

การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสำหรับการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



นางสาวปิยะวรรณ สิงห์ภูกาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEFECT REDUCTION OF COATING PROCESS FOR ELECTRONIC CIRCUIT BOARD PRODUCTI
ON



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสำหรับการผลิต แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
โดย	นางสาวปิยะวรรณ สิงห์ภูงาม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ธีรจิรวณิช)

ปิยะวรรณ สิงหะภูกาม : การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสำหรับการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (DEFECT REDUCTION OF COATING PROCESS FOR ELECTRONIC CIRCUIT BOARD PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดา เนตร, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียและระยะเวลาการทำงานในกระบวนการเคลือบผิวแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา โดยศึกษาลักษณะผลิตภัณฑ์และกระบวนการเคลือบผิว ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวเคลือบ ได้แก่ ความดันในหัวพ่น (P) ที่ 1.5 และ 2.5 KPa ระยะห่างระหว่างหัวพ่นถึงพื้นผิวของแผงวงจร (H) ที่ 2 4 6 และ 8 ซม. และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่น (V) ที่ 0 10 15 20 และ 25 ซม./วินาที ตามลำดับ ตรวจวัดความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และสภาพผิวเคลือบ เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา ได้แก่ (1) ร้อยละของของดีในครั้งแรก (First Time Yield; FTY) ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิว (2) เวลาที่ใช้ในการพ่นเคลือบผิวเฉลี่ยต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ (3) เวลารวมในกระบวนการเคลือบผิว

ผลการศึกษาพบว่า (1) ความดัน (P) ที่ 2.5 KPa ความสูง (H) 2 ซม. และความเร็ว (V) 15 ซม./วินาที จะให้คุณภาพผิวเคลือบสม่ำเสมอมากที่สุด และให้ความหนาผิวเคลือบเท่ากับ 54.06 ไมโครเมตร แต่จะให้รอบเวลาในการพ่นช้าที่สุดเท่ากับ 64.33 วินาที/แผงวงจร (2) การเพิ่มความสูง (H) ที่ 4 ซม. และความเร็ว (V) ที่ 15 ซม./วินาที ขณะที่ความดัน (P) คงเดิมที่ 2.5 KPa จะให้ความหนาผิวเคลือบเท่ากับ 47.84 ไมโครเมตรซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด เพราะมีข้อจำกัดเรื่องความสูงของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆซึ่งมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 2.5 ซม. และอยู่ในข้อกำหนดความหนาผิว 50 ±20 ไมโครเมตร โดยให้รอบเวลาในการพ่นลดลงเป็น 57.33 วินาที/แผงวงจร ซึ่งก็ยังสูงกว่าเดิมที่ 51.20 วินาที/แผงวงจร โดยโรงงานกำหนดความดัน (P) ที่ 2.5 กิโลปาสคาล ความสูง (H) 6 ซม. และความเร็ว (V) 25 ซม./วินาที แต่จะให้คุณภาพผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอและต้องผ่านขั้นตอนปรับแก้ไขทั้งหมด (3) ร้อยละของของดี (FTY) ที่ผ่านขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.67 ซึ่งเดิมต้องปรับแก้ไขทั้งหมด (4) ระยะเวลารวมในกระบวนการเคลือบผิวด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติและแก้ไขผิวชิ้นงานเฉลี่ยต่อแผงวงจรลดลงจากเดิม 123.13 วินาที เหลือ 59.72 วินาที เนื่องจากการลดปริมาณงานปรับแก้ไขชิ้นงานบกพร่องในขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770232821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS:

PIYAWAN SINGHAPUKAM: DEFECT REDUCTION OF COATING PROCESS FOR ELECTRONIC CIRCUIT BOARD PRODUCTION. ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D.b, 133 pp.

The objective of this research was to reduce the defect and working time in the coating process of electronic printed circuit board assembly (PCBA) of the case study factory. The product characteristics and coating process were studied. The process factors influencing on the coating quality were controlled which were (1) the pressure in the nozzle (P) at 1.5 and 2.5 KPa, (2) the distance between the nozzle and the work-piece surface (H) at 2, 4, 6 and 8 cm, and (3) the coating speed (V) at 10, 15 and 20 cm/sec. The coating layer of the specimens being thickness, diameter, and surface quality were inspected. The study results of (1) the first time yield (FYT), (2) the average of coating time per board, and (3) the total working time in coating process were compared to the existing.

The result was found that (1) the pressure (P) at 2.5 KPa, the distance (H) at 2 cm, and speed (V) at 15 cm/sec provided the best consistency quality surface with the average thickness of 54.06 μ m, but longest coating time of 64.33 sec/board. (2) increasing the distance (H) at 4 cm and speed (V) at 15 cm/sec while constant pressure at 2.5 KPa could be the suitable condition to the product due to the limitation of the height of the various electronic pieces ranged from 0.2 to 2.5 cm, and also provide the average thickness of 47.84 μ m closed to the specification of 50 \pm 20 μ m and coating time of 57.33 sec/board. However, the existing condition that the factory applied the pressure (P), distance (H), and speed (V) at 2.5 KPa, 6 cm and 25 cm/sec, respectively gave less coating time of 51.20 sec/board but very poor quality surface and had to rework. (3) The FYT was increased from 0 to 96.67%, and (4) the total coating process time was decreased from 123.13 to 59.72 sec/board due to the decrease of the reworked.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รวมถึงประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ การแนะนำทฤษฎีต่างๆมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงแนวทางในการดำเนินงานวิจัยที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทางคณะผู้บริหารของโรงงานกรณีศึกษาทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลและดำเนินงานวิจัยภายในโรงงาน ขอขอบคุณพนักงานทุกคนที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีสำหรับงานวิจัย ให้คำปรึกษาแนะนำข้อมูลต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ ครอบครัวและเพื่อนๆที่ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ และเป็นเบื้องหลังความสำเร็จการศึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความสำคัญของการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	4
2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด.....	5
2.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ.....	7
2.4 แนวทางในการออกแบบการทดลอง.....	9
2.5 การเลือกรูปแบบการทดลอง.....	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3.....	16

การศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษา.....	16
3.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา	16
3.2 สภาพปัญหาที่พบในปัจจุบัน	34
บทที่ 4	46
วิธีการดำเนินงานวิจัย	46
4.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์	46
4.2 วิธีการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน.....	47
4.3 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง.....	49
4.4 วิธีการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง	59
4.5 วิธีการวัดความหนาของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	60
4.6 วิธีวัดความกว้างของการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	61
4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	62
4.8 วิธีการเปรียบเทียบผลการทดลองแบบเดิมและแบบใหม่	62
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	63
5.1 ผลการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน.....	63
5.2 ผลการทดลองบนแผ่นทดลอง (PCB).....	69
5.3 ผลการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง.....	105
5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง	110
บทที่ 6	116
สรุปผลการศึกษา ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ.....	116
6.1 สรุปผลการศึกษา	116
6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย	117
6.3 ข้อเสนอแนะ	117

รายการอ้างอิง 118

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 133



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1 จำนวนของเสียเฉลี่ยของแต่ละประเภทจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ของผลิตภัณฑ์ (SL) ในช่วงเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560	44
ตารางที่ 4.1 การกำหนดระดับปัจจัยและออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V = 0$)	50
ตารางที่ 4.2 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$)	52
ตารางที่ 4.3 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$) (ต่อ).....	53
ตารางที่ 4.4 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$) (ต่อ).....	54
ตารางที่ 4.5 การกำหนดระดับปัจจัยและออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V > 0$)	55
ตารางที่ 4.6 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V>0$)	57
ตารางที่ 4.7 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V>0$) (ต่อ).....	58
ตารางที่ 4.8 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V>0$) (ต่อ).....	59
ตารางที่ 5. 1 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิวชิ้นงาน	67
ตารางที่ 5.2 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิวชิ้นงาน (ต่อ)	68
ตารางที่ 5.3 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว ($V = 0$)	70
ตารางที่ 5.4 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว ($V = 0$) (ต่อ).....	71
ตารางที่ 5.5 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย ที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว ($V>0$)	90
ตารางที่ 5.6 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย ที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว ($V>0$ (ต่อ).....	91
ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง	105
ตารางที่ 5.8 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน	106
ตารางที่ 5.9 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ)....	107

ตารางที่ 5.10 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ).. 108

ตารางที่ 5.11 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ).. 109

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการเคลื่อนด้วยเครื่องอัตโนมัติและขั้นตอนการ
แก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร..... 112

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการศึกษาก่อนและหลังการปรับปรุง 114



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างก่อนการเคลือบและหลังการเคลือบด้วยน้ำยาซิลิโคน	2
รูปที่ 2.1 การเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติ	4
รูปที่ 2.2 หลักการพาเรโต (กิตติศักดิ์, 2550).....	6
รูปที่ 2.3 แผนภูมิควบคุม	7
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของแต่ละผลิตภัณฑ์ในโรงงานกรณีศึกษา	18
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตหลักของโรงงานกรณีศึกษา.....	19
รูปที่ 3.3 แผงวงจรก่อนและหลังการพิมพ์ตะกั่วลงบนลายแผงวงจร	20
รูปที่ 3.4 การวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องวางอัตโนมัติ.....	20
รูปที่ 3.5 การตรวจสอบแผงวงจรก่อนเข้าเครื่องอบความร้อนด้วยพนักงาน	21
รูปที่ 3.6 เครื่องและโปรแกรมหลอมละลายตะกั่วให้เข้าอุปกรณ์กับแผงวงจรเชื่อมติดกัน	21
รูปที่ 3.7 เครื่องตรวจจับความผิดพลาดแผงวงจร	22
รูปที่ 3.8 การตรวจสอบแผงวงจรด้วยเครื่องช่วยขยาย	22
รูปที่ 3.9 เครื่องตัดแยกแผงวงจร	23
รูปที่ 3.10 ลักษณะการวางตัวอุปกรณ์ชนิดขาทะลุแผงวงจรและตรวจสอบข้อของตัวอุปกรณ์	23
รูปที่ 3.11 เครื่องโซลเดอร์เวฟ	24
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแผงวงจร ICT	24
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการทำงาน FCT.....	25
รูปที่ 3.14 เครื่องทำความสะอาดแผงวงจร	26
รูปที่ 3.15 กระบวนการเคลือบแผงวงจร.....	27
รูปที่ 3.16 กระบวนการตรวจสอบและแก้ไขชิ้นงาน	27
รูปที่ 3.17 เครื่องอบแผงวงจร	28
รูปที่ 3.18 ลักษณะการบรรจุหีบห่อ	28

รูปที่ 3.19	ขั้นตอน SMT.....	30
รูปที่ 3.20	ขั้นตอน SMT และขั้นตอน WS	31
รูปที่ 3.21	ขั้นตอน ICT และขั้นตอน FCT	32
รูปที่ 3.22	ขั้นตอน CT และขั้นตอน PS.....	33
รูปที่ 3.23	ของเสียของแต่ละขั้นตอนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา ในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	35
รูปที่ 3.24	ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	37
รูปที่ 3.25	ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	39
รูปที่ 3.26	ร้อยละมูลค่าความสูญเสียของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2559	39
รูปที่ 3.27	ร้อยละยอดขายของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึง เดือนมีนาคม 2560	40
รูปที่ 3.28	ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	41
รูปที่ 3.29	ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	41
รูปที่ 3.30	ร้อยละของจำนวนการผลิตแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	42
รูปที่ 3.31	ร้อยละของมูลค่าความสูญเสียของแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือน เมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560	42
รูปที่ 3.32	ตัวอย่างประเภทของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องของกระบวนการเคลือบแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์	43
รูปที่ 3.33	แผนภาพพาเรโตแสดงจำนวนของเสียเฉลี่ยแต่ละประเภทจากขั้นตอนการเคลือบ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของผลิตภัณฑ์ (SL) ในช่วงเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560	45

รูปที่ 4.1 แบบจำลองตำแหน่งวัดค่าความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา	61
รูปที่ 4.2 แบบจำลองตำแหน่งวัดค่าความกว้างของการกระจายตัวของน้ำยาด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์	61
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	64
รูปที่ 5.2 ลักษณะการพันเคลือบด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติ	65
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งการพันเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	65
รูปที่ 5.4 ผลการศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	66
รูปที่ 5.5 ลักษณะแฉวการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	69
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 1 วินาที	74
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 5 วินาที	74
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 10 วินาที	75
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 15 วินาที	75
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 20 วินาที	76
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน	77
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบเฉลี่ย (ϕ) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน	77
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$	78
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$	79

รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$	80
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$	80
รูปที่ 5.17 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$).....	82
รูปที่ 5.18 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$).....	83
รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$).....	84
รูปที่ 5.20 Main Effect Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v=0$	85
รูปที่ 5.21 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v=0$	86
รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$).....	87
รูปที่ 5.23 Main Effect Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v=0$	88
รูปที่ 5.24 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v=0$	89
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน.....	93
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน.....	93
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน.....	94
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน.....	95
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย(ϕ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa ระดับความสูง (H)และความเร็ว (V) ต่างๆกัน.....	96

รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย(σ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa ระดับความสูง (H)และความเร็ว (V) ต่างๆกัน	96
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย(σ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 และ 2.5 KPa ในระดับความสูง (H) และความเร็ว (V) ต่างๆกัน	98
รูปที่ 5.32 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V>0$).....	99
รูปที่ 5.33 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V>0$).....	99
รูปที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V>0$).....	100
รูปที่ 5.35 Main Effect Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v>0$	101
รูปที่ 5.36 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v>0$	102
รูปที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V>0$).....	103
รูปที่ 5.38 Main Effect Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v>0$	104
รูปที่ 5.39 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v>0$	105
รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบค่าร้อยละของข้อดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) โดยเฉลี่ย.....	111
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบรอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติ (Cycle Time) โดยเฉลี่ย	111
รูปที่ 5.42 ลักษณะของผิวเคลือบของแต่ละแบบ	113
รูปที่ 5. 43 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา	115

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ส่งผลให้มีการแข่งขันกันมากยิ่งขึ้นไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ก็จะต้องมีการตื่นตัว พร้อมรับมือกับสิ่งใหม่ๆให้กับองค์กรและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างความมั่นคงขององค์กรและเพื่อสามารถแข่งขันกับคู่แข่งในด้านการตลาดอุตสาหกรรมประเภทเดียวกันได้ โดยทั่วไปสิ่งที่จะทำให้องค์กรประสบความสำเร็จได้นั้นจะต้องมีการปรับปรุงพัฒนากระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพเป็นไปตามมาตรฐานและขีดจำกัดข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างความเชื่อถือและความพึงพอใจให้กับลูกค้า ดังนั้นการปรับปรุงพัฒนาและการศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อนำไปสู่การควบคุมกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญที่องค์กรควรคำนึงและใส่ใจเป็นอย่างมาก

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

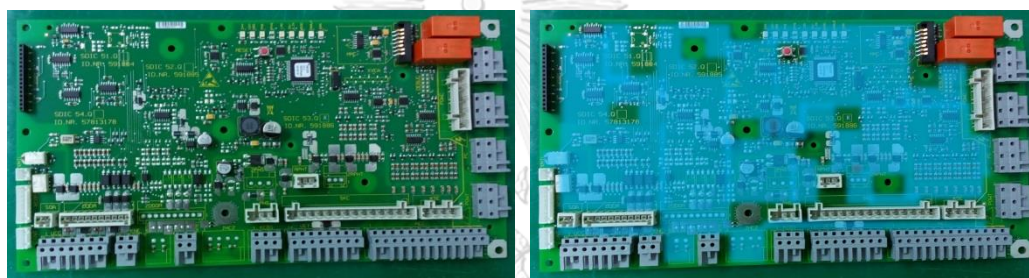
สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีฐานการผลิตขยายตัวเพิ่มมากขึ้นมีการย้ายฐานการผลิตทางทวีปยุโรปและอเมริกาที่มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าทวีปเอเชีย ประเทศไทยก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นักลงทุนด้านธุรกิจอิเล็กทรอนิกส์ให้ความสำคัญที่จะย้ายฐานการผลิตเข้ามาในประเทศไทยเพราะมีต้นทุนแรงงานต่ำและการผลิตที่ได้มาตรฐานเทียบเท่ากับการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สากล นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มานานกว่า 50 ปีถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจในประเทศอย่างมาก โดยสร้างรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกในปี 2558 มีมูลค่าการส่งออก 31,985.3 ล้านเหรียญสหรัฐฯ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2558)

นอกจากนี้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และยังเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการดำเนินชีวิตในยุคปัจจุบัน ซึ่งจะพบเห็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ในอุปกรณ์ทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวัน อาทิเช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน ระบบควบคุมยานพาหนะต่างๆ ระบบสื่อสารสารสนเทศ ระบบเครื่องปรับอากาศ ระบบเครื่องขยายเสียง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในสำนักงานหรือองค์กร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางทหาร เป็นต้น ดังนั้นเมื่อความต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของผู้บริโภคมากขึ้นจึงต้องพัฒนากระบวนการผลิตสินค้าให้ตอบสนองกับความต้องการ

ตามพฤติกรรมของลูกค้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา รวมไปถึงการผลิตสินค้าที่มีความน่าเชื่อถือในเรื่องคุณภาพ ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวม จึงเป็นอีกหนึ่งกระบวนการสำคัญ ที่ทำหน้าที่เคลือบคลุมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยน้ำยาซิลิโคน เพื่อป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง การเกิดไฟฟ้าสถิต การกัดกร่อนจากสารเคมีจากสภาพแวดล้อมการใช้งานและป้องกันการสูญหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจรรวม ซึ่งลักษณะสีของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ผ่านการเคลือบแผงวงจรจะมีสีเขียวแต่เมื่อผ่านการเคลือบแล้วแผงวงจรจะมีสีฟ้าดังรูปที่ 1.1 ตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก่อนการเคลือบและหลังการเคลือบน้ำยาซิลิโคน เนื่องจากการป้องกันดังกล่าวด้วยขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวม

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างก่อนการเคลือบและหลังการเคลือบด้วยน้ำยาซิลิโคน



ก่อนเคลือบน้ำยา

หลังเคลือบน้ำยา

ปัจจุบันขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวมของโรงงานกรณีศึกษาต้องเผชิญกับปัญหาของเสียที่เกิดจากการเคลือบไม่ครบพื้นที่ที่กำหนด (Insufficient Coating) เป็นจำนวนมาก ทำให้ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเนื่องจากต้องเสียเวลาในการแก้ไขใหม่ (Rework) สูงกว่าที่ควรจะเป็น และเป็นอุปสรรคต่อการขยายตัวของธุรกิจทางผู้บริหารจึงมีนโยบายในการลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสที่จะได้รับผลกำไรที่มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงจัดทีมงานที่มีความเชี่ยวชาญเพื่อทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดของเสีย คือ เครื่องเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวมมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีของเสียลดลงและลดการแก้ไขใหม่ (Rework) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตและสร้างมูลค่าเพิ่มของผลกำไรจากสถานะปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเคลือบอัตโนมัติให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

1. เพื่อลดของเสียประเภทการเคลือบน้ำยาไม่ครบพื้นที่ (Insufficient Coating) ในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2. เพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยมีดังนี้

1. ทำการศึกษาเพื่อลดการแก้ไขใหม่ (Rework) ในกระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในโรงงานกรณีศึกษาของผลิตภัณฑ์ (SL) รุ่น SL239 เท่านั้น
2. ดำเนินการกิจกรรมเพื่อการแก้ไขและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับลิฟต์ภายในโรงงานกรณีศึกษาเท่านั้น
3. ของเสียในที่นี้สามารถซ่อมได้ซึ่งเรียกว่า ชิ้นงานแก้ไข

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

1. ทีมสนับสนุนการปรับปรุงกระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
2. ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมต่อผิวเคลือบในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด
3. ลดปริมาณของเสียประเภทเคลือบไม่ครบพื้นที่ที่กำหนดในกระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา
4. ลดต้นทุนความสูญเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทการเคลือบน้ำยาไม่ครบพื้นที่ที่กำหนด
5. เป็นแนวทางในการลดต้นทุนสำหรับขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันและเพิ่มผลกำไรที่จะได้รับ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษากระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และรวบรวมข้อมูลของปัญหา
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปัญหา
3. ค้นหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหา
4. กำหนดแนวทางในการแก้ไขปัญหา
5. ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
6. การนำไปประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงความสำคัญของการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ แนวทางในการออกแบบการทดลอง การเลือกรูปแบบการทดลอง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความสำคัญของการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ PCBA Coating (Printed Circuit Board Assembly Coating) เพื่อป้องกันสภาพแวดล้อมที่มีผลกับวงจรีเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้งานให้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้การเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากความชื้น สารเคมีและสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดสนิมกัดกร่อนและไฟฟ้าลัดวงจร ซึ่งการป้องกันจากสภาพแวดล้อมจะรวมถึงการถูกกระทำจากวัตถุ เช่น การจับถือ การสั่นสะเทือน การถูกขูดหรือรอยถลอก และหน้าที่สำคัญอีกด้านหนึ่งของการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังรวมถึงการเป็นฉนวนแต่ละชั้นในการบรรจุภัณฑ์ การยึดเกาะของสารเคมีป้องกันสนิมแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นความถี่ทางเสียงและการเกิดไฟฟ้าสถิต (ESD) การเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่นำไปใช้งานและหน้าที่การทำงานของวงจรีเล็กทรอนิกส์นั้น ๆ อย่างไรก็ตามความต้องการพื้นฐานอย่างหนึ่งในการเคลือบก็คือ ยึดเกาะที่ดี ทนต่อสภาพแวดล้อมการใช้งาน



รูปที่ 2.1 การเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติ

2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด

เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 ชนิดนี้ ถูกตั้งชื่อตามนักรบในตำนานของชาวญี่ปุ่นที่ชื่อ "เบงเค" (Ben-ke) ผู้ซึ่งมีอาวุธอันร้ายกาจแตกต่างกันทั้งหมด 7 ชนิด พกอยู่ที่หลัง และสามารถเลือกดึงมาใช้สยบคู่ต่อสู้ที่มีฝีมือร้ายกาจคนแล้วคนเล่า สำหรับเครื่องมือทั้ง 7 ชนิด สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

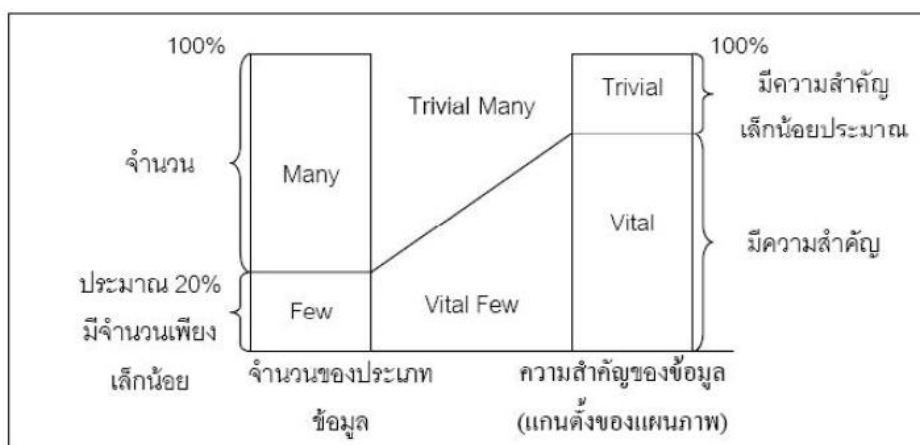
1) ใบตรวจสอบ (Check Sheet) คือ แผ่นที่มีแบบฟอร์มซึ่งได้รับการออกแบบให้สามารถเข้าใจง่าย โดยส่วนใหญ่จะมีการออกแบบให้กรอกข้อมูลลงในช่องว่างต่างๆและที่พิมพ์มาเรียบร้อย เพื่อให้ผู้บันทึกสามารถลงบันทึกข้อมูลต่างๆ ตามในช่องว่างได้โดยสะดวกไม่ยุ่งยาก ป้องกันความผิดพลาดสำหรับการจดบันทึกข้อมูล และมีการเขียนน้อยที่สุดสะดวกต่อผู้อ่านหรือผู้นำไปใช้ ดังนั้นในการออกแบบแผ่นแบบฟอร์มจึงมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อช่วยให้การกรอกข้อมูลเป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็วและสามารถนำข้อมูลที่จดบันทึกไปใช้ได้ง่ายที่สุด โดยทั่วไปลักษณะของใบตรวจสอบบนหัวกระดาษใบตรวจสอบจะมีรายละเอียดของผู้ตรวจสอบที่กำลังตรวจสอบสินค้าชนิดอะไร จากกล่องไหน ที่ไหน หมายเลขสินค้าอะไร ระบุวันที่การตรวจสอบ จำนวนที่ถูกตรวจสอบเท่าไร พนักงานผู้ตรวจสอบคือใคร และลักษณะที่วัดเป็นอย่างไร ส่วนในตรวจสอบที่มีลักษณะเป็นตารางแสดงรายละเอียดต่างๆ ที่ต้องการตรวจสอบไว้พร้อมแล้ว สามารถใช้ปฏิบัติได้โดยไม่ต้องกรอกรายละเอียดใหม่ เพียงแต่กรอกรายละเอียดลงในช่องที่ตรงกับรายละเอียดนั้น หรือ กรอกผล นอกจากนี้ยังมีใบตรวจสอบอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถสร้างความเข้าใจให้กับผู้ปฏิบัติงานเข้าใจง่ายอีกแบบหนึ่งคือใบตรวจสอบที่แสดงภาพ เช่น แสดงรอยตำหนิบนสินค้า ซึ่งนิยมใช้กันในการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงาน

2) ฮิสโทแกรม (Histogram) เป็นแผนภูมิที่แสดงความถี่ของสิ่งที่เกิดขึ้น โดยแสดงเป็นรูปแบบของกราฟแท่งสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากันและแต่ละแท่งเรียงติดกัน โดยมีวิธีสร้างฮิสโทแกรมทำได้ดังนี้ เริ่มจากการเก็บรวบรวมข้อมูลของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นกำหนดจำนวนช่วงหรือแท่งของกราฟที่ต้องการแสดง โดยปกติจะกำหนดให้มีแท่งกราฟอยู่ที่ประมาณ 8-12 แท่ง หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าของแต่ละช่วงซึ่งค่าที่กำหนดจะต้องครอบคลุมทุกค่าของข้อมูลที่เก็บได้และต้องไม่มีค่าใดตกอยู่ในช่วงข้อมูลมากกว่า 1 ช่วง สุดท้ายนับจำนวนข้อมูลแต่ละช่วงแล้วเขียนเป็นกราฟฮิสโทแกรม

3) แผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2550) แผนภาพที่เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูลที่ใช้ในการจำแนกประเภท ซึ่งแผนภาพพาเรโตแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีข้อมูลมีเสถียรภาพ และกรณีข้อมูลไม่มีเสถียรภาพ

เมื่อข้อมูลอยู่ในสภาวะเสถียรภาพแล้ว โดยข้อมูลที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยในส่วนข้อมูลที่มีความสำคัญเล็กน้อยจะมีจำนวนมาก ซึ่งตัวแบบของความมีเสถียรภาพของ

ข้อมูลนั้นจะมีลักษณะข้อมูลที่มีความสำคัญมากประมาณ 80% ของตัวชี้วัดความสำคัญทั้งหมด และมาจากประเภทข้อมูลเพียงเล็กน้อยประมาณ 20% ของประเภทข้อมูลทั้งหมด หรือเรียก กฎหลักการพาเรโตอีกอย่างนี้ว่า กฎ 80-20 สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการพาเรโต (กิตติศักดิ์, 2550)

4) ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) อาจจะเรียกย่อๆ ว่า ผังก้างปลา หรือ ถ้าในภาษาอังกฤษอาจใช้ตัวย่อว่า CE Diagram ซึ่งมีนิยามปรากฏในมาตรฐานของญี่ปุ่น หรือ JIS Standards (Japanese Industrial Standards) โดยมาตรฐาน JIS ได้ระบุนิยามของ CE Diagram ไว้คือ ผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางด้านคุณภาพ กับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องคือผลที่เกิดขึ้นจากเหตุ ที่เป็นต้นเหตุของคุณลักษณะอันนั้น หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นแผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อค้นหาสาเหตุต่างๆ ว่ามีอะไรบ้างที่มาเกี่ยวข้องกันสัมพันธ์กันอย่างไรถึงส่งผลทำให้ผลปรากฏตามมาในขั้นสุดท้าย โดยวิธีการระดมความคิดอย่างเป็นอิสระของทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมด้านการควบคุมคุณภาพ ประโยชน์ของการใช้ผังก้างปลา ได้แก่

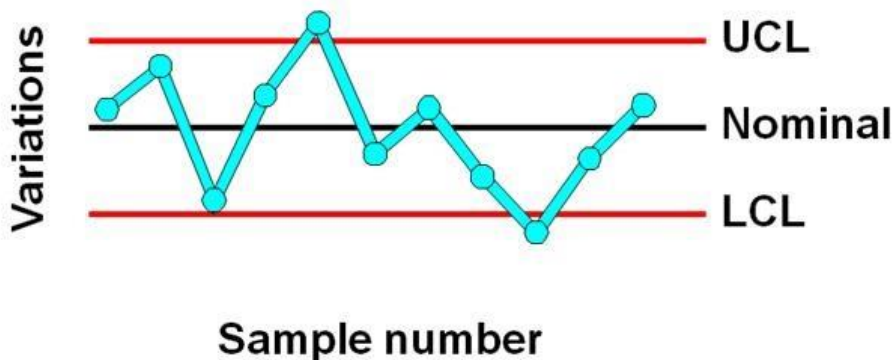
- ใช้เป็นเครื่องมือในการระดมความคิดจากสมองของทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องจากกลุ่มคุณภาพอย่างเป็นหมวดหมู่ ในที่นี้ยิ่งได้ผลมากที่สุด
- แสดงให้เห็นถึงสาเหตุต่างๆ ของปัญหาที่เกิดขึ้น ว่ามีที่มาอย่างไร จนถึงปมสำคัญที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไข
- แผนผังนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างมากมาย ทั้งในหน้าที่การทำงานทางสังคม จนกระทั่งชีวิตประจำวัน

5) กราฟ (Graph) เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญกับวิทยานิพนธ์ที่ใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลที่สามารถทำให้ผู้อ่านเข้าใจและเข้าถึงข้อมูลต่างๆ ได้สะดวกและง่ายต่อการแปลความหมาย นอกจากนี้ยังสามารถให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดีกว่าการนำเสนอข้อมูลด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้ข้อมูลที่แสดงในรูปแบบของกราฟสามารถมองเห็นข้อมูลต่างๆ ได้ทันที กราฟแสดงข้อมูลที่นิยมใช้นำเสนอข้อมูลมี

ด้วยกันหลายประเภทได้แก่ กราฟแท่งสี่เหลี่ยม กราฟเส้น กราฟรูปภาพ และกราฟวงกลม ซึ่งกราฟแต่ละประเภทจะมีประโยชน์ในการใช้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ต้องการนำเสนอ

6) ผังการกระจาย (Scatter Diagram) คือ แผนภาพที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ที่เป็นเหตุและผลของปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ โดยกำหนดให้แกนนอนเป็นสาเหตุและแกนตั้งเป็นผล ซึ่งลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร เนื่องจากการวิเคราะห์ Regression และ Correlation จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะของความสัมพันธ์ทั้ง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงหรือไม่ ก่อนที่นำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ต่อไปโดยการนำค่า X และ Y มาทำ Scatter Plot แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดตรงที่ต้องพิจารณาว่าเป็นข้อมูลแหล่งเดียวกันหรือไม่

7) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือ แผนภูมิหรือแผนกราฟที่เขียนขึ้นล่วงหน้าโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ซึ่งระบุคุณสมบัติทางด้านคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของชิ้นงานที่ทำการผลิตและต้องการจะควบคุมคุณภาพ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตามผลที่ได้จากการผลิตในกระบวนการผลิตขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งที่สนใจ โดยการตรวจวัดค่าซึ่งวัดได้ (Variable) ที่เรียกว่าค่าวัดหรือการนับจำนวนของค่าที่เป็นหน่วยนับ (Attribute) แล้วเขียนบันทึกลงในแผนภูมินั้น ซึ่งจะมีสามเส้นได้แก่ เส้นควบคุมบน เส้นควบคุมล่าง และเส้นค่ากลาง จะเป็นขนาดหรือเป้าหมายการผลิต



รูปที่ 2.3 แผนภูมิควบคุม

2.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

(กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2546) กล่าวว่า ความหมายของการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Study) หมายถึง การกำหนดตัวพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการผลิต จากนั้นทำการวัดเพื่อการรวบรวมข้อมูลที่แสดงถึงพารามิเตอร์ที่กำหนด

ถ้าพบว่าข้อมูลหรือผลที่ได้จากการทดลองอยู่ในสภาวะภายใต้การควบคุมก็จะทำการอนุมานทางสถิติสำหรับกระบวนการ

ส่วนการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis) หมายถึง การวัดระดับความผันแปรของกระบวนการ และวิเคราะห์ความผันแปรกับข้อกำหนดที่ลูกค้าต้องการ ไปจนถึงพิจารณาแหล่งความผันแปรต่างๆ เพื่อเป็นการหาแนวทางลดความผันแปรที่จะศึกษาต่อไป ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

- ขั้นตอนการทดสอบข้อกำหนดเฉพาะ (Specification) ซึ่งสามารถดำเนินการได้จากการทบทวนสอบแบบ (design output) ของผลิตภัณฑ์ และทบทวนข้อตกลงระหว่างลูกค้าว่าสามารถยอมรับข้อกำหนดเฉพาะดังกล่าวหรือไม่
- ขั้นตอนการดึงสิ่งตัวอย่างจากกระบวนการ ที่ได้จากผลระยะสั้นและระยะยาว
- ขั้นตอนการทบทวนสอบสถานะเสถียรภาพของกระบวนการ โดยอาศัยแผนภูมิควบคุมเพื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสิ่งตัวอย่างอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติสำหรับกำหนดคุณสมบัติด้านความสามารถในการคาดการณ์ของกระบวนการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่
- ขั้นตอนการประเมินค่ามาตรฐานของข้อกำหนด (Z-score)
- ขั้นตอนการประเมินค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ พร้อมการวิเคราะห์สาเหตุของความผันแปรที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตเพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

การประเมินความสามารถของกระบวนการที่มีข้อมูลอยู่ในรูปแบบของจำนวนนับในกรณีข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการตรวจสอบ เช่นการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) ที่มีลักษณะข้อมูลเป็นแบบหน่วยนับ

$$\text{สัดส่วนของเสีย } (\hat{p}) = \frac{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์ของเสียที่ตรวจพบ } (D)}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ } (N)}$$

ดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการที่นิยมใช้กันมี 4 ดัชนีได้แก่

1. Cp ใช้แสดงศักยภาพของกระบวนการในระยะสั้น
2. Cpk ใช้แสดงความสามารถของกระบวนการในระยะสั้น
3. Pp ใช้แสดงศักยภาพของกระบวนการในระยะยาว
4. Ppk ใช้แสดงความสามารถของกระบวนการในระยะยาว

2.4 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

สำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งกับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องเข้าใจตรงกันว่า กำลังศึกษาอะไร จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้อย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการมีดังนี้

- 1) ทำความเข้าใจถึงปัญหาและกำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไข ซึ่งในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องการระบุวัตถุประสงค์ของการทดลอง
- 2) การเลือกปัจจัย ระดับของปัจจัย และขอบเขต ขั้นตอนนี้ผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ของปัจจัยที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง
- 3) การเลือกตัวแปรผลตอบ ในขั้นตอนนี้ควรเลือกตัวแปรผลตอบให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์
- 4) การเลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยที่ใช้ ความเหมาะสมของขนาดตัวอย่าง (Replications) ข้อจำกัดของการสุ่มตัวอย่าง (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่มีความเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของต้นทุนที่ใช้ในการทดลองด้วย
- 5) ทำการทดลอง เป็นการทำตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ ซึ่งจำเป็นต้องติดตามกระบวนการดำเนินการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด
- 6) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะนำความรู้ด้านสถิติมาใช้ เพื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นในการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ข้างต้นหรือไม่
- 7) สรุปและข้อเสนอแนะ เป็นขั้นตอนการทดสอบเพื่อยืนยันผลในการหาข้อสรุปของการทดลองและแนะนำแนวทางของการทดลองที่เกิดขึ้น

2.5 การเลือกรูปแบบการทดลอง

(ปารเมศ ชุติมา, 2545) การเลือกรูปแบบการทดลอง คือการพิจารณาเพื่อหาวิธีการทดลองให้เหมาะสมกับงาน เวลาที่ใช้ทดลอง ต้นทุนในการทดลอง ซึ่งการทดลองที่นิยมใช้พิจารณาเลือกมีด้วยกัน 3 แบบคือ

1. การออกแบบการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) สำหรับการทดลองบางการทดลองอาจประสบปัญหาเกี่ยวกับหน่วยการทดลองที่ใช้ไม่มีความคงที่ ทำให้การทดลองแบบสุ่มต่อเนื่องไม่มีประสิทธิภาพพอเท่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากความผันแปร

ของข้อมูลนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับผลของทรีทเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมไปถึงความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลองด้วย ส่งผลให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นจะถูกรวมเข้ากับความคลาดเคลื่อนของการทดลองส่งผลต่อผลรวมจากผลบวกของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้นและผลที่ได้รับอาจเกิดความผิดพลาดได้มาก ดังนั้นจึงต้องพยายามแยกผลที่เกิดจากอิทธิพลอื่นที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับทรีทเมนต์ออกจากความแปรปรวนทั้งหมด การทดลองแบบบล็อกสุ่มเป็นวิธีหนึ่งที่มีการจำแนกแบบสองทาง (Two-Way Classification) จะใช้ในกรณีที่หน่วยการทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะคือ ทางแนวนอน (Row) และทางแนวตั้ง (Column) โดยจะทำการจัดหน่วยทดลองที่มีความเหมือนหรือคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เรียกวิธีการนี้ว่า การบล็อก ซึ่งกำหนดให้ผลที่ได้จากความแปรปรวนระหว่างหน่วยทดลองในบล็อกเดียวกันให้มีค่าต่ำ และกำหนดให้ความแตกต่างระหว่างบล็อกให้มีค่าสูงโดยในแต่ละบล็อกจะกระทำแบบการสุ่ม ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมาจากยอดรวมของผลบวกของกำลังสองได้

2. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการทดลองที่พิจารณาผลที่เกิดขึ้นในทุกๆระดับของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยทุกๆ Treatment Combination ของปัจจัยทุกตัวที่ศึกษาจะถูกพิจารณาไปพร้อมๆ กัน สำหรับผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนั้นๆ ที่เรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) ในบางการทดลองอาจจะพบว่าความแตกต่างของค่าผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น หมายความว่าผลตอบของปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ หรือเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยค่าผลตอบที่จุดต่างๆ คือตัวแปรตอบสนองเช่นกรณีที่มีปัจจัย 2 ตัวคือ A และ B โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับคือ - หรือ Low และ + หรือ High ประโยชน์ของการ

ทดลองแบบแฟคทอเรียลมีด้วยกันหลายประการกล่าวคือ มีจำนวนการทดลองน้อยกว่าการทดลองแบบอื่น และยังให้ผลที่เกี่ยวข้อง (Interaction Effect) ซึ่งมีความสำคัญมาก นอกจากนี้ไม่สามารถหาค่าได้จากการทดลองแบบเปรียบเทียบอย่างง่ายและการทดลองทีละปัจจัย (One factor at a time) แต่ควรระมัดระวังในกรณีที่ละเลยผลของ Interaction อาจทำให้เกิดข้อสรุปผิดพลาด

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Design) เป็นการออกแบบแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย K ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมีระดับของปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้อาจเกิดข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา และความเร็ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น โดยที่ 2 ระดับจะแทนด้วยระดับ สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่งๆ บางครั้ง มี หรือ ไม่มี ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เหมาะสมสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยนำเข้าหลายๆปัจจัย ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล เรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยกำหนด ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัวและการออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized) โดยสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในการปรับปรุงกระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีการปรับปรุงประสิทธิภาพดังเช่นของ (สุณา คำหาญพล, 2555) ได้ทำการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดข้อบกพร่องของกระบวนการผลิตในปัจจุบันที่ 87.20% หรือ 135,000 DPMO (2.64 sigma) เป็น 90% หรือ 96,800 DPMO (2.78 sigma) โดยพิจารณาเลือกผลิตภัณฑ์รุ่นที่มีมูลค่าสูงสุดแต่มีประสิทธิภาพต่ำสุดมาทำการวิจัยเพื่อขยายผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์รุ่นอื่นๆต่อไป จากการสำรวจหาสาเหตุของข้อบกพร่องเบื้องต้นพบว่า สาเหตุหลักๆได้แก่ เคลือบน้ำยาไม่เต็มตามพื้นที่

กำหนด, เคลื่อนย้ายในพื้นที่ห้ามเคลื่อน, น้ำยาเคมีไหลเข้าอุปกรณ์เชื่อมต่อ, เคลื่อนหนาเกินไปหรือบางเกินไป และการเกิดฟองอากาศ โดยประยุกต์ใช้แนวทางซิกซิกมา (Six sigma) ได้แก่ 1) Define ขั้นตอนในการกำหนดปัญหา 2) Measure ขั้นตอนการวัดระดับความรุนแรงของปัญหา 3) Analyze ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา 4) Improve ขั้นตอนการปรับปรุง และ 5) Control ขั้นตอนการควบคุมและติดตามผล และใช้เครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์ได้แก่ แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต, แผนภูมิแก๊งปลา, แผนภูมิพาเรโต, ตารางแสดงสาเหตุและผลกระทบ, การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ(FMEA),และการออกแบบการทดลอง (DOE) นอกจากนี้ในการประเมินความแม่นยำของระบบตรวจวัดผู้วิจัยได้ใช้ Gauge R&R และประเมินความสามารถของกระบวนการด้วยการวัด C_{pk} หลังจากทำการปรับปรุงแล้วพบว่าประสิทธิภาพในกระบวนการเคลื่อนย้ายอะคริลิกสำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มจาก 87.20% เป็น 97.74% หรือ 22,700 DPMO (3.5 Sigma) และสามารถประหยัดต้นทุนในการซ่อมผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องได้ถึง 321,152 บาท ภายในระยะเวลา 4 เดือน

วิธีการซิกซ์ ซิกมา ในปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ยกตัวอย่างงานวิจัยดังนี้ (Raisinghani, Ette, Pierce, Cannon, & Daripaly, 2005) ได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการซิกซ์ ซิกมา ได้แก่

- การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) เป็นขั้นตอนแรกที่ต้องทำในการประยุกต์ใช้แนวทางของซิกซ์ ซิกมา เนื่องจากการวิเคราะห์ความสามารถของการวัดหรือทำการวิเคราะห์ เป็นเครื่องมือวัด ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ วิเคราะห์ความผันแปรที่เกิดจากเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ (Repeatability) และความผันแปรที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด (Reproducibility)
- การควบคุมกระบวนการ (Process Control) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการค้นหาความเบี่ยงเบนของผลลัพธ์หรือผลตอบ ไปจนถึงการควบคุมค่าเฉลี่ยเพื่อช่วยตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการผลิตเมื่อกระบวนการเกิดความเบี่ยงเบนมากๆ โดยเครื่องมือที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control) คือใช้เป็นแผนภูมิควบคุมเพื่อวัดและควบคุมกระบวนการ

- การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) เป็นเครื่องมือที่นำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าหลายๆตัวกับตัวแปรตอบสนองเหมาะสมสำหรับกรณีที่กระบวนการผลิตค่อนข้างมีความซับซ้อน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้อาจเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงหรือไม่ก็ได้ ผลลัพธ์ของการทำการทดลองจะได้ออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการทำนายผลของตัวแปรตอบสนอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดรวมถึงลดความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้
- การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis) เป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์และปรับปรุงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนตามผังกระบวนการถึงความเป็นไปได้ของการเกิดความผิดพลาดนั้นๆ ขึ้นอยู่กับความรุนแรง โอกาสในการเกิด และความสามารถในการตรวจจับความผิดพลาด จากทั้ง 3 ส่วนนี้จะนำไปสู่การได้มาซึ่งค่า Relative Priority 21 Number (RPN) หากค่า RPN สูงแสดงว่ามีความวิกฤตมาก ต้องมีการแก้ไขในขั้นตอนหรือ กระบวนการนั้น

(อาทิตย์ หงสพันธ์, 2553) ได้นำหลักการซิกซ์ ซิกมา ในการลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์พบว่าข้อบกพร่องที่มีจำนวนมากและก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงมีอยู่ทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ ข้อบกพร่องประเภทเส้นใย, มีสีเป็นคราบ, สีเป็นรอยขีด, เม็ดผง สีไหล, เม็ดพื้น และสีเป็นหลุมจากกระบวนการพ่นสี โดยมีเป้าหมายให้ลดของเสียลง 40% ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แนะนำแนวทางของซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ ได้ผลหลังการปรับปรุงคือ สามารถลดจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อ 1 คันลดลงได้ 57% และสามารถลดค่าใช้จ่ายในงานซ่อมต่อคันลงได้ 55%

(เสรี กุลปิยะ, 2556) ได้นำแนวทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์วงจรรวม อันเนื่องมาจากข้อบกพร่องประเภทขนาดความกว้างของการบินบนตัวผลิตภัณฑ์ ออกนอกค่าการยอมรับ โดยการประยุกต์ใช้ 5 ขั้นตอนของเทคนิคซิกซ์ ซิกมา ในขั้นแรกได้เลือกข้อบกพร่องประเภทขนาดความกว้างของการบินบนตัวผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์ เนื่องจากมีค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการค่อนข้างต่ำโดย C_{pk} เท่ากับ 0.66 ซึ่งระบุจากระยะการวัดเพื่อระบุสาเหตุของปัญหา หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลในระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อระบุปัจจัยที่นำเข้าไปในขั้นตอนนี้พบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีอย่างมีนัยสำคัญ

ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำ, แรงดันน้ำ และความเร็วในการตัด ต่อมาในระยะเวลาการปรับปรุงแก้ไขปัญหาได้ทำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์เบนเคน โดยผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองถูกประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัจจัยทั้งหมดสามปัจจัย ซึ่งจะทำให้ขนาดความกว้างของการบิ่นบนตัวผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยที่สุด หลังจากระยะเวลาการปรับปรุงพบว่าค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการคือ อุณหภูมิ น้ำเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส, แรงดันน้ำเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที และความเร็วในการตัดเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ เมื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมเรียบร้อยแล้วจึงติดตามผลด้วยแผนภูมิควบคุม - R สำหรับข้อบกพร่องประเภทความกว้างของการบิ่น หลังการปรับปรุงพบว่าขนาดความกว้างของการบิ่นเป็นไปตามที่กำหนดไว้คือน้อยกว่า 2 mil และค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการของเพิ่มขึ้นเป็น 1.41 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์การยอมรับด้านเดียวที่ 1.25

(กัน ตา สุวรรณ ฤทธิ์ & ณัฐ ษา ทวี แสง สกุล ไทย, 2011) ได้นำหลักการซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้เพื่อลดของเสียในกระบวนการเขียนสัญญาณบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการประยุกต์ใช้ 5 ขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการขันสกรูของตำแหน่งต่างๆบนฝาปิดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แรงในการขันสกรูบนฝาปิดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ค่าแรงดันในการเติมก๊าซฮีเลียม และวิธีการทำงานที่ได้ทำให้เกิดประโยชน์ หลังจากการออกแบบการทดลองได้ค่าของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ ค่าความเร็วรอบในการขันสกรู 1,200 rpm, แรงในการขันสกรู 4 in.lb. และค่าแรงดันในการเติมก๊าซฮีเลียม 1.2 atm. ในส่วนของวิธีการที่ไม่เกิดประโยชน์ได้มีการประยุกต์ใช้ระบบบังคับและแนวคิด ECRS เพื่อลดเวลาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในกระบวนการผลิตนาน จากนั้นทำการควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากการปรับปรุงของเสียในกระบวนการเขียนสัญญาณบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่าสามารถจำนวนของเสียประเภท Drive Exceeded Time Limit บนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่วนบุคคลจากเดิมที่ 85,125 DPPM ลดลงได้ 39,346 DPPM

(Banuelas, Antony, & Brace, 2005) ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียในกระบวนการเคลือบผิว มีการกำหนดตัวชี้วัดความสามารถของกระบวนการคือรอบของการหยุดกระบวนการผลิตสำหรับกระบวนการผลิตเคลือบฟิล์ม ซึ่งข้อบกพร่องที่นำมาปรับปรุงคือความขัดข้องของการเปลี่ยนสปินเดิล (Spindle) จากเครื่อง Re - winder และนำข้อมูลที่ได้ซึ่งเป็นข้อมูลในเชิงคุณลักษณะมาเปลี่ยนให้เป็นข้อมูลในลักษณะความผันแปรโดยการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ t - test เพื่อทดสอบว่ารอบของการตัดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขัดข้องของ Winder หรือไม่ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่ารอบเวลาของการตัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 5% ดังนั้นจึงใช้ค่ารอบเวลาของการตัดเป็นตัวแปรตอบสนองที่สามารถเป็นตัวทำนายที่ดีที่สุดของการดำเนินงานของ Winder

(ภารินี แก้วสม, 2556) ได้นำเทคนิคทางซิกซ์ ซิกมา ในการลดของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่อง เส้นด้านเป็นขนในกระบวนการดึงยึดเส้นด้าย จากข้อมูลข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนมีของเสีย เท่ากับ 3.35% ของปริมาณของการผลิต คิดมูลค่าความเสียหายเป็นเงิน 585,486 บาทต่อปีสำหรับ เครื่องจักรที่ทำการศึกษา ซึ่งหลังจากการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้เทคนิคของซิกซ์ ซิกมา สามารถ ลดสัดส่วนของเสียลงเหลือ 1.47% หรือลดลงถึง 56.1% คิดเป็นมูลค่าที่ลดลงได้เป็นเงิน 293,632 บาทต่อปี

(ฉันทิช ลักษณ์านันท์, 2557) นำแนวคิดของซิกซ์ ซิกมา มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ Surface Mount Technology (SMT) ซึ่งมีข้อบกพร่องและทำให้เกิดของเสียที่ไม่สามารถแก้ไขได้ คือคราบของสารบัดกรีเปื้อนบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นสูงถึง 520 PPM ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ ผลิต โดยหลังจากการปรับปรุงมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำความสะอาดโดยใช้การออกแบบ เชิงแพคทอเรียลสองระดับปัจจัยและสองการทดลองซ้ำ ซึ่งพารามิเตอร์ที่แนะนำคือ การเช็ดทำความสะอาด ด้วยทิศทางเดียวกัน ที่ความเร็วในการเช็ด 80 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยไม่ต้องใช้แรงดูด สูญญากาศ ผลที่ได้หลังการศึกษาพบว่ามีการเสียจากข้อบกพร่องลดลง 250 PPM หรือลดลงร้อยละ 51.92 จากกระบวนการเดิมก่อนการปรับปรุง และมูลค่าความเสียหายต่อชิ้นลดลงจาก 17.21 บาท เหลือ 10.94 บาท

บทที่ 3

การศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษา

ในบทนี้จะเป็นการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษา โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษาว่ามีการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ประเภทใดบ้าง มีกระบวนการผลิตตั้งแต่ต้นจนส่งมอบให้ลูกค้าอย่างไร จากนั้นจะศึกษาลงไปถึงสภาพปัญหาที่พบในปัจจุบันซึ่งจะอธิบายถึงการคัดเลือกปัญหาที่จะนำไปศึกษา โดยมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

3.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานในกรณีศึกษาก่อตั้งครั้งแรกเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ปี พ.ศ. 2531 โดยการขยายตัวจากสำนักงานใหญ่ของบริษัทในเมืองซานโฮเซ ในรัฐแคลิฟอร์เนียเข้ามาตั้งฐานการผลิตที่จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีฐานการผลิตรวมทั้งสิ้น 25 ประเทศทั่วโลก ซึ่งโรงงานในกรณีศึกษาเป็นฐานการผลิตในส่วนการดำเนินผลิต ประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปัจจุบันในประเทศไทยมีบุคลากรทั้งหมดประมาณ 1,600 คนและได้ประสบผลสำเร็จอย่างยิ่งเนื่องจากมีเทคโนโลยีที่มีคุณภาพสูงและผู้บริหารระดับสูงให้ความสำคัญอย่างจริงจังและต่อเนื่องในการผลิตที่มีคุณภาพสูงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและราคาสามารถแข่งขันกับตลาดโลกได้ ซึ่งข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษามีดังนี้

- 3.1.1 ผลิตภัณฑ์
- 3.1.2 กระบวนการผลิต
- 3.1.3 พังกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา

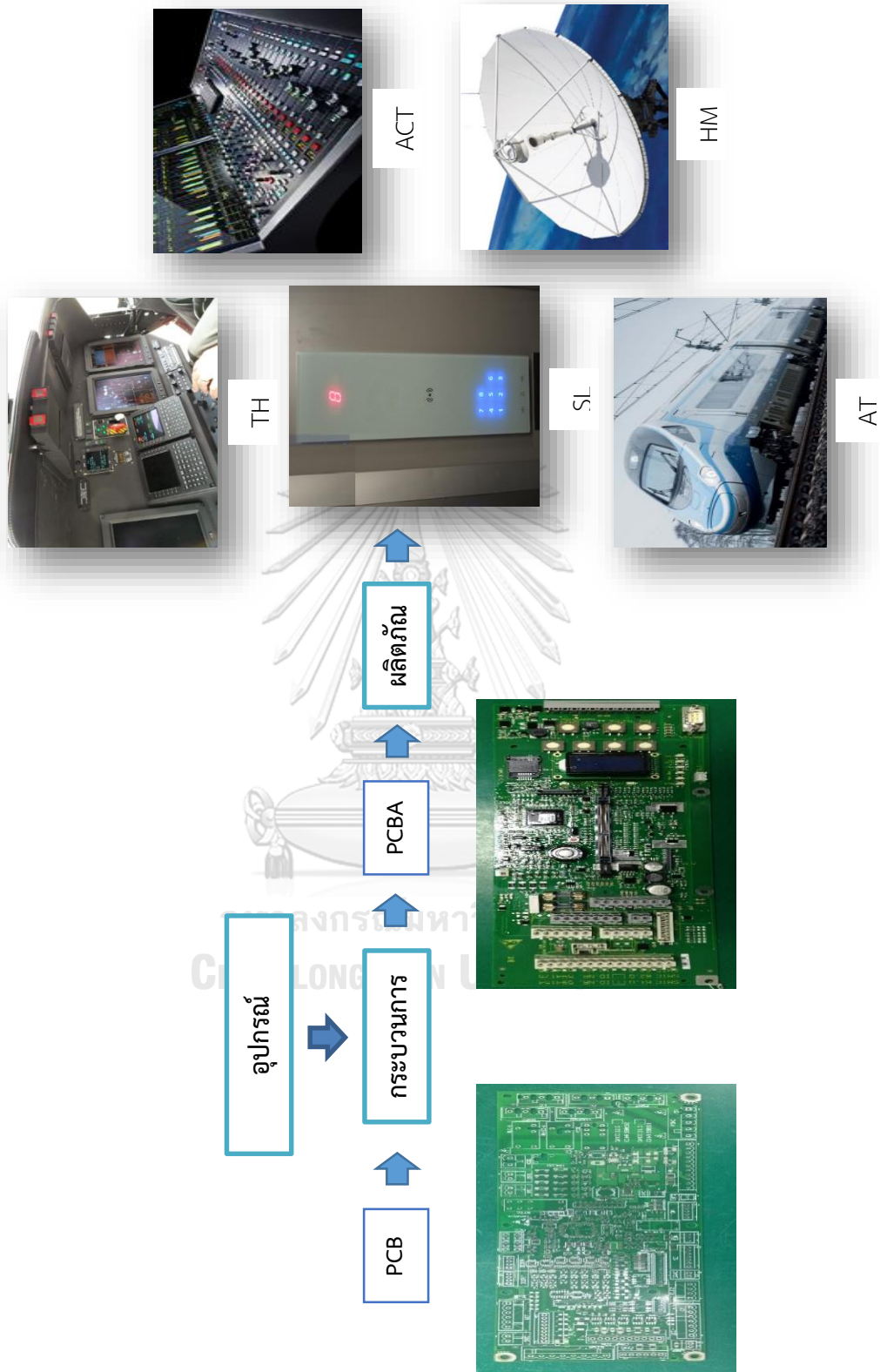
3.1.1 ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานกรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ PCBA (Printed Circuit Board Assembly) คือแผงวงจรที่ได้รับการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และทำการบัดกรีเพื่อเชื่อมต่อระหว่างแผงวงจรพิมพ์ PCB (Printed Circuit Board) กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างของแต่ละผลิตภัณฑ์ในโรงงานกรณีศึกษาได้แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษาได้ถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

- แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการบินสำหรับเครื่องบิน (TH)

- แผนงานจริยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง (AT)
- แผนงานจริยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL)
- แผนงานจริยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับเครื่องเสียง (ACT)
- แผนงานจริยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับสารสนเทศ (HM)





รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของแต่ละผลิตภัณฑ์ในโรงงานการศึกษา

3.1.2 กระบวนการผลิต

เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา ผู้วิจัยจึงทำการศึกษารายละเอียดของแต่ละกระบวนการดังรูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตหลักของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (PCBA) แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนการผลิตหลักคือ

- 1) ขั้นตอนการวางอุปกรณ์อัตโนมัติ SMT (Surface Mount Technology)
- 2) ขั้นตอนการเชื่อมบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องชุบขาตะกั่ว WS (Wave Soldering)
- 3) ขั้นตอนการทดสอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ICT (In Circuit Test)
- 4) ขั้นตอนการทดสอบการทำงาน FCT (Functional Test)
- 5) ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ CT (Coating)
- 6) ขั้นตอนการบรรจุหีบห่อ PS (Packing & Shipment)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตหลักของโรงงานกรณีศึกษา

จากขั้นตอนการทำงานของโรงงานกรณีศึกษาสามารถอธิบายด้วยแผนภาพการไหลของกระบวนการผลิต (Process Flow Diagram) และรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

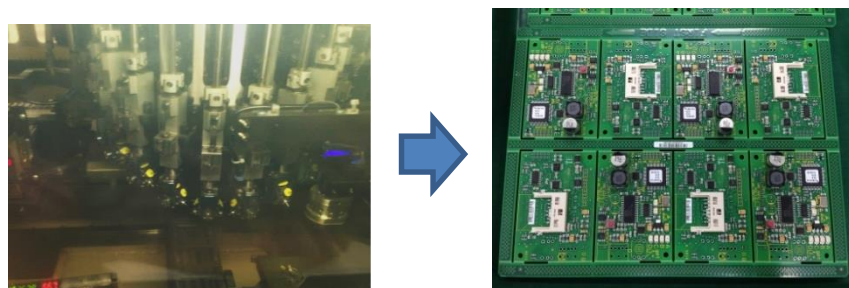
- 1) ขั้นตอนการวางอุปกรณ์อัตโนมัติ SMT (Surface Mount Technology)
 - 1.1) เตรียมแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board Preparation) เป็นขั้นตอนการเตรียมแผงวงจรพิมพ์ (PCB) และติดฉลาก (Label) ตามตำแหน่งที่กำหนดทางด้านหน้าของแผงวงจรพิมพ์ (Top Side) จากนั้นทำการประทับสัญลักษณ์ด้วยอักษร A บนแผงวงจรพิมพ์ เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานที่อยู่ในรุ่นของการปรับปรุง (Revision) ครั้งที่เท่าไร

1.2) กระบวนการโซลเดอร์สกรีน (Solder Past Printing Process) เมื่อทำการเตรียมแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ของรุ่นที่ต้องการผลิตแล้ว กระบวนการถัดไปคือการพิมพ์ตะกั่วลงบนลายแผ่นวงจรพิมพ์ โดยผ่านเครื่องพิมพ์ตะกั่ว (Screen printing) ที่มีแผ่นลายฉลุ (Stencil) และ (Vacuum block) ซึ่งจะต้องเช็ดแผ่นลายฉลุ (Stencil) 1 ครั้งเมื่อทำการปาดตะกั่วบนแผ่นลายฉลุจำนวน 16-20 ครั้ง



รูปที่ 3.3 แผ่นวงจรก่อนและหลังการพิมพ์ตะกั่วลงบนลายแผ่นวงจร

1.3) กระบวนการวางอุปกรณ์ (Pick and Place Process) เป็นขั้นการหยิบตัวอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีขนาดเล็กมาวางบนแผ่นวงจรที่มีครีมนตะกั่วอยู่บนตำแหน่งที่ต้องการบัดกรีแล้ว โดยใช้เครื่องชิพเมาท์เตอร์ (Chip Mounter) ในสายการผลิตจะมีเครื่องวางอุปกรณ์ทั้งหมด 8 เครื่องในแต่ละเครื่องจะถูกแบ่งการวางตัวอุปกรณ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการจับอุปกรณ์แต่ละชนิดและเวลาที่ใช้ในการวางอุปกรณ์ของแต่ละแผงวงจรให้มีความสมดุลกัน เนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่ทำการวางมีขนาดเล็กมากจึงต้องใช้เครื่องมือช่วยได้แก่ จุกพลาสติกเล็กๆ (Nozzle) ที่มีลมดูด (Vacuum) ให้ตัวอุปกรณ์ลอยติดกับจุกพลาสติกแล้วนำไปวางบนตำแหน่งที่ต้องการตามโปรแกรม (Program) ที่เลือกไว้



รูปที่ 3.4 การวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องวางอัตโนมัติ

1.4) การตรวจสอบแผงวงจรก่อนผ่านเข้าเครื่องอบความร้อน (Before Oven inspection) หลังจากการวางตัวอุปกรณ์เสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนนี้จะให้พนักงานทำ

การตรวจสอบแผงวงจร อาการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หาย (Missing component) การวางไม่ตรงตำแหน่ง (Misalignment component) และทำการวางชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กรณีที่ไม่สามารถวางด้วยเครื่องได้ (Manual placement)



รูปที่ 3.5 การตรวจสอบแผงวงจรก่อนเข้าเครื่องอบความร้อนด้วยพนักงาน

1.5) กระบวนการรีโฟลว์ (Reflow Soldering Process) เป็นการทำให้ตะกั่วครีมหลอมละลายและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อเชื่อมระหว่างแผงวงจรกับตัวอุปกรณ์ให้ติดกัน ซึ่งเครื่องหลอมตะกั่วจะใช้หลักการเป่าลมร้อนสามารถแบ่งอุณหภูมิออกเป็นช่วงๆ โดยเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงต่างๆได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมตะกั่วจะใช้ตามมาตรฐาน IPC



รูปที่ 3.6 เครื่องและโปรแกรมหลอมละลายตะกั่วให้ขาอุปกรณ์กับแผงวงจรเชื่อมติดกัน

1.6) กระบวนการตรวจจับความผิดพลาด (AOI: Automatic Optical Inspection) เป็นการตรวจสอบโดยดูจากจอแสดงผล (Monitor) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมติดของตะกั่วและการวางของตัวอุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดหรือไม่



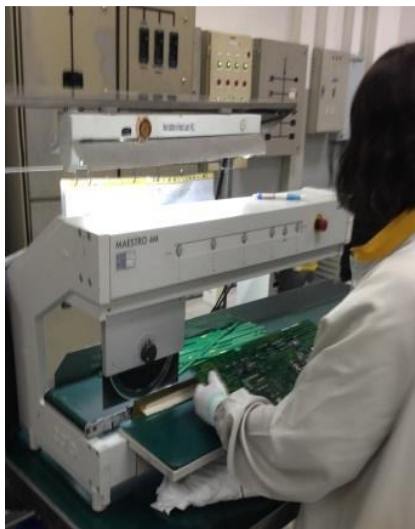
รูปที่ 3.7 เครื่องตรวจจับความผิดพลาดแผงวงจร

1.7) การตรวจสอบแผงวงจร (Post Oven Inspection) วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบแผ่นวงจรด้วยสายตา โดยใช้เครื่องช่วยขยาย (Luxo lamp) กำลังขยาย 3X และ (Microscope) กำลังขยาย 10X โดยขั้นตอนนี้พนักงานจะทำการตรวจสอบสิ่งผิดปกติภายนอก (Mechanical) และทำการแยกงานเสียออกเพื่อส่งไปยังส่วนแก้ไขงาน (Rework station) ส่วนงานดีจะส่งต่อไปยังขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.8 การตรวจสอบแผงวงจรด้วยเครื่องช่วยขยาย

1.8) กระบวนการตัดแยกแผงวงจร (De Panel Process) เป็นการตัดแยกแผงวงจรออกจากกันโดยใช้เครื่อง Dividing Machine ตัดตามแนวเส้น V Cut

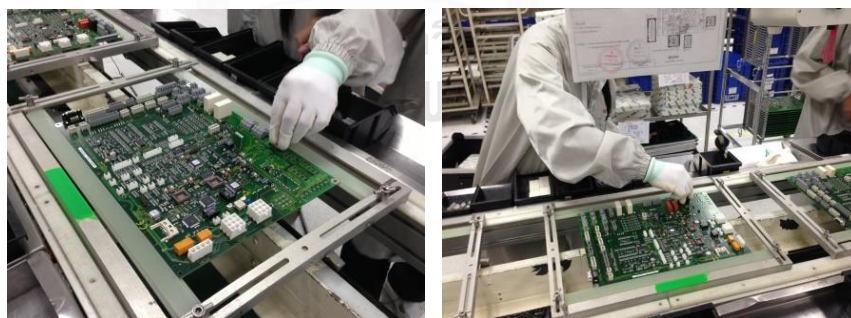


รูปที่ 3.9 เครื่องตัดแยกแผงวงจร

2) ขั้นตอนการเชื่อมบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องชุบขาตะกั่ว WS

(Wave Soldering)

2.1) กระบวนการวางตัวอุปกรณ์ชนิดขาตะกั่วแผงวงจรและตรวจสอบขั้วของตัวอุปกรณ์ (First Hand Load Fixture and Inspection Process) เป็นขั้นตอนการนำตัวอุปกรณ์ที่มีลักษณะขาตะกั่วผ่านแผงวงจรวางบนแผงวงจร ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้พนักงานในการวางตัวอุปกรณ์และตรวจสอบขั้วของตัวอุปกรณ์ว่าวางถูกต้องหรือไม่ ก่อนปล่อยเข้าเครื่องโซลเดอร์เวฟ (Solder Wave)



รูปที่ 3.10 ลักษณะการวางตัวอุปกรณ์ชนิดขาตะกั่วแผงวงจรและตรวจสอบขั้วของตัวอุปกรณ์

2.2) กระบวนการโซลเดอร์เวฟ (Solder Wave Process) เป็นกระบวนการบัดกรีเพื่อเชื่อมติดระหว่างตัวอุปกรณ์ชนิดที่ขาตะกั่วแผงวงจรกับแผงวงจรโดยผ่านเข้าเครื่องโซลเดอร์เวฟ ซึ่งเครื่องชุบขาตะกั่วจะมีลักษณะคล้ายกับเตาหลอมตะกั่วเพื่อให้ตะกั่วมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อแผงวงจรผ่านเตาหลอมตะกั่วดังนั้นตะกั่วจะเกาะขาตัวอุปกรณ์ขึ้นมาเชื่อมกับแผงวงจร



รูปที่ 3.11 เครื่องโซลเดอร์เวฟ

2.3) กระบวนการตรวจสอบ (Touch up and Final Inspection) เป็นการตรวจสอบตัวอุปกรณ์ชนิดทะเลงแผงวงจรว่าอยู่ตรงตำแหน่งที่กำหนดหรือไม่ ตะกั่วเชื่อมติดระหว่างขาตัวอุปกรณ์กับแผงวงจรเรียบร้อยหรือไม่ถ้าไม่เรียบร้อยพนักงานจะทำการเติมตะกั่ว ขาของตัวอุปกรณ์ห้ามยาวเกิน 2.54 มิลลิเมตร ถ้ายาวเกินให้ทำการตัดออกและขอบของแผงวงจรไม่เกิดการแยกตัว (Delamination) ตามมาตรฐาน IPL 610

3) ขั้นตอนการทดสอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ICT (In Circuit Test)

3.1) กระบวนการทดสอบแผงวงจร ICT (In Circuit Test Process) เป็นการทดสอบ การลัดไฟ การหลุดหาย การใส่ผิด การแตกหัก การใส่กลับข้างกลับขั้วของตัวอุปกรณ์และ การบัดกรีเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผงวงจร โดยจะเน้นการทดสอบค่าของอุปกรณ์เช่น ค่าตัวต้านทาน (Resistor), ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor), ค่าขดลวด (Inductor) และเช็คทิศทางของอุปกรณ์เช่น ไดโอด (Diode), ทรานซิสเตอร์ (Transistor) นอกจากนี้ ICT ยังสามารถเช็คการเชื่อมต่อของลายวงจรบนแผงวงจรอีกด้วย



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแผงวงจร ICT

4) ขั้นตอนการทดสอบการทำงาน FCT (Functional Test)

4.1) กระบวนการทดสอบการทำงาน FCT (Functional Test Process) เป็นการทดสอบการทำงานของแผงวงจร โดยหลักการการทำงานของ FCT จะจ่ายไฟเข้าแผงวงจรจากนั้นทำการจำลองสภาพการใช้งานจริงของแผงวงจรที่ถูกกำหนดโดยลูกค้าว่าต้องการให้เครื่องทดสอบการทำงานของฟังก์ชันใดบ้าง



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการทำงาน FCT

4.2) กระบวนการตรวจจับความผิดพลาด (AOI: Automatic Optical Inspection) เป็นการตรวจสอบโดยดูจากจอแสดงผล (Monitor) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ว่าถูกวางตรงตำแหน่งที่กำหนดหรือไม่

4.3) กระบวนการตรวจสอบครั้งที่ 1 (Per-Final Quality Audit) เป็นการตรวจสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ว่าอยู่ในสภาพปกติหรือไม่ อุปกรณ์ทุกตัวต้องไม่กลับขั้ว ต้องไม่มีเศษตะกั่วติดอยู่บนแผงวงจรและขาของอุปกรณ์ชนิดทะลุผ่านที่อยู่บนแผงวงจร ห้ามยาวเกิน 2.54 มิลลิเมตร ซึ่งการตรวจสอบนี้จะให้พนักงานที่ผ่านการอบรมเรื่องการตรวจสอบแผงวงจรเป็นผู้ตัดสินใจโดยใช้คอมพิวเตอร์สแกนสไลด์ฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยในการตรวจสอบ

4.4) กระบวนการทำความสะอาดแผงวงจร (Cleaning Coating Area Process) เป็นการทำความสะอาดของเหลวประเภทฟลักซ์และฝุ่นละอองที่ติดมาจากกระบวนการก่อนหน้าซึ่งจะใช้เครื่องสำหรับล้างแผงวงจรโดยเฉพาะเพื่อไม่ให้มีสิ่งสกปรกติดบนแผงวงจรก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบแผงวงจรต่อไป

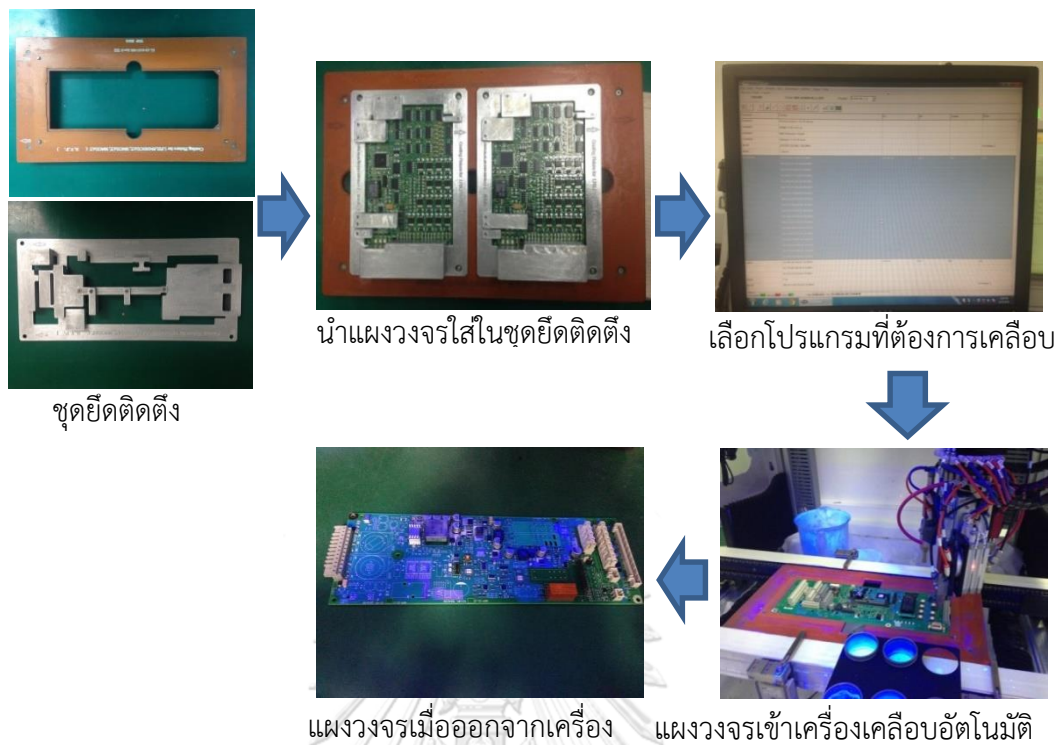


รูปที่ 3.14 เครื่องทำความสะอาดแผงวงจร

5) ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ CT (Coating)

5.1) กระบวนการวางแผงวงจรลงบนชุดยึดติดตั้ง (PCBA on Fixture) เป็นขั้นตอนการแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านขั้นตอนก่อนหน้าวางลงบนชุดยึดติดตั้ง (Fixture) เพื่อเตรียมป้อนเข้าเครื่องเคลือบอัตโนมัติ

5.2) กระบวนการเคลือบแผงวงจร (Coating Process) เป็นกระบวนการเคลือบแผงวงจรโดยใช้เครื่องเคลือบแผงวงจรอัตโนมัติซึ่งตัวเครื่องจะเคลือบแบบพ่นตามโปรแกรมที่สร้างขึ้นหรือถูกป้อนให้ทำงานและเคลือบด้วยของเหลวประเภทซิลิโคน เพื่อป้องกันความชื้น, ฝุ่นละอองและตัวที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตอื่นๆ



รูปที่ 3.15 กระบวนการเคลือบแผงวงจร

5.2 (RW) กระบวนการตรวจสอบ (Inspection and Touch up Coating Process) หลังจากทำการเคลือบแผงวงจรด้วยเครื่องอัตโนมัติจะเป็นขั้นตอนการตรวจสอบแผงวงจรเพื่อตรวจดูความเรียบร้อยของแผงวงจรเช่น น้ำยาไหลเข้าพื้นที่ห้ามเคลือบ น้ำยาเคลือบไม่ครบพื้นที่ที่กำหนด เกิดผล เปลือกส้ม เกิดการลอกหลุดของน้ำยาน้ำยาเป็นฟองอากาศ เป็นต้น ถ้าเกิดปัญหาดังกล่าวจะแก้ไข (Rework) โดยการตัดสินใจของพนักงานภายใต้แสงยูวีในขั้นตอนนี้ทันทีก่อนส่งไปยังกระบวนการต่อไป



รูปที่ 3.16 กระบวนการตรวจสอบและแก้ไขชิ้นงาน

5.3) กระบวนการอบแผงวงจร (Baking Process) เป็นการอบแผงวงจรหลังจากผ่านกระบวนการเคลือบแผงวงจรอัตโนมัติเรียบร้อยแล้ว โดยการอบแผงวงจรจะใช้

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและใช้เวลาอบ 20 นาที เพื่อให้แผงวงจรที่ผ่านการเคลือบน้ำยาแห้งสนิท



รูปที่ 3.17 เครื่องอบแผงวงจร

6) ขั้นตอนการบรรจุหีบห่อ PS (Packing & Shipment)

