	8.14
30	100	3	5	3	300	1	126.20	13.49
16	100	10	5	3	350	8	135.01	17.19
12	100	10	1	3	300	1	115.73	10.52

ปัจจัยนำเข้า							ผลตอบสนอง	
ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย						ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร (แผงวงจร ด้านบน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (แผงวงจร ด้านบน)
	A	B	C	D	E	F		
4	100	10	1	0	300	8	111.76	13.47
10	100	3	1	3	350	8	108.21	8.32
31	20	10	5	3	300	8	127.72	14.40
21	20	3	5	0	350	8	121.55	11.62
29	20	3	5	3	350	1	105.85	9.20
9	20	3	1	3	300	8	104.46	8.41

และผลการวิเคราะห์ของแผงวงจรด้านบนเป็นดังต่อไปนี้

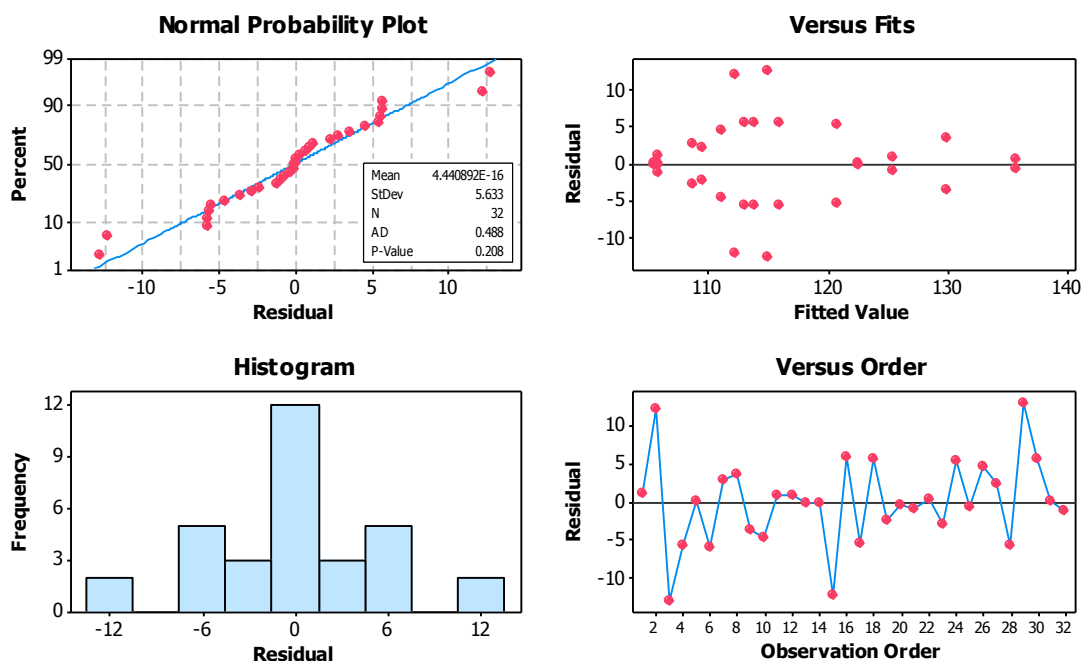
(1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน)

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

- (1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- (2) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values)
- (3) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)

Residual Plots for %Volume_TOP



รูปที่ 5.10 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรต้นบน

จากการพิจารณาสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติด้วยกราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง พบว่า กราฟมีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรงและผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ค่า P-value ของส่วนตกค้างเท่ากับ 0.209 มีค่ามากกว่าค่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

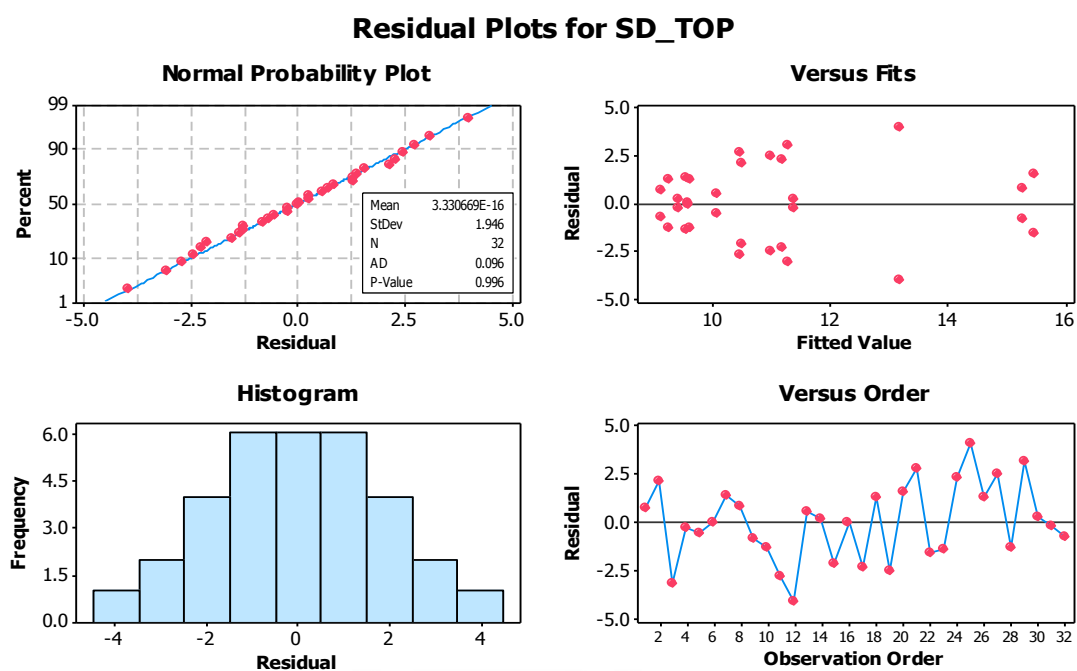
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Residuals Versus Fitted Values) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างมีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งศูนย์

และเพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา พบว่า ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจึงสรุปได้ว่าข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

ดังนั้น ข้อมูลที่มาจากการทดลองจึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนได้

- (2) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)
(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผนวงจรถ้าบน)



รูปที่ 5.11 แบบจำลองของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผนวงจรถ้าบน

กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่า ค่า P-value ของส่วนตกค้างเท่ากับ 0.556 มีค่ามากกว่าค่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างมีข้อมูลส่วนใหญ่ตกอยู่ในตำแหน่งศูนย์

และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตักข้างกับลำดับเวลา พบว่า ลักษณะการกระจายตัวไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จึงสรุปได้ว่าข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

ดังนั้น ข้อมูลที่มาจากการทดลองจึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนต่อได้

(3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

(ค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน)

ผลการวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (แผงวงจรด้านบน) และคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน

Factor	Name	Low	High
A	Speed	20	100
B	Pressure	3	10
C	Snap-off Speed	1	5
D	Snap-off Pressure	0	3
E	Squeegee	300	350
F	Useful life	1	8

Estimated Effects and Coefficients for %Volume_TOP (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		115.645	1.386	83.44	0
A	7.437	3.719	1.386	2.68	0.016
B	-1.063	-0.531	1.386	-0.38	0.706
C	7.278	3.639	1.386	2.63	0.018
D	-1.107	-0.553	1.386	-0.4	0.695
E	-0.344	-0.172	1.386	-0.12	0.903
F	1.437	0.719	1.386	0.52	0.611

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
A*B	-5.156	-2.578	1.386	-1.86	0.081
A*C	1.608	0.804	1.386	0.58	0.57
A*D	3.068	1.534	1.386	1.11	0.285
A*E	3.445	1.723	1.386	1.24	0.232
A*F	4.329	2.165	1.386	1.56	0.138
B*D	8.24	4.12	1.386	2.97	0.009
B*F	1.124	0.562	1.386	0.41	0.69
A*B*D	4.131	2.065	1.386	1.49	0.156
A*B*F	5.802	2.901	1.386	2.09	0.053

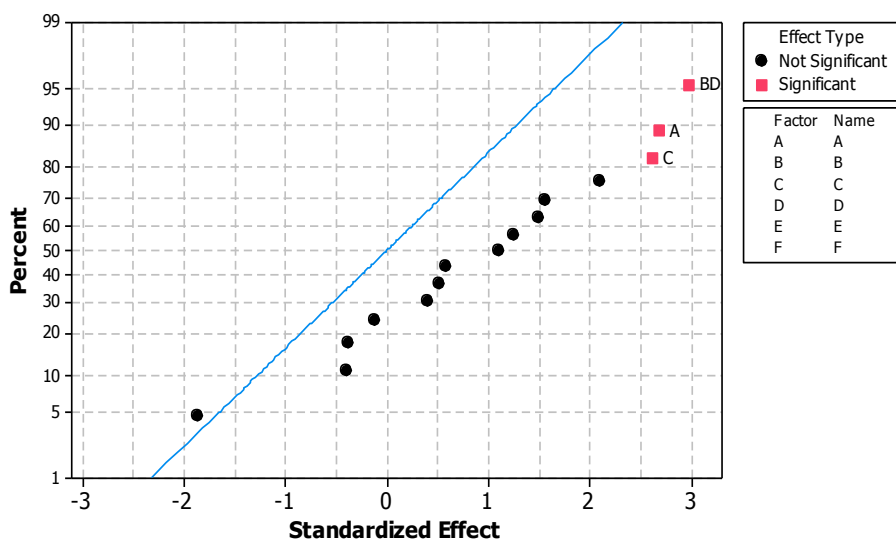
Analysis of Variance for %Volume_TOP (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	902.61	902.61	150.435	2.45	0.071
A	1	442.5	442.5	442.499	7.2	0.016
B	1	9.04	9.04	9.036	0.15	0.706
C	1	423.81	423.81	423.81	6.89	0.018
D	1	9.8	9.8	9.795	0.16	0.695
E	1	0.95	0.95	0.947	0.02	0.903
F	1	16.53	16.53	16.525	0.27	0.611
2-Way Interactions	7	1106.85	1106.85	158.121	2.57	0.056
A*B	1	212.67	212.67	212.673	3.46	0.081
A*C	1	20.68	20.68	20.679	0.34	0.57
A*D	1	75.29	75.29	75.29	1.22	0.285
A*E	1	94.96	94.96	94.959	1.54	0.232
A*F	1	149.92	149.92	149.923	2.44	0.138
B*D	1	543.22	543.22	543.216	8.84	0.009
B*F	1	10.11	10.11	10.107	0.16	0.69
3-Way Interactions	2	405.85	405.85	202.924	3.3	0.063
A*B*D	1	136.52	136.52	136.52	2.22	0.156

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A*B*F	1	269.33	269.33	269.327	4.38	0.053
Residual Error	16	983.6	983.6	61.475		
Pure Error	16	983.6	983.6	61.475		
Total	31	3398.91				

Normal Plot of the Standardized Effects

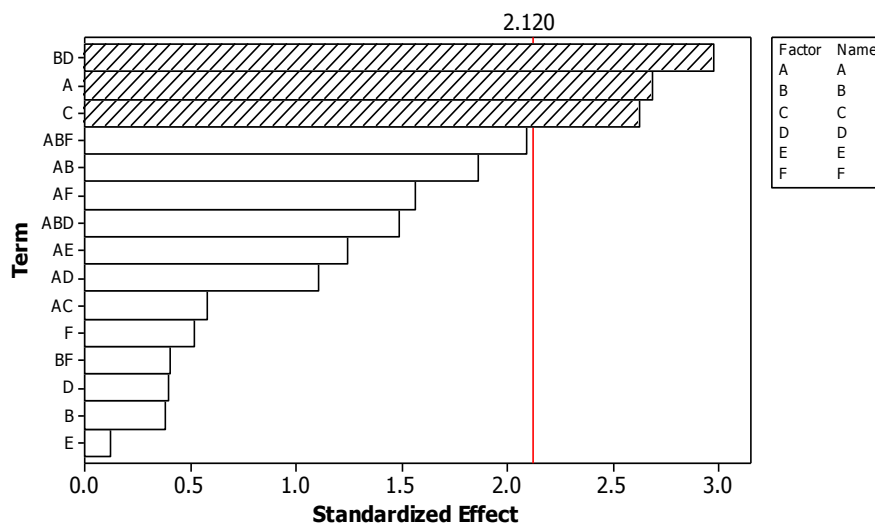
(response is %Volume_TOP, Alpha = 0.05)



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน

Pareto Chart of the Standardized Effects

(response is %Volume_TOP, Alpha = 0.05)



รูปที่ 5.13 แผนภูมิพารेटอของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05 ในตารางที่ 5.9 และแสดงด้วยกราฟปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบนในรูปที่ 5.12 พบว่า เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 3 ทาง (3-Way Interactions) พบว่า ไม่มีปัจจัยใดส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

แต่เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 2 ทาง (2-Way Interactions) พบว่า **ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย B*D มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05** โดยปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน และปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลกระทบร่วมระหว่าง (แรงที่ใช้ในการสกรีน*ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน) ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

และเมื่อพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) พบว่า **ผลกระทบหลักของปัจจัย A และ C มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05** โดยปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน และปัจจัย C คือ ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน ดังนั้นจึงสรุปได้ ผลกระทบหลักของความเร็วที่ใช้ในการสกรีนและความเร็วในการแยกออกของการสกรีน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้เมื่อนำค่าสัมบูรณ์ของตัวสถิติ T (T-statistic) ไปพล็อตด้วยแผนภูมิพาเรโต ในรูปที่ 5.13 พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก A C และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย B*D มีค่าสัมบูรณ์เท่ากับ 2.68, 2.63 และ 2.97 ตามลำดับ โดยมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตของการกระจายตัวแบบ T คือ 2.12

ดังนั้น ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A B C และ D เป็นปัจจัยที่จะต้องนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการหาพื้นผิวสะท้อน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมแก่ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแผงวงจรด้านบนต่อไป

(4) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม เพื่อลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีให้มีการกระจายตัวน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์

ความแปรปรวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.10 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน

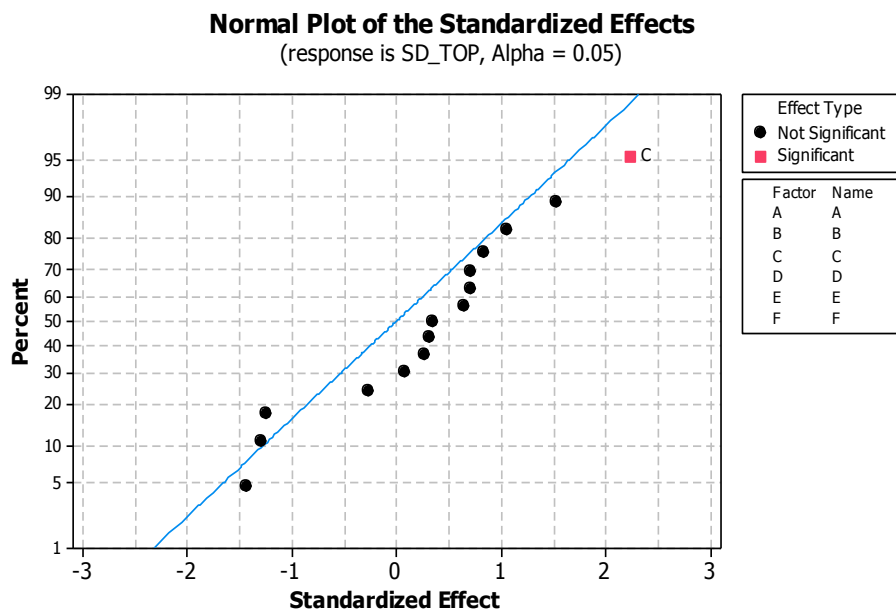
Factor	Name	Low	High
A	Speed	20	100
B	Pressure	3	10
C	Snap-off Speed	1	5
D	Snap-off Pressure	0	3
E	Squeegee	300	350
F	Useful life	1	8

Estimated Effects and Coefficients for SD_TOP (coded units)

