

การปรับปรุงประสิทธิภาพ ในกระบวนการเคลือบเงินของการผลิตกระจกเงา



พิชาฉาน เวชกิจ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR SILVERING PROCESS
IN MIRROR PRODUCTION



Mr.Pichashan Wetchakit

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงประสิทธิภาพ ในกระบวนการเคลือบเงินของ
การผลิตกระจกเงา

โดย

นายพิชาخان เวชกิจ


สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

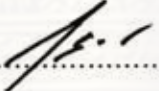
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

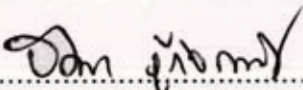
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ้กิจการพานิช


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

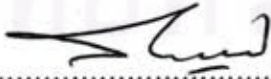

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირุญวงศ์)

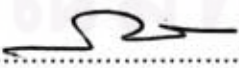
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อก้งวาน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ้กิจการพานิช)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเทือกศึก)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.กวิน สนิธิเพิ่มพูน)

วิชางาน เวชกิจ : การปรับปรุงประสิทธิภาพ ในกระบวนการเคลือบเงินของการผลิต
กระจกเงา. (EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR SILVERING PROCESS IN
MIRROR PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. จิตรา ฐิติการพานิช,
123 หน้า.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเคลือบเงิน ของ
การผลิตกระจกเงา และหาเงื่อนไขของปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบเงิน โดย
อาศัยหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการเคลือบเงินให้มีค่า
สูงขึ้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบเงินทุกตัว จำนวน 9
ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเงินตั้งต้น อัตราการจ่ายสารละลายเงิน ขนาดของหัว
สเปรย์ จำนวนของหัวสเปรย์ การจัดวางตำแหน่งหัวสเปรย์ ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์
อุณหภูมิของน้ำ DI ความดันของน้ำ DI และคุณภาพน้ำ DI

จากการวิเคราะห์เบื้องต้น ได้ตัดปัจจัยความเข้มข้นของสารละลายเงินตั้งต้นซึ่งเป็นปัจจัย
ตายตัว และตัดปัจจัยอุณหภูมิของน้ำ DI และคุณภาพน้ำ DI ซึ่งเป็นปัจจัยทิศทางเดียวออก อีกทั้ง
ได้ตัดปัจจัยทั้ง 3 ตัวที่เกี่ยวกับหัวสเปรย์ออก เนื่องจากมูลค่าการลงทุนสูงและใช้เวลาตั้งช้อนาน
จึงพิจารณาปัจจัยที่เหลือเพียง 3 ปัจจัย และนำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์
โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทุกด้านที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบเงิน และทำการศึกษาวิเคราะห์หาปัจจัย
และเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลอง เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตต่อไป

จากผลการทดสอบด้านต่างๆของการเคลือบเงิน สามารถสรุปเงื่อนไขสำหรับปัจจัยต่างๆ
ในการเคลือบเงินที่เหมาะสมที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังนี้ คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน
5 ลิตรต่อชั่วโมง ความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปรย์ 13 รอบต่อนาที และความดันของน้ำ DI 3 บาร์
ซึ่งเมื่อนำเงื่อนไขที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง พบว่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินมีค่าสูงขึ้น
จากเดิม 71.3% เป็น 78.9% หรือเพิ่มขึ้น 7.6% และสามารถลดต้นทุนการใช้สารละลายเงินใน
การผลิตได้ 18.32 บาทต่อหน่วยผลิตภัณฑ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา...2552

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

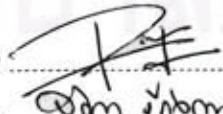
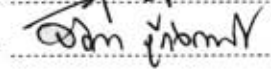
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5071433121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : Silvering of Mirror / Design of Experiment / Completely Randomized Factorial Design

PICHASHAN WETCHAKIT : EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR SILVERING
PROCESS IN MIRROR PRODUCTION. ADVISOR : JITTRA
RUKIJKANPANICH, Ph.D., 123 pp.

The objectives of this research are to study factors that influence the efficiency of silvering process in mirror production and to apply the design of experiment (DOE) technique to determine the appropriate parameters for silvering process. The nine factors studied in the initial phase of the research were the concentration of silver solution, silver solution supply rate, size of spray nozzle, number of spray nozzle, spray nozzle configuration, frequency of moving spray bar, temperature of DI water, DI water pressure and quality of DI water. From the initial run, fixed concentration of silver solution, temperature of DI water and quality of DI water, which are one-way factors, are eliminated from this analysis. In addition, 3 more factors relating to spray nozzle are also eliminated from this analysis because of high cost of investment. Consequently, there are only 3 main factors that are applied completely randomized factorial design which determines all characteristics of Silvering process and verifies factors and optimal conditions from experiment used as a standard of silvering process. Based on the results, the appropriate factors and conditions for silvering process, with $0.05 = \alpha$ significance level, are silver solution supply rate 5 Liters/hr, frequency of moving spray bar 13 rpm and pressure of DI water 3 Bar. When the recommended conditions are applied in the actual production, the efficiency of silvering process is increased from 71.3% to 78.9% and the material cost of silver solution is decreased 18.32 baht per product unit.

| | |
|--|---|
| Department : Industrial Engineering..... | Student's Signature  |
| Field of Study : Industrial Engineering..... | Advisor's Signature  |
| Academic Year : 2009..... | Co-Advisor's Signature |

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตรา ฐักิจการพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ชี้แนะแนวทางและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกั้วาน ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา, รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก และ รองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ สนิธิเพิ่มพูน กรรมการ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณเรวัตกร กล้าหาญ ผู้จัดการอาวุโสโรงงานผลิตกระดาษ ที่ได้ให้คำแนะนำ การสนับสนุน และความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณนพดล ไรจนรัตน์ นางกฤษ วิศวกรฝ่ายกระดาษ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดลองจนสำเร็จลุล่วง ตลอดจนพนักงานของโรงงานกระดาษ และฝ่ายไฟฟ้าทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง เพื่อนนิสิต และท่านที่มีได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายนี้หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ ที่จะนำไปเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ณ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ข้อมูลบริษัทตัวอย่าง..... | 2 |
| 1.3 การสำรวจปัญหา และมูลเหตุจูงใจ..... | 14 |
| 1.4 วัตถุประสงค์ของการดำเนินการวิจัย..... | 19 |
| 1.5 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย..... | 19 |
| 1.6 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... | 19 |
| 1.7 แผนดำเนินการในการทำงานวิจัย..... | 20 |
| 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 20 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 21 |
| 2.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ..... | 21 |
| 2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนเงินบนกระแจะงา..... | 40 |
| 2.3 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 44 |
| 3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง..... | 46 |
| 3.1 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 46 |
| 3.2 การเลือกปัจจัยที่จะนำมาศึกษา และระดับของแต่ละปัจจัย..... | 48 |
| 3.3 การวัดประสิทธิภาพในการเคลื่อนเงิน..... | 51 |
| 3.4 รูปแบบการทดลอง..... | 52 |
| 3.5 สรุปแผนการออกแบบการทดลอง..... | 53 |

| บทที่ | หน้า |
|---------------------------------|------|
| 4 | 57 |
| 4.1 | 57 |
| 4.2 | 58 |
| 4.3 | 61 |
| 4.4 | 62 |
| 5 | 66 |
| 5.1 | 66 |
| 5.2 | 90 |
| 5.3 | 93 |
| 6 | 95 |
| 6.1 | 95 |
| 6.2 | 96 |
| 6.3 | 97 |
| รายการอ้างอิง..... | 99 |
| ภาคผนวก..... | 101 |
| ภาคผนวก ก | 102 |
| ภาคผนวก ข | 104 |
| ภาคผนวก ค | 107 |
| ภาคผนวก ง | 111 |
| ภาคผนวก จ | 115 |
| ภาคผนวก ฉ | 118 |
| ภาคผนวก ช | 122 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 123 |

| ตารางที่ | | หน้า |
|---------------|---|------|
| ตารางที่ 1.1 | ต้นทุนต่อหน่วยและต้นทุนรวมของวัตถุดิบในการผลิตกระจกเงา..... | 14 |
| ตารางที่ 2.1 | การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน..... | 34 |
| ตารางที่ 2.2 | การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ One-way ANOVA | 36 |
| ตารางที่ 2.3 | การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับการทดลองแบบสุ่มในบล็อก..... | 37 |
| ตารางที่ 2.4 | การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Two-Factor Fixed effect Model | 39 |
| ตารางที่ 3.1 | ปัจจัยและระดับของปัจจัย..... | 51 |
| ตารางที่ 3.2 | ลำดับการทดลอง..... | 55 |
| ตารางที่ 3.3 | เมตริกซ์การออกแบบ..... | 56 |
| ตารางที่ 4.1 | คุณลักษณะการเคลือบเงิน ที่ต้องการตามมาตรฐานการผลิตกระจกเงา..... | 65 |
| ตารางที่ 5.1 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก..... | 68 |
| ตารางที่ 5.2 | ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก..... | 70 |
| ตารางที่ 5.3 | ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปร์ย์..... | 72 |
| ตารางที่ 5.4 | ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความดันน้ำ DI..... | 73 |
| ตารางที่ 5.5 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง..... | 76 |
| ตารางที่ 5.6 | ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง..... | 78 |
| ตารางที่ 5.7 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน..... | 81 |
| ตารางที่ 5.8 | ผลการทดสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการสะท้อนแสง..... | 83 |
| ตารางที่ 5.9 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน..... | 86 |
| ตารางที่ 5.10 | ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน..... | 89 |
| ตารางที่ 5.11 | การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง..... | 91 |
| ตารางที่ 5.12 | การประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม..... | 92 |
| ตารางที่ 5.13 | ผลการทดลองผลิตจริง..... | 93 |

สารบัญภาพ

ญ

| รูปที่ | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 1.1 | สถิติปริมาณการขายกระจกเงาระหว่างปี 2534 - 2550..... | 5 |
| รูปที่ 1.2 | สัดส่วนของส่วนแบ่งตลาดกระจกเงาในประเทศไทย 2550..... | 5 |
| รูปที่ 1.3 | แผนผังการจัดโครงสร้างองค์กรของบริษัทตัวอย่าง..... | 7 |
| รูปที่ 1.4 | แผนผังโครงสร้างองค์กรภายในฝ่ายกระจกเงา..... | 8 |
| รูปที่ 1.5 | กระบวนการผลิตกระจกเงา..... | 11 |
| รูปที่ 1.6 | ต้นทุนต่อหน่วยและต้นทุนรวมของวัตถุดิบในการผลิตกระจกเงา..... | 15 |
| รูปที่ 1.7 | แผนภูมิพาเรโตของราคาวัตถุดิบในการผลิตหนึ่งหน่วยของกระจกเงา..... | 15 |
| รูปที่ 1.8 | ประสิทธิภาพการเคลื่อนเงินในการผลิตกระจกเงาของบริษัทตัวอย่าง เทียบกับบริษัทในเครือ..... | 17 |
| รูปที่ 1.9 | มูลค่าสารละลายเงิน ที่สูญเสียดังแต่ปี 2548 - 2551..... | 18 |
| รูปที่ 2.1 | อิทธิพลที่ไม่มีผล และอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์..... | 21 |
| รูปที่ 2.2 | ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ..... | 23 |
| รูปที่ 2.3 | อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลและมีผล..... | 30 |
| รูปที่ 2.4 | ปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการปรับสภาพผิวกระจก..... | 40 |
| รูปที่ 2.5 | ความแตกต่างของพื้นผิวกระจก ก่อนและหลังการกระตุ้นพื้นผิว..... | 41 |
| รูปที่ 2.6 | ปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการเคลือบเงิน..... | 41 |
| รูปที่ 3.1 | ความหมายของเบอร์หัวสเปร์ย์..... | 47 |
| รูปที่ 3.2 | รูปการจัดวางหัวสเปร์ย์..... | 47 |
| รูปที่ 4.1 | กระจกพื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง..... | 57 |
| รูปที่ 4.2 | ปัจจัยทั้ง 3 ตัวที่ทำการศึกษา..... | 58 |
| รูปที่ 4.3 | ตัวเลขมิเตอร์ตั้งต้นตอนเริ่มการทดลอง..... | 58 |
| รูปที่ 4.4 | การปล่อยกระจกพื้นฐานเข้าสู่การทดลอง..... | 59 |
| รูปที่ 4.5 | กระจกทดลองระหว่างการทดสอบเคลือบเงิน..... | 59 |
| รูปที่ 4.6 | การนำกระจกทดลองออกจากการทดสอบและการจัดเก็บ..... | 60 |
| รูปที่ 4.7 | ตำแหน่งและการตัดแบ่งชิ้นทดสอบ..... | 61 |
| รูปที่ 4.8 | ชิ้นทดสอบแบบ A และแบบ B..... | 62 |
| รูปที่ 4.9 | การตัดแบ่งชิ้นทดสอบและการจัดเก็บ..... | 62 |
| รูปที่ 4.10 | การเปลี่ยนสีขณะทำการไตรเตรต..... | 63 |
| รูปที่ 4.11 | การวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่องโครมามิเตอร์..... | 64 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ | | |
| รูปที่ 5.1 | การกระจายของข้อมูลของส่วนตักค้างการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก.. | 66 |
| รูปที่ 5.2 | ส่วนตักค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลของการทดสอบปริมาณเงินบน ผิวกระจก..... | 67 |
| รูปที่ 5.3 | ส่วนตักค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบสนองการทดสอบปริมาณเงิน บนผิวกระจก..... | 67 |
| รูปที่ 5.4 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก..... | 71 |
| รูปที่ 5.5 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก ระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความถี่ราวสเปร์ย์..... | 72 |
| รูปที่ 5.6 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก ระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความดันน้ำ DI | 73 |
| รูปที่ 5.7 | กราฟแสดงการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง..... | 74 |
| รูปที่ 5.8 | ค่าส่วนตักค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลของการทดสอบค่าการสะท้อนแสง.... | 75 |
| รูปที่ 5.9 | ส่วนตักค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบสนองการทดสอบปริมาณเงิน บนผิวกระจก..... | 75 |
| รูปที่ 5.10 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง..... | 78 |
| รูปที่ 5.11 | กราฟการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการ เคลือบเงิน..... | 79 |
| รูปที่ 5.12 | ส่วนตักค้างกับลำดับการเก็บข้อมูลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ การเคลือบเงิน..... | 80 |
| รูปที่ 5.13 | ส่วนตักค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ การเคลือบเงิน..... | 80 |
| รูปที่ 5.14 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการ เคลือบเงิน..... | 84 |
| รูปที่ 5.15 | กราฟการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน..... | 85 |
| รูปที่ 5.16 | ค่าส่วนตักค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลการทดสอบค่าประสิทธิภาพ การเคลือบเงิน..... | 85 |
| รูปที่ 5.17 | ส่วนตักค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบการทดสอบค่าประสิทธิภาพ การเคลือบเงิน..... | 86 |
| รูปที่ 5.18 | กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน.... | 89 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในการดำเนินธุรกิจในปัจจุบันนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ธุรกิจทั้งหลายจะต้องเร่งพัฒนา และปรับปรุงตัวเองให้สามารถต่อสู้แข่งขันกับผู้ผลิตในอุตสาหกรรมเดียวกันกับตนให้ได้ จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ผู้บริหารจะต้องคิดค้นกลยุทธ์ต่างๆในการลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นแนวคิดเกี่ยวกับต้นทุนและความสูญเสียจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะนำสู่การบรรลุเป้าหมายในการแข่งขันให้ได้

สิ่งที่ผู้ผลิตจะต้องทำให้ได้ก็คือ พยายามลดความสูญเสีย (Lost) ให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งการลดความสูญเสีย คือ การลดสิ่งต่างๆในการปฏิบัติงาน โดยที่ไม่ทำให้คุณค่าหรือคุณภาพของสินค้าหรือบริการของบริษัทลดลง ซึ่งได้แก่

- (1) การตรวจสอบ
- (2) การจัดเก็บ
- (3) การขนย้าย
- (4) การเคลื่อนไหว
- (5) การผลิตมากเกินไป
- (6) การผลิตของเสีย
- (7) การรอคอย

ทั้ง 7 ประการนี้เป็นความสูญเสียที่ยิ่งใหญ่ในสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งต้องพยายามขจัดให้หมดไป ผู้บริหารสามารถค้นหาความสูญเสียเหล่านี้ได้ โดยการสังเกตการปฏิบัติงานในบริษัทของตนแล้วตั้งคำถามว่า การทำเช่นนี้เป็นกรเพิ่มคุณค่าหรือเพิ่มต้นทุนหรือไม่ แล้วทำการพิจารณาอย่างเป็นรูปธรรมจะทำให้สามารถขจัดความสูญเสียให้ลดลง และช่วยให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้ในที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ข้อมูลบริษัทตัวอย่าง

บริษัทตัวอย่างเป็นบริษัทที่ผลิตกระจกขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย โดยมีผลิตภัณฑ์กระจกหลากหลายประเภท ที่ลูกค้าสามารถเลือกได้ตามความต้องการของวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน โดยประเภทของผลิตภัณฑ์กระจก แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1.) กระจกแผ่นเรียบทั่วไป เป็นกระจกลำดับพื้นฐานซึ่งได้จากกระบวนการหลอม สามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

1.1 กระจกแผ่นเรียบใส เป็นกระจกใสที่ผลิตจากวัตถุดิบภายในประเทศ ซึ่งประกอบไปด้วยทรายแก้ว (Silica sand) หินโดโลไมท์ (Dolomite) หินฟันม้า (Feldspar) และเศษกระจก (Cullet) รวมกับวัตถุดิบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จำพวกโซดาแอช หินปูน และโซเดียมซัลเฟต ด้วยกระบวนการผลิตกระจกโฟลท ทำให้ได้กระจกใสที่มีคุณภาพดีเยี่ยม ผิวทั้งสองด้านจะเรียบสนิท ทำให้ภาพการมองเห็นชัดเจนไม่บิดเบี้ยว

1.2 กระจกแผ่นเรียบสีตัดแสง เป็นกระจกสีที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตกระจกโฟลท เช่นเดียวกับกระจกใส แต่จะมีการเติมวัตถุดิบเพื่อทำให้เกิดเป็นสีต่างๆ กระจกโฟลทชนิดนี้มีด้วยกัน 6 สี ประกอบด้วย กระจกสีชาอ่อน กระจกสีชาดำ กระจกสีฟ้าเข้ม กระจกสีฟ้าอ่อน กระจกสีเขียว และกระจกสีบรอนซ์

1.3 กระจกผนังอาคาร เป็นกระจกแผ่นเรียบใสอย่างหนาและขนาดใหญ่ ที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างผนังกระจกสูงจากพื้นถึงเพดาน ผลิตโดยนำกระจกใสอย่างหนามาตัดและฝนขอบด้วยเครื่องจักรพิเศษ

1.4 กระจกฝ้า เป็นกระจกที่ผลิตโดยกระบวนการพ่นทรายไปที่ด้านหนึ่งของกระจกใสเพื่อให้เกิดเป็นฝ้ามัว ไม่สามารถมองเห็นได้ แต่แสงสามารถส่องผ่านไปได้

1.5 กระจกบานเกล็ด เป็นกระจกขนาดเล็กที่นำมาใช้ทำหน้าต่างบานเกล็ด ผลิตโดยใช้กระจกใสมาตัดและฝนขอบกลม

2.) กระจกแปรรูป เป็นกระจกที่ถูกนำมาแปรรูป จากกระจกแผ่นเรียบพื้นฐาน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่าง เป้าหมายก็เพื่อเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

2.1 กระจกเงา เป็นกระจกที่ผลิตโดยนำกระจกแผ่นเรียบมาผ่านกระบวนการเคลือบเงิน ให้ภาพสะท้อนที่คมชัดเหมือนจริง และตรงต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งาน ซึ่งผลิตด้วยกันทั้งหมด 5 สี คือ กระจกเงา ใส ชาอ่อน ชาดำ เขียว และฟ้า

2.2 กระจกสะท้อนแสง ผลิตโดยการเคลือบกระจกแผ่นเรียบด้วยโลหะในระบบสุญญากาศ เหมาะสำหรับนำมาใช้ทำผนังกระจก การผสมตัวเคลือบโลหะและความหนาของฟิล์มที่ต่างกัน จะทำให้ได้โทนสี และคุณสมบัติการกันความร้อนที่ต่างกัน

2.3 กระจกนิรภัยอาคารสูง เป็นกระจกแผ่นเรียบที่ผ่านการให้ความร้อนสูงและเป่าลมให้เย็นลงทันที ผลิตโดยกระบวนการเทมเปอร์ (Temper) สามารถทนต่อแรงกระแทกและแรงอัดลมได้มากกว่ากระจกธรรมดา 3-5 เท่า ในความหนาเดียวกัน เมื่อกระจกแตกจะกลายเป็นชิ้นเล็กๆ จึงช่วยลดอันตรายและการบาดเจ็บจากเศษกระจกได้

2.4 กระจกฮีตสเตรงเทน เป็นกระจกแผ่นเรียบที่ผ่านการให้ความร้อนสูง และควบคุมอัตราห้วงในการเป่าลมเย็นในกระบวนการเทมเปอร์ ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงเป็น 2 เท่าของกระจกทั่วไป ลักษณะการแตกจะคล้ายกับกระจกทั่วไป แต่จะยังคงติดอยู่ในกรอบ

2.5 กระจกฉนวนความร้อน เป็นกระจก 2 แผ่นหรือมากกว่า ที่ผลิตโดยกระบวนการทำกระจกฉนวน สามารถกันเสียง และประหยัดพลังงานได้มากกว่ากระจกทั่วไป

2.6 กระจกนิรภัยหลายชั้น เป็นกระจก 2 แผ่นหรือมากกว่า ที่ถูกนำมาผลิตโดยกระบวนการนำฟิล์มใสหรือฟิล์มสีลวดลายต่างๆมาแทรกห้วงกระจกแต่ละแผ่น เพื่อให้มีความสวยงาม และเมื่อกระจกแตกฟิล์มจะช่วยยึดเศษกระจกแต่ละชั้น จึงช่วยลดอันตรายและการบาดเจ็บจากเศษกระจกได้

ในงานวิจัยครั้งนี้จะจำกัดขอบเขตเฉพาะการศึกษาในฝ่ายผลิตกระจกเงา ซึ่งทำการผลิตกระจกแปรรูปจากกระจกแผ่นเรียบ โดยผ่านกระบวนการเคลือบผิวทางเคมีให้เกิดเป็นชั้นสะท้อนของภาพ ซึ่งกระจกเงาที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ในการสะท้อนของภาพที่เสมือนจริงไม่บิดเบี้ยว มีสีเป็นธรรมชาติ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่สูง และมีความคงทนต่อสภาพและสภาวะแวดล้อมในการใช้งานได้เป็นอย่างดี

ผลิตภัณฑ์กระจกเงา ที่ทำการผลิต สามารถจำแนกตามความหนา ได้เป็นดังนี้

1. กระจกเงาใสทั่วไป ความหนา 2, 3, 5 และ 6 มม.
2. กระจกเงาใสบางพิเศษ ความหนา 0.95, 1.00 และ 1.25 มม.

โดยผลิตภัณฑ์กระจกเงามีลักษณะการใช้งาน โดยแบ่งตามกลุ่มของตลาดได้ดังนี้

- ประเภทสุขภัณฑ์ห้องน้ำ (Mirror for sanitary ware market)
- ประเภทเฟอร์นิเจอร์ (Mirror for furniture Market)
- ประเภทตกแต่งภายใน (Mirror for interior and decorate market)
- ประเภทตลับเครื่องสำอาง กล่องเครื่องประดับ กรอบรูป (Mirror for gift shop, cosmetic compact, jewelry box market)
- ประเภทกระจกมองหลังและมองข้างรถยนต์ (Mirror for automotive market)
- ประเภทกระจกสำหรับอุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ (Mirror for Solar Cell)

หน่วยการวัดของผลิตภัณฑ์กระจกเงา

หน่วยวัดของผลิตภัณฑ์กระจกเงา จะคิดตามขนาดของพื้นที่กระจก 100 ตารางฟุต ซึ่งเรียกหน่วยของพื้นที่นี้ว่า **Single Case (S.c/s)** โดยกำหนดให้

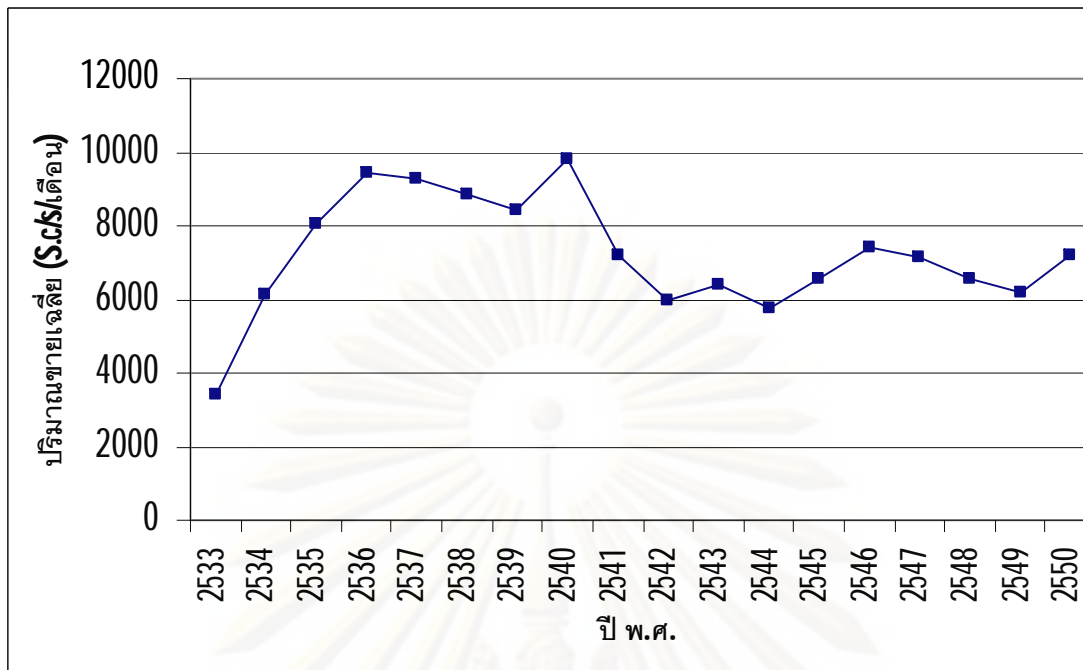
$$1 \text{ Single Case (S.c/s)} = 100 \text{ ตารางฟุต}$$

การตลาด

ลูกค้าของบริษัทฯ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

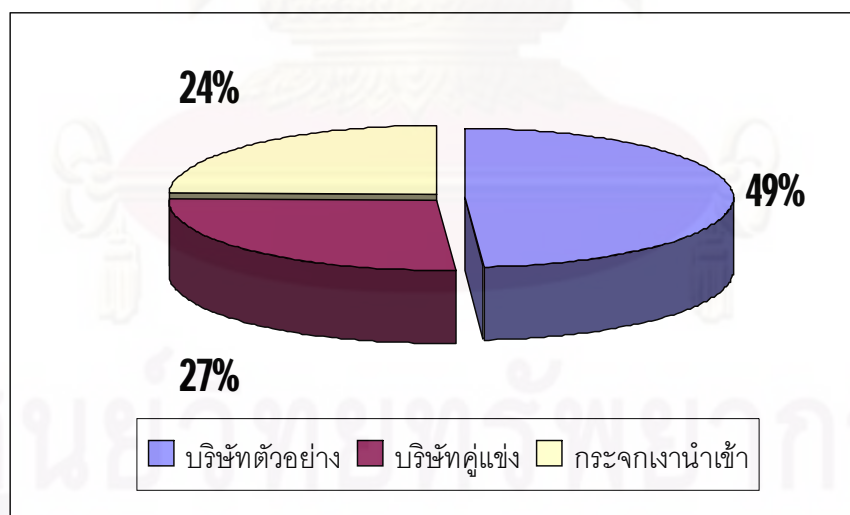
- (1) ผู้จัดจำหน่ายภายในประเทศ
- (2) ผู้แปรรูปกระจก

ตลาดการค้าของกระจกเงาในปัจจุบันมีเฉพาะตลาดในประเทศ มากกว่าร้อยละ 98 ของกระจกเงาที่ขายจะเป็นกระจกเงาใส ส่วนที่เหลือน้อยกว่าร้อยละ 2 เป็นกระจกเงาสีต่างๆ โดยมีสถิติปริมาณการขายกระจกเงาตั้งแต่ปี 2535 - 2550 แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 มีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดจนกระทั่งปี พ.ศ. 2540 ซึ่งเกิดวิกฤตทางเศรษฐกิจทำให้ยอดขายลดลง ทำให้เกิดปัญหาการตลาดและมีการแข่งขันกันมากขึ้น เป็นผลทำให้ต้องลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง โดยเมื่อผ่านวิกฤตเศรษฐกิจในช่วงปี 2540 - 2544 มาได้ ยอดขายก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สถิติปริมาณการขายกระจกเงาระหว่างปี 2534 - 2550

ส่วนแบ่งตลาดของกระจกเงาในประเทศไทย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือผู้ผลิตกระจกเงาในประเทศ 2 ราย และส่วนที่เหลือคือ กระจกเงาที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งสัดส่วนของส่วนแบ่งตลาดแสดงได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 สัดส่วนของส่วนแบ่งตลาดกระจกเงาในประเทศไทย 2550

โครงสร้างองค์กร

ลักษณะการจัดโครงสร้างองค์กรการบริหารของบริษัทตัวอย่าง แสดงตามแผนผังโครงสร้างองค์กรได้ดังในรูปที่ 1.3 จากโครงสร้างการจัดองค์กร การบริหารระดับสูงสุด คือ ส่วน

ของคณะกรรมการบริหาร รองลงมาคือกรรมการบริหารสายงานต่างๆ ซึ่งจะแบ่งสายงานตามหน้าที่ออกเป็นกอง ฝ่าย และแผนกตามลำดับ ในส่วนของหน่วยงานที่เข้าไปศึกษาปัญหาและทำงานวิจัยในครั้งนี้ สังกัดกองการผลิตกระจกโฟลต ฝ่ายกระจกเงา โดยมีแผนผังการจัดโครงสร้างองค์กรภายในฝ่ายกระจกเงา ดังปรากฏในรูปที่ 1.4 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 หน่วย คือหน่วยผลิตกระจกเงา และหน่วยควบคุมและจัดส่ง มีพนักงานทั้งหมด 38 คน แบ่งเป็นพนักงานประจำ 25 คน และพนักงานผู้รับเหมา 13 คน ซึ่งเป็นพนักงานที่มาจากบริษัทผู้รับเหมาซึ่งทางบริษัทฯ ขอให้จัดหาคนเข้าทำงานโดยส่วนใหญ่เป็น Un-skill labor

วันและเวลาทำงานของพนักงาน มีดังนี้

1. พนักงานประจำ

| | |
|---------------------|----------------------|
| วันทำงาน | จันทร์ ถึง ศุกร์ |
| เวลาทำงาน | 8.00 น. ถึง 17.00 น. |
| วันหยุดประจำสัปดาห์ | วันเสาร์และอาทิตย์ |

2. พนักงานผู้รับเหมา

| | |
|---------------------|--|
| วันทำงาน | จันทร์ถึงศุกร์ และวันเสาร์ที่ 2 และ 4 ของเดือน |
| เวลาทำงาน | 8.15 น. ถึง 16.45 น. |
| วันหยุดประจำสัปดาห์ | วันเสาร์ที่ 1, 3 และ 5 ของเดือน และวันอาทิตย์ |

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตกระจกเงา มีขั้นตอนในการผลิตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.5







รูปที่ 1.5 กระบวนการผลิตกระจกเงา

กระบวนการผลิตกระจกเงา เริ่มต้นจากการนำกระจกเบสิกที่ผ่านการคัดเลือกคุณภาพเป็นพิเศษจากกระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบ (Float process) ความหนา 2, 3, 5, และ 6 มม. ทั้งกระจกใสและกระจกสีต่างๆ ถูกลำมาป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการตรวจเช็คคุณภาพเบื้องต้นของกระจกเบสิกทุกแผ่น เพื่อคัดแยกรอยตำหนิที่สามารถเห็นได้ชัดเจน ได้แก่ กระจกแตก รอยกะเทาะ รอยขีดข่วน เป็นต้น ซึ่งกระจกเสียเหล่านี้จะต้องไม่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตกระจกเงา

จากนั้นกระจกเบสิกจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวด้านบนด้วยการฉีดล้างด้วยน้ำ และขัดด้วยแปรงขัดแบบโรลเลอร์ (Roller brush) เพื่อล้างเอาสิ่งสกปรกและผงพลาสติกที่ใช้รอยคั่นระหว่างแผ่นกระจกออก แล้วขัดด้วยซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide) และแปรงขัดแบบจานหมุน (Disk brush)

ผิวกระจกจะถูกฉีดล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อไล่เอาสิ่งสกปรกและสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดผิวกระจกออกให้หมด แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องล้าง ขัดด้วยแปรงขัดแบบโรลเลอร์ และฉีดล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เพื่อเตรียมผิวกระจกให้พร้อมก่อนการเคลือบด้วยสารเคมี

ผิวกระจกจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดประจุไฟฟ้าและการยึดเกาะของชั้นเคลือบเงินกับผิวกระจก ด้วยการสเปรย์สารละลายดีบุกคลอไรด์ (Tin (II) chloride solution) จากนั้นสเปรย์ทับด้วยสารละลายพัลลาเดียมคลอไรด์ (Palladium chloride solution) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของชั้นเคลือบเงิน สเปรย์ทับด้วยสารละลายเงิน (Silver solution) และสารละลายรีดิวเซอร์ (Reducer solution) เพื่อให้เกิดเป็นชั้นสะท้อนของภาพ แล้วสเปรย์ทับด้วยสารละลายดีบุกคลอไรด์ (Tin (II) chloride solution) เพื่อป้องกันการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของชั้นเคลือบเงิน แล้วสเปรย์ทับด้วยสารละลายซิลเลน (Silane solution) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของชั้นเคลือบสีอีกชั้นหนึ่ง แล้วฉีดล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

กระจกเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (High pressure blower) เพื่อเป่าลมไล่น้ำให้แห้ง อบไล่ความชื้นและเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะของชั้นเคลือบโลหะกับผิวกระจกให้มากขึ้น ด้วยหลอด

ความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) โดยให้ความร้อนจากด้านล่างของแผ่นกระจก แล้วเป่าลมลดอุณหภูมิ

กระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นโลหะเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการเคลือบสีชั้นที่ 1 ด้วยการเคลื่อนที่ผ่านเครื่องทำมานสี (Curtain coater machine) ด้วยความเร็วสูงที่ 80 เมตรต่อนาที ซึ่งความเร็วของเครื่องจักรปกติจะเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที วัตถุประสงค์ของขั้นตอนการเคลือบสีนี้เพื่อป้องกันความเสียหายทางคุณภาพที่จะเกิดจากการปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical protection) กับชั้นเคลือบเงิน จากนั้นอบให้แห้งด้วยหลอดความร้อนอินฟราเรด โดยให้ความร้อนที่ด้านบนของแผ่นกระจก แล้วเป่าลมลดอุณหภูมิ

จากนั้นกระจกจะเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องทำมานสีอีกครั้ง เพื่อเคลือบสีชั้นที่ 2 เพื่อให้เกิดความคงทนทางกายภาพต่อสภาพการใช้งาน (Physical protection) จากนั้นอบไล่ตัวทำลายของสี ด้วยหลอดความร้อน (Resistance heater) โดยให้ความร้อนที่ด้านล่างของแผ่นกระจก และอบให้แห้งด้วยหลอดความร้อนอินฟราเรด โดยให้ความร้อนที่ด้านบนของแผ่นกระจก แล้วเป่าลมลดอุณหภูมิ

ผิวกระจกด้านล่างที่ไม่ได้เคลือบสารเคมี เคลื่อนที่ผ่านโรลเลอร์แบบฟองน้ำ (Sponge roller) ที่ดูดซับสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride solution) ชัดด้วยแปรงขัดแบบโรลเลอร์ ฉีดล้างด้วยน้ำ เพื่อล้างผิวด้านล่างให้สะอาด แล้วเป่าลมไล่ น้ำให้แห้ง

ด้านหลังกระจกเงา ด้านที่เคลือบสีจะถูกพิมพ์โลโกมิโรแทค (Mirrotag logo) และรหัสการผลิตที่ใช้บ่งบอกวัน เดือน ปี และเวลาที่ทำการผลิต ด้วยเครื่องอิงค์เจ็ต (Inkjet machine) จากนั้นกระจกเงาจะเคลื่อนที่ออกจากกระบวนการผลิต



พนักงานจะรับกระจกเงา ตรวจสอบคุณภาพ คัดแยกกระจกดี-กระจกเสียเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพ โดยจะสุ่มตัวอย่างกระจกเงา ความถี่ทุกๆ 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณชั้นเคลือบเงิน และวัดความหนาของสี ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นเคลือบสี และทดสอบความคงทนของกระจกเงาตามวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานสากล กระจกดีจะถูกใส่ลงพัลเล็ตให้ครบจำนวนตาม มาตรฐานการบรรจุกระจกแต่ละความหนาและขนาด โดยระหว่างแผ่นกระจกจะคั่นด้วยกระดาษ เพื่อป้องกันความเสียหายของชั้นเคลือบที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่เคลื่อนย้าย พัลเล็ตกระจกเงาที่บรรจุครบจำนวนแล้ว จะต้องติดใบสลิปเพื่อบ่งชี้ว่าเป็นสถานะของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ชนิด ความหนา และขนาดของกระจกเงา จำนวนแผ่นต่อพัลเล็ต

รหัสการผลิต และตราประทับจากฝ่ายควบคุมคุณภาพว่าผ่านการตรวจสอบ หลังจากนั้นจะทำการผูกมัดด้วยเชือกเพื่อป้องกันการเสียหายขณะขนย้าย ซึ่งจะทำการขนส่งด้วยรถโฟล์คลิฟท์ เพื่อนำไปจัดเก็บและเก็บรักษาในอาคารเก็บสินค้า ให้กระจกเงาอยู่ในสภาพที่ดีพร้อมที่จะส่งมอบให้ลูกค้าต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 การสำรวจปัญหา และมูลเหตุจูงใจ

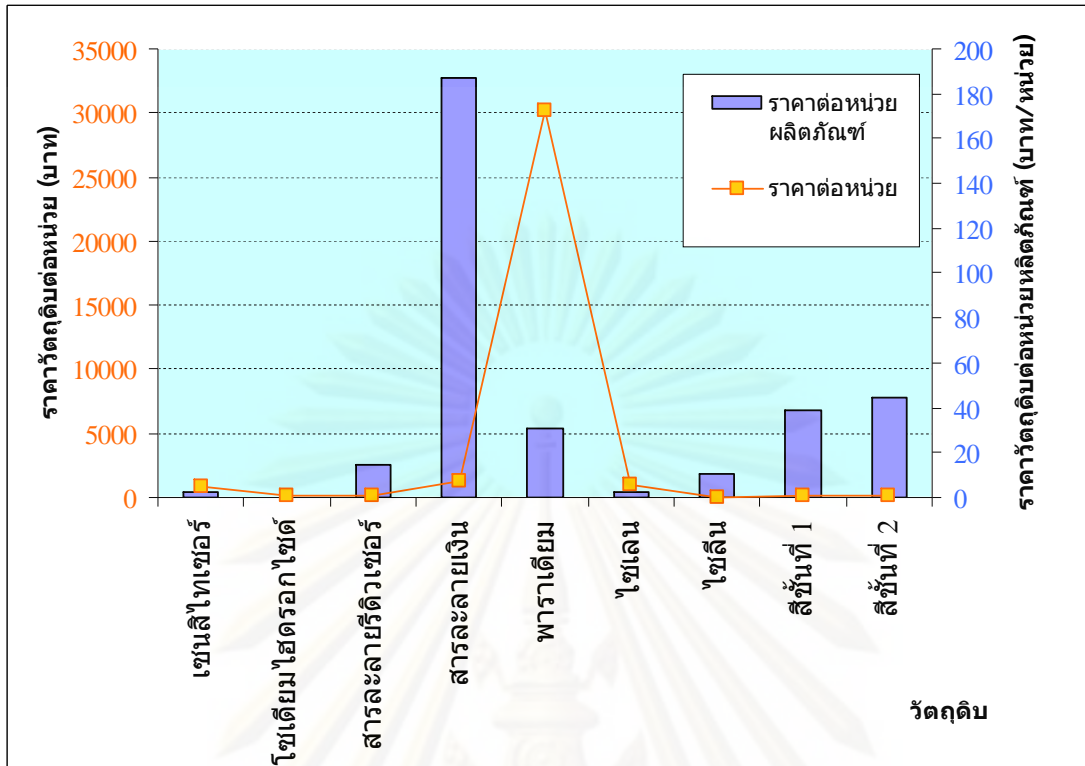
ในกระบวนการผลิตกระจกเงา กระบวนการเคลือบเงิน ถือเป็นกระบวนการที่เปรียบเสมือนหัวใจหลักของการผลิตกระจกเงา คุณภาพของกระจกเงาที่ผลิตได้ โดยเฉพาะคุณภาพในด้านการสะท้อนภาพจะดีเพียงใดก็จะขึ้นอยู่กับขั้นตอนนี้

ดังนั้นสารละลายเงิน (Silver Concentrate Solution) จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญในการผลิตเป็นอย่างมาก เพราะถ้าสารละลายเงินที่ใช้ในการผลิตมีคุณสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสม ก็จะทำให้คุณภาพกระจกที่ผลิตได้ต่ำไปด้วย ดังนั้นสารละลายเงินจึงมีความสำคัญอย่างมากใน **เชิงคุณภาพ**ของกระจกเงาที่ผลิต

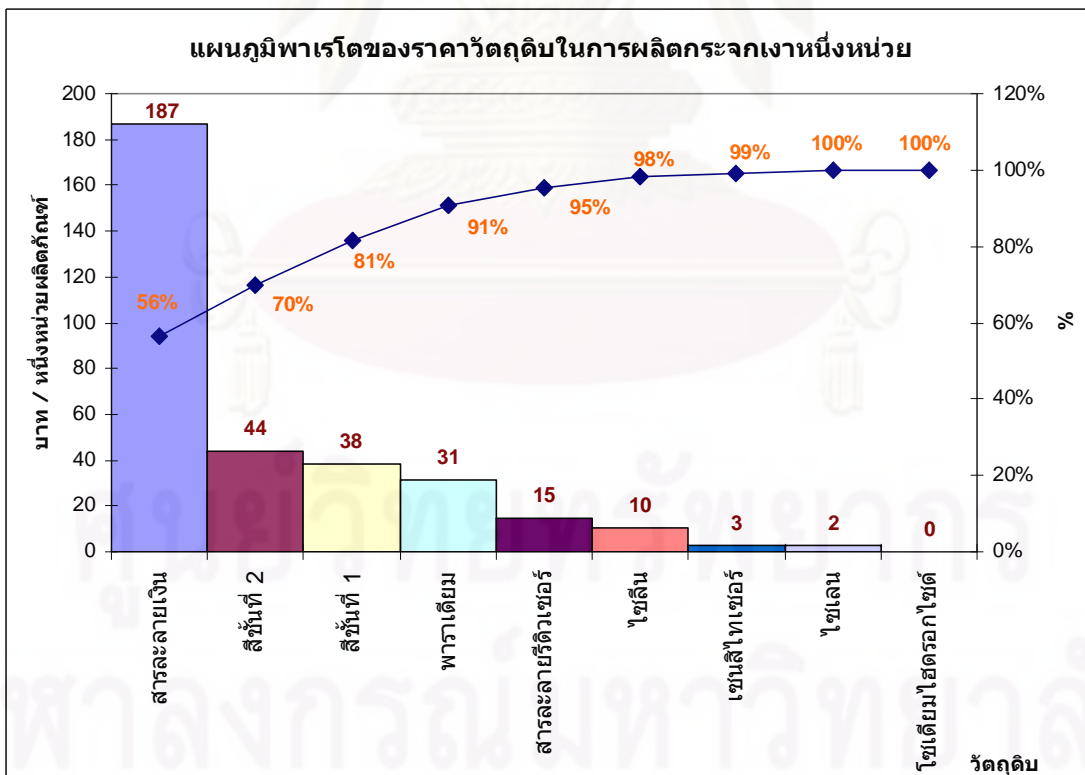
นอกจากในเชิงคุณภาพแล้ว สารละลายเงินก็มีความสำคัญอย่างมากใน **เชิงปริมาณและมูลค่า** เนื่องจากสารละลายเงิน ถือเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าต่อหน่วยสูงเป็นอันดับสอง และมีมูลค่ารวมสูงที่สุดในการผลิตกระจกเงา (ไม่นับมูลค่าของกระจกพื้นฐาน) ซึ่งคิดเป็นมูลค่าถึง **56%** ของต้นทุนต่อหน่วยของกระจกเงา ดังตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.6

ตารางที่ 1.1 ต้นทุนต่อหน่วยและต้นทุนรวมของวัตถุดิบในการผลิตกระจกเงา

| วัตถุดิบ | หน่วย | ราคาต่อหน่วยเฉลี่ย | ราคาเฉลี่ยต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ | อัตราส่วนต้นทุน |
|---|-------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1. สารละลายเซนซิไทเซอร์ (Sensitizer Solution) | ลิตร | 836.33 | 1.777 | 1% |
| 1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | ลิตร | 164.00 | 0.129 | 0% |
| 2. สารละลายรีดิวเซอร์ (Reducer Solution) | ลิตร | 116.16 | 13.961 | 5% |
| 3. สารละลายเงิน (Silver Solution) | ลิตร | 1283.86 | 186.734 | 56% |
| 4. สารละลายพาราดีม (PdCl ₂ Solution) | ลิตร | 30159.91 | 31.059 | 9% |
| 6. ซิแลน (Silane) | ก.ก. | 1030.00 | 1.487 | 1% |
| 7. ไซลีน (Xylene) | ลิตร | 21.58 | 10.392 | 3% |
| 8. สีชั้นที่ 1 (Base Paints) | ก.ก. | 97.68 | 38.487 | 12% |
| 9. สีชั้นที่ 2 (Top Paints) | ก.ก. | 99.99 | 43.178 | 13% |



รูปที่ 1.6 ต้นทุนต่อหน่วยและต้นทุนรวมของวัสดุในการผลิตกระจกเงา



รูปที่ 1.7 แผนภูมิพาเรโตของราคาวัสดุในการผลิตหนึ่งหน่วยของกระจกเงา

จากข้อมูลในรูปที่ 1.6 สามารถวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตของข้อมูลต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตกระจกเงาหนึ่งหน่วย ซึ่งก็จะเห็นได้ว่าสารละลายเงิน เป็นวัตถุดิบที่มีต้นทุน**สูงที่สุด**ในการผลิตกระจกเงา คือมีอัตราส่วนต้นทุนถึง **56%** ในการผลิตกระจกเงาหนึ่งหน่วย ดังรูปที่ 1.7

โดยการเคลือบเงินในการผลิตกระจกเงานั้น จะมีปัจจัยต่างๆที่ใช้วัตถุดิบในกระบวนการเคลือบเงินดังนี้

1. ปริมาณเงินบนผิวกระจก

ปริมาณเงินบนผิวกระจก จะมีผลต่อความสามารถในการสะท้อนแสง ถ้าปริมาณเงินน้อยเกินไปก็จะทำให้ความสามารถการสะท้อนแสงไม่ดี แต่ในทางกลับกัน ถ้าปริมาณเงินบนผิวกระจกมากเกินไป ก็จะได้การสะท้อนแสงที่ดี แต่ก็เกิดการสิ้นเปลืองที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นมาก เนื่องจากสารละลายเงินมีมูลค่าต่อหน่วยสูงมาก ซึ่งโดยทั่วไป ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกจะได้จากการวัดจากผลผลิตจริง โดยค่าตามมาตรฐานจะต้องมีค่ามากกว่า **700** มิลลิกรัมต่อตารางเมตร

2. ความสม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

ค่าความสม่ำเสมอของการเคลือบเงิน จะส่งผลโดยตรงต่อความผิดเพี้ยนของการสะท้อน โดยถ้าการเคลือบเงินไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้การสะท้อนภาพที่เกิดขึ้นผิดเพี้ยนจากความเป็นจริง

ปัญหาการเคลือบเงินที่ไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่นปริมาณสารละลายเงินน้อยเกินไป, การจัดวางหัวสเปรย์ไม่เหมาะสม หรือความถี่ในการเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ไม่เหมาะสม เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไป ปัญหาการเคลือบไม่สม่ำเสมอมักจะถูกแก้โดยการเพิ่มปริมาณการใช้สารละลายเงินให้มากขึ้น เพื่อให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกมีปริมาณมาก เพื่อชดเชยบริเวณที่การเคลือบเกิดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย แต่ก็เกิดการสิ้นเปลืองสูงเช่นเดียวกัน

การวัดค่าความสม่ำเสมอของการเคลือบเงิน จะได้จากการวัดค่าการสะท้อนแสงที่จุดต่างๆบนผิวกระจกตลอดช่วงความกว้างของกระจก แล้วนำค่าทั้งหมดมาคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งตามมาตรฐาน จะต้องไม่เกิน **3 σ**

3. ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (%Silvering Yield)

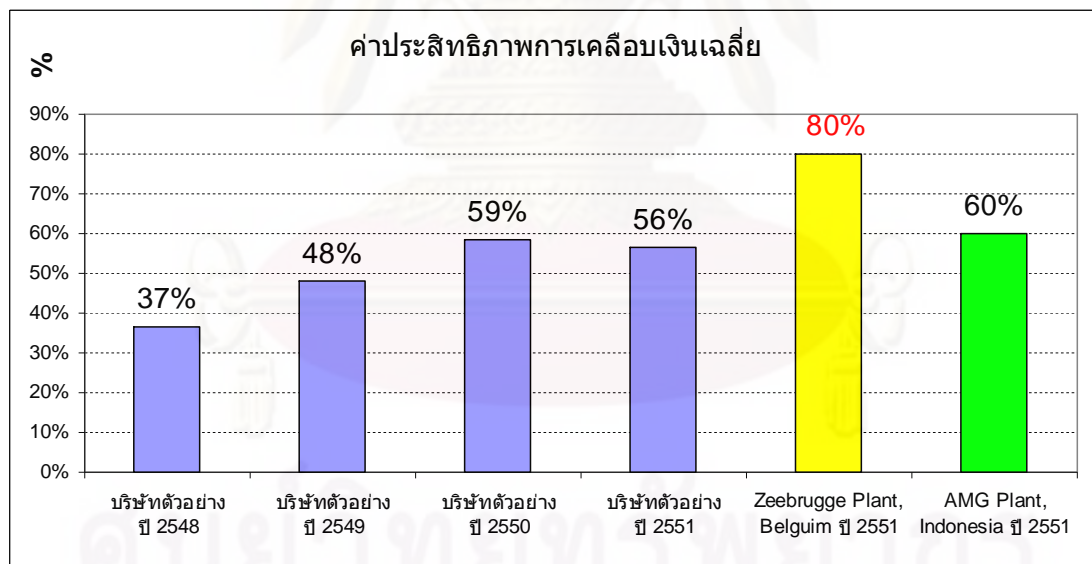
ค่านี้เป็นตัวที่บอกว่า ปริมาณเงินที่ใช้ไปทั้งหมด จะอยู่บนผิวกระจกมากน้อยแค่ไหน ซึ่งจะสะท้อนถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเคลือบเงินว่าเกิดได้ดีเพียงใด มีการสูญเสียมากน้อยแค่ไหน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ Silvering Yield} = (\text{ปริมาณเงินบนผิวกระจก} / \text{ปริมาณเงินที่ใช้ไปทั้งหมด}) \times 100$$

โดยค่าปริมาณเงินที่ใช้ไปทั้งหมด จะได้จากปริมาณสารละลายเงินเข้มข้นที่ใช้ไปตลอดช่วงเวลาการผลิตนั้นๆ

สภาพปัญหาที่พบ

ในการผลิตกระจกเงาของบริษัทตัวอย่างที่ทำการศึกษานั้น จากการศึกษา ก็พบว่า ได้ทำการตั้งค่าปริมาณสารละลายเงินที่ใช้ ให้มีค่าค่อนข้างสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อลดโอกาสในการเกิดของเสีย ทั้งในด้านปริมาณเงินบนผิวกระจกน้อยเกินไป และปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบเงิน โดยยอมให้เกิดการสูญเสียของสารละลายเงินค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อนำข้อมูลต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับสารละลายเงินที่ใช้ไปทำการเปรียบเทียบ (Benchmarking) กับกระบวนการผลิตกระจกเงาของบริษัทในเครือเดียวกัน กระบวนการผลิตและเทคโนโลยีใกล้เคียงกัน ประเภทผลผลิตเดียวกัน และในปีการผลิตเดียวกัน อันได้แก่ โรงงาน AMG ที่อินโดนีเซีย และโรงงาน Zeebrugge ที่เบลเยียม ก็พบว่าค่าประสิทธิภาพการใช้สารละลายเงิน (% Silvering Yield) ของบริษัทตัวอย่าง มีค่าต่ำที่สุด ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ประสิทธิภาพการเคลือบเงินในการผลิตกระจกเงาของบริษัทตัวอย่าง

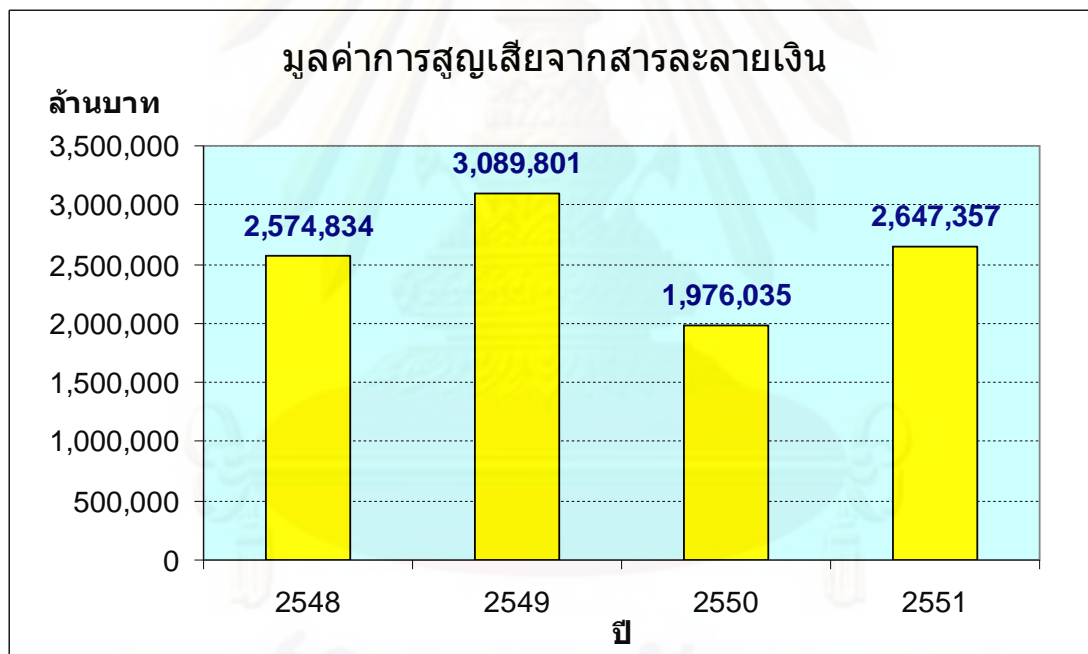
เทียบกับบริษัทในเครือ

จากรูป จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินของบริษัทที่ทำการศึกษา มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับบริษัทอื่นๆ ตลอดช่วงหลายปีที่ผ่านมา คือมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2551 เพียง 56% ในขณะที่การผลิตที่อินโดนีเซียและเบลเยียม มีค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

เงินในปีเดียวกัน 60% และ 80% ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยหลักของปัญหานี้เกิดจาก การที่ยังไม่มีการ กำหนดมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเคลือบเงิน โดยในปัจจุบันจะเป็น การปรับตัวแปรแต่ละตัวแบบลองผิดลองถูกเสียส่วนใหญ่ และมักจะทำการตั้งปริมาณการใช้ สารละลายเงินเงินให้ค่อนข้างสูง เพื่อให้ชดเชยความบกพร่องต่างๆในการเคลือบเงิน จึงทำให้เกิด การสูญเสียสารละลายเงินเป็นปริมาณมาก ซึ่งก็ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิต ณ ปัจจุบัน

โดยเมื่อดูข้อมูล ด้านมูลค่าการสูญเสียสารละลายเงิน ที่ไม่สามารถเก็บกลับมาได้ ตั้งแต่ปี 2548 - 2551 ก็พบว่า การสูญเสียจากสารละลายเงิน มีมูลค่าสูงถึงประมาณ 2 - 3 ล้านบาทต่อปี ที่ ความสามารถในการเก็บกลับเงิน 95 % (Silver Recovery Yield 95%)

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลมูลค่าการสูญเสียสารละลายเงินนั้น อาจจะไม่สอดคล้องกับแนวโน้ม ข้อมูลประสิทธิภาพการเคลือบเงินในปีที่ตรงกัน เนื่องมาจากปัจจัยประกอบหลักๆ ได้แก่ราคาขาย ของตะกอนเงินในแต่ละปีแตกต่างกัน และปริมาณตะกอนเงินที่ถูกขาย อาจจะมีการสะสมข้ามปี ตามความเหมาะสมในปีนั้นๆ



รูปที่ 1.9 มูลค่าสารละลายเงิน ที่สูญเสียตั้งแต่ปี 2548 - 2551

1.4 วัตถุประสงค์ของการดำเนินการวิจัย

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการเคลือบเงิน ในกระบวนการผลิตกระจกเงา

1.5 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย

ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย สรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (Silvering Yield) จะศึกษาทุกปัจจัย เฉพาะที่อยู่ในกระบวนการเคลือบเงินเท่านั้น
2. ประเภทของการผลิตกระจกเงาที่ทำการศึกษา ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการเคลือบเงิน จะศึกษาเฉพาะการผลิตของกระจกเงาที่เกิดขึ้นตามปกติ เฉพาะที่ความหนา 6 มม. เท่านั้น ซึ่งเป็นความหนาที่มีการผลิตเป็นประจำ และมีปริมาณการผลิตมากที่สุด โดยไม่รวมถึงการผลิตกระจกเงาเพื่อการทดลอง หรือการทดสอบวัสดุชนิดใหม่

1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย สรุปได้ดังนี้

1. สัมภาษณ์งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาพทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง
3. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตในปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง โดยเฉพาะข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเคลือบเงิน รวมถึงพารามิเตอร์ในการควบคุมปัจจัยต่างๆในการเคลือบเงิน
4. วิเคราะห์และค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงินในกระบวนการผลิตกระจกเงา
5. ออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม จากปัจจัยต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษา
6. ทำการทดลอง และบันทึกผลการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองที่ได้กำหนดเอาไว้
7. วิเคราะห์และประเมินผลการทดลองทั้งหมดโดยใช้หลักสถิติ และเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนและหลังการปรับปรุง
8. กำหนดมาตรฐานการทำงานในการควบคุมปัจจัย สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.7 แผนดำเนินการในการทำงานวิจัย

| แผนดำเนินการ | ปี 2551 | | | ปี 2552 | | | | | | | | |
|---|---------|------|------|---------|------|-------|-------|------|--|--|--|--|
| | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | | | | |
| 1. สํารวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | | | | | | | | | | | | |
| 1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาพทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง | | | | | | | | | | | | |
| 2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบเงินของโรงงานตัวอย่าง | | | | | | | | | | | | |
| 3. วิเคราะห์และค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน | | | | | | | | | | | | |
| 4. ออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม | | | | | | | | | | | | |
| 6. ทำการทดลอง และบันทึกผลการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองที่ได้กำหนดเอาไว้ | | | | | | | | | | | | |
| 7. วิเคราะห์และประเมินผลการทดลองทั้งหมดโดยใช้หลักสถิติ | | | | | | | | | | | | |
| 8. กำหนดมาตรฐานการทำงานในการควบคุม ปัจจัย สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | | | | | | | | | | | | |
| 9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | | |

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ สรุปได้ดังนี้

1. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ลดปริมาณการสูญเสียสารละลายเงิน ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระจกเงา ซึ่งจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้
2. เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง และประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน หรือมีกระบวนการผลิตที่ใกล้เคียงกัน
3. เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจที่จะทำการศึกษา และนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยหัวข้อหลักๆ ดังต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ
- 2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนเงินบนกระแຈง

2.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ

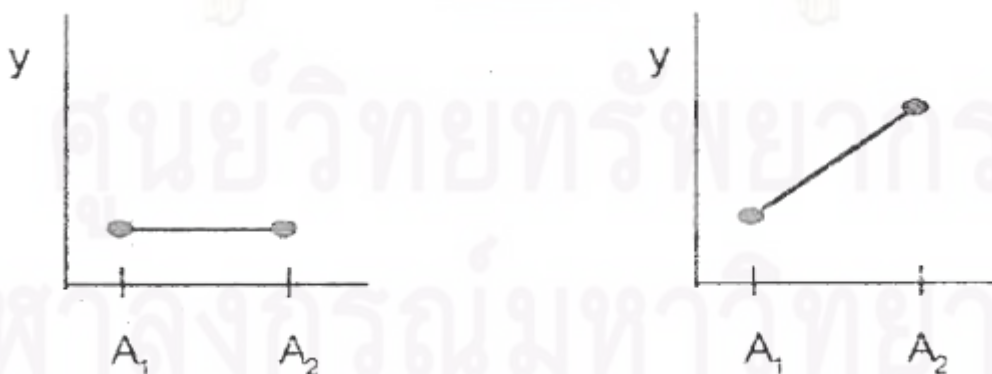
2.1.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) (5)

หมายถึง การออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่า ปัจจัย (Factor) ใด หรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งให้ความสำคัญ (หรือความสนใจ) ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา โดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

ก) เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

ข) เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยใดมีผลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ y คือค่าความแข็งแรง และ A คือเวลาการป่ม ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังกราฟตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.1



(1) ปัจจัย A ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

(2) ปัจจัย A มีผลต่อผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2.1 อิทธิพลที่ไม่มีผล และอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.1.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง (13.7)

1) **ทรีทเมนต์ (Treatment)** คือ สิ่งหรือวิธีที่เราปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) **หน่วยทดลอง (Experiment Unit)** เป็นมาตราหรือหน่วยซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ซึ่งโดยคำจำกัดความแล้ว หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของสิ่งทดลองซึ่งได้รับทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัด อาจผันแปรไปได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง แม้ว่าจะใช้สิ่งทดลองเหมือนกันก็ตาม ในการทำการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องให้คำจำกัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

3) **ปัจจัย (Factor)** ได้แก่ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (**A Particular Class of Related Treatment**) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ

ปัจจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.1) **ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors)** หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง

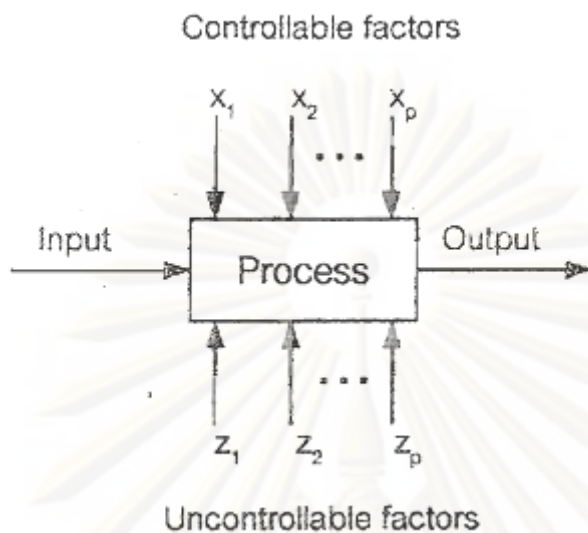
3.2) **ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors)** หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

3.1.1) **ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) หรือ Background Variable** ซึ่งหมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (**Response Variable**) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษ ส่วนใหญ่มักได้แก่ เวลา หรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

3.1.2) **Nuisance Variable** คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน เราสามารถกำจัดอิทธิพลของ **Nuisance Variable** ได้โดยการสุ่ม

4) **ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)** คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (**Sensitivity**) ความเชื่อถือได้ (**Reliability**) การแจ่มแจ้งของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่า ค่าสังเกตที่ได้จากทรีทเมนต์หนึ่งๆ ควรมีการแจ่มแจ้งแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ

(Normality) นี้ เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติได้



รูปที่ 2.2 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

2.1.3 ลำดับขั้นการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองต่างๆ จะต้องมีขั้นตอนของการทดลองดังนี้ คือ

1) การนิยามปัญหา (Recognition of and statement of the problem) เป็นการระบุว่า ความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย (Choice of factors , levels and ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้น ควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายคือ ระบุว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Effect) แบบสุ่ม (Random Effect) หรือแบบผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้พอเป็นสังเขปดังนี้

2.1) แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.2) แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

2.3) แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่ม

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the response variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่ามันจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

4) การเลือกแบบการทดลอง (Choice of experimental design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์และตัวแปรตอบสนองแล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลอง ซึ่งหมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยง และต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

5) ดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผล

7) สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

2.1.4 หลักในการออกแบบการทดลอง

1) การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ เทคนิคการจัดหน่วยทดลองให้แก่ทรีทเมนต์หรือจัดหน่วยทรีทเมนต์ให้แก่หน่วยทดลอง โดยให้แต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์ใดทรีทเมนต์หนึ่งเท่าๆ กัน

วัตถุประสงค์ของการสุ่มมีดังนี้

ก) เพื่อขจัดอคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าทรีทเมนต์ต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกันในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง

ข) การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิตินั้นมีข้อกำหนดว่า ความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยการสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตาม

ข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัด หรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กัน

การทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- 1.1) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- 1.2) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- 1.3) การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2) การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทรีทเมนต์หนึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วยทดลอง โดยมีจุดประสงค์ของการทำซ้ำคือ

2.1) การทำซ้ำทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ เพื่อนำค่าความผันแปรภายในกลุ่มนี้มาเป็นตัวทดสอบว่าทรีทเมนต์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติหรือไม่

2.2) เพิ่มความเที่ยง (Precision) ของการทดลองโดยการช่วยลดขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ซึ่ง

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\sigma^2/n}$$

จะเห็นว่า การเพิ่มจำนวนซ้ำ n จะช่วยลดค่า $\sigma_{\bar{y}}$ ได้

3) การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ แต่ไม่จำเป็นที่ต้องทำเสมอไป

2.1.5 การเลือกแบบการทดลอง

1) แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD)

เป็นแผนการทดลองแบบที่ง่ายที่สุด เหมาะสมกับการทดลองที่ไม่สามารถแยกได้ว่า หน่วยทดลองที่นำมาใช้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรก่อนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองนี้ จะแยกสาเหตุของความผันแปรของข้อมูลทั้งหมดว่าเนื่องมาจากอิทธิพลของทรีทเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีสาเหตุจากปัจจัยอื่นอีก จึงเรียกข้อมูลนี้ว่าข้อมูลแบบแจกแจงทางเดียว (One-way Classification)

ตามแผนการทดลองนี้แสดงว่า เมื่อหน่วยทดลองได้รับทรีทเมนต์ที่ต้องการทดสอบแล้ว ความแตกต่างของข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละหน่วยทดลองจะต้องเกิดจากอิทธิพลของทรีทเมนต์ที่

ต่างกันเท่านั้น ดังนั้น เพื่อแผนการทดลองนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยทดลองที่นำมาใช้จึงควรมีลักษณะที่สม่ำเสมอหรือคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือมีความผันแปรระหว่างหน่วยทดลองน้อยที่สุด หลักสำคัญของแผนการทดลองนี้คือ การจัดทรีทเมนต์ให้กับหน่วยทดลอง หรือจัดหน่วยทดลองให้แก่ทรีทเมนต์จะต้องเป็นไปโดยสุ่ม ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสุ่ม

1.1) ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี

- ก) เป็นแผนการทดลองที่จัดง่าย
- ข) ให้ค่าองศาแห่งความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน (Degree of Freedom for Error) สูงสุด
- ค) วิธีการวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุดในบรรดาแผนการทดลองทั้งหลาย
- ง) ในแต่ละทรีทเมนต์ ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนซ้ำไม่เท่ากัน ก็ไม่ทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนแต่อย่างใด

ข้อเสีย

- ก) มีข้อจำกัดว่าจะใช้ได้เหมาะสมเมื่อมีจำนวนทรีทเมนต์น้อยๆ หากมีทรีทเมนต์จำนวนมากแล้ว จำเป็นต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้นอาจไม่สามารถกระทำได้
- ข) ใช้กับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอ
- ค) ไม่สามารถตรวจสอบอิทธิพลของกิริยาร่วมได้ (Interaction Effect)

1.2) โครงรูปข้อมูล

สมมติให้ การทดลอง มี a ทรีทเมนต์ (หรือ a ระดับ)

n คือ จำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์

Y_{ij} คือ ค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

| | Treatment | | | | | | |
|--------------|----------------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------------------------------------|
| | 1 | 2 | ... | i | ... | a | |
| | y_{11} | y_{21} | | y_{i1} | | y_{a1} | |
| | y_{12} | y_{22} | | y_{i2} | | y_{a2} | |
| | y_{13} | y_{23} | | y_{i3} | | y_{a3} | |
| | . | . | | . | | . | |
| | . | . | | . | | . | |
| | . | . | | . | | . | |
| | y_{1n} | y_{2n} | | y_{in} | | y_{an} | |
| Totals | $y_{.1}$ | $y_{.2}$ | ... | $y_{.i}$ | | $y_{.a}$ | $y_{..} = \text{Grand Total}$ |
| Sample means | $\bar{y}_{.1}$ | $\bar{y}_{.2}$ | ... | $\bar{y}_{.i}$ | | $\bar{y}_{.a}$ | $\bar{y}_{..} = \text{Grand mean}$ |

ตัวแบบทางสถิติของแผนการทดลองนี้ คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คืออิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

2) แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design : RCB)

ในบางการทดลองอาจประสบปัญหาเกี่ยวกับหน่วยทดลองที่ใช้ไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้การใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลจะไม่ใช้ผลของทรีทเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ยังมี ความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลอง

รวมอยู่ด้วย ซึ่งความผันแปรส่วนหลังนี้จะไปรวมอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ทำให้ยอดรวมของผลบวกของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น มีผลต่อการทดสอบทำให้ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องพยายามแยกผลอันเกิดจากอิทธิพลอื่นที่ไม่ใช่ทรีทเมนต์ออกจากความแปรปรวนทั้งหมด เพื่อให้แน่ใจว่าผลที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นอิทธิพลของทรีทเมนต์ (Treatment Effect) แต่เพียงอย่างเดียว

แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อก เป็นวิธีหนึ่งในหลายๆ วิธีของการจำแนกแบบ 2 ทาง (Two-Way Classification) จะใช้เมื่อหน่วยทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ ทางแนวนอน (Row) และแนวตั้ง (Column) มีหลักการคือ พยายามจัดหน่วยทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งจะเรียกว่าบล็อก ดังนั้นความแปรปรวนระหว่างหน่วยทดลองในบล็อกเดียวกันจึงมีค่าต่ำ และให้ความแตกต่างระหว่างบล็อกมีค่าสูง ในแต่ละบล็อกจะมีครบทุกทรีทเมนต์ การจะให้ทรีทเมนต์ใดแก่หน่วยทดลองใดภายในแต่ละบล็อกกระทำโดยสุ่ม กรณีนี้จะทำให้เราแยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมากจากยอดรวมของผลบวกของกำลังสองได้

2.1) ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี

- ก) มีความเที่ยงตรงสูงกว่า แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์
- ข) ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนทรีทเมนต์หรือบล็อก
- ค) ถ้าหากจำเป็นที่จะต้องมีซ้ำสำหรับทรีทเมนต์ใด ก็อาจเพิ่มหน่วยทดลองเป็นสองหรือมากกว่านั้นในแต่ละบล็อก
- ง) กรณีที่ข้อมูลในบล็อกใดหรือทรีทเมนต์ใดใช้ไม่ได้หรือสูญหายไป สามารถละเว้นได้โดยไม่ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณวิเคราะห์สำหรับส่วนข้อมูลที่เหลือ

ข้อเสีย

ถ้าหน่วยทดลองในแต่ละบล็อกมีความผันแปรมาก ความผันแปรที่เกิดขึ้นจากการทดลองย่อมมากตาม กรณีนี้มักเกิดขึ้นถ้าไม่สามารถควบคุมหน่วยทดลองภายในบล็อกให้สม่ำเสมอตลอดได้

2.2) โครงรูปข้อมูล

สมมติให้การทดลองมี **a** ทรีทเมนต์ และ **b** บล็อก ตามแผนภาพจะเห็นว่า มีค่าสังเกต **1** ค่าต่อ **1** ทรีทเมนต์ในแต่ละบล็อก

| Block 1 | Block 2 | Block b |
|----------|----------|----------|
| y_{11} | y_{12} | y_{1b} |
| y_{21} | y_{22} | y_{2b} |
| y_{31} | y_{32} | y_{3b} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| y_{a1} | y_{a2} | y_{ab} |

ตัวแบบทางสถิติของแผนการทดลองนี้ คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คืออิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

β_j คืออิทธิพลอันเกิดจากบล็อกที่ j

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

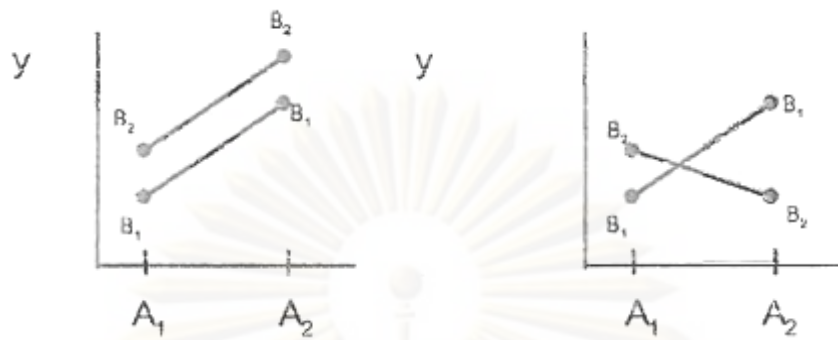
3) แผนการทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial Experiment)

เป็นการทดลองที่มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมๆ กัน โดยให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนอง

โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าการทดลองแบบแฟคตอเรียล เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ แฟคเตอร์พร้อมกัน คำว่า แฟคตอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้ง หรือแต่ละซ้ำของการทดลองนั้น กล่าวคือมีการใช้ระดับของแฟคเตอร์ต่างๆ ร่วมกัน จึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน เช่น ถ้าแฟคเตอร์ A มี a ระดับ แฟคเตอร์ B มี b ระดับ แต่ละซ้ำจะมี ab treatment combination แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

ก) อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น

ข) อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน



(1) อิทธิพลของปัจจัยร่วมไม่มีผล (2) อิทธิพลของปัจจัยร่วมมีผล

รูปที่ 2.3 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลและมีผล

การทดลองแบบแฟคตอเรียลนั้น เป็นการประกอบกันของทรีทเมนต์ ไม่ใช่ชนิดของแผนการทดลอง การประกอบกันของทรีทเมนต์นี้อาจใช้ในแผนการทดลองแบบใดๆ ก็ได้ เช่น การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ แบบสุ่มบล็อก หรือจัดสุ่มลาดินก็ได้

3.1) ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี

ก) เป็นการใช้น้อยทดลองทั้งหมดเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทรีทเมนต์หลายๆ ทรีทเมนต์พร้อมกันได้ จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยลงกว่าการทดสอบครั้งละ 1 แฟคเตอร์

ข) ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างแฟคเตอร์ได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 แฟคเตอร์

ข้อเสีย

ก) เนื่องจากมี **treatment combination** จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น จึงอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง

ข) ในกรณีที่มีกิริยาร่วมเกิดขึ้น อาจทำให้การสรุปผลเป็นภาษาที่เข้าใจง่ายได้ยาก

ค) ถ้าจำนวนปัจจัยมีมาก ขนาดของการทดลองก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก

2.1 โครงรูปข้อมูล

สมมติการทดลองปัจจัย A มี i ระดับ ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B มี j ระดับ ($j = 1, 2, \dots, b$) ทำการทดลอง k ซ้ำ ($k = 1, 2, \dots, n$) การทดลองแฟคตอเรียลของปัจจัย 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังนี้

| | | Factor B | | | |
|----------|-----|------------------------------------|------------------------------------|-----|------------------------------------|
| | | 1 | 2 | ... | b |
| Factor A | 1 | $y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$ | $y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$ | | $y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$ |
| | 2 | $y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$ | $y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$ | | $y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$ |
| | ... | | | | |
| | a | $y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$ | $y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$ | | $y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$ |

ตัวแบบทางสถิติของแผนการทดลองนