

การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์บนแผ่นผิวอะลูมิเนียม
กรณีศึกษาโรงงานผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า

นายวิทยา นันติชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEFECTIVE REDUCTION IN POLYMER COATING PROCESS ON ALUMINUM
SURFACE A CASE STUDY OF CAPACITOR FACTORY

Mr. Wittaya Nuntichai

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์บนแผ่น
ผิวอะลูมิเนียม กรณีศึกษาโรงงานผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า

โดย

นายวิทยา นันติชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

วิทยา นันติชัย : การลดของเสียในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์บนแผ่นผิวอะลูมิเนียม
กรณีศึกษาโรงงานผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า. (DEFECTIVE REDUCTION IN POLYMER
COATING PROCESS ON ALUMINUM SURFACE A CASE STUDY OF CAPACITOR
FACTORY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 114 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณฟองอากาศบนผิวชิ้นงานตัวเก็บประจุไฟฟ้าใน
กระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้กระแสไฟฟ้าวัดสูง ในการวิจัยนี้ได้
แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ (1) การคัดเลือกและการวิเคราะห์ปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิด
ฟองอากาศ (2) การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ (3) การศึกษากลไกของ
ปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ และ(4) การเสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิต

จากการคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ ผลการทดสอบปัจจัยด้วย
วิธีการเชิงสถิติพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์ และ
ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ
การเกิดฟองอากาศด้วยวิธีการ two-way ANOVA โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ระดับ และ
ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จากการศึกษากลไกการเกิดฟองอากาศสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการ
ปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องได้แก่ การประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม การ
ปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์เคลือบสาร และการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping

ผลการศึกษาพบว่า (1) ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุดคือ ความ
หนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping
เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที (2) สามารถลดปริมาณการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานจากเดิม
ร้อยละ 29.2 เหลือเพียงร้อยละ 1.03 (จำนวนเฟรมงานตัวอย่าง 10,080 เฟรม) และ(3) สามารถ
ลดปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้าวัดสูงจากร้อยละ 7.42 เหลือเพียงร้อยละ 1.70 ก่อนการ
ปรับปรุง

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2551.....

4971468721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : AIR BUBBLE FORMATION / DESIGN OF EXPERIMENT / POLYMER COATING PROCESS

WITTAYA NUNTICHAJ : DEFECTIVE REDUCTION IN POLYMER COATING PROCESS ON ALUMINUM SURFACE A CASE STUDY OF CAPACITOR FACTORY. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUJINDANETR, Ph.D., 114 pp.

The objective of this research work was to reduce the air bubble on the surface of capacitor during polymer coating process being the main factor of high leakage current. The research was divided into 4 steps; (1) selecting and investigating the factors that could be effect the air bubble formation problem, (2) analyzing the factors affecting on air bubble formation, (3) studying the mechanism of air bubble formation for the affected factors, and (4) proposing the methods to improve the coating process.

According to factors selection, the statistical analysis showed that the factors affecting on air bubble formation were polymer viscosity and Jig Stamping moving up speed. The polymer viscosity and jig moving up speed were analyzed by two-way ANOVA with 4 levels and 2 replication. The continuous improvement applied by investigating the air bubble formation mechanism was that (1) performing the suitable factors obtained, (2) developing the coating equipment speed, and (3) modifying the Jig Stamping shape.

The study found that (1) the most suitable factors to control for the minimum air bubble were polymer viscosity of 61.16 centistoke (cSt) and Jig Stamping moving up speed of 5 mm/sec, (2) the air bubble formation on the surface capacitor was reduced from 29.2% to 1.03% (the sample size of 10,080 frames of work), and (3) the high leakage current defect was also decreased from 7.42% to 1.70%.

Department :Industrial Engineering.... Student's Signature :
 Field of Study : ...Industrial Engineering.... Principal Advisor's Signature :
 Academic Year :2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงซึ่งท่านได้ชี้แนะแนวทางการวิเคราะห์ปัญหาและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี หากไม่มีท่านคอยช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ แล้ววิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สำเร็จลงได้ และขอกราบขอบพระคุณ ประธานและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้บริหารของโรงงานตัวอย่างที่อนุญาตให้ผู้วิจัยได้ศึกษาดำเนินการวิจัยภายในโรงงาน ตลอดจนเพื่อนๆ และพนักงานแผนกต่างๆ ที่ได้ช่วยเหลือและความร่วมมือในการทดลองเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจที่จะนำไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหา เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารเคลือบผิว.....	4
2.2 การออกแบบการทดลอง.....	11
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of Variance: ANOVA).....	21
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 ผลกระทบและสภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา.....	30
3.1 ผลกระทบต่ออะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	30
3.2 กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	31
3.3 สภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา.....	35
3.4 การศึกษากระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์.....	41
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
4.1 การคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ.....	47

4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ.....	49
4.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ.....	52
4.4 แนวทางการปรับปรุง.....	52
บทที่ 5 ผลการดำเนินการวิจัย.....	53
5.1 ผลการคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ.....	53
5.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ.....	63
5.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ.....	72
5.4 แนวทางการปรับปรุง.....	77
5.5 การติดตามผลหลังการปรับปรุง.....	83
บทที่ 6 วิจัยกรณีผลการทดลอง.....	88
6.1 การคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ.....	88
6.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ.....	88
6.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ.....	89
6.4 การแนวทางการปรับปรุง.....	90
6.5 การเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต.....	90
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	92
7.1.1 การคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ.....	92
7.1.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ.....	92
7.1.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ.....	93
7.1.4 แนวทางการปรับปรุง.....	93
7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย.....	94
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	96

ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก. แสดงภาพตัดขวางภายในชิ้นงานเสี้ยค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล.....	99
ภาคผนวก ข แสดงลักษณะผิวชิ้นงานเมื่อปรับความหนืดสารพอลิเมอร์.....	101
ภาคผนวก ค แสดงผลการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ.....	103
ภาคผนวก ง แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศแต่ละเฟรมงาน.....	106
ภาคผนวก จ แสดงลักษณะเครื่องจักรเคลือบสารพอลิเมอร์.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	ถ้วยวัดความหนืดของพอร์ด.....	7
2.2	แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	24
3.1	แสดงปริมาณงานเสียตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2550 ถึง มีนาคม 2551.....	36
3.2	แสดงปริมาณของเสียโดยรวม 6 เดือน.....	36
5.1	แสดงระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองสำหรับการคัดเลือกปัจจัย.....	54
5.2	แสดงผลการทดลองการคัดเลือกปัจจัย.....	55
5.3	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนลง Jig Stamping.....	56
5.4	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยเวลาเคลือบสารพอลิเมอร์.	57
5.5	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping.....	58
5.6	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์...	59
5.7	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยอุณหภูมิอบผิวเฟรมงาน...	60
5.8	ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเคลื่อน ย้ายเฟรมงาน.....	61
5.9	สรุปผลการทดสอบปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบแบบ Two Proportions.....	62
5.10	แสดงระดับปัจจัยของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ.....	63
5.11	แสดงผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ.....	64
5.12	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละการเกิดฟองอากาศ.....	68
5.13	แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศแต่ละระดับความหนืดสารพอลิเมอร์.....	73
5.14	แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศแต่ละระดับความเร็วของ Jig Stamping.....	75
5.15	แสดงแบบจำลองสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping.....	80
5.16	แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ.....	83
5.17	แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ.....	85
5.18	แสดงปริมาณเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศในแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุง.....	86
6.10	แสดงการเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต.....	91

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	1
2.1	แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ.....	11
2.2	การออกแบบเชิงแพททอเรียล 2 ปัจจัย.....	17
2.3	การออกแบบเชิงแพททอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกริยา).....	17
2.4	การออกแบบเชิงแพททอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกริยา).....	18
2.5	การออกแบบเชิงแพททอเรียล (มีอันตรกริยา).....	18
3.1	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	30
3.2	โครงสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	30
3.3	โครงสร้างภายในชั้นอะลูมิเนียม.....	31
3.4	แสดงขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	33
3.5	แผนภาพแสดงการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์.....	34
3.6	แผนภาพพาเรโตแสดงปริมาณของเสีย(เดือนตุลาคม 2550 ถึง มีนาคม 2551)..	37
3.7	แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าวัดไหลของชิ้นงาน.....	38
3.8	แสดงลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน.....	39
3.9	กราฟแสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศ(วันที่ 1 เมษายน ถึง 30 เมษายน 2551).	40
3.10	แสดงเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์อัตโนมัติ.....	41
3.11	แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์.....	42
3.12	ชุดอุปกรณ์สำหรับเคลือบผิวเฟรมงาน.....	43
3.13	การเคลื่อนที่ลงของ Jig Stamping เพื่อทำการเคลือบผิว.....	43
3.14	การเคลือบสารพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน.....	44
3.15	การเคลื่อนที่ขึ้นของ Jig Stamping หลังจากทำการเคลือบผิว.....	44
3.16	แสดงการลำเลียงเฟรมงานเข้าตู้อบ.....	45
3.17	เฟรมงานออกจากเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์.....	45
5.1	กราฟแสดงลำดับความสัมพันธ์ของข้อมูลตัวแปรตอบสนอง.....	65
5.2	กราฟแสดงความเป็นปกติของข้อมูลตัวแปรตอบสนอง.....	66
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าพีต.....	67

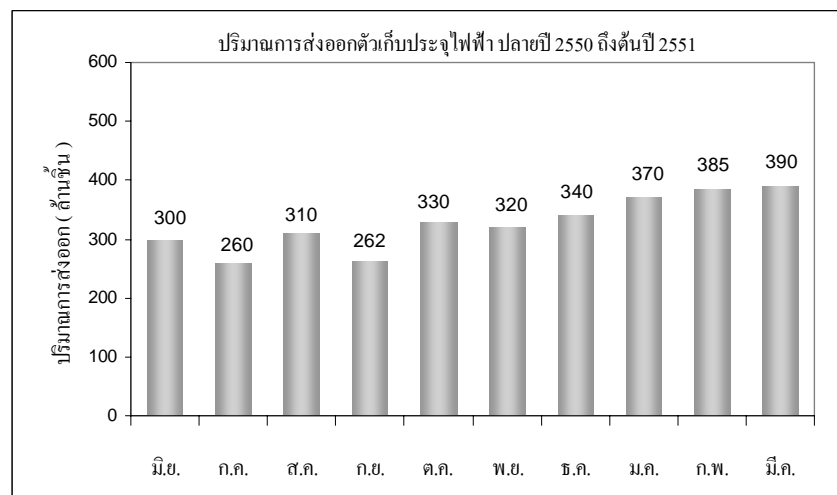
ภาพที่		หน้า
5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ.....	69
5.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของJig Stampingกับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ.....	70
5.6	แสดงอันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping กับความหนืดสารพอลิเมอร์กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ.....	71
5.7	แสดงลักษณะความโค้งงอของสารพอลิเมอร์.....	74
5.8	แสดงลักษณะช่องอากาศระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวสารพอลิเมอร์.....	74
5.9	แสดงลักษณะการเกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน.....	76
5.10	ชุดอุปกรณ์การเคลือบสารพอลิเมอร์.....	78
5.11	แสดงความโค้งงอของผิวสารพอลิเมอร์ของ Jig Stamping แบบเดิม.....	79
5.12	แสดง Jig Stamping แบบเดิม.....	79
5.13	แสดงความโค้งงอของผิวสารพอลิเมอร์ของ Jig Stamping แบบใหม่.....	81
5.14	แสดง Jig Stamping แบบใหม่.....	81
5.15	แสดง Drawing ของ Jig Stamping แบบเดิม.....	82
5.16	แสดง Drawing ของ Jig Stamping แบบใหม่.....	82
5.17	แสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศของแต่ละล็อตผลิตภัณฑ์.....	86
5.18	แสดงร้อยละการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันตลาดของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการเจริญเติบโต และเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีของผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อให้ทันต่อสถานการณ์เปลี่ยนแปลงดังกล่าว สำหรับอุตสาหกรรมผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าหรือคาปาซิเตอร์ก็เช่นกัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการเติบโตของตลาดอย่างรวดเร็ว จากปริมาณการส่งออกของผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีฐานการผลิตในประเทศไทยพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงดังกราฟรูปที่ 1 แสดงปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าของโรงงานกรณีศึกษา ด้วยเหตุนี้เองทำให้บริษัทต่างชาติเริ่มขยายการลงทุนอุตสาหกรรมประเภทนี้ในประเทศไทยมากขึ้น



รูปที่ 1 กราฟแสดงปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาทำการผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า 2 ชนิดคือ ชนิดแทนทาลัมคาปาซิเตอร์ และชนิดอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ ซึ่งตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์เพิ่งเริ่มการผลิตปลายปี 2549 ซึ่งปัจจุบันพบว่าปริมาณผลผลิตที่ได้ไม่สูงมากนัก เนื่องจากเกิดของเสียในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดแทนทาลัมคาปาซิเตอร์ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ มาทำการศึกษาเพื่อลด

ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น จากการสำรวจข้อมูลกระบวนการผลิตพบว่าของเสียที่พบมากที่สุดคือ ชิ้นงานมีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูง และไม่สามารถนำกลับมาซ่อมแซมใหม่ได้ ทำให้สูญเสียมูลค่าที่เกิดขึ้นจากของเสียประเภทนี้สูงถึงหลายล้านบาทต่อเดือน ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงภายในชิ้นงานคือ การเกิดฟองอากาศขึ้นบนผิวชิ้นงานหลังจากทำการเคลือบผิวด้วยสารพอลิเมอร์ ซึ่งปัญหาดังกล่าวทางโรงงานได้พยายามค้นหาสาเหตุเพื่อแก้ปัญหาหลายวิธี แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาได้ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน โดยการนำเครื่องมือทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา รวมถึงการประยุกต์ใช้เพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวอะลูมิเนียมในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.2.2 เพื่อลดปริมาณฟองอากาศบนผิวอะลูมิเนียมในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.2.3 เพื่อลดปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยจะครอบคลุมดังนี้

- 1.3.1 การวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาเฉพาะของเสียที่เกิดขึ้นจากฟองอากาศบนผิวอะลูมิเนียมในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.3.2 ทำการศึกษาขั้นตอนและวิธีการเคลือบผิวของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.3.3 ทำการศึกษาและคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการเชิงสถิติและการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง
- 1.3.4 ทำการศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ
- 1.3.5 ทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ดังนี้
 - 1.3.5.1 การประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม
 - 1.3.5.2 การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร
 - 1.3.5.3 การเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping

1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆ ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยคำนวณ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 10 ขั้นตอนหลักดังนี้

- 1.4.1 สํารวจทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษากระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์และสภาพปัญหาการเกิดฟองอากาศ
- 1.4.3 ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวอะลูมิเนียม
- 1.4.4 ทำการคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศด้วยการเชิงสถิติ
- 1.4.5 ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศโดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง
- 1.4.6 ทำการวิเคราะห์กลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ
- 1.4.7 ทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.4.8 ทำการเปรียบเทียบและติดตามผลหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต
- 1.4.9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
- 1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.5.2 สามารถลดปริมาณการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์
- 1.5.3 สามารถลดปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์
- 1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงกระบวนการผลิตอื่นๆที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวคือสารที่ใช้เคลือบพื้นผิววัสดุให้มีความคงทนถาวร และป้องกันพื้นผิววัสดุจากสภาพแวดล้อมภายใต้สภาวะการใช้งาน สารเคลือบผิวมีอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อมนุษย์มากมาย เช่น นักอุตสาหกรรมใช้สารเคลือบผิวป้องกันพื้นผิววัสดุโครงสร้างให้มีความคงทนถาวรขึ้น การเคลือบกระดาษให้เกิดความเงา และการเคลือบวัสดุต่างๆ เพื่อความสวยงาม เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวสามารถจำแนกตามชนิดของวัสดุได้หลากหลายชนิด แต่สามารถแบ่งได้กว้าง ๆ เป็น 3 ประเภท คือ สี (Paint) วาร์นิช (Varnish) และแล็กเกอร์ (Lacquer)

2.1.1.1 สี (Paint) หมายถึง สารที่มีส่วนประกอบหลักเป็นสารพอลิเมอร์ มีคุณสมบัติในการยึดติดบนพื้นผิวชนิดต่างๆ วัสดุที่ใช้ในการผลิตสีมีทั้งชนิดที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ หน้าที่ของสีคือใช้ทาหรือเคลือบผิวใด ๆ เพื่อความสวยงาม หรือเพื่อกันการกัดกร่อนเมื่อแห้งจะเกิดฟิล์มติดบนพื้นผิวนั้น ส่วนผสมหลักของสีประกอบด้วย 4 ชนิด คือ สารยึดเกาะ (Binder) ตัวทำละลาย (Solvent) ผงสี (Pigment) และสารเติมแต่ง (Additive)

(ก) สารยึดเกาะ (Binder หรือ Film former) เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญมาก ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าด้วยกันให้เกิดฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดได้แก่ น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oil) เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

(ข) ตัวทำละลาย (Solvent) คือของเหลวที่ระเหยได้ ทำหน้าที่ละลายสารยึดเกาะที่เป็นของแข็งที่มีความหนืดสูงให้เป็นเนื้อเดียวกันกับผงสีและสารเติมแต่งต่าง ๆ ลดความหนืดของสีเพื่อความสะดวกในการผลิตและง่ายต่อการใช้งาน ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ การเลือกใช้ตัวทำละลายสำหรับพอลิเมอร์หรือเรซินให้ถูกต้องมีความสำคัญอย่างยิ่งและความสามารถในการละลายของตัวทำละลายต่อพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน ถ้าเลือกใช้ตัวทำละลายที่ไม่ดีฟิล์มที่เคลือบผิวหน้าวัสดุย่อมไม่ดีและหลุดออกได้ง่าย

(ค) ผงสี (Pigment) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญ เป็นสารที่ให้สีและทำให้สีมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวหรือเรียกว่ามีกำลังซ่อนแสง (Hiding power) ผงสีอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ สามารถละลายในสารยึดเกาะหรือตัวทำละลายได้

(ง) สารเติมแต่ง (Additive) เป็นสารผสมพิเศษเติมลงไปเพียงเล็กน้อย สำหรับปรับปรุงคุณภาพของสีให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ทำให้สีแห้งเร็วขึ้น ทำให้สีไม่ขึ้นรา เป็นต้น

2.1.1.2 วาร์นิช (Varnish) คือสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว

2.1.1.3 แล็กเกอร์ (Lacquer) คือสารเคลือบผิวที่มีลักษณะเป็นสารละลายซึ่งได้จากการนำสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ความสามารถในการเคลือบผิวขึ้นกับอัตราการระเหยของตัวทำละลาย

2.1.2 การเกิดฟิล์ม (Film Formation)

การเปลี่ยนสภาพจากสารเคลือบผิวไปเป็นฟิล์มที่ยึดติดกับผิววัสดุ และทำให้พื้นผิวมีความทนทานเพิ่มขึ้น เรียกว่า กระบวนการเกิดฟิล์ม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

2.1.2.1 แอปพลิเคชัน (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้าหรือทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่มก็ได้

2.1.2.2 ฟิกเซชัน (Fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่น ไม่หลุดออกจากผิวหน้า และไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ ตัวอย่างเช่น กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวที่มีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ การเกิดฟิล์มในขั้นตอนฟิกเซชันจะเกิดโดยการระเหยของตัวทำละลาย หรือสารเคลือบผิวเป็นแบบลาเท็กซ์ (Latex System) ขั้นตอนฟิกเซชันจะเกิดโดยอาศัยการระเหยของน้ำ เป็นต้น

2.1.2.3 การบ่ม (Curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้แสง ความร้อนหรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้านจะเกิดการบ่มโดยการทำปฏิกิริยากันออกซิเจนในอากาศ เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทานเพิ่มขึ้นหรือการนำเคลือบ (Enamel) ที่ทำจากโพลีเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบ ก็เป็นการบ่ม

อีกวิธีหนึ่งกระบวนการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิด ไม่จำเป็นจะต้องมี 3 ขั้นตอนเสมอไป ตัวอย่างเช่น แล็กเกอร์ มีขั้นตอนฟิสิกส์ และการบ่มรวมกัน โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายระหว่างการแอฟฟลิเคชัน เป็นต้น

2.1.3 การแห้งของสารเคลือบผิว

การแห้งตัวของสารเคลือบจะถูกควบคุมโดยลักษณะคุณสมบัติ และปริมาณที่ใช้เคลือบลงบนผิวหน้านั้น โดยทั่วไปสารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่าง ๆ กันได้ 2 แบบ คือ

2.1.3.1 แห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ (Physical Drying) การแห้งด้วยวิธีการนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (Secondary Force) อย่างอ่อนๆ ดังนั้นฟิล์มที่เกิดยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน ตัวอย่างสารเคลือบผิวที่แห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ ได้แก่ แล็กเกอร์ สีที่ทำจากยางคลอริเนเตด (Chlorinated Rubber) เป็นต้น

2.1.3.2 แห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (Chemical Drying) ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีการนี้ยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary Bond) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะแข็งแรงและทนทานต่อตัวทำละลาย การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมีนี้อาจเกิดโดย

(ก) แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารเคลือบผิวประเภทนี้จะดูดออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ขนาดอนุภาคของสารเคลือบผิวใหญ่ขึ้น จนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้งแข็งตามต้องการ เช่น สีน้ำมันทาบ้านที่ผลิตจากอัลคิเดเรซิน (Alkyd Resin) เป็นต้น การแห้งโดยวิธีการนี้ อาจเร่งให้แห้งเร็วขึ้นได้โดยการใส่สารเร่งแห้ง (Drier)

(ข) แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี สารเคลือบผิวประเภทนี้ ส่วนใหญ่บรรจุในภาชนะแยกกัน ก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ดังนั้นเมื่อผสมแล้วจึงต้องทำให้หมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เรียกว่าสารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น (Cold Curing Coatings) ตัวอย่างเช่น ยูเรียเรซิน (Urea Resin) โพลียูรีเทนเรซิน (Polyurethane Resin) เป็นต้น แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยาต้องใช้ความร้อนสูง เรียกว่าสารเคลือบผิวชนิดอบ (Stoving or Baking Coatings)

2.1.4 ความหนืดของสารเคลือบผิว

ความหนืด (Viscosity) หมายถึง ความต้านทานต่อการไหลของของเหลว การวัดความหนืดสามารถทำได้หลายวิธี เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความหนืด เรียกว่า มาตรฐานความหนืด หรือวิสโคมิเตอร์ (Viscometer) ในการวัดความหนืดไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตามอุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้ คือ 25°C

มาตรฐานความหนืด หรือ เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด มีหลายชนิด ดังนี้คือ

2.1.4.1 บับเบิลวิสโคมิเตอร์ (Bubble Viscometers) มาตรฐานความหนืดชนิดนี้นิยมใช้วัดความหนืดของน้ำมัน และสารยึดเกาะ เครื่องจะประกอบด้วยหลอดมาตรฐาน ที่ฝาหลอดถูกผนึก (Sealed) จำนวน 41 หลอด บรรจุของเหลวที่เรียงลำดับ ความหนืดต่ำที่สุด ถึงของเหลว ที่มีความหนืดสูงที่สุด แสดงค่าเป็น ความหนืดคิเนมาติก

วิธีการวัด ความหนืดจะเปรียบเทียบ อัตราความเร็วของฟองอากาศ ระหว่างสารในหลอดทดสอบ และของเหลวในหลอดมาตรฐาน การบรรจุสาร ในหลอดทดสอบ จึงต้องระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ เพื่อให้สารในหลอดทดสอบ มีขนาดฟองอากาศใกล้เคียงกับ ของเหลวในหลอดมาตรฐานมากที่สุด นอกจากนี้จะต้องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด อีกด้วย

2.1.4.2 ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ด (Ford Viscosity Cups) เป็นวิธีการทดสอบที่สถานประกอบการอุตสาหกรรม นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสะดวก และรวดเร็ว ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ดทำด้วย วัสดุที่ทนการกัดกร่อน และตัวทำละลาย เช่น ทองเหลือง หรือ อลูมิเนียม ที่กั้นถ้วยมีทางออกเหมือนกรวย ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ดที่ใช้ในงาน ทดสอบทางเซรามิก มี 3 ขนาด คือถ้วยหมายเลข 2 หมายเลข 3 และหมายเลข 4 ถ้วยแต่ละขนาดมีเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางออกต่างกัน และเหมาะสำหรับการหา ความหนืดของสารได้ในช่วงต่างๆกัน

ตารางที่ 2.1 ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ด

หมายเลขของถ้วย	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออก (นิ้ว)	ช่วงความหนืด (เซนติสโตก)
2	0.10	25 - 120
3	0.13	37 - 231
4	0.15	70 - 370

ก่อนทำการทดสอบ ให้เลือกถ้วยที่เหมาะสม โดยใช้ถ้วยหมายเลข 3 และหมายเลข 4 สำหรับทดสอบสาร ที่มีเวลาการไหลออกจากถ้วยอยู่ระหว่าง 20 - 100 วินาที ส่วนถ้วยหมายเลข 2 สำหรับเวลาการไหลออกจากถ้วย 40 - 100 วินาที หากไม่เคยทดสอบมาก่อนควร ทดสอบการใช้งาน ว่าสารที่ต้องการทดสอบ ใช้เวลาในการไหลเท่าใด อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ เพื่อเลือกใช้ขนาดของถ้วยให้เหมาะสม หลังจากนั้นปรับระดับ การวางของเครื่องมือให้ได้ระดับ เพื่อช่วยให้สารที่บรรจุในถ้วยจนเต็มนั้นไม่มีรอยโค้ง หรือล้นออกจากถ้วย ด้านใด ด้านหนึ่ง ทดสอบหา เวลาในการไหลของสาร ออกจากถ้วย โดยเอานิ้วปิด ท่อทางออกด้านล่างของถ้วย เติมสารลงไปจนล้น แล้วใช้กระจก หรือพายปาดส่วนที่ล้นออก เปิดปลายท่อที่เอานิ้วปิดไว้ จับเวลาจนกระทั่ง สารไหลออกจนหมด (t) นำมาคำนวณหาความหนืดคิเนมาติก (หน่วยเป็นเซนติสโตก) จากเวลาการไหล (วินาที) ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ถ้วยหมายเลข 2} = 2.388t - 0.007t^2 - 57.008$$

$$\text{ถ้วยหมายเลข 3} = 2.314t - 15.200$$

$$\text{ถ้วยหมายเลข 4} = 3.846t - 17.300$$

เมื่อ t หมายถึง เวลาการไหลของสารมีหน่วยเป็นวินาที

2.1.5 ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิว

ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิว หรือฟิล์มของสารเคลือบผิว ไม่ว่าจะเป็นสี วาร์นิช หรือ แล็กเกอร์อาจเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการดังนี้ คือ

2.1.5.1 การเตรียมผิววัสดุที่ต้องการเคลือบยังไม่ดีพอ เช่น พื้นผิวไม่สะอาดหรือไม่แห้งสนิท

2.1.5.2 ใช้เทคนิคหรือกรรมวิธีเคลือบไม่ถูกต้อง

2.1.5.3 ทำการเคลือบภายใต้ภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิต่ำเกินไป หรือ ความชื้นสูงเกินไป

2.1.5.4 เคลือบพื้นผิวบางหรือหนาเกินไป

2.1.5.5 เลือกใช้สารเคลือบผิวที่ไม่เหมาะสมกับพื้นผิววัสดุ

2.1.5.6 เลือกใช้วัตถุดิบที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของสารเคลือบผิว หรือวัตถุดิบที่ใช้มีคุณภาพต่ำ

ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิว มีหลายลักษณะดังนี้

- (1) การเป็นฝ้า (Bloom) การเป็นฝ้า หมายถึง ลักษณะมัวคล้ายหมอกที่เกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มของสีเคลือบที่แห้งแล้วและทำให้ความเงาของฟิล์มลดลง
- (2) ความดำน (Blushing) ความดำน หมายถึง ลักษณะที่บแสงของฟิล์มของแล็กเกอร์ที่กำลังแห้ง ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของส่วนที่เป็นของแข็งของผลิตภัณฑ์ ความดำมี 2 แบบ คือ ความดำเนื่องจากความชื้น (Moisture Blushing) และความดำเนื่องจากกัม (Gum Blushing)
- (3) การพอง (Blistering) การพอง หมายถึง การโป่งที่ผิวของฟิล์มของสีที่แห้งแล้วเนื่องจากมีความชื้นหรือแก๊สใต้ฟิล์มของสีส่วนใหญ่การพองจะเกิดกับสีสำหรับการตกแต่งที่มาจากอัลคิเดเรซิน อีพอกซีเอสเตอ์ ยูรีเทนออยล์ และน้ำมันวานิช เนื่องจากสารยึดเหนี่ยว โดยเฉพาะ อัลคิเดเรซิน ประกอบด้วยส่วนที่สามารถสกัดได้ด้วยน้ำ (Water-Extractable Fraction) เป็นปริมาณสูงกว่าสารยึดประเภทไวนิลหรืออีพอกซีเรซินชนิด 2 ส่วน
- (4) รอยแปรง (Brush Marks) รอยแปรง หมายถึง ริวในฟิล์มของสีแห้งที่ยังคงอยู่หลังการทาสีด้วยแปรง มีสาเหตุมาจากสีมีสมบัติการไหลไม่ดี ซึ่งมักจะเป็นสีที่มีปริมาณผงสีสูงเกินไป
- (5) การเป็นฝุ่น (Chalking) การเป็นฝุ่น หมายถึง การที่ผิวหน้าของฟิล์มของสีเปลี่ยนลักษณะเป็นฝุ่นเนื่องจากการเสื่อมคุณภาพ หรือการสลายตัวของสารยึดที่เข้าทำปฏิกิริยากับอากาศ การเป็นฝุ่นของฟิล์มของสียังเนื่องมาจากการเลือกใช้ผงสีและปริมาณของผงสีที่ไม่เหมาะสม
- (6) รอยแตก (Cracking) รอยแตก หมายถึง ข้อบกพร่องของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่เกิดการแยกตัวเนื่องจากสารเคลือบผิวสามารถขยายตัว และหดตัวได้ในอัตราที่เท่ากันระหว่างกรรมวิธีการแห้งตัวของฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลือบสารเคลือบผิวหนาเกินไป
- (7) การเป็นรูเข็ม และการเป็นหลุม (Pinholing and Cratering) การเป็นรูเข็ม หมายถึง การเกิดเป็นรูเข็มเล็ก ๆ บนผิวของฟิล์มของสารเคลือบผิว มีสาเหตุมาจากระหว่างการเคลือบเกิดฟองอากาศเล็ก ๆ ซึ่งจะแตกระหว่างกรรมวิธีแห้งตัวเป็นฟิล์ม ทำให้ผิวของฟิล์มเกิดเป็นรูเข็มเล็ก ๆ ลักษณะเหมือนรูเข็ม
- (8) ลักษณะผิวส้ม (Orange Peel) ข้อบกพร่องชนิดนี้ แสดงลักษณะของฟิล์มที่พ่นแล้วไม่เรียบคล้ายผิวส้ม มีสาเหตุหลายประการ คือ
 - (ก) ความหนืดของสารเคลือบผิวสูงเกินไป
 - (ข) ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม คือ ใช้ตัวทำละลายที่มีจุด

เดือดดำในปริมาณสูงเกินไป ดังนั้นแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูง

(ค) ความดันของลมที่พ่นไม่ถูกต้อง

(ง) ขณะพ่นหัวพ่นอยู่ห่างจากผิววัสดุมากเกินไป เกิดการสูญเสียตัวทำ

ละลายก่อนที่สารเคลือบผิวจะไปเกาะที่ผิววัสดุ ทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่เรียบ

(9) การเป็นคลื่น (Rivelling) การเป็นคลื่น หมายถึง การที่ผิวของฟิล์มของสาร

เคลือบผิวมีลักษณะไม่เรียบคล้ายระลอกคลื่นมีสาเหตุจากการเคลือบหนาเกินไป หรือจากการใช้สารเร่งแห้งจากโคบอลต์มากเกินไป ทำให้การแห้งตัวเป็นฟิล์มจากชั้นบนสุดไปยังชั้นล่างสุดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

(10) การย้อย (Sagging or Curtaining) การย้อย หมายถึง การที่ฟิล์มของสาร

เคลือบผิวไหลลงมาระหว่างทำการเคลือบแล้วเกิดการแข็งตัวเป็นผลให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ มีช่องว่างหนา โดยปกติการย้อยจะมีลักษณะเหมือนม่านเกิดขึ้นเฉพาะพื้นผิวในแนวตั้ง

(11) การไหลเป็นทาง (Runs) การไหลเป็นทาง หมายถึง การที่สีไหลลงมาเป็นทาง

แคบ ๆ อาจมีสาเหตุจากการที่มีสารเคลือบผิวมากเกินไปบนพื้นผิวบกร่อง เช่น มีรอยแตก รู เป็นต้น สารเคลือบผิวส่วนนี้ยังคงไหลต่อไปในขณะที่สารเคลือบผิวโดยรอบแข็งตัวแล้ว

(12) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) ขอบบกร่องชนิดนี้มีลักษณะเป็นรอยย่นในฟิล์ม

เนื่องจากผิวฟิล์มแห้งไม่สม่ำเสมอ มีสาเหตุ 2 ประการ คือ สารเคลือบผิวมีสารเร่งแห้งมากเกินไป หรือการเคลือบ เคลือบหนาเกินไป

2.2 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หมายถึง การออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งๆ ที่มีความสำคัญ (หรือความสนใจ) ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) โดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

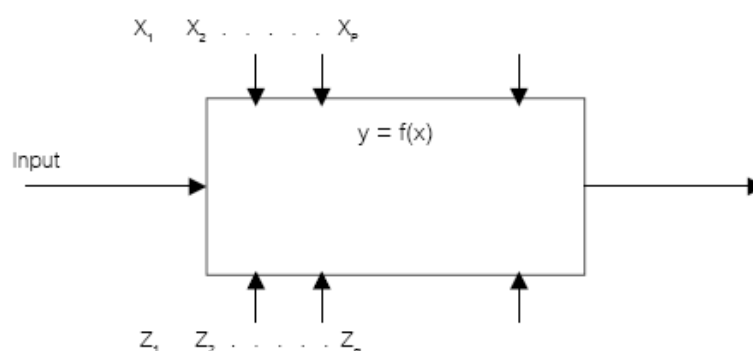
- (1) เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือ ความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต
- (2) เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

2.2.1 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

2.2.1.1 ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.2.1.2 หน่วยทดลอง (Experiment Unit) เป็นมาตรฐานหรือหน่วยซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ซึ่งโดยคำจำกัดความแล้วหมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของทดลองซึ่งได้รับจากทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัดอาจผันแปรได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง แม้ว่าจะใช้สิ่งทดลองเหมือนกันก็ตามในการทำการทดลองแต่ละครั้ง จึงต้องให้ความจำกัดความของหน่วยการทดลองให้ชัดเจน

2.2.1.3 ปัจจัย (Factor) ได้แก่ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกันอาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ



รูปที่ 2.1 แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

	Y	คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์
	X, Z	คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย
		$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$
ซึ่ง	μ	คือ ค่าเฉลี่ยมีค่าคงที่
	τ_i	คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย
	ϵ_{ij}	คือ ความคลาดเคลื่อน

ปัจจัย (Factor) ในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น

(1) ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

(2) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

2.2.1.4 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลองเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวแปร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเองในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามได้มากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือ (Reliability) การแจ่มแจ้งของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัตินอกจากนี้การเลือกตัวแปรตาม จะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้รับจากวิธีทดสอบหนึ่งๆควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมุติฐานในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจใช้การแปลงข้อมูลค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติ

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับประเด็นต่างๆดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y (Response) มากที่สุด
2. หาวิธีการตั้งค่า x (input) ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของ y (Response) เพื่อให้ผลตอบของ y มีค่าตามต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่า x (input) ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของ y (Response) เพื่อให้ผลตอบของ y มีค่าน้อยที่สุด
4. หาวิธีการตั้งค่า x (input) ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของ y (Response) เพื่อให้ผลตอบที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) Z_1, Z_2, \dots, Z_q มีค่าน้อยที่สุด

2.2.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

2.2.2.1 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวเท่า ๆ กันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับทุกระดับที่ศึกษาให้เท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 3 วิธี คือ

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

2.2.2.2 การทำซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2.2.2.3 การบล็อก (Blocking) คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.2.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

2.2.3.1 การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้ จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับปัจจัยเป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิตเพื่อระบุว่า มีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้น ควรจะมีช่วงในการทดลองเป็นอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายคือ ระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด(Fixed levels), แบบสุ่ม (Random levels) หรือแบบผสม (Mixed levels) ซึ่งสามารถกล่าวโดยสังเขปได้ ดังต่อไปนี้

- (1) แบบกำหนด (Fixed levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุม หรือ กำหนดค่าได้แน่นอน
- (2) แบบสุ่ม (Random levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม

หรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

- (3) แบบผสม (Mixed levels) หมายถึง การผสมผสาน ระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

2.2.3.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย เป็นการให้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลอง สุดท้ายคือระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

1. แบบกำหนด หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
2. แบบสุ่ม หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
3. แบบผสม หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

2.2.3.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.2.3.4 การเลือกแบบการทดลอง การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็น ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

2.2.3.5 การดำเนินการทดลอง เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทำการทดลองคือความถูกต้องของ

กระบวนการเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด เพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนี้มักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

2.2.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์ (Software) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้ได้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดี การใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากขึ้น

2.2.3.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง เมื่อสรุปผลแล้ว ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.2.4 การเลือกแบบการทดลอง

2.2.4.1 แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomize Design)

ใช้กับการทดลองปัจจัยเดียว (Single factor experiment) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีขนาดไม่โตนักและไม่มีปัจจัยรบกวนการทดลองจะทำโดยยึดหลักการทำแบบสุ่ม(Randomization) และ การทำซ้ำ (Replication) ขั้นตอนในการทำการทดลอง

- (1) กำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response variable) และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) ที่สนใจ
- (2) ทำการทดลองโดยสุ่มแบบสมบูรณ์ (Complete random) ในการวัดค่า
- (3) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

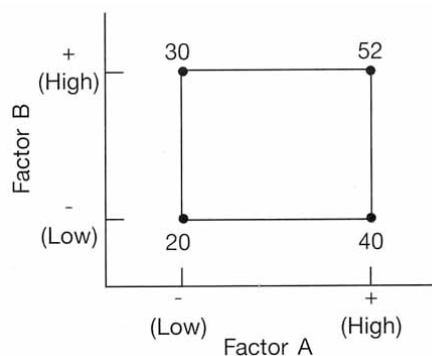
2.2.4.2 แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomize Block Design)

ใช้กับการทดลองปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวน (Noise factor) หลักการของแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม คือต้องทำการสุ่ม (Randomization) ทุกครั้งต้องทำซ้ำทุกการทดลองต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน การบล็อก (Blocking) อาจจะทำมากกว่า 1 บล็อกก็ได้ซึ่งขึ้นกับจำนวนของปัจจัยรบกวนขั้นตอนในการทำการทดลอง

- (1) ออกแบบและวางแผนการทดลอง
- (2) เก็บข้อมูล
- (3) วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA table) ซึ่งจะต้องมีผลของบล็อก (Block effect) ด้วย

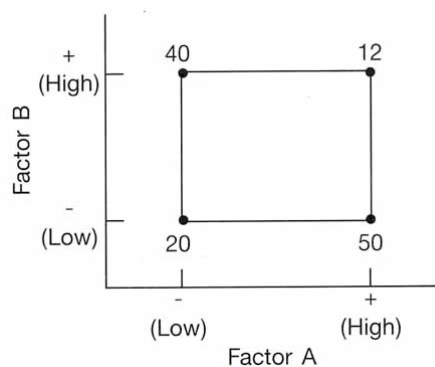
2.2.4.3 แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับและปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เพลทิกิต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลองและเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกันผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการทดลองตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ “ต่ำ” และ “สูง”



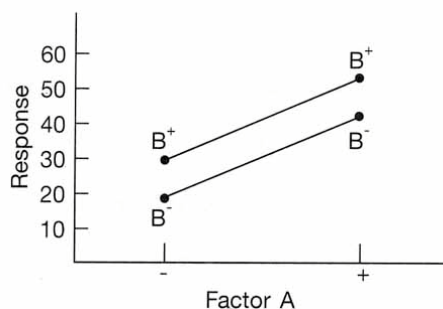
รูปที่ 2.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

สำหรับกรณีที่มีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย เราอาจจะพบว่า ความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายความว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น ๆ นั้นเอง และเราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องตัวอย่างเช่น พิจารณาการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของปัจจัย 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3

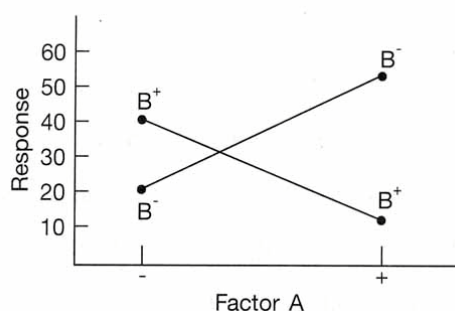


รูปที่ 2.3 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)

กราฟ รูปที่ 2.4 เป็นกราฟระหว่างผลตอบของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ B- และ B+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 2.5 เป็นการพล็อตข้อมูลของรูปที่ 2.17 ซึ่งจะได้เห็นว่าเส้น B- และ B+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่า ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน



รูปที่ 2.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา)



รูปที่ 2.5 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา)

สรุปก็คือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นารออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้เราสามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

(1) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2k (2k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกต่อไป

(2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3k (3k Factorial Design)

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

(3) การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณี เมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเมนต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

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

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย

ϵ_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่มหรือความ

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกตั้งในทางปฏิบัติ สมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบ

สมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

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

โดยที่ y_{ij} คือค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \mu + \tau_i \\ &= y_{..} + (y_i - y_{..}) \\ &= y_i. \end{aligned}$$

จากสมการ ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้น การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

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

- (1) การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 -Goodness of Fit Test)
- (2) การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ-สเมอร်นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test)
- (3) การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2.2.5.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

2.2.5.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมานี้มี

ลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ของข้อมูล แต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลายๆค่าซึ่งเรียกว่าระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลอง (Treatment) กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทำ การทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่มรูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวม (in General) ของปัจจัยจาก

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SST = SSTr + SSE$$

โดยที่ SST คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SSTr คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

SSE คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS/DF$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

และ DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบค่าความแปรผันคือ

$$F = MSTr/MSE$$

เมื่อ MSTr คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

MSE คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การเปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า $F_{\alpha, V1, V2}$

ถ้า $F \geq F_{\alpha, V1, V2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, V1, V2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ α คือระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

$V1$ คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

$V2$ คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.3.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างรูปแบบเชิงเส้นขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

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

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

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

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

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนซ้ำ)

และ $ijkl Y$ คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

β_j คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

γ_k คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

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

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

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

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

ε_{ijkl} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณและใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	SS _A /DF	MS _A /MS _E
B	SS _B	b-1	SS _B /DF	MS _B /MS _E
C	SS _C	c-1	SS _C /DF	MS _C /MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	SS _{AB} /DF	MS _{AB} /MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	SS _{AC} /DF	MS _{AC} /MS _E
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	SS _{BC} /DF	MS _{BC} /MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS _{ABC} /DF	MS _{ABC} /MS _E
Error	SS _E	abc(n-1)	SS _E /DF	
Total	SS _T	abcn-1		

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเคลือบผิว

1. Lopez Lbanez (2005) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบ ZrO₂ บนผิวอลูมิเนียมด้วยวิธีการพ่น ซึ่งทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ คุณสมบัติของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย และแรงดันลมที่ใช้สำหรับการพ่น ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบด้วย X-ray photoelectron และ UV-VIS-NIR Spectroscopy ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้วยวิธีการ ANOVA พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิสารละลายมีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบผิวมากที่สุด ส่วนปัจจัยรองคือ แรงดันลมที่ใช้พ่น ผลการทดลองพบว่าระดับปัจจัยที่มีผลทำให้ความหนาของชั้นเคลือบผิวมากที่สุดคือ อุณหภูมิสารละลาย 200 °C ซึ่งเป็นระดับต่ำสุด และแรงดันลม 1.5 bar ซึ่งเป็นระดับสูงสุด

2. Roman Jaworski (2007) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ TiO₂ บนแผ่นผิวอะลูมิเนียม ซึ่งทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการพ่น Spray ด้วยสารละลายที่เตรียมจากผงแร่ Rutile ในการทดลองจะใช้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ full factorial เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล โดยทำการตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นเคลือบด้วยวิธีการทดสอบ scratch test และทำการตรวจสอบด้วย optical microscope และ scanning electron microscope (SEM) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามี 3 ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบคือ ระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้พ่น ระยะห่างของ Spray ที่ใช้การพ่น และอัตราความเร็วที่ใช้ในการพ่น ซึ่งระยะห่างของ Spray ที่ใช้การพ่นมีผลกระทบมากที่สุด

3. ภาณุ ชุตเจือจัน (2550) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวคิดของซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการพ่นสีรองพื้น ในกระบวนการผลิตกล่องนาฬิกา อาศัยหลักการของซิกซ์ ซิกมา มาเป็นแนวทาง ขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก กล่าวคือ การนิยามปัญหา (Define Phase) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure Phase) การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase) การควบคุมกระบวนการผลิตเป็นขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการซิกซ์ ซิกมา หลังจากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการพบว่า ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยจากผลการ

ทดลองคือ ความหนืดของสารเคมีในการพ่นสีรองพื้น เท่ากับ 30 วินาที จำนวนรอบของการพ่นในการพ่นสีรองพื้นเท่ากับ 6 รอบ และรูปแบบการพ่นในการพ่นสีรองพื้นแบบเดียว ซึ่งได้จำนวนของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการพ่นสีรองพื้นในกระบวนการผลิตกล่องนาฬิการาคาแพงเท่ากับ 3,240 DPPM ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิม 83 เปอร์เซนต์ ทำให้กระบวนการผลิตมีมาตรฐานเท่ากับ 2.99 σ

4. เปมิกา สุวรรณมณี (2548) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเฟอริไนเจอร์ไม่โดยการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดชิ้นงานเสียในลักษณะสีเป็นผิวส้มในกระบวนการพ่นสีเฟอริไนเจอร์ไม่มากที่สุดคือ ปัจจัยความหนืดของสี และ ปัจจัยที่มีผลรองลงมา คือ แรงดันลม และปัจจัยร่วมระหว่างความหนืดของสีกับแรงดันลม ส่วนปัจจัยอื่น ๆ มีผลที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยสำหรับกระบวนการพ่นสีเฟอริไนเจอร์ไม่ เพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ในการทำงานจริง

5. เพียงพิศ วงศ์มณีนิล (2544) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการผสม ขนาดอนุภาคยางใช้แล้ว และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางใช้แล้วต่อยางมะตอย ที่มีต่อสมบัติด้านความหนืด ความอ่อนตัวไม่เปราะ ความทนแรงกระแทก ความติดแน่น และความทนละอองน้ำเกลือ ของสารเคลือบผิว ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการผสม ขนาดอนุภาคยางใช้แล้ว และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางใช้แล้วต่อยางมะตอย มีอิทธิพลร่วมกันต่อสมบัติของสารเคลือบผิวที่ผลิตจากยางใช้แล้วโดยรวมพบว่า เมื่ออุณหภูมิการผสมสูงขึ้น สารเคลือบผิวมีความหนืด ความติดแน่น และความทนละอองน้ำเกลือเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อขนาดอนุภาคยางใช้แล้วและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางใช้แล้วต่อยางมะตอยเพิ่มขึ้น สารเคลือบผิวมีความหนืดมากขึ้น แต่ความติดแน่น และความทนละอองน้ำเกลือต่ำลง ส่วนความอ่อนตัวไม่เปราะและความทนแรงกระแทกของสารเคลือบผิว ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการผสม ขนาดอนุภาคยางใช้แล้ว และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางใช้แล้วต่อยางมะตอย ในช่วงที่ใช้ในการทดลองนี้

งานวิจัยเกี่ยวกับการลดของเสียในกระบวนการผลิต

1. **ชาญชัย บวรโชคชัย (2545)** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากค่า Pitch Static Attitude (PSA) ของแขนจับหัวอ่านโดยนำวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกม่า มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแปรปรวนของ PSA และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยดังกล่าวในการผลิตที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนลดลงได้ ซึ่งก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิตมีปริมาณของเสียเท่ากับ 4,456 DPPM จากข้อมูลหลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่า มีปริมาณของเสียเกิดขึ้นประมาณ 997 DPPM ซึ่งคิดเป็น 77.63 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียที่ลดลงได้ก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิต และสามารถที่จะลดความสูญเสียได้เป็นจำนวนเงิน 2,750,580 บาท โดยประมาณการจากการขายที่พยากรณ์ไว้ของบริษัทจากเดือนกรกฎาคม 2545 ถึงเดือนมีนาคม 2546

2. **อุษณีย์ ถิ่นเกาะแก้ว (2545)** ได้นำเสนองานวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระป๋อง ซึ่งใช้หลักการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติเป็นสำคัญ อันประกอบด้วยหลักการดำเนินงาน 4 ขั้นตอน ได้แก่ การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure) การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis) การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve) การควบคุมตัวแปรต่างๆ (Control) ทั้งนี้จากการดำเนินงานวิจัยซึ่งได้แก่ การสำรวจปัญหา และหาระดับความรุนแรงด้วยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) และการแก้ไขควบคุมปัญหาด้วยการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ จากผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตลดลงผลจากงานวิจัยนี้นำมาศึกษาถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย การวิเคราะห์ปัญหา การลำดับขั้นตอนการแก้ไขปัญหา

งานวิจัยเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

1. Liao Tsai. Ming (2007) เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ด้วยการสร้างชั้นกึ่งฉนวนหรือ Al_2O_3 และการสร้างชั้นพอลิเมอร์จากสาร polypyrrole โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะใช้ 2-naphthalenesulfonic acid (2-NSNa) และ dodecyl benzyisulfonic acid (DBSA) เป็นตัว Co-dopant สำหรับพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล , ค่าเก็บประจุไฟฟ้า และ ค่าความต้านไฟฟ้า สำหรับลักษณะพื้นผิวและส่วนประกอบทางเคมีวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ Scanning electron microscopy (SEM) และ Eelectrostatic discharge (EDS) จากการวิจัยพบว่าการเตรียมโดยใช้ 2-NSNa และ DBSA เป็นตัว Co-dopant สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้ 0.029 ± 0.005 ไมโครแอมป์ และ ค่าเก็บประจุไฟฟ้า 688.8 ± 8.28 นาโนฟารัด และ ค่าความต้านทาน 18.63 ± 3.48 โอห์ม

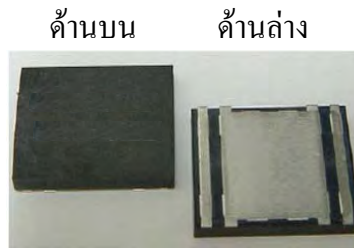
2. จันทรา ยอดมนต์ (2545) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหลของแทนทาลัมคาปาซิเตอร์ ในขั้นตอนการสร้างชั้นกึ่งฉนวน (A-anodization and Anodization) และขั้นตอนการซ่อมแซมชั้นกึ่งฉนวนและคัดแยกของเสีย (Aging) แล้วนำมาสร้างแบบจำลองของการถดถอย (Regression Model) ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) แบบ 2^k จากผลการวิจัยสามารถทราบความสัมพันธ์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหล (Leakage current) ในขั้นตอนการสร้างและซ่อมแซมชั้นกึ่งฉนวนได้ จากความสัมพันธ์ของปัจจัยหลัก (MainEffect) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถหาสภาวะปฏิบัติการที่ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าต่ำสุดภายใต้ขอบเขตระยะเวลาในการผลิตที่น้อยที่สุด

บทที่ 3

ผลิตภัณฑ์และสภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

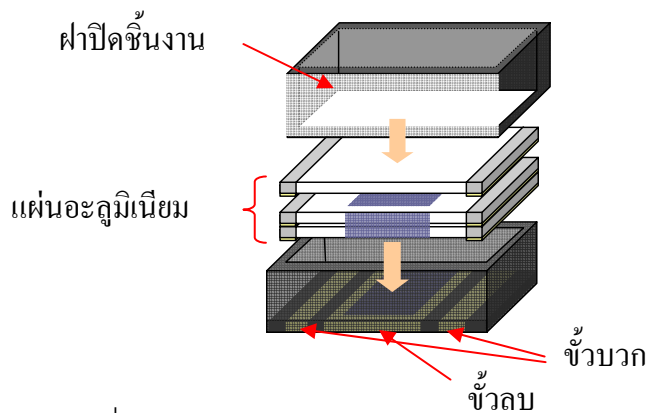
3.1 ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

ผลิตภัณฑ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ จัดได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมสูง เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นของอะลูมิเนียมซึ่งสามารถเก็บความจุไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวเก็บประจุชนิดชนิดอื่นๆ สำหรับผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 12.0 มิลลิเมตรยาว 16.7 มิลลิเมตร และสูง 2.5 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งส่วนห่อหุ้มด้านบนผลิตจากพลาสติกและส่วนประกอบด้านล่างทำจากลีดเฟรมมีไว้สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า



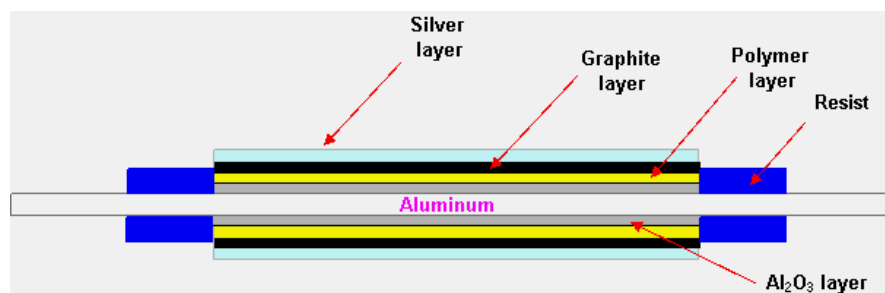
รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

โครงสร้างภายในชิ้นงานจะประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมวางซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น แสดงดังรูปที่ 3.2 เพื่อเพิ่มค่าเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งทำการเชื่อมต่อกับการนำไฟฟ้าและด้านบนชิ้นงานจะประกอบด้วยฝาปิดชิ้นงานส่วนด้านล่างจะทำการประกอบด้วยลีดเฟรม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

จากลักษณะโครงสร้างภายในชั้นอะลูมิเนียมพบว่าประกอบไปด้วยชั้นต่างๆ ที่สร้างขึ้นด้วยปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าและกระบวนการเคลือบชั้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยแกนกลางคือ แผ่นอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างภายในชั้นอะลูมิเนียม

3.2 กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ส่วนใหญ่ทำการผลิตโดยเครื่องจักรอัตโนมัติ ตั้งแต่การตัดแผ่นอะลูมิเนียม การสร้างชั้นกึ่งฉนวนไฟฟ้า การสร้างชั้นขั้วลบ การประกอบชิ้นงาน และการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงขั้นตอนการผลิตโดยรวมของอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์ และแผนภาพแสดงการผลิตตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

1. การขึ้นรูปแผ่นอะลูมิเนียม

ทำการตัดแยกแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งมีความหนาประมาณ 0.160 มิลลิเมตรเพื่อทำการแบ่งออกเป็นเฟรมงานด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติในแต่ละเฟรมงานจะประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 12 ชิ้น และในแต่ละล็อตประกอบด้วยเฟรมงานจำนวน 336 เฟรม

2. การสร้างชั้นกึ่งฉนวนไฟฟ้า

เป็นกระบวนการสร้างชั้นกึ่งฉนวนไฟฟ้าหรือชั้น Al_2O_3 ด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซึ่งจะเป็นชั้นที่ทำหน้าที่กั้นระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

3. การสร้างชั้นพอลิเมอร์

เป็นกระบวนการสร้างชั้นพอลิเมอร์ชั้นแรกด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ สารละลายพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

4. การเคลือบสารพอลิเมอร์

เป็นกระบวนการผลิตที่จะทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้สำหรับการเคลือบผิวด้วยสาร พอลิเมอร์จะทำการเคลือบผิวด้วยเครื่องเคลือบสารอัตโนมัติจากนั้นทำการอบผิวเฟรม งานด้วยตู้อบภายในเครื่อง

5. การเคลือบสารกราไฟต์

เป็นกระบวนการเคลือบสารกราไฟต์ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นขั้วลบด้วยแผ่นสกรีนบอร์ดซึ่ง ทำงานด้วยเครื่องเคลือบสารอัตโนมัติจากนั้นทำการอบผิวด้วยความร้อน

6. การเคลือบสารซิลเวอร์

เป็นกระบวนการเคลือบสารซิลเวอร์ด้วยแผ่นสกรีนบอร์ดด้วยเครื่องเคลือบสาร อัตโนมัติและอบอบผิวด้วยความร้อน

7. การติดแผ่น Spacer

เป็นกระบวนการเชื่อมแผ่น Spacer บริเวณขั้วบวกของเฟรมงานด้วยเครื่องUltrasonic welding เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสะดวกต่อการประกอบรวมชิ้นงาน

8. การตัดแยกชิ้นงาน

เป็นกระบวนการตัดแยกชิ้นงานออกจากเฟรมงานด้วยเครื่องตัดชิ้นงานอัตโนมัติเพื่อนำไปประกอบชิ้นงานในกระบวนการถัดไป

9. การประกบชิ้นงาน

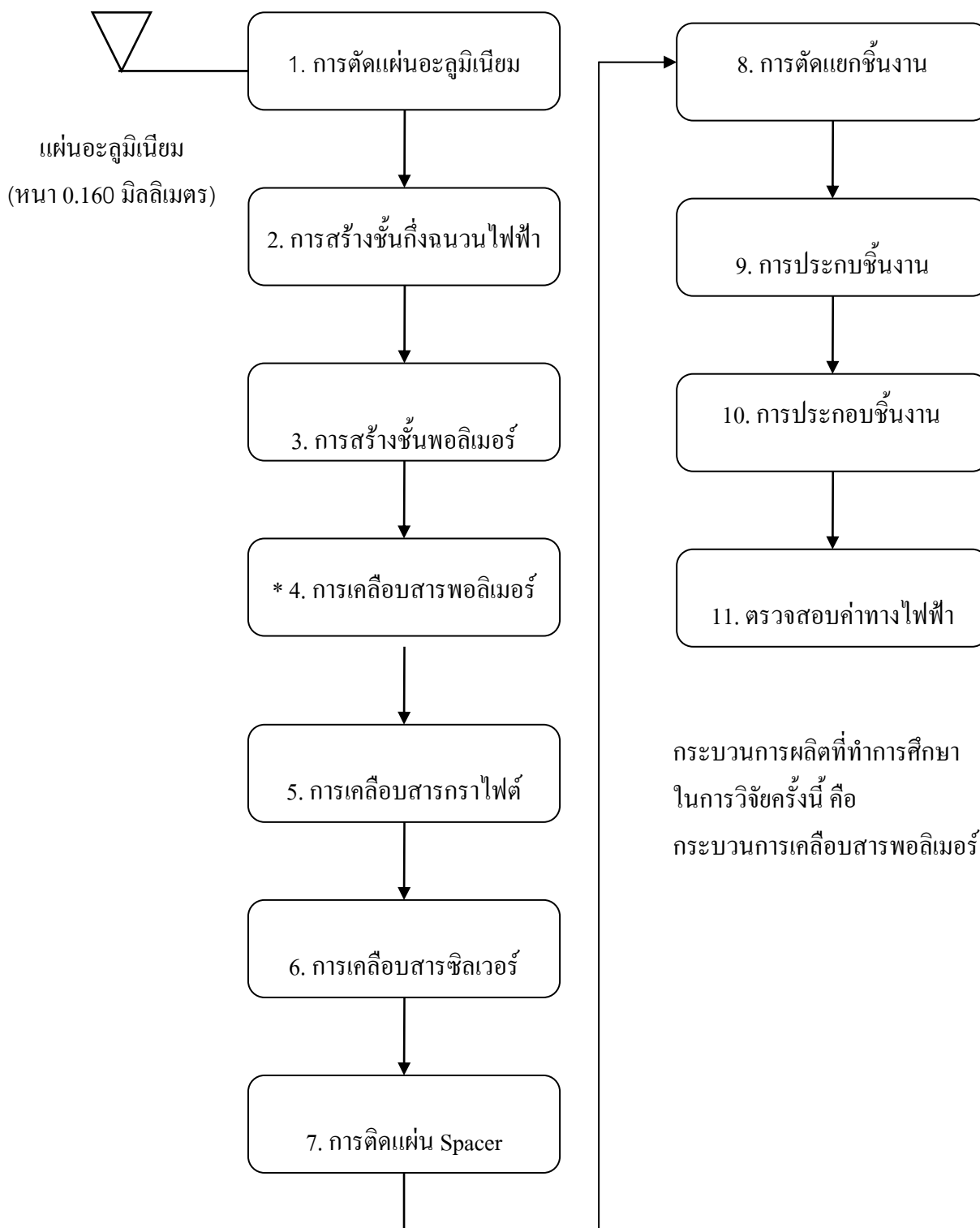
เป็นกระบวนการประกบชิ้นงานเพื่อเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าซึ่งทำการเชื่อมด้วยกาวนำ ไฟฟ้าและอบแห้งด้วยความร้อน

10. ประกอบชิ้นงาน

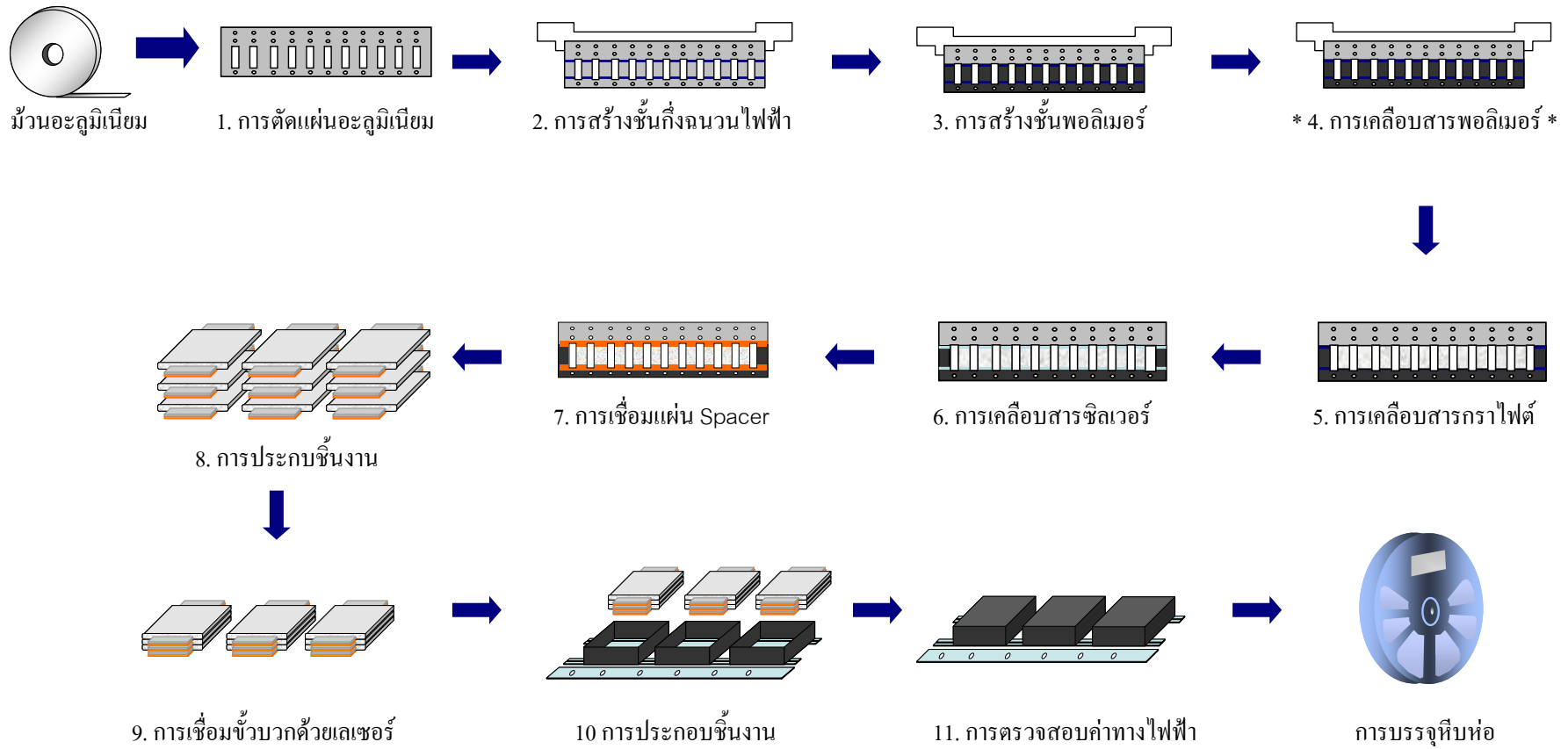
เป็นกระบวนการประกอบฝาปิดชิ้นงานด้วยเครื่องประกอบชิ้นงานอัตโนมัติ ซึ่งทำการ เชื่อมชิ้นงานกับ Case ด้วยกาวนำไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการอบด้วยความร้อน

11. การตรวจสอบค่าทางไฟฟ้า และการบรรจุหีบห่อ

เป็นการตรวจสอบเพื่อคัดชิ้นงานที่มีค่าทางไฟฟ้าเกินมาตรฐานที่กำหนด เช่นค่า กระแสไฟฟ้าวัดไหล ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าและบรรจุผลิตภัณฑ์ด้วย เครื่องจักรอัตโนมัติ



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์



* กระบวนการผลิตที่ทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ คือ กระบวนการที่ 4 กระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ *

รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์

จากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคาปาซิเตอร์โดยรวมข้างต้น กระบวนการผลิตที่
 ทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้คือ กระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ (กระบวนการที่4) ซึ่งจะ
 ทำการศึกษายัจัยที่มีผลกระทบต่ออากาศในกระบวนการเคลือบผิวด้วยสารพอลิ
 เมอร์ ส่วนกระบวนการคัดของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจะทำการคัดเลือกในกระบวนการที่
 11 คือ กระบวนการตรวจสอบค่าทางไฟฟ้า

3.3 สภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานการศึกษา

จากการสำรวจสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน โดยเริ่มจากการ
 สำรวจประเภทของเสียในกระบวนการผลิตโดยรวม เพื่อพิจารณาของเสียหลักของกระบวนการ
 ผลิตมาวิเคราะห์หาสาเหตุ และทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต
 ประกอบด้วยขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.3.1 การสำรวจของเสียของกระบวนการผลิตโดยรวม

จากการสำรวจข้อมูลการผลิตเพื่อตรวจสอบปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภทของ
 กระบวนการผลิตโดยรวม ในช่วงเวลา 6 เดือน เริ่มตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2550 จนถึง เดือนมีนาคม
 2551 พบว่าของเสียในกระบวนการผลิตมีทั้งหมด 5 ประเภทหลัก ได้แก่ กระแสไฟฟ้ารั่วไหล ความ
 ต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า ชื้นงานแตก และอื่นๆ ซึ่งจากการพิจารณาประเภทของเสียโดยรวม
 ทั้ง 6 เดือนจะพบว่าประเภทของเสียหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ กระแสไฟฟ้ารั่วไหล เมื่อ
 คิดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากของเสียประเภทนี้ในช่วงเวลา 6 เดือน พบว่ามีมูลค่าความเสียหาย
 ถึง 15,174,680 บาท แสดงข้อมูลของเสียแต่ละประเภททั้ง 6 เดือน ดังตารางที่ 3.1 และแสดง
 ปริมาณของเสียโดยรวมทั้ง 6 เดือน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณงานเสียตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2550 จนถึง มีนาคม 2551

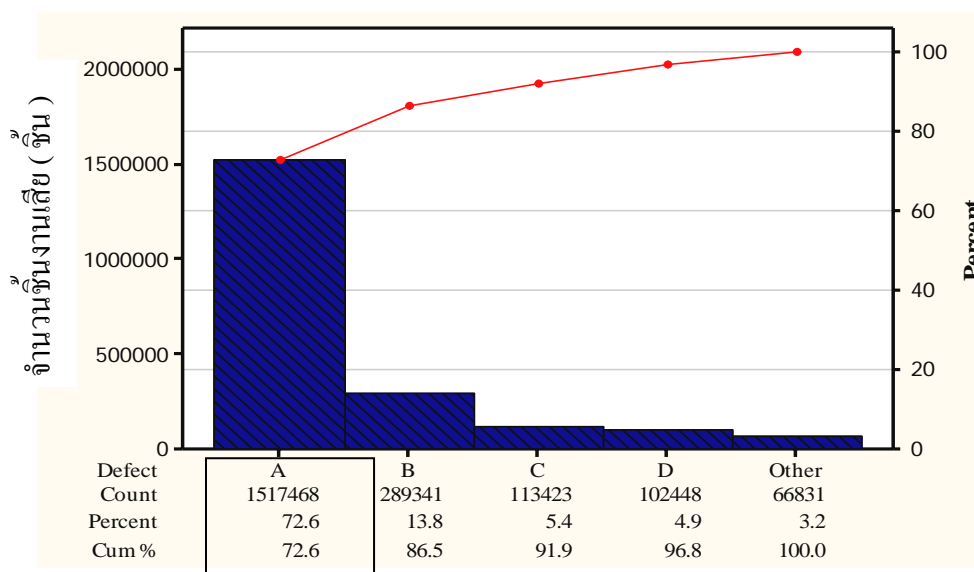
เดือน		ตุลาคม		พฤศจิกายน		ธันวาคม		มกราคม		กุมภาพันธ์		มีนาคม	
		จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ	จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ	จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ	จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ	จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ	จำนวนชิ้นงาน	ร้อยละ
ปริมาณป้อนการผลิต (ชิ้น)		3,240,000	-	2,973,000	-	2,488,000	-	3,775,000	-	4,342,000	-	3,540,000	-
ประเภทของเสีย	1. กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	244,283	7.54	199,868	6.72	173,164	6.96	282,219	7.48	350,303	8.07	267,631	7.45
	2. ความต้านทานไฟฟ้า	46,958	1.45	41,372	1.39	32,244	1.30	61,834	1.64	58,074	1.34	48,859	1.42
	3. ความจุไฟฟ้า	19,697	0.61	18,355	0.62	11,225	0.45	32,502	0.86	19,977	0.46	11,667	0.56
	4. ชิ้นงานแตก	13,989	0.43	21,851	0.73	14,092	0.57	11,891	0.31	17,654	0.41	22,971	0.50
	5. อื่นๆ	8,793	0.27	9,908	0.33	8,123	0.33	7,929	0.21	18,586	0.43	13,492	0.33
จำนวนของเสียรวม		333,720	10.30	291,354	9.80	238,848	9.60	396,375	10.50	464,594	10.70	364,620	10.30

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณของเสียโดยรวม 6 เดือน จากปริมาณงานเสียทั้งหมด 20,358,000 ชิ้น

ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสียรวม 6 เดือน (ชิ้น)	ร้อยละของเสีย	มูลค่าของเสีย (บาท)
1. กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	1,517,468	7.45	15,174,680
2. ความต้านทานไฟฟ้า	289,341	1.42	2,893,410
3. ความจุไฟฟ้า	113,423	0.56	1,134,230
4. ชิ้นงานแตก	102,448	0.50	1,024,480
5. อื่นๆ	66,831	0.33	668,310
จำนวนของเสียรวม	20,358,000	0.33	668,310

หมายเหตุ ต้นทุนของเสีย (10บาท/ชิ้น)

จากข้อมูลปริมาณของเสียแต่ละประเภทโดยรวมทั้ง 6 เดือน สามารถนำมาแสดงด้วยแผนภาพพาเรโต เพื่อพิจารณาของเสียหลักในกระบวนการผลิต แสดงดังรูปที่ 3.6



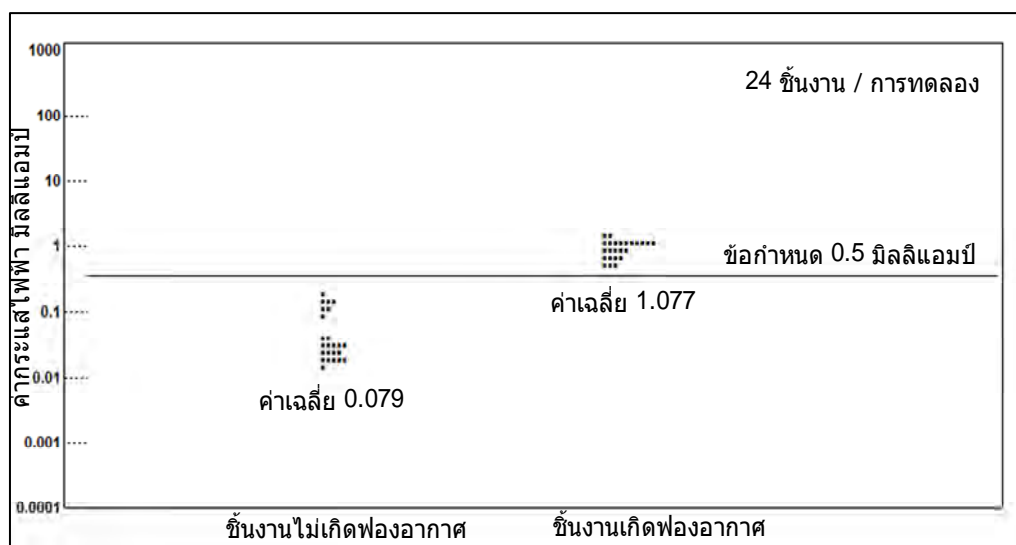
รูปที่ 3.6 แผนภาพพาเรโตแสดงปริมาณของเสีย(เดือนตุลาคม 2550 ถึง มีนาคม 2551)

โดยกำหนดให้

- A : กระแสไฟฟ้ารั่วไหล
- B : ความต้านทาน
- C : ความจุไฟฟ้า
- D : ชิ้นงานแตก

จากแผนภาพพาเรโตพบว่าประเภทของเสียหลักในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมคอปาสีเตอร์โดยรวมในช่วงเวลา 6 เดือนคือ ของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหล โดยมีปริมาณของเสียเกิดขึ้นเท่ากับ 1,517,468 ชิ้นจากปริมาณของเสียทั้งหมด 20,895,110 ชิ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 72.6 จากปริมาณของเสียทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้องทำการแก้ไข

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกปัญหาดังกล่าวมาดำเนินการวิเคราะห์เพื่อทำการแก้ไข จากข้อมูลการวิเคราะห์และการพิสูจน์สาเหตุการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของทางโรงงาน พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลคือ การเกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ จากกราฟรูปที่ 3.7 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของชิ้นงานที่ไม่เกิดฟองอากาศกับชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้ปริมาณชิ้นงาน 24 ชิ้นต่อการทดสอบ โดยที่ข้อกำหนดมาตรฐานของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลภายในชิ้นงานต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิแอมป์



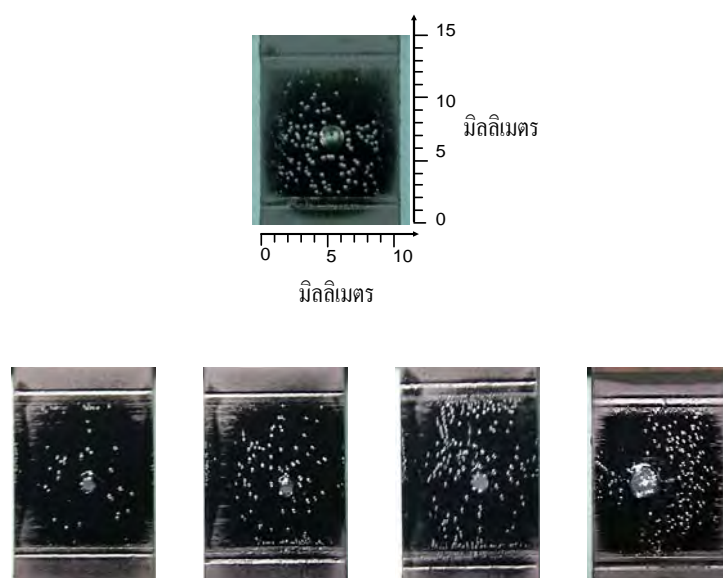
รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลของชิ้นงาน

จากการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลระหว่างชิ้นงานที่เกิดและไม่เกิดฟองอากาศ พบว่าชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศทั้งหมดจะมีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

สรุปได้ว่า การเกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์จะมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูง ดังนั้นในขั้นตอนถัดไปจะทำการศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบันของการเกิดฟองอากาศในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำการสำรวจโดยเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนและวิธีการทำงานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์

3.3.2 การสำรวจสภาพปัญหาการเกิดฟองอากาศ

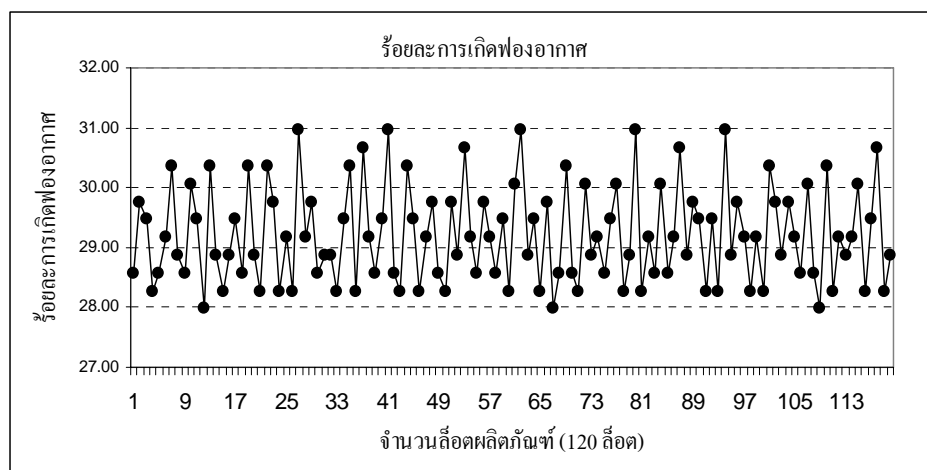
จากการสำรวจสภาพปัญหาการเกิดฟองอากาศในปัจจุบันของกระบวนการเคลือบผิวด้วยสารพอลิเมอร์ โดยทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดฟองอากาศในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ พบว่าลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน

ปัญหาดังกล่าวทางโรงงานได้พยายามแก้ไขมาโดยตลอดแต่ปัจจุบันยังไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

เมื่อทำการสำรวจปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 1 เดือนตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน จนถึง 30 เมษายน 2551 โดยการตรวจนับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศของแต่ละล็อตผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วยเฟรมงาน 336 เฟรม สามารถแสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศในแต่ละล็อตผลิตภัณฑ์ ดังกราฟรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศ(วันที่ 1 เมษายน ถึง 30 เมษายน 2551)

จากการสำรวจปริมาณการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานในช่วงเวลา 1 เดือน พบว่าร้อยละการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานเท่ากับ 28.90 จากผลิตภัณฑ์จำนวน 120 ล็อต (1 ล็อตมีจำนวน 336 เฟรมงาน) ซึ่งถือว่าอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง

ดังนั้นการดำเนินการวิจัยจะเริ่มจากการศึกษากระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์โดยละเอียด เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศเพื่อทำการปรับปรุง และลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.4 การศึกษากระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์

กระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์เป็นกระบวนการผลิตที่ทำการเคลือบผิวเฟรมงานด้วยสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องจักรแบบอัตโนมัติ ซึ่งทำการเคลือบผิวครั้งละ 1 เฟรมงาน หลังจากนั้นเฟรมงานจะถูกลำเลียงเข้าสู่ตู้อบภายในตัวเครื่องจักร ในกระบวนการผลิตจะทำการเคลือบผิวอย่างต่อเนื่องจำนวน 336 เฟรมงาน หรือ 1 ล็อตผลิตภัณฑ์ แสดงเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์อัตโนมัติ

สำหรับกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ สามารถแยกวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต และขั้นตอนการเคลือบสารพอลิเมอร์ของเครื่องจักร ดังนี้

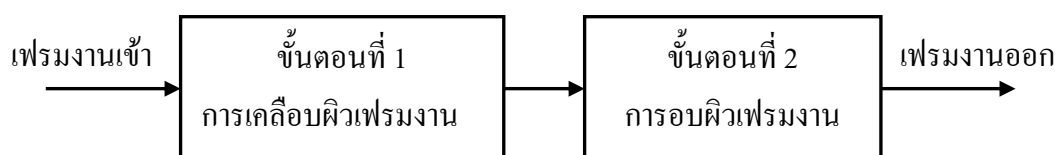
3.4.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ มีดังต่อไปนี้

1. สารละลายพอลิเมอร์
2. น้ำ Deionization Water
3. เฟรมงาน
4. ถ้วยวัดความหนืดของพอร์ด หมายเลข 3
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ถังใส่สารละลายพอลิเมอร์

3.4.2 ขั้นตอนการเคลือบสารพอลิเมอร์

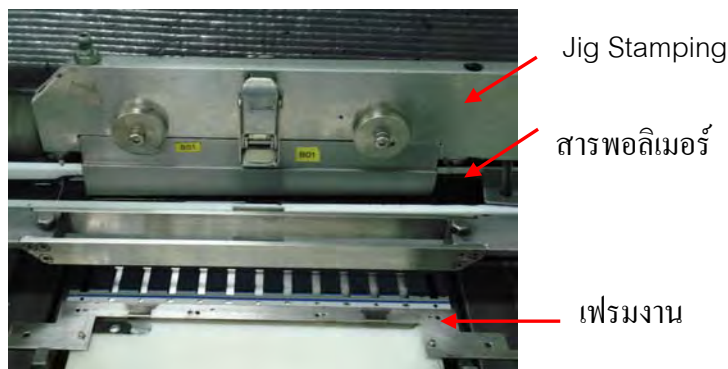
สำหรับขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการเคลือบผิวเฟรมงานซึ่งทำหน้าที่เคลือบผิวเฟรมงานด้วยสารพอลิเมอร์ และขั้นตอนการอบผิวเฟรมงาน ซึ่งจะทำการอบผิวเฟรมงานโดยสายพานลำเลียงเข้าสู่ตู้อบ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์

3.4.2.1 ขั้นตอนการเคลือบผิวเฟรมงาน

สำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวเฟรมงานเริ่มตั้งแต่การนำเฟรมงานเข้าเครื่องจักร ซึ่งเฟรมงานจะถูกจับไปวางบนแท่นเคลือบด้วยหัวจับอัตโนมัติ และทำการเคลือบสารพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงานด้วย Jig Stamping แสดงอุปกรณ์การเคลือบผิวดังรูปที่ 3.12

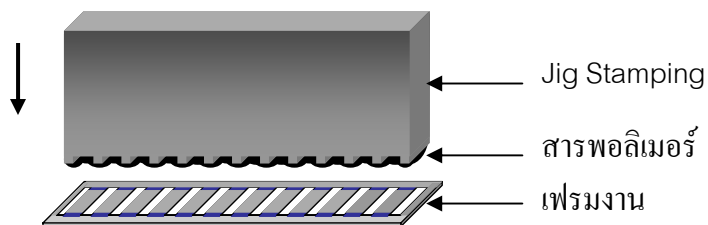


รูปที่ 3.12 ชุดอุปกรณ์สำหรับเคลือบผิวเฟรมงาน

ซึ่งในขั้นตอนการเคลือบผิวจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ลงของ Jig Stamping เพื่อทำการเคลือบผิว

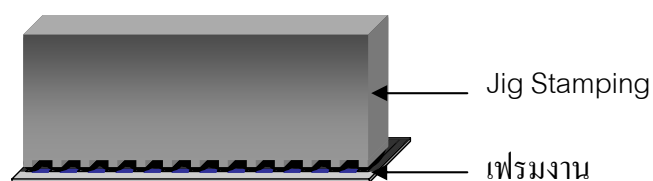
เมื่อเฟรมงานถูกนำมาวางบนแท่นเคลือบจากนั้น Jig Stamping จะเคลื่อนที่ลงในอ่างสารละลายพอลิเมอร์ในระดับหนึ่งเพื่อจุ่มสารละลายพอลิเมอร์ให้ติดบนผิวของ Jig Stamping จากนั้นจะเคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ตำแหน่งที่จะทำการเคลือบผิวและเคลื่อนที่ลงเพื่อเคลือบสารพอลิเมอร์บนผิวของเฟรมงาน แสดงการเคลื่อนที่ลงของ Jig Stamping เพื่อทำการเคลือบผิว ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเคลื่อนที่ลงของ Jig Stamping เพื่อทำการเคลือบผิว

2. การเคลื่อนที่ลงของพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน

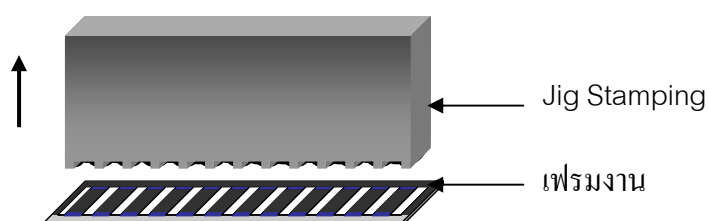
เมื่อ Jig Stamping เคลื่อนที่ลงถึงตำแหน่งที่ทำการเคลื่อนที่ลงของพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน ในขั้นตอนนี้ Jig Stamping จะหยุดการเคลื่อนที่ประมาณ 1 วินาที เพื่อให้สารละลายพอลิเมอร์เคลื่อนที่ลงเพื่อเคลือบผิวเฟรมงาน แสดงการเคลื่อนที่ลงของพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเคลื่อนที่ลงของพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน

3. การเคลื่อนที่ขึ้นของ Jig Stamping หลังจากทำการเคลือบผิว

หลังจาก Jig Stamping หยุดการเคลื่อนที่เพื่อทำการเคลือบผิวจากนั้น Jig Stamping จะเคลื่อนที่ขึ้นเพื่อกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น และพร้อมสำหรับการเคลือบผิวเฟรมถัดไป แสดงการเคลื่อนที่ขึ้นของ Jig Stamping หลังจากทำการเคลือบผิว ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเคลื่อนที่ขึ้นของ Jig Stamping หลังจากทำการเคลือบผิว

3.4.2.2 ขั้นตอนการอบผิวเฟรมงาน

เมื่อทำการเคลือบผิวเฟรมงานเสร็จ จากนั้นเฟรมงานจะถูกลำเลียงเข้าสู่ตู้อบภายในเครื่อง ด้วยสายพานลำเลียงเพื่อทำการอบผิวบนเฟรมงานให้แห้ง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อบจะควบคุมที่ 110 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วของสายพานเท่ากับ 12 มิลลิเมตรต่อวินาที แสดงการลำเลียงเฟรมงานเข้าอบ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการลำเลียงเฟรมงานเข้าตู้อบ

หลังจากผ่านการอบความร้อนเฟรมงานจะถูกส่งออกจากตัวเครื่อง แสดงเฟรมงานออกจากเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เฟรมงานออกจากเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์

3.4.3 การวัดความหนืดของสารพอลิเมอร์

ความหนืดของสารพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตปัจจุบันจะควบคุมอยู่ในช่วง 39 - 42 วินาที โดยทำการปรับความหนืดด้วยน้ำ Deionization Water ในการวิจัยครั้งนี้จะคำนวณหน่วยของความหนืดจากอัตราการไหล ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความหนืดต่อความหนาแน่น ความหนืดที่ได้จากการวัดโดยวิธีการแบบนี้เรียกว่า ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็นสโตก (Stoke) หรือตารางเซนติเมตรต่อวินาที (cm²/s)

สำหรับวิธีการวัดความหนืดจะใช้ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ตหมายเลข 3 เริ่มจากการจับเวลาตั้งแต่สารไหลออกจากท่อของถ้วยวัดความหนืดจนกระทั่งสารไหลออกจนหมด (t) จากนั้นนำมาคำนวณหาความหนืดคิเนมาติก (หน่วยเป็นเซนติสโตก) จากเวลาการไหล (วินาที) โดยใช้สูตร ถ้วยหมายเลข 3 = 2.314t - 15.200 เมื่อ t หมายถึง เวลาการไหลของสารมีหน่วยเป็นวินาที แสดงช่วงความหนืดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ในหน่วยเซนติสโตก ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงการเทียบหน่วยความหนืดสารละลายพอลิเมอร์

ความหนืดสารพอลิเมอร์ (วินาที)	ความหนืดสารพอลิเมอร์ (เซนติสโตก)
42	81.99
39	75.05
36	68.10
33	61.16

หลังจากทำการศึกษาขั้นตอนกระบวนการเคลือบผิวด้วยสารพอลิเมอร์โดยละเอียด จากนั้นขั้นตอนถัดไปจะทำการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน ซึ่งจะดำเนินการศึกษาต่อในขั้นตอนการค้นหาและคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ

ขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ดังนี้

4.1.1 การค้นหาปัจจัยด้วยการระดมสมอง (Brainstorming)

ในขั้นตอนนี้จะทำการค้นหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานด้วยวิธีการระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้ที่มีความชำนาญและเชี่ยวชาญในด้านเครื่องจักร รวมถึงพนักงานงานแผนกต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วย

1. แผนกวิศวกรเครื่องจักร
2. แผนกวิศวกรผลิตภัณฑ์
3. แผนกวิศวกรตรวจสอบคุณภาพ
4. แผนกควบคุมการผลิต

ซึ่งวิธีการค้นหาปัจจัยเริ่มจากการประชุมระดมสมองเพื่อค้นหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศ โดยจะทำการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องตามขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการเคลือบผิวเฟรมงาน และขั้นตอนการอบผิวเฟรมงาน เพื่อนำปัจจัยที่ได้ไปทำการทดสอบสมมุติฐานเพื่อยืนยันผลทางสถิติในขั้นตอนถัดไป

4.1.2 การคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบเชิงสถิติ

เมื่อทราบปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานจากขั้นตอนการระดมสมองแล้วขั้นตอนถัดไปคือ การนำปัจจัยไปทำการทดสอบสมมุติฐานทางสถิติเพื่อพิสูจน์ยืนยันผลจากการตั้งสมมุติฐาน สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ จำนวนฟองอากาศที่เกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงานในกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาเป็นข้อมูลแบบจำนวนนับ (Attribute Data) ดังนั้นวิธีการทดสอบทางสถิติที่เลือกใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือ

วิธีการทดสอบแบบ Two Proportions ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัย โดยมีลำดับขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. กำหนดระดับปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองออกเป็น 2 ระดับของแต่ละปัจจัยซึ่งเป็นระดับสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัยที่ทำการจัดปรับได้
2. เตรียมเฟรมงานสำหรับการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดในจำนวนเท่ากัน
3. ทำการทดลองในแต่ละระดับปัจจัยโดยควบคุมปัจจัยอื่นๆให้คงที่
4. ตรวจสอบจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศของแต่ละการทดลอง
5. คำนวณสัดส่วนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศของแต่ละการทดลอง โดยคำนวณจากสูตร ดังนี้

$$\text{สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ} = \frac{\text{จำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ}}{\text{จำนวนเฟรมงานที่ไม่เกิดฟองอากาศ}}$$

6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศและจำนวนเฟรมงานที่ไม่เกิดฟองอากาศของแต่ละการทดลองป้อนลงในโปรแกรม Minitab ในการทดสอบแบบ Two Proportions
7. วิเคราะห์ผลการคำนวณจากโปรแกรม Minitab โดยพิจารณาความแตกต่างของสัดส่วนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศของแต่ละการทดลองจากค่า P-Value ถ้าค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสัดส่วนการเกิดฟองอากาศมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ

หลังจากทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานจากขั้นตอนการทดสอบปัจจัยด้วยวิธีการเชิงสถิติแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการค้นหาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ และศึกษาแนวโน้มการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด โดยมี 2 ขั้นตอนหลักคือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติดังต่อไปนี้

4.2.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. เลือกระดับปัจจัยที่จะทำการทดลองโดยพิจารณาจากความสามารถในการจัดปรับเครื่องจักรหรือข้อกำหนดที่ใช้ในกระบวนการผลิต
2. เลือกตัวแปรตอบสนองที่จะทำการศึกษา ในการทดลองครั้งนี้ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ จำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศซึ่งคำนวณเป็นร้อยละการเกิดฟองอากาศ โดยใช้สูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเกิดฟองอากาศ} = \frac{\text{จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ}}{\text{จำนวนเฟรมงานไม่เกิดฟองอากาศ}} \times 100$$

3. ทำการเลือกแบบการทดลองในกรณีที่มีระดับปัจจัยตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไปการทดลองเชิงแฟกทอเรียลจะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ทุกระดับปัจจัยที่ทำการศึกษาก็จะถูกพิจารณาไปพร้อมๆกัน ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab
4. ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ โดยทำการควบคุมปัจจัยอื่นๆให้คงที่ตลอดการทดลอง
5. ตรวจสอบนับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศโดยคำนวณเป็นร้อยละการเกิดฟองอากาศของแต่ละการทดลอง
6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab จากนั้นจะนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เมื่อได้ผลจากการออกแบบการทดลองขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลองซึ่งข้อมูลต้องมีลักษณะตรงตามสมมุติฐานของหลักการออกแบบการทดลองซึ่งมีการตรวจสอบคุณสมบัติทั้ง 3 ประการดังนี้

(ก) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ โดยพิจารณาการกระจายของข้อมูลซึ่งข้อมูลต้องมีการกระจายตัวแบบสุ่มและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลำดับของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองอยู่ภายใต้ความเป็นอิสระ

(ข) การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลจะพิจารณาจากกราฟของ Normal Plot of Residuals ซึ่งข้อมูลจะต้องมีลักษณะการเรียงตัวเป็นเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

(ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลจะต้องมีลักษณะสุ่มไม่มีแนวโน้มหรือไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามสมมติฐานของหลักการออกแบบการทดลองทั้ง 3 ประการ จึงจะสามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปได้

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

หลังจากทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของแต่ละปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเพื่อพิจารณาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ถ้าค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. การวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของปัจจัย

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจะทำการศึกษาจากแนวโน้มการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยซึ่งสามารถแยกพิจารณาอิทธิพลจากปัจจัยหลักและอิทธิพลจากปัจจัยร่วมเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัย และการวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัย ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์คือ การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด

4.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ

จากการวิเคราะห์ผลทดลองเมื่อทราบถึงแนวโน้มและควมมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ ในขั้นตอนนี้ต่อไปคือ การศึกษากลไกที่ก่อให้เกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยซึ่งทำการศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์และสังเกตลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงปัจจัยสำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง

4.4 แนวทางการปรับปรุง

เมื่อสามารถสรุปผลการทดลองและทราบถึงกลไกของแต่ละปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศแล้วสำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง รวมถึงการปรับปรุงแต่ละปัจจัยที่ได้จากการศึกษาการเกิดฟองอากาศ ทั้งนี้เพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีเป้าหมายคือ ลดปริมาณการเกิดฟองอากาศให้มากที่สุด

บทที่ 5

ผลการดำเนินการวิจัย

5.1 ผลการคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ

สรุปผลการคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ จากขั้นตอนการค้นหาปัจจัย ด้วยการระดมสมอง และการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการเชิงสถิติ ดังนี้

5.1.1 การค้นหาปัจจัยด้วยการระดมสมอง (Brainstorming)

สามารถรวบรวมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศได้ทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังนี้

1. ความเร็วในการเคลื่อนลงของ Jig Stamping
2. เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน
3. ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping
4. ความหนืดของสารพอลิเมอร์
5. คุณสมบัติที่ใช้อบผิวเฟรมงาน
6. ความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ

สำหรับปัจจัยที่รวบรวมได้จากการระดมสมอง จะพิจารณาตามขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งปัจจัยที่ 1 ถึงปัจจัยที่ 4 จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเคลือบผิวเฟรมงาน ส่วนปัจจัยที่ 5 และปัจจัยที่ 6 จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการอบผิวเฟรมงาน แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรในบทที่ 3 รูปที่ 3.11

5.1.2 การคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการเชิงสถิติ

สรุปผลการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบแบบ Two Proportions แสดงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ ดังนี้

5.1.2.1 ผลการทดลอง

ในการทดลองได้กำหนดระดับปัจจัยสำหรับการทดลองดังตารางที่ 5.1 โดยมีตัวแปรตอบสนองคือ จำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ

ตาราง 5.1 แสดงระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองสำหรับการคัดเลือกปัจจัย

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย	จำนวนเฟรมงาน ที่เกิดฟองอากาศ
		ต่ำสุด	สูงสุด		
Y1	ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping	15	35	มิลลิเมตรต่อวินาที	
Y2	เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ บนเฟรมงาน	1	3	วินาที	
Y3	ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping	15	35	มิลลิเมตรต่อวินาที	
Y4	ความหนืดสารพอลิเมอร์	75.05	81.99	เซนติสโตก	
Y5	อุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงาน	90	110	องศาเซลเซียส	
Y6	ความเร็วสายพานในการเคลื่อน ย้ายเฟรมงานเข้าอบ	12	24	มิลลิเมตรต่อวินาที	

ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยจะทำการควบคุมระดับปัจจัยอื่นๆให้คงที่เท่ากับระดับปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนี้

1. ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping	35	มิลลิเมตรต่อวินาที
2. เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน	1	วินาที
3. ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping	35	มิลลิเมตรต่อวินาที
4. ความหนืดของสารพอลิเมอร์	81.99	เซนติสโตก
5. อุณหภูมิที่ใช้ออบผิวเฟรมงาน	100	องศาเซลเซียส
6. ความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ	12	มิลลิเมตรต่อวินาที

จากการดำเนินการทดลองดังตารางที่ 5.1 สามารถแสดงผลการทดลองการคัดเลือกปัจจัยดังตารางที่ 5.2

ตาราง 5.2 แสดงผลการทดลองการคัดเลือกปัจจัย

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับปัจจัย	จำนวนเฟรมงาน ป้อนการทดลอง	จำนวนเฟรมงาน เกิดฟองอากาศ	สัดส่วนการเกิด ฟองอากาศ
Y1	ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping	15	3,696	1,113	0.30
		35	3,696	1,072	0.29
Y2	เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ บนเฟรมงาน	1	3,696	1,106	0.29
		3	3,696	1,054	0.28
Y3	ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping	15	3,696	972	0.26
		35	3,696	1,127	0.30
Y4	ความหนืดของสารพอลิเมอร์	75.05	3,696	916	0.24
		81.99	3,696	1,153	0.31
Y5	อุณหภูมิที่ใช้ออบผิวเฟรมงาน	90	3,696	1,106	0.29
		110	3,696	1,135	0.30
Y6	ความเร็วสายพานในการ เคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ	12	3,696	1,125	0.30
		24	3,696	1,096	0.29

จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ

5.1.2.2 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบเชิงสถิติทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังนี้

1. ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping (Y1)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.3 ซึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ระดับคือ ระดับความเร็วในการเลื่อนลง Jig Stamping 35 มิลลิเมตรต่อวินาที และระดับความเร็วในการเลื่อนลง Jig Stamping 15 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าที่ระดับความเร็วในการเลื่อนลง Jig Stamping 35 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,072 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.29 และที่ระดับความเร็วในการเลื่อนลง Jig Stamping 15 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,113 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.30

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping

Test and CI for Two Proportions			
Y1	เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
35 มิลลิเมตรต่อวินาที	1072	3696	0.290043
15 มิลลิเมตรต่อวินาที	1113	3696	0.301136
Difference = p (1) - p (2)			
Estimate for difference: -0.0110931			
95% CI for difference: (-0.0318959, 0.00970976)			
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = -1.05 P-Value = 0.296			

จากตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัย พบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.296 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าสัดส่วนการเกิดฟองอากาศระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig

Stamping ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping ไม่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

2. เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน (Y2)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.4 ซึ่งประกอบด้วยทดลอง 2 ระดับคือ เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ 1 วินาที และเวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ 3 วินาที พบว่าที่เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ 1 วินาที มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,106 เฟรมจากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.29 และที่เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ 3 วินาที มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,054 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.28

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยเวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์

Test and CI for Two Proportions				
Y2		เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
1	วินาที	1106	3696	0.299242
3	วินาที	1054	3696	0.285173
Difference = p (1) - p (2)				
Estimate for difference: 0.0140693				
95% CI for difference: (-0.00666287, 0.0348014)				
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 1.33 P-Value = 0.183				

จากตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยพบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.183 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการเกิดฟองอากาศระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยเวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าเวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

3. ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping (Y3)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.5 ซึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ระดับคือ ระดับความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping 35 มิลลิเมตรต่อวินาที และระดับความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping 15 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าที่ระดับความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping 35 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,127 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.30 และที่ระดับความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping 15 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 972 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.26

ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping

Test and CI for Two Proportions			
Y3	เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
35 มิลลิเมตรต่อวินาที	1127	3696	0.304924
15 มิลลิเมตรต่อวินาที	972	3696	0.262987
Difference = p (1) - p (2)			
Estimate for difference: 0.0419372			
95% CI for difference: (0.0214009, 0.0624735)			
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 4.00 P-Value = 0.000			

จากตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยพบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนการเกิดฟองอากาศบนเฟรมงานในแต่ละระดับของปัจจัยความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่า ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

4. ความหนืดของสารพอลิเมอร์ (Y4)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.6 ซึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ระดับคือ ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ 75.05 เซนติสโตก และระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ 81.99 เซนติสโตก พบว่าที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ 75.05 เซนติสโตก มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 916 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.24 และที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ 81.99 เซนติสโตก มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,153 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.31

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์

Test and CI for Two Proportions				
Y4		เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
75.05	เซนติสโตก	916	3696	0.247835
81.99	เซนติสโตก	1153	3696	0.311959
Difference = p (1) - p (2)				
Estimate for difference: -0.0641234				
95% CI for difference: (-0.0845400, -0.0437068)				
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = -6.16 P-Value = 0.000				

จากตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยพบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการเกิดฟองอากาศในแต่ละระดับของปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าความหนืดสารพอลิเมอร์มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

5. อุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงาน (Y5)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.7 ซึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ระดับคือ ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และระดับอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าที่ระดับระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,106 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.29 และที่ระดับอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,135 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.30

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยอุณหภูมิอบผิวเฟรมงาน

Test and CI for Two Proportions				
Y5		เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
90	องศาเซลเซียส	1106	3696	0.299242
110	องศาเซลเซียส	1135	3696	0.307089
Difference = p (1) - p (2)				
Estimate for difference: -0.00784632				
95% CI for difference: (-0.0288012, 0.0131086)				
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = -0.73 P-Value = 0.463				

จากตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยพบว่ามีค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่า เท่ากับ 0.463 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนการเกิดฟองอากาศในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงานไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงานไม่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

6. ความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ (Y6)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงปริมาณการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบแต่ละระดับในการทดลองดังตารางที่ 5.8 ซึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ระดับคือ ระดับความเร็วสายพาน 12 มิลลิเมตรต่อวินาที และระดับความเร็วสายพาน 24 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าที่ระดับความเร็วสายพาน 12 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,125 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.30 และที่ระดับความเร็วสายพาน 24 มิลลิเมตรต่อวินาที มีจำนวนเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศเท่ากับ 1,096 เฟรม จากจำนวนเฟรมงานทั้งหมด 3,696 เฟรม คิดเป็นสัดส่วนการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 0.29

ตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงาน

Test and CI for Two Proportions			
Y6	เฟรมงานเกิดฟองอากาศ	เฟรมงานทดลอง	สัดส่วนการเกิดฟองอากาศ
12 มิลลิเมตรต่อวินาที	1125	3696	0.304383
24 มิลลิเมตรต่อวินาที	1096	3696	0.296537
Difference = p (1) - p (2)			
Estimate for difference: 0.00784632			
95% CI for difference: (-0.0130553, 0.0287480)			
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 0.74 P-Value = 0.462			

จากตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับของปัจจัยพบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.462 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนการเกิดฟองอากาศในแต่ละระดับของปัจจัยความเร็วของสายพานไม่มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าความเร็วของสายพานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบไม่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน

สรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศในขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบแบบ Two Proportions ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 สรุปผลการทดสอบปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบแบบ Two Proportions

ลำดับ	ปัจจัย	ค่า P-value	ความมีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ
Y1	ความเร็วในการเคลื่อนลงของ Jig Stamping	0.296	ไม่มีผล
Y2	เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน	0.183	ไม่มีผล
Y3	ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping	0.000	มีผล
Y4	ความหนืดสารพอลิเมอร์	0.000	มีผล
Y5	อุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงาน	0.463	ไม่มีผล
Y6	ความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ	0.462	ไม่มีผล

จากการทดสอบสมมุติฐานของปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย พบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ 2 ปัจจัยคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์ และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ซึ่งต่างก็มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

5.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ

สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง แสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ ดังนี้

5.2.1 ผลการทดลอง

สำหรับการทดลองจะดำเนินการตามแผนการทดลองแบบสุ่ม ซึ่งทำการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยแบ่งระดับปัจจัยออกเป็น 4 ระดับ แสดงระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงระดับปัจจัยของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย				หน่วย
	1	2	3	4	
ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping	5	20	35	50	มิลลิเมตรต่อวินาที
ความหนืดของสารพอลิเมอร์	61.16	68.10	75.05	81.99	เซนติสโตก

ในการทดลองประกอบด้วย 2 ปัจจัยซึ่งกำหนดระดับปัจจัยออกเป็น 4 ระดับ และกำหนดให้มีการทำซ้ำ 2 รอบทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง ในแต่ละการทดลองใช้เฟรมงานจำนวน 336 เฟรม หรือ 1 ล็อตผลิตภัณฑ์ โดยมีตัวแปรตอบสนองคือ ร้อยละการเกิดฟองอากาศบนเฟรมงาน เมื่อได้แผนการทดลองแบบสุ่มจากโปรแกรม Minitab จากนั้นจึงดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง

แสดงผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ โดยการจัดเรียงลำดับใหม่ตามระดับความหนืดที่เพิ่มขึ้นแสดงดังตารางที่ 5.11 หลังจากดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองแบบสุ่มจากโปรแกรม Minitab

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ

ลำดับ	ความหนืด สารพอลิเมอร์	ความเร็ว Jig Stamping	จำนวนพรมงาน ป้องกันการทดลอง	จำนวนพรมงานที่ เกิดฟองอากาศ	ร้อยละการเกิด ฟองอากาศ
1	61.16	5	336	45	13.39
2	61.16	5	336	41	12.2
3	61.16	20	336	48	14.29
4	61.16	20	336	50	14.88
5	61.16	35	336	49	14.58
6	61.16	35	336	49	14.58
7	61.16	50	336	57	16.96
8	61.16	50	336	61	18.15
9	68.10	5	336	53	15.77
10	68.10	5	336	46	13.69
11	68.10	20	336	61	18.15
12	68.10	20	336	57	16.96
13	68.10	35	336	67	19.94
14	68.10	35	336	67	19.94
15	68.10	50	336	76	22.62
16	68.10	50	336	80	23.81
17	75.05	5	336	56	16.67
18	75.05	5	336	59	17.56
19	75.05	20	336	65	19.35
20	75.05	20	336	72	21.43
21	75.05	35	336	89	26.49
22	75.05	35	336	80	23.81
23	75.05	50	336	100	29.76
24	75.05	50	336	99	29.46
25	81.99	5	336	83	24.7
26	81.99	5	336	78	23.21
27	81.99	20	336	81	24.11
28	81.99	20	336	94	27.98
29	81.99	35	336	105	31.25
30	81.99	35	336	99	29.46
31	81.99	50	336	118	35.12
32	81.99	50	336	108	32.14

5.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

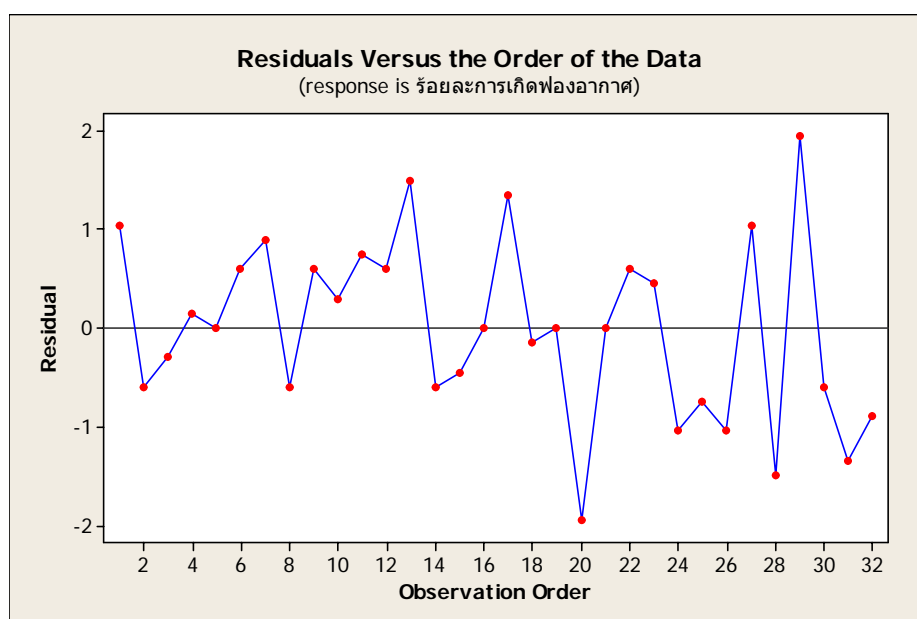
แสดงผลการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล และการวิเคราะห์ระดับความมีอิทธิพลของปัจจัย ดังนี้

5.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy Checking) จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติข้อมูลตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ประเภทคือ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล และการตรวจสอบมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน ซึ่งทำการตรวจสอบดังต่อไปนี้

(ก) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบลำดับความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะพิจารณาจากกราฟ Residuals versus the order of the data ที่ประมวลผลจากโปรแกรม Minitab ซึ่งแกนตั้งแสดงค่าส่วนตกค้าง ส่วนแกนนอนแสดงลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 5.1

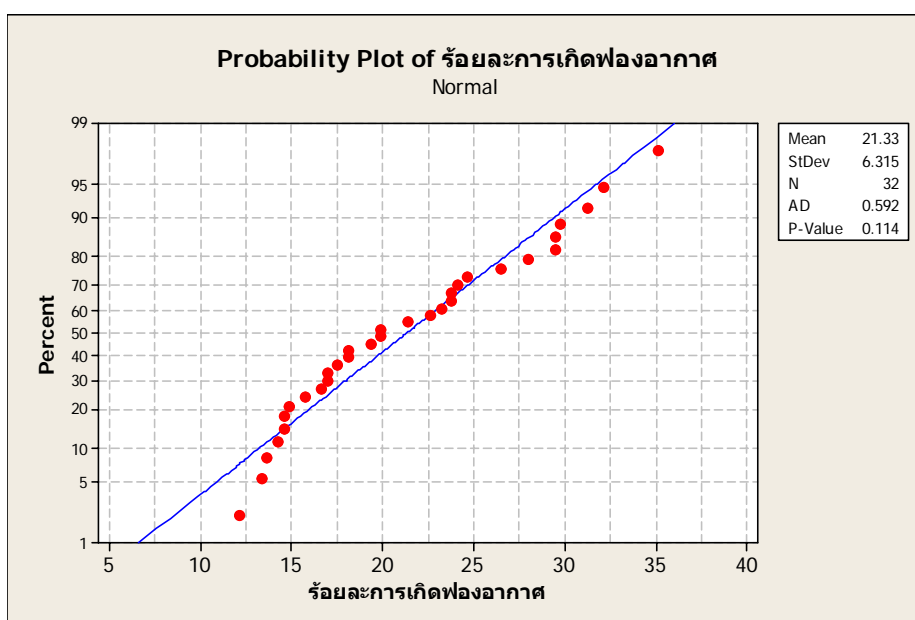


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงลำดับความสุ่มของข้อมูลตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟเมื่อพิจารณาค่าของส่วนตกค้างตามเวลาที่เก็บข้อมูล พบว่าลักษณะกราฟมีการกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่แน่นอนและไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม สรุปได้ว่าลำดับข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกันและอยู่ภายใต้ความสุ่ม

(ข) การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลจะทำการตรวจสอบจากกราฟ Normal Plot of Residuals โดยการนำค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามากกับค่าความน่าจะเป็นสะสมนำมาสร้าง Normal Probability Plot โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 5.2

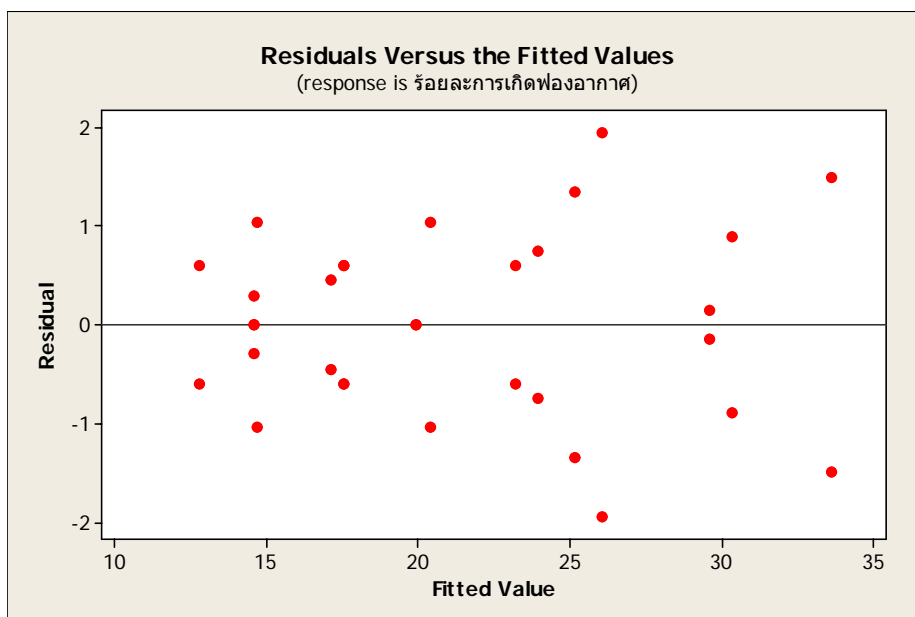


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความเป็นปกติของข้อมูลตัวแปรตอบสนอง

จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการเรียงตัวในลักษณะใกล้เคียงเส้นตรง และเมื่อพิจารณาจากค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.114 ซึ่งมากกว่า 0.05 สรุปได้ว่าข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ

(ค) การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

สำหรับการตรวจสอบความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้จากการแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือ ร้อยละการเกิดฟองอากาศ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าฟิต

เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าการกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม สรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

สรุปผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy Checking) พบว่าข้อมูลของตัวแปรตอบสนองมีคุณสมบัติตรงตามเงื่อนไขของหลักการออกแบบทดลองทั้ง 3 ประเภทคือ ความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

5.2.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

แสดงผลการคำนวณความแปรปรวนสำหรับร้อยละการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัย ดังตารางที่ 5.12 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping และปัจจัยร่วมระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์และความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละการเกิดฟองอากาศ

Analysis of Variance for ร้อยละการเกิดฟองอากาศ, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ความหนืดสารพอลิเมอร์	3	816.713	816.713	272.238	167.49	0.000
ความเร็ว Jig Stamping	3	348.336	348.336	116.112	71.44	0.000
ความหนืดพอลิเมอร์*ความเร็ว Jig Stamping	9	45.177	45.177	5.020	3.09	0.024
Error	16	26.006	26.006	1.625		
Total	31	1236.232				

S = 1.27489 R-Sq = 97.90% R-Sq(adj) = 95.92%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 5.12 พบว่าปัจจัยหลักที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ความหนืดสารพอลิเมอร์และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ซึ่งต่างก็มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 เมื่อพิจารณาความแปรปรวนของปัจจัยร่วมระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping พบว่ามีค่า P-Value เท่ากับ 0.024 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 เช่นกัน

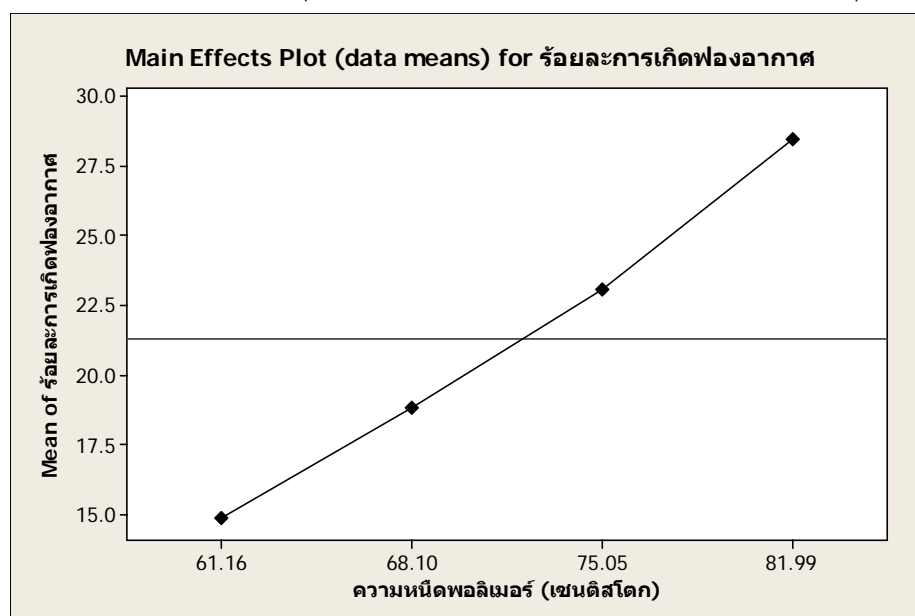
สรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

5.2.2.3 การวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของปัจจัย

การวิเคราะห์ความมีอิทธิพลของปัจจัยจะทำการวิเคราะห์จากปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศได้แก่ อิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลของปัจจัยร่วม ทั้งนี้เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัย ดังนี้

(ก) ความหนืดสารพอลิเมอร์

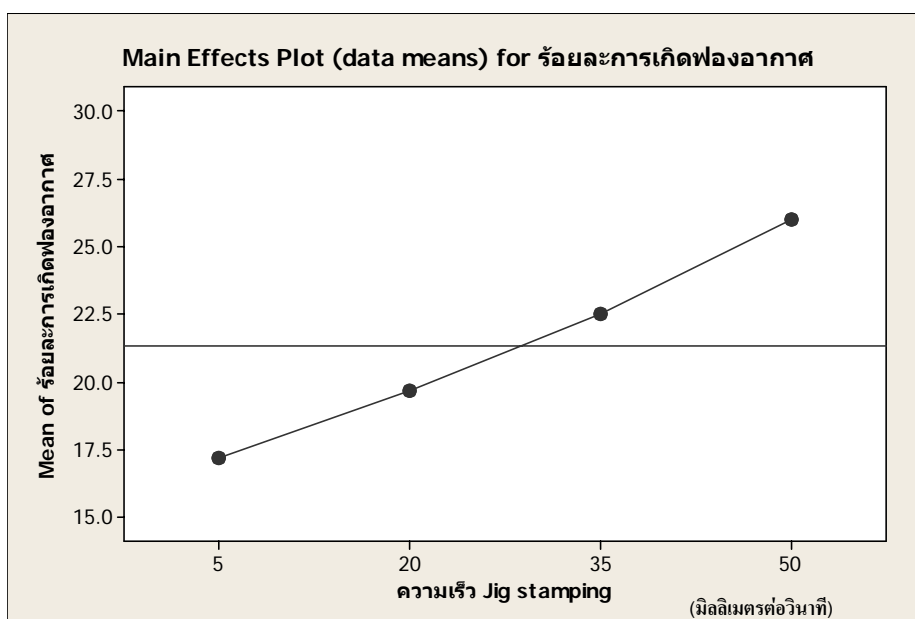
จากผลทดลองเมื่อทำการศึกษาความมีอิทธิพลของปัจจัยความหนืดซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ ดังรูปที่ 5.4 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ และแกนนอนแสดงระดับความหนืดของสารพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศบนเฟรมงานเพิ่มมากขึ้นโดยที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 81.99 เซนติสโตก มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 28.49 ในขณะที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 61.16 เซนติสโตก มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 14.87 ตามลำดับ สรุปได้ว่าความหนืดสารพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กับร้อยละการเกิดฟองอากาศในเชิงเส้นตรง โดยที่ระดับความหนืดต่ำสุดจะทำให้เกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานน้อยที่สุด



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ

(ข) ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping

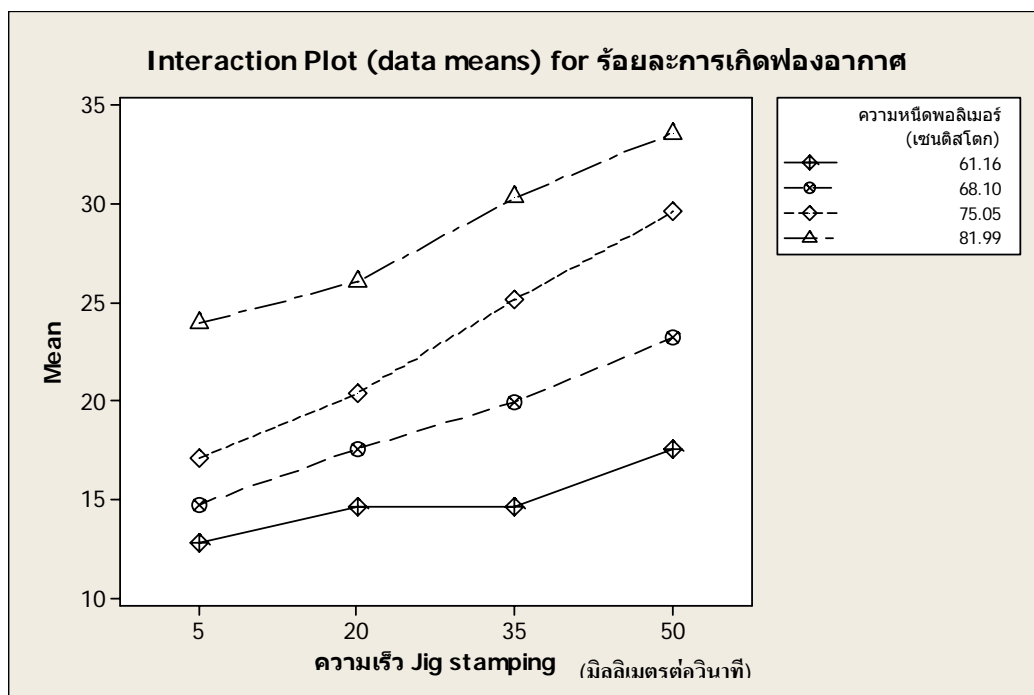
จากผลทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ที่มีผลต่อร้อยละการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping กับร้อยละการเกิดฟองอากาศ ดังรูปที่ 5.5 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ และแกนนอนแสดงระดับความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping พบว่าที่ระดับความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 26.00 ในขณะที่ระดับความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 17.14 ตามลำดับ สรุปได้ว่าความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีความสัมพันธ์กับร้อยละการเกิดฟองอากาศในเชิงเส้นตรง โดยที่ระดับความเร็วต่ำสุดจะทำให้เกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานน้อยที่สุด เช่นเดียวกับความหนืดสารพอลิเมอร์



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของ Jig Stamping กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ

(ค) ความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยร่วมระหว่างความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping พบว่าเกิดอันตรกิริยา (Interaction Effect) ที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping กับความหนืดสารพอลิเมอร์ที่มีผลต่อร้อยละการเกิดฟองอากาศ ดังรูปที่ 5.6 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ แกนนอนแสดงระดับความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping และสัญลักษณ์ในแต่ละเส้นบนกราฟแสดงระดับความหนืดของสารพอลิเมอร์ จากกราฟพบว่าระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดฟองอากาศมากที่สุดคือระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 81.99 เซนติสโตก และความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 33.63 ในขณะที่ระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุดคือ ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 12.79



รูปที่ 5.6 แสดงอันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping กับความหนืดสารพอลิเมอร์กับค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศ

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองเชิงแพททอเรียล 4 ระดับ พบว่าทั้งปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมจากความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ต่างก็มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการศึกษาแนวโน้มการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เท่ากับ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาทีจะทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 12.79

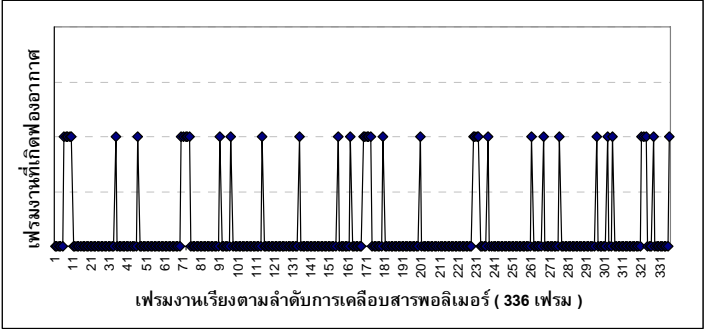
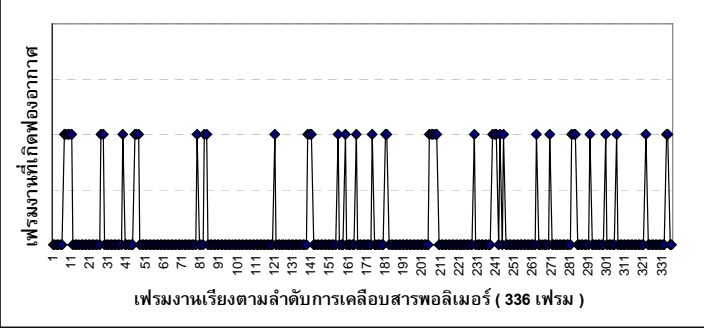
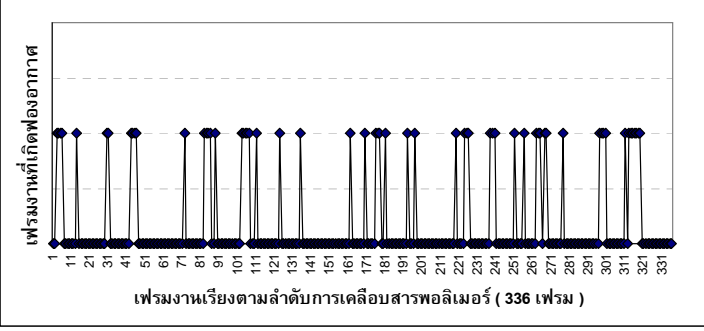
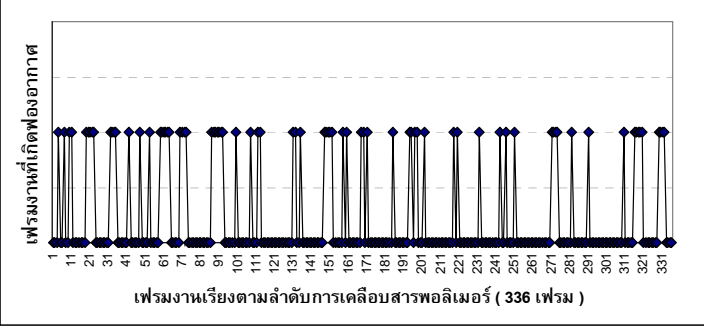
5.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ

ทำการศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศจากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยได้แก่ ความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ดังนี้

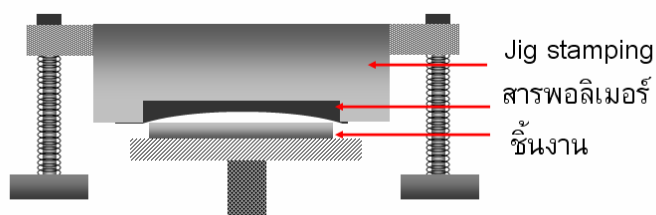
5.3.1 กลไกจากปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์

ในการวิเคราะห์การเกิดขึ้นของฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน เริ่มจากการศึกษาลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งชิ้นงานบนเฟรมงาน พบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีรูปแบบการกระจายตัวแบบสุ่มไม่มีตำแหน่งการเกิดที่แน่นอน จากผลการทดลองเชิงแพททอเรียลพบว่าเมื่อความหนืดของสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นปริมาณฟองอากาศจะเกิดมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นในการวิเคราะห์กลไกการเกิดฟองอากาศจากปัจจัยความหนืดจะทำการเปรียบเทียบในแต่ละระดับของความหนืดที่เพิ่มขึ้นเพื่อศึกษาความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อระดับความหนืดเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองเชิงแพททอเรียลเมื่อวิเคราะห์ลำดับการเกิดฟองอากาศของเฟรมงานที่ป้อนเข้าเครื่องจักร ซึ่งมีเฟรมงาน 336 เฟรมในแต่ละการทดลอง โดยกำหนดระดับความเร็วในการเคลื่อนขึ้นให้คงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าลำดับการเกิดฟองอากาศในแต่ละเฟรมงานของแต่ละการทดลองมีลักษณะแบบสุ่มและไม่มีความต่อเนื่องในการเกิดฟองอากาศ แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศโดยเปรียบเทียบระดับความหนืดที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5.13 สรุปได้ว่าลำดับการกระจายตัวของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟรมงานเกิดขึ้นในรูปแบบสุ่ม

ตารางที่ 5.13 แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศแต่ละระดับความหนืดสารพอลิเมอร์

ความหนืดสารพอลิเมอร์ (เซนติสโตก)	แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ
61.16	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 45 เฟรม</p>
68.10	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 46 เฟรม</p>
75.05	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 56 เฟรม</p>
81.99	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 78 เฟรม</p>

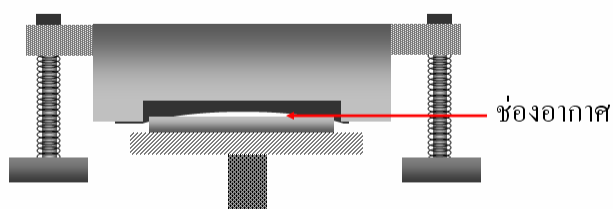
จากตารางที่ 5.13 พบว่าถ้าปรับระดับความหนืดสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ในขั้นตอนการเคลือบสารพอลิเมอร์จากการสังเกตพบความแตกต่างระหว่างระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงคือ เมื่อความหนืดของสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ผิวของสารพอลิเมอร์ที่เกาะติดกับ Jig Stamping ก่อนที่จะทำการเคลือบผิวเกิดความโค้งงอมากขึ้น แสดงลักษณะความโค้งงอของผิวสารพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 5.7



(ก) ก่อนเคลือบ

รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะความโค้งงอของสารพอลิเมอร์

ดังนั้นเมื่อทำการเคลือบผิวบนเฟรมงานจะส่งผลให้เกิดช่องว่างอากาศขึ้นระหว่างผิวของชิ้นงานกับผิวของสารพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 5.8



(ข) ทำการเคลือบ

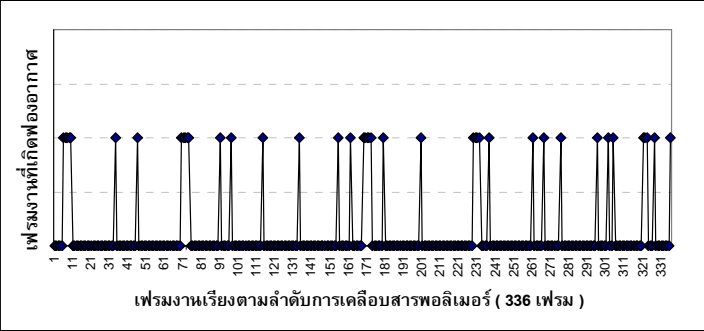
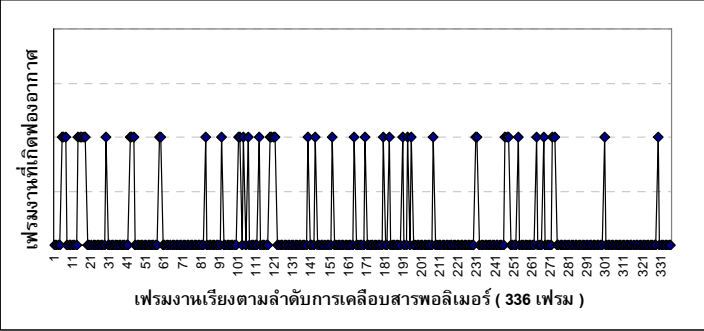
รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะช่องอากาศระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวสารพอลิเมอร์

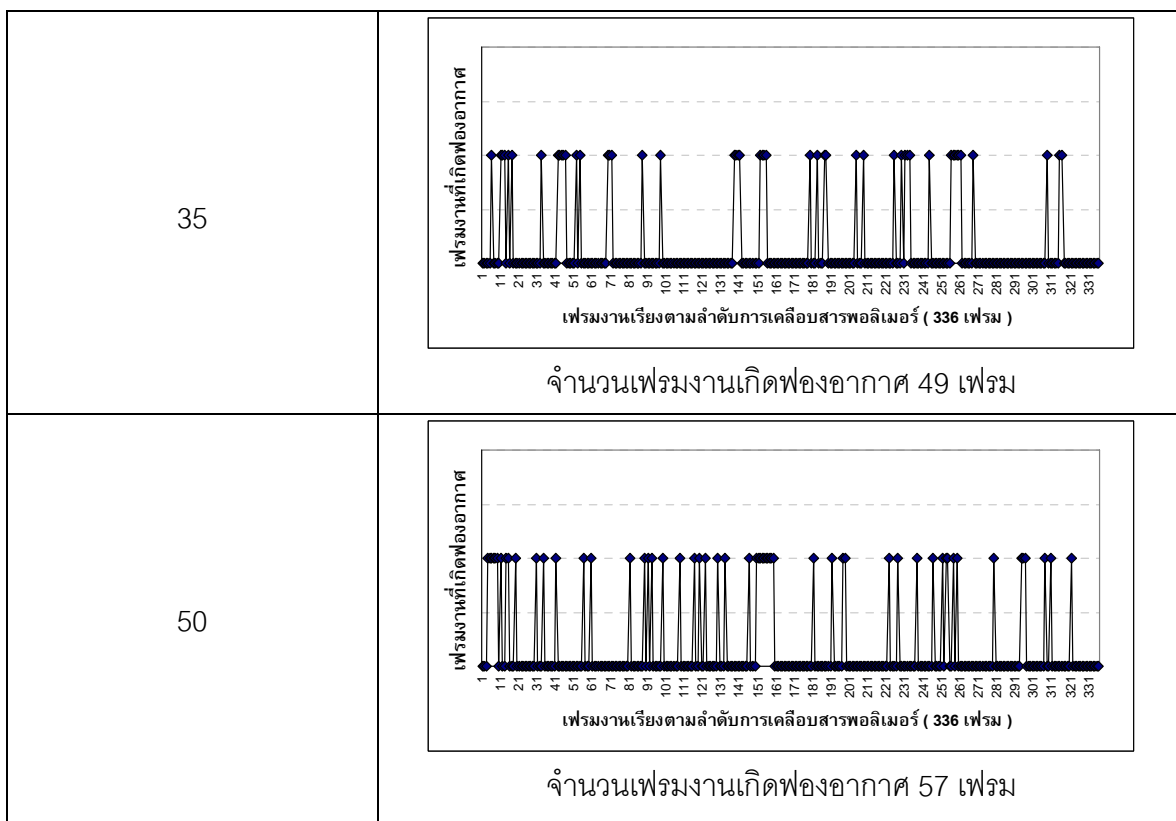
สามารถสรุปได้ว่า ความหนืดสารพอลิเมอร์จะมีผลทำให้ผิวของสารพอลิเมอร์เกิดความโค้งงอก่อนทำการเคลือบผิว เมื่อทำการเคลือบผิวบนเฟรมงานจะมีผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวของสารพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบนผิวชิ้นงาน จากผลการศึกษาที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ต่อเพื่อปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น

5.3.2 กลไกจากปัจจัยความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping

จากการศึกษารูปแบบการเกิดฟองอากาศตามลำดับของเฟรมงานที่ป้อนเข้าเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยเฟรมงานจำนวน 336 เฟรม พบว่าลักษณะการเกิดฟองอากาศมีลักษณะแบบสุ่มไม่เกิดความต่อเนื่องในแต่ละเฟรมงาน และจากผลการทดลองเชิงแพททอเรียลเมื่อปรับเปลี่ยนระดับความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping โดยกำหนดระดับความหนืดสารพอลิเมอร์คงที่เท่ากับ 61.16 เซนติสโตก สามารถแสดงลำดับการเกิดฟองอากาศในแต่ละเฟรมงาน ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศแต่ละระดับความเร็วของ Jig Stamping

ความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping (มิลลิเมตรต่อวินาที)	แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ
5	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 41 เฟรม</p>
20	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 48 เฟรม</p>



จากผลการทดลองดังตารางที่ 5.14 พบว่าเมื่อทำการจัดปรับความเร็วในการเลื่อน Jig Stamping สูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณฟองอากาศเกิดมากขึ้น หลังจากทำการวิเคราะห์โดยการสังเกตลักษณะเฟรมงานขณะทำการเคลือบโดยการเปรียบเทียบระหว่างระดับความเร็วที่ต่างกัน พบว่าถ้าใช้ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping สูงจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดช่องว่างของอากาศระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน

เมื่อทำการเคลือบผิวเสร็จขณะที่ Jig Stamping เลื่อนขึ้นจะมีผลทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการเกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน

สรุปได้ว่าความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping จะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีค่ามากขึ้นสังเกตได้จากการกระเพื่อมของเฟรมงาน ซึ่งมีผลทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบนผิวเฟรมงาน เนื่องจากการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานจะทำให้ช่องว่างของอากาศขยายขนาดใหญ่ขึ้น ผลจากการศึกษาที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปเพื่อปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น

5.4 แนวทางการปรับปรุง

จากผลการทดลองเชิงแพททอเรียลและการศึกษากลไกการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัย สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ดังนี้

5.4.1 การประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากผลการออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียล พบว่าระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำสุดคือ ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ที่ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเกิดฟองอากาศเท่ากับ 12.79 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบันยังคงไม่เหมาะสมกับวิธีการเคลือบผิวในกระบวนการผลิต ดังนั้นควรทำการประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อลดปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบผิว

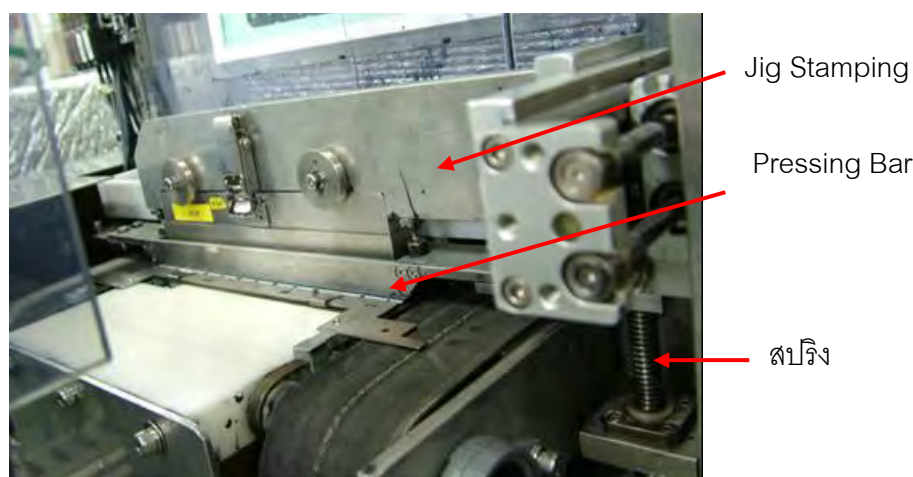
5.4.2 การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร

จากผลการออกแบบการทดลอง พบว่าถ้าใช้ความเร็วในการเคลื่อน Jig Stamping สูงขึ้น จะมีผลให้ความเร็วในการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีค่ามากขึ้น สังเกตได้จากการกระเพื่อมของเฟรมงาน ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่มีผลทำให้เกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน จากผลการทดลองโดยการปรับลดความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ที่ระดับต่ำสุดคือ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าความเร็วในการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ลดลง สังเกตได้จากการกระเพื่อมของเฟรมงานที่น้อยลง แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาให้หมดไปได้ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งอาจเกิดจากชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีระยะเวลาการใช้งานมานานและยังไม่ได้รับการซ่อมแซมแก้ไข จากการสังเกตจะพบว่า Pressing Bar ที่ใช้กดเฟรมงานขณะเคลือบยังมีระยะห่างระหว่างเฟรม

งานกับ Pressing Bar มากอีกทั้งสปริงที่ใช้ในการเลื่อนขึ้นของ Pressing Bar ยังมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ได้เช่นกัน ดังนั้นแนวทางสำหรับการปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบผิว จะทำการปรับปรุง ดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนชุดสปริงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นของ Pressing Bar ที่ใช้กดเฟรมงานเป็นแบบสแตนเลสเพื่อป้องกันการเกิดสนิมเนื่องจากสปริงชุดเดิมบางส่วนเกิดสนิมทำให้การเคลื่อนไม่สม่ำเสมอ
2. ทำการปรับระยะห่างของ Pressing Bar ที่ใช้กดทับเฟรมงานขณะทำการเคลือบให้มี ความเหมาะสมเพื่อลดการกระเพื่อมของเฟรมงาน จากเดิมระยะห่าง 2 มิลลิเมตรโดยกำหนดให้ระยะห่างเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร

แสดงชุดอุปกรณ์การเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วย Jig Stamping สำหรับการเคลือบสารพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงาน สปริงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นของ Pressing Bar และ Pressing Bar สำหรับกดเฟรมงานขณะเคลือบสาร ดังรูปที่ 5.10

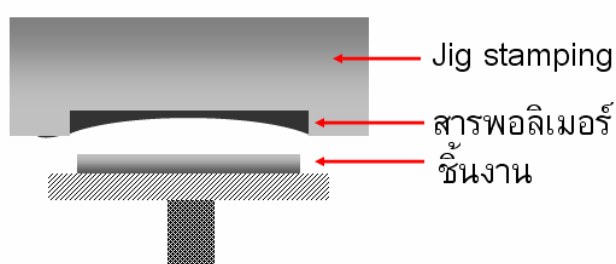


รูปที่ 5.10 ชุดอุปกรณ์การเคลือบสารพอลิเมอร์

จากการปรับปรุงข้างต้น จึงได้เสนอแนวทางการตรวจสอบและซ่อมบำรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสารเพิ่มเติมกับทางโรงงาน ในการกำหนดระยะเวลาการตรวจสอบและการซ่อมบำรุงสภาพเครื่องจักรเพื่อลดความผันแปรที่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิต

5.4.3 การปรับปรุงแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping

จากผลการออกแบบการทดลอง พบว่าความหนืดสารพอลิเมอร์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศมากที่สุดซึ่งจากการศึกษาทั่วโลกการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์ พบว่าโดยปกติแล้วผิวของสารพอลิเมอร์ที่เกาะติดกับ Jig Stamping ก่อนทำการเคลือบผิวจะเกิดความโค้งเว้ามีลักษณะดังรูปที่ 5.11 ดังนั้นเมื่อเริ่มการเคลือบผิวจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวของเฟรมงาน ซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงานหลังจากเคลือบผิวเสร็จ รูปที่ 5.12 แสดง Jig Stamping แบบเดิม







รูปที่ 5.11 แสดงความโค้งเว้าของผิวสารพอลิเมอร์ของ Jig Stamping แบบเดิม



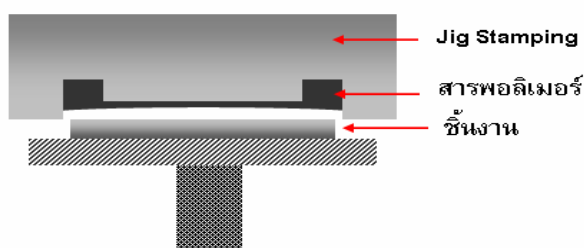
รูปที่ 5.12 แสดง Jig Stamping แบบเดิม

ดังนั้นจึงได้เสนอแนวทางการปรับปรุงโดยการออกแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping เพื่อลดความโค้งเว้าของผิวสารพอลิเมอร์ ซึ่งทำการทดลองโดยการเจาะร่องแม่พิมพ์ Jig Stamping บริเวณมุมทั้งสองด้าน เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดลองมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงทำการออกแบบโดยการกำหนดระดับความกว้างและความลึกของ Jig Stamping ออกเป็น 4 ระดับแสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 แสดงแบบจำลองสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping

ระยะความกว้าง (W) (มิลลิเมตร)	ระยะความลึก (L) (มิลลิเมตร)	ภาพจำลอง ความโค้งเว้าของสารพอลิเมอร์
0.8	0.8	
	1.0	
1.6	0.8	
	1.0	

จากการออกแบบ Jig Stamping พบว่าระดับความกว้างและความลึกที่ทำให้ผิวของสารพอลิเมอร์เกิดความโค้งเว้าน้อยที่สุดคือ ระดับความกว้าง 1.60 มิลลิเมตรและระดับความลึก 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งถ้าใช้ระดับความลึกและความกว้างมากกว่าช่วงดังกล่าวก็จะทำให้ผิวของสารพอลิเมอร์เกิดความโค้งเว้ามากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วงของสารพอลิเมอร์บริเวณที่เกาะติดในร่องทั้งสองข้างมีค่ามากขึ้น รูปที่ 5.14 แสดงรูปร่างลักษณะของ Jig Stamping แบบใหม่

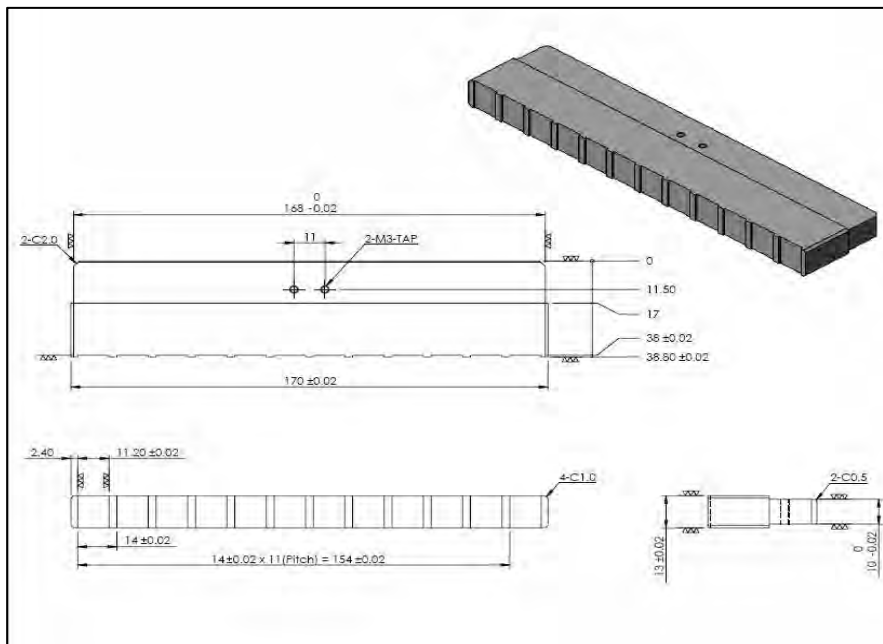


รูปที่ 5.13 แสดงความโค้งเว้าของผิวสารพอลิเมอร์ของ Jig Stamping แบบใหม่

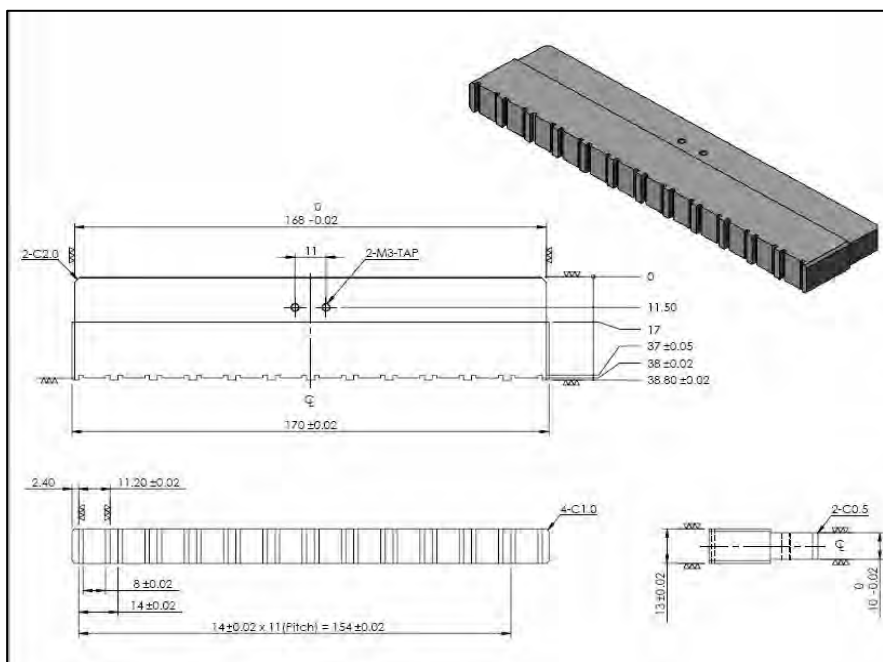


รูปที่ 5.14 แสดง Jig Stamping แบบใหม่

แสดงการเปรียบเทียบ Drawing ของ Jig Stamping แบบเดิมและแบบใหม่ดังรูปที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16 ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 แสดง Drawing ของ Jig Stamping แบบเดิม



รูปที่ 5.16 แสดง Drawing ของ Jig Stamping แบบใหม่

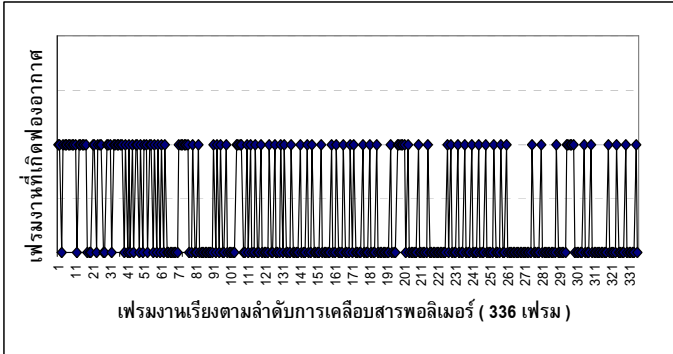
5.5 การติดตามผลหลังการปรับปรุง

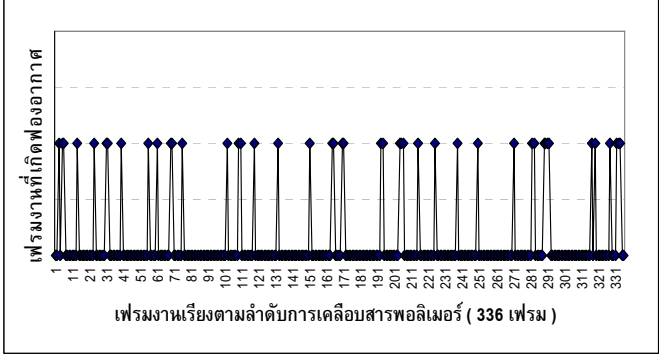
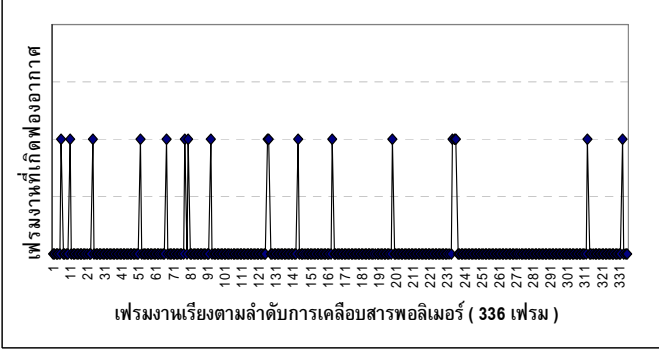
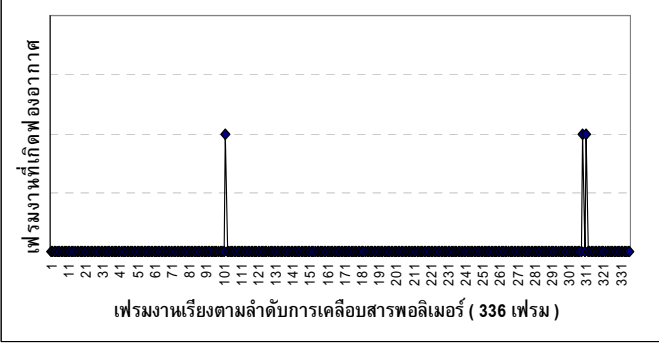
ติดตามผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 แนวทาง โดยทำการเปรียบเทียบ ลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ ร้อยละการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน และร้อยละการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ของแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุง ดังนี้

5.5.1 การเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ

จากการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง สามารถเปรียบเทียบรูปแบบและลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศของแต่ละครั้งเมื่อทำการปรับปรุง โดยสุ่มตัวอย่างจำนวน 336 เฟรม ซึ่งพบว่าลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศลดลงตามลำดับหลังจากทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 แนวทาง แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศของแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุง ดังตารางที่ 5.16

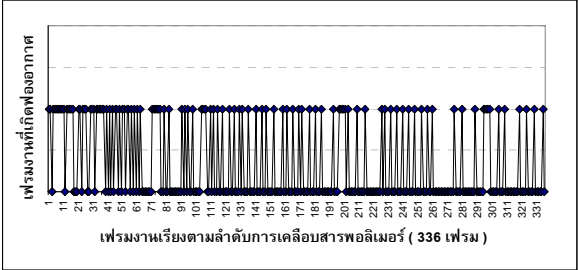
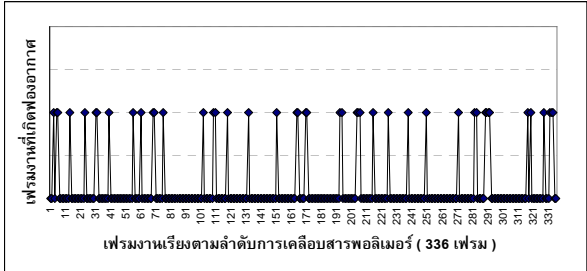
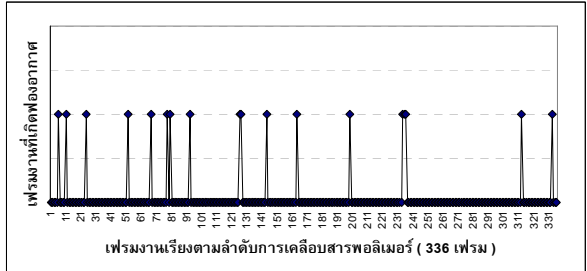
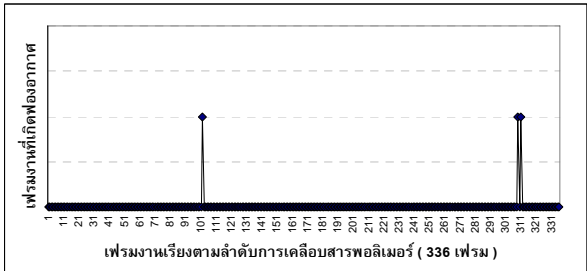
ตารางที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ

การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ
<p>ก่อนการปรับปรุง</p> <p>ความหนืดสารพอลิเมอร์ 81.99 เซนติสโตก</p> <p>ความเร็วในการเล็อนขึ้น</p> <p>Jig Stamping 35 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 104 เฟรม (ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 30.95)</p>

<p><u>การปรับปรุงครั้งที่ 1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม <p>ความหนืดสารพอลิเมอร์ 61.16 เซนติสโตก</p> <p>ความเร็วในการเลื่อนขึ้น</p> <p>Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 45 เฟรม (ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 13.39)</p>
<p><u>การปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม - การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร 	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 18 เฟรม (ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 5.36)</p>
<p><u>การปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม - การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร - การเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping 	 <p>จำนวนเฟรมงานเกิดฟองอากาศ 3 เฟรม (ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 0.89)</p>

สรุปผลการปรับปรุงโดยเปรียบเทียบการเกิดฟองอากาศทั้ง 3 แนวทาง ดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ

การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ
<p><u>ก่อนการปรับปรุง</u></p> <p><u>การปรับปรุงครั้งที่ 1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม <p><u>การปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม - การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร <p><u>การปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 3</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - การใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสม - การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร - การเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping 	<p>แสดงการเปรียบเทียบลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ</p>  <p>เฟรมงานเกิดฟองอากาศ</p> <p>เฟรมงานเรียงตามลำดับการเคลือบสารพอลิเมอร์ (336 เฟรม)</p> <p>ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 30.95</p> <p style="text-align: center;">↓</p>  <p>เฟรมงานเกิดฟองอากาศ</p> <p>เฟรมงานเรียงตามลำดับการเคลือบสารพอลิเมอร์ (336 เฟรม)</p> <p>ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 13.39</p> <p style="text-align: center;">↓</p>  <p>เฟรมงานเกิดฟองอากาศ</p> <p>เฟรมงานเรียงตามลำดับการเคลือบสารพอลิเมอร์ (336 เฟรม)</p> <p>ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 5.36</p> <p style="text-align: center;">↓</p>  <p>เฟรมงานเกิดฟองอากาศ</p> <p>เฟรมงานเรียงตามลำดับการเคลือบสารพอลิเมอร์ (336 เฟรม)</p> <p>ร้อยละการเกิดฟองอากาศ 0.89</p>

5.5.2 การเปรียบเทียบร้อยละการเกิดฟองอากาศ

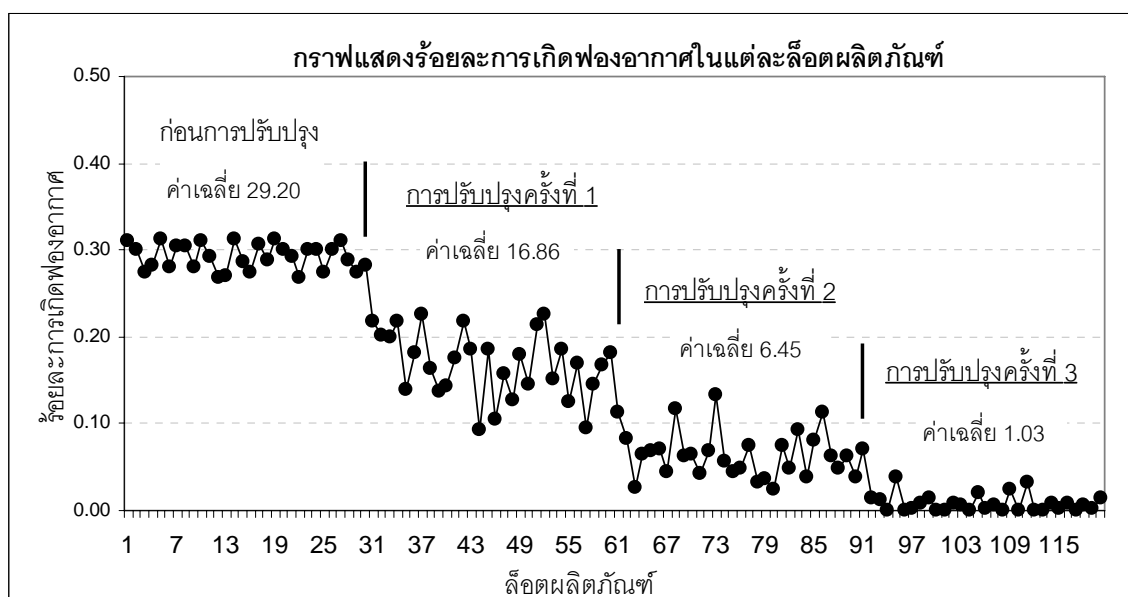
จากการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 การปรับปรุงดังกล่าวไว้ตอนต้น เมื่อทำการติดตามผลของปริมาณร้อยละการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงาน โดยทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 ครั้งที่ทำการปรับปรุง สามารถแสดงปริมาณร้อยละการเกิดฟองอากาศ ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 แสดงปริมาณเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศในแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุง

การปรับปรุง	จำนวนเฟรมงาน ป้อนการผลิต	จำนวนเฟรมงาน ที่เกิดฟองอากาศ	ร้อยละการเกิด ฟองอากาศ
ก่อนการปรับปรุง	10,080	2,943	29.20
ปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 1	10,080	1,699	16.86
ปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 2	10,080	650	6.45
ปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 3	10,080	104	1.03

หมายเหตุ : แต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุงใช้เฟรมงานจำนวนเท่ากันจำนวน 30 ลีต

แสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศของแต่ละลีดตผลิตรัทท์ในแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุงดังกราฟรูปที่ 5.17

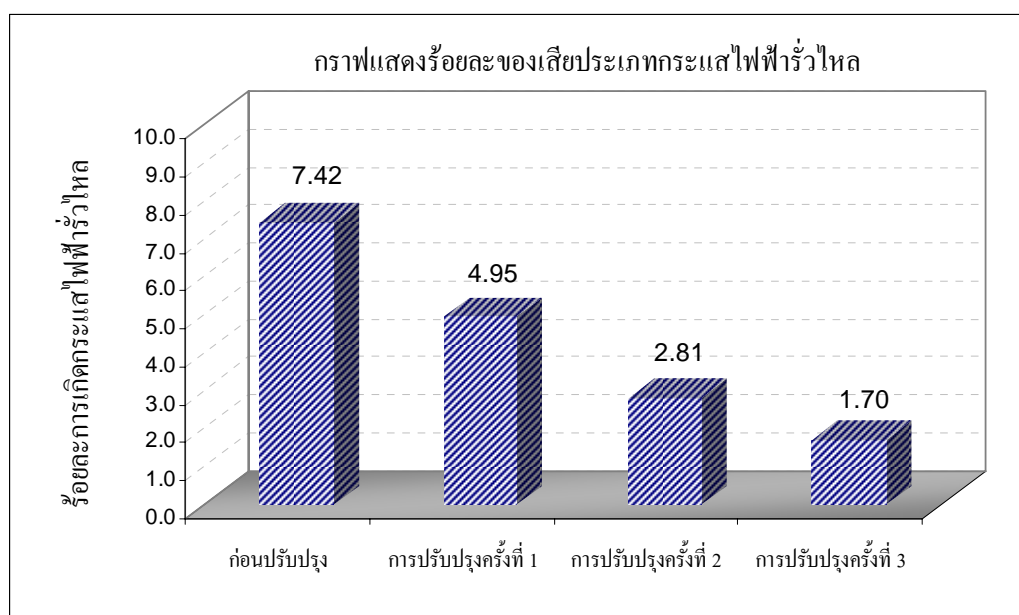


รูปที่ 5.17 แสดงร้อยละการเกิดฟองอากาศของแต่ละลีดตผลิตรัทท์

จากกราฟก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตพบว่า ร้อยละการเกิดฟองอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 29.20 เมื่อทำการปรับปรุงครั้งที่ 1 ด้วยการประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสามารถลดปริมาณการเกิดฟองอากาศเหลือร้อยละ 16.86 หลังจากนั้นปรับปรุงครั้งที่ 2 ด้วยการปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร พบว่าสามารถลดปริมาณการเกิดฟองอากาศเหลือร้อยละ 6.45 และการปรับปรุงครั้งสุดท้ายการปรับปรุงต่อเนื่องครั้งที่ 3 การเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping พบว่าสามารถลดปริมาณการเกิดฟองอากาศเหลือเพียงร้อยละ 1.03

5.5.3 การเปรียบเทียบร้อยละการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหล

จากการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง หลังจากทำการติดตามปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหล พบว่าก่อนการปรับปรุงจากจำนวนงาน 30 ล็อต เกิดของเสียประเภทนี้เท่ากับร้อยละ 7.42 หลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 ครั้ง พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียเหลือเพียงร้อยละ 1.70 แสดงผลการเปรียบเทียบของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในแต่ละครั้งที่ทำการปรับปรุง ดังกราฟรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงร้อยละการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงโดยทำการทดลองปรับปรุงกระบวนการผลิตกับจำนวนงานทั้งหมด 1,000 ล็อต หรือประมาณ 1,344,00 ชิ้นงาน พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจาก 99,720 ชิ้นเหลือเพียง 22,850 ชิ้น สามารถลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ประมาณ 768,700 บาท

บทที่ 6

วิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟองอากาศ

การค้นหาค่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศด้วยวิธีการระดมสมอง จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยตามขั้นตอนการทำงานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ กระบวนการเคลือบผิวเฟรมงานและกระบวนการอบผิวเฟรมงาน จากปัจจัยที่ค้นหาได้มีจำนวนทั้งหมด 6 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ความหนืดของสารพอลิเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้อบผิวเฟรมงาน และความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ ซึ่งปัจจัยที่รวบรวมได้ทั้งหมด จะทำการทดสอบความมีอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศด้วยวิธีการทางสถิติ เนื่องจากตัวแปรที่ทำการศึกษาเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Attribute Data) ดังนั้นวิธีการคัดเลือกปัจจัยทางสถิติที่นำมาใช้คือ วิธีการทดสอบแบบ Two Proportions โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ระดับต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละปัจจัย ซึ่งในการดำเนินการทดลองเมื่อทำการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยในแต่ละครั้ง จะควบคุมระดับปัจจัยอื่นๆให้คงที่โดยกำหนดให้เท่ากับระดับที่ใช้ในปัจจุบัน จากผลการทดสอบพบว่า มี 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศได้แก่ ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping และความหนืดของสารพอลิเมอร์ ซึ่งในขั้นตอนถัดไปจะทำการศึกษาแนวโน้มการเกิดฟองอากาศของทั้ง 2 ปัจจัยเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำที่สุด

6.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ

ในขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ ได้นำหลักการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยร่วม ในการทดลองได้กำหนดระดับปัจจัยใหม่ในช่วงที่กว้างมากขึ้นโดยแบ่งออกเป็น 4 ระดับ โดยที่ปัจจัยความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักรทำให้สามารถขยายช่วงการจับปรับได้ในช่วงที่กว้างขึ้นตั้งแต่ 5 – 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์ ได้ทำการทดลองโดยการปรับความหนืดสารพอลิเมอร์ด้วยน้ำ Deionization Water พบว่าระดับความหนืดต่ำสุดที่ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพในการเคลือบผิวบนชิ้นงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 61.16 – 81.99 เซนติสโตก ซึ่งผลการทดลองเชิงแพททอเรียลพบว่าปัจจัยจากความหนืดสารพอลิเมอร์และความเร็วใน

การเลื่อนชั้น Jig Stamping ต่างก็มีผลต่อการเกิดฟองอากาศในทิศทางเดียวกันคือเมื่อระดับปัจจัยต่ำลงปริมาณการเกิดฟองอากาศก็จะน้อยลงตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ต่ำมากๆ และกำหนดระดับความเร็วในการเลื่อนชั้นของ Jig Stamping ต่ำสุด จะทำให้ปริมาณการเกิดฟองอากาศต่ำที่สุด อีกทั้งยังพบว่าทั้ง 2 ปัจจัยหลักเกิดอิทธิพลร่วมที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ ซึ่งทำให้สามารถหาระดับปัจจัยใหม่ที่ทำให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด จากระดับดังกล่าวแม้ว่าจะสามารถลดปริมาณฟองอากาศได้มาก แต่ว่ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหการเกิดฟองอากาศให้หมดไปได้ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาถึงกลไกการเกิดขึ้นของฟองอากาศเพื่อหาแนวทางสำหรับการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

6.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ

การศึกษากลไกการเกิดฟองอากาศเริ่มจากการวิเคราะห์ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน พบว่าฟองอากาศจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงานเท่านั้น และไม่มีลำดับความต่อเนื่องของฟองงานที่เกิดฟองอากาศ แสดงให้เห็นว่าลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟรมงานมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ในการศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศจะทำการศึกษาจาก 2 ปัจจัยหลักคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์และความเร็วในการเลื่อนชั้น Jig Stamping เริ่มจากการศึกษากลไกของปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์สูงขึ้นปริมาณฟองอากาศจะเกิดมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจึงทำการศึกษาโดยทำการเปรียบเทียบที่ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ต่ำ และระดับความหนืดสารพอลิเมอร์สูง พบข้อแตกต่างคือที่ระดับความหนืดสูงของสารพอลิเมอร์จะเกิดความโค้งงอมากกว่าที่ความหนืดต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงาน ส่วนการศึกษากลไกจากปัจจัยความเร็วในการเลื่อนชั้น Jig Stamping ทำการพิจารณาเช่นเดียวกับความหนืดสารพอลิเมอร์โดยเปรียบเทียบที่ระดับความเร็วต่ำกับความเร็วสูง ซึ่งพบว่าที่ระดับความเร็วต่ำการกระเพื่อมของเฟรมงานขณะทำการเคลือบผิวจะเกิดการกระเพื่อมน้อยกว่าที่ระดับความเร็วสูง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วในการเลื่อนชั้น Jig Stamping ต่ำปริมาณฟองอากาศจะเกิดน้อยลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการกระเพื่อมของเฟรมงานก็มีผลทำให้เกิดฟองอากาศได้เช่นกัน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์กลไกการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัยจะนำไปเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์เพื่อลดปริมาณการเกิดฟองอากาศอย่างต่อเนื่อง

6.4 การเสนอแนวทางการปรับปรุง

การปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์การวิจัยครั้งนี้ได้เสนอแนวทางการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 วิธีการได้แก่ การประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองซึ่งใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลจากการศึกษากลไกการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัย สามารถปรับปรุงอย่างต่อเนื่องจากกลไกการเกิดฟองอากาศของปัจจัยความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping คือ การปรับเปลี่ยนขึ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสารได้แก่ การปรับระยะกดเฟรมงานของ Pressing Bar และเปลี่ยนสปริงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นของ Pressing Bar เนื่องจากสริงชุดเดิมเกิดสนิมทำให้การเคลื่อนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อลดการกระเพื่อมของเฟรมงาน และการปรับปรุงต่อเนื่องจากปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์โดยการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping เพื่อลดความโค้งงอของผิวสารพอลิเมอร์ เนื่องจากแม่พิมพ์ Jig Stamping มีราคาสูง ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงทำการออกแบบระดับในการเจาะร่อง Jig Stamping เพียง 4 ระดับเท่านั้น ซึ่งพบว่าที่ระดับความกว้าง 1.6 มิลลิเมตร และความลึก 1.0 มิลลิเมตร จะทำให้ผิวของสารพอลิเมอร์เกิดความโค้งงอน้อยที่สุดจนมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรง ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping ดังกล่าว ได้ทำการชั่งน้ำหนักสารพอลิเมอร์บนผิวเฟรมงานโดยเปรียบเทียบระหว่าง Jig Stamping แบบเดิมและแบบใหม่ พบว่าน้ำหนักสารพอลิเมอร์บนเฟรมงานหลังจากอบผิวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

6.5 การเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต

เนื่องจากการปรับปรุงโดยการประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยการลดความเร็วของ Jig Stamping จากเดิม 35 มิลลิเมตรต่อวินาทีเหลือ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่งผลต่อเวลามาตรฐานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.80 นาทีเป็น 1.83 นาที ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต เริ่มจากการพิจารณา กำลังการผลิตของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ ดังนี้

เวลามาตรฐานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ = 1.80 นาที / ชิ้น

กำลังการผลิตของเครื่องจักรเท่ากับ 1,260 นาที / วัน / เครื่อง

กระบวนการผลิตมีทั้งหมด 16 เครื่องจักร

ดังนั้น ในช่วงเวลา 1 เดือน

มีกำลังการผลิตทั้งหมด 1,260 นาที x 16 x 25 วัน = 504,000 นาที / เดือน

1. การคำนวณกำลังการผลิตก่อนการปรับปรุง

เวลามาตรฐานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ = 1.80 นาที / ชิ้น

กำลังการผลิตทั้งหมด = 504,000 นาที / เดือน

ดังนั้นปริมาณการผลิตที่ได้ 504,000 นาที / 1.80 นาที = 280,000 ชิ้น / เดือน

2. การคำนวณกำลังการผลิตหลังการปรับปรุง

เวลามาตรฐานของกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ = 1.83 นาที / ชิ้น

กำลังการผลิตทั้งหมด = 504,000 นาที / เดือน

ดังนั้นปริมาณการผลิตที่ได้ 504,000 นาที / 1.83 นาที = 275,410 ชิ้น / เดือน

ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตที่ได้ระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง แสดงการเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบความสูญเสียระหว่างการลดของเสียกับการลดผลผลิต

การปรับปรุง	ปริมาณการผลิตต่อเดือน (ชิ้น) (1)	ร้อยละการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหล (2)	ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น (ชิ้น) (1) X (2)/100 = (3)	ปริมาณผลผลิตต่อเดือน (ชิ้น) (1)-(3) = (4)	มูลค่าการลดลงของเสีย (บาท/เดือน) B - A = (5) X 10
ก่อนปรับปรุง	280,000	7.42	20,776	259,224 ^A	115,040
หลังปรับปรุง	275,410	1.70	4,682	270,728 ^B	

หมายเหตุ : ต้นทุนการผลิต 10 บาท / ชิ้น

ผลการปรับปรุงพบว่าสามารถลดมูลค่าความสูญเสียจากของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้ถึง 115,040 บาทต่อเดือน

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 การคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ

จากขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดฟองอากาศ สามารถสรุปผลการคัดเลือกปัจจัยได้ ดังนี้

1. ปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองมีทั้งหมด 6 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วในการเลื่อนลงของ Jig Stamping เวลาขณะเคลือบสารพอลิเมอร์บนเฟรมงาน ความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping ความหนืดของสารพอลิเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ออบผิวเฟรมงาน และความเร็วสายพานในการเคลื่อนย้ายเฟรมงานเข้าอบ

2. ผลการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการ Two Proportions พบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศบนผิวเฟรมงานอย่างมีนัยสำคัญคือ ความหนืดสารพอลิเมอร์ และความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping

7.1.2 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ ด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังนี้

1. เมื่อความหนืดสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณฟองอากาศเกิดมากขึ้น เมื่อความหนืดสารพอลิเมอร์ลดลงปริมาณฟองอากาศก็จะเกิดน้อยลงตามลำดับ
2. เมื่อความเร็วในการเลื่อนขึ้นของ Jig Stamping สูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณฟองอากาศเกิดมากขึ้น เมื่อความเร็วลดลงปริมาณฟองอากาศก็จะเกิดน้อยลงตามลำดับ เช่นเดียวกับความหนืดสารพอลิเมอร์
3. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยร่วม พบว่าเกิดอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์กับความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping สามารถหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดฟองอากาศต่ำสุดคือ ระดับความหนืดสารพอลิเมอร์ 61.16 เซนติสโตก และความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

7.1.3 การศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ

จากการศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ สามารถสรุปกลไกการเกิดฟองอากาศของแต่ละปัจจัย ดังนี้

1. จากปัจจัยความหนืดสารพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อความหนืดสารพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อผิวของสารพอลิเมอร์ในร่อง Jig Stamping มีความโค้งเว้ามากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานเมื่อทำการเคลือบผิว ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นบริเวณตรงกลางผิวชิ้นงาน
2. จากปัจจัยความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping พบว่าเมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping สูงจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกตัวระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเคลื่อนขึ้นของ Jig Stamping มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดช่องว่างของอากาศระหว่างผิวของสารพอลิเมอร์กับผิวชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดฟองอากาศบนผิวชิ้นงาน

7.1.4 แนวทางการปรับปรุงและผลหลังจากการปรับปรุง

จากผลการศึกษาปัจจัยด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบทดลอง และการศึกษากลไกของปัจจัยที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเคลือบสารพอลิเมอร์ทั้ง 3 แนวทาง ดังนี้

1. การประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง
2. การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร
3. การเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ของ Jig Stamping

ผลจากการปรับปรุงโดยเปรียบเทียบจำนวนลิวต์ที่เท่ากัน (30 ลิวต์ หรือ 10,080 เฟรม) พบว่า เดิมก่อนการปรับปรุงเกิดปริมาณฟองอากาศร้อยละ 29.20 หลังจากปรับปรุงครั้งแรกโดยประยุกต์ใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมปริมาณฟองอากาศลดลงเหลือร้อยละ 16.86 (ลดลงจากเดิมร้อยละ 12.34) จากนั้นทำการปรับปรุงต่อเนื่องด้วยการปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสาร ปริมาณฟองอากาศลดลงเหลือร้อยละ 6.45 (ลดลงจากเดิมร้อยละ 10.41) และการปรับปรุงด้วยการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping พบว่าสามารถลดปริมาณฟองอากาศเหลือเพียงร้อยละ

1.03 (ลดลงจากเดิมร้อยละ 5.42) จากการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องทั้ง 3 แนวทาง พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียประเภทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากเดิมร้อยละ 7.42 เหลือเพียงร้อยละ 1.70

7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัยมี ดังนี้

1. ในการประชุมเพื่อระดมสมองต้องอาศัยความร่วมมือจากพนักงานแผนกต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ทำให้ต้องมีการจัดตารางเวลาการประชุมล่วงหน้า เพื่อให้พนักงานแต่ละแผนกมีเวลาว่างที่ตรงกัน ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างมากในการติดต่อพนักงานแต่ละแผนก
2. การทดลองตามหลักการออกแบบการทดลองแบบสุ่ม ต้องใช้จำนวนการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อทำการทดลองจะต้องหยุดเครื่องจักรในกระบวนการผลิต ดังนั้นต้องอาศัยการติดต่อสื่อสารกับหัวหน้างานแผนกต่างๆ เพื่อขอความร่วมมือโดยเฉพาะหัวหน้างานฝ่ายผลิต รวมถึงการได้รับความร่วมมือจากแผนกซ่อมบำรุงเครื่องจักรที่ช่วยในการจัดปรับเครื่องจักรเพื่อทำการทดลอง
3. เนื่องจากแม่พิมพ์ Jig Stamping มีราคาแพงทำให้ไม่สามารถออกแบบได้หลายระดับ อีกทั้งการสั่งแบบแม่พิมพ์ต้องได้รับการอนุมัติงบประมาณจากผู้บริหารระดับสูงซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนาน
4. การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์การเคลือบสารจะต้องทำการสั่งซื้ออุปกรณ์ ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนานในการได้รับการอนุมัติงบประมาณจากผู้บริหารระดับสูง
5. เมื่อมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต เช่น การปรับลดความหนืดสารพอลิเมอร์ จะต้องมีการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทุกครั้งโดยแผนกตรวจสอบคุณภาพ ก่อนจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตได้

7.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินงานวิจัย ทางโรงงานควรมีการดำเนินการการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. เนื่องจากการปรับปรุงการผลิตมีผลทำให้เวลาการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้นทางโรงงานควรทำการชดเชยเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วยการลดเวลาการจัดปรับเครื่องจักรของพนักงาน หรือการปรับเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Jig Stamping ในส่วนอื่นๆ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. เนื่องจากความหนืดสารพอลิเมอร์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ และมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นทางโรงงานควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเคมีที่ช่วยปรับความหนืดของสารพอลิเมอร์ ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนจากการใช้สารพอลิเมอร์ได้มาก
3. สำหรับการป้องกันการระเหยของสารพอลิเมอร์ในอ่างของสารละลาย ดังนั้นทางโรงงานควรปรับปรุงโดยจัดทำเป็นระบบปิดเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย ซึ่งอาจจะมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น
4. จากผลการปรับปรุงด้วยการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ Jig Stamping พบว่าปริมาณการเกิดฟองอากาศลดลงมาก ดังนั้นทางโรงงานควรทำการทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับระดับความเร็วของ Jig Stamping ให้สูงขึ้นหรือเข้าใกล้ระดับเดิม ซึ่งการทดลองจะต้องติดตามผลในระยะยาวเนื่องจากการเพิ่มความเร็วของ Jig Stamping อาจมีผลต่อการสึกหรอของชุดอุปกรณ์ได้มากขึ้น และสามารถนำผลจากการศึกษามาใช้ในการกำหนดระยะเวลาการเปลี่ยนชุดอุปกรณ์การเคลือบสาร เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตให้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับวิศวกรรม. เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับวิศวกรรม. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.

จันทรา ยอดมนต์. การสร้างแบบจำลองและการออกแบบไมโครสภาวะการสร้างชิ้นกึ่งฉนวน ซ่อมแซมและคัดแยกของเสียของกระบวนการผลิตชิปแทนทาลัมคาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ชาญชัย บวรโชคชัย. การลดของเสียจากกระบวนการฉีดเทียน โดยประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2545.

ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2545.

เปมิกา สุวรรณมณี. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเฟอร์นิเจอร์ไม้โดยการ
ออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา : โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ, 2548.

เพียงพิศ วงศ์มณีนิล. ผลของอุณหภูมิการผสมขนาดอนุภาคยางใช้แล้วและอัตราส่วนยางใช้แล้ว
ต่อยางมะตอยที่มีต่อสมบัติของสารเคลือบผิวที่ผลิตจากยางใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ภาณุ ชุตเจ็จจิน. การประยุกต์ซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียจากการพ่นสีรองพื้น ในกระบวนการผลิต
กล่องนาฬิการาคาแพง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2544.

อุษณีย์ ถิ่นเกาะแก้ว. การลดของเสียจากกระบวนการผลิตกระป๋องโดยใช้วิธีการซิกซ์ ซิกมา.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Douglas C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments. 5th ed. John Wiley & Sons, 2001.

Liao Tsai. Ming. Preparation and characterization of Ppy/Al₂O₃/Al used as solid-state capacitors for Microsystems-Effect of amount of electricity passed. Taiwan: Chemical and Materials Engineering, National Chin-Yi University of Technology, 2007.

Lopez Lbanez, R., and others. Optimization of spray pyrolysis zirconia coatings on aluminized steel. Spain: Facultad de Ciencias, Universidad de Malaga, 2005.

Roman Jaworski, and others. Characterization of mechanical properties of suspension plasma sprayed TiO₂ coatings using scratch test. Poland: Mechanics, Wroclaw University of Technology, 2007.

ภาคผนวก

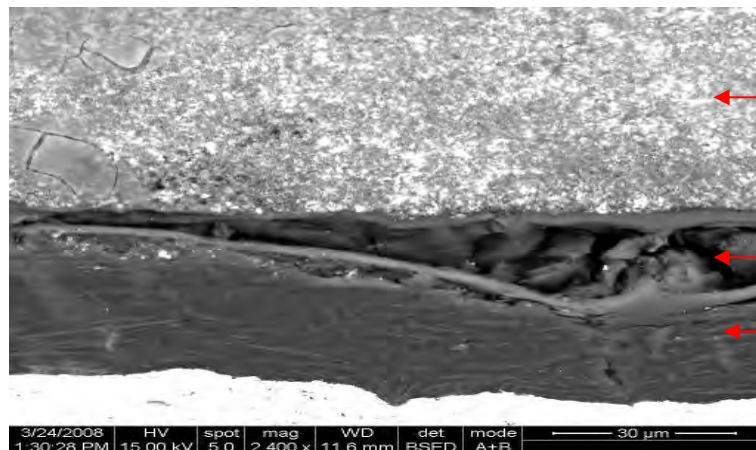
ภาคผนวก ก แสดงภาพตัดขวางภายในชิ้นงานเสียค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล

โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในชั้นพอลิเมอร์



ชั้นซิลเวอร์
ชั้นพอลิเมอร์
ชั้นอะลูมิเนียม

รูปที่ ก1 ภาพตัดขวางภายในชิ้นงานเสียค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล

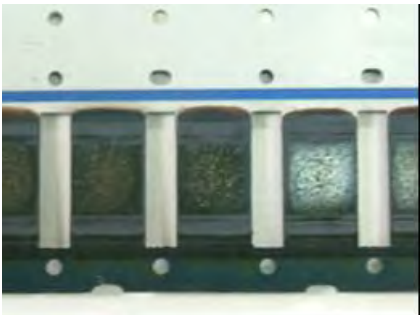

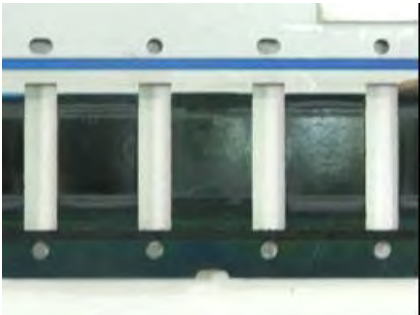


ชั้นอะลูมิเนียม
โพรงอากาศภายในชั้นพอลิเมอร์
ชั้นพอลิเมอร์

รูปที่ ก2 ภาพถ่ายภายในชิ้นงานเสียค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลด้วย Scanning Electron Microscope กำลังขยาย (2400 X)

ภาคผนวก ข แสดงลักษณะผิวชิ้นงานเมื่อปรับความหนืดสารพอลิเมอร์

ตารางที่ ข1 แสดงลักษณะผิวชิ้นงานเมื่อจัดปรับความหนืดสารพอลิเมอร์

ความหนืดสารพอลิเมอร์ (เซนติสโตก)	ลักษณะผิวชิ้นงานหลังเคลือบสารพอลิเมอร์
68.1	
61.16	
54.22	
47.27	

ภาคผนวก ค แสดงผลการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ

ตารางที่ ค1 แสดงลำดับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ

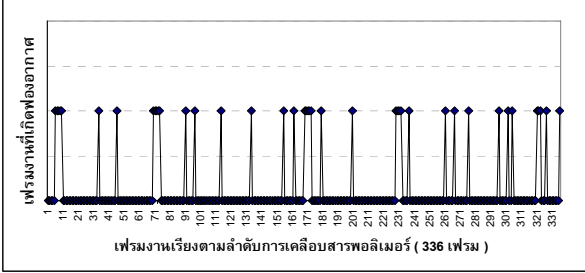
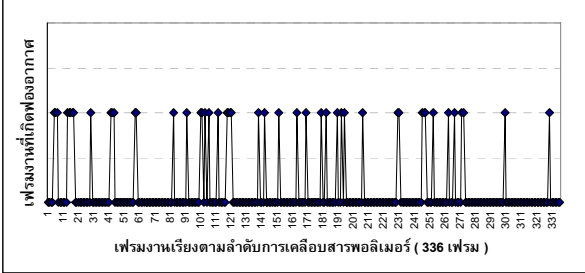
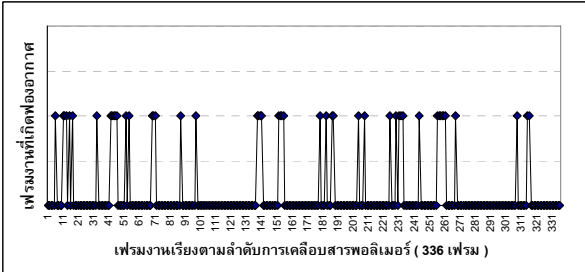
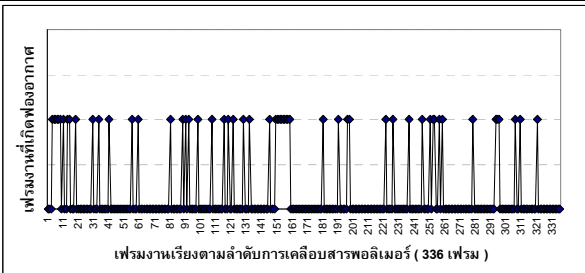
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ความหนืด สารพอลิเมอร์	ความเร็ว Jig Stamping	ร้อยละการเกิด ฟองอากาศ
21	1	1	1	68.1	5	
4	2	1	1	61.16	50	
18	3	1	1	61.16	20	
12	4	1	1	75.05	50	
19	5	1	1	61.16	35	
20	6	1	1	61.16	50	
31	7	1	1	81.99	35	
24	8	1	1	68.1	50	
8	9	1	1	68.1	50	
2	10	1	1	61.16	20	
29	11	1	1	81.99	5	
17	12	1	1	61.16	5	
32	13	1	1	81.99	50	
1	14	1	1	61.16	5	
9	15	1	1	75.05	5	
23	16	1	1	68.1	35	
11	17	1	1	75.05	35	
28	18	1	1	75.05	50	
7	19	1	1	68.1	35	
30	20	1	1	81.99	20	
3	21	1	1	61.16	35	
6	22	1	1	68.1	20	
25	23	1	1	75.05	5	
26	24	1	1	75.05	20	
13	25	1	1	81.99	5	
5	26	1	1	68.1	5	
10	27	1	1	75.05	20	
16	28	1	1	81.99	50	
14	29	1	1	81.99	20	
22	30	1	1	68.1	20	
27	31	1	1	75.05	35	
15	32	1	1	81.99	35	

ตารางที่ ค2 แสดงผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 4 ระดับ

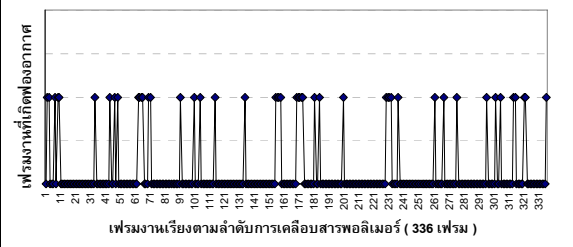
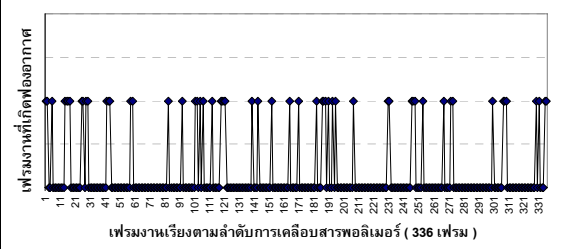
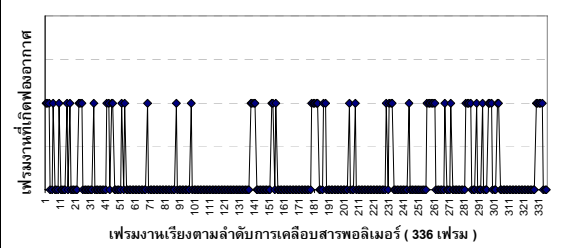
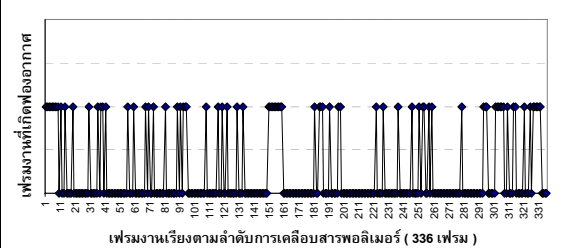
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ความหนืด สารพอลิเมอร์	ความเร็ว Jig Stamping	จำนวนเฟรมงาน ป้อนการทดลอง	จำนวนเฟรมงานที่ เกิดฟองอากาศ	ร้อยละการเกิด ฟองอากาศ
21	1	1	1	68.1	5	336	53	15.77
4	2	1	1	61.16	50	336	57	16.96
18	3	1	1	61.16	20	336	48	14.29
12	4	1	1	75.05	50	336	100	29.76
19	5	1	1	61.16	35	336	49	14.58
20	6	1	1	61.16	50	336	61	18.15
31	7	1	1	81.99	35	336	105	31.25
24	8	1	1	68.1	50	336	76	22.62
8	9	1	1	68.1	50	336	80	23.81
2	10	1	1	61.16	20	336	50	14.88
29	11	1	1	81.99	5	336	83	24.7
17	12	1	1	61.16	5	336	45	13.39
32	13	1	1	81.99	50	336	118	35.12
1	14	1	1	61.16	5	336	41	12.2
9	15	1	1	75.05	5	336	56	16.67
23	16	1	1	68.1	35	336	67	19.94
11	17	1	1	75.05	35	336	89	26.49
28	18	1	1	75.05	50	336	99	29.46
7	19	1	1	68.1	35	336	67	19.94
30	20	1	1	81.99	20	336	81	24.11
3	21	1	1	61.16	35	336	49	14.58
6	22	1	1	68.1	20	336	61	18.15
25	23	1	1	75.05	5	336	59	17.56
26	24	1	1	75.05	20	336	65	19.35
13	25	1	1	81.99	5	336	78	23.21
5	26	1	1	68.1	5	336	46	13.69
10	27	1	1	75.05	20	336	72	21.43
16	28	1	1	81.99	50	336	108	32.14
14	29	1	1	81.99	20	336	94	27.98
22	30	1	1	68.1	20	336	57	16.96
27	31	1	1	75.05	35	336	80	23.81
15	32	1	1	81.99	35	336	99	29.46

ภาคผนวก ง แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศแต่ละเฟรมงาน

ตารางที่ ง1 แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศของการทดลองเชิงแพททอเรียล 4 ระดับ กำหนดความเร็วของ Jig Stamping ที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

<p>ความเร็วในการเคลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	<p>แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ</p>
<p>61.16</p>	
<p>68.1</p>	
<p>75.05</p>	
<p>81.99</p>	

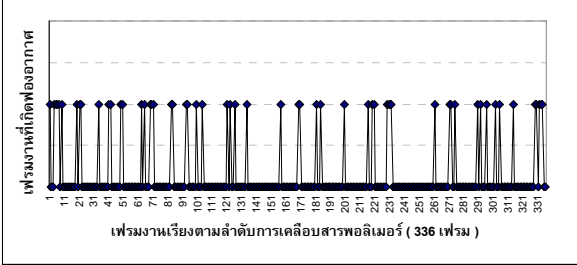
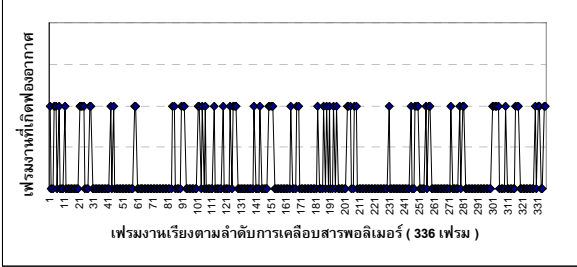
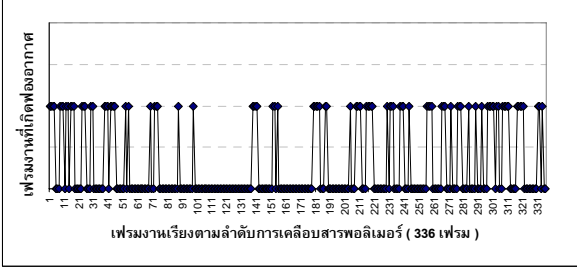
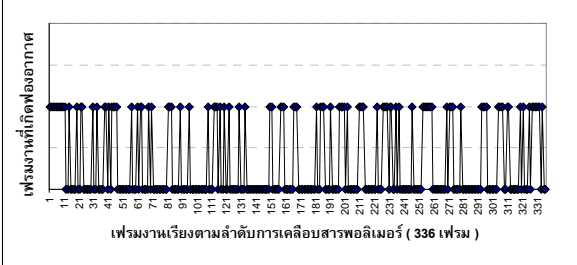
ตารางที่ ง2 แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศของการทดลองเชิงแพททรีเรียล 4 ระดับ กำหนดความเร็วของ Jig Stamping ที่ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

<p>ความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	<p>แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ</p>
<p>61.16</p>	
<p>68.1</p>	
<p>75.05</p>	
<p>81.99</p>	

ตารางที่ ง3 แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศของการทดลองเชิงแพททรีเรียล 4 ระดับ กำหนดความเร็วของ Jig Stamping ที่ 35 มิลลิเมตรต่อวินาที

<p>ความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	<p>แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ</p>
<p>61.16</p>	
<p>68.1</p>	
<p>75.05</p>	
<p>81.99</p>	

ตารางที่ ง4 แสดงลำดับการเกิดฟองอากาศของการทดลองเชิงแพททอเรียล 4 ระดับ กำหนดความเร็วของ Jig Stamping ที่ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

<p>ความเร็วในการเลื่อนขึ้น Jig Stamping 5 มิลลิเมตรต่อวินาที</p>	<p>แสดงลำดับเฟรมงานที่เกิดฟองอากาศ</p>
<p>61.16</p>	
<p>68.1</p>	
<p>75.05</p>	
<p>81.99</p>	

ภาคผนวก จ แสดงลักษณะเครื่องจักรเคลือบสารพอลิเมอร์



รูปที่ ๑1 หน้าจอ Monitor สำหรับการปรับเครื่องเคลือบสารพอลิเมอร์



รูปที่ ๑2 ชุดอุปกรณ์การเคลือบสารพอลิเมอร์



รูปที่ ๑3 แสดงการเคลื่อนย้ายเฟรมงานขณะเข้าตู้อบ



รูปที่ ๑4 เครื่องจักรเคลือบสารพอลิเมอร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิทยา นันตชัย เกิดวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดลำปางจบ
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปี พ.ศ. 2546
และเข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549