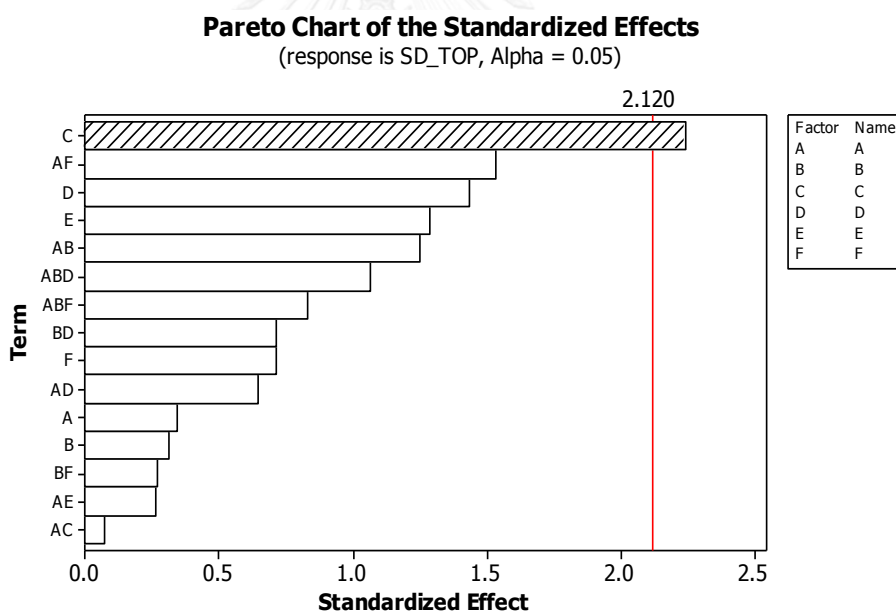
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		11.0159	0.4788	23.01	0
A	0.3331	0.1666	0.4788	0.35	0.732
B	0.3006	0.1503	0.4788	0.31	0.758
C	2.1506	1.0753	0.4788	2.25	0.039
D	-1.3756	-0.6878	0.4788	-1.44	0.17
E	-1.2319	-0.6159	0.4788	-1.29	0.217
F	0.6844	0.3422	0.4788	0.71	0.485
A*B	-1.1981	-0.5991	0.4788	-1.25	0.229
A*C	0.0719	0.0359	0.4788	0.08	0.941
A*D	0.6181	0.3091	0.4788	0.65	0.528
A*E	0.2519	0.1259	0.4788	0.26	0.796
A*F	1.4681	0.7341	0.4788	1.53	0.145
B*D	0.6856	0.3428	0.4788	0.72	0.484
B*F	-0.2594	-0.1297	0.4788	-0.27	0.79
A*B*D	1.0194	0.5097	0.4788	1.06	0.303
A*B*F	0.7994	0.3997	0.4788	0.83	0.416

Analysis of Variance for SD_TOP (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	6	69.638	69.638	11.6064	1.58	0.216
A	1	0.888	0.888	0.8878	0.12	0.732
B	1	0.723	0.723	0.723	0.1	0.758
C	1	37.002	37.002	37.0015	5.04	0.039
D	1	15.139	15.139	15.1388	2.06	0.17
E	1	12.14	12.14	12.1401	1.65	0.217
F	1	3.747	3.747	3.747	0.51	0.485
2-Way Interactions	7	36.631	36.631	5.2331	0.71	0.662
A*B	1	11.484	11.484	11.484	1.57	0.229
A*C	1	0.041	0.041	0.0413	0.01	0.941
A*D	1	3.057	3.057	3.0566	0.42	0.528
A*E	1	0.508	0.508	0.5075	0.07	0.796
A*F	1	17.243	17.243	17.2431	2.35	0.145
B*D	1	3.761	3.761	3.7607	0.51	0.484
B*F	1	0.538	0.538	0.5382	0.07	0.79
3-Way Interactions	2	13.425	13.425	6.7125	0.91	0.421
A*B*D	1	8.313	8.313	8.313	1.13	0.303
A*B*F	1	5.112	5.112	5.112	0.7	0.416
Residual Error	16	117.387	117.387	7.3367		
Pure Error	16	117.387	117.387	7.3367		
Total	31	237.082				



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน



รูปที่ 5.15 แผนภูมิพาร์โตของปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ α เท่ากับ 0.05 ในตารางที่ 5.10 และกราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบนในรูปที่ 5.14 รวมถึงเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยกับค่าวิกฤตของการกระจายตัวแบบ T มีค่าเท่ากับ 2.12 ในแผนภูมิพาร์โตรูปที่

5.15 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 3 ทาง (3-Way Interactions) ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย 2 ทาง (2-Way Interactions) พบว่า ไม่มีปัจจัยใดมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

แต่เมื่อพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัย C พบว่า ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลกระทบหลักของปัจจัย C (ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน) ส่งผลกระทบต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

5.3. วิธีการพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) ของแผงวงจรด้านล่าง

เมื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปด้วยแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-2} แฟคทอเรียลบางส่วนแล้ว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ **ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A*B*D** (ปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน ปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน และปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน) ซึ่งจะถูกนำมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวดอปสนอง เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน แรงที่ใช้ในการสกรีน และระยะทางในการแยกออกของการสกรีน สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5.1)

$$y = f(x_A, x_B, x_D) + \varepsilon \quad (5.1)$$

โดยที่ y คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร x_A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน x_B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน x_D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน และ ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

และจากการเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่จะต้องทดลองระหว่างวิธีการแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) และวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) พบว่า เมื่อปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย วิธีการแบบส่วนผสมกลาง มีจำนวนครั้งในทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ในขณะที่วิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 ครั้ง เนื่องจากวิธีการพื้นผิวดอปสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าจึงเป็นวิธีการที่เลือกมาใช้เพื่อจำกัดแบบจำลองลำดับที่สอง และประมาณความสัมพันธ์ของสมการเพราะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองได้มากกว่า

5.3.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพินผิวตอบสนองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง แสดงดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแผนวงจрд้านล่าง

สัญลักษณ์ ของปัจจัย	ปัจจัย	หน่วยวัด	ระดับ ต่ำ	ระดับ กลาง	ระดับ สูง
A	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน	มิลลิเมตร/วินาที	20	60	100
B	แรงที่ใช้ในการสกรีน	กิโลกรัม	3	6.5	10
D	ระยะทางในการแยกออก ของการสกรีน	มิลลิเมตร	0	1.5	3

5.3.2. ตัวแปรตอบสนอง

ผลลัพธ์จากการคัดกรองปัจจัยด้วยแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-2} แฟคทอเรียลบางส่วน พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุม คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีบนแผนวงจрд้านล่างดังตารางที่ 5.12 ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีใช้เป็นตัวแปรตอบสนองเพื่อการติดตามผลเท่านั้น

ตารางที่ 5.12 ตัวแปรตอบสนองของแผนวงจрд้านล่าง

ตัวแปรตอบสนอง	หน่วยวัด	ค่าเป้าหมาย
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบน แผนวงจрд้านล่าง	%Volume	100%
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรโลหะบัดกรีบน แผนวงจрд้านล่าง	%Volume	ใกล้เคียง 0

5.3.3. การทดลอง

ในขณะที่ทำการทดลองต้องควบคุมปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องให้คงที่ เพื่อให้ผลลัพธ์จากการทดลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยปัจจัยที่ต้องควบคุมให้คงที่ ได้แก่

1. ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน ควบคุมความเร็วที่ 1.5 มิลลิเมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของเครื่องจักร อย่างไรก็ตามหากฝ่ายผลิตต้องการเพิ่มจำนวนการผลิตสามารถปรับให้เร็วขึ้นเป็นความเร็วสูงสุดในการแยกออกที่ 5 มิลลิเมตร/วินาทีได้ เนื่องจากปัจจัยด้านความเร็วในการแยกออกของการสกรีนไม่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตรโลหะบัดกรีด้านล่าง
2. ขนาดของใบปาด ผู้วิจัยเลือกใช้ใบปาดขนาด 300 มิลลิเมตรเพราะมีความกว้างพอดีกับแผงวงจร
3. อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี เลือกใช้โลหะบัดกรีที่อายุการใช้งานตั้งแต่เริ่มต้นเปิดฝาจนกระทั่งอายุการใช้งานครบ 8 ชั่วโมง เพราะจากการทดลองพบว่าค่าความหนืดระหว่าง 1-8 ชั่วโมงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตรโลหะบัดกรีด้านล่าง
4. อุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส
5. ความชื้นสัมพัทธ์ควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 40-80 %RH

การทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีเฉลี่ยบนแผงวงจรด้านล่าง 3 ปัจจัย ได้แก่

- ปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน
- ปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน และ
- ปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน

ทำการทดลอง 15 ครั้งแบบสุ่ม โดยลำดับของการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ลำดับของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแผนผังวงจรร้อยด้าน

Box-Behnken Design				
Factors: 3		Replicates: 1		
Base runs: 15		Total runs: 15		
Base blocks: 1		Total blocks: 1		
Center points: 3				
การทดลอง ครั้งที่	ลำดับของการ ทดลอง	ปัจจัย		
		A	B	D
1	6	100	6.5	0
2	5	20	6.5	0
3	3	20	10	1.5
4	8	100	6.5	3
5	11	60	3	3
6	7	20	6.5	3
7	13	60	6.5	1.5
8	10	60	10	0
9	2	100	3	1.5
10	14	60	6.5	1.5
11	1	20	3	1.5
12	4	100	10	1.5
13	9	60	3	0
14	12	60	10	3
15	15	60	6.5	1.5

5.3.4. การวิเคราะห์ผลการทดลองของแผนผังวงจรร้อยด้านด้วยวิธีการพื้นผิว

ตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแผนผังวงจรร้อยด้านแสดงดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ผลการทดลองของแผนวงจรถ้าด้านล่าง

ปัจจัยนำเข้า				ผลตอบสนองที่ ต้องการควบคุม	ผลตอบสนอง
ลำดับของการ ทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ปริมาตรของโลหะ บัดกรี (แผนวงจรถ้าด้านล่าง)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ปริมาตรโลหะบัดกรี (แผนวงจรถ้าด้านล่าง)
	A	B	D		
6	100	6.5	0	95.28	6.74
5	20	6.5	0	102.88	9.68
3	20	10	1.5	104.37	9.11
8	100	6.5	3	93.46	7.05
11	60	3	3	93.21	7.35
7	20	6.5	3	91.21	7.14
13	60	6.5	1.5	91.94	7.17
10	60	10	0	101.04	8.88
2	100	3	1.5	92.02	6.87
14	60	6.5	1.5	92.46	7.51
1	20	3	1.5	92.81	6.45
4	100	10	1.5	90.59	6.74
9	60	3	0	100.00	8.55
12	60	10	3	100.01	6.12
15	60	6.5	1.5	91.60	6.66

ผลวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนของแผนวงจรถ้าด้านล่าง เป็นดังต่อไปนี้

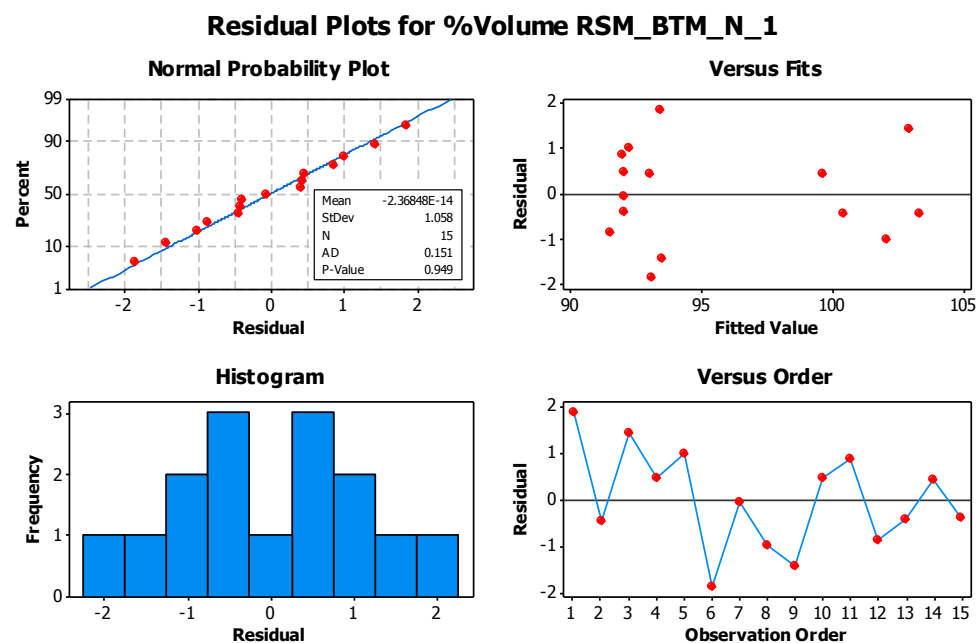
1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ค่าเฉลี่ยแผนวงจรถ้าด้านล่าง)

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์

ความแปรปรวนมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

- (1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- (2) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values)
- (3) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)



รูปที่ 5.16 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง

จากการพิจารณากราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value ของส่วนตกค้าง เท่ากับ 0.949 ซึ่งมีค่ามากกว่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Residuals Versus Fitted Values) เป็นการตรวจสอบความมีเสถียรภาพในด้านความแปรปรวน จากกราฟลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง มีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงค่าศูนย์ และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นทรงระฆังคว่ำซึ่งบ่งชี้ถึงการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา (Residuals in Time Sequence) มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบการกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

2) การหาแบบจำลองพหุนามเพื่อจำกัดพื้นผิวตอบสนอง

ปัญหาของพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่มักใช้แบบจำลองพหุนามลำดับที่หนึ่งหรือลำดับที่สองมาใช้ประมาณการฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระได้ [3] ดังนั้น การประมาณผลตอบสนองกรณีมีส่วนโค้งของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง จะใช้ข้อมูลผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 5.15 เพื่อจำกัดพื้นผิวตอบสนอง

ตารางที่ 5.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านล่าง

Response Surface Regression: %Volume RSM_BTM_N_1 versus A, B, D				
The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for %Volume RSM_BTM_N_1				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	105.323	4.922	21.399	0.000
A	0.024	0.085	0.278	0.792
B	-1.458	1.094	-1.333	0.240
D	-10.905	1.915	-5.693	0.002
A*A	0.000	0.001	0.049	0.963
B*B	0.237	0.075	3.150	0.025
D*D	1.628	0.410	3.975	0.011
A*B	-0.023	0.006	-3.668	0.014
A*D	0.041	0.015	2.782	0.039
B*D	0.274	0.169	1.627	0.165
R-Sq = 94.99% R-Sq(adj) = 85.97%				

Analysis of Variance for %Volume RSM_BTM_N_1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	297.18	297.18	33.02	10.53	0.009
Linear	3	146.73	107.28	35.76	11.41	0.011
A	1	49.60	0.24	0.24	0.08	0.792
B	1	40.37	5.57	5.57	1.78	0.240
D	1	56.77	101.61	101.61	32.41	0.002
Square	3	75.71	75.71	25.24	8.05	0.023
A*A	1	0.67	0.01	0.01	0.00	0.963
B*B	1	25.51	31.11	31.11	9.92	0.025
D*D	1	49.53	49.53	49.53	15.80	0.011
Interaction	3	74.74	74.74	24.91	7.95	0.024
A*B	1	42.19	42.19	42.19	13.46	0.014
A*D	1	24.26	24.26	24.26	7.74	0.039
B*D	1	8.29	8.29	8.29	2.65	0.165
Residual Error	5	15.68	15.68	3.14		
Lack-of-Fit	3	15.30	15.30	5.10	27.19	0.036
Pure Error	2	0.38	0.38	0.19		
Total	14	312.85				

การพิจารณาค่า R-Sq(adj) ในตารางที่ 5.15 มีค่าเท่ากับ 85.97% โดยค่าความผันแปรทั้งหมดที่กระจายตัวอยู่ในค่าเฉลี่ยของแผนวงจрд้านล่างอยู่ในรูปที่สามารถอธิบายได้ 85.97 เปอร์เซ็นต์ และอยู่ในรูปที่ไม่สามารถอธิบายได้ 14.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพอจะยอมรับได้ว่าข้อมูลสามารถใช้คาดการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าเฉลี่ยของแผนวงจрд้านล่างได้ และจากการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผนวงจрд้านล่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ได้แก่

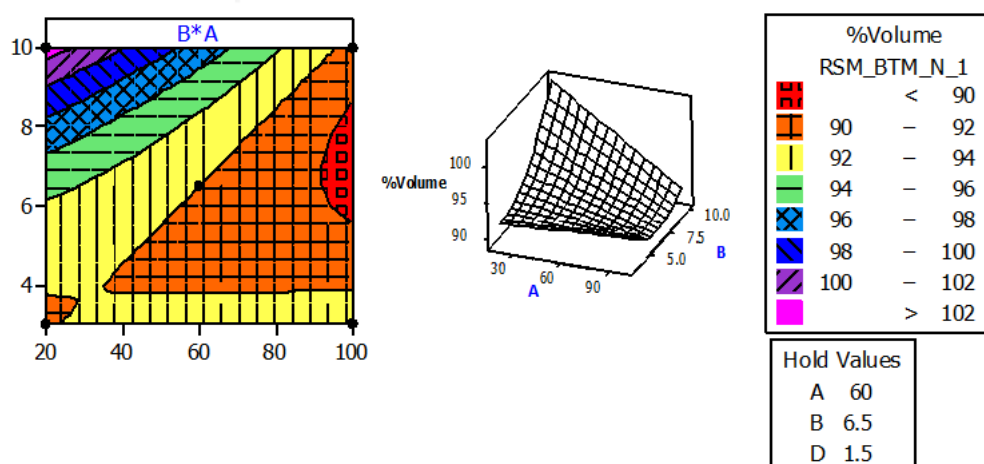
- ปัจจัย D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย B*B (แรงที่ใช้ในการสกรีน*แรงที่ใช้ในการสกรีน)

- ปัจจัย D*D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน*ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย A*B (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน*แรงที่ใช้ในการสกรีน) และ
- ปัจจัย A*D (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน*ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)

และแบบจำลองถดถอยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ เทอมของสมการเส้นตรง เทอมของสมการกำลังสอง และเทอมของผลกระทบรวมระหว่างปัจจัย จึงสรุปได้ว่าเทอมเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองการถดถอยของค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านล่างอย่างมีนัยสำคัญ

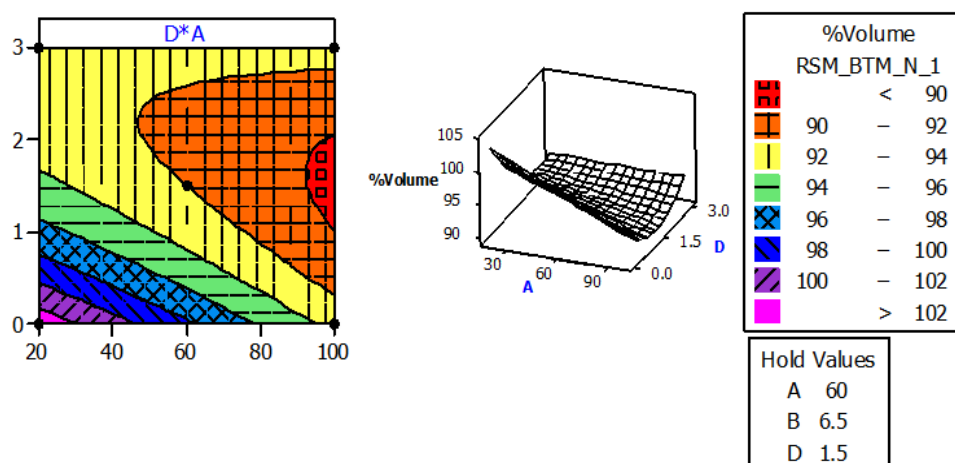
3) การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้วยกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง (Contour and Response Surface Plot)

กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองช่วยให้สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรในรูปแบบสามมิติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยกราฟโครงร่างจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรกับปัจจัยในแนวระนาบ x และ y ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับ และแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยในรูปแบบสามมิติ ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง [32]



รูปที่ 5.17 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย B*A

จากการพิจารณารูปที่ 5.17 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงที่ใช้ในการสกรีน (B) และความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (A) พบว่า ที่ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (D) มีค่าคงที่เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ถ้าใช้แรงในการสกรีนสูงและใช้ความเร็วในการสกรีนต่ำ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100% มากยิ่งขึ้น การใช้แรงในการสกรีนที่ต่ำเกินไป พบว่า โลหะบัดกรีส่วนใหญ่จะกระจายเป็นแผ่นฝ้าปกคลุมอยู่บนแผ่นพิมพ์เนื่องจากไม่มีแรงกดมากพอในการผลักให้โลหะบัดกรีไหลลงไปในช่องเปิดของแผ่นพิมพ์ ทำให้ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรน้อยลง



รูปที่ 5.18 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย D*A

จากการพิจารณารูปที่ 5.18 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยระยะทางในการแยกออก (D) และความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (A) พบว่า ระยะทางในการแยกออกเท่ากับ 0 และความเร็วที่ใช้ในการสกรีนต่ำ ทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100% มากที่สุด โดยพบว่าหากใบปาดเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โลหะบัดกรีที่ต้องไหลลงเพิ่มเติมในช่องเปิดของแผ่นพิมพ์จะไหลลงไปได้น้อยลง นอกจากนี้เมื่อมีระยะทางในการแยกออกที่ยาวมากขึ้น ส่งผลให้โลหะบัดกรีที่อยู่บริเวณขอบของแผงวงจรถูกรีดให้ไหลออกไป ทำให้บริเวณดังกล่าวมีโลหะบัดกรีบางส่วนสูญหายไป จึงมีแนวโน้มทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรลดน้อยลง

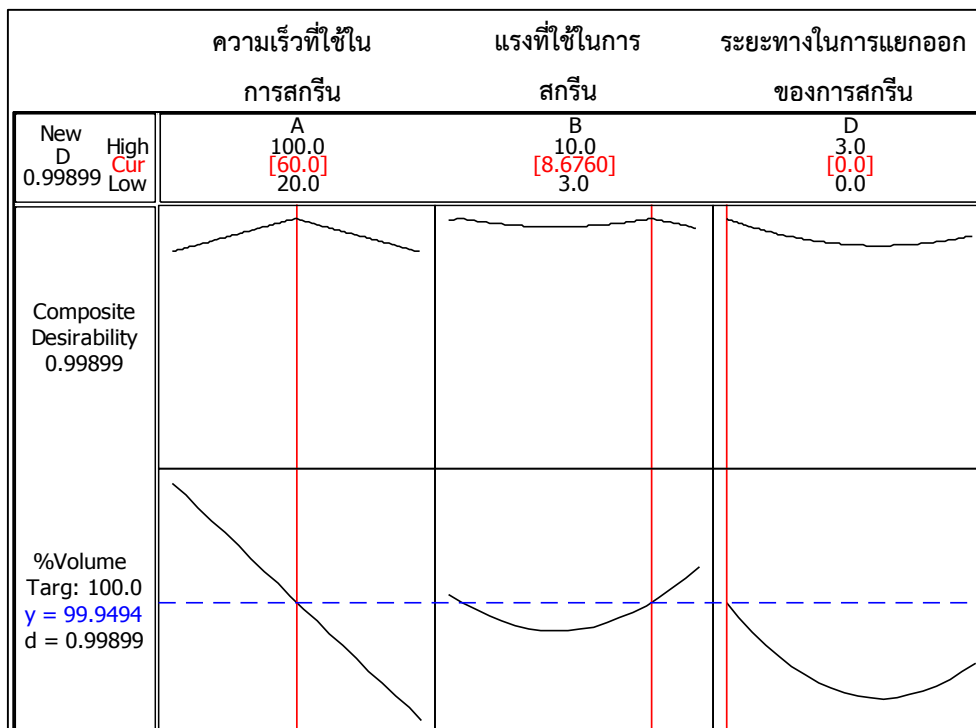
4) การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านล่าง

เมื่อทราบแบบจำลองพหุนามลำดับที่สองของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรแผงวงจรด้านล่างและความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจากกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองแล้ว การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดได้จากแบบจำลองพหุนามลำดับที่สองและความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยโดยจะต้องเป็นสถานะที่ทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด โดยอยู่ภายใต้ขีดจำกัดข้อกำหนดต่ำสุดเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์และขีดจำกัดข้อกำหนดสูงสุดเท่ากับ 150 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 เงื่อนไขสำหรับหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านล่าง

ผลตอบสนอง	เป้าหมาย	ค่าเป้าหมาย	ขีดจำกัดข้อกำหนดต่ำสุด	ขีดจำกัดข้อกำหนดสูงสุด	ความสำคัญ
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง	ใกล้เคียงเป้าหมายดีที่สุด	100%	50%	150%	1

และผลจากการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 สถานะที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแผงวงจรด้านล่าง

จากรูปที่ 5.19 พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย 100 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด คือ

- ปัจจัย A (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน) เท่ากับ 60 มิลลิเมตร/วินาที
- ปัจจัย B (แรงที่ใช้ในการสกรีน) เท่ากับ 8.6 กิโลกรัม และ
- ปัจจัย D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (A) แรงที่ใช้ในการสกรีน (B) และ ที่ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (D) พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100% มากที่สุด เมื่อใช้ความเร็วที่ใช้ในการสกรีนที่มีค่าสูง ใช้ระยะทางในการแยกออกของการสกรีนต่ำ และพบว่าสามารถใช้แรงในการสกรีนได้ 2 ระดับโดยที่ได้ค่าเป้าหมายใกล้เคียงกันคือ คือระดับต่ำและสูง

อย่างไรก็ตามในด้านการประยุกต์ใช้งานถ้าใช้แรงในการสกรีนสูงจะช่วยประหยัดน้ำยาและชุดผ้าทำความสะอาดแผ่นพิมพ์ที่ต้องใช้กระบวนการผลิตได้มากกว่า เนื่องจาก

การใช้แรงในการสกรีนที่ต่ำเกินไป พบว่า โลหะบัดกรีส่วนใหญ่จะกระจายเป็นแผ่น
ฝ้าปกคลุมอยู่บนแผ่นพิมพ์เนื่องจากไม่มีแรงกดมากพอในการผลักให้โลหะบัดกรีไหลลงไป
ในช่องเปิดของแผ่นพิมพ์ ทำให้โลหะบัดกรีส่วนใหญ่ติดบนแผ่นพิมพ์และสิ้นเปลืองผ้าทำ
ความสะอาดในการล้างโลหะบัดกรีให้สะอาด



5.4. วิธีการพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) ของแผนวงจรถ้าบบ

เมื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปด้วยแผนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแล้ว จึงเหลือเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแผนวงจรถ้าบบอย่างมีนัยสำคัญ คือ **ผลกระทบหลักของปัจจัย A C และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย B*D** และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผนวงจรถ้าบบอย่างมีนัยสำคัญ คือ **ผลกระทบหลักของปัจจัย C** (โดยที่ ปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน ปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน ปัจจัย C คือ ความเร็วในการแยกออกของการสกรีนและ ปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองในกรณีของแผนวงจรถ้าบบมีผลตอบสนอง 2 ค่า คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (y_1) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (y_2) ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน แรงที่ใช้ในการสกรีน ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน และระยะทางในการแยกออกของการสกรีน สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5.2) และ (5.3)

$$y_1 = f(x_A, x_B, x_C, x_D) + \varepsilon_1 \quad (5.2)$$

$$y_2 = f(x_C) + \varepsilon_2 \quad (5.3)$$

โดยที่ y_1 คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร

y_2 คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตร

x_A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน

x_B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน

x_C คือ ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน

x_D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน และ

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการทดลองด้วยวิธีการแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) และวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) พบว่า เมื่อปัจจัยจำนวนปัจจัยเท่ากับ 4 ปัจจัย วิธีการแบบส่วนผสมกลาง มีจำนวนครั้งในการทดลองทั้งหมด 31 ครั้ง ในขณะที่วิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 ครั้ง ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าจึงเป็นวิธีการที่เลือกมาใช้เพื่อจำกัดแบบจำลองลำดับที่สอง

และประมาณความสัมพันธ์ของสมการ เพราะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองได้มากกว่า

5.4.1. ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพินผิวตอบสนองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง แสดงดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ระดับของปัจจัยสำหรับใช้ทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแผงวงจรด้านบน

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	หน่วยวัด	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
A	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน	มิลลิเมตร/วินาที	20	60	100
B	แรงที่ใช้ในการสกรีน	กิโลกรัม	3	6.5	10
C	ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน	มิลลิเมตร/วินาที	1	3	5
D	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน	มิลลิเมตร	0	1.5	3

5.4.2. ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองที่ต้องการควบคุมประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรี ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 ตัวแปรตอบสนองของแผงวงจรด้านบน

ตัวแปรตอบสนอง	หน่วยวัด	ค่าเป้าหมาย
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน	%Volume	100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน	%Volume	ใกล้เคียง 0

5.4.3. การทดลอง

ในขณะที่ทำการทดลองต้องควบคุมปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องให้คงที่ เพื่อให้ผลลัพธ์จากการทดลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยปัจจัยที่ต้องควบคุมให้คงที่ ได้แก่

1. ขนาดของใบปาด ผู้วิจัยเลือกใช้ใบปาดขนาด 300 มิลลิเมตรเพราะมีความกว้างพอดีกับแผงวงจร
2. อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี เลือกใช้โลหะบัดกรีที่อายุการใช้งานตั้งแต่เริ่มต้นเปิดฝาจนกระทั่งอายุการใช้งานครบ 8 ชั่วโมง เพราะจากการทดลองพบว่าค่าความหนืดระหว่าง 1-8 ชั่วโมงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตรโลหะบัดกรีด้านบน
3. อุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส
4. ความชื้นสัมพัทธ์ควบคุมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 40-80 %RH

การทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบน 4 ปัจจัย ได้แก่

- ปัจจัย A คือ ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน
- ปัจจัย B คือ แรงที่ใช้ในการสกรีน
- ปัจจัย C คือ ความเร็วในการแยกออกของการสกรีนและ
- ปัจจัย D คือ ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน

ทำการทดลอง 27 ครั้งแบบสุ่ม ลำดับของการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 ลำดับของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแผงวงจรด้านบน

Box-Behnken Design			
Factors:	4	Replicates:	1
Base runs:	27	Total runs:	27
Base blocks:	1	Total blocks:	1
Center points: 3			

การทดลอง ครั้งที่	ลำดับของ การทดลอง	ปัจจัย			
		A	B	C	D
1	26	60	6.5	3	1.5
2	12	100	6.5	3	3
3	7	60	6.5	1	3
4	21	60	3	3	0
5	13	60	3	1	1.5
6	10	100	6.5	3	0
7	11	20	6.5	3	3
8	6	60	6.5	5	0
9	24	60	10	3	3
10	17	20	6.5	1	1.5
11	23	60	3	3	3
12	5	60	6.5	1	0
13	3	20	10	3	1.5
14	14	60	10	1	1.5
15	1	20	3	3	1.5
16	20	100	6.5	5	1.5
17	16	60	10	5	1.5
18	15	60	3	5	1.5
19	18	100	6.5	1	1.5
20	25	60	6.5	3	1.5
21	8	60	6.5	5	3
22	9	20	6.5	3	0
23	19	20	6.5	5	1.5
24	2	100	3	3	1.5
25	4	100	10	3	1.5
26	22	60	10	3	0
27	27	60	6.5	3	1.5

5.4.4. การวิเคราะห์ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบนด้วยวิธีการพื้นผิว

ตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแผงวงจรด้านบน แสดงดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 ผลการทดลองของแผงวงจรด้านบน

ลำดับของ การ ทดลอง	ปัจจัยนำเข้า				ผลตอบสนอง	
	ปัจจัย				ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ปริมาตรของโลหะ บัดกรี (แผงวงจรด้านบน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ปริมาตรโลหะบัดกรี (แผงวงจรด้านบน)
	A	B	C	D		
26	60	6.5	3	1.5	92.95	7.04
12	100	6.5	3	3	92.81	7.80
7	60	6.5	1	3	96.88	7.46
21	60	3	3	0	100.54	9.10
13	60	3	1	1.5	101.11	9.68
10	100	6.5	3	0	95.60	7.71
11	20	6.5	3	3	91.70	7.18
6	60	6.5	5	0	97.63	7.94
24	60	10	3	3	89.08	7.39
17	20	6.5	1	1.5	105.48	9.42
23	60	3	3	3	92.12	6.82
5	60	6.5	1	0	99.57	10.63
3	20	10	3	1.5	106.70	5.52
14	60	10	1	1.5	102.02	7.73
1	20	3	3	1.5	92.78	6.54
20	100	6.5	5	1.5	98.59	6.84
16	60	10	5	1.5	100.09	7.98
15	60	3	5	1.5	102.63	8.00

ปัจจัยนำเข้า					ผลตอบสนอง	
ลำดับของ การ ทดลอง	ปัจจัย				ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ปริมาตรของโลหะ บัดกรี (แผงวงจรด้านบน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ปริมาตรโลหะบัดกรี (แผงวงจรด้านบน)
	A	B	C	D		
18	100	6.5	1	1.5	97.55	5.50
25	60	6.5	3	1.5	94.45	7.17
8	60	6.5	5	3	97.40	6.73
9	20	6.5	3	0	102.17	10.34
19	20	6.5	5	1.5	101.74	5.50
2	100	3	3	1.5	92.94	6.89
4	100	10	3	1.5	90.78	7.54
22	60	10	3	0	100.87	8.69
27	60	6.5	3	1.5	91.95	7.43

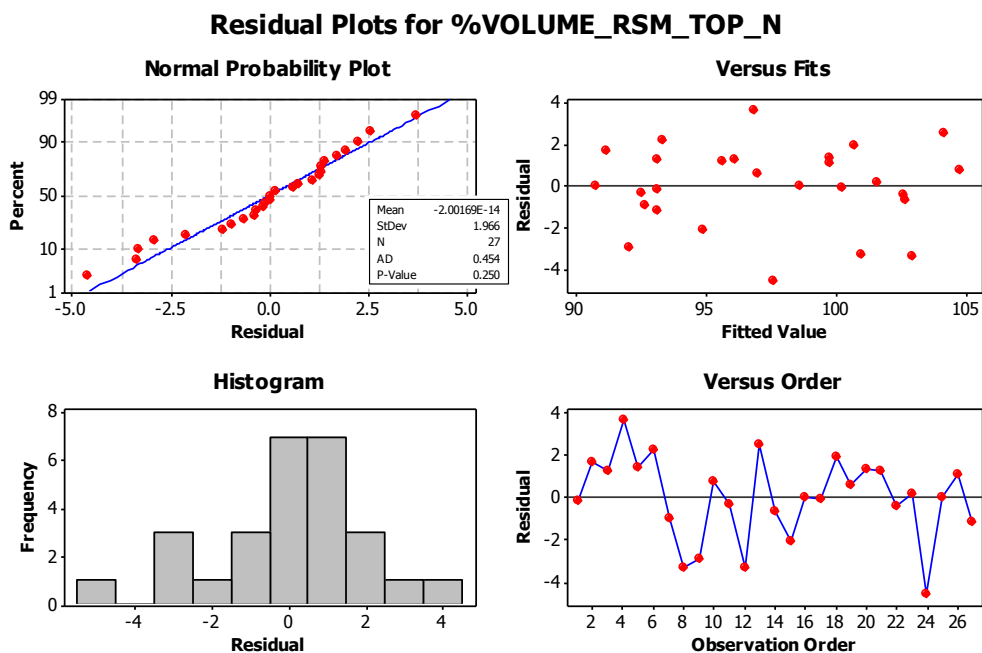
ผลวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของแผงวงจรด้านบน เป็นดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน)

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

- (1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- (2) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values)
- (3) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)



รูปที่ 5.20 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบน

จากการพิจารณารูปที่ 5.20 กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value ของส่วนตกค้าง เท่ากับ 0.25 โดยมีความมากกว่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Residuals Versus Fitted Values) เป็นการตรวจสอบความมีเสถียรภาพในด้านความแปรปรวน จากกราฟลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง มีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงค่าศูนย์ และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นทรงระฆังคว่ำซึ่งบ่งถึงการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ

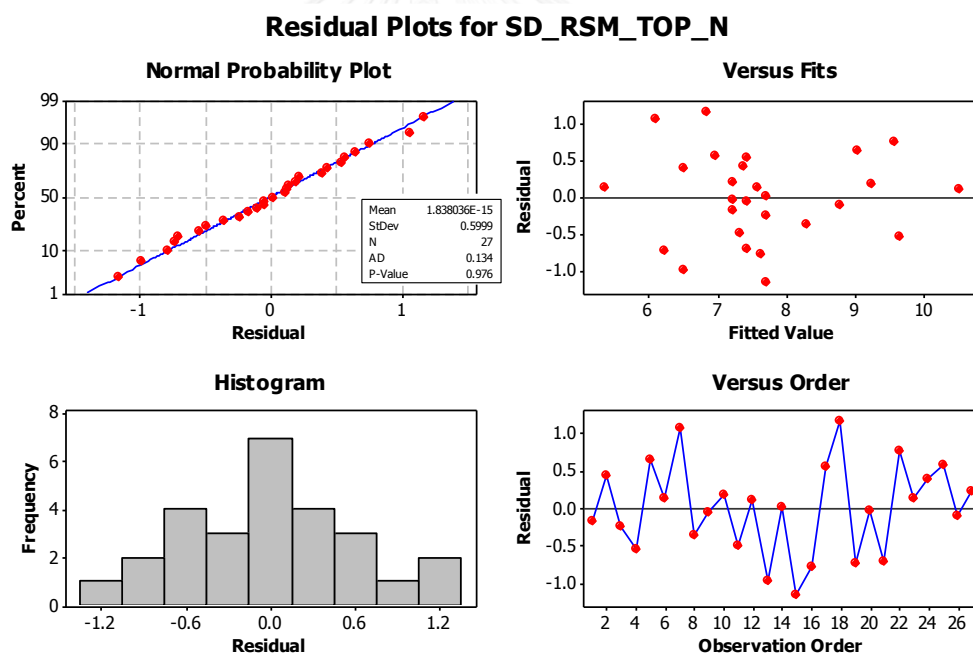
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา (Residuals in Time Sequence) มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบกระจายตัวที่ชัดเจนภายใต้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

2) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน)

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

- (1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (The Normality Assumption)
- (2) การตรวจสอบส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Plot of Residuals Versus Fitted Values)
- (3) การตรวจสอบส่วนตกค้างตามลำดับเวลา (Plot of Residuals in Time Sequence)



รูปที่ 5.21 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (แผงวงจรด้านบน)

จากการพิจารณารูปที่ 5.21 กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง มีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal

Distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่า P-value ของส่วนตกค้าง เท่ากับ 0.153 โดยมีค่ามากกว่าแอลฟา 0.05 จึงสรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างเทียบกับค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง เป็นการตรวจสอบความมีเสถียรภาพในด้านความแปรปรวน จากกราฟลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มกระจายตัวที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรต่อความแปรปรวน

แผนภาพฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง มีข้อมูลส่วนใหญ่ของส่วนตกค้างตกอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงค่าศูนย์ และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นทรงระฆังคว่ำซึ่งบอถึงการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับเวลา (Residuals in Time Sequence) มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีแนวโน้มกระจายตัวที่ชัดเจน ภายใต้อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลจึงมีความอิสระต่อกัน

3) การหาแบบจำลองพหุนามเพื่อจำกัดพื้นผิวตอบสนอง

ปัญหาของพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่มักใช้แบบจำลองพหุนามลำดับที่หนึ่งหรือลำดับที่สองมาใช้ประมาณการฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระได้ [3] ดังนั้น การประมาณผลตอบสนองกรณีมีส่วนโค้งของค่าเฉลี่ยแผนวงจรด้านบนจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ 5.22 ในการจำกัดพื้นผิวตอบสนองของค่าเฉลี่ยแผนวงจรด้านบน

ตารางที่ 5.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแผนวงจรด้านบน

Response Surface Regression: %VOLUME_RSM_TOP_N versus A, B, C, D

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for %VOLUME_RSM_TOP_N

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	114.587	10.479	10.935	0
A	-0.100	0.134	-0.741	0.473
B	0.352	1.663	0.212	0.836

Term	Coef	SE Coef	T	P
C	-9.085	2.686	-3.382	0.005
D	-3.676	3.240	-1.135	0.279
A*A	0.001	0.001	1.341	0.205
B*B	0.166	0.102	1.623	0.131
C*C	1.416	0.313	4.518	0.001
D*D	0.054	0.557	0.097	0.924
A*B	-0.029	0.010	-2.778	0.017
A*C	0.015	0.018	0.826	0.425
A*D	0.032	0.024	1.327	0.209
B*C	-0.123	0.207	-0.596	0.562
B*D	-0.160	0.276	-0.582	0.571
C*D	0.205	0.482	0.425	0.678

R-Sq = 82.92% R-Sq(adj) = 63.00%

Analysis of Variance for %VOLUME_RSM_TOP

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	487.997	487.997	34.857	4.16	0.009
Linear	4	203.592	120.717	30.179	3.6	0.038
A	1	86.941	4.6	4.6	0.55	0.473
B	1	4.588	0.375	0.375	0.04	0.836
C	1	1.71	95.812	95.812	11.44	0.005
D	1	110.353	10.781	10.781	1.29	0.279
Square	4	191.979	191.979	47.995	5.73	0.008
A*A	1	0.092	15.068	15.068	1.8	0.205
B*B	1	2.207	22.05	22.05	2.63	0.131
C*C	1	189.6	170.982	170.982	20.42	0.001
D*D	1	0.079	0.079	0.079	0.01	0.924
Interaction	6	92.427	92.427	15.405	1.84	0.174
A*B	1	64.642	64.642	64.642	7.72	0.017

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A*C	1	5.712	5.712	5.712	0.68	0.425
A*D	1	14.746	14.746	14.746	1.76	0.209
B*C	1	2.976	2.976	2.976	0.36	0.562
B*D	1	2.839	2.839	2.839	0.34	0.571
C*D	1	1.513	1.513	1.513	0.18	0.678
Residual Error	12	100.5	100.5	8.375		
Lack-of-Fit	10	97.333	97.333	9.733	6.15	0.148
Pure Error	2	3.167	3.167	1.583		
Total	26	588.497				

การพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.22 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยแผงวงจรด้านบนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ได้แก่

- ปัจจัย C (ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย C*C (ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน*ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน) และ
- ปัจจัย A*B (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน*แรงที่ใช้ในการสกรีน)

และพบว่าแบบจำลองถดถอย (Regression) ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ เทอมของสมการเส้นตรง และเทอมของสมการกำลังสอง จึงสรุปได้ว่า เทอมเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองการถดถอยของค่าเฉลี่ยของแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบน

Response Surface Regression: SD_RSM_TOP_N versus A, B, C, D

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for SD_RSM_TOP_N

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18.833	3.197	5.890	0

Term	Coef	SE Coef	T	P
A	-0.059	0.041	-1.435	0.177
B	-0.691	0.507	-1.362	0.198
C	-2.535	0.820	-3.093	0.009
D	-3.434	0.989	-3.474	0.005
A*A	0.000	0.000	-1.215	0.248
B*B	0.014	0.031	0.452	0.659
C*C	0.091	0.096	0.952	0.360
D*D	0.405	0.170	2.384	0.034
A*B	0.003	0.003	0.946	0.363
A*C	0.016	0.006	2.978	0.012
A*D	0.014	0.007	1.840	0.091
B*C	0.069	0.063	1.093	0.296
B*D	0.047	0.084	0.555	0.589
C*D	0.163	0.147	1.110	0.289

R-Sq = 79.51% R-Sq(adj) = 55.61%

Analysis of Variance for SD_RSM_TOP

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	36.317	36.317	2.594	3.330	0.022
Linear	4	15.546	13.730	3.433	4.400	0.020
A	1	0.411	1.605	1.605	2.060	0.177
B	1	0.396	1.447	1.447	1.860	0.198
C	1	4.600	7.461	7.461	9.570	0.009
D	1	10.138	9.408	9.408	12.070	0.005
Square	4	8.385	8.385	2.096	2.690	0.083
A*A	1	3.794	1.151	1.151	1.480	0.248
B*B	1	0.137	0.160	0.159	0.200	0.659
C*C	1	0.022	0.707	0.707	0.910	0.360
D*D	1	4.433	4.433	4.433	5.690	0.034

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Interaction	6	12.387	12.387	2.064	2.650	0.071
A*B	1	0.697	0.697	0.697	0.890	0.363
A*C	1	6.917	6.917	6.917	8.870	0.012
A*D	1	2.641	2.641	2.641	3.390	0.091
B*C	1	0.931	0.931	0.931	1.190	0.296
B*D	1	0.240	0.240	0.240	0.310	0.589
C*D	1	0.960	0.960	0.960	1.230	0.289
Residual Error	12	9.357	9.357	0.780		
Lack-of-Fit	10	9.278	9.278	0.928	23.530	0.041
Pure Error	2	0.079	0.079	0.039		
Total	26	45.673				

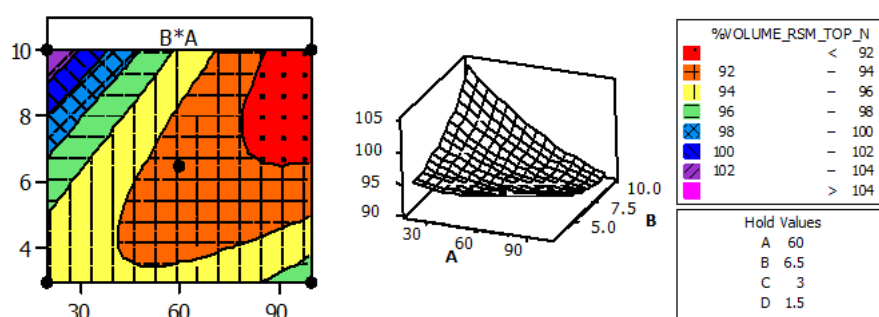
จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.23 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ได้แก่

- ปัจจัย C (ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย D*D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน*ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน)
- ปัจจัย A*C (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน*ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน)

แต่จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์การถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ α เท่ากับ 0.05 พบว่าแบบจำลองถดถอยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ เทอมของสมการเส้นตรงเท่านั้น จึงสรุปได้ว่า มีเฉพาะเทอมของสมการเส้นตรงเท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองการถดถอยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผงวงจรด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ

4) การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้วยกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง (Contour and Response Surface Plot)

กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองจะช่วยให้สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรในรูปแบบสามมิติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยกราฟโครงร่างจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรกับปัจจัยในแนวระนาบ x และ y ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับ และแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยในรูปแบบสามมิติ ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 5.22 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัย B*A

จากการพิจารณารูปที่ 5.22 กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (B) และแรงที่ใช้ในการสกรีน (A) พบว่า เมื่อความเร็วในการแยกออกของการสกรีนมีค่าคงที่เท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะทางในการแยกออกของการสกรีนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ถ้าใช้ความเร็วในการสกรีนสูงและใช้แรงในการสกรีนต่ำ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100% มากขึ้น

5) การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านบน

การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านบนนั้นมีความแตกต่างจากการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแผงวงจรด้านล่าง เพราะผลจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองประกอบด้วยผลตอบสนอง 2 ค่า คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (y_1) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (y_2) ดังนั้น การหารูปแบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะ บัดกรีจึงไม่สามารถใช้วิธีการหาผลตอบสนองแต่ละตัวแบบแยกกันได้ เนื่องจากผลตอบสนองทั้งสองค่าเกิดจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลองร่วมกัน

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของผลตอบสนองจึงต้องใช้การวิเคราะห์ในกรณีผลตอบสนองหลายค่า (Multi-response) โดย Montgomery [3] ได้แนะนำวิธีการหนึ่งของ Derringer และ Suich ที่มีประโยชน์และเป็นที่ยอมรับในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมแก่ผลตอบสนองหลายค่า คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวเป็นการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่าโดยการรวมผลตอบสนองทุกค่ามาไว้ในฟังก์ชันผลตอบสนองค่าเดียว โดยคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) ของฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละตัว ดังสมการที่ (5.4)

$$D = [d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m]^{1/m} \quad (5.4)$$

โดยที่ d คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละค่า และ m คือ จำนวนของผลตอบสนอง

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย 100 % มากที่สุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ 0 มากที่สุด มีการกำหนดเงื่อนไขดังตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีน (แผงวงจรด้านบน)

ผลตอบสนอง	ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าเป้าหมาย	ขีดจำกัด ข้อกำหนด ต่ำสุด	ขีดจำกัด ข้อกำหนด สูงสุด	น้ำหนัก ความ สำคัญ
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	y_1	ใกล้เคียง เป้าหมายดี ที่สุด	100%	50%	150%	5
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานเปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	y_2	ค่าน้อยดีที่สุด	-	0	15	1

การเปลี่ยนผลตอบแทน y_1 ไปอยู่ในฟังก์ชันความพึงพอใจ d_1 โดยที่ต้องการให้ผล
 ตอบสนองอยู่ที่ค่าเป้าหมาย สามารถคำนวณได้จากจากสมการที่ 5.5

$$d_2 = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{โดยที่} \\ T \text{ คือ ค่าเป้าหมาย} \\ L \text{ คือ ขีดจำกัดข้อกำหนดล่าง} \\ U \text{ คือ ขีดจำกัดข้อกำหนดบน} \\ r \text{ คือ ค่าน้ำหนัก} \end{array} \quad (5.5)$$

และการเปลี่ยนผลตอบแทน y_2 ไปอยู่ในฟังก์ชันความพึงพอใจ d_2 โดยที่ต้องการให้ผล
 ตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด สามารถคำนวณได้จากจากสมการที่ 5.6

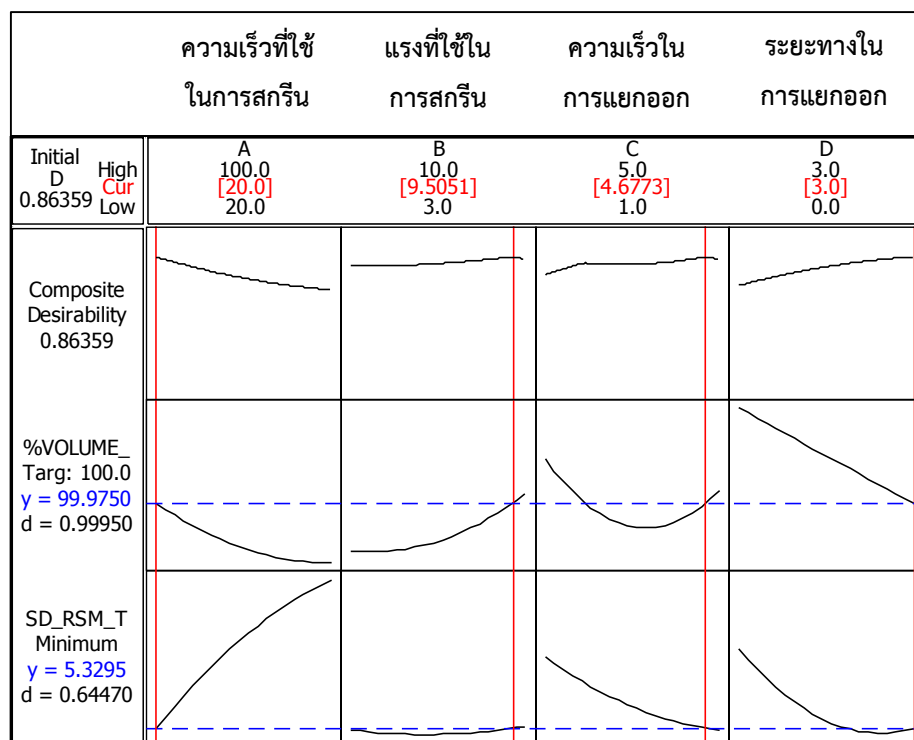
$$d_2 = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{โดยที่} \\ T \text{ คือ ค่าเป้าหมาย} \\ U \text{ คือ ขีดจำกัดข้อกำหนดบน} \\ r \text{ คือ น้ำหนัก} \end{array} \quad (5.6)$$

และเนื่องจากการเลือกน้ำหนักความสำคัญ หาก $r > 1$ แสดงว่ามีความสำคัญมากยิ่งขึ้นที่
 จะเข้าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย และหากเลือก $0 < r < 1$ แสดงว่ามีความสำคัญน้อย [4]
 ผู้วิจัยจึงกำหนดให้น้ำหนักความสำคัญของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเท่ากับ 5 และเลือก
 ให้น้ำหนักความสำคัญของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเท่ากับ 1 เพราะ
 ต้องการให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด เนื่องจากหาก
 ค่าดังกล่าวอยู่นอกเหนือขีดจำกัดข้อกำหนดจะส่งผลให้มีของเสียเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อ
 ผลิตภัณ์มากกว่า ผลลัพธ์จากการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดด้วยการคำนวณแสดงใน
 ตารางที่ 5.24 และรูปที่ 5.23

ตารางที่ 5.24 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนแผงวงจรด้านบน

วิธีการ ที่	ปัจจัย				ตัวแปรตอบสนอง		ฟังก์ชันความ พึงพอใจรวม
	A	B	C	D	y_1	y_2	
1	99.98	9.87	5.00	0.38	0.948	0.432	0.730

วิธีการ ที่	ปัจจัย				ตัวแปรตอบสนอง		ฟังก์ชันความ พึงพอใจรวม
	A	B	C	D	y_1	y_2	
2	20.53	7.53	1.06	2.31	0.941	0.469	0.746
3	20.05	9.79	2.47	1.72	0.924	0.551	0.778
4	20.01	10.00	1.73	3.00	0.961	0.554	0.800
5	65.11	9.99	1.00	2.12	0.998	0.515	0.801
6	99.96	3.32	4.37	1.41	0.988	0.544	0.810
7	100.00	3.40	4.37	1.45	0.991	0.544	0.811
8	99.26	3.24	4.21	1.43	1.000	0.547	0.818
9	100.00	3.99	1.02	1.15	1.000	0.551	0.820
10	50.03	3.00	5.00	1.45	0.996	0.557	0.820
11	100.00	3.37	1.02	2.83	1.000	0.561	0.825
12	100.00	3.65	1.00	2.08	0.999	0.575	0.831
13	20.00	3.06	5.00	2.64	0.945	0.664	0.840
14	20.05	9.34	4.29	2.19	0.979	0.643	0.851
15	20.00	8.66	5.00	2.45	0.968	0.664	0.854
16	20.00	9.99	4.18	2.82	1.000	0.638	0.861
17	20.00	9.51	4.68	3.00	1.000	0.645	0.864
<u>18</u>	<u>20.00</u>	<u>9.51</u>	<u>4.68</u>	<u>3.00</u>	<u>1.000</u>	<u>0.645</u>	<u>0.864</u>



รูปที่ 5.23 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดแก่กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแผงวงจรด้านบน

จากตารางที่ 5.24 และรูปที่ 5.23 พบว่า ฟังก์ชันความพึงพอใจรวมสูงสุด คือ 0.86 โดยเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับฟังก์ชันความพึงพอใจรวมในอุดมคติที่จะต้องเท่ากับ 1 ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย 100 % และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีค่าน้อยมากที่สุด คือ

- ปัจจัย A (ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร/วินาที
- ปัจจัย B (แรงที่ใช้ในการสกรีน) เท่ากับ 10 กิโลกรัม
- ปัจจัย C (ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร/วินาทีและ
- ปัจจัย D (ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (A) แรงที่ใช้ในการสกรีน (B) ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน (C) และ ที่ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (D) พบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 100% มากที่สุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีค่าน้อยมากที่สุด เมื่อใช้ความเร็วที่ใช้ใน

การสกรีนที่มีค่าต่ำ ใช้ความเร็วในการสกรีน ความเร็วในการแยกออกและระยะทางในการ
แยกออกของการสกรีนที่ระดับต่ำ



บทที่ 6

การควบคุมและติดตามผล

6.1. การทดลองเพื่อยืนยันผลของแผงวงจรด้านล่าง

เพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่ได้มาจากการวิเคราะห์ จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยนำเงื่อนไขในตารางที่ 6.1 ไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิตแผงวงจรด้านล่างของผลิตภัณฑ์รุ่น B โดยใช้การทดสอบจำนวน 2 รอบการผลิต เพื่อตรวจสอบความเสถียรของเงื่อนไขที่นำมาทดลอง

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	หน่วย
A	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน	60	มิลลิเมตร/วินาที
B	แรงที่ใช้ในการสกรีน	8.6	กิโลกรัม
D	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน	0	มิลลิเมตร

ผลลัพธ์จากการทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด แสดงออกมาในรูปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีและจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองแผงวงจรด้านล่างเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

		เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการสกรีน (แผงวงจรด้านล่าง)			ข้อมูลด้านปริมาณ		ข้อมูลด้านคุณภาพ	
รอบการผลิตที่	จำนวนการผลิต (ชิ้น)	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (มิลลิเมตร/วินาที)	แรงที่ใช้ในการสกรีน (กิโลกรัม)	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรี		จำนวนของเสีย (ชิ้น)	% ของเสีย
					ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
1	90	60	8.6	0	104.38	9.38	1	1.1%
2	140	60	8.6	0	100.69	7.60	2	1.4%

ผลจากการทดลอง พบว่า ภายหลังจากปรับปรุงโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการ ออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการสกรีน โลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง ทำให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีในรอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 102 เปอร์เซ็นต์ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ปริมาตรเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีจำนวนของเสียลดลงจากช่วงเวลาก่อนการปรับปรุงที่ 3 เปอร์เซ็นต์ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

และจากการทดสอบจับเวลาในการผลิตของกระบวนการผลิตแผงวงจรเปรียบเทียบกับ เวลาการผลิตเดิม พบว่า ให้ผลผลิตออกมาเท่ากับ 56 ชิ้นต่อชั่วโมงซึ่งเท่ากับเวลาการผลิตเดิม โดยคอกวดของกระบวนการผลิตแผงวงจรคือ กระบวนการอบชิ้นงานด้วยความร้อนสูง ดังนั้นแม้ จะมีการปรับเปลี่ยนความเร็วในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อ กระบวนการผลิตแผงวงจร และพบว่ากระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีจะส่งผลกระทบต่อการผลิต แผงวงจรหากใช้เวลาในการผลิตนานเกิน 30 วินาที

6.2. การทดลองเพื่อยืนยันผลของแผงวงจรด้านบน

เพื่อการยืนยันผลของเงื่อนไขที่ได้มาจากการวิเคราะห์จึงทำการทดลองเพิ่มเติม โดยนำ เงื่อนไขที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้งานจริงในขั้นตอนการกระบวนการผลิตแผงวงจรด้านบนของ ผลิตภัณฑ์รุ่น B

ตารางที่ 6.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านบน

สัญลักษณ์ ของปัจจัย	ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	หน่วย
A	ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน	20	มิลลิเมตร/วินาที
B	แรงที่ใช้ในการสกรีน	10	กิโลกรัม
C	ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน	5	มิลลิเมตร/วินาที
D	ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน	3	มิลลิเมตร

การทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์จำนวน 2 รอบการผลิต ซึ่งแต่ละรอบการผลิตมี ระยะเวลาห่างกันประมาณ 4 วัน ผลลัพธ์จากการทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่ เหมาะสมที่สุด ในรูปแบบของข้อมูลด้านปริมาณ และข้อมูลด้านคุณภาพ แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองแผนวงจรด้านบนเพื่อยืนยันผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

						ข้อมูลด้านปริมาณ		ข้อมูลด้านคุณภาพ	
รอบ การ ผลิตที่	จำนวน การผลิต (ชิ้น)	เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการสกรีน (แผนวงจรด้านบน)				เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของ โลหะบัดกรี		จำนวน ของเสีย (ชิ้น)	% ของ เสีย
		ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (มิลลิเมตร/วินาที) (มิลลิเมตร/วินาที)	แรงที่ใช้ในการสกรีน (กิโลกรัม)	ความเร็วในการแยกออกของ การสกรีน (มิลลิเมตร/วินาที)	ระยะทางในการแยกออกของ การสกรีน (มิลลิเมตร)	ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน		
1	85	20	10	5	3	105.13	8.52	0	0%
2	90	20	10	5	3	104.86	8.67	0	0%

ผลจากการทดลองในตารางที่ 6.4 พบว่า ภายหลังจากการปรับปรุงโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของแผนวงจรด้านบน ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีมีค่าเท่ากับ 105% ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีจำนวนของเสียลดลงจากช่วงเวลาก่อนการปรับปรุงที่ 2 เปอร์เซ็นต์ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 0 เปอร์เซ็นต์

และจากการทดสอบจับเวลาในการผลิตของกระบวนการผลิตแผนวงจรเปรียบเทียบกับเวลาการผลิตเดิม พบว่า ให้ผลผลิตออกมาเท่ากับ 20 ชิ้นต่อชั่วโมงซึ่งเท่ากับเวลาการผลิตเดิม โดยคอกวดของกระบวนการผลิตแผนวงจรคือ กระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผนวงจร ดังนั้นแม้จะมีการปรับเปลี่ยนความเร็วในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแผนวงจร

6.3. การจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมแก่ช่างเทคนิค

หลังจากการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ของแผนวงจรด้านล่างและแผนวงจรด้านบนแล้ว จึงนำปัจจัยที่เหมาะสมเหล่านี้มาจัดทำเป็นมาตรฐานการทำงาน โดยจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมให้แก่ช่างเทคนิค และให้ช่างเทคนิคลงบันทึกทุกครั้ง

ภายหลังจากการเปลี่ยนรุ่นของผลิตภัณฑ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว เอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์รุ่น B แสดงดังรูปที่ 6.1



	บอร์ดด้านล่าง (Bottom Side)		บอร์ดด้านบน (Top Side)	
	ค่าที่กำหนด (SPECIFICATION)	ค่าจริง (ACTUAL)	ค่าที่กำหนด (SPECIFICATION)	ค่าจริง (ACTUAL)
วันที่ (Date)				
กะ (Shift)				
หมายเลขโปรเจกต์ (Project No)	28036		28036	
หมายเลขผลิตภัณฑ์ (Assy P/N)	9053628-LFM99		9053628-LFM99	
ลำดับของงาน (Work Order)				
จำนวนบอร์ด (Qty)				
โลหะบัดกรี (Solder Paste)				
หมายเลขของไซลเดอร์ (Solder Paste P/N)	EI0019894-LF	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	EI0019894-LF	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
วันที่เปิดใช้ไซลเดอร์ (Solder Paste open date)				
เวลาเปิดใช้ไซลเดอร์ (Solder Paste open time)				
เครื่องสกรีน (Screen Printing M/C)				
หมายเลขของแผ่นพิมพ์ (Stencil ID No)	3-ST-28036-B-004	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	3-ST-28036-T-005	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
หมายเลขของ Base Screen (Base Screen Fixture ID No)				N/A
ชื่อโปรแกรมที่เครื่องสกรีน (Screen Printing Program Name)	B036LC1A	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	T036LC1C	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
ขนาดของใบปาด (Squeegee Size)	300 mm	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	300 mm	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
ไม่มีปัญหาเรื่องตำแหน่งการสกรีนผิดพลาด (No position error)	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO		<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน (Screen Printing Speed)	60 mm/s		20 mm/s	
แรงที่ใช้ในการสกรีน (Screen Printing Force)	8.6 kg		10 kg	
ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน (Snap off Speed)	1.5 mm/s		5 mm/s	
ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน (Snap off Distance)	0 mm		3 mm	

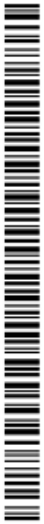
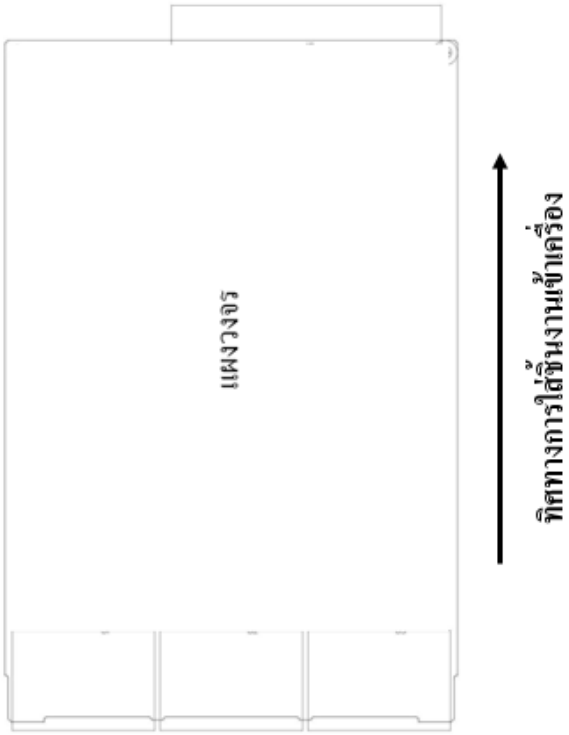
เครื่องตรวจวัดปริมาณโลหะบัดกรี (SPI M/C)					
ชื่อโปรแกรมที่เครื่อง SPI (SPI Program Name)		B036LC1B	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	T036LC1C	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
ตำแหน่งของโลหะบัดกรี (Solder Paste Position)		น้อยกว่า 25 % ($\leq 25\%$)	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	น้อยกว่า 25 % ($\leq 25\%$)	<input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO
	ครั้งที่ 1	เป้าหมาย 100%		เป้าหมาย 100%	
	ครั้งที่ 2	เป้าหมาย 100%		เป้าหมาย 100%	
	ครั้งที่ 3	เป้าหมาย 100%		เป้าหมาย 100%	
เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรี (%Volume of Solder Paste)	ครั้งที่ 4	เป้าหมาย 100%		เป้าหมาย 100%	
ลงชื่อ (Sign)					
ชื่อของช่างเทคนิค (Technician name)					
วันที่ (Date)					
เวลา (Time)					

รูปที่ 6.1 เอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์รุ่น B

6.4. การจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการ

เพื่อให้แผนการปรับปรุงเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีสามารถดำเนินไปได้อย่างยั่งยืน การออกเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานที่เครื่องสกรีนโลหะบัดกรีและเครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรีทุกครั้งที่มีการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิตให้แก่พนักงานปฏิบัติการ เป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองข้ามได้เนื่องจากพนักงานปฏิบัติการผู้อยู่ประจำเครื่องเหล่านั้นจะต้องปฏิบัติงานตามเอกสารวิธีการทำงานอย่างเคร่งครัด ได้แก่ การโดยเอกสารวิธีการทำงานของพนักงานปฏิบัติการภายหลังการปรับปรุงครั้งนี้ ดังรูปที่ 6.2



เอกสารการปฏิบัติงาน หัวข้อ: กระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี	
 *AYMHT-9053628-1422*	P/N: T9053628
กระบวนการ: สกรีนโลหะบัดกรี ลำดับงานที่: 1422	
<p>ข้อควรระวัง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ในการจับบอร์ดให้ใส่ถุงนวมทุกครั้ง และให้จับที่บริเวณขอบบอร์ดเพื่อป้องกันบอร์ดเป็นรอย 2. ตรวจสอบแผ่นพิมพ์ก่อนใช้งาน ต้องไม่มีรอยบวม หรือเสียหาย และไม่มีโลหะบัดกรีเหลือติดอยู่ในช่องที่จะสกรีน 3. กรณีแผงวงจรมีปัญหา เช่น บิดงอ, รอยข่วน ให้แยกไว้แล้วแจ้งต่อหัวหน้างานทราบ 	<p>วิธีปฏิบัติงาน</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. การจับถือบอร์ดจะต้องระวังไม่ให้โดนโลหะบัดกรีมีการสกรีนไว้แล้ว

	<p>2. แผ่นพิมพ์ที่ใช้ Tooling ID: 3-I-28036-B/T</p> <p>3. Base Screen ID: 3-S-I-28036-B/T</p> <p>4. ใช้ Template Set up ID: 4-S-28036-A-001 หรือ 4-S-9053628-A-001 ในการตั้งค่าที่ เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี</p> <p>5. เครื่องสกรีนโลหะบัดกรี</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ แผงวงจรด้านล่างใช้โปรแกรมชื่อ : B036LC1A ■ แผงวงจรด้านบนใช้โปรแกรมชื่อ : T036LC1A <p>6. เครื่องตรวจวัดปริมาตรโลหะบัดกรี</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ แผงวงจรด้านล่างใช้โปรแกรมชื่อ : B036LC1A ■ แผงวงจรด้านบนใช้โปรแกรมชื่อ : T036LC1A <p>7. ทิศทางการไหลของชิ้นงานเข้าเครื่อง ดังภาพขวามือ</p> <p>8. เพลอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรี 100±50 เพลอร์เซ็นต์</p> <p> จุดตรวจสอบ</p> <p>  </p>
--	--

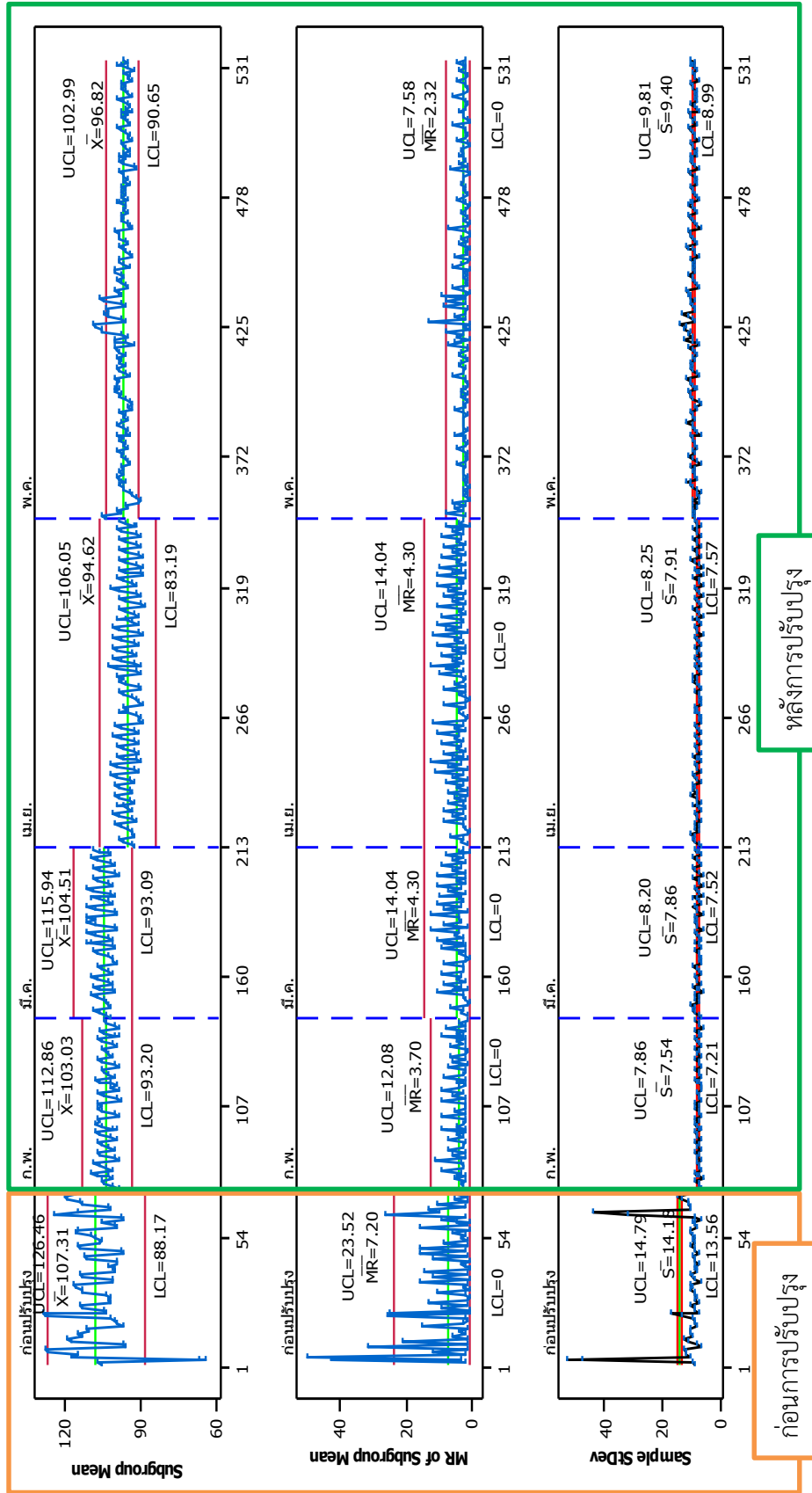
รูปที่ 6.2 เอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการ

6.5. แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาณของโลหะบัดกรี

หลังจากการจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมแก่ช่างเทคนิค และจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการแล้ว ในส่วนการเฝ้าติดตามเปอร์เซ็นต์ปริมาณโลหะบัดกรีของกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิต พนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพจะต้องทำการสุ่มตรวจค่าปริมาณโลหะบัดกรีครั้งละ 1 ชิ้นทุก 4 ชั่วโมง ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้แผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-S มาใช้แทนการใช้แผนภูมิควบคุมแบบ X-bar-S เนื่องจากต้องสุ่มวัดโลหะบัดกรีในทุกตำแหน่งของแผงวงจรทำให้แผนภูมิควบคุมแบบ X-bar-S ไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากแผนภูมิควบคุมแบบ X-bar-S ใช้ตรวจจับความผิดปกติในกรณีการวัดชิ้นงานเพียง 1 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน 1 ชิ้นเท่านั้น การใช้แผนภูมิควบคุมดังกล่าวจึงไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการผลิตในกรณีการตรวจวัดค่าหลายตำแหน่งต่อหนึ่งชิ้นงาน

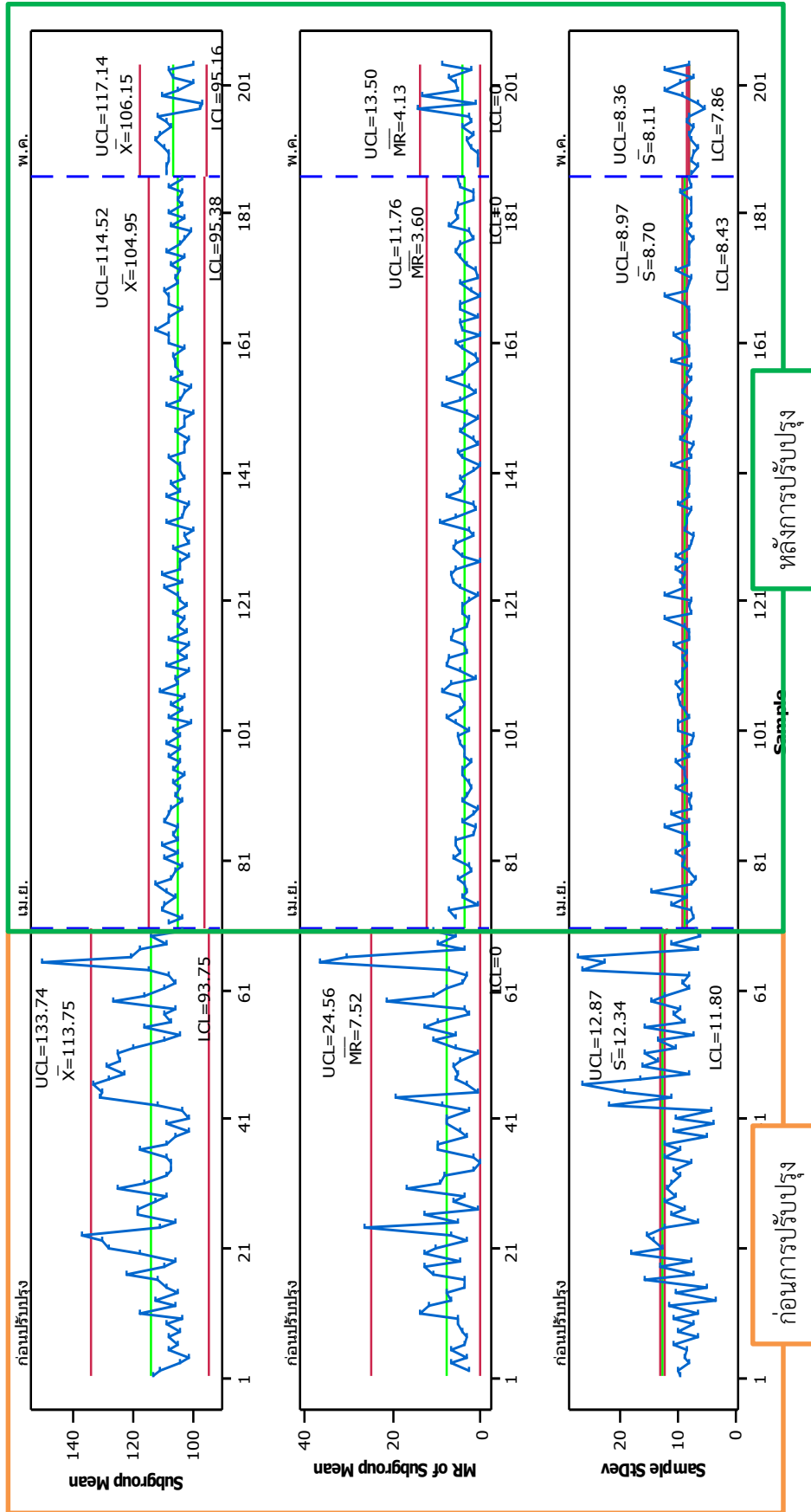
แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาณของโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่างเปรียบเทียบระหว่างก่อนการปรับปรุงและภายหลังการปรับปรุงแล้วเป็นระยะเวลา 4 เดือน โดยผลิตภัณฑ์รุ่น B จะมีรอบการผลิตเดือนละ 1 ครั้งแต่จะผลิตอย่างต่อเนื่องตามคำสั่งการผลิตในแต่ละเดือนระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ – พฤษภาคม 2559 ดังรูปที่ 6.3 และแผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาณของโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านบนเปรียบเทียบระหว่างก่อนการปรับปรุงและภายหลังการปรับปรุงแล้วเป็นระยะเวลา 3 เดือนระหว่างเดือนเมษายน – มิถุนายน 2559 ดังรูปที่ 6.4

I-MR-R/S (Between/Within) Chart of %Volume_BTM by Monthly



รูปที่ 6.3 แผนภูมิควบคุมแปรผันเริ่มต้นปริมาณของโลหะบัดกรีของแผงวงจรด้านล่าง

I-MR-R/S (Between/Within) Chart of %Volume top by Monthly



รูปที่ 6.4 แผนภูมิควบคุมเปอร์เซ็นต์ปริมาณของโลหะบัดกรีของแผงวงจรร้านบน

จากรูปที่ 6.3 พบว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรอยู่ภายใต้การควบคุมมากขึ้น ข้อมูลค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรภายหลังการปรับปรุงระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมิถุนายนใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ 100% นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีการกระจายตัวน้อยลง

แต่พบความเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรในแต่ละรอบของการผลิตโดยพบความผิดปกติของปริมาตรโลหะบัดกรีในช่วงระหว่างเดือนมีนาคมและเมษายน เมื่อตรวจสอบกลับไป จากบันทึกการผลิตของส่วนงานฝ่ายผลิตพบว่ามี การเปลี่ยนแผ่นพิมพ์ขึ้นใหม่ ซึ่งแผ่นพิมพ์ที่มีอายุการใช้งานไม่เท่ากันมีแนวโน้มที่จะให้ค่าความตึงของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ไม่เท่ากัน โดยแผ่นพิมพ์ที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา นาน ความตึงของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์จะค่อยๆ หย่อนลงทำให้ค่าปริมาตรโลหะบัดกรีมากขึ้นกว่าในกรณีของการใช้แผ่นพิมพ์ใหม่ ซึ่งนั่นคาดการณ์ว่าจะ เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีในเดือนเมษายนลดลงน้อยกว่าเดือนมีนาคม จึงเฝ้าติดตามอีกครั้งในเดือนพฤษภาคมพบว่า แนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรโลหะบัดกรีลดลงมาใกล้เคียงกับของเดือนเมษายนกัน จึงสรุปว่าการเปลี่ยนแผ่นพิมพ์ใหม่เป็นสาเหตุทำให้ค่าโลหะบัดกรีลดลง

จากรูปที่ 6.4 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะบัดกรีบนแผงวงจรด้านบนอยู่ภายใต้การควบคุมมากขึ้น ข้อมูลค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาตรภายหลังการปรับปรุงระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคมใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ 100% มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรมีการกระจายตัวน้อยลง

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1. บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสกรีนโลหะบัดกรีลงบนแผงวงจร เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ได้แก่ การศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี การค้นหาสาเหตุของปัญหาการดำเนินการแก้ไขปรับปรุงด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง ตลอดจนการควบคุมและเฝ้าติดตามผลหลังจากการปรับปรุงแก้ไข

7.1.1. สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

ผลิตภัณฑ์รุ่น B เป็นแผงวงจรรุ่นที่มีของเสียเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์รุ่นอื่นๆ ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 โดยของเสียเกิดจากกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีมากที่สุด ของเสีย 4 อันดับแรก ได้แก่ (1) ปัญหาโลหะบัดกรียึดติดกับขาข้างเคียง (2) ปัญหาโลหะบัดกรีมากเกินไป (3) ปัญหาโลหะบัดกรีน้อยเกินไป และ (4) ปัญหาไม่มีโลหะบัดกรี

7.1.2. สรุปสาเหตุของปัญหาที่มีผลกระทบต่อปริมาตรโลหะบัดกรี

การค้นหาสาเหตุของปัญหาที่มีผลกระทบต่อปริมาตรโลหะบัดกรีแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ การระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าด้วยตารางสาเหตุและผล โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีและจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขปรับปรุง ประกอบด้วย ปัญหาการกำหนดระยะทางในการแยกออกของการสกรีน ปัญหาการปรับแรงที่ใช้ในการสกรีน ปัญหาการกำหนดความเร็วในการแยกออกของการสกรีน ปัญหาการปรับความเร็วในการสกรีน และ ปัญหาการเลือกใช้ขนาดของใบปาด

และส่วนที่สอง คือ การค้นหาสาเหตุของปัญหาจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรี พบว่า ปัจจัยขาเข้าจากวิธีระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญด้านกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีครอบคลุมค่าปัจจัยขาเข้าที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ มีเพียงปัจจัยด้านความหนืดของโลหะบัดกรีเท่านั้น ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยด้านความหนืดเข้ามาเป็นปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการทดลอง แต่เนื่องจากการวัดค่าความหนืดจำเป็นต้องมีการลงทุนเพื่อจัดซื้อเครื่องมือวัดความหนืดซึ่งเครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงต้องเปลี่ยนวิธีเป็นการวัดค่าความหนืดโดยประมาณจากอายุการใช้งานของโลหะบัดกรี เพราะจากการศึกษาคุณสมบัติของโลหะบัดกรีพบว่า โลหะบัดกรีที่เริ่มเปิดใช้งานจะมีความค่าหนืดต่ำ หลังจากนั้นค่าความหนืดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจากออกซิเจนที่อยู่ในอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีในโลหะบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีมีค่าความหนืดสูงขึ้น

ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรของโลหะบัดกรีมาจากปัจจัย 6 ปัจจัย ดังนี้

- (1) ความเร็วที่ใช้ในการสกรีน
- (2) แรงที่ใช้ในการสกรีน
- (3) ความเร็วในการแยกออกของการสกรีน
- (4) ระยะทางในการแยกออกของการสกรีน
- (5) ขนาดของใบปาดและ
- (6) อายุการใช้งานของโลหะบัดกรี

7.1.3. สรุปขั้นตอนการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยเลือกใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน เพื่อคัดกรองปัจจัยว่าปัจจัยขาเข้าทั้ง 6 ปัจจัยมีปัจจัยใดบ้างมีอิทธิพลและคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป โดยเลือกใช้การออกแบบแบบแฟคทอเรียลบางส่วนที่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมแบบ IV หรือ การออกแบบการทดลองแบบ 2^{6-2} แฟคทอเรียลบางส่วน มีความเสี่ยงในคาดเดาผลลัพธ์ผิดพลาดปานกลาง ใช้จำนวนในการทดลอง 16 ครั้งและทำซ้ำจำนวน 2 ครั้งต่อแผนวงจรหนึ่งด้าน

จากนั้นนำผลการทดลองมาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อให้ข้อมูลที่มาจากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ แล้วจึงนำผลการทดลองเหล่านั้นมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ปัจจัยใดมีค่า P-Value น้อยกว่าค่าแอลฟาถือว่าไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปด้วยแผนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนแล้ว จึงนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองเหล่านั้นมาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และในกรณีที่ผลตอบสนองมากกว่า 2 ค่า การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดใช้การวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจรวม ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของฟังก์ชันความพึงพอใจในแต่ละค่า โดยการเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่าความพึงพอใจรวมที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด

7.1.4. สรุปขั้นตอนการควบคุมและติดตามผลที่เกิดจากการปรับปรุงแก้ไข

หลังจากการจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมแก่ช่างเทคนิค และจัดทำเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานแก่พนักงานปฏิบัติการ จึงเริ่มต้นการควบคุมและติดตามผลการปรับปรุงแก้ไขด้วยแผนภูมิควบคุมแบบ I-MR-S

7.2. ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากขั้นตอนการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นจะต้องตรวจสอบถึงความพร้อมและสภาพการทำงานของเครื่องจักรอยู่เสมอ โดยเฉพาะภายหลังจากการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแต่ละเดือนเพราะอาจเกิดปัญหาความแม่นยำในการปรับตั้งระยะแนวแกน Y ของกระบอกสูบและส่งผลต่อแรงที่ใช้การสกรีนได้
2. แนวทางในการทำวิจัยเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดของเสียในกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของผลิตภัณฑ์รุ่น B ในครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการสกรีนโลหะบัดกรีของผลิตภัณฑ์อื่นๆได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่มีปัจจัยหลายค่าเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต
3. แม้การปฏิบัติงานจะมีเอกสารแนะนำวิธีการปฏิบัติงานให้ส่วนงานที่เกี่ยวข้องแล้ว แต่จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะๆ เพื่อตรวจเช็คความถูกต้องในการปฏิบัติงาน
4. งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นวิธีการพื้นผิวสะท้อนแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเท่านั้น โดยในงานวิจัยหน้าควร จะทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีการแบบส่วนผสมกลางเพื่อดูผลลัพธ์ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

รายการอ้างอิง

- [1] ศุภชัย นาทะพันธ์, การควบคุมคุณภาพ (Quality Control), เล่มที่ 19, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2551.
- [2] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, “การประเมินผลระบบการวัด (MSE) สำหรับข้อมูลแบบผันแปร,” ใน *การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) (ประมวลผลด้วย Minitab 15)*, กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
- [3] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte.Ltd, 2013.
- [4] G. Groh, Writer, *Lean Six Sigma Black Belt Training*. [Performance]. Benchmark Electronics, Inc., 2015.
- [5] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, กรุงเทพมหานคร: ท้อป, 2551.
- [6] ปาริชาติ นาทะสัน, “การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, หน้า 21, 2553.
- [7] Minitab Inc., *Minitab Help-Factorial Design*, New South Wales: Minitab Inc., 2010.
- [8] ธนภัทร สุวงค์, “การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการด้ายบอนด์แบบยูเทคติก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง,” *เชียงใหม่ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2555, หน้า 8, 2555.
- [9] J. Zolgharnein, A. Shahmoradi and J. B. Ghasemib, "Comparative study of Box–Behnken, central composite, and Doehlert matrix for multivariate optimization of Pb (II) adsorption onto Robinia tree leave," *Chemometrics*, no. 27, pp. 2-20, 2013.
- [10] S. Ferreira, R. Brunsb, H. Ferreira, G. Matosa, J. Davida, G. Brand, E. d. Silvaa, L. Portugala, P. d. Reisc, A. Souzaa and W. d. Santosc, "Box-Behnken design: An

- alternative for the optimization of analytical methods," *Analytica Chimica Acta*, vol. 597, no. 2, pp. 179-186, 2007.
- [11] M. Zandieh, M. Amiri, B. Vahdani and R. Soltani, "A robust parameter design for multi-response problems," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, pp. 463-476, 2009.
- [12] C. Cojocar, M. Khayet, G. Zakrzewska-Trznadel and A. Jaworska, "Modeling and multi-response optimization of pervaporation of organic aqueous solutions using desirability function approach," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 52-63, 2009.
- [13] Minitab Inc, "I-MR-R/S (Between/Within) chart," 2015. [Online]. Available: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/quality-tools/control-charts/understanding-variables-control-charts/what-is-an-i-mr-r-s-between-within-chart/>. [Accessed 15 April 2015].
- [14] B. Scibilia, "How Could You Benefit from Between / Within Control Charts," 14 September 2014. [Online]. Available: <http://blog.minitab.com/blog/applying-statistics-in-quality-projects/how-could-you-benefit-from-between-within-control-charts>. [Accessed 25 April 2015].
- [15] B. McNeese, "Xbar-mR-R (Between/Within) Control Chart," January 2011. [Online]. Available: <http://www.spcforexcel.com/knowledge/variable-control-charts/xbar-mr-r-betweenwithin-control-chart>. [Accessed 25 April 2015].
- [16] SigmaXL, "I-MR-R/S Control Charts in Excel Using SigmaXL," 2015. [Online]. Available: <http://www.sigmaxl.com/I-MR-R.shtml>. [Accessed 15 April 2015].
- [17] M. H. Caleb Li, A. Al-Refaie and C. Y. Yang, "DMAIC Approach to Improve the Capability of SMT Solder Printing Process," *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, vol. 31, no. 2, pp. 126-133, 2008.

- [18] G. SEKHARAN, R. JAFRI MOHD, Y. SHA'RI MOHD and B. ZAILIS ABU, "OPTIMIZATION OF SOLDER PASTE PRINTING PARAMETERS USING DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)," *Jurnal Teknologi*, no. 43, pp. 11-20, 2006.
- [19] C. Y. Huang, Y. H. Lin, Y. C. and C. L. Ku, "The solder paste printing process: critical parameters, defect scenarios, specifications and cost reduction," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 211-223, 2011.
- [20] T.-N. Tsai and T. Yang, "A neuro-computing approach to the thermal profile control of the second-side reflow process in surface mount assembly," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 3, no. 16, pp. 343-359, 2005.
- [21] M. Liukkonen, T. Hiltunen, E. Havia, H. Leinonen and Y. Hiltunen, "Modeling of soldering quality by using artificial neural networks," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 2, no. 32, pp. 89-96, 2009.
- [22] C. Cherie, H. Laye Feng, M. Rita, M. Runsheng, X. Chuan and T. Desmond, "iNEMI solder paste deposition project report-optimizing solder paste printing for large and small components," in *Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2010 5th International*, Taipei, 2010.
- [23] T.-N. Tsai, "Improving the fine-pitch stencil printing capability using the Taguchi method and Taguchi fuzzy-based model," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 808-817, 2011.
- [24] J. P. C. Tong, T. F. and B. P. C. Yen, "A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement," *Springer-Verlag London*, pp. 524-531, 2004.
- [25] Xi-Ping Li, Guo-Qun Zhao, Yan-Jin Guan and Ming-Xing Ma, "Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm," *Materials and Design*, vol. 30, pp. 4317-43, 2009.
- [26] Jay C. Y. Huang, "Reducing Solder Paste Inspection in Surface-Mount Assembly

- Through Mahalanobis–Taguchi Analysis," *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING*, vol. 33, no. 4, pp. 269, 2010.
- [27] C. Cojocaru, K. M, Z.-T. G and J. A, "Modeling and multi-response optimization of pervaporation of organic aqueous solutions using desirability function approach," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 52-63, 2009.
- [28] DEK Printing Machine, Ltd., "SMT Process Design," *SMT Process Design Training Course Workbook*, pp. 6, 2008.
- [29] J. Pan and G. L. Tonkey, "A study of the aperture filling process in solder paste stencil printing," 2006.
- [30] Speedline Technologies, Inc., MPM | Accuflex Printer User Manual, Massachusetts: Speedline Technologies, Inc., 2004.
- [31] YESTech Inc., "AOI Inspection Methodology," in *YesVision™ User Manual Version 2.7*, California, YESTech Inc., 2007, pp. 48.
- [32] M. Mourabet, "Use of response surface methodology for optimization of fluoride adsorption in an aqueous solution by Brushite," *Arabian Journal of Chemistry*, pp. 5, 2014.
- [33] นภััสรวงศ์ โจรจนโรวรรณ, การควบคุมคุณภาพ (Quality Control), กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการวัดความแม่นยำของเครื่องตรวจสอบแผงวงจร

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
1	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 10:08:54 AM	phyglo00 1-c253	C01	Missing Component
11	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 10:27:36 AM	phyglo01 1-r586	C12	Tombstone
10	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 10:16:00 AM	phyglo01 0-u51	S06	Bridging Solder
26	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 10:20:07 AM	phyglo02 6-r389	P	No defect
23	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:36:35 AM	phyglo02 3-u39	S06	Bridging Solder
7	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:41:55 AM	phyglo00 7-q3	C10	Reverse Polarity
24	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:43:01 AM	phyglo02 4-u16	S06	Bridging Solder
21	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:45:03 AM	phyglo02 1-c253	S05	Excessive Solder
33	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:46:03 AM	phyglo03 3-c92	P	No defect
28	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:48:04 AM	phyglo02 8-u26	P	No defect
2	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:49:03 AM	phyglo00 2-r185	C01	Missing Component
13	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:50:12 AM	phyglo01 3-u15	C21	Lifted Up Lead
25	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:52:15 AM	phyglo02 5-r379	S13	Non wetting
8	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:53:14 AM	phyglo00 8-l3	C10	Reverse Polarity
31	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:54:47 AM	phyglo03 1-c66	P	No defect
14	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:57:44 AM	phyglo01 4-u21	C21	Lifted Up Lead
27	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 11:58:55 AM	phyglo02 7-u33	P	No defect
5	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 12:00:18 PM	phyglo00 5-c392	C07	Side Overhang
9	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-ส.ค-15 12:02:07 PM	phyglo00 9-u24	S06	Bridging Solder

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
16	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:03:20 PM	phyglo01 6-r490	C25	Upside down
30	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:05:51 PM	phyglo03 0-u5	P	No defect
20	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:06:47 PM	phyglo02 0-r219	S04	Insufficient Solder
29	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:07:49 PM	phyglo02 9-c30	P	No defect
12	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:09:08 PM	phyglo01 2-r440	C12	Tombstone
15	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:10:30 PM	phyglo01 5-r540	C25	Upside down
3	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:11:45 PM	phyglo00 3-r267	C01	Missing Component
34	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:13:05 PM	phyglo03 4-r43	P	No defect
17	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:14:18 PM	phyglo01 7-r461	S02	No Solder
18	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:16:42 PM	phyglo01 8-r136	S02	No Solder
32	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:17:43 PM	phyglo03 2-r223	P	No defect
22	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:20:41 PM	phyglo02 2-r266	S05	Excessive Solder
6	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:45:51 PM	phyglo00 6-r283	C07	Side Overhang
35	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:48:34 PM	phyglo03 5-r312	P	No defect
4	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:51:39 PM	phyglo00 4-r107	C07	Side Overhang
19	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#1	17-๙.๙-15 12:53:05 PM	phyglo01 9-c219	S04	Insufficient Solder
7	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 1:37:51 PM	phyglo00 7-q3	C10	Reverse Polarity
23	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 1:38:59 PM	phyglo02 3-u39	S06	Bridging Solder
8	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 1:39:59 PM	phyglo00 8-l3	C10	Reverse Polarity
10	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 1:42:37 PM	phyglo01 0-u51	S06	Bridging Solder
34	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 1:43:44 PM	phyglo03 4-r43	P	No defect

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
5	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 1:44:58 PM	phyglo00 5-c392	C07	Side Overhang
18	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 1:46:40 PM	phyglo01 8-r136	S02	No Solder
9	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 1:47:41 PM	phyglo00 9-u24	S06	Bridging Solder
19	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 1:55:12 PM	phyglo01 9-c219	S04	Insufficient Solder
24	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:01:40 PM	phyglo02 4-u16	S06	Bridging Solder
21	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:04:21 PM	phyglo02 1-c253	S05	Excessive Solder
2	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:05:22 PM	phyglo00 2-r185	C01	Missing Component
32	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:06:26 PM	phyglo03 2-r223	P	No defect
3	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:07:42 PM	phyglo00 3-r267	C01	Missing Component
35	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:09:00 PM	phyglo03 5-r312	P	No defect
17	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:10:26 PM	phyglo01 7-r461	S02	No Solder
26	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:11:30 PM	phyglo02 6-r389	P	No defect
4	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:12:44 PM	phyglo00 4-r107	C07	Side Overhang
25	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:13:49 PM	phyglo02 5-r379	S13	Non wetting
15	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:16:44 PM	phyglo01 5-r540	C25	Upside down
14	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:18:49 PM	phyglo01 4-u21	C21	Lifted Up Lead
22	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:20:39 PM	phyglo02 2-r266	S05	Excessive Solder
13	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:22:42 PM	phyglo01 3-u15	C21	Lifted Up Lead
27	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:23:44 PM	phyglo02 7-u33	P	No defect
31	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:25:20 PM	phyglo03 1-c66	P	No defect
16	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๓-15 2:26:14 PM	phyglo01 6-r490	C25	Upside down

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
12	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:27:14 PM	phyglo01 2-r440	C12	Tombstone
33	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:28:20 PM	phyglo03 3-c92	P	No defect
6	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:29:35 PM	phyglo00 6-r283	C07	Side Overhang
30	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:30:51 PM	phyglo03 0-u5	P	No defect
28	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:33:25 PM	phyglo02 8-u26	P	No defect
11	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:35:32 PM	phyglo01 1-r586	C12	Tombstone
20	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:36:37 PM	phyglo02 0-r219	S04	Insufficient Solder
1	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:37:56 PM	phyglo00 1-c253	C01	Missing Component
29	YTVFX16_V ER	b30148	Kancharee	Trial#2	17-๙.๙-15 2:39:46 PM	phyglo02 9-c30	P	No defect
18	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:22:10 PM	PHYGLO0 18-R136	S02	No Solder
4	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:23:24 PM	PHYGLO0 04-R107	C07	Side Overhang
34	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:25:09 PM	PHYGLO0 34-R43	P	No defect
30	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:33:43 PM	PHYGLO0 30-U5	P	No defect
3	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:37:29 PM	PHYGLO0 03-R267	C01	Missing Component
9	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 3:40:58 PM	PHYGLO0 09-U24	S06	Bridging Solder
17	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:32:40 PM	PHYGLO0 17-R461	S02	No Solder
13	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:36:18 PM	PHYGLO0 13-U15	C21	Lifted Up Lead
33	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:39:08 PM	PHYGLO0 33-C92	P	No defect
26	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:41:55 PM	PHYGLO0 26-R389	P	No defect
31	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:44:33 PM	PHYGLO0 31-C66	P	No defect
15	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:45:32 PM	PHYGLO0 15-R540	C25	Upside down

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
24	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:48:37 PM	PHYGLO0 24-U16	S06	Bridging Solder
32	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:55:35 PM	PHYGLO0 32-R223	P	No defect
2	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:56:53 PM	PHYGLO0 02-R185	C01	Missing Component
6	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 4:59:30 PM	PHYGLO0 06-R283	C07	Side Overhang
19	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:01:13 PM	PHYGLO0 19-C219	S04	Insufficient Solder
1	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:03:12 PM	PHYGLO0 01-C253	C01	Missing Component
28	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:14:51 PM	PHYGLO0 28-U26	P	No defect
7	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:16:09 PM	PHYGLO0 07-Q3	C10	Reverse Polarity
8	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:18:24 PM	PHYGLO0 08-L3	C10	Reverse Polarity
20	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:19:34 PM	PHYGLO0 20-R219	S04	Insufficient Solder
16	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:23:34 PM	PHYGLO0 16-R490	C25	Upside down
29	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:24:40 PM	PHYGLO0 29-C30	P	No defect
27	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:28:00 PM	PHYGLO0 27-U33	P	No defect
10	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:29:40 PM	PHYGLO0 10-U51	S06	Bridging Solder
12	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:31:29 PM	PHYGLO0 12-R440	C12	Tombstone
5	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:34:07 PM	PHYGLO0 05-C392	C07	Side Overhang
11	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:36:49 PM	PHYGLO0 11-R586	C01	Tombstone
22	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:38:02 PM	PHYGLO0 22-R266	S05	Excessive Solder
14	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:42:01 PM	PHYGLO0 14-U21	C21	Lifted Up Lead
23	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:45:04 PM	PHYGLO0 23-U39	S06	Bridging Solder
35	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:46:05 PM	PHYGLO0 35-R312	P	No defect

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
25	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:47:00 PM	PHYGLO0 25-R379	S13	Non wetting
21	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#1	17-๙.๙-15 5:49:27 PM	PHYGLO0 21-C253	S05	Excessive Solder
19	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:08:15 PM	PHYGLO0 19-C219	S04	Insufficient Solder
32	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:09:30 PM	PHYGLO0 32-R223	P	No defect
22	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:11:00 PM	PHYGLO0 22-R266	S05	Excessive Solder
7	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:12:26 PM	PHYGLO0 07-Q3	C10	Reverse Polarity
11	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:14:53 PM	PHYGLO0 11-R586	C01	Tombstone
4	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:17:00 PM	PHYGLO0 04-R107	C07	Side Overhang
5	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:19:19 PM	PHYGLO0 05-C392	C07	Side Overhang
10	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:20:56 PM	PHYGLO0 10-U51	S06	Bridging Solder
15	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:22:30 PM	PHYGLO0 15-R540	C25	Upside down
20	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:24:55 PM	PHYGLO0 20-R219	S04	Insufficient Solder
28	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:27:07 PM	PHYGLO0 28-U26	P	No defect
23	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:28:53 PM	PHYGLO0 23-U39	S06	Bridging Solder
12	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:29:55 PM	PHYGLO0 12-R440	C12	Tombstone
30	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:31:09 PM	PHYGLO0 30-U5	P	No defect
33	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:33:39 PM	PHYGLO0 33-C92	P	No defect
8	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:34:46 PM	PHYGLO0 08-L3	C10	Reverse Polarity
14	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:35:52 PM	PHYGLO0 14-U21	C21	Lifted Up Lead
6	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:37:33 PM	PHYGLO0 06-R283	C07	Side Overhang
3	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-๙.๙-15 6:40:12 PM	PHYGLO0 03-R267	C01	Missing Component

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
18	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:41:27 PM	PHYGLO0 18-R136	S02	No Solder
25	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:44:14 PM	PHYGLO0 25-R379	S13	Non wetting
26	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:45:45 PM	PHYGLO0 26-R389	P	No defect
17	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:47:15 PM	PHYGLO0 17-R461	S02	No Solder
35	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:48:19 PM	PHYGLO0 35-R312	P	No defect
21	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:50:32 PM	PHYGLO0 21-C253	S05	Excessive Solder
1	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:51:39 PM	PHYGLO0 01-C253	C01	Missing Component
13	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 6:52:44 PM	PHYGLO0 13-U15	C21	Lifted Up Lead
2	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:10:19 PM	PHYGLO0 02-R185	C01	Missing Component
24	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:11:43 PM	PHYGLO0 24-U16	S06	Bridging Solder
29	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:13:51 PM	PHYGLO0 29-C30	P	No defect
16	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:15:26 PM	PHYGLO0 16-R490	C25	Upside down
34	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:16:33 PM	PHYGLO0 34-R43	P	No defect
9	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:18:12 PM	PHYGLO0 09-U24	S06	Bridging Solder
27	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:19:19 PM	PHYGLO0 27-U33	P	No defect
31	YTVFX16_V ER	a31412	Watsana	Trial#2	17-ส.ค-15 8:21:57 PM	PHYGLO0 31-C66	P	No defect
7	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ส.ค-15 2:41:07 PM	PHYGLO0 07-Q3	C10	Reverse Polarity
15	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ส.ค-15 2:47:17 PM	PHYGLO0 15-R540	C25	Upside down
2	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ส.ค-15 2:48:19 PM	PHYGLO0 02-R185	C01	Missing Component
21	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ส.ค-15 2:49:26 PM	PHYGLO0 21-C253	S05	Excessive Solder
12	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ส.ค-15 2:50:25 PM	PHYGLO0 12-R440	C12	Tombstone

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
35	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:51:55 PM	PHYGLO0 35-R312	P	No defect
26	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:54:09 PM	PHYGLO0 26-R389	P	No defect
30	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:55:45 PM	PHYGLO0 30-U5	P	No defect
17	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:56:39 PM	PHYGLO0 17-R461	S02	No Solder
13	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:59:24 PM	PHYGLO0 13-U15	C21	Lifted Up Lead
3	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:00:33 PM	PHYGLO0 03-R267	C01	Missing Component
28	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:01:38 PM	PHYGLO0 28-U26	P	No defect
6	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:03:13 PM	PHYGLO0 06-R283	C07	Side Overhang
31	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:04:15 PM	PHYGLO0 31-C66	P	No defect
22	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:05:56 PM	PHYGLO0 22-R266	S05	Excessive Solder
24	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:08:09 PM	PHYGLO0 24-U16	S06	Bridging Solder
32	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:09:29 PM	PHYGLO0 32-R223	P	No defect
23	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:10:51 PM	PHYGLO0 23-U39	S06	Bridging Solder
5	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:12:09 PM	PHYGLO0 05-C392	C07	Side Overhang
20	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 3:13:12 PM	PHYGLO0 20-R219	S04	Insufficient Solder
25	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:04:49 PM	PHYGLO0 25-R379	S13	Non wetting
4	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:06:12 PM	PHYGLO0 04-R107	C07	Side Overhang
10	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:11:24 PM	PHYGLO0 10-U51	S06	Bridging Solder
16	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:18:23 PM	PHYGLO0 16-R490	C25	Upside down
9	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:19:37 PM	PHYGLO0 09-U24	S06	Bridging Solder
27	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຄ-15 2:21:00 PM	PHYGLO0 27-U33	P	No defect

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
18	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:22:22 PM	PHYGLO0 18-R136	S02	No Solder
14	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:25:44 PM	PHYGLO0 14-U21	C21	Lifted Up Lead
11	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:26:43 PM	PHYGLO0 11-R586	C12	Tombstone
34	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:28:10 PM	PHYGLO0 34-R43	P	No defect
33	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:31:40 PM	PHYGLO0 33-C92	P	No defect
1	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:32:35 PM	PHYGLO0 01-C253	C01	Missing Component
29	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:33:46 PM	PHYGLO0 29-C30	P	No defect
19	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:34:41 PM	PHYGLO0 19-C219	S04	Insufficient Solder
8	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#1	18-ສ.ຕ-15 2:35:59 PM	PHYGLO0 08-L3	C10	Reverse Polarity
30	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:20:08 PM	PHYGLO0 30-U5	P	No defect
24	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:21:03 PM	PHYGLO0 24-U16	S06	Bridging Solder
34	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:22:05 PM	PHYGLO0 34-R43	P	No defect
19	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:22:59 PM	PHYGLO0 19-C219	S04	Insufficient Solder
18	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:24:51 PM	PHYGLO0 18-R136	S02	No Solder
4	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:25:56 PM	PHYGLO0 04-R107	C07	Side Overhang
15	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 3:27:14 PM	PHYGLO0 15-R540	C25	Upside down
1	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:14:45 PM	PHYGLO0 01-C253	C01	Missing Component
12	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:16:38 PM	PHYGLO0 12-R440	C12	Tombstone
23	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:17:42 PM	PHYGLO0 23-U39	S06	Bridging Solder
26	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:18:55 PM	PHYGLO0 26-R389	P	No defect
14	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:23:39 PM	PHYGLO0 14-U21	C21	Lifted Up Lead

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
10	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:24:38 PM	PHYGLO0 10-U51	S06	Bridging Solder
6	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:26:43 PM	PHYGLO0 06-R283	C07	Side Overhang
35	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:27:48 PM	PHYGLO0 35-R312	P	No defect
21	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:28:58 PM	PHYGLO0 21-C253	S05	Excessive Solder
13	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:31:07 PM	PHYGLO0 13-U15	C21	Lifted Up Lead
16	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:33:02 PM	PHYGLO0 16-R490	C25	Upside down
29	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:34:03 PM	PHYGLO0 29-C30	P	No defect
27	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:36:35 PM	PHYGLO0 27-U33	P	No defect
33	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:40:17 PM	PHYGLO0 33-C92	P	No defect
2	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:41:19 PM	PHYGLO0 02-R185	C01	Missing Component
25	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:42:23 PM	PHYGLO0 25-R379	S13	Non wetting
17	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:45:22 PM	PHYGLO0 17-R461	S02	No Solder
22	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:47:53 PM	PHYGLO0 22-R266	S05	Excessive Solder
7	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:48:59 PM	PHYGLO0 07-Q3	C10	Reverse Polarity
3	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:50:59 PM	PHYGLO0 03-R267	C01	Missing Component
9	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:53:24 PM	PHYGLO0 09-U24	S06	Bridging Solder
32	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:54:33 PM	PHYGLO0 32-R223	P	No defect
20	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:55:34 PM	PHYGLO0 20-R219	S04	Insufficient Solder
11	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:56:33 PM	PHYGLO0 11-R586	C12	Tombstone
5	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:58:45 PM	PHYGLO0 05-C392	C07	Side Overhang
28	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ສ.ຕ-15 4:59:54 PM	PHYGLO0 28-U26	P	No defect

Sample Number	System ID	Inspector	Inspector Name	TRIAL	Date	SN	Defect Code	Defect Type
8	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ส.ค-15 5:00:49 PM	PHYGLO0 08-L3	C10	Reverse Polarity
31	YTVFX16_V ER	b10346	Seenual	Trial#2	18-ส.ค-15 5:01:53 PM	PHYGLO0 31-C66	P	No defect



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณฤดี อินทนะนุก เกิดเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในปีการศึกษา
2549 ภายหลังจากจบการศึกษาได้เข้าปฏิบัติงานยังบริษัทประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในตำแหน่ง
วิศวกรฝ่ายผลิต หลังจากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556