6.1) กระบวนการตรวจสอบครั้งที่ 2 (Per-Final Quality Audit) เป็นการตรวจสอบแผงวงจรเพื่อดูความเรียบร้อยของการเคลือบเช่นน้ำยาไหลเข้าพื้นที่ห้ามเคลือบ น้ำยาเคลือบไม่ครบพื้นที่ที่กำหนด เกิดผลเปลือกส้ม เกิดการลอกหลุดของน้ำยาน้ำยาเป็นฟองอากาศ น้ำยาไม่เงา น้ำยาเป็นเส้นใย คราบสกปรก พบรอยนิ้วมือบนแผงวงจร มีรอยแตกบนแผงวงจร เป็นต้น ถ้าพบปัญหาข้างต้นจะทำการแยกของเสียออกแล้วส่งไปแก้ไข (Rework)

6.2) กระบวนการบรรจุหีบห่อ (Packing Process) เป็นขั้นตอนการบรรจุแผงวงจรลงกล่องโดยการนำแผงวงจรที่ผ่านทุกกระบวนการเรียบร้อยแล้วใส่ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิต (ESD) และใส่กล่องบรรจุภัณฑ์ เพื่อเตรียมส่งมอบสู่ลูกค้า

CHULALONGKORN UNIVERSITY

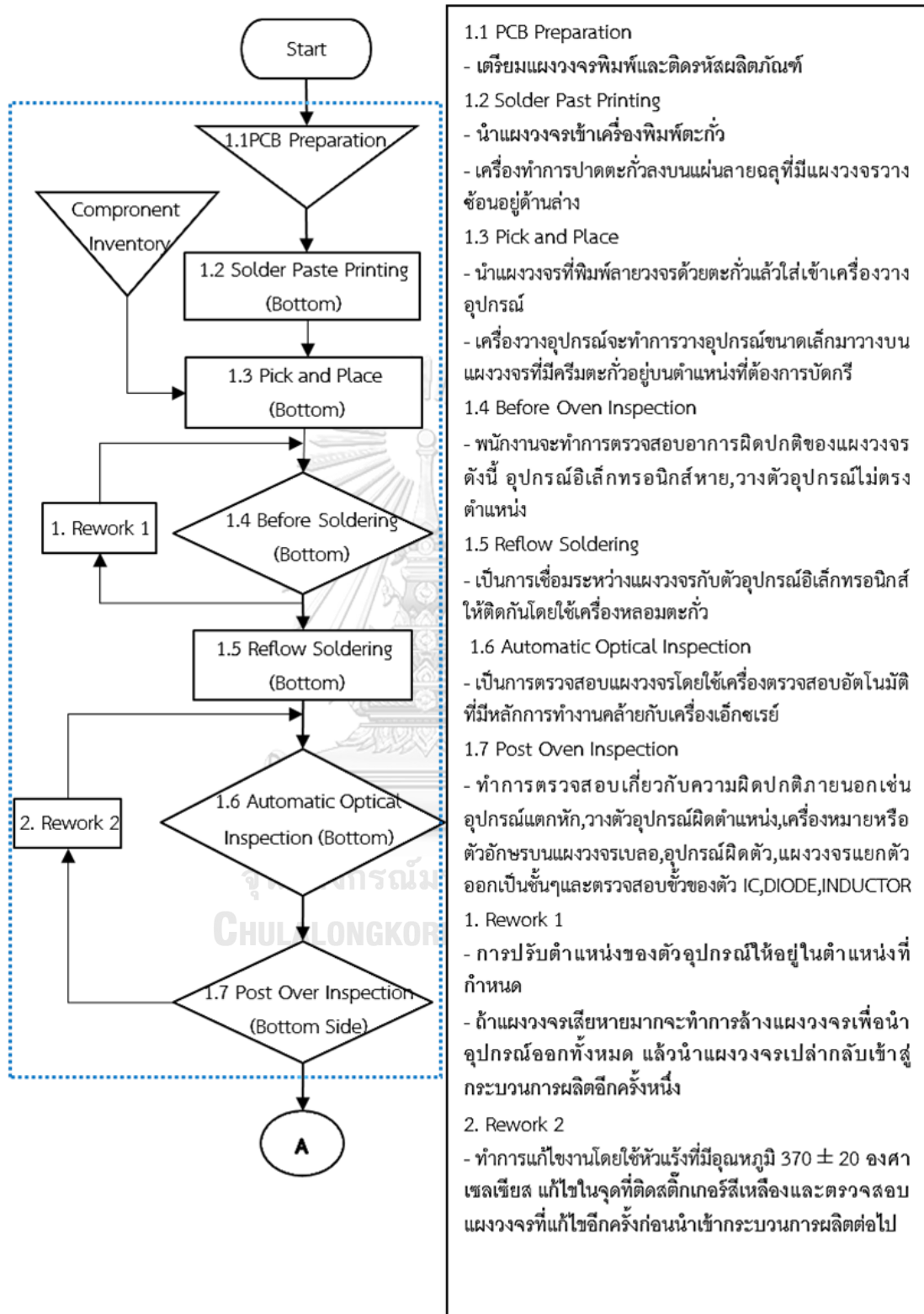


รูปที่ 3.18 ลักษณะการบรรจุหีบห่อ

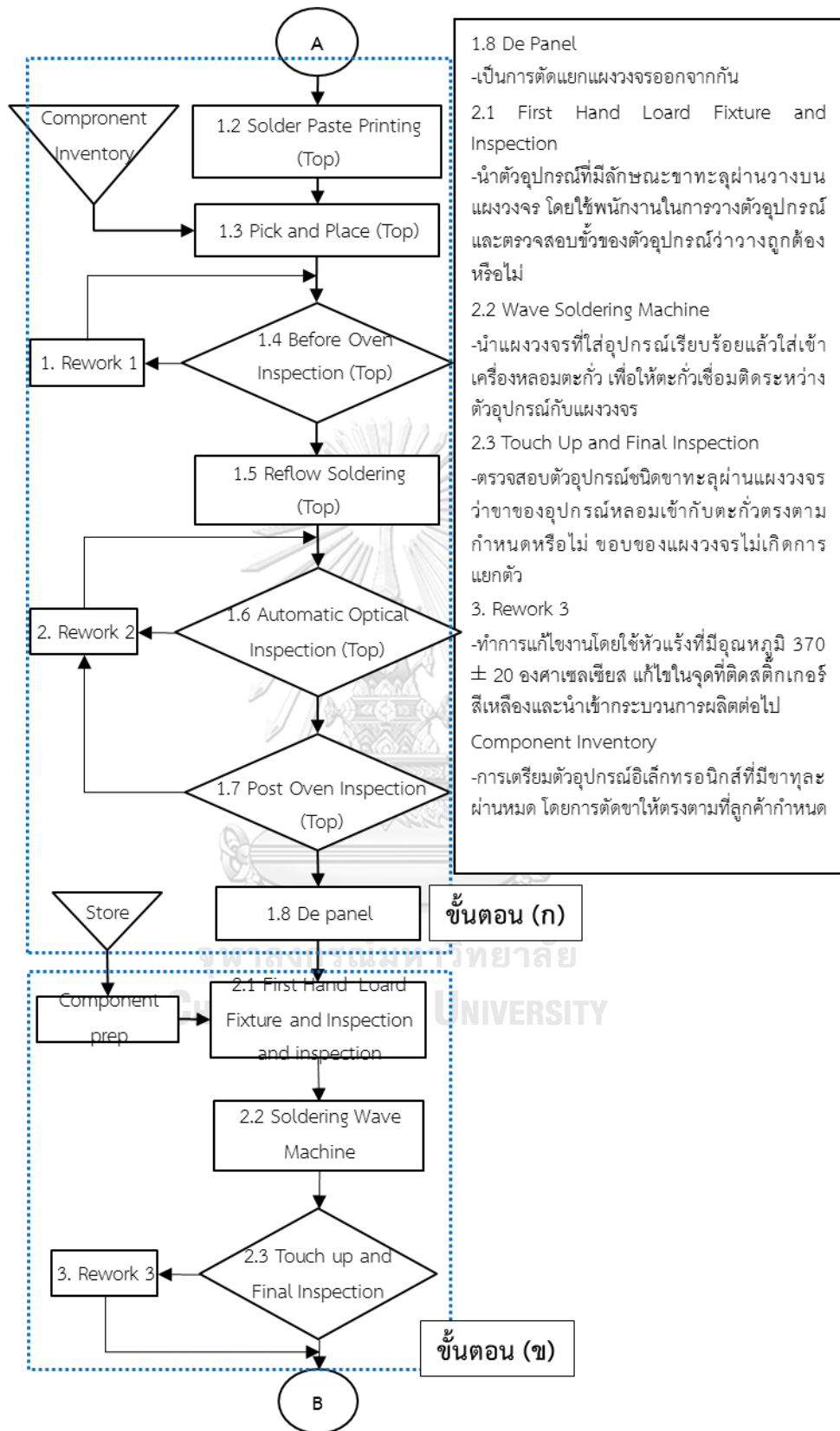
6.3) กระบวนการตรวจสอบครั้งสุดท้าย (Final Quality Audit) เป็นขั้นตอนตรวจสอบครั้งสุดท้ายโดยการสุ่มตรวจแผนผังจรที่ผ่านกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะตรวจสอบอุปกรณ์ว่าอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดหรือไม่ แผนผังจรไม่มีลรอยแตกหัก ขาของอุปกรณ์ทุกตัวเชื่อมติดกับแผนผังจรดีหรือไม่



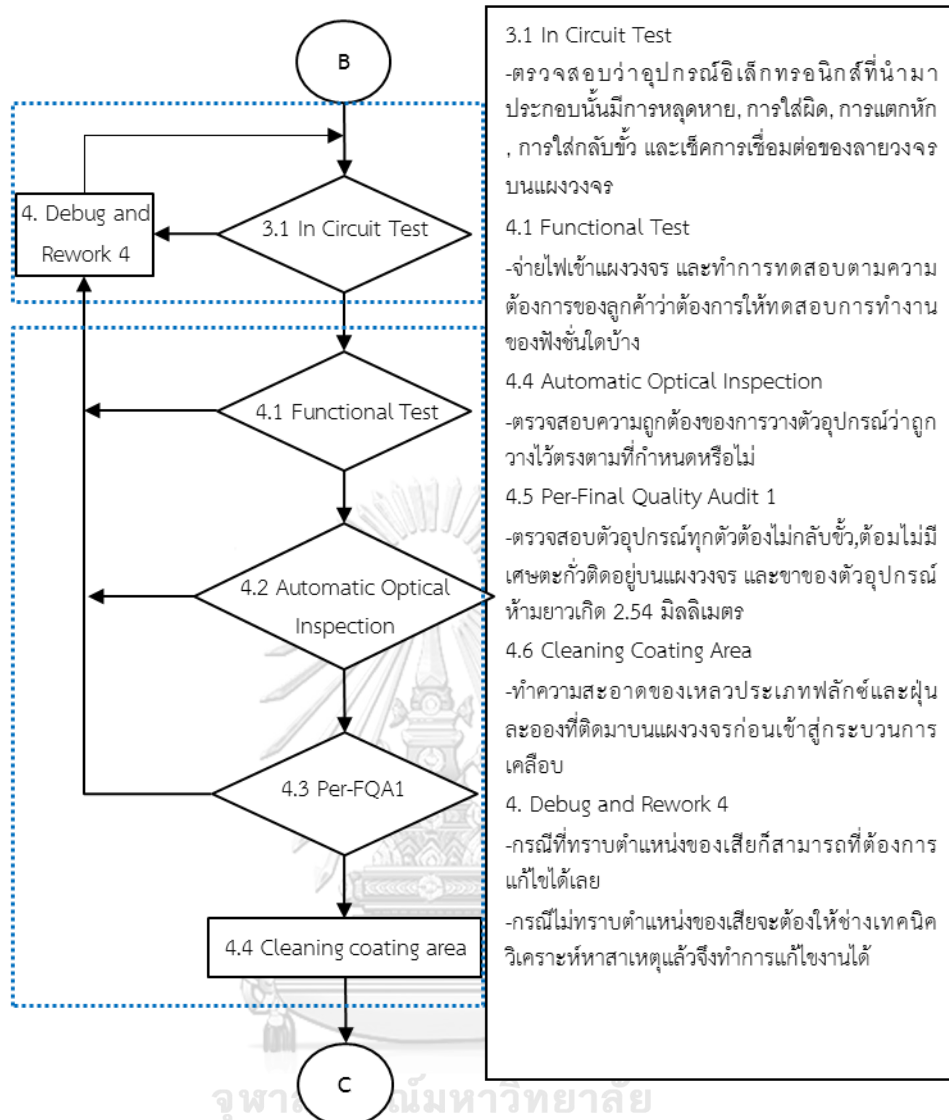
3.1.3 ผังกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 3.19 ขั้นตอน SMT



รูปที่ 3.20 ขั้นตอน SMT และขั้นตอน WS



3.1 In Circuit Test
 -ตรวจสอบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาประกอบนั้นมีการหลุดหาย, การใส่ผิด, การแตกหัก, การใส่กลับหัว และเช็คการเชื่อมต่อของลายวงจรบนแผงวงจร

4.1 Functional Test
 -จ่ายไฟเข้าแผงวงจร และทำการทดสอบตามความต้องการของลูกค้าว่าต้องการให้ทดสอบการทำงานของฟังก์ชันใดบ้าง

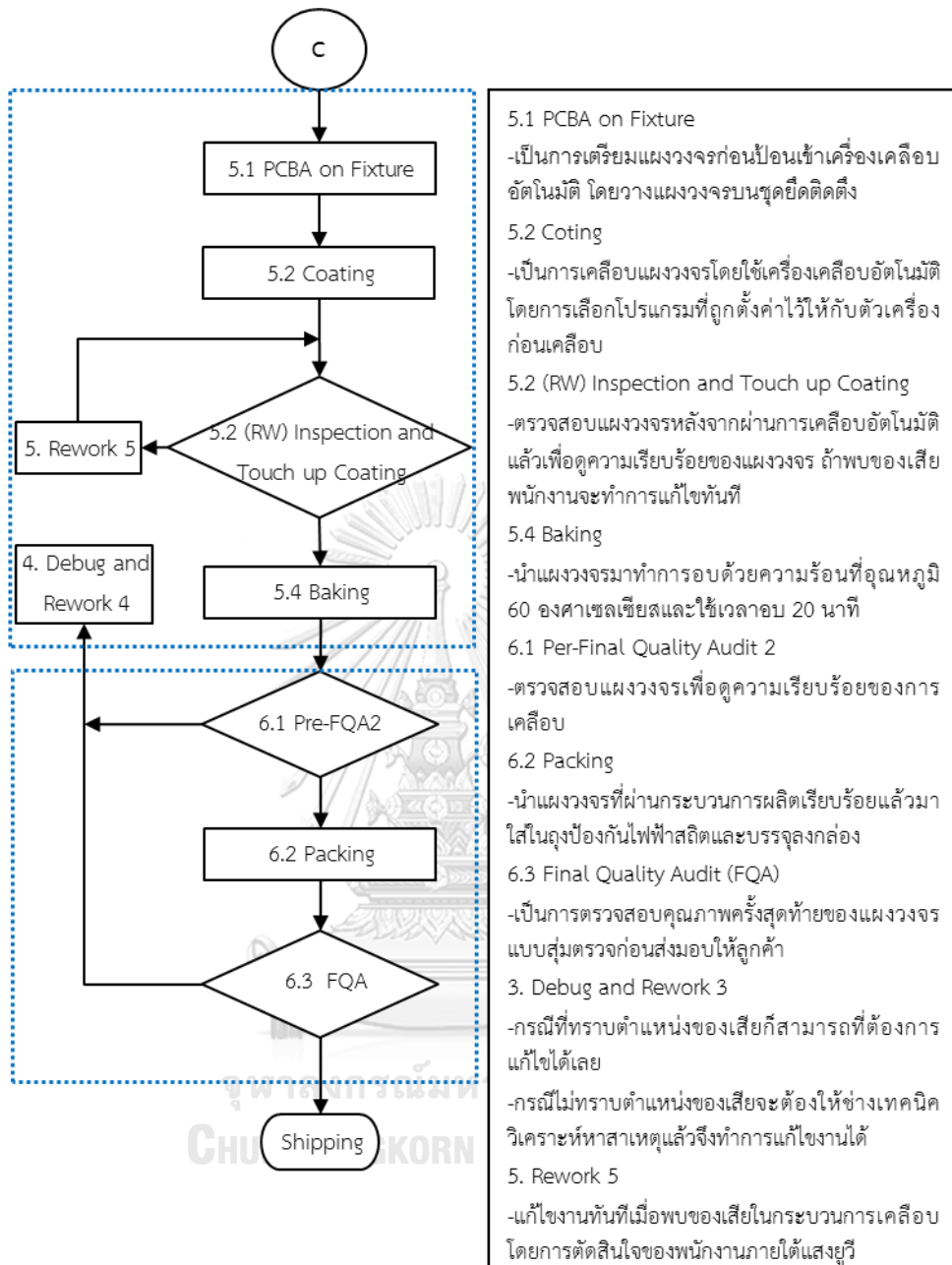
4.2 Automatic Optical Inspection
 -ตรวจสอบความถูกต้องของการวางตัวอุปกรณ์ว่าถูกวางไว้ตรงตามที่กำหนดหรือไม่

4.3 Per-FQA1
 -ตรวจสอบตัวอุปกรณ์ทุกตัวต้องไม่กลับหัว, ต้องไม่มีเศษตะกั่วติดอยู่บนแผงวงจร และขาของตัวอุปกรณ์ห้ามยาวเกิน 2.54 มิลลิเมตร

4.4 Cleaning coating area
 -ทำความสะอาดของเหลวประเภทฟลักซ์และฝุ่นละอองที่ติดมาบนแผงวงจรก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบ

4. Debug and Rework 4
 -กรณีที่ทราบตำแหน่งของเสียก็สามารถที่ต้องการแก้ไขได้เลย
 -กรณีไม่ทราบตำแหน่งของเสียจะต้องให้ช่างเทคนิควิเคราะห์หาสาเหตุแล้วจึงทำการแก้ไขงานได้

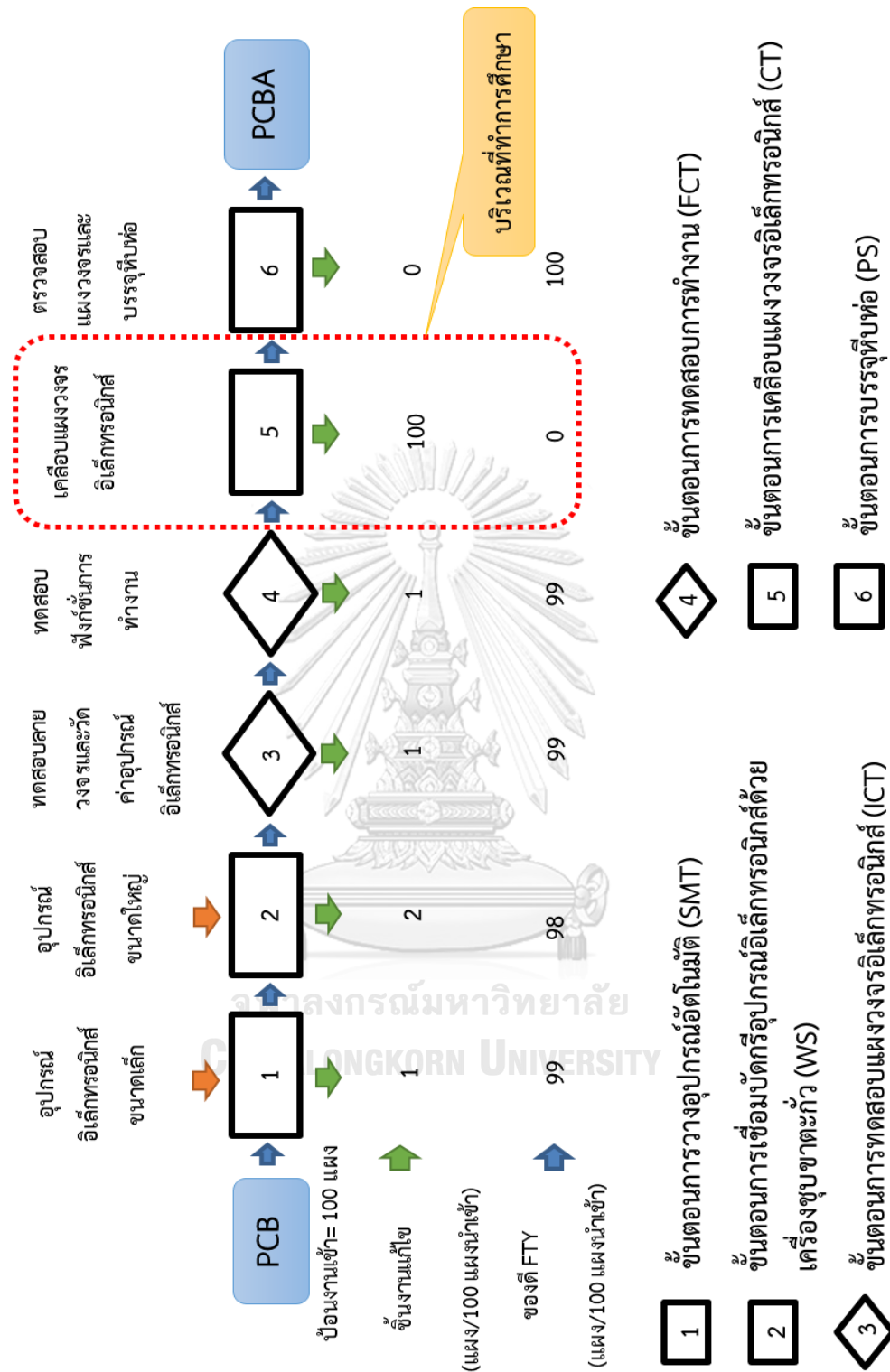
รูปที่ 3.21 ขั้นตอน ICT และขั้นตอน FCT



รูปที่ 3.22 ขั้นตอน CT และขั้นตอน PS

3.2 สภาพปัญหาที่พบในปัจจุบัน

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษาจะพบว่าข้อมูลของเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 6 ขั้นตอนการหลักของโรงงานกรณีศึกษาได้แก่ (1) ขั้นตอนการวางอุปกรณ์อัตโนมัติ SMT (Surface Mount Technology), (2) ขั้นตอนการเชื่อมบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องชุบขาตะกั่ว WS (Wave Soldering), (3) ขั้นตอนการทดสอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ICT (In Circuit Test), (4) ขั้นตอนการทดสอบการทำงาน FCT (Functional Test), (5) ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ CT (Coating) และ(6) ขั้นตอนการบรรจุหีบห่อ PS (Packing & Shipment) พบว่าชิ้นงานแก้ไขเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในระยะเวลา 1 ปีย้อนหลังมีค่าสูงสุดคิดเท่ากับ 100 แผงต่อ 100 แผงนำเข้า นอกจากนี้ของดีที่ออกจากกระบวนการผลิตในครั้งแรก FTY (First Time Yield) ที่ได้จากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 0 แผงต่อ 100 แผงนำเข้า ดังรูปที่ 3.23 ของเสียของแต่ละขั้นตอนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการลดของเสียหรือชิ้นงานแก้ไขที่เกิดจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีการแก้ไขชิ้นงาน 100% หรือทุกชิ้นหลังผ่านเครื่องพ่นน้ำยาอัตโนมัติ

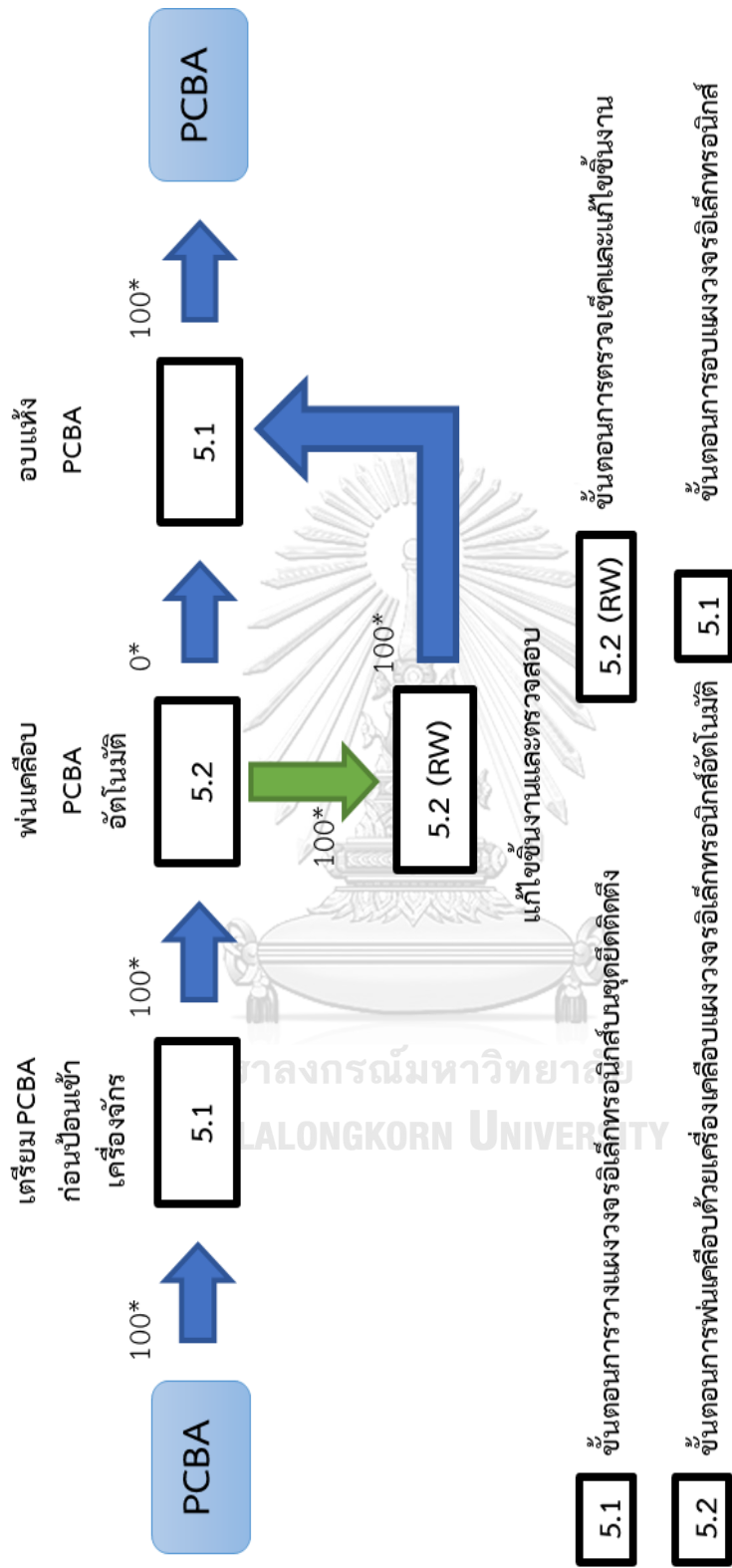


รูปที่ 3.23 ของเสียของแต่ละขั้นตอนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานกรณีศึกษา ในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

หลังจากทราบปัญหาที่เกิดขึ้นของโรงงานกรณีศึกษาแล้ว ผู้วิจัยจึงศึกษารายละเอียดของขั้นตอนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาที่ทำให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมาก โดยเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่แบ่งขั้นตอนการปฏิบัติงานออกเป็น 4 ขั้นตอนย่อยคือ

- 1) ขั้นตอนการวางแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บนชุดยึดติดตั้ง
- 2) ขั้นตอนการพ่นเคลือบด้วยเครื่องเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ
- 3) ขั้นตอนการตรวจเช็คและแก้ไขชิ้นงาน
- 4) ขั้นตอนการอบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าหลังจากนำแผงวงจรป้อนเข้าในขั้นตอนการพ่นเคลือบด้วยเครื่องเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติจำนวน 100 แผง ปรากฏว่าชิ้นงานที่ออกมาในกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) เท่ากับ 0 แผง ซึ่งเกิดของเสียหลังจากผ่านขั้นตอนการพ่นเคลือบด้วยเครื่องเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติทั้งหมด 100 แผงและชิ้นงานทั้งหมดต้องทำการแก้ไขชิ้นงานทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียทั้งหมดในขั้นตอนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากขั้นตอนการเคลือบผงด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลต่อมูลค่าความสูญเสียรวมของการแก้ไขใหม่ (Rework) มีมูลค่าสูงถึง 7,437,610 บาทในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 เนื่องจากของเสียในบางตำแหน่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขใหม่ (Rework) ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ขั้นตอนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากปัญหาการแก้ไขใหม่ (Rework) ที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มเวลาในขั้นตอนการผลิตมากขึ้นโดยไม่จำเป็น เกิดความสูญเสียที่มีผลอย่างมากต่อต้นทุนการผลิต และทำให้ส่งงานล่าช้ากว่ากำหนด

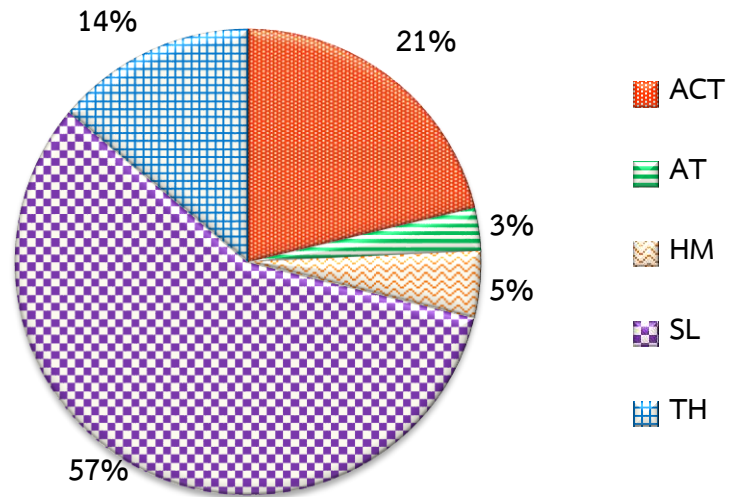


* แทนหน่วยเป็น “แผง”

รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

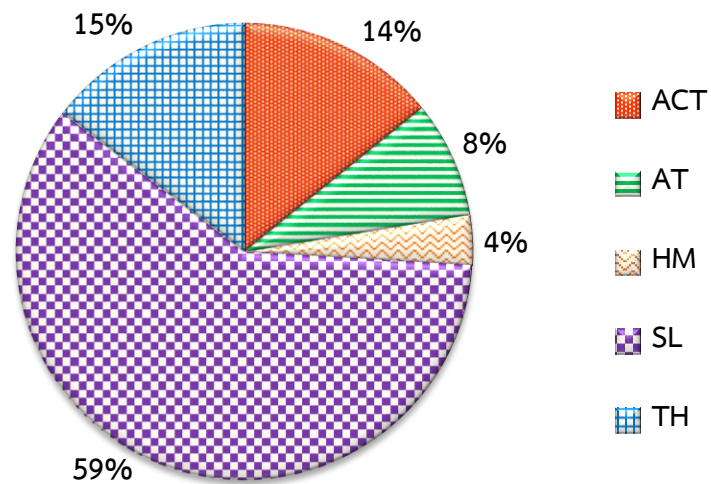
เมื่อพิจารณาข้อมูลการผลิตตั้งแต่เดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 ของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทที่ผลิตได้ในโรงงานกรณีศึกษาดังรูปที่ 3.25 ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละลูกค้า จะพบว่าแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการบินสำหรับเครื่องบิน (TH) มียอดการผลิตคิดเป็นร้อยละ 14 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง (AT) มียอดการผลิตคิดเป็นร้อยละ 3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL) มียอดการผลิตคิดเป็นร้อยละ 57 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับเครื่องเสียง (ACT) มียอดการผลิตคิดเป็นร้อยละ 21 และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับสารสนเทศ (HM) มียอดการผลิตคิดเป็นร้อยละ 5 จากข้อมูลจำนวนการผลิตจะพบว่าผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL) มียอดการผลิตสูงสุดเป็นร้อยละ 57 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และเมื่อพิจารณามูลค่าการสูญเสียของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทจากรูปที่ 3.26 ร้อยละมูลค่าความสูญเสียของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 จะพบว่าผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL) มีมูลค่าความสูญเสียสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 59 ของมูลค่าความสูญเสียทั้งหมดเป็นเงิน 4,421,558 บาท นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL) ยังมีร้อยละของยอดขายคิดเป็นร้อยละ 51 จากยอดขายทั้งหมดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงระยะเวลา 1 ปีซึ่งเป็นร้อยละของยอดขายที่มากที่สุดดังรูปที่ 3.27 ร้อยละยอดขายของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกพิจารณาผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL)

ร้อยละจำนวนการผลิต (%) ของแต่ละลูกค้า



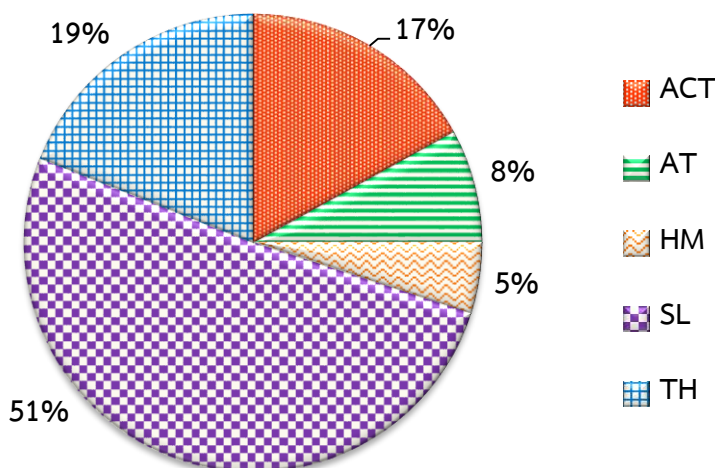
รูปที่ 3.25 ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

ร้อยละความสูญเสีย (%) ของแต่ละลูกค้า



รูปที่ 3.26 ร้อยละมูลค่าความสูญเสียของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2559

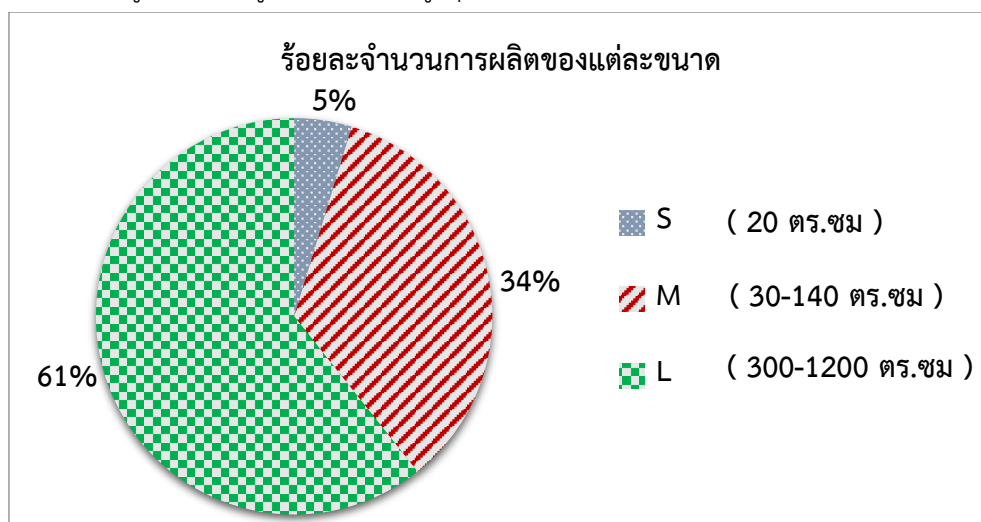
ร้อยละของยอดขาย (%) ของแต่ละลูกค้า



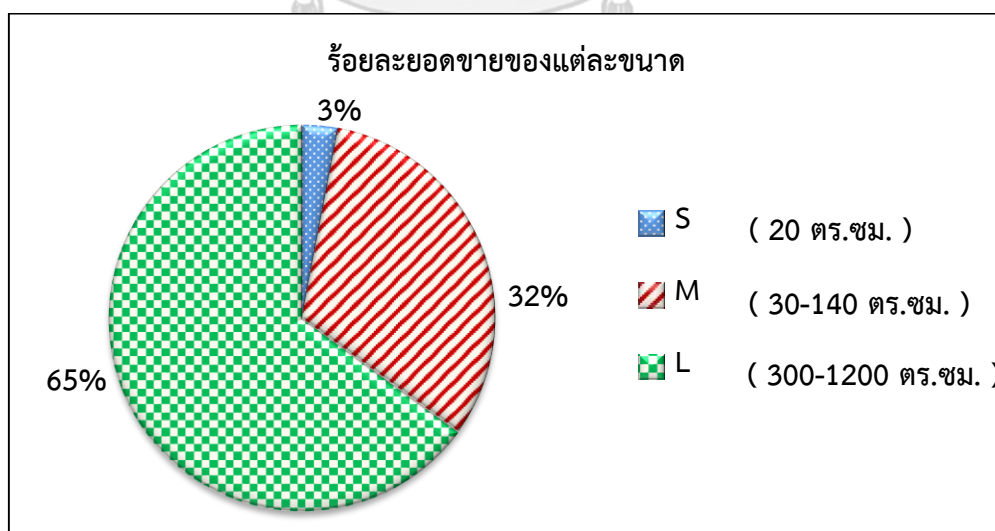
รูปที่ 3.27 ร้อยละยอดขายของแต่ละลูกค้าของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

หลังจากพิจารณาเลือกผลิตภัณฑ์ประเภทแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมระบบการทำงานสำหรับลิฟท์ (SL) แล้ว จากนั้นทำการพิจารารุ่นของผลิตภัณฑ์ (SL) เพื่อจะทำการศึกษาต่อไปจาก โดยที่ผลิตภัณฑ์ (SL) แบ่งขนาดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ออกเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ซึ่งขนาดจะแบ่งตามพื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (S) มีพื้นที่ประมาณ 20 ตารางเซนติเมตร, ขนาดกลาง (M) มีพื้นที่ประมาณ 30 - 140 ตารางเซนติเมตร และขนาดใหญ่ (L) มีพื้นที่ประมาณ 300 - 1,200 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.28 ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 พบว่าร้อยละของจำนวนการผลิตผลิตภัณฑ์ (SL) ขนาดใหญ่ (L) คิดเป็นร้อยละ 61 ของจำนวนการผลิตผลิตภัณฑ์ (SL) รวมทั้งปี ซึ่งขนาดที่มีร้อยละการผลิตสูงที่สุด เมื่อพิจารณาร้อยละของยอดขายของผลิตภัณฑ์ (SL) ขนาดใหญ่ (L) มียอดขายคิดเป็นร้อยละ 65% ของยอดขายผลิตภัณฑ์ (SL) รวมทั้งปีดังรูปที่ 3.29 ร้อยละยอดขายของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 จึงเลือกตัวแทนผลิตภัณฑ์ (SL) ขนาดใหญ่ (L) ที่มีค่าร้อยละของจำนวนการผลิตและค่าร้อยละของยอดขายมากที่สุด มีความต่อเนื่องในการผลิตที่สามารถเก็บข้อมูลได้ง่ายและเป็นรุ่นที่สามารถนำไปใช้พัฒนากับรุ่นอื่นได้มาทำการพิจารณาเลือกรุ่นที่จะนำไปศึกษาต่อไปทั้งหมด 6 รุ่น ดังรูปที่ 3.30 ร้อยละของจำนวนการผลิตแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 และรูปที่ 3.31 ร้อยละของมูลค่าความสูญเสียแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 พบว่าผลิตภัณฑ์ (SL) รุ่น SL892 มีค่าร้อยละของจำนวนการผลิตมากที่สุด รองลงมาคือรุ่น

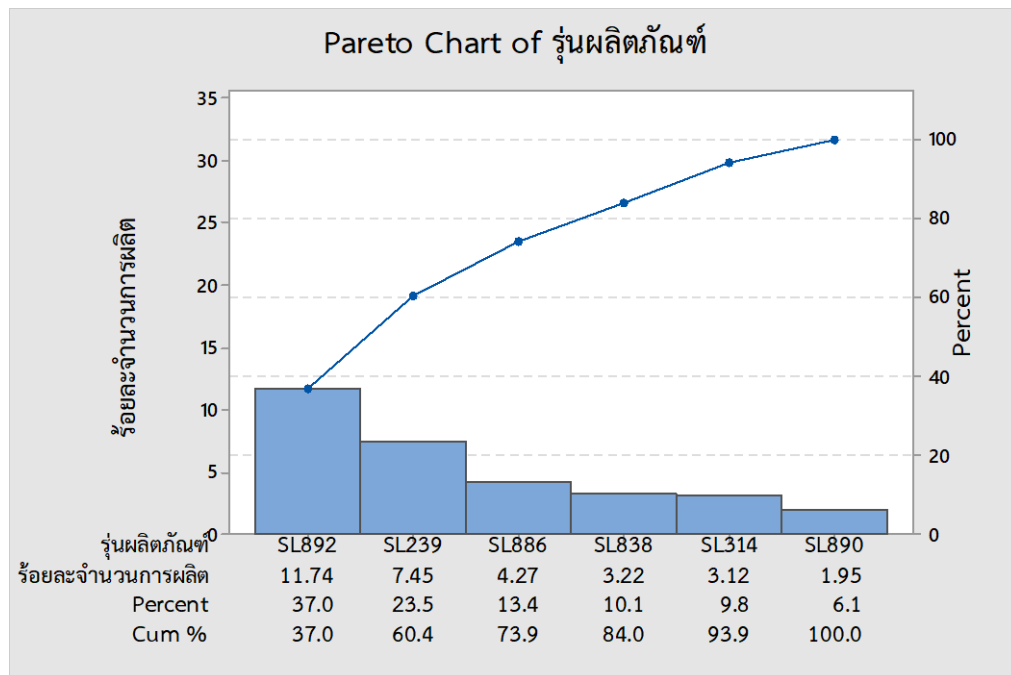
SL239 และ SL886 แต่เมื่อพิจารณาที่ร้อยละของมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละรุ่นพบว่า ผลิตรภัณฑ์ (SL) รุ่น SL239 มีมูลค่าความสูญเสียสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 18.65 ของมูลค่าความสูญเสียของผลิตรภัณฑ์ (SL) ทั้งหมดในเวลา 1 ปี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการศึกษาลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของผลิตรภัณฑ์ รุ่น SL239 เป็นตัวแทนในการปรับปรุงของผลิตรภัณฑ์ (SL) เนื่องจากมีค่าร้อยละของจำนวนการผลิตและร้อยละของมูลค่าความสูญเสียที่ส่งผลกระทบต่อมูลค่าความสูญเสียโดยรวมสูงสุด



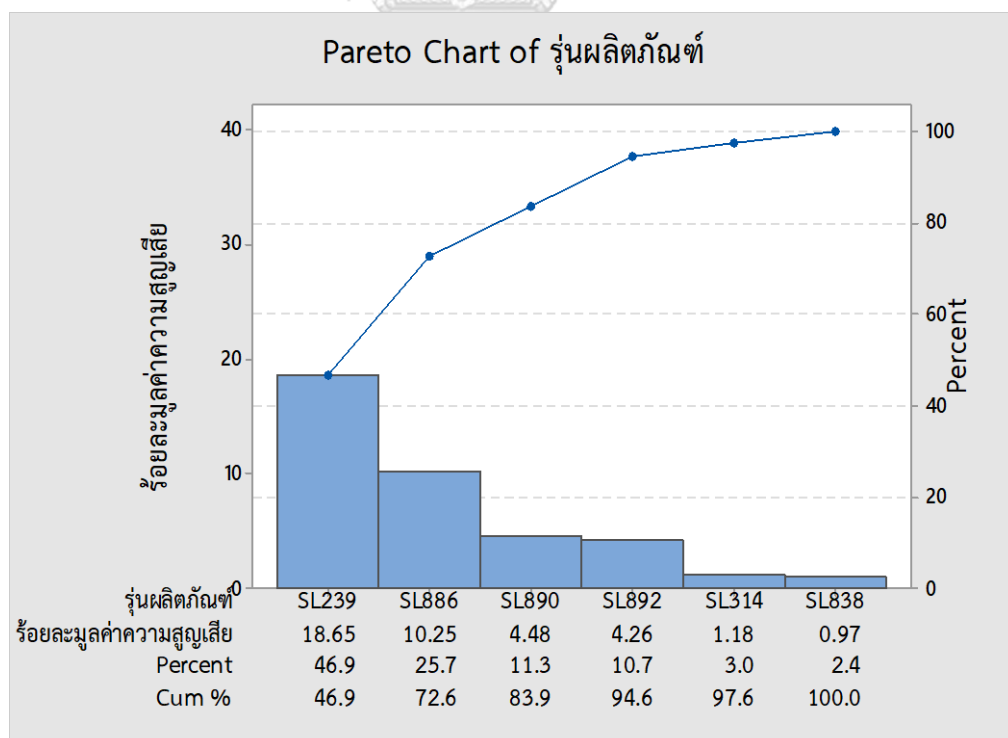
รูปที่ 3.28 ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560



รูปที่ 3.29 ร้อยละจำนวนการผลิตของแต่ละขนาดของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

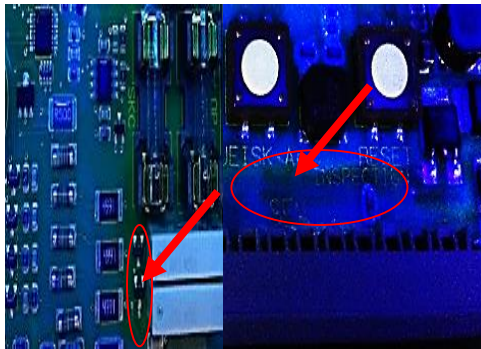


รูปที่ 3.30 ร้อยละของจำนวนการผลิตแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

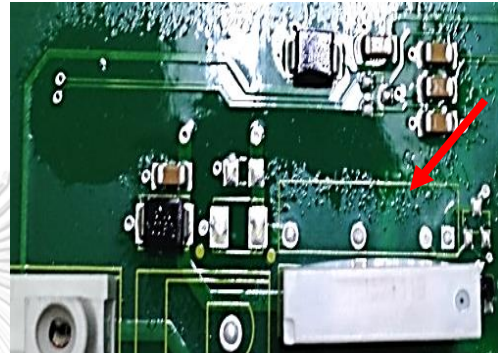


รูปที่ 3.31 ร้อยละของมูลค่าความสูญเสียของแต่ละรุ่นของโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560

หลังจากเลือกผลิตภัณฑ์ (SL) รุ่น SL239 ที่จะนำมาทำการปรับปรุงแล้ว ได้มีการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของเสียที่พบดังรูปที่ 3.32 ตัวอย่างประเภทของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแยกของเสียออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ เคลือบไม่ครบพื้นที่ (A), น้ำยาไหลเข้าในพื้นที่ยกเคลือบ (B), หลุดลอก (C), ผิวนูน (D), ความหนาไม่ได้ตามที่กำหนด (E) และฟองอากาศ (F)



เคลือบไม่ครบพื้นที่ที่กำหนด (A)



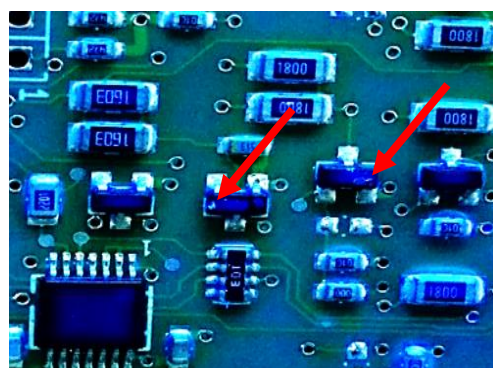
ผิวนูน (D)



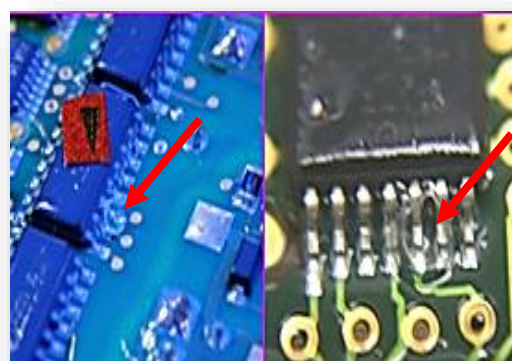
น้ำยาไหลเข้าพื้นที่ยกเคลือบ (B)



ความหนาไม่ได้ตามที่กำหนด (E)



ลอกหลุด (C)



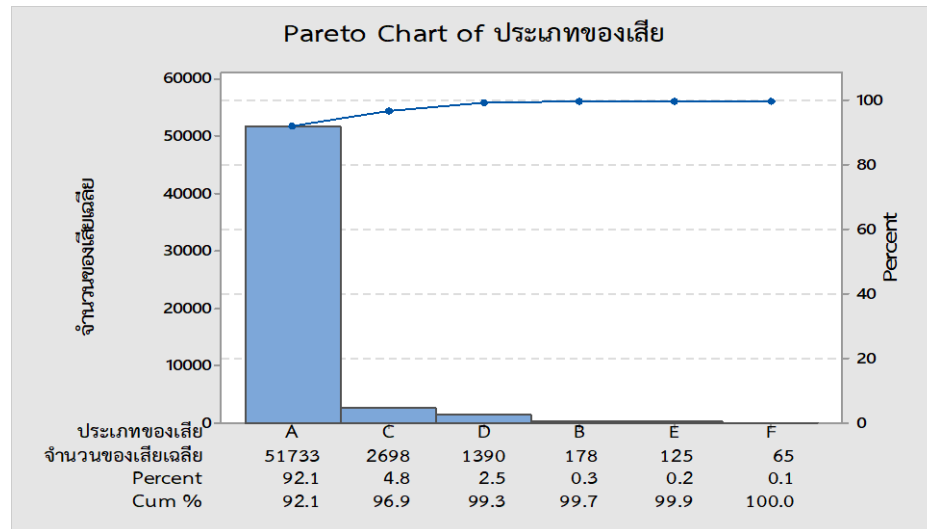
ฟองอากาศ (E)

รูปที่ 3.32 ตัวอย่างประเภทของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องของกระบวนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากนั้นนำข้อมูลจำนวนของเสียในแต่ละประเภทในตารางที่ 3.1 จำนวนลักษณะของเสียเฉลี่ยแต่ละประเภทของขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสในช่วงเดือนเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560 มาพิจารณาเลือกลักษณะของเสียที่จะทำการแก้ไขโดยใช้แผนภาพพาเรโตดังแสดงใน รูปที่ 3.33 แผนภาพพาเรโตแสดงจำนวนของเสียแต่ละประเภทจากกระบวนการเคลือบแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสของผลิตภัณฑ์ (SL) ในช่วงเดือนเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560 ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ (SL) มีจำนวนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทเคลือบไม่ครบพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 92.1 จากจำนวนของเสียที่พบทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ (SL) ดังนั้นการลดจำนวนของเสียจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสจึงมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาในเรื่องลักษณะของเสียประเภทเคลือบไม่ครบพื้นที่หรือเรียกว่า Insufficient Coating

ตารางที่ 3.1 จำนวนของเสียเฉลี่ยของแต่ละประเภทจากขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสของผลิตภัณฑ์ (SL) ในช่วงเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560

ประเภทของเสีย		ร้อยละจำนวน ของเสียเฉลี่ย	ร้อยละสะสม ของของเสีย
ของเสีย	จำนวนของเสียเฉลี่ย		
A	51,733	92.1	92.1
B	178	4.8	96.4
C	2,698	2.5	99.3
D	1,390	0.3	99.7
E	125	0.2	99.9
F	65	0.1	100



รูปที่ 3.33 แผนภาพพาเรโตแสดงจำนวนของเสียเฉลี่ยแต่ละประเภทจากขั้นตอนการเคลือบ
แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของผลิตภัณฑ์ (SL) ในช่วงเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560

บทที่ 4

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการดำเนินงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย การกำหนดวัสดุและอุปกรณ์ หลังจากนั้น กำหนดวิธีการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน จากนั้นทำการออกวิธีการทดลองบน แผ่นทดลอง และวิธีการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง เมื่อออกแบบการทดลอง เรียบร้อยแล้วจึงทำการออกแบบวิธีการวัดความหนาของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และ วิธีวัดความกว้างของการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำค่าที่ได้จากการ วัดมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ สุดท้ายทำการกำหนดวิธีการเปรียบเทียบผลการทดลองแบบเดิมและ แบบใหม่ โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์มีดังนี้

4.1.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

4.1.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง

- 1) แผงวงจรที่ยังไม่ได้ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Print Circuit Board; PCB)
- 2) แผงวงจรประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Print Circuit Board Assembly; PCBA)
- 3) สารเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประเภท ซิลิโคน

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

- 1) ชุดยึดติดตั้ง (Fixture)
- 2) ชุดครอบคลุม (Cover Fixture)
- 3) เครื่องเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ
- 4) ถาดใส่แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ป้องกันไฟฟ้าสถิต
- 5) รถเข็นชิ้นงาน
- 6) เครื่องวัดความหนาของสารเคลือบแผงวงจร
- 7) เครื่องวัดความกว้างหรือเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
- 8) หลอดไฟอัลตราไวโอเล็ต

9) นาฬิกาจับเวลา

4.2 วิธีการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน

วิธีการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบันมีดังนี้

- 4.2.1 ศึกษารูปแบบของแผงวงจรและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- 4.2.2 ศึกษาวิธีการพันเคลือบด้วยเครื่องเคลือบแผงวงจรอัตโนมัติ
- 4.2.3 ศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 4.2.4 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร
- 4.2.5 ศึกษารอบเวลาการพันเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4.2.1 ศึกษารูปแบบของแผงวงจรและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

- 1) วัดขนาดความกว้าง ความยาวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 2) แยกประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4.2.2 ศึกษาวิธีการพันเคลือบด้วยเครื่องเคลือบแผงวงจรอัตโนมัติ

- 1) นำลักษณะการเคลื่อนที่ของหัวพ่นขณะพ่นน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาวาดเป็นแผนภาพ

4.2.3 ศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

- 1) ศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และนำมาวาดเป็นแผนภาพการทำงาน
- หมายเหตุ: - ศึกษาขั้นการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1 สายการผลิตจากทั้งหมด 4 สายการผลิต

4.2.4 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร

- 1) จับเวลาการแก้ไขชิ้นงานเมื่อพนักงานเริ่มทำการแก้ไขผิวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จนสิ้นสุดการแก้ไขชิ้นงาน โดยจะจับเวลาเป็นรอบการแก้ไขชิ้นงานเป็นวินาทีต่อแผงวงจร
- 2) นำค่าที่เก็บได้มาหาค่าเฉลี่ยของเวลาการแก้ไขผิว (T_R) ชิ้นงานต่อแผงวงจร

หมายเหตุ: - โดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยาว (L) และความกว้าง (W) ที่ต้องการเคลือบผิว เท่ากับ 20 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.2.5 ศึกษาเวลาการพ่นเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

- 1) ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เดิม โดยกำหนดจุดการพ่นเป็นเส้นตรงระยะ 20 เซนติเมตร
- 2) วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวในการพ่นน้ำยาเคลือบทั้งหมด 8 จุด
- 3) บันทึกค่าที่ได้จากการวัด และนำมาคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวต่อแผงวงจร (T_d) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของเวลาที่ใช้ในการพ่นและเวลากลับของหัวพ่นทั้งหมด ดังสมการที่ 4.1 โดย (1) เวลารวมที่ใช้ในการพ่นทั้งหมดมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเที่ยว (N) และเวลาที่ใช้ต่อเที่ยว และจำนวนเที่ยว (N) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความกว้างที่ต้องการเคลือบของแผงวงจร (W) ต่อความกว้างของผิวเคลือบต่อเที่ยวของการพ่น (B) ซึ่งในที่นี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 80 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยพ่นที่วัดได้จริง กรณีไม่ถูกทับซ้อน (\emptyset) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ (2) เวลาที่ใช้ในการรอกกลับของหัวพ่นทั้งหมด (n) มีค่าเท่ากับผลคูณของเวลาที่ใช้ในการรอกกลับของหัวพ่นต่อเที่ยว (U) และจำนวนเที่ยวที่ใช้ในการรอกกลับ (N-1) ดังสมการที่ 4.3

นอกจากนี้ เวลารวมของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (TT) มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในการพ่นน้ำยาเคลือบผิว (T_d) และเวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิว (T_R) ชิ้นงานต่อแผง ดังแสดงในสมการที่ 4.4 โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก

$$T_d = N \frac{L}{V} + n \quad (4.1)$$

$$N = \frac{W}{B} \text{ หรือ } = \frac{W}{0.8\emptyset} \quad (4.2)$$

$$n = (N - 1)U \quad (4.3)$$

$$TT = T_d + T_R \quad (4.4)$$

- เมื่อ T_d = เวลาที่ใช้ในการพ่นน้ำยาเคลือบผิวต่อแผง (วินาที/แผง)
 N = จำนวนเที่ยวในการพ่นต่อแผง (เที่ยว/แผง) และ N เป็นเลขจำนวนเต็ม (Integer number)
 L = ความยาวที่ใช้ในการพ่นหรือความยาวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (เซนติเมตร)
 V = ความเร็วของหัวพ่นน้ำยาในการเคลือบผิว (เซนติเมตร/วินาที)
 W = ความกว้างที่ต้องการเคลือบผิวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (เซนติเมตร)
 B = ความกว้างของแนวเคลือบต่อเที่ยว (เซนติเมตร) (ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ $0.8\emptyset$)
 \emptyset = ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริง กรณีไม่ถูกทับซ้อน (cm)
 n = เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการรอกกลับของหัวพ่นต่อแผงวงจร (วินาที/แผง)
 U = เวลาในการรอกกลับของหัวพ่น (วินาที/เที่ยว)
 TT = เวลา รวมของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (วินาที/แผง)
 T_R = เวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (วินาที/แผง)

หมายเหตุ: ค่าพารามิเตอร์เดิมคือ ความดันเท่ากับ 2.5 กิโลปาสคาล ความเร็วเท่ากับ 25 เซนติเมตร/วินาที ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร เท่ากับ 6 เซนติเมตร โดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยาว (L) และความกว้าง (W) ที่ต้องการเคลือบผิว เท่ากับ 20 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.3 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง

วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง (PCB) มีดังนี้

4.3.1 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว=0)

4.3.2 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง (เมื่อหัวพ่นเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่าง ๆ กัน)

4.3.1 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว=0)

- กำหนดให้
- ตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของน้ำยาเคลือบ (T), ค่าเฉลี่ยความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบ (\emptyset)
 - ตัวแปรอิสระ คือ ความดันในหัวพ่น (P), ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร (H), เวลาในการพ่น (S)

1) ออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V = 0$)

ตารางที่ 4.1 การกำหนดระดับปัจจัยและออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V = 0$)

ความดันในหัวพ่น (kPa)	เวลาในการพ่น (Sec)	ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร (cm)							
		2		4		6		8	
1.5	1	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	5	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	10	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	15	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	20	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
2.5	1	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	5	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	10	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	15	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø
	20	T	Ø	T	Ø	T	Ø	T	Ø

หมายเหตุ:

- เลือกใช้ค่าความดันของการพ่นเคลือบ 2 ระดับ เพราะจากเดิมที่ความดัน 2.5 กิโลปาสกาลยิ่งใช้ความดันมากยิ่งขึ้นทำให้การเคลือบออกมาไม่ดี
- เลือกใช้ค่าเวลาที่ใช้ในการพ่น 5 ระดับ เพื่อหาแนวโน้มของเวลาในการพ่นส่งผลต่อปริมาณผิวเคลือบในทิศทางใด
- เลือกใช้ค่าความสูงของหัวพ่นเคลือบ 4 ระดับ เพราะต้องการความละเอียดมากขึ้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสูงของหัวพ่นกับปัจจัยอื่นๆที่เหมาะสมมากที่สุด

2) ทำการทดลองตามเมทริกซ์การออกแบบ ดังตารางที่ 4.2-4.4 ทำการทดลองตามลำดับการทดลองแบบสุ่มซึ่งกำหนดการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

- 2.1) เตรียมแผ่นทดลองและเช็คทำความสะอาดหัวพ่น
- 2.2) ตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องเคลือบอัตโนมัติตามลำดับของการทดลองอย่างสุ่ม โดยกำหนดจุดการพ่นของแต่ละสภาวะการทดลอง
- 2.3) นำแผ่นทดลองที่ได้เข้าตู้อบ 20 นาที เพื่อให้สารเคลือบแห้งสนิท

2.4) รोजนแผ่นทดลองที่นำออกจากตู้อบเย็นตัวลง จากนั้นนำแผ่นทดลองวางบนตำแหน่งป้องกันไฟฟ้าสถิตใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต วัดค่าความหนาและค่าความกว้างการกระจายตัวของสารเคลือบ

2.5) บันทึกผลการทดลอง

3) นำค่าที่วัดได้จากผลการทดลองทั้งหมดมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนากับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยา

4) ตรวจสอบความถูกต้องตามสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติสมมติฐานของความเป็นอิสระต่อกัน และสมมติฐานของควมมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

5) นำค่าเฉลี่ยความหนาและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่าความหนาและค่าความกว้างการกระจายตัวของสารเคลือบอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



ตารางที่ 4.2 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$)

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	เวลาในการพ่น (sec), S
1	45	1.5	2	1
2	60	1.5	2	1
3	11	1.5	2	5
4	71	1.5	2	5
5	6	1.5	2	10
6	19	1.5	2	10
7	33	1.5	2	15
8	47	1.5	2	15
9	26	1.5	2	20
10	63	1.5	2	20
11	1	1.5	4	1
12	75	1.5	4	1
13	36	1.5	4	5
14	78	1.5	4	5
15	28	1.5	4	10
16	31	1.5	4	10
17	52	1.5	4	15
18	79	1.5	4	15
19	38	1.5	4	20
20	61	1.5	4	20
21	15	1.5	6	1
22	64	1.5	6	1
23	50	1.5	6	5
24	54	1.5	6	5
25	5	1.5	6	10
26	46	1.5	6	10
27	9	1.5	6	15

ตารางที่ 4.3 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$ (ต่อ))

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	เวลาในการพ่น (sec), S
28	10	1.5	6	15
29	32	1.5	6	20
30	42	1.5	6	20
31	22	1.5	8	1
32	69	1.5	8	1
33	39	1.5	8	5
34	58	1.5	8	5
35	25	1.5	8	10
36	62	1.5	8	10
37	20	1.5	8	15
38	76	1.5	8	15
39	24	1.5	8	20
40	55	1.5	8	20
41	27	2.5	2	1
42	40	2.5	2	1
43	21	2.5	2	5
44	49	2.5	2	5
45	53	2.5	2	10
46	73	2.5	2	10
47	13	2.5	2	15
48	17	2.5	2	15
49	14	2.5	2	20
50	57	2.5	2	20
51	18	2.5	4	1
52	70	2.5	4	1
53	4	2.5	4	5
54	68	2.5	4	5

ตารางที่ 4.4 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V=0$ (ต่อ))

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	เวลาในการพ่น (sec), S
55	12	2.5	4	10
56	66	2.5	4	10
57	44	2.5	4	15
58	59	2.5	4	15
59	8	2.5	4	20
60	29	2.5	4	20
61	23	2.5	6	1
62	56	2.5	6	1
63	43	2.5	6	5
64	65	2.5	6	5
65	67	2.5	6	10
66	72	2.5	6	10
67	51	2.5	6	15
68	77	2.5	6	15
69	16	2.5	6	20
70	37	2.5	6	20
71	35	2.5	8	1
72	41	2.5	8	1
73	2	2.5	8	5
74	30	2.5	8	5
75	34	2.5	8	10
76	74	2.5	8	10
77	3	2.5	8	15
78	7	2.5	8	15
79	48	2.5	8	20
80	80	2.5	8	20

4.3.2 วิธีการทดลองบนแผ่นทดลอง (เมื่อหัวพ่นเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆกัน)

- กำหนดให้
- ตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของน้ำยาเคลือบ (T), ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยา(\emptyset)
 - ตัวแปรอิสระ คือ ความดันในหัวพ่น (P), ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร (H), ความเร็วในการพ่น (V)

1) ออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V > 0$)

ตารางที่ 4.5 การกำหนดระดับปัจจัยและออกแบบการทดลอง (เมื่อ $V > 0$)

ความดันในหัวพ่น (kPa)	ความเร็วในการพ่น (cm/sce)	ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร (cm)							
		2		4		6		8	
1.5	10	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	15	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	20	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	25	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
2.5	10	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	15	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	20	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset
	25	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset	T	\emptyset

หมายเหตุ: - เลือกใช้ค่าความเร็วที่ใช้ในการพ่น 4 ระดับ เพื่อหาแนวโน้มของเวลาในการพ่นส่งผลต่อปริมาณผิวเคลือบในทิศทางใด

2) ทำการทดลองตามเมทริกซ์การออกแบบ ดังตารางที่ 4.6-4.8 ทำการทดลองตามลำดับการทดลองแบบสุ่มซึ่งกำหนดการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

2.1) เตรียมแผ่นทดลองและเช็ดทำความสะอาดหัวพ่น

2.2) ตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องเคลือบอัตโนมัติตามลำดับของการทดลองอย่างสุ่ม โดยกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการพ่นใช้ความยาวในการพ่น 20 cm ในทุกสภาวะการทดลองจนครบ

2.3) นำแผ่นทดลองที่ได้เข้าตู้อบ 20 นาที เพื่อให้สารเคลือบแห้งสนิท

2.4) รोजนแผ่นทดลองที่นำออกจากตู้อบเย็นตัวลง จากนั้นนำแผ่นทดลองวางบนตำแหน่งป้องกันไฟฟ้าสถิตใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต วัดค่าความหนาและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยา

2.5) บันทึกผลการทดลอง

3) นำค่าที่วัดได้จากผลการทดลองทั้งหมดมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนากับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยา และคำนวณหารอบเวลาในการเคลื่อนผ่านวงจรรด้วยเครื่องอัตโนมัติของแต่ละสภาวะการทดลอง

4) ตรวจสอบความถูกต้องตามสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระต่อกัน และสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

5) นำค่าเฉลี่ยความหนาและค่าเฉลี่ยความกว้างการกระจายตัวของสารเคลือบที่ได้จากการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยความหนาและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ออกทีละตัว จนเหลือเฉพาะตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหนาและค่าความกว้างอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ตารางที่ 4.6 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว (V) >0

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V
1	16	1.5	2	10
2	52	1.5	2	10
3	14	1.5	2	15
4	35	1.5	2	15
5	1	1.5	2	20
6	57	1.5	2	20
7	17	1.5	2	25
8	55	1.5	2	25
9	9	1.5	4	10
10	37	1.5	4	10
11	23	1.5	4	15
12	12	1.5	4	15
13	36	1.5	4	20
14	43	1.5	4	20
15	47	1.5	4	25
16	60	1.5	4	25
17	40	1.5	6	10
18	22	1.5	6	10
19	51	1.5	6	15
20	28	1.5	6	15
21	33	1.5	6	20
22	64	1.5	6	20
23	3	1.5	6	25
24	39	1.5	6	25
25	41	1.5	8	10
26	5	1.5	8	10

ตารางที่ 4.7 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว (V) >0 (ต่อ)

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V
27	20	1.5	8	15
28	11	1.5	8	15
29	10	1.5	8	20
30	63	1.5	8	20
31	59	1.5	8	25
32	56	1.5	8	25
33	19	2.5	2	10
34	50	2.5	2	10
35	15	2.5	2	15
36	53	2.5	2	15
37	34	2.5	2	20
38	58	2.5	2	20
39	49	2.5	2	25
40	25	2.5	2	25
41	21	2.5	4	10
42	4	2.5	4	10
43	29	2.5	4	15
44	31	2.5	4	15
45	13	2.5	4	20
46	26	2.5	4	20
47	27	2.5	4	25
48	2	2.5	4	25
49	7	2.5	6	10
50	6	2.5	6	10
51	18	2.5	6	15
52	45	2.5	6	15

ตารางที่ 4.8 เมทริกซ์ออกแบบการทดลอง เมื่อความเร็ว ($V > 0$) (ต่อ)

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V
53	8	2.5	6	20
54	42	2.5	6	20
55	32	2.5	6	25
56	44	2.5	6	25
57	46	2.5	8	10
58	38	2.5	8	10
59	48	2.5	8	15
60	62	2.5	8	15
61	24	2.5	8	20
62	54	2.5	8	20
63	61	2.5	8	25
64	30	2.5	8	25

4.4 วิธีการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

วิธีการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

4.4.1 วิธีการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

4.4.2 วิธีการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนการ

เคลื่อนแผงวงจรในปัจจุบัน

4.4.1 วิธีการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

- 1) เตรียมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริงจำนวน 10 แผ่น
- 2) ตั้งค่าพารามิเตอร์ตามสภาวะของระดับปัจจัยที่ได้จากผลการทดลองที่ดีที่สุด
- 3) วัดค่าความหนาของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 4) ตรวจสอบผิวเคลือบและจุดบัดกรีของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก FTY

(First Time Yield)

- 5) ข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาร้อยละของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก FTY

หมายเหตุ: - ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง อาจถูกเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการใช้งานจริง

4.4.2 วิธีการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรในปัจจุบัน

1) ออกใบกำหนดการตั้งค่าพารามิเตอร์ใหม่ของเครื่องเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติสำหรับให้พนักงานในขั้นตอนการผลิตทำงานตามกำหนด

2) จัดอบรมพนักงานในขั้นตอนการทำงานใหม่

3) ออกใบการตรวจสอบชิ้นงานสำหรับขั้นตอนงานจริง กำหนดให้พนักงานเก็บตัวอย่าง ชิ้นงานของแต่ละกระบวนการทำงาน โดยตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกเก็บจะถูกสุ่มเลือกจากรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในแต่ละกระบวนการทำงาน ซึ่งในโรงงานกรณีศึกษาแบ่งการทำงานออกเป็น 3 กะต่อวันคือ เช้า, ป้าย และดึก

4) พนักงานวัดค่าความหนาของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5) พนักงานตรวจสอบผิวเคลือบและจดบันทึกของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก FTY (First Time Yield)

6) นำค่าได้จากการเก็บข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยของร้อยละของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก FTY (First Time Yield) และค่าของความหนาเฉลี่ย

หมายเหตุ: - ในการตรวจสอบชิ้นงานพนักงานจะทำการตรวจสอบจากลักษณะของเสียที่พบบนชิ้นงาน เมื่อพบของเสียจะนับให้ชิ้นงานนั้นเป็นของเสียทันที

- ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานเป็นขั้นตอนที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้นมาชั่วคราวในระยะเวลา 1 เดือน เพื่อเป็นการยืนยันผลการการทดลอง

4.5 วิธีการวัดความหนาของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

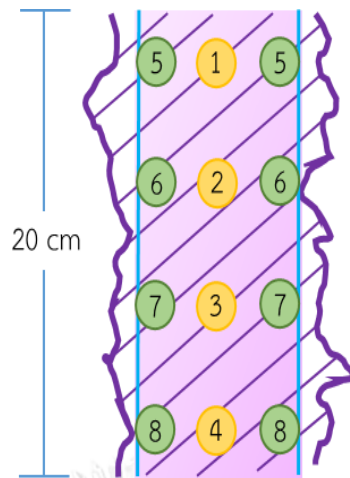
1) จัดเตรียมแผ่นทดลองที่ผ่านการเคลือบจากเครื่องเคลือบอัตโนมัติ

2) ตั้งค่าเครื่องวัดความหนาให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

3) นำหัววัดของเครื่องวัดความหนาวางบนแผ่นทดลอง เครื่องวัดจะแสดงตัวเลขค่าความหนา ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)

4) จดบันทึกค่าความหนาและคำนวณความแตกต่างระหว่างจุดด้านข้างและตรงกลางของความหนาน้ำยาเคลือบ

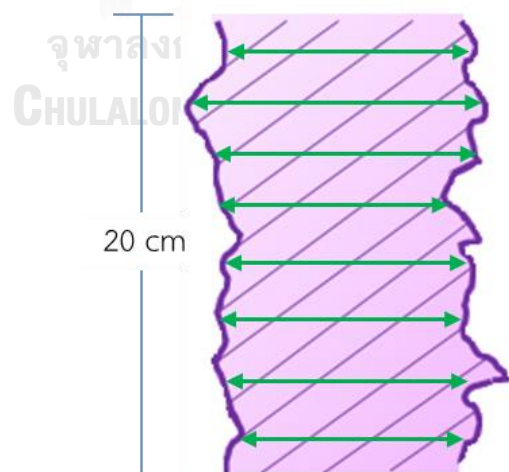
หมายเหตุ: ทำการวัดทั้งหมด 8 จุด แบ่งเป็นด้านข้าง 4 จุดและตรงกลาง 4 จุด ต่อการทดลอง 1 ครั้ง



รูปที่ 4.1 แบบจำลองตำแหน่งวัดค่าความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา

4.6 วิธีวัดความกว้างของการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

- 1) นำแผ่นทดลองที่ผ่านการเคลือบอัตโนมัติวางบนจุดป้องกันไฟฟ้าสถิตในลักษณะขนานกับพื้นราบ
 - 2) ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์วัดจากจุดขอบด้านหนึ่งถึงขอบอีกด้านหนึ่งของพื้นที่ความกว้างการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบ
 - 3) อ่านค่าที่วัดได้จากเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ จากนั้นบันทึกผล
- หมายเหตุ: ทำการวัดทั้งหมด 8 จุด แต่ละจุดห่างกันประมาณ 2 เซนติเมตร (cm)



รูปที่ 4.2 แบบจำลองตำแหน่งวัดค่าความกว้างของการกระจายตัวของน้ำยาด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab และกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติ (α) เท่ากับ 0.05

4.8 วิธีการเปรียบเทียบผลการทดลองแบบเดิมและแบบใหม่

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างก่อนการศึกษา ผลการทดลองเคลื่อนบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง และผลการนำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงาน โดยค่าดัชนีที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีดังนี้

1. ร้อยละของของดีในครั้งแรก (FTY) ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิว
2. รอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติเฉลี่ยต่อแผง
3. เวลารวมในกระบวนการเคลือบผิวเฉลี่ยต่อแผ่น
4. เปรียบเทียบผิวเคลือบที่ได้จากการทดลอง
5. เปรียบเทียบผลการศึกษา ก่อนและหลังการปรับปรุง

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะประกอบไปด้วยกัน 4 หัวข้อใหญ่ๆ ได้แก่ ผลการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน ผลการทดลองบนแผ่นทดลอง (PCB) ผลการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง และการเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

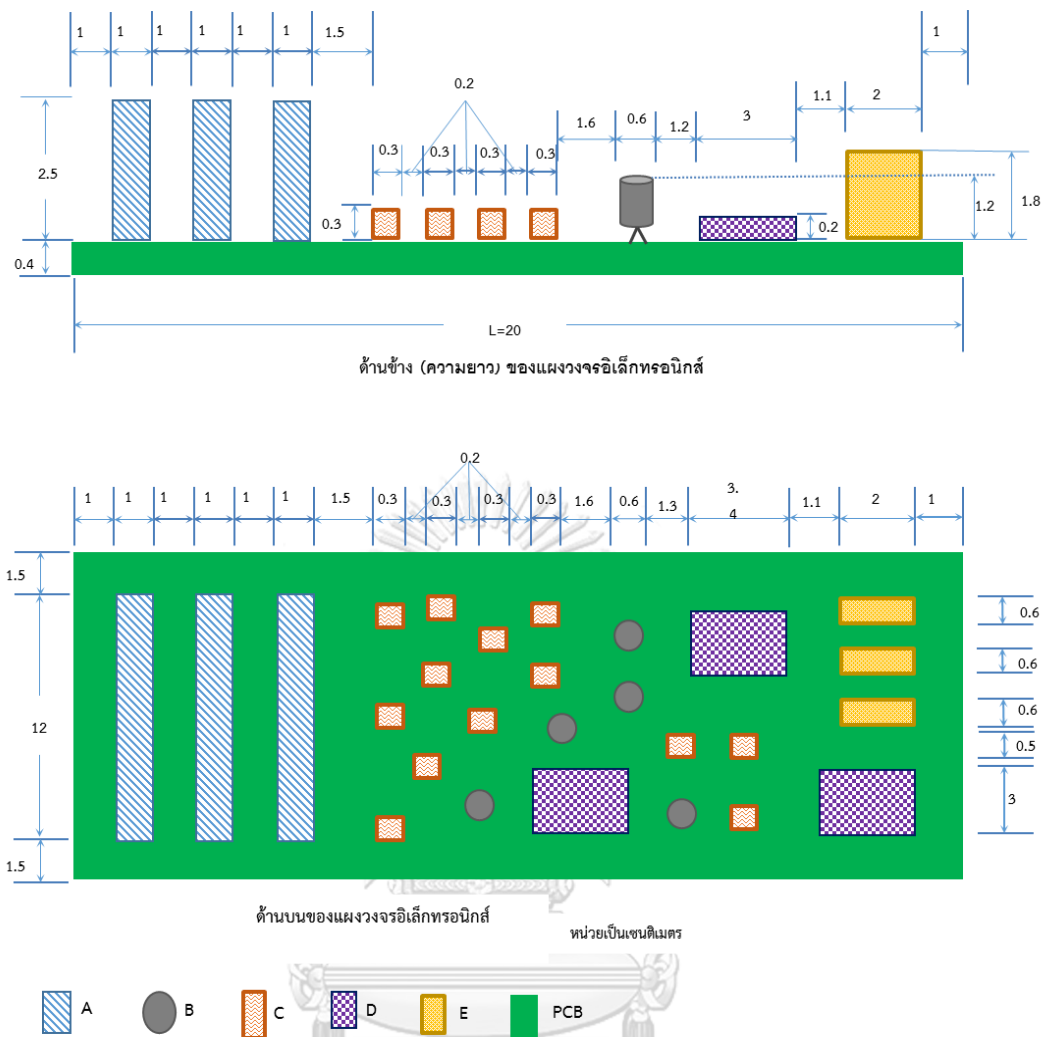
5.1 ผลการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบัน

ผลการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาปัจจุบันมีดังนี้

- 5.1.1 ผลการศึกษารูปแบบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 5.1.2 ผลการศึกษารูปแบบวิธีการพันเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 5.1.3 ผลการศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 5.1.4 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขชิ้นงาน
- 5.1.5 ผลการศึกษารอบเวลาการพันเคลือบและการแก้ไขงานใหม่

5.1.1 ผลการศึกษารูปแบบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

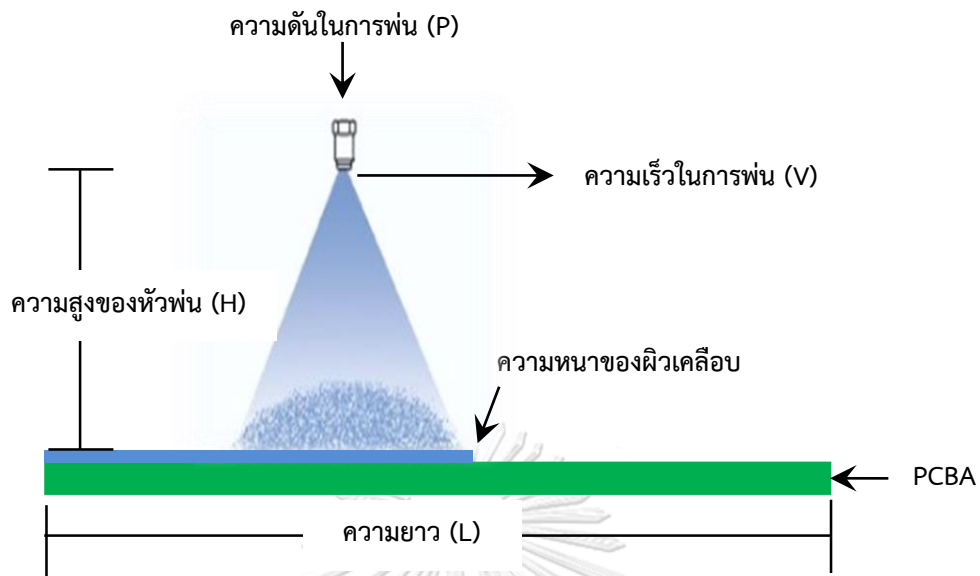
จากรูปที่ 5.1 พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกจัดวางไว้ที่ตำแหน่งด้านข้างของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์จำพวกคอนเนคเตอร์ และอุปกรณ์จำพวกสามารถเชื่อมต่อต่างๆ (A) ส่วนตรงกลางของแผงวงจรจะถูกวางด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้แก่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (B) ตัวต้านทางไฟฟ้า (C) วงจรรวมไอซี (D) และทรานซิสเตอร์ (E) เป็นต้น



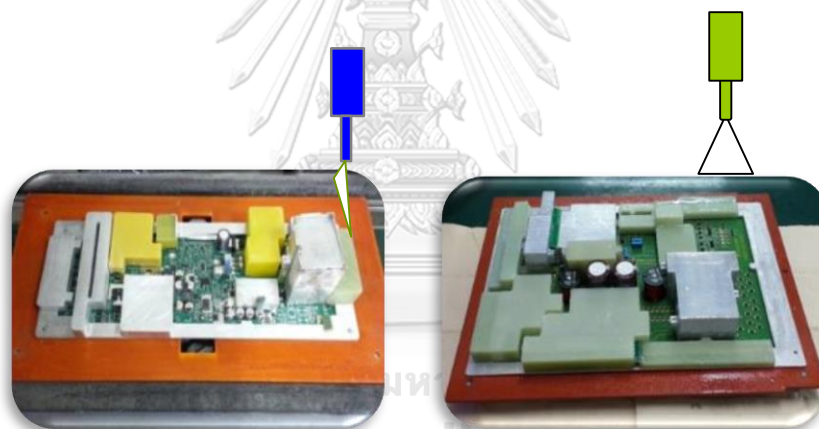
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5.1.2 ผลการศึกษารูปแบบวิธีการพันเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากการศึกษาดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ลักษณะการพันเคลือบด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติและตำแหน่งการพันเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการเคลือบด้วยเครื่องเคลือบต้องทำการตั้งค่าความสูงของหัวพ่นให้อยู่สูงกว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนแผงวงจรจากนั้นในขณะที่หัวพ่นทำการการพันโดยใช้ความดันภายในหัวพ่นและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปคงที่ตามความยาวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ ความดันในการพ่น (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V)



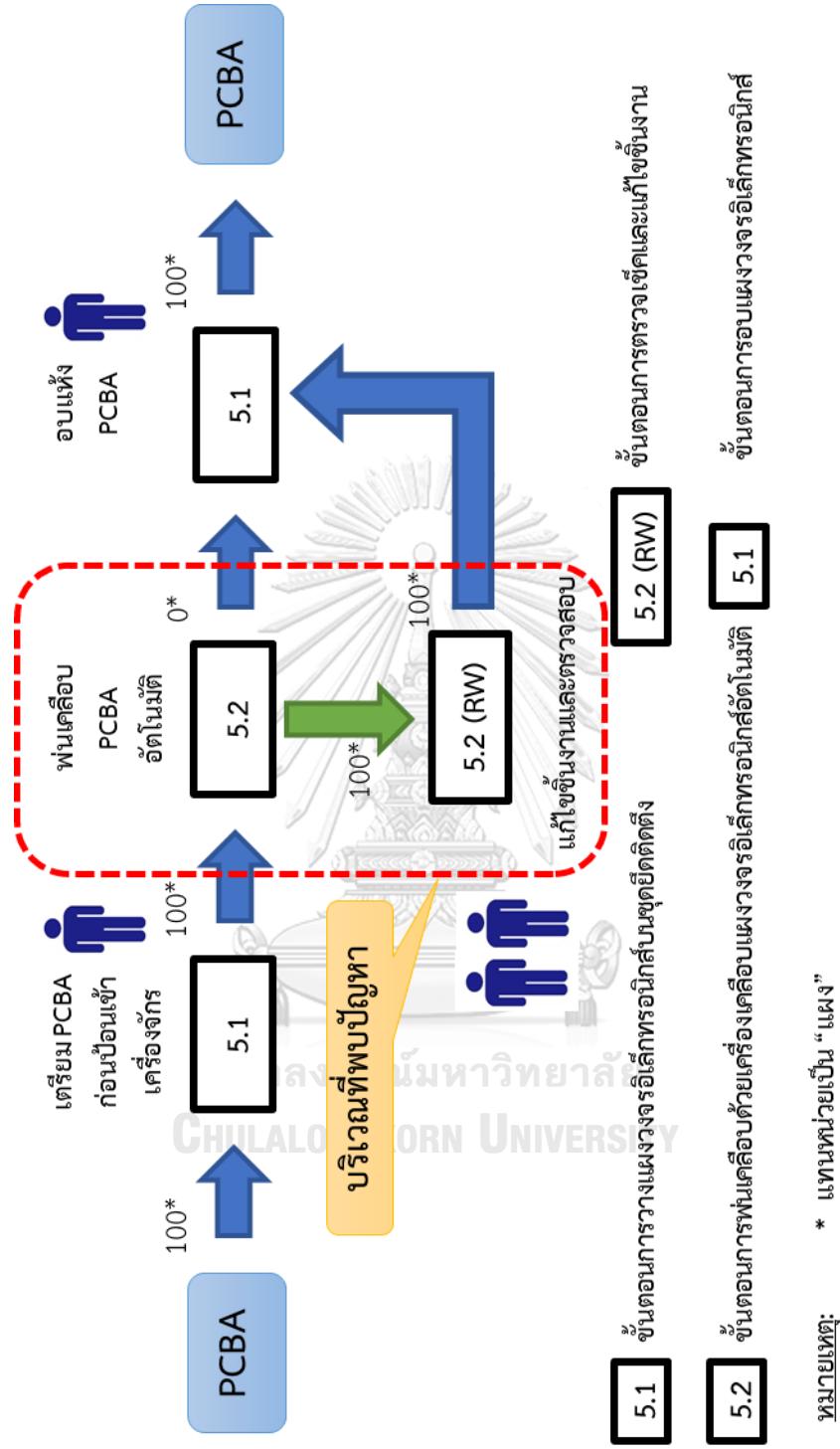
รูปที่ 5.2 ลักษณะการพ่นเคลือบด้วยเครื่องเคลือบอัตโนมัติ



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งการพ่นเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5.1.3 ผลการศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 5.4 ผลการศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าในขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรมีขั้นตอนการทำงานย่อยๆทั้งหมด 4 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการวางแผงวงจร (PCBA) บนอุปกรณ์ยึดติดตั้ง (Fixture) 2) ขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติ 3) ขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานและตรวจสอบแผงวงจร และ 4) ขั้นตอนการอบแผงวงจร ซึ่งใน 1 สายการผลิตของขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรจะใช้พนักงานทั้งหมด 4 คน ซึ่งส่วนที่พบปัญหาคือขั้นตอนที่ 2) ขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติ และ 3) ขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานและตรวจสอบแผงวงจร เนื่องจากหลังนำงานป้อนเข้าเครื่องเคลือบอัตโนมัติเพื่อทำการเคลือบชิ้นงานต้องการแก้ไขผิวชิ้นงานทั้งหมด



รูปที่ 5.4 ผลการศึกษาขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5.1.4 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิดชิ้นงาน

ตารางที่ 5.1 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิดชิ้นงาน

ลำดับ	เวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิดชิ้นงาน (วินาที/แผง)
1	71
2	65
3	73
4	60
5	61
6	76
7	72
8	80
9	79
10	62
11	83
12	66
13	82
14	78
15	76
16	63
17	70
18	68
19	82
20	78
21	65
22	65
23	82
24	64
25	79

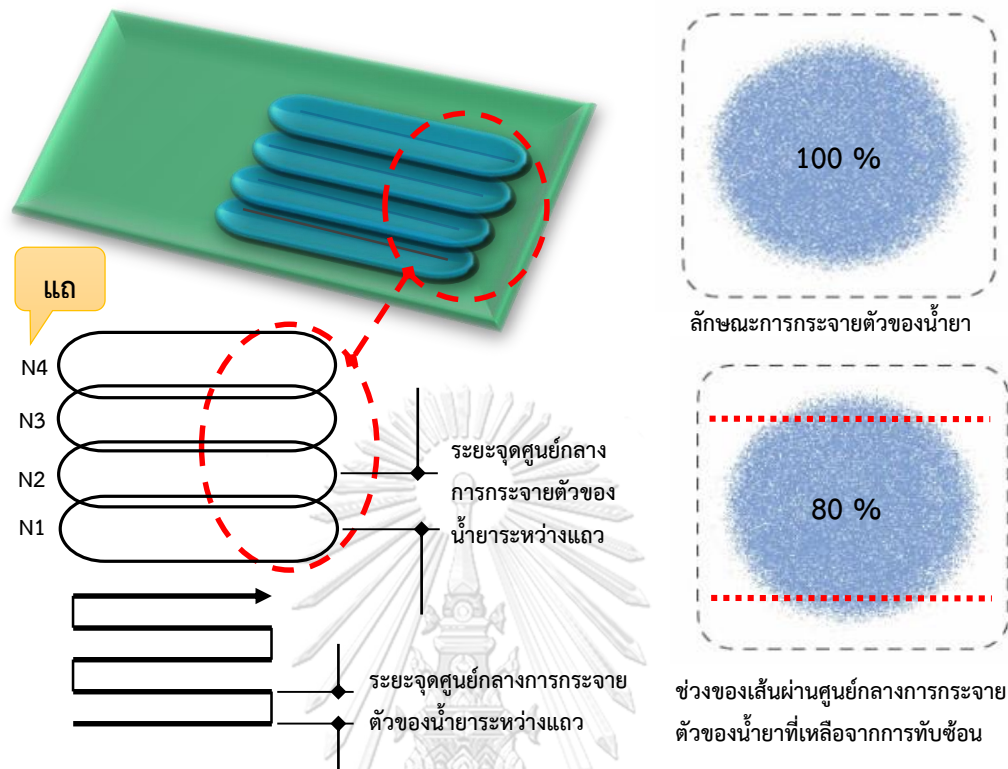
ตารางที่ 5.2 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิดขึ้นงาน (ต่อ)

ลำดับ	เวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิดขึ้นงาน (วินาที/แผง)
26	81
27	72
28	75
29	69
30	61
ค่าเฉลี่ย	71.93
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.48

จากตารางที่ 5.1-5.2 ผลการศึกษาเวลาในการแก้ไขผิดขึ้นงาน พบว่า การบันทึกเวลาในการแก้ไขขึ้นงานทั้งหมด 30 แผง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเวลาในการแก้ไขขึ้นงานมีค่าเท่ากับ 71.93 วินาที/แผง และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.48

5.1.5 ผลการศึกษารอบเวลาการพันเคลือบและการแก้ไขงานใหม่

เมื่อศึกษาเวลาการพันเคลือบน้ำยา ดังรูปที่ 5.5 ลักษณะแถวการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีการกำหนดให้แต่ละแถวมีการทับซ้อนกันเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาที่วัดได้จริง ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเคลือบที่นำมาใช้ในการคำนวณหารอบเวลาการเคลือบมีค่าเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาจริงที่วัดได้จริง



รูปที่ 5.5 ลักษณะแกวการเคลือบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5.2 ผลการทดลองบนแผ่นทดลอง (PCB)

ผลการทดลองบนแผ่นทดลอง (PCB) ดังนี้

5.2.1 ผลการทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว=0)

5.2.2 ผลการทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว>0)

5.2.1 ผลการทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว=0)

ตารางที่ 5.3-5.4 แสดงค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากวิธีการทดลองบนแผ่นทดลองเมื่อความเร็ว (V) = 0 จากการออกแบบการทดลองซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ความดัน (กิโลปาสกาล), ระยะความสูงในการพ่น (เซนติเมตร) และเวลาในการพ่น (วินาที) ดังนั้นในแต่ละตัวอย่างของการพ่นน้ำยาทั้ง 2 ระดับความดันจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง (ที่ระดับความดันเท่ากับ 1.5 และ 2.5 กิโลปาสกาล) โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง

ตารางที่ 5.3 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว (V) = 0

ความดัน (kPa)	ระยะความสูงที่ใช้ในการทดลอง	เวลา Time (sec)	ความหนา (μm)						เส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยา (cm)	
			1	0.5	0	ผลต่าง(0-1)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
1.5	2	1	73.000	73.625	74.500	1.500	73.444	0.786	1.700	0.035
		5	137.625	134.625	133.500	-4.125	135.833	0.864	2.938	0.088
		10	192.125	185.750	182.500	-9.625	188.222	0.314	3.638	0.124
		15	235.375	227.625	222.500	-12.875	230.500	0.707	4.150	0.071
		20	278.625	273.875	263.500	-15.125	274.833	0.393	4.513	0.053
	4	1	54.375	55.000	55.500	1.125	54.778	0.786	1.925	0.035
		5	121.125	118.750	118.750	-2.375	119.806	0.275	3.050	0.035
		10	172.000	165.875	163.500	-8.500	168.333	0.786	3.763	0.053
		15	208.375	200.875	196.500	-11.875	203.722	0.550	4.313	0.018
		20	256.375	251.500	242.500	-13.875	252.667	0.471	4.650	0.035
	6	1	37.125	38.125	38.250	1.125	37.694	0.511	2.225	0.106
		5	92.875	94.375	96.000	3.125	93.889	0.157	3.313	0.194
		10	150.375	145.750	143.500	-6.875	147.556	0.471	3.913	0.053
		15	186.625	178.750	176.000	-10.625	181.944	0.079	4.438	0.053
		20	218.375	213.375	206.500	-11.875	214.833	0.393	4.875	0.106
	8	1	27.875	28.625	30.000	2.125	28.444	0.157	2.450	0.106
		5	73.250	76.375	77.500	4.250	75.111	0.471	3.525	0.071
		10	116.000	113.125	111.500	-4.500	114.222	0.786	4.288	0.088
		15	146.875	139.625	138.000	-8.875	142.667	0.629	4.788	0.053
		20	181.625	178.125	171.500	-10.125	178.944	0.707	5.200	0.106

ตารางที่ 5.4 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว (V) = 0 (ต่อ)

ความดัน (kPa)	ระยะความสูงที่ใช้ในการทดลอง	เวลา Time (sec)	ความหนา (μm)						เส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยา (cm)	
			1	0.5	0	ผลต่าง(0-1)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
2.5	2	1	144.250	142.250	141.500	-2.750	143.056	0.864	2.238	0.018
		5	226.125	210.625	207.500	-18.625	217.167	0.550	4.088	0.053
		10	267.250	248.125	242.000	-25.250	255.944	0.079	5.363	0.018
		15	305.875	285.625	276.000	-29.875	293.556	0.314	6.225	0.035
		20	343.125	323.125	310.000	-33.125	330.556	0.786	6.838	0.018
	4	1	97.125	98.750	99.500	2.375	98.111	0.629	2.688	0.018
		5	190.875	181.125	178.500	-12.375	185.167	0.393	4.388	0.053
		10	229.125	213.875	208.500	-20.625	220.056	0.236	5.750	0.035
		15	272.375	255.625	247.500	-24.875	262.167	0.393	6.500	0.035
		20	312.125	293.000	281.500	-30.625	300.222	0.629	7.125	0.035
	6	1	72.250	74.000	75.500	3.250	73.000	1.257	3.075	0.035
		5	150.625	144.375	142.500	-8.125	146.944	0.236	4.875	0.035
		10	195.125	184.625	180.500	-14.625	188.833	0.707	6.138	0.053
		15	232.875	217.875	211.500	-21.375	223.833	0.236	6.963	0.053
		20	276.250	257.875	248.500	-27.750	265.000	0.471	7.525	0.071
	8	1	57.375	59.625	61.500	4.125	58.833	0.864	3.375	0.035
		5	126.000	124.375	123.000	-3.000	124.944	0.079	5.225	0.071
		10	176.875	166.750	163.500	-13.375	170.889	0.314	6.413	0.018
		15	207.750	193.625	188.500	-19.250	199.389	0.550	7.313	0.088
		20	228.125	212.125	205.000	-23.125	218.444	0.943	8.238	0.053

- หมายเหตุ :
- สัญลักษณ์ 1 คือค่าของความหนาที่ขอบริมการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลองเฉลี่ย
 - สัญลักษณ์ 0.5 คือค่าของความหนาระหว่างขอบริมกับจุดกึ่งกลางการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลองเฉลี่ย

- สัญลักษณ์ 0.5 คือค่าของความหนาที่จุดกึ่งกลางการกระจายตัวของน้ำยาที่
ได้จากแต่ละการทดลองเฉลี่ย

จากตารางที่ 5.3-5.4 แสดงค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่าน
ศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลอง
ที่แตกต่างกัน พบว่า

1) ค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ค่าของผลต่างของความหนาที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับค่า
ของความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่าน
ศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะมี
ความแตกต่างกัน

2) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ค่าของผลต่างของความ
หนาที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับค่าของความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองใน
สภาวะเดียวกันแต่ความดัน (กิโลปาสคาล) ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ ได้แก่ที่ระดับความดันเท่ากับ 1.5
และ 2.5 (กิโลปาสคาล) พบว่า ค่าความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ค่าผลต่างของความหนาที่จุดกึ่งกลาง
เฉลี่ยกับค่าของความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้น
ผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) มีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ
ความดัน (กิโลปาสคาล) จากระดับค่าความดันที่ 1.5 เป็น 2.5 (กิโลปาสคาล) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของ
ความหนา (ไมโครเมตร) ค่าของผลต่างของความหนาที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับความหนาที่จุดขอบข้างจาก
การกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย
(เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับทุกสภาวะการทดลอง

3) ความหนา (ไมโครเมตร) ที่ได้จากการทดลอง ในแต่ละระดับค่าความดันทั้ง 2 ระดับ
สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.444 ถึง
274.833 ไมโครเมตร

- ที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 58.833 ถึง 330.556 ไมโครเมตร

4) ค่าผลต่างของความหนาที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ได้จากการทดลอง ในความดันทั้ง 2 ระดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของผลต่างของความหนาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยอยู่ในช่วง -15.125 ถึง 4.250 ไมโครเมตร

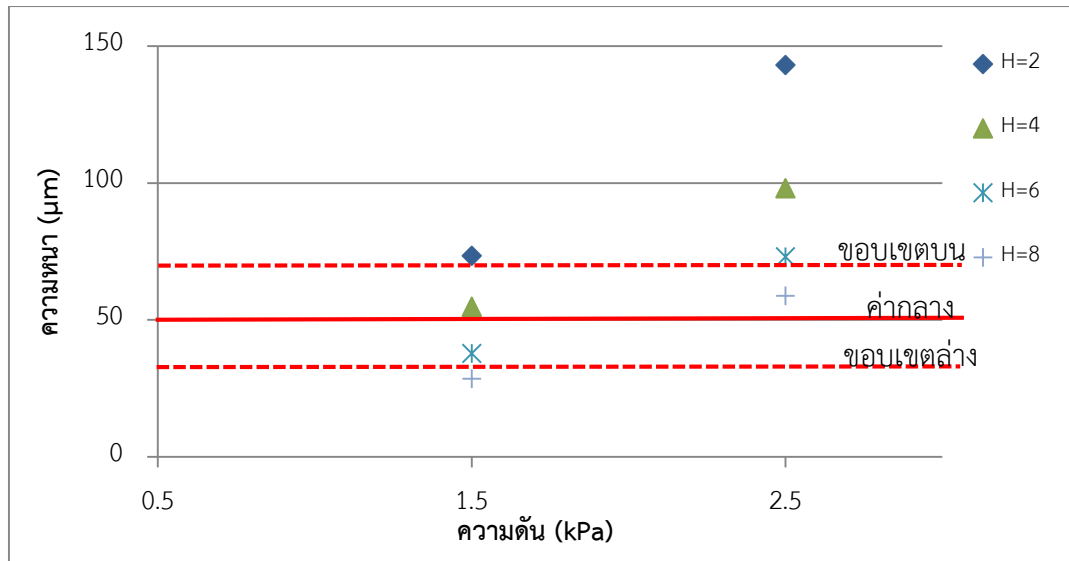
- ที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของผลต่างของความหนาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยกับความหนาที่จุดขอบข้างจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยอยู่ในช่วง -33.125 ถึง 4.125 ไมโครเมตร

5) ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลอง ในความดันทั้ง 2 ระดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

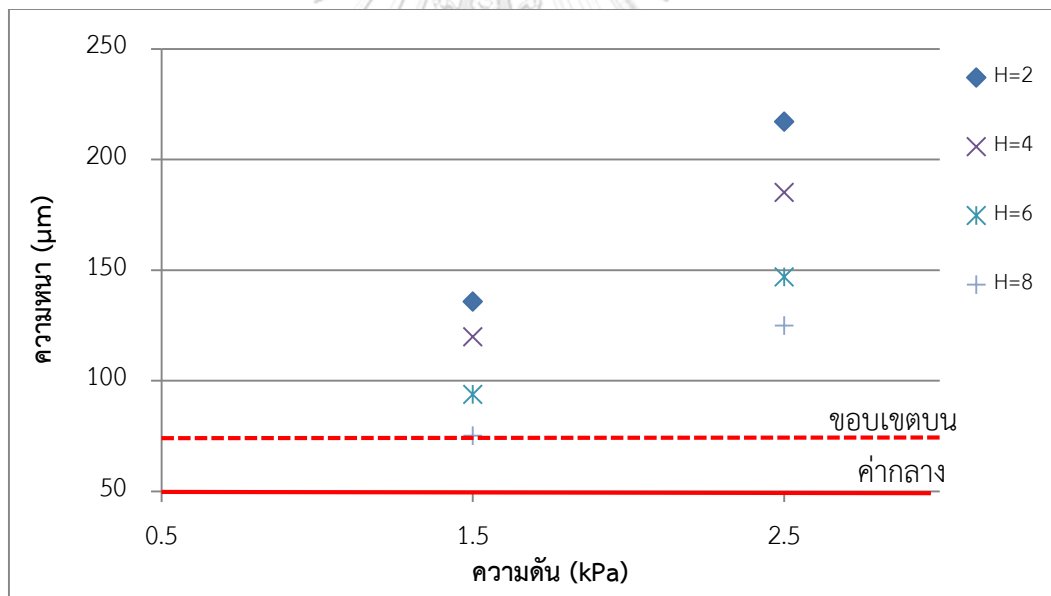
- ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.700 ถึง 5.200 เซนติเมตร

- ที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.238 ถึง 8.238 เซนติเมตร

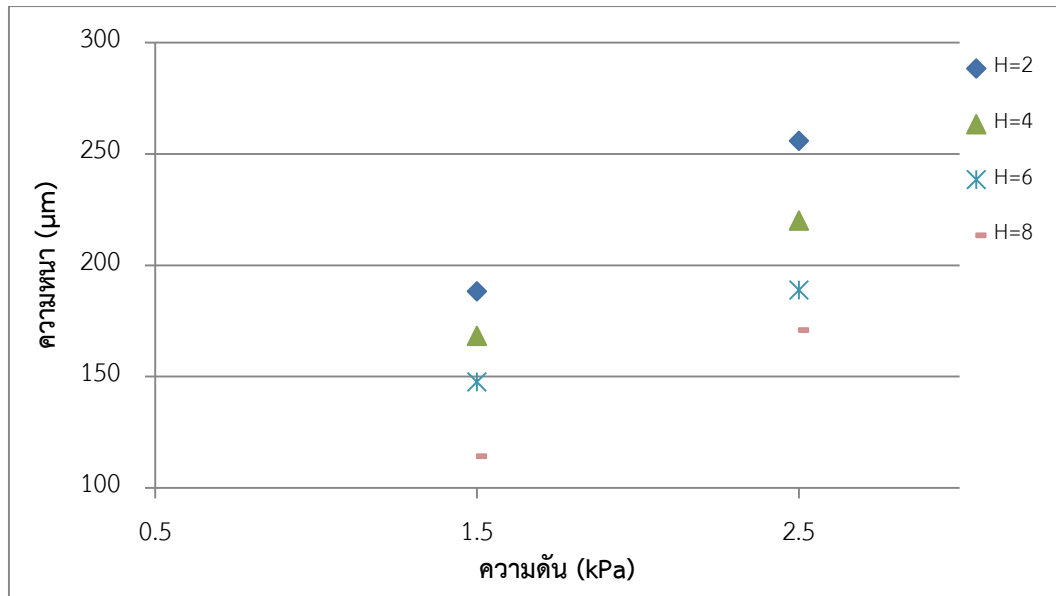
6) ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (กิโลปาสคาล) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงต่างกันในแต่ละสภาวะ



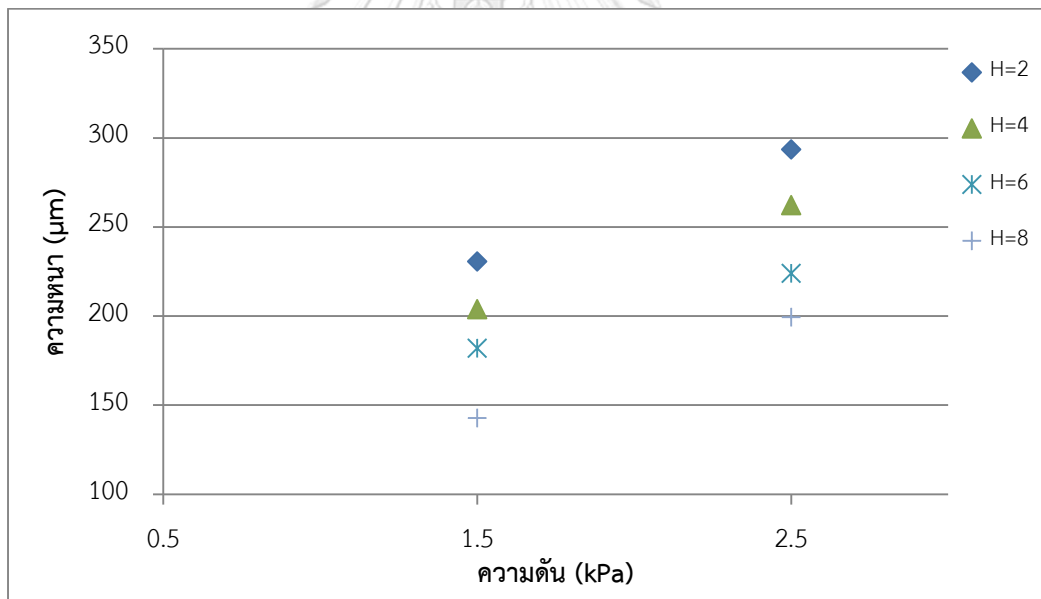
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 1 วินาที



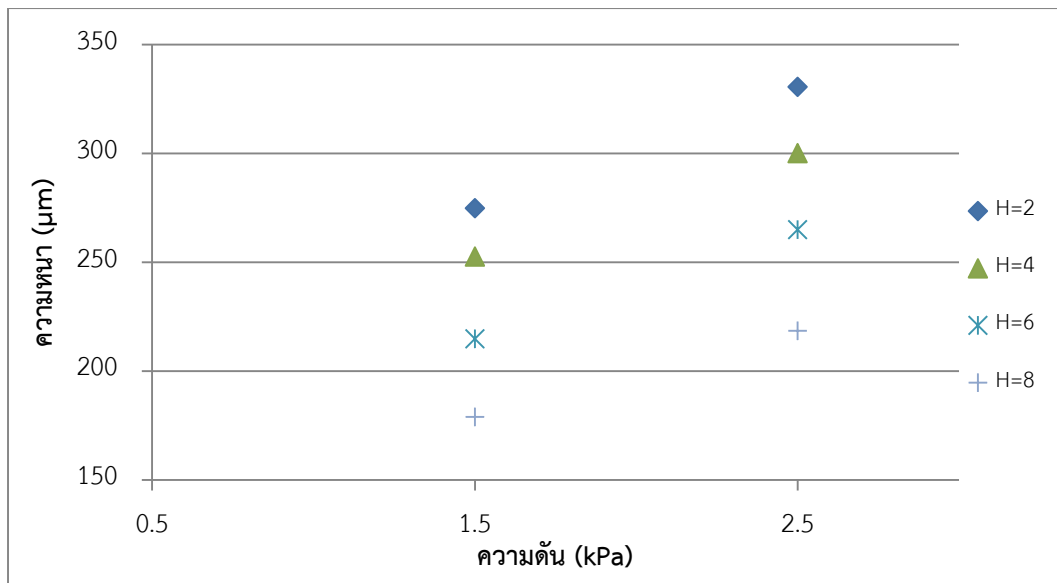
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 5 วินาที



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 10 วินาที



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 15 วินาที

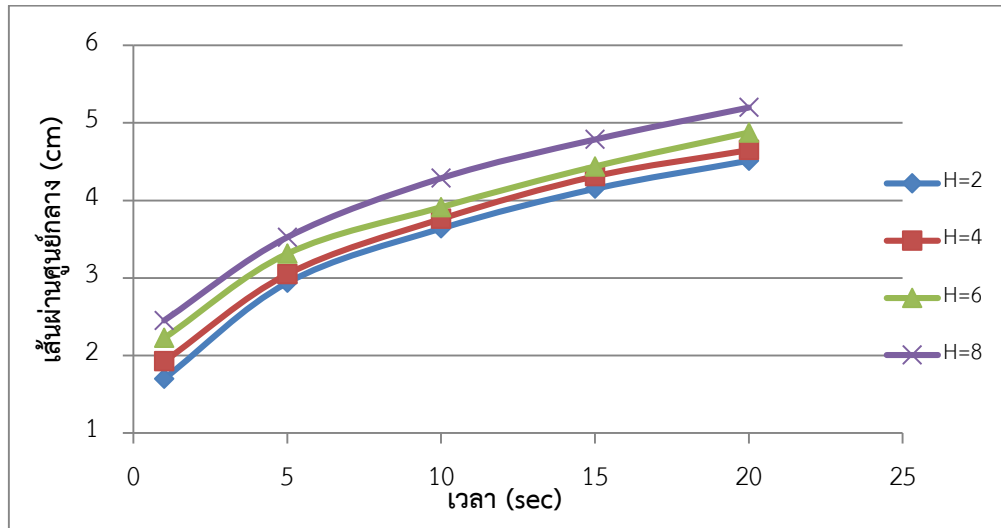


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ระดับความสูง (H) ต่างๆกันในเวลา 20 วินาที

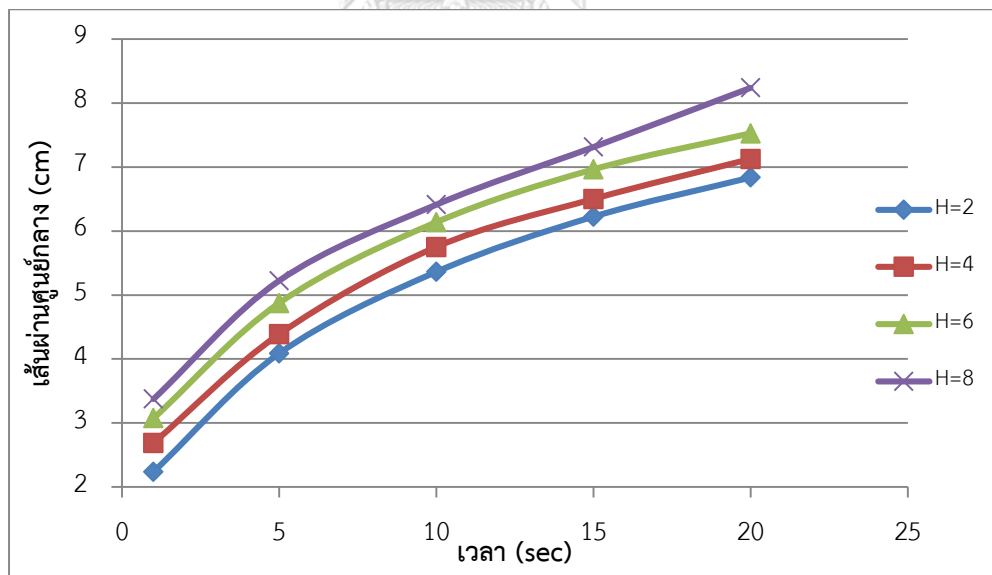
จากรูปที่ 5.6-5.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (กิโลปาสกาล) กับความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงต่างกันโดยมีการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ทดลองเป็นค่าคงที่ในแต่ละสถานะ เมื่อพิจารณาที่เวลาในการทดลองคงที่ แต่ระดับความสูง (เซนติเมตร) แตกต่างกันได้แก่ 2, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร สามารถวิเคราะห์ผลจากรูปที่ 5.6-5.10 ได้ดังนี้

- เมื่อระดับความสูงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าของความหนาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สถานะการทดลอง
- เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น ค่าของความหนาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันในทุกๆ สถานะการทดลอง

8) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลอง (วินาที) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสภาวะ



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (Ø) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน

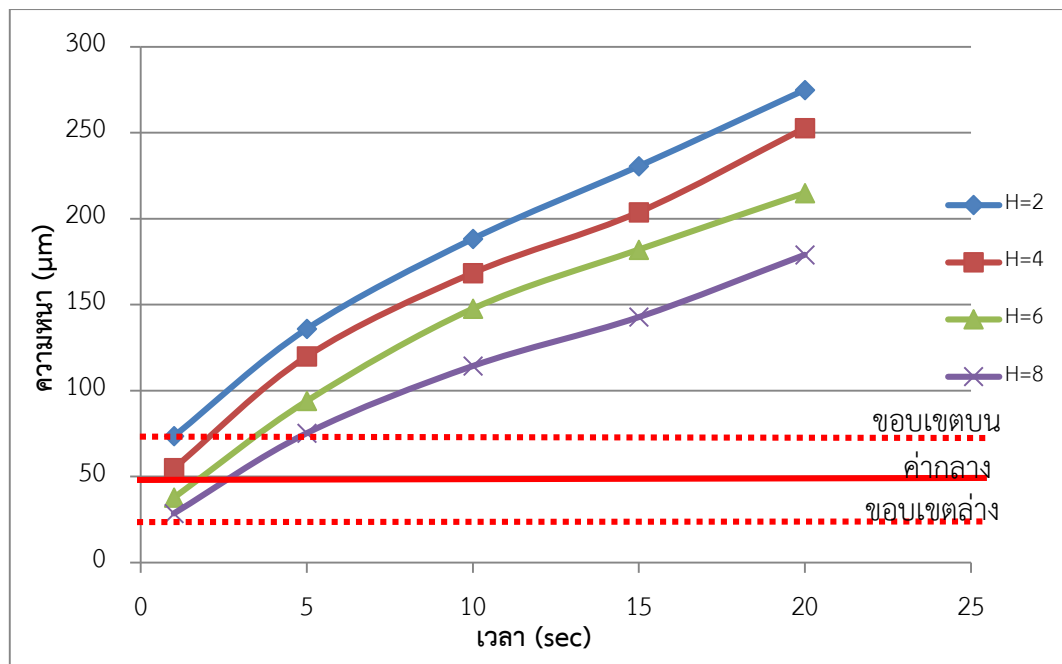


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบเฉลี่ย (Ø) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน

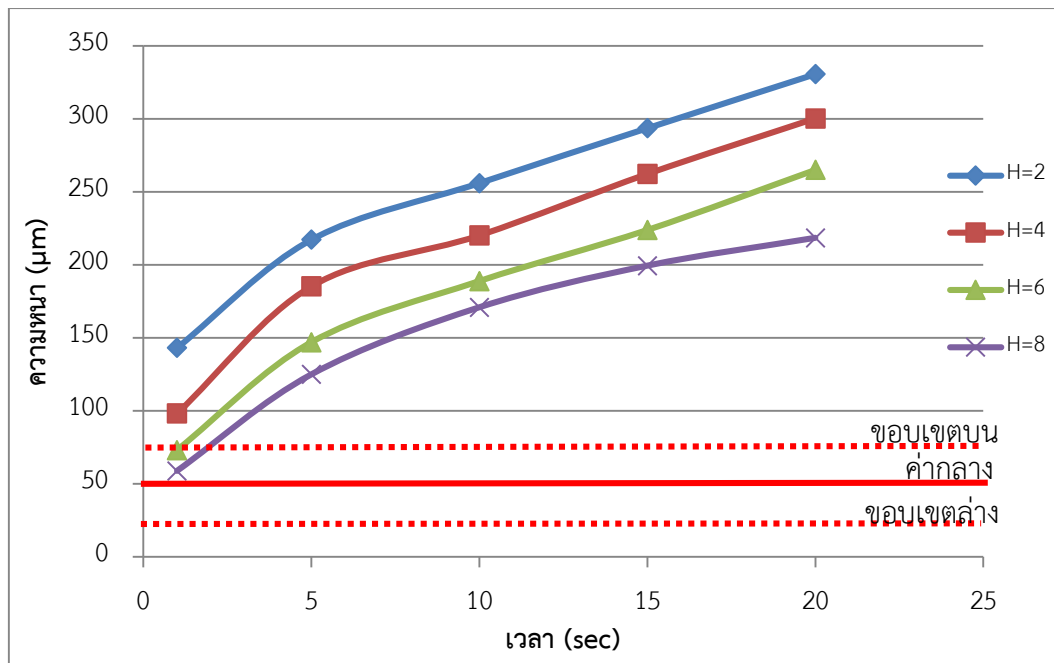
จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงความสัมพันธ์เวลาที่ใช้ในการทดลอง (วินาที) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสกาล และ 2.5 กิโลปาสกาล ภายใต้ระดับความสูงต่างกันในแต่ละสภาวะตามลำดับ ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจาก

การกระจายตัวน้ำยาเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทดลองและระดับความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความดันต่างกันพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

9) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลอง (วินาที) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสภาวะ



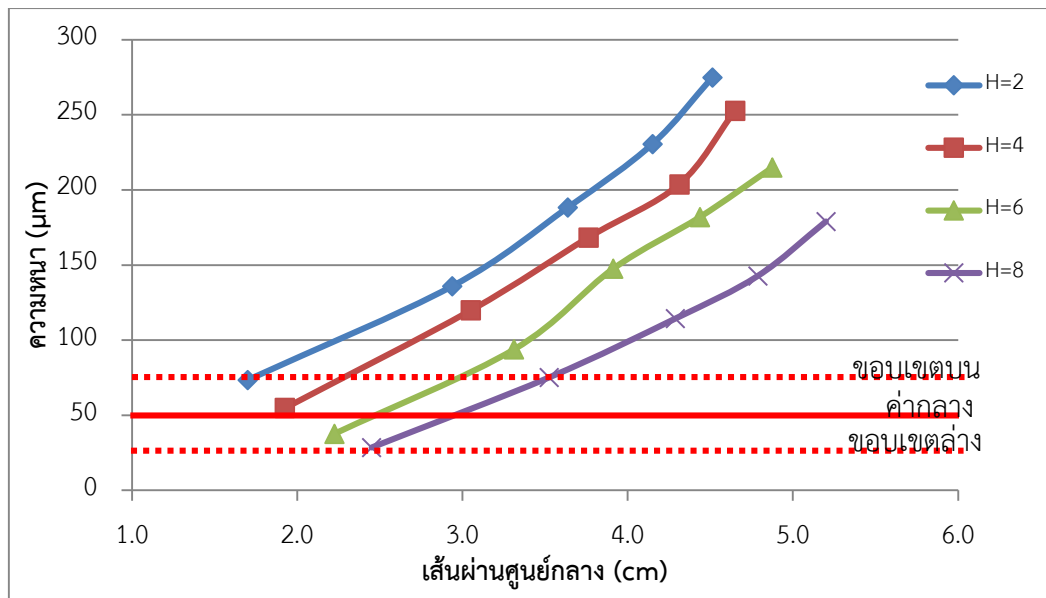
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$



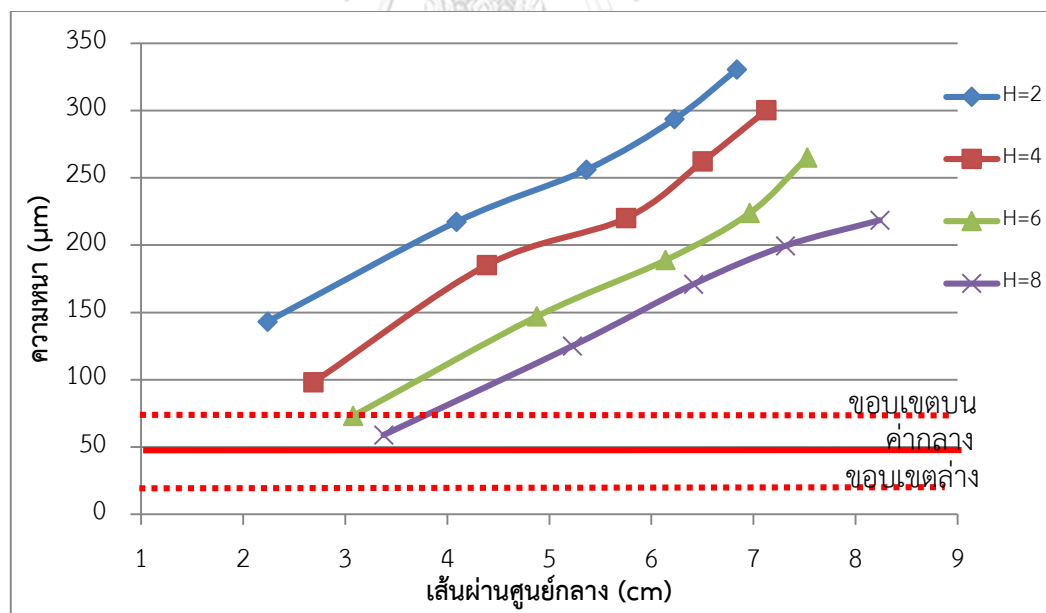
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (S) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงความสัมพันธ์เวลาที่ใช้ในการทดลอง (วินาที) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสกาล และ 2.5 กิโลปาสกาล ภายใต้ระดับความสูงต่างกันในแต่ละสถานะตามลำดับ ค่าของความหนาเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการทดลอง และระดับความสูงเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาที่ความดันต่างกันพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าของความหนาเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

10) ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสถานะ



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับ ความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับ ความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกันโดยมีขอบเขตความหนาที่ต้องการ $50 \pm 20 \mu\text{m}$

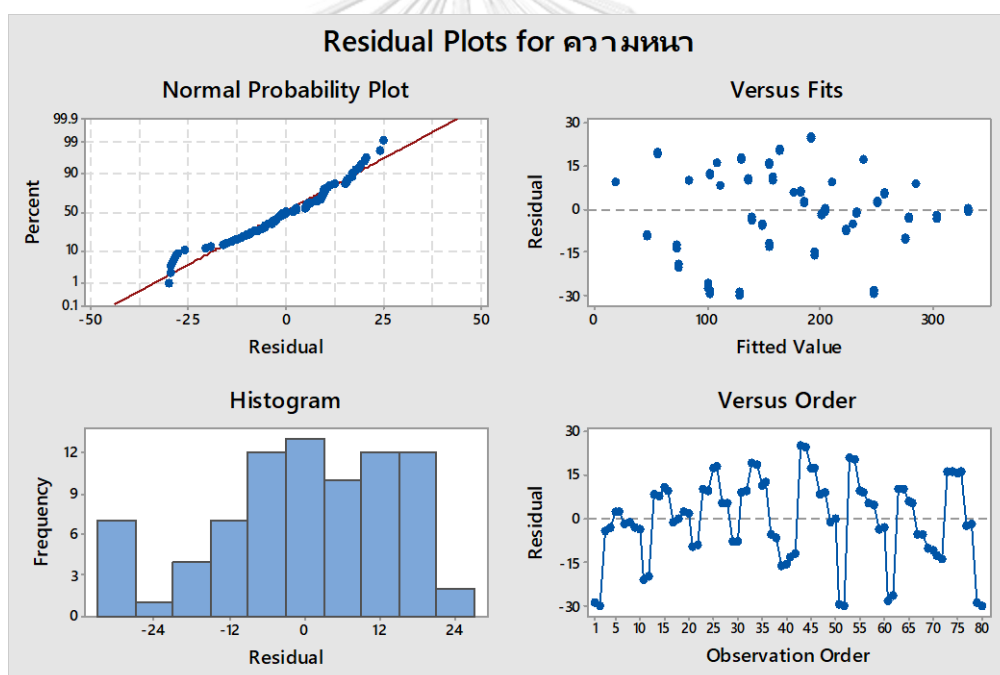
จากรูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบเฉลี่ย (เซนติเมตร) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงและความดัน

ต่างกัน โดยมีการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ทดลองเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละสภาวะคือ 1, 5, 10, 15, และ 20 (วินาที) เมื่อพิจารณาที่เวลาในการทดลองคงที่ แต่ระดับความสูง (เซนติเมตร) แตกต่างกันคือ 2, 4, 6 และ 8 (เซนติเมตร) สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาแยกในแต่ละระดับความสูง (2, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร) และความดัน (1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาล) ที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาที่ความดัน 1.5, 2.5 กิโลปาสคาล และระดับความสูงที่ 2 เซนติเมตร พบว่า

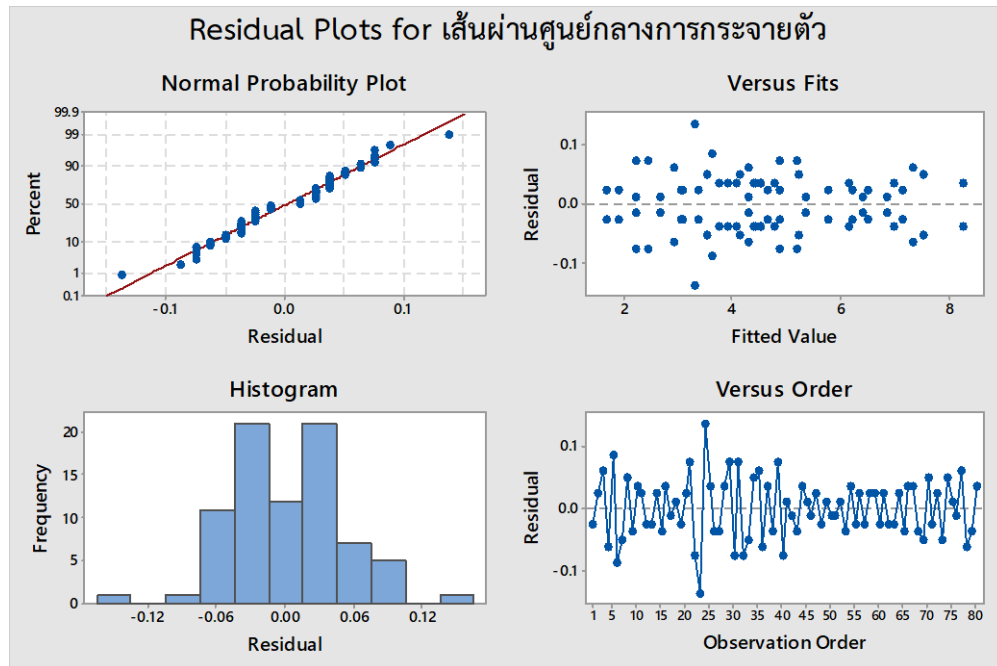
- เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มสูงขึ้น ค่าของความหนาเฉลี่ยและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นแต่ระดับความสูงเป็นค่าคงที่ ค่าของความหนาเฉลี่ยและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- เมื่อความดันเป็นค่าคงที่แต่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ค่าของความหนาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง แต่ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- ถ้าพิจารณาที่ความสูงและเวลาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทำให้ได้ช่วงความหนาที่ต้องการคือ 50 ± 20 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยามีค่าสูงสุด ที่ความดัน 1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาล พบว่าที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล ความสูง 4 เซนติเมตร และเวลาที่ใช้ในการทดลอง 1 วินาที ส่วนที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล ความสูง 8 เซนติเมตร และเวลาที่ใช้ในการทดลอง 1 วินาที

11) การตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ

รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 แสดงผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าของความหนาเฉลี่ย และกรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย พบว่า 1) ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและมีความปกติของข้อมูล ซึ่งค่าของ p-value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2) ความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence Distribution) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน 3) ความมีเสถียรภาพของค่าแปรปรวน (Stability of Variance) ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าแปรปรวน



รูปที่ 5.17 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$)



รูปที่ 5.18 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$)

12) ผลวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาของผิวเคลือบ

รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาเฉลี่ยพบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (S) อันตรกิริยา (Interaction) มีผล 3 คู่คือ ความดันกับความสูงของหัวพ่น ($P*H$), ความดันกับเวลาในการพ่น ($P*S$) และความสูงของหัวพ่นกับเวลาในการพ่น ($H*S$)

General Factorial Regression: ความหนาเฉลี่ย versus P, H, S

Factor Information

Factor	Levels	Values
P	2	1.5, 2.5
H	4	2, 4, 6, 8
S	5	1, 5, 10, 15, 20

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	39	465025	11923.7	34656.06	0.000
Linear	8	459288	57411.0	166864.02	0.000
P	1	56039	56038.8	162875.59	0.000
H	3	77604	25867.9	75184.65	0.000
S	4	325646	81411.4	236620.66	0.000
2-Way Interactions	19	5087	267.7	778.20	0.000
P*H	3	1628	542.8	1577.64	0.000
P*S	4	746	186.4	541.89	0.000
H*S	12	2713	226.1	657.12	0.000
3-Way Interactions	12	650	54.1	157.36	0.000
P*H*S	12	650	54.1	157.36	0.000
Error	40	14	0.3		
Total	79	465039			

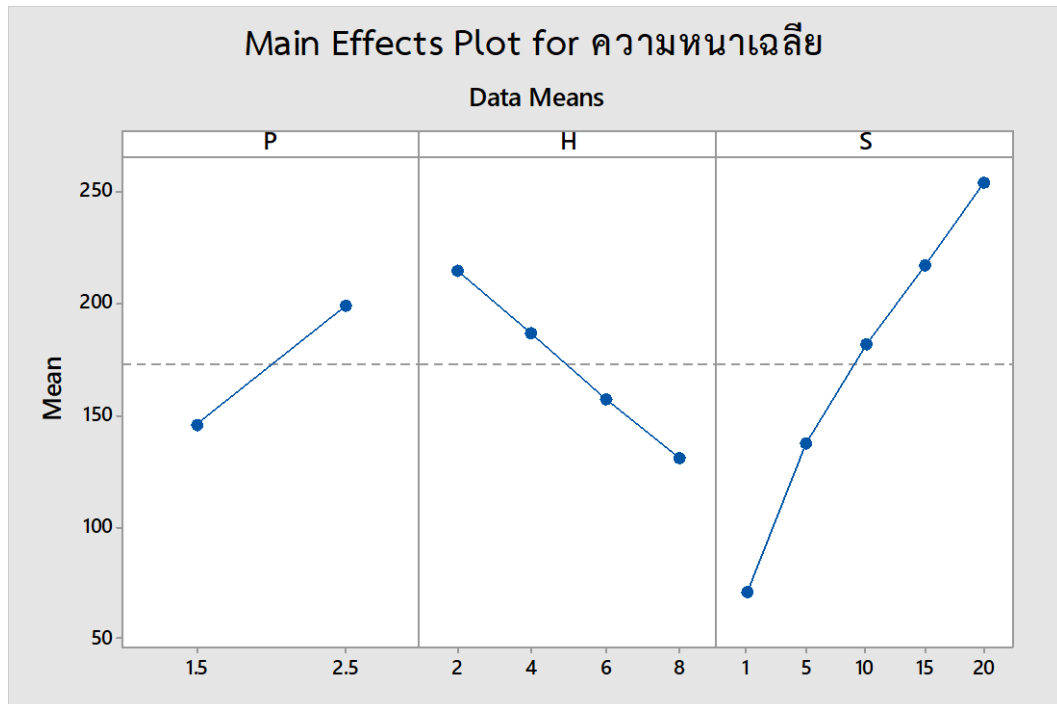
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.586565	100.00%	99.99%	99.99%

รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$)

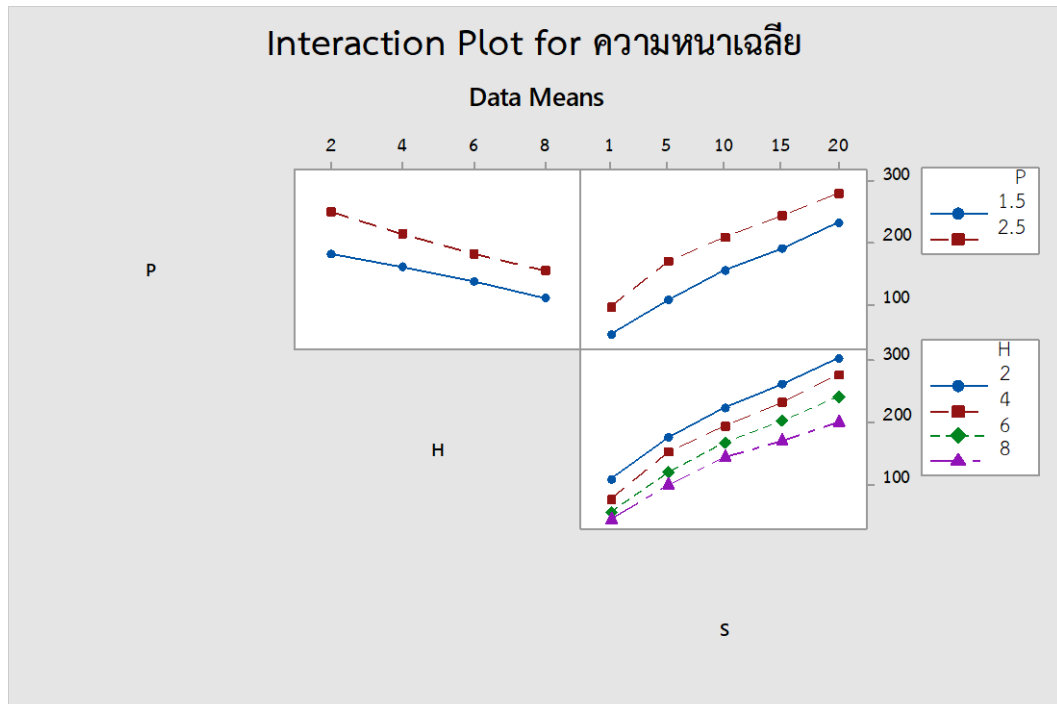
จากนั้นนำข้อมูลมาทำ Main effect plot พล็อตเพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัวดังรูปที่ 5.20 Main Effect Plot ของค่าของความหนาเฉลี่ยที่ $v=0$ พบว่าเมื่อความดัน P เพิ่มขึ้นจาก 1.5 กิโลปาสคาล เป็น 2.5 กิโลปาสคาล ค่าของความหนาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 150 ไมโครเมตร ถึง 200 ไมโครเมตร ดังนั้นผิวเคลือบจะมีความหนาขึ้น สำหรับความสูงของหัวพ่น H เพิ่มขึ้นจาก 2 เซนติเมตร เป็น 8 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าความหนาเฉลี่ยมีค่าลดลงเพราะว่าน้ำยาเกิดความฟุ้งกระจายมากขึ้น แต่เมื่อเวลาในการพ่น (S) เพิ่มจาก 1 มิลลิเมตร/วินาที เป็น 20 มิลลิเมตร/วินาที ที่ทำให้ค่าความหนาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการพ่นในความเร็วเท่ากับ 0 หัวพ่นจะพ่นอยู่กับที่เมื่อใช้เวลาในการพ่น

มากขึ้นผิวเคลือบจึงมีความหนามากขึ้นด้วย ดังนั้นความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (V) มีอิทธิพลต่อค่าของความหนาเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) เท่ากับ 0.05



รูปที่ 5.20 Main Effect Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v=0$

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Interaction Plot เพื่อดูผลัทธิกริยาระหว่าง 1) ความดัน (P)และความสูงของหัวพ่น (H) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย H เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง 2) ความดัน (P) และเวลาในการพ่น (S) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย S เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น 3) ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (S) พบว่าที่ปัจจัย H ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย S เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.21 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v=0$



รูปที่ 5.21 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v=0$

13) ผลวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย

รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยได้แก่ ความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (S) อันตรกิริยา (Interaction) มีผล 3 คู่คือ ความดันกับความสูงของหัวพ่น ($P*H$), ความดันกับเวลาในการพ่น ($P*S$) และความสูงของหัวพ่นกับเวลาในการพ่น ($H*S$)

General Factorial Regression: เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัว versus P, H, S

Factor Information

Factor	Levels	Values
P	2	1.5, 2.5
H	4	2, 4, 6, 8
S	5	1, 5, 10, 15, 20

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	39	221.100	5.6692	1223.71	0.000
Linear	8	211.350	26.4187	5702.52	0.000
P	1	67.299	67.2986	14526.52	0.000
H	3	9.394	3.1313	675.89	0.000
S	4	134.657	33.6643	7266.49	0.000
2-Way Interactions	19	9.651	0.5079	109.64	0.000
P*H	3	0.747	0.2492	53.78	0.000
P*S	4	8.759	2.1899	472.69	0.000
H*S	12	0.144	0.0120	2.59	0.012
3-Way Interactions	12	0.100	0.0083	1.80	0.082
P*H*S	12	0.100	0.0083	1.80	0.082
Error	40	0.185	0.0046		
Total	79	221.286			

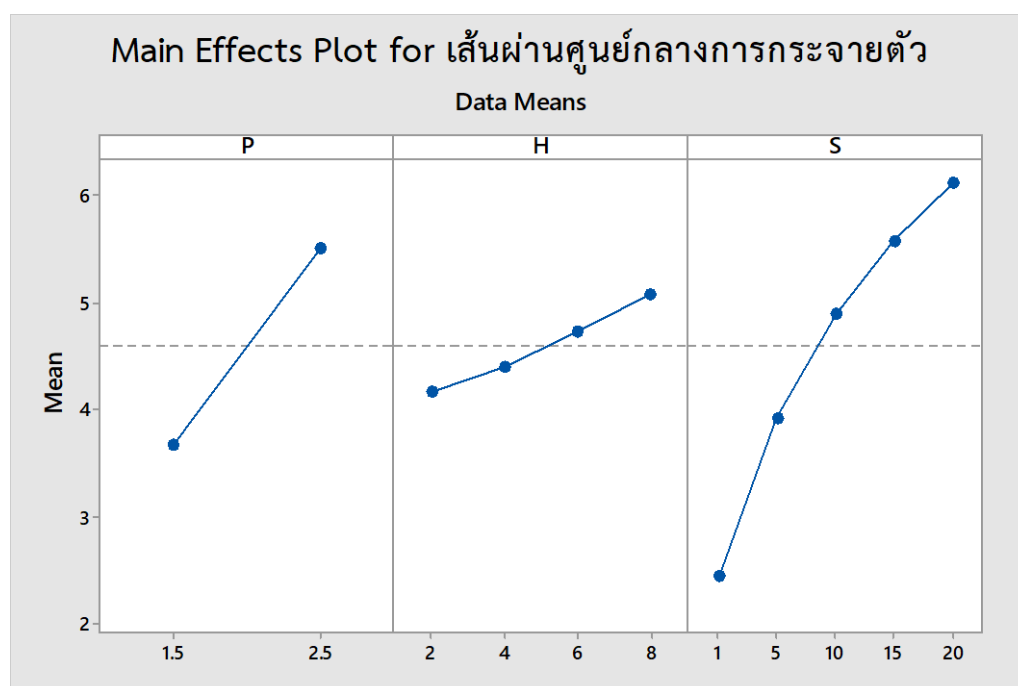
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0680648	99.92%	99.83%	99.67%

รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V=0$)

จากนั้นนำข้อมูลมาทำ Main effect plot พล็อตเพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัวดังรูปที่ 5.23 Main Effect Plot ของค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย $v=0$ พบว่าเมื่อความดัน P เพิ่มขึ้นจาก 1.5 กิโลปาสกาล เป็น 2.5 กิโลปาสกาล ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.8 เซนติเมตร ถึง 5.6 เซนติเมตร ดังนั้นผิวเคลือบจะมีขนาดเพิ่มขึ้นสำหรับความสูงของหัวพ่น H เพิ่มขึ้นจาก 2 เซนติเมตร เป็น 8 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าค่าเส้นผ่าน

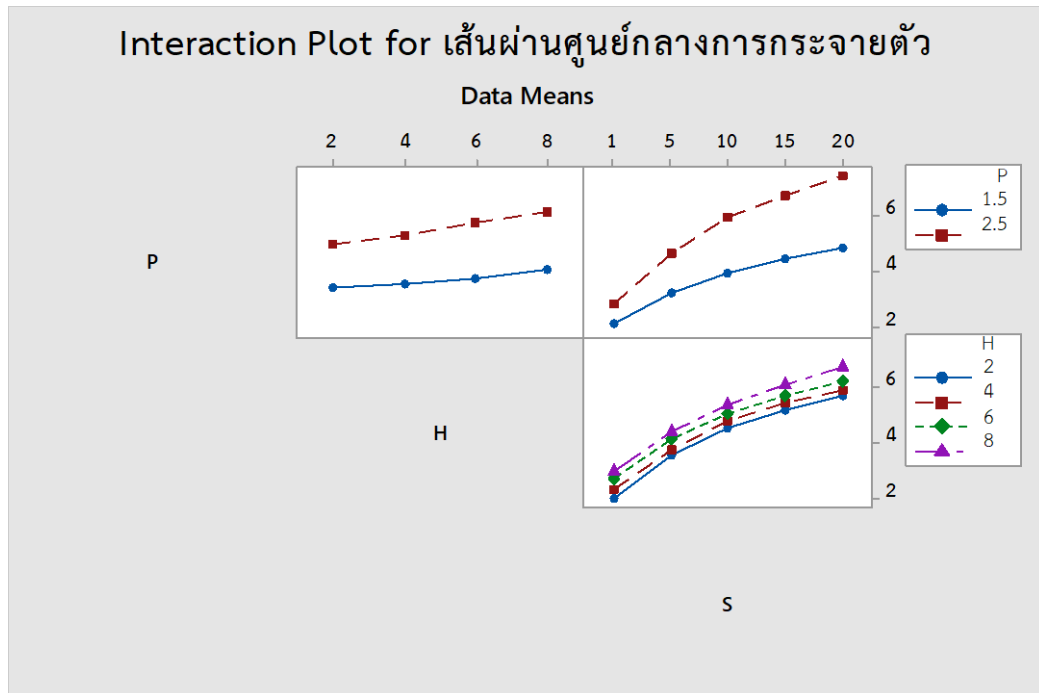
ศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาในการพ่น S เพิ่มจาก 1 วินาที เป็น 20 วินาที ที่ทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันและความสูงของหัวพ่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำยาเกิดความฟุ้งกระจายมากขึ้น ดังนั้นความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (S) มีอิทธิพลต่อค่าของความหนาเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) เท่ากับ 0.05



รูปที่ 5. 23 Main Effect Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v=0$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Interaction Plot เพื่อดูผลต่อปฏิกริยาระหว่าง 1) ความดัน (P)และความสูงของหัวพ่น (H) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย H เพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น 2) ความดัน (P)และเวลาในการพ่น (S) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย S เพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น 3) ความสูงของหัวพ่น (H) และเวลาในการพ่น (S) พบว่าที่ปัจจัย H ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย S เพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.24 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยที่ $v=0$



รูปที่ 5.24 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v=0$

5.2.2 ผลการทดลอง (เมื่อหัวพ่นอยู่กับที่หรือความเร็ว >0)

ตารางที่ 5.3-5.4 แสดงค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเคลือบเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากวิธีการทดลองบนแผ่นทดลองเมื่อความเร็ว (V) > 0 จากการออกแบบการทดลองซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ความดัน (กิโลปาสกาล), ระยะความสูงในการพ่น (เซนติเมตร) และความเร็วในการเคลือบ (เซนติเมตร/วินาที)

ดังนั้นในแต่ละตัวอย่างของการพ่นน้ำยาทั้ง 2 ระดับความดันจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง (ที่ระดับความดันเท่ากับ 1.5 และ 2.5 กิโลปาสกาล) โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองที่ได้ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและเพียงพอต่อการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

ตารางที่ 5.5 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่ต่างกันไป เมื่อความเร็ว (V)>0

ความดัน (kPa)	ระยะความสูงที่ใช้ในการทดลอง (cm)	ความเร็ว (mm/sec)	ความหนา (μm)					เส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยา	
			0	1	ผลต่าง (0-1)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	ค่า S.D.
1.5	2	10	31.941	31.560	0.381	31.751	0.353	0.524	2.12×10^{-3}
		15	26.096	25.669	0.427	25.883	0.384	0.443	3.80×10^{-3}
		20	22.704	22.230	0.474	22.467	0.667	0.386	11.6×10^{-2}
		25	19.713	19.189	0.524	19.451	0.623	0.345	6.36×10^{-3}
	4	10	25.305	24.894	0.411	25.099	0.381	0.645	4.24×10^{-3}
		15	21.353	20.899	0.454	21.126	0.399	0.512	5.04×10^{-3}
		20	17.348	16.841	0.506	17.094	0.416	0.454	7.07×10^{-3}
		25	15.945	15.369	0.576	15.657	0.970	0.393	1.08×10^{-2}
	6	10	19.329	18.880	0.449	19.104	0.407	0.790	1.28×10^{-2}
		15	16.178	15.696	0.481	15.937	0.211	0.643	7.25×10^{-3}
		20	13.539	13.013	0.526	13.276	0.798	0.531	1.81×10^{-2}
		25	9.553	8.968	0.585	9.260	1.227	0.487	2.09×10^{-2}
	8	10	14.314	13.851	0.462	14.083	0.979	0.943	7.69×10^{-3}
		15	11.455	10.924	0.531	11.189	0.455	0.715	1.16×10^{-2}
		20	9.553	8.976	0.576	9.264	1.184	0.640	1.35×10^{-2}
		25	6.789	6.183	0.606	6.486	1.373	0.614	1.45×10^{-2}

หมายเหตุ: - สัญลักษณ์ 1 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความหนาที่ขอบข้างการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลอง

- สัญลักษณ์ 0 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความหนาที่จุดกึ่งกลางการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 5.6 ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อความเร็ว (V)>0 (ต่อ)

ความดัน (kPa)	ระยะความสูงที่ใช้ในการทดลอง (cm)	ความเร็ว (mm/sec)	ความหนา (μm)					เส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยา (cm)	
			0	1	ผลต่าง (0-1)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	ค่า S.D.
2.5	2	10	70.784	70.360	0.424	70.572	0.091	0.795	3.18×10^{-3}
		15	54.291	53.835	0.456	54.063	0.657	0.686	4.60×10^{-3}
		20	45.973	45.480	0.492	45.726	1.115	0.608	1.54×10^{-2}
		25	40.124	39.623	0.501	39.873	0.832	0.559	7.25×10^{-3}
	4	10	57.253	56.781	0.471	57.017	0.685	0.963	1.27×10^{-2}
		15	48.094	47.603	0.491	47.848	0.261	0.762	4.42×10^{-3}
		20	40.274	39.756	0.518	40.015	0.824	0.678	3.18×10^{-3}
		25	35.581	35.050	0.531	35.316	0.855	0.608	2.48×10^{-3}
	6	10	51.104	50.586	0.517	50.845	0.797	1.042	4.42×10^{-3}
		15	40.583	40.056	0.526	40.319	0.335	0.876	3.71×10^{-3}
		20	34.225	33.656	0.569	33.941	0.872	0.772	5.83×10^{-3}
		25	31.879	31.271	0.607	31.575	1.649	0.660	2.55×10^{-2}
	8	10	43.644	43.110	0.534	43.377	0.201	1.194	4.77×10^{-3}
		15	33.799	33.198	0.601	33.498	0.929	1.010	5.57×10^{-3}
		20	28.930	28.391	0.539	28.661	0.978	0.881	8.31×10^{-3}
		25	26.254	25.526	0.727	25.890	1.048	0.767	1.38×10^{-2}

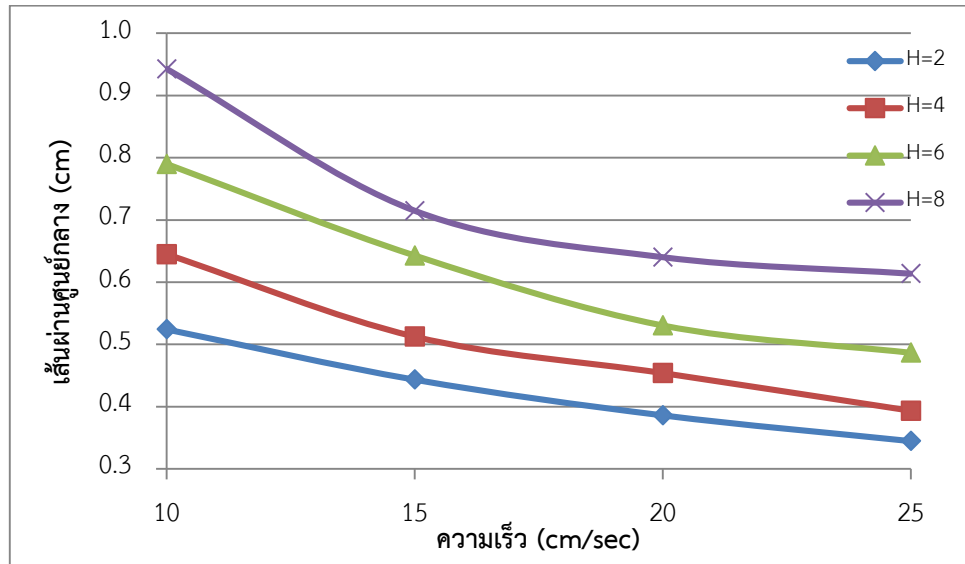
หมายเหตุ: - สัญลักษณ์ 1 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความหนาที่ขอบข้างการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลอง

- สัญลักษณ์ 0 หมายถึงค่าเฉลี่ยของความหนาที่จุดกึ่งกลางการกระจายตัวของน้ำยาที่ได้จากแต่ละการทดลอง

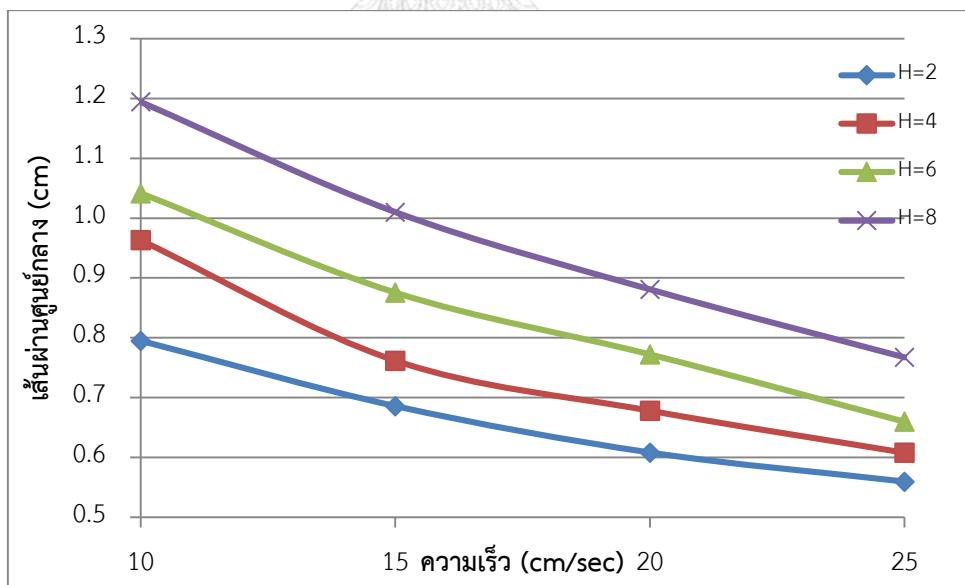
จากตารางที่ 5.5-5.6 แสดงค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้ความดัน (กิโลปาสคาล) ที่ 1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาล ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ปัจจัยพบว่า

- 1) ค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะมีความแตกต่างกัน
- 2) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองในสภาวะเดียวกันแต่ความดัน (กิโลปาสคาล) ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ ได้แก่ที่ระดับความดันเท่ากับ 1.5 และ 2.5 (กิโลปาสคาล) พบว่า ค่าของความหนาเฉลี่ย และค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยมีค่าที่ต่างกัน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความดัน (กิโลปาสคาล) จากระดับค่าความดันที่ 1.5 เป็น 2.5 (กิโลปาสคาล) ส่งผลให้ทั้ง 2 ค่าที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับทุกสภาวะการทดลอง
- 3) ค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ได้จากการทดลองของค่าความดันทั้ง 2 ระดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้
 - ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.486 ถึง 31.751 ไมโครเมตร
 - ที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าของความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25.890 ถึง 70.572 ไมโครเมตร
- 4) ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ได้จากการทดลองของค่าความดันทั้ง 2 ระดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้
 - ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาอยู่ในช่วง 0.345 ถึง 0.943 เซนติเมตร
 - ที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาอยู่ในช่วง 0.559 ถึง 1.194 เซนติเมตร

5) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที) กับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสถานะ



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (\bar{D}) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน

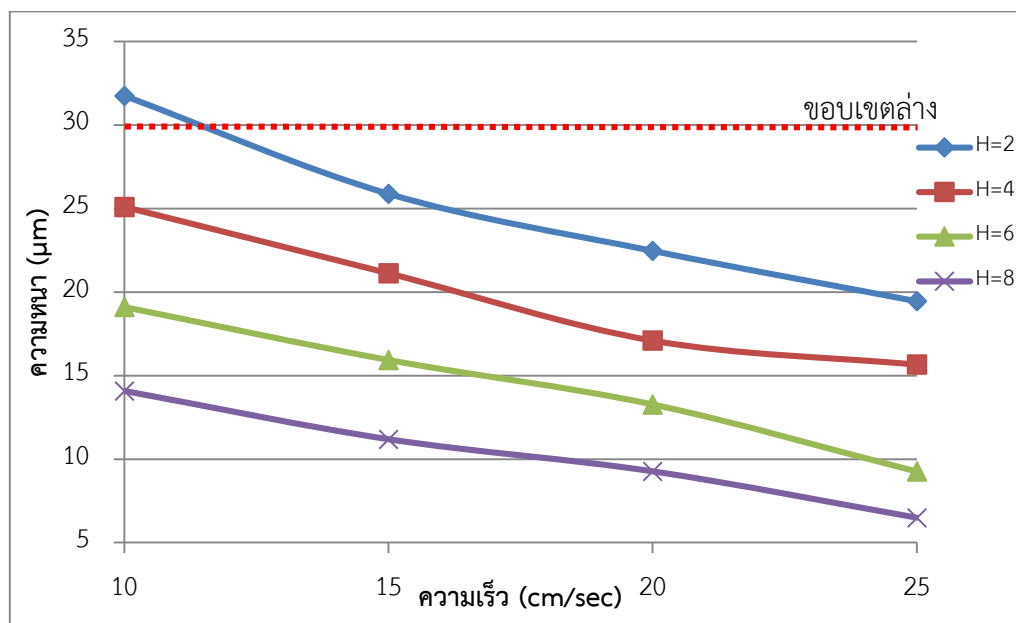


รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (\bar{D}) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน

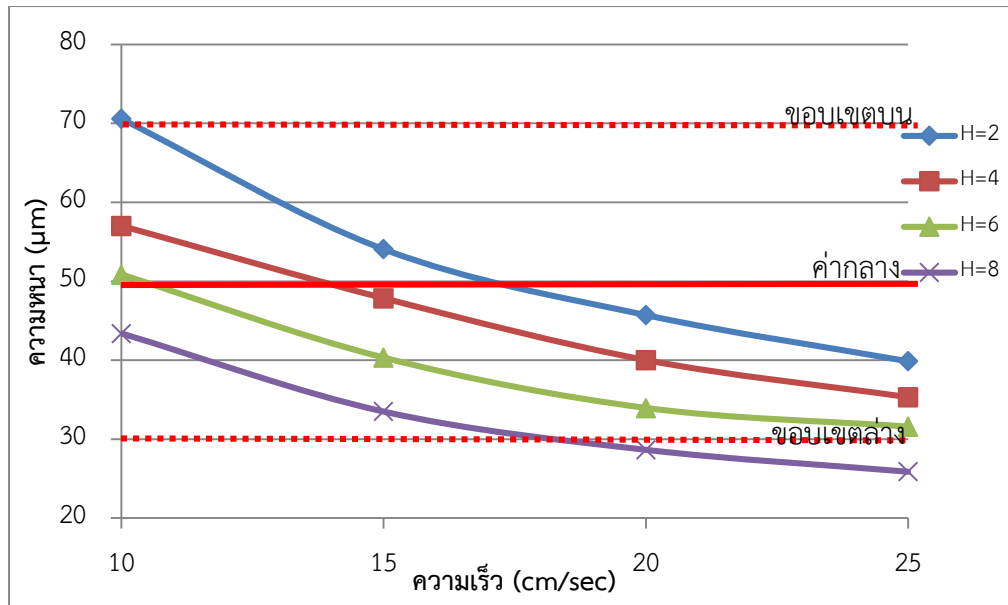
จากรูปที่ 5.25 และ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที) กับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) ที่ความ

ดัน 1.5 กิโลปาสคาล และ 2.5 กิโลปาสคาล ภายใต้ระดับความสูงต่างกันในแต่ละสถานะ ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วในการทดลองแต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาที่ความดันต่างกันพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าของความหนาเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

6) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการทดลอง (เช่น ดีเมตร/วินาที) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (μm) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสถานะ



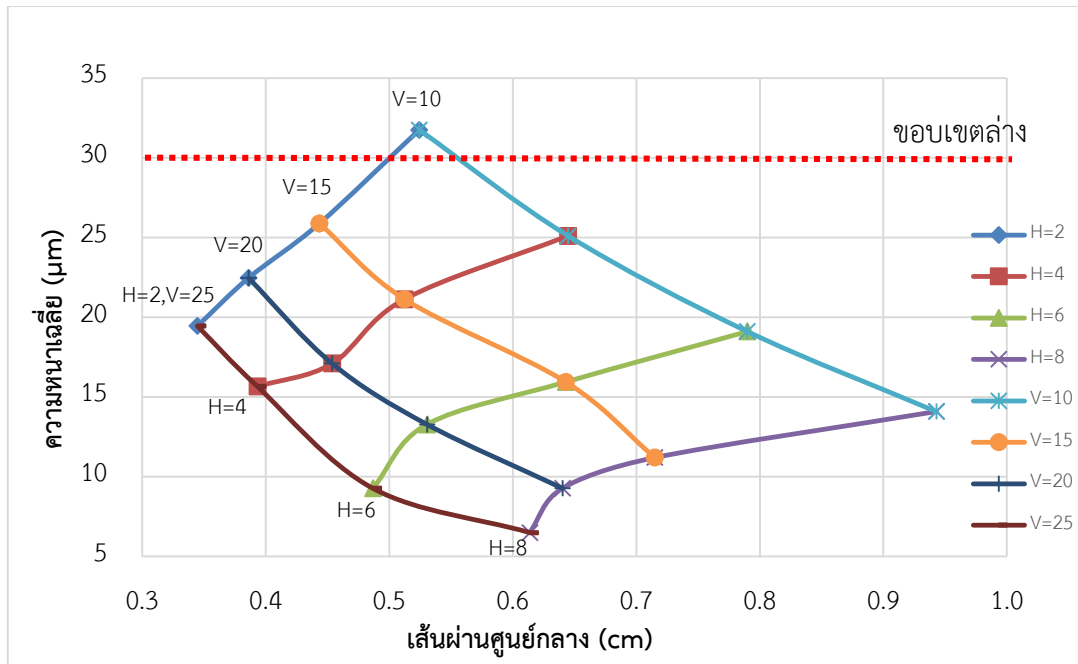
รูปที่ 5. 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความหนาเฉลี่ย (τ) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน



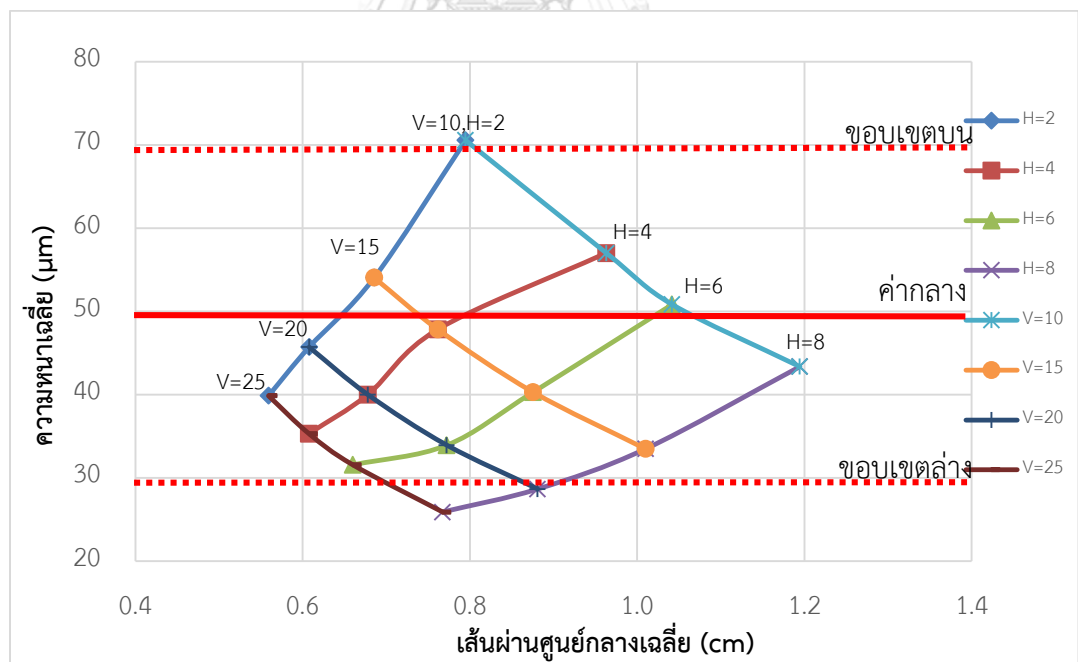
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความหยาบเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 2.5 KPa และระดับความสูง (H) ต่างๆกัน

จากรูปที่ 5.26 และ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที) กับค่าของความหยาบเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสกาล และ 2.5 กิโลปาสกาล ภายใต้ระดับความสูงต่างกันในแต่ละสภาวะตามลำดับ ค่าของความหยาบเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วในการทดลองและระดับความสูงเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาที่ความดันต่างกันพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าของความหยาบเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

7) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) กับค่าของความหยาบเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูงและความดันต่างกันในแต่ละสภาวะ



รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa ระดับความสูง (H) และความเร็ว (V) ต่างๆกัน



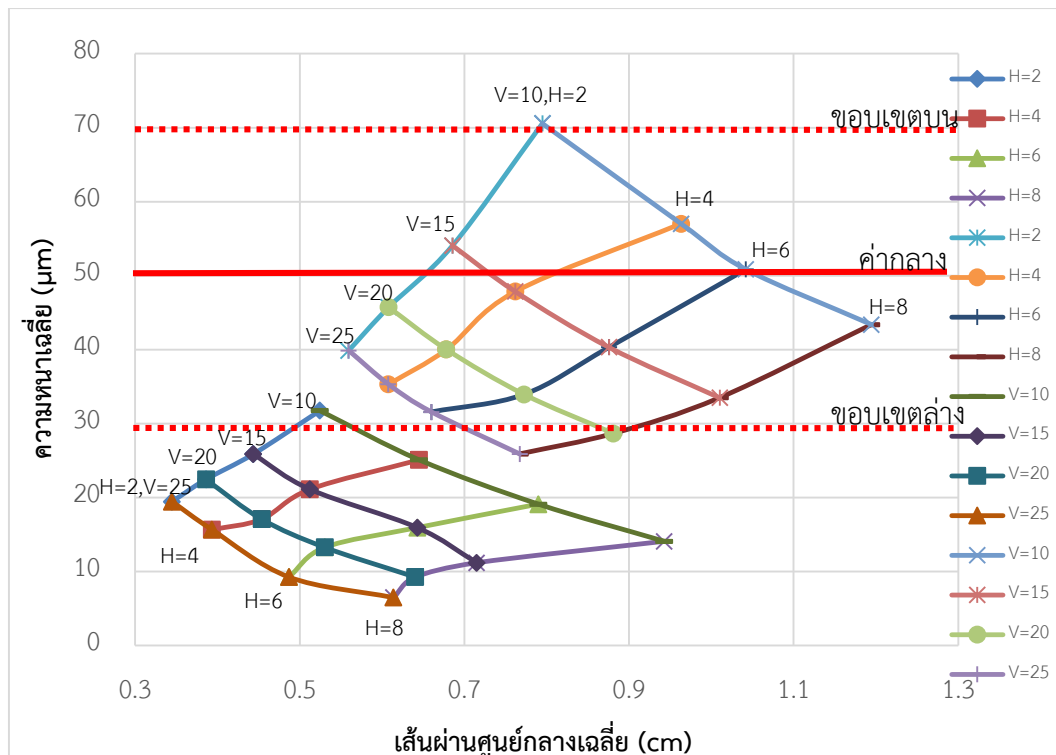
รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (ϕ) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 KPa ระดับความสูง (H) และความเร็ว (V) ต่างๆกัน

จากรูปที่ 5.29 และ 5.30 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) กับค่าของความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ระดับความสูง

และความดันต่างกัน โดยมีการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ทดลองเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละสภาวะ เมื่อพิจารณาความเร็วที่ใช้ในการทดลองคงที่ แต่ระดับความสูง (เซนติเมตร) แตกต่างกันได้แก่ 2, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาแยกที่แต่ละระดับความสูง และความดัน (1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาล) ที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาที่ความดัน 1.5, 2.5 กิโลปาสคาล และระดับความสูงที่ 2 เซนติเมตร พบว่า

- เมื่อความเร็วที่ใช้ในการทดลองเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของความหนาและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มลดลงเช่นกันในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นแต่ความสูงและความเร็วในการทดลองเป็นค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของความหนาและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- เมื่อความดันเป็นค่าคงที่แต่ความสูงเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของความหนาที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง แต่ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง
- ถ้าพิจารณาที่ความสูงและความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทำให้ได้ช่วงความหนาที่ต้องการคือ 50 ± 20 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยามีค่าสูงสุด ที่ความดัน 1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาล พบว่า ที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล ความสูง 2 เซนติเมตร และความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง 10 เซนติเมตร/วินาที ส่วนที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล ความสูง 4 เซนติเมตร และความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง 15 เซนติเมตร/วินาที

8) ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน 1.5 กิโลปาสคาล กับความดัน 2.5 กิโลปาสคาลที่ความเร็วและระดับความสูงของหัวพ่นที่แตกต่างกัน



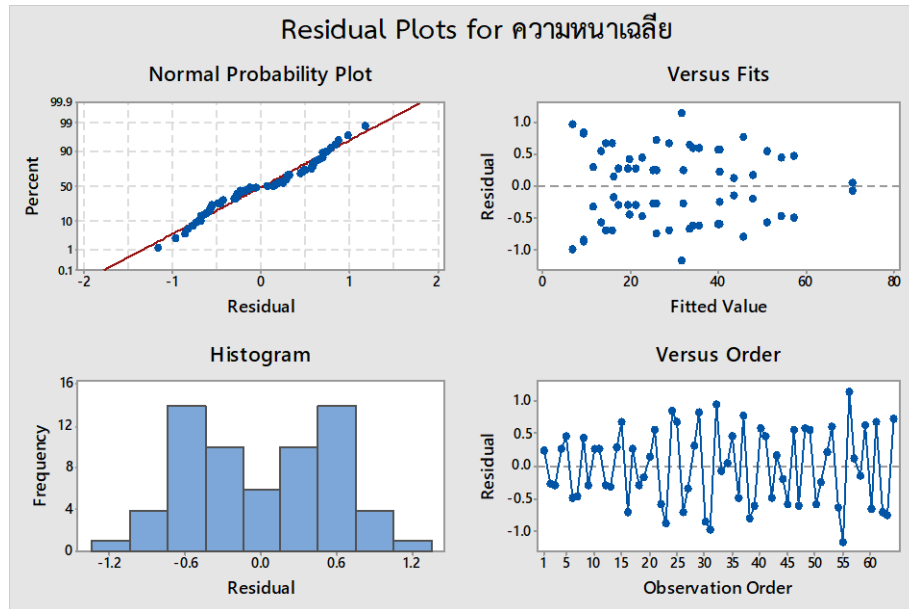
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (\bar{D}) กับความหนาเฉลี่ย (T) ที่ความดัน (P) 1.5 และ 2.5 KPa ในระดับความสูง (H) และความเร็ว (V) ต่างๆกัน

เมื่อนำค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจากการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เซนติเมตร) กับความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ที่ความดัน 1.5 และ 2.5 กิโลปาสคาลในระดับความสูงและความเร็วต่างกันของแต่ละสภาวะมาเปรียบเทียบในกราฟเดียวกัน พบว่าที่ความดัน 1.5 กิโลปาสคาล มีเพียงสภาวะเดียวที่ค่าความหนาอยู่ในช่วงที่ต้องนอกนั้นมีค่าต่ำกว่าช่วงของความหนาที่ต้องการทั้งหมด ส่วนที่ความดัน 2.5 กิโลปาสคาล ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าความหนาอยู่ในช่วงที่ต้องการคือ 50 ± 20 ไมโครเมตร

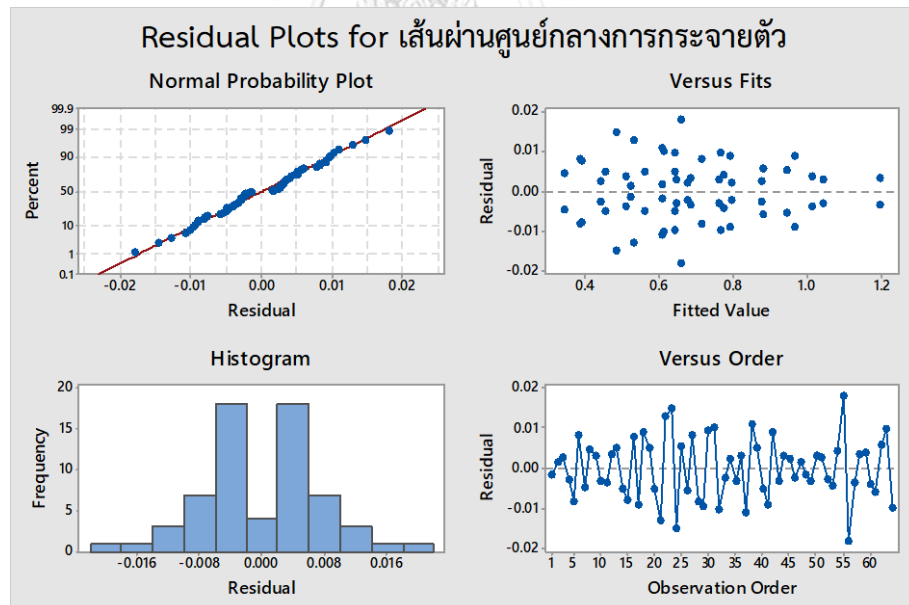
9) การตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ

รูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 แสดงผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าความหนาเฉลี่ยและกรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย พบว่า 1) ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและมีความปกติของข้อมูล ซึ่งค่าของ p-value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2) ความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence Distribution) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความ

เป็นอิสระต่อกัน 3) ความมีเสถียรภาพของค่าแปรปรวน (Stability of Variance) ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าแปรปรวน



รูปที่ 5.32 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V > 0$)



รูปที่ 5.33 ผลการตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ กรณีค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V > 0$)

10) ผลวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาของผิวเคลือบ

จากรูปที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาเฉลี่ยพบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยได้แก่ ความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) อันตรกิริยา (Interaction) มีผล 3 คู่คือ ความดันกับความสูงของหัวพ่น (P*H), ความดันกับความเร็วในการพ่น (P*V) และความสูงของหัวพ่นกับความเร็วในการพ่น (H*V)

General Factorial Regression: ความหนาเฉลี่ย versus P, H, V

Factor Information

Factor	Levels	Values
P	2	1.5, 2.5
H	4	2, 4, 6, 8
V	4	10, 15, 20, 25

Analysis of Variance

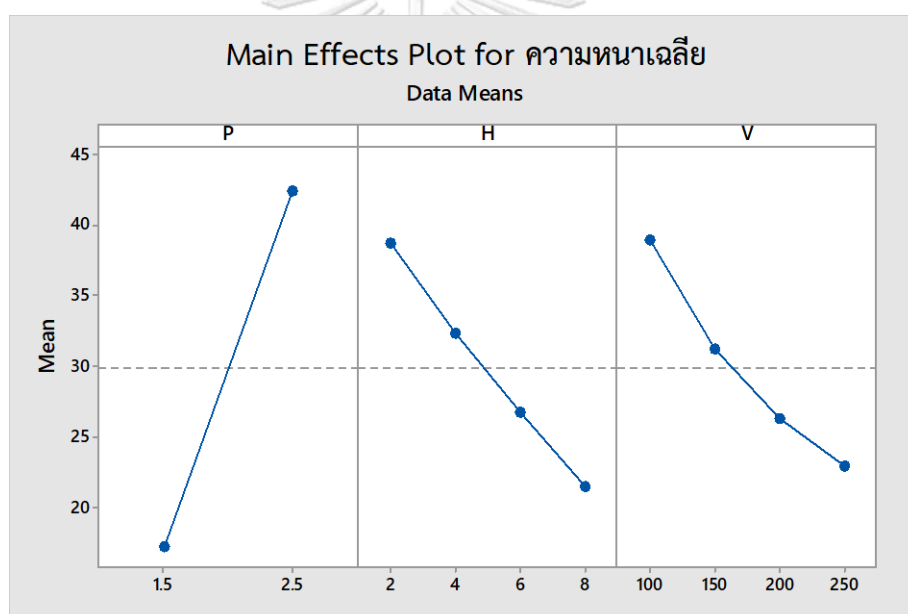
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	15589.5	502.9	772.28	0.000
Linear	7	15015.3	2145.0	3294.13	0.000
P	1	10070.6	10070.6	15465.43	0.000
H	3	2614.7	871.6	1338.47	0.000
V	3	2329.9	776.6	1192.68	0.000
2-Way Interactions	15	540.4	36.0	55.33	0.000
P*H	3	52.0	17.3	26.62	0.000
P*V	3	383.0	127.7	196.07	0.000
H*V	9	105.4	11.7	17.98	0.000
3-Way Interactions	9	33.8	3.8	5.78	0.000
P*H*V	9	33.8	3.8	5.78	0.000
Error	32	20.8	0.7		
Total	63	15610.4			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.806951	99.87%	99.74%	99.47%

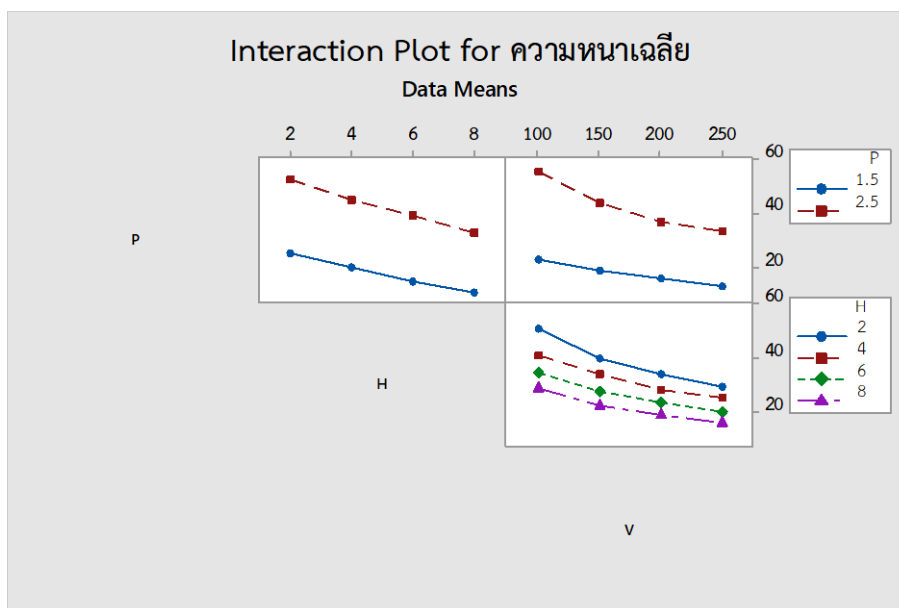
รูปที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาเฉลี่ย (เมื่อ $V > 0$)

จากนั้นนำข้อมูลมาทำ Main effect plot เพื่อแสดงผลของปัจจัยหลักแต่ละตัวดังรูปที่ 5.35 Main Effect Plot ของค่าความหนาเฉลี่ยที่ $v > 0$ พบว่าเมื่อความดัน P เพิ่มขึ้นจาก 1.5 กิโลปาสคาล เป็น 2.5 กิโลปาสคาล ค่าของความหนาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 16 ไมโครเมตร ถึง 43 ไมโครเมตร ดังนั้นผิวเคลือบจะมีความหนาขึ้น สำหรับความสูงของหัวพ่น H เพิ่มขึ้นจาก 2 เซนติเมตร เป็น 4 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าความหนาเฉลี่ยมีค่าลดลงเช่นเดียวกับความเร็วในการพ่น V เพิ่มจาก 10 เซนติเมตร/วินาที เป็น 25 เซนติเมตร/วินาที ที่ทำให้ค่าความหนาเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความสูงของหัวพ่นและความเร็วในการพ่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำยาเกิดความฟุ้งกระจายมากขึ้น ดังนั้นความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) มีอิทธิพลต่อค่าของความหนาเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) เท่ากับ 0.05



รูปที่ 5.35 Main Effect Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v > 0$

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Interaction Plot เพื่อดูผลอันตรกิริยาระหว่าง 1) ความดัน (P) และความสูงของหัวพ่น (H) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย H เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง 2) ความดัน (P) และความเร็วในการพ่น (V) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย V เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง 3) ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) พบว่าที่ปัจจัย H ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย V เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 5.36 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v > 0$



รูปที่ 5.36 Interaction Plot ของค่าความหนาเฉลี่ย ที่ $v > 0$

11) ผลวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย

จากรูปที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยได้แก่ ความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) อันตรกิริยา (Interaction) มีผล 3 คู่คือ ความดันกับความสูงของหัวพ่น ($P*H$), ความดันกับความเร็วในการพ่น ($P*V$) และความสูงของหัวพ่นกับความเร็วในการพ่น ($H*V$)

General Factorial Regression: เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัว versus P, H, V

Factor Information

Factor	Levels	Values
P	2	1.5, 2.5
H	4	2, 4, 6, 8
V	4	10, 15, 20, 25

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	31	2.63026	0.084847	771.22	0.000
Linear	7	2.56703	0.366719	3333.32	0.000
P	1	0.90054	0.900542	8185.54	0.000
H	3	0.81386	0.271288	2465.89	0.000
V	3	0.85263	0.284208	2583.33	0.000
2-Way Interactions	15	0.05626	0.003750	34.09	0.000
P*H	3	0.00145	0.000485	4.41	0.011
P*V	3	0.01584	0.005281	48.00	0.000
H*V	9	0.03896	0.004329	39.35	0.000
3-Way Interactions	9	0.00697	0.000775	7.04	0.000
P*H*V	9	0.00697	0.000775	7.04	0.000
Error	32	0.00352	0.000110		
Total	63	2.63378			

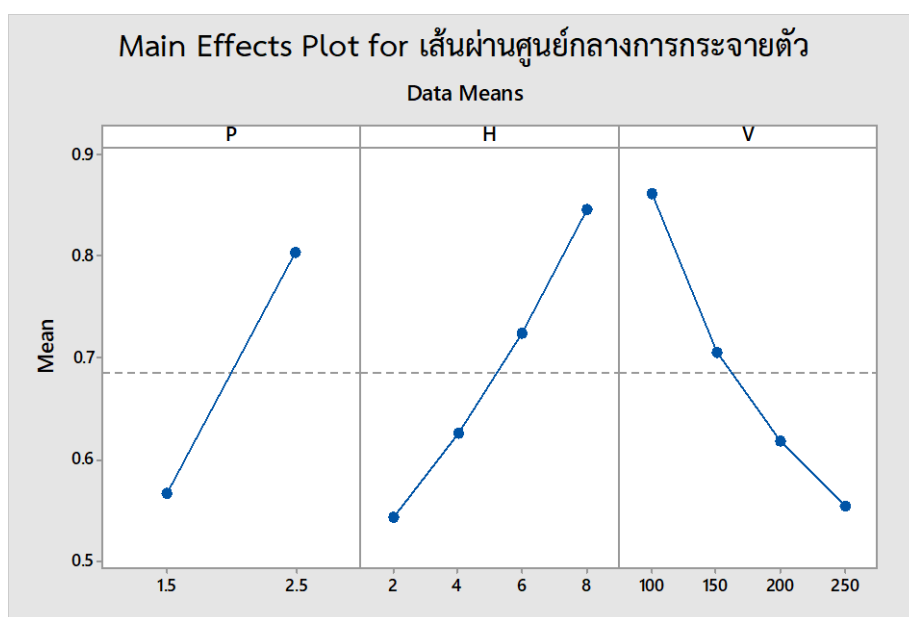
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0104889	99.87%	99.74%	99.47%

รูปที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย (เมื่อ $V > 0$)

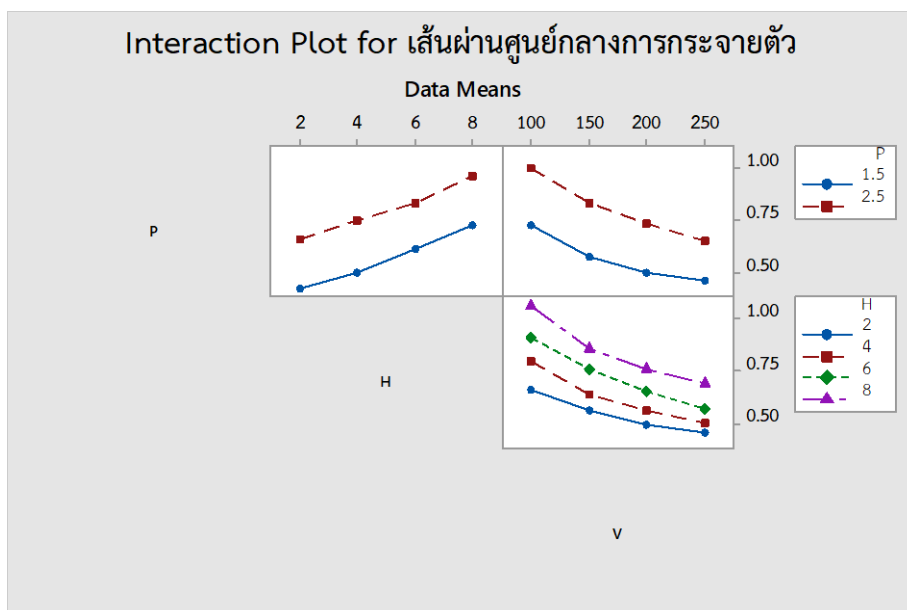
จากนั้นนำข้อมูลมาทำ Main effect plot พล็อตเพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัวดังรูปที่ 5.38 Main Effect Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย $v > 0$ พบว่าเมื่อความดัน P เพิ่มขึ้นจาก 1.5 กิโลปาสคาล เป็น 2.5 กิโลปาสคาล ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.58 เซนติเมตร ถึง 0.82 เซนติเมตร ดังนั้นผิวเคลือบจะมีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับความสูงของหัวพ่น H เพิ่มขึ้นจาก 2 เซนติเมตร เป็น 4 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าค่าเส้น

ผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วในการพ่น V เพิ่มขึ้นจาก 10 เซนติเมตร/วินาที เป็น 25 เซนติเมตร/วินาที ที่ทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความดันและความสูงของหัวพ่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำยาเกิดความฟุ้งกระจายมากขึ้น ดังนั้นความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) มีอิทธิพลต่อค่าของความหนาเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) เท่ากับ 0.05



รูปที่ 5.38 Main Effect Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v > 0$

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Interaction Plot เพื่อดูผลอันตรกิริยาระหว่าง 1) ความดัน (P) และ ความสูงของหัวพ่น (H) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย H เพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น 2) ความดัน (P) และความเร็วในการพ่น (V) พบว่าปัจจัย P ที่ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย V เพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง 3) ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วในการพ่น (V) พบว่าที่ปัจจัย H ระดับต่ำเมื่อระดับปัจจัย V เพิ่มค่าความหนาเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 5.39 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v > 0$



รูปที่ 5.39 Interaction Plot ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเฉลี่ย ที่ $v > 0$

5.3 ผลการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

ผลการนำไปประยุกต์ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริงมีดังนี้

5.3.1 ผลการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

5.3.2 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งานกับขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรในปัจจุบัน

5.3.1 ผลการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง

แผ่นที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ผลรวมเฉลี่ย
ความหนาเฉลี่ย (μm)	47.70	47.32	47.74	47.98	47.72	47.10	47.16	47.72	47.50	48.02	47.60
ผลการตรวจสอบ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10.00
ร้อยละ FTY											100

หมายเหตุ: - ผลการตรวจสอบคุณภาพผิวเคลือบจะใช้ 0 แทนแผงวงจรที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ และใช้ 1 แทนแผงวงจรที่ผ่านการตรวจสอบ

จากตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริงทั้งหมด 10 แผ่น พบว่าค่าจำนวนของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตครั้งแรก (FTY) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 ของจำนวนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด และมีค่าความหนาเฉลี่ยเป็น 47.60 ไมโครเมตร

5.3.2 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งานกับขั้นตอนการเคลือบแผงวงจรในปัจจุบัน

ตารางที่ 5.8 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน

วันที่	ช่วงเวลา	จำนวนงานเข้า (แผ่น)	จำนวนของเสียรวม (แผ่น)	จำนวนของดีรวม (แผ่น)	ร้อยละของ FTY
1	เช้า	245	12	233	95.10%
	บ่าย	172	6	166	96.51%
	ดึก	98	6	92	93.88%
2	เช้า	164	6	158	96.34%
	บ่าย	128	3	125	97.66%
	ดึก	241	10	231	95.85%
3	เช้า	159	7	152	95.60%
	บ่าย	105	7	98	93.33%
	ดึก	191	4	187	97.91%
4	เช้า	233	7	226	97.00%
	บ่าย	194	7	187	96.39%
	ดึก	148	5	143	96.62%
5	เช้า	276	4	272	98.55%
	บ่าย	152	4	148	97.37%
	ดึก	262	8	254	96.95%
6	เช้า	144	7	137	95.14%
	บ่าย	86	3	83	96.51%
	ดึก	118	3	115	97.46%

ตารางที่ 5.9 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ)

วันที่	ช่วงเวลา	จำนวนงาน เข้า (แผ่น)	จำนวนของ เสียรวม (แผ่น)	จำนวนของ ดีรวม (แผ่น)	ร้อยละของ FTY
7	เช้า	142	5	137	96.48%
	บ่าย	235	14	221	94.04%
	ดึก	82	2	80	97.56%
8	เช้า	176	7	169	96.02%
	บ่าย	110	5	105	95.45%
	ดึก	132	4	128	96.97%
9	เช้า	218	7	211	96.79%
	บ่าย	81	2	79	97.53%
	ดึก	194	4	190	97.94%
10	เช้า	120	4	116	96.67%
	บ่าย	56	1	55	98.21%
	ดึก	215	7	208	96.74%
11	เช้า	125	4	121	96.80%
	บ่าย	261	5	256	98.08%
	ดึก	144	3	141	97.92%
12	เช้า	232	10	222	95.69%
	บ่าย	216	7	209	96.76%
	ดึก	198	7	191	96.46%
13	เช้า	105	5	100	95.24%
	บ่าย	229	9	220	96.07%
	ดึก	154	5	149	96.75%
14	เช้า	74	1	73	98.65%
	บ่าย	133	6	127	95.49%
	ดึก	282	8	274	97.16%

ตารางที่ 5.10 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ)

วันที่	ช่วงเวลา	จำนวนงาน เข้า (แผ่น)	จำนวนของ เสียรวม (แผ่น)	จำนวนของ ดีรวม (แผ่น)	ร้อยละของ FTY
15	เช้า	112	4	108	96.43%
	บ่าย	88	6	82	93.18%
	ดึก	253	8	245	96.84%
16	เช้า	176	4	172	97.73%
	บ่าย	150	6	144	96.00%
	ดึก	246	11	235	95.53%
17	เช้า	262	10	252	96.18%
	บ่าย	191	5	186	97.38%
	ดึก	175	6	169	96.57%
18	เช้า	210	8	202	96.19%
	บ่าย	127	8	119	93.70%
	ดึก	190	3	187	98.42%
19	เช้า	284	7	277	97.54%
	บ่าย	205	8	197	96.10%
	ดึก	252	5	247	98.02%
20	เช้า	108	5	103	95.37%
	บ่าย	174	5	169	97.13%
	ดึก	265	8	257	96.98%
21	เช้า	285	8	277	97.19%
	บ่าย	102	4	98	96.08%
	ดึก	173	6	167	96.53%
22	เช้า	95	2	93	97.89%
	บ่าย	240	10	230	95.83%
	ดึก	218	7	211	96.79%
23	เช้า	124	6	118	95.16%
	บ่าย	161	8	153	95.03%
	ดึก	205	5	200	97.56%

ตารางที่ 5.11 ผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งาน (ต่อ)

วันที่	ช่วงเวลา	จำนวนงาน เข้า (แผ่น)	จำนวนของเสีย รวม (แผ่น)	จำนวนของดี รวม (แผ่น)	ร้อยละของ FTY
24	เช้า	64	0	64	100.00%
	บ่าย	238	8	230	96.64%
	ดึก	175	5	170	97.14%
25	เช้า	255	9	246	96.47%
	บ่าย	216	8	208	96.30%
	ดึก	137	6	131	95.62%
26	เช้า	210	2	208	99.05%
	บ่าย	85	1	84	98.82%
	ดึก	188	6	182	96.81%
27	เช้า	226	8	218	96.46%
	บ่าย	242	7	235	97.11%
	ดึก	116	5	111	95.69%
28	เช้า	92	2	90	97.83%
	บ่าย	124	1	123	99.19%
	ดึก	278	9	269	96.76%
29	เช้า	149	4	145	97.32%
	บ่าย	256	8	248	96.88%
	ดึก	182	6	176	96.70%
30	เช้า	264	7	257	97.35%
	บ่าย	235	9	226	96.17%
	ดึก	158	5	153	96.84%
รวม		15991	530	15461	96.67%
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)		61.74	2.62	59.95	0.01

จากตารางที่ 5.8-5.11 แสดงผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามเงื่อนไขการทดลองมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันเป็นระยะเวลา 1 เดือนพบว่าค่าจำนวนของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตครั้งแรก (FTY) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.67 ของจำนวนงานเข้าทั้งหมด

5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลองมีดังนี้

5.4.1 เปรียบเทียบค่าร้อยละของของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) โดยเฉลี่ย

5.4.2 เปรียบเทียบรอบเวลาการเคลื่อนอัตโนมัติ (Cycle Time) โดยเฉลี่ย

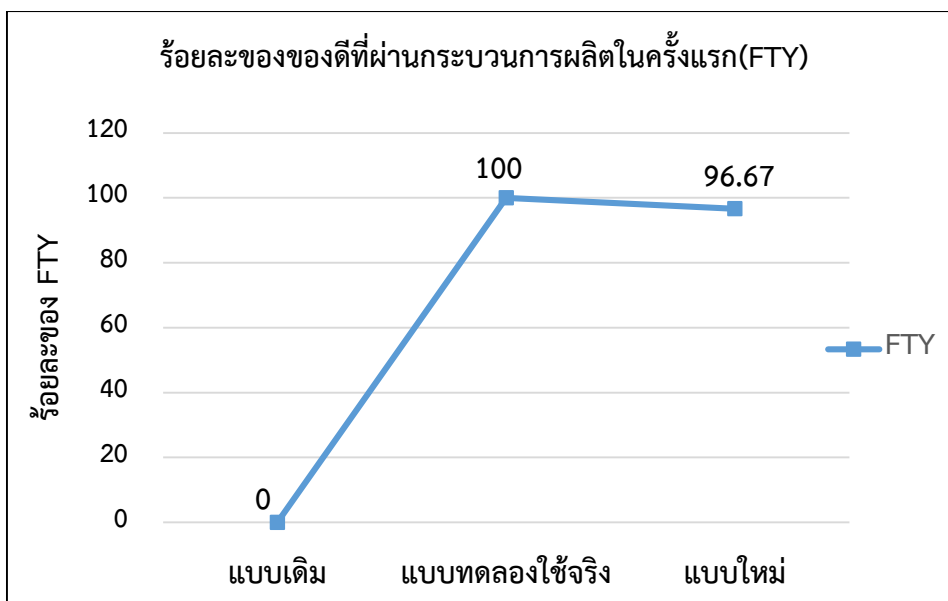
5.4.3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการเคลื่อนด้วยเครื่องอัตโนมัติและขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร

5.4.4 เปรียบเทียบผิวเคลือบที่ได้จากการทดลอง

5.4.5 เปรียบเทียบผลการศึกษาก่อนและหลังการปรับปรุง

5.4.1 เปรียบเทียบค่าร้อยละของของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) โดยเฉลี่ย

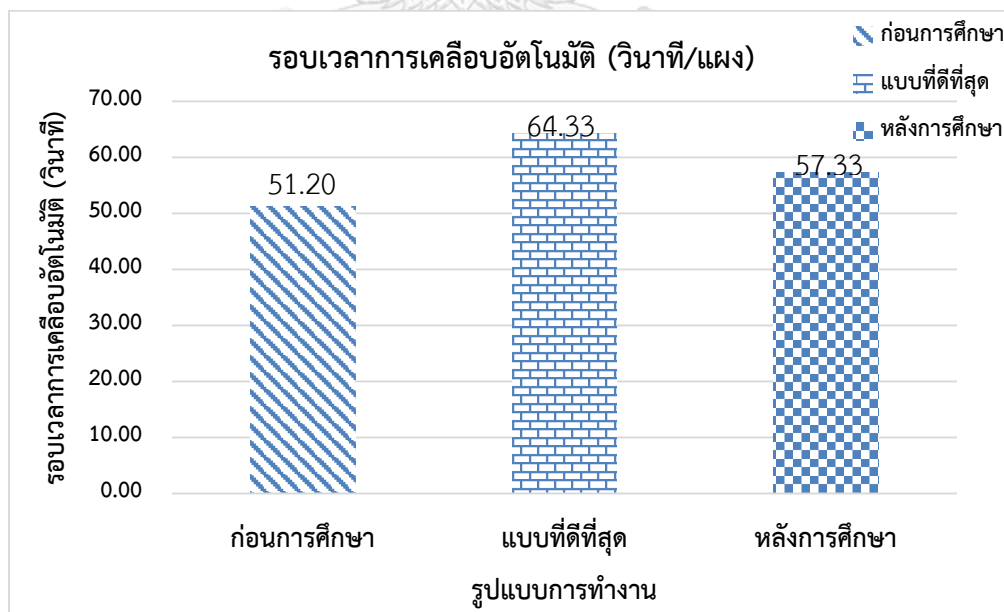
จากรูปที่ 5.40 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละของของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) โดยเฉลี่ย พบว่าแบบทดลองใช้จริงกับแบบใหม่มีค่าต่างไม่มาก แต่เมื่อเทียบร้อยละของ FTY ระหว่างแบบเดิมกับแบบใหม่มีค่าต่างกันมาก ดังนั้นพารามิเตอร์แบบใหม่จึงให้ค่าร้อยละของของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรกมากกว่าพารามิเตอร์แบบเดิม



รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบค่าร้อยละของของดีที่ผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรก (FTY) โดยเฉลี่ย

5.4.2 เปรียบเทียบรอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติ (Cycle Time) โดยเฉลี่ย

จากรูปที่ 5.41 แสดงการเปรียบเทียบรอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติ (Cycle Time) โดยเฉลี่ยพบว่าแบบที่ดีที่สุดกับก่อนการศึกษามีค่าต่างกันมาก แต่เมื่อเทียบรอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติโดยเฉลี่ยระหว่างก่อนการศึกษากับหลังการศึกษามีค่าต่างกันไม่มาก ดังนั้นพารามิเตอร์หลังการศึกษาก็ให้รอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ก่อนการศึกษา



รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบรอบเวลาการเคลือบอัตโนมัติ (Cycle Time) โดยเฉลี่ย

5.4.3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติและขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติและขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงวงจร

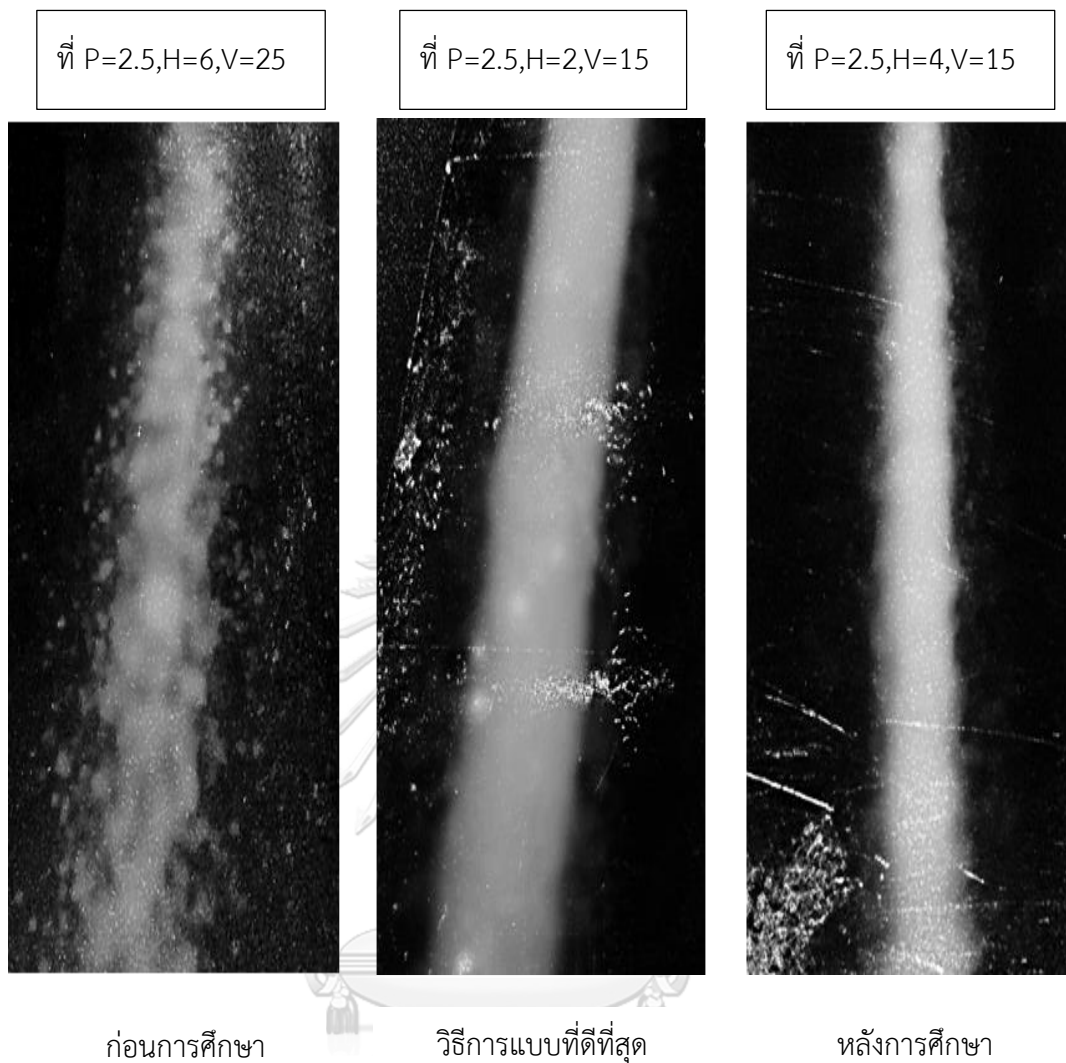
ขั้นตอนการเคลือบ	หน่วย	ก่อนการศึกษา	หลังการศึกษา
1. ขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติ	วินาที/แผง	51.20	57.33
2. ขั้นตอนการแก้ไขผิวงาน	วินาที/แผง	71.93	71.93
รวม	วินาที/แผง	123.13	129.26

หมายเหตุ: ผลรวมของเวลาการเคลือบนี้จะขึ้นอยู่กับร้อยละของงานที่ต้องแก้ไขใหม่ (Rework)

จากตารางที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติและขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงาน ก่อนการศึกษาพบว่ามีปัญหาเรื่องของเสียจำนวนมากหลังขั้นตอนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติซึ่งทำให้ต้องมีขั้นตอนการแก้ไขผิวชิ้นงานเกิดขึ้น แต่หลังการศึกษาพบว่าขั้นตอนการแก้ไขชิ้นงานถูกนำออกทำให้เวลาลดลงจาก 123.13 วินาที/แผง เหลือเพียง 129.26 วินาที/แผง

5.4.4 เปรียบเทียบผิวเคลือบที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 5.42 แสดงการเปรียบเทียบผิวเคลือบที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าของพารามิเตอร์ก่อนการศึกษามีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของน้ำยาเคลือบ ทำให้ผิวเคลือบไม่ได้คุณภาพ เมื่อเทียบกับแบบที่ดีที่สุดและหลังการศึกษามีการกระจายตัวสม่ำเสมอของน้ำยาเคลือบ ทำให้จำนวนของดีที่ได้ในครั้งแรกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.42 ลักษณะของผิวเคลือบของแต่ละแบบ

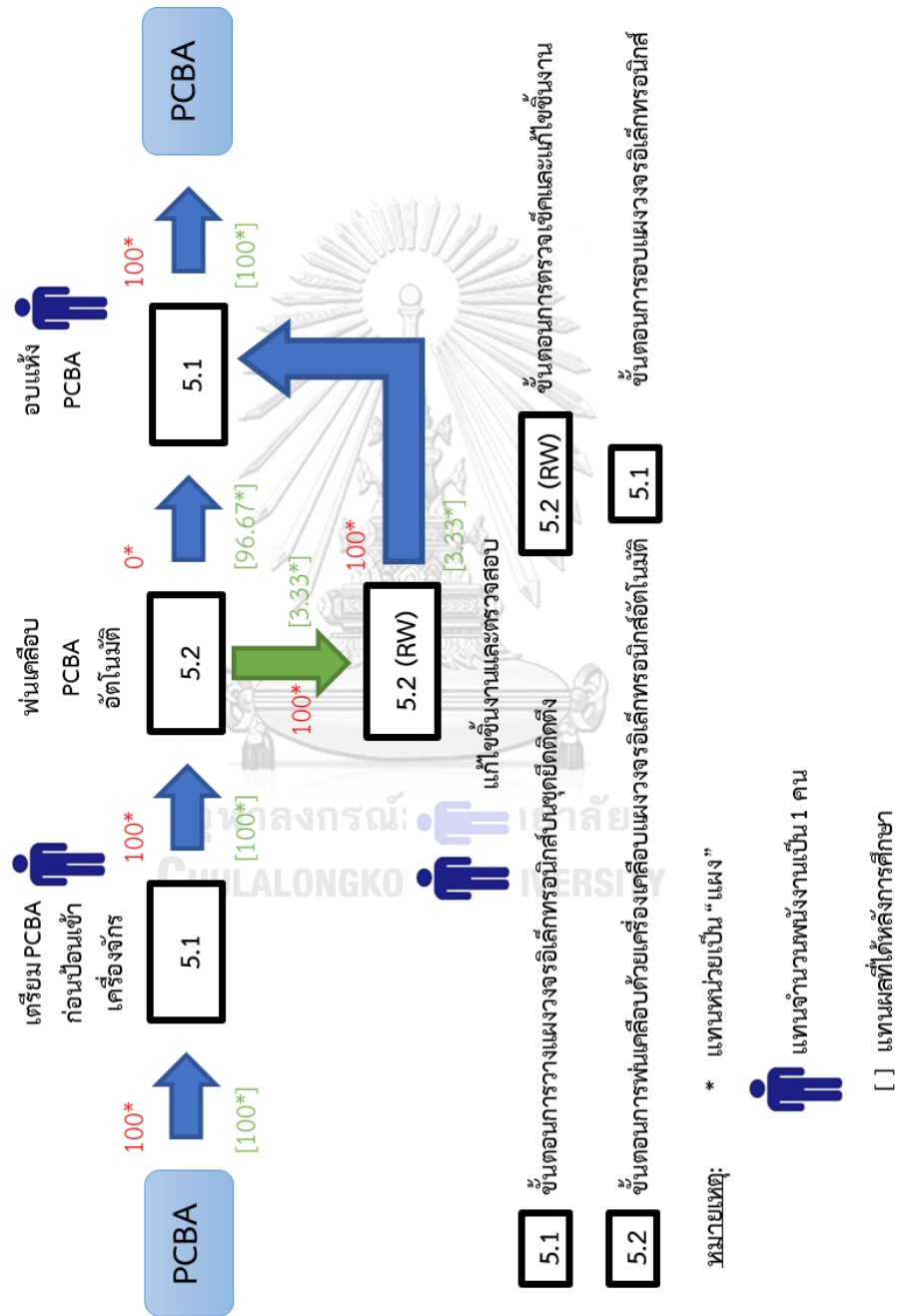
5.4.5 เปรียบเทียบผลการศึกษาก่อนและหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการศึกษาก่อนและหลังการปรับปรุง

รายการ	หน่วย	ก่อนการศึกษา (1)	หลังการศึกษา (2)	แตกต่าง (2)-(1)
ปัจจัยควบคุมที่ใช้ :				
ความดัน (P)	กิโลปาสคาล	2.5	2.5	0
ความสูง (H)	เซนติเมตร	6	4	-2
ความเร็ว (V)	เซนติเมตร/ วินาที	25	15	-10
1) แผงวงจรที่ป้อนเข้า เครื่องเคลือบ อัตโนมัติ	แผง	1,000	1,000	0
2) ผลของจำนวนของดี ที่ได้ในครั้งแรก (First Time Yield)	1,000 แผง	0	9,667	9,667
3) ชิ้นงานแก้ไข (Rework)หรือของเสีย	1,000 แผง	1,000	33.3	-966.7 (-96.7%)
4) เวลาที่ใช้ในการพัน/ แผงวงจร	วินาที/แผง	51.20	57.33	6.13 (12%)
5) เวลาแก้ไขงานใหม่/ แผงวงจร	วินาที/แผง	71.93	71.93	0
6) เวลารวม กระบวนการพัน ทั้งหมด	วินาที/1000 แผง	$(51.20+71.93)*1000$ = 123,130	$(57.33*1000)+(71.93*33.3)$ = 59,725	-63,405 (-51.5%)
7) เวลารวม กระบวนการพันโดย เฉลี่ย/แผงวงจร	วินาที/แผง	$123,130/1,000$ =123.13	$59,725/1,000$ =59.72	-63.41 (-51.5%)

หมายเหตุ: เครื่องหมาย (-) คือ ให้ผลลดลง (+) คือให้ผลเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษาโดยป้อนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 100 แผง เท่ากับพบว่าก่อนการศึกษาแผงวงจรที่ได้จากกระบวนการเคลือบในครั้งแรกเท่ากับ 0 แผง เมื่อเทียบกับผลที่ได้หลังการศึกษาพบว่าแผงวงจรที่ได้จากกระบวนการเคลือบในครั้งแรกเพิ่มเป็น 96.67 แผง นอกจากนี้หลังการศึกษายังสามารถลดพนักงานในขั้นตอนการตรวจสอบและแก้ไขชิ้นงานจากเดิม 2 คนเหลือเพียง 1 คน



รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการสรุปผลที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้จะประกอบไปด้วย การสรุปผลการศึกษา ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลระหว่างความดัน (P), ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็ว (V) จากเครื่องเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ ที่ส่งผลต่อค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลาง การกระจายตัวของน้ำยา ในขั้นตอนการเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยการออกแบบการทดลอง จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

1. ความดันของน้ำยา (P) ความสูงของหัวพ่น (H) และความเร็วของหัวพ่น (V) จะมีผลต่อคุณภาพผิวของการพ่นน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และการกระจายตัวสม่ำเสมอของน้ำยาเคลือบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า α เท่ากับ 0.05

2. ความดันของน้ำยา (P) เท่ากับ 2.5 กิโลปาสคาล ความสูงของหัวพ่น (H) เท่ากับ 2 เซนติเมตร และความเร็วของหัวพ่น (V) เท่ากับ 15 เซนติเมตร/วินาที ให้คุณภาพผิวของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่สุด แต่จะให้รอบเวลาในการพ่นช้าที่สุดเท่ากับ 64.33 วินาที/แผง และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีขนาดความสูงน้อย 2 เซนติเมตร ซึ่งในทางปฏิบัติมักมีความสูงไม่เกิน 4 เซนติเมตร

3. ความดันของน้ำยา (P) เท่ากับ 2.5 กิโลปาสคาล ความสูงของหัวพ่น (H) เท่ากับ 4 เซนติเมตร และความเร็วของหัวพ่น (V) เท่ากับ 15 เซนติเมตร/วินาที คือปัจจัยควบคุมที่ประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งจะให้คุณภาพผิวของน้ำยาเคลือบบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ดี ให้รอบเวลาในการพ่น เท่ากับ 57.33 วินาที/แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ขณะที่เดิมก่อนการศึกษายู่ที่ 51.20 วินาที/แผง หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ $11.97 \approx 12\%$

4. จำนวนของดีที่ได้ในครั้งแรก (First Time Yield) หลังผ่านขั้นตอนการพ่นเคลือบ เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.7 ของจำนวนป้อนเข้า อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากเดิมต้องส่งชิ้นงานแก้ไข (Reworks) ทั้งหมด เวลารวมที่ใช้ในกระบวนการเคลือบด้วยเครื่องอัตโนมัติและกระบวนการแก้ไขชิ้นงานจากเดิมก่อนการศึกษายู่ที่ 123.13 วินาที/แผง เป็น 59.72 วินาที/แผง หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 51.50

5. หลังจากการศึกษา พบว่าโรงงานสามารถลดปริมาณของเสียหรือการแก้ไขชิ้นงาน (Reworks) จากเดิมร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 3.33 หรือลดลงร้อยละ 96.67 ของจำนวนชิ้นงานทั้งหมด

6. ความดัน (P) มีผลต่อค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า α เท่ากับ 0.05 เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นน้ำยาที่ถูกพ่นออกมาจึงมีปริมาณเยอะขึ้นทำให้ค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

7. ความสูงของหัวพ่น (H) มีผลต่อค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า α เท่ากับ 0.05 เนื่องจากเมื่อความสูงของหัวพ่นอยู่ในระดับที่สูงขึ้นยังทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย ส่งผลให้ค่าความหนาลดลง แต่เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยากลับมีค่าเพิ่มขึ้น

8. ความเร็วของหัวพ่น (V) มีผลต่อค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า α เท่ากับ 0.05 เนื่องจากเมื่อความเร็วของหัวพ่นเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาของการพ่นลดลงหัวพ่นเคลื่อนที่เร็วขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยามีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้ยังทำให้น้ำยาเคลือบมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย

1) เนื่องจากทำการทดลองกับเครื่องเคลือบอัตโนมัติที่ใช้ในการผลิตจริง มีการเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง จึงทำให้เสียเวลารอคิวในการใช้เครื่องจักรเป็นเวลานานและขาดความต่อเนื่องและความยุ่งยากในการทดลองมากขึ้น

2) การทดลองหนึ่งครั้งเกิดต้นทุนจำนวนมาก จึงมีข้อจำกัดในเรื่องของการทำการทดลองซ้ำและการเลือกช่วงเวลาในการทำการทดลอง เพราะต้องวัดค่าตามช่วงเวลาหลังจากที่ผลิตเสร็จ

6.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึง ระดับของปัจจัยของค่าพารามิเตอร์ในเครื่องเคลือบผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของน้ำยาเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่ดีที่สุด งานวิจัยต่อไปควรศึกษา คุณสมบัติในด้านอื่นๆ เช่น การเปลี่ยนสารเคลือบมีผลต่อผิวเคลือบหรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เสรี กุลปิยะ. (2556). การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกมาในการลดข้อบกพร่องจากการบินของผลิตภัณฑ์วงจรรวม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- กัน ตา สุวรรณ ฤทธิ, & ณัฐ ชา ทวี แสง สกุล ไทย. (2011). การ ลด ของ เสีย ใน กระบวนการเขียน สัญญาณ บน ฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ โดยใช้ แนวคิด ลีน ซิก ซิก มา (Defect Reduction of Signal Writing Process in Hard Disk Drive By Lean Six Sigma). วารสาร วิศวกรรมศาสตร์, 3(1), 47-60.
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2546). การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) ประมวลผลด้วย MINITAB (พิมพ์ครั้งที่ 6 ed.). กรุงเทพฯ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2550). หลักการการควบคุมคุณภาพ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพมหานคร: สมาคม ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- จตุรรัตน์ สุนทรเวชพงษ์. (2559). อิทธิพลของส่วนผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีต่อคุณสมบัติการใช้งาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฉันทิช ลักษณานันท์. (2557). การลดของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทคราบของสารบัดกรีบนแผงวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ปารเมศ ชูติมา, ก., กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรเทพ เหลือทรัพย์สุข. (2553). สถิติสำหรับ Six Sigma ง่ายนิดเดียว. กรุงเทพมหานคร: อี.ไอ.สแควร์ สำนักพิมพ์.
- ภัทรดิกรรณ์ รัชศักดิ์ศรี. (2555). การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ภาณุ ชุติเจื้อจิ้น. (2550). การลดของเสียจากการพันสีร่องพื้นในกระบวนการผลิตกล่องนาฬิกาโดย
แนวทางซิกซ์ ซิกมา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภารินี แก้วสม. (2556). การลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขนในกระบวนการด้ายเส้นด้าย.
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วชิรพงษ์ สาลีสิงห์. (2548). ภูมิวัตกระบวนการทำงานด้วยเทคนิค *Six Sigma* ฉบับ *Champion* และ
Black Belt. กรุงเทพฯ: ศิริวัฒนา อินเตอร์พรีนท์.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2558). สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี
2559. Retrieved from
http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_overview/annual2015.pdf
- สุนา คำหาญพล. (2555). การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการเคลื่อนย้ายอะคริลิกป้องกัน
ความชื้นสำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาการ
จัดการทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์), มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.
- สุพิชญา มหิทธิหาญ. (2559). การศึกษาการใช้แอปพลิเคชันการวินิจฉัยสีบนมือถือเพื่อปรับปรุงการ
วิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- อาทิตย์ หงสพันธ์. (2553). การ ลด ข้อ บกพร่อง ใน กระบวนการ พ่น สี ตัว ถัง รถยนต์ โดย
แนวทาง ซิก ซี่ ซิก มา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- AIAG, A. (2010). Measurement System Analysis. *Reference Manual*, 3rd ed. Troy:
Automotive.
- Banuelas, R., Antony, J., & Brace, M. (2005). An application of Six Sigma to reduce
waste. *Quality and Reliability Engineering International*, 21(6), 553-570.
- Breyfogle III, F. W. (2003). *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical
methods*: John Wiley & Sons.
- Codilian, R. (2004). Disk drive comprising a coating bonded to a printed circuit board
assembly: Google Patents.

- Conseil, H., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2014). *Contamination profile of Printed Circuit Board Assemblies in relation to soldering types and conformal coating*. Paper presented at the European Corrosion Congress.
- Fasser, Y., & Brettner, D. (1992). *Process improvement in the electronics industry*: John Wiley & Sons, Inc.
- Johnson, R., Miller, I., & Freund, J. (1995). *Probability and statistics for engineers* (Vol. 6): Prentice Hall.
- Khorasani, A. M., Yazdi, M. R. S., & Safizadeh, M. S. (2011). Tool Life Prediction in Face Milling Machining of 7075 Al by Using Artificial Neural Networks (ANN) and Taguchi Design of Experiment (DOE). *International Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 30.
- Kim, J.-R., Cho, J. M., Lee, A. R., Chae, E. A., Park, J.-U., Byun, W.-B., . . . Shin, W. S. (2011). Improvement of the performance of inverted polymer solar cells with a fluorine-doped tin oxide electrode. *Current Applied Physics*, 11(1, Supplement), S175-S178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.11.027>
- Nayatani, Y., Eiga, T., Futami, R., & Miyagawa, H. 7 เครื่องมือ สู่ คุณภาพ ยุค ใหม่= 7 New QC Tools.
- Raisinghani, M. S., Ette, H., Pierce, R., Cannon, G., & Daripaly, P. (2005). Six Sigma: concepts, tools, and applications. *Industrial management & Data systems*, 105(4), 491-505.
- Rathinavelu, U., Jellesen, M. S., & Ambat, R. Effect of process related residues on the performance of conformal coatings for PCBA applications.
- Scrucca, L. (2004). qcc: an R package for quality control charting and statistical process control. *dim (pistonrings)*, 1(200), 3.
- Tsai, C.-Y., & Chiu, C.-C. (2007). A case-based reasoning system for PCB principal process parameter identification. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1183-1193.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตัวอย่างการคำนวณ

การหาเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวต่อแผงวงจร (T_d) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของเวลาที่ใช้ในการพ่นและวกกลับของหัวพ่นทั้งหมด ดังสมการที่ 4.1 โดย (1) เวลารวมที่ใช้ในการพ่นทั้งหมดมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเที่ยว (N) และเวลาที่ใช้ต่อเที่ยว และจำนวนเที่ยว (N) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความกว้างที่ต้องการเคลือบของแผงวงจร (W) ต่อความกว้างของผิวเคลือบต่อเที่ยวของการพ่น (B) ซึ่งในที่นี้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 80 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยพ่นที่วัดได้จริง กรณีไม่ถูกทับซ้อน (\emptyset) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ (2) เวลาที่ใช้ในการวกกลับของหัวพ่นทั้งหมด (n) มีค่าเท่ากับผลคูณของเวลาที่ใช้ในการวกกลับของหัวพ่นต่อเที่ยว (U) และจำนวนเที่ยวที่ใช้ในการวกกลับ ($N-1$) ดังสมการที่ 4.3

นอกจากนี้ เวลาของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (TT) มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในการพ่นน้ำยาเคลือบผิว (T_d) และเวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิว (T_R) ชิ้นงานต่อแผงวงจร ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$T_d = N \frac{L}{V} + n \quad (4.1)$$

$$N = \frac{W}{B} \text{ หรือ } = \frac{W}{0.8\emptyset} \quad (4.2)$$

$$n = (N - 1)U \quad (4.3)$$

$$TT = T_d + T_R \quad (4.4)$$

- เมื่อ T_d = เวลาที่ใช้ในการพ่นน้ำยาเคลือบผิวต่อแผง (วินาที/แผง)
 N = จำนวนเที่ยวในการพ่นต่อแผง (เที่ยว/แผง) และ N เป็นเลขจำนวนเต็ม (Integer number)
 L = ความยาวที่ใช้ในการพ่นหรือความยาวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (เซนติเมตร)
 V = ความเร็วของหัวพ่นน้ำยาในการเคลือบผิว (เซนติเมตร/วินาที)
 W = ความกว้างที่ต้องการเคลือบผิวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (เซนติเมตร)

B = ความกว้างของแนวเคลือบต่อเที่ยว (เซนติเมตร) (ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 0.8Ø)

\emptyset = ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริง กรณีไม่ถูกทับซ้อน (cm)

n = เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการรอกกลับของหัวพ่นต่อแผงวงจร (วินาที/แผง)

U = เวลาในการรอกกลับของหัวพ่น (วินาที/เที่ยว)

TT = เวลารวมของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (วินาที/แผง)

T_R = เวลาที่ใช้ในการแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง (วินาที/แผง)

ตัวอย่างเช่น

จงหาเวลารวมของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง ที่ความดันเท่ากับ 2.5 กิโลปาสคาล ความเร็วเท่ากับ 25 เซนติเมตร/วินาที ความสูงของหัวพ่นจากพื้นผิวแผงวงจร เท่ากับ 6 เซนติเมตร โดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยาว (L) และความกว้าง (W) ที่ต้องการเคลือบผิว เท่ากับ 20 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จริงกรณีไม่ถูกทับซ้อน (\emptyset) เท่ากับ 0.66 เซนติเมตร เวลาในการรอกกลับของหัวพ่น เท่ากับ 1 วินาที/เที่ยว เวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผง เท่ากับ 71.33 วินาที/แผง

จากสูตร
$$N = \frac{W}{0.8\emptyset}$$

$$N = \frac{15}{0.8 \times 0.66}$$

$N = 28.42$ ปัดขึ้นเป็น 29 เที่ยว/แผง

จากสูตร
$$n = (N - 1)U$$

$$n = (29 - 1) \times 1$$

$$n = 28 \times 1$$

$$n = 28$$

วินาที/แผง

จากสูตร
$$T_d = N \frac{L}{V} + n$$

$$T_d = 29 \frac{20}{25} + 28$$

$$T_d = 23.2 + 28$$

$$T_d = 51.20$$

วินาที/แผง

จากสูตร
$$TT = T_d + T_R$$

$$TT = 51.20 + 71.33$$

$$TT = 123.13$$

วินาที/แผง

ดังนั้นเวลารวมของขั้นตอนการพ่นน้ำยาเคลือบผิวและเวลาแก้ไขผิวชิ้นงานต่อแผงมีค่าเท่ากับ
123.13 วินาที/แผง





ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)=0

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	เวลาในการพ่น (sec), S	ความหนาเฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (\O)
1	45	1.5	2	1	74.00	1.675
2	60	1.5	2	1	72.89	1.725
3	11	1.5	2	5	135.22	3.000
4	71	1.5	2	5	136.44	2.875
5	6	1.5	2	10	188.00	3.725
6	19	1.5	2	10	188.44	3.550
7	33	1.5	2	15	230.00	4.100
8	47	1.5	2	15	231.00	4.200
9	26	1.5	2	20	275.11	4.475
10	63	1.5	2	20	274.56	4.550
11	1	1.5	4	1	54.22	1.950
12	75	1.5	4	1	55.33	1.900
13	36	1.5	4	5	120.00	3.025
14	78	1.5	4	5	119.61	3.075
15	28	1.5	4	10	168.89	3.725
16	31	1.5	4	10	167.78	3.800
17	52	1.5	4	15	203.33	4.300
18	79	1.5	4	15	204.11	4.325
19	38	1.5	4	20	253.00	4.625
20	61	1.5	4	20	252.33	4.675
21	15	1.5	6	1	37.33	2.300
22	64	1.5	6	1	38.06	2.150
23	50	1.5	6	5	94.00	3.175
24	54	1.5	6	5	93.78	3.450
25	5	1.5	6	10	147.22	3.950
26	46	1.5	6	10	147.89	3.875
27	9	1.5	6	15	182.00	4.400

ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)=0 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของ หัวพ่น (cm), H	เวลาในการ พ่น (sec), S	ความหนา เฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง การกระจายตัว น้ำยาเฉลี่ย (Ø)
28	45	1.5	6	15	181.89	4.475
29	60	1.5	6	20	214.56	4.950
30	11	1.5	6	20	215.11	4.800
31	71	1.5	8	1	28.33	2.525
32	6	1.5	8	1	28.56	2.375
33	19	1.5	8	5	75.44	3.475
34	33	1.5	8	5	74.78	3.575
35	47	1.5	8	10	113.67	4.350
36	26	1.5	8	10	114.78	4.225
37	63	1.5	8	15	143.11	4.825
38	1	1.5	8	15	142.22	4.750
39	75	1.5	8	20	178.44	5.275
40	36	1.5	8	20	179.44	5.125
41	78	2.5	2	1	142.44	2.250
42	28	2.5	2	1	143.67	2.225
43	31	2.5	2	5	217.56	4.050
44	52	2.5	2	5	216.78	4.125
45	79	2.5	2	10	256.00	5.375
46	38	2.5	2	10	255.89	5.350
47	61	2.5	2	15	293.33	6.250
48	15	2.5	2	15	293.78	6.200
49	64	2.5	2	20	330.00	6.850
50	50	2.5	2	20	331.11	6.825
51	54	2.5	4	1	98.56	2.675
52	5	2.5	4	1	97.67	2.700
53	46	2.5	4	5	185.44	4.350
54	9	2.5	4	5	184.89	4.425

ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)=0 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของ หัวพ่น (cm), H	เวลาในการ พ่น (sec), S	ความหนา เฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง การกระจายตัว น้ำยาเฉลี่ย (\O)
55	45	2.5	4	10	220.22	5.725
56	60	2.5	4	10	219.89	5.775
57	11	2.5	4	15	262.44	6.475
58	71	2.5	4	15	261.89	6.525
59	6	2.5	4	20	299.78	7.150
60	19	2.5	4	20	300.67	7.100
61	33	2.5	6	1	72.11	3.100
62	47	2.5	6	1	73.89	3.050
63	26	2.5	6	5	147.11	4.850
64	63	2.5	6	5	146.78	4.900
65	1	2.5	6	10	189.33	6.100
66	75	2.5	6	10	188.33	6.175
67	36	2.5	6	15	223.67	7.000
68	78	2.5	6	15	224.00	6.925
69	28	2.5	6	20	265.33	7.475
70	31	2.5	6	20	264.67	7.575
71	52	2.5	8	1	59.44	3.350
72	79	2.5	8	1	58.22	3.400
73	38	2.5	8	5	125.00	5.175
74	61	2.5	8	5	124.89	5.275
75	15	2.5	8	10	170.67	6.425
76	64	2.5	8	10	171.11	6.400
77	50	2.5	8	15	199.00	7.375
78	54	2.5	8	15	199.78	7.250
79	5	2.5	8	20	219.11	8.200
80	46	2.5	8	20	217.78	8.275

ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)>0

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V	ความหนาเฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (\varnothing)
1	16	1.5	2	10	32.000	0.523
2	52	1.5	2	10	31.501	0.526
3	14	1.5	2	15	25.611	0.446
4	35	1.5	2	15	26.154	0.441
5	1	1.5	2	20	22.939	0.378
6	57	1.5	2	20	21.995	0.394
7	17	1.5	2	25	19.010	0.340
8	55	1.5	2	25	19.891	0.349
9	9	1.5	4	10	24.830	0.648
10	37	1.5	4	10	25.369	0.642
11	23	1.5	4	15	21.407	0.509
12	12	1.5	4	15	20.844	0.516
13	36	1.5	4	20	16.800	0.459
14	43	1.5	4	20	17.389	0.449
15	47	1.5	4	25	16.343	0.386
16	60	1.5	4	25	14.971	0.401
17	40	1.5	6	10	19.393	0.781
18	22	1.5	6	10	18.816	0.799
19	51	1.5	6	15	15.788	0.648
20	28	1.5	6	15	16.086	0.638
21	33	1.5	6	20	13.840	0.518
22	64	1.5	6	20	12.711	0.543
23	3	1.5	6	25	8.393	0.501
24	39	1.5	6	25	10.128	0.472
25	41	1.5	8	10	14.775	0.948
26	5	1.5	8	10	13.390	0.937

ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)>0 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V	ความหนาเฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (\varnothing)
27	16	1.5	8	15	10.868	0.723
28	52	1.5	8	15	11.511	0.707
29	14	1.5	8	20	10.101	0.631
30	35	1.5	8	20	8.428	0.650
31	1	1.5	8	25	5.515	0.624
32	57	1.5	8	25	7.456	0.604
33	17	2.5	2	10	70.507	0.792
34	55	2.5	2	10	70.636	0.797
35	9	2.5	2	15	54.527	0.682
36	37	2.5	2	15	53.599	0.689
37	23	2.5	2	20	46.515	0.597
38	12	2.5	2	20	44.938	0.619
39	36	2.5	2	25	39.285	0.564
40	43	2.5	2	25	40.461	0.554
41	47	2.5	4	10	57.501	0.954
42	60	2.5	4	10	56.532	0.972
43	40	2.5	4	15	48.032	0.759
44	22	2.5	4	15	47.664	0.765
45	51	2.5	4	20	39.433	0.680
46	28	2.5	4	20	40.598	0.676
47	33	2.5	4	25	34.711	0.609
48	64	2.5	4	25	35.920	0.606
49	3	2.5	6	10	51.409	1.039
50	39	2.5	6	10	50.281	1.045
51	41	2.5	6	15	40.082	0.878
52	5	2.5	6	15	40.556	0.873

ผลการทดลอง เมื่อความเร็ว (V)>0 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	ความดัน (kPa), P	ความสูงของหัวพ่น (cm), H	ความเร็วในการพ่น (cm/sec), V	ความหนาเฉลี่ย (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวน้ำยาเฉลี่ย (\varnothing)
53	8	2.5	6	20	34.558	0.768
54	42	2.5	6	20	33.324	0.776
55	32	2.5	6	25	30.409	0.678
56	44	2.5	6	25	32.741	0.642
57	46	2.5	8	10	43.519	1.191
58	38	2.5	8	10	43.235	1.198
59	48	2.5	8	15	34.155	1.014
60	62	2.5	8	15	32.841	1.006
61	24	2.5	8	20	29.352	0.875
62	54	2.5	8	20	27.969	0.887
63	61	2.5	8	25	25.149	0.777
64	30	2.5	8	25	26.631	0.757



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปิยะวรรณ สิงห์ภูงาม เกิดเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดปทุมธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสิรินธรราชวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม และเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต ในคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิตในปี 2556 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2557



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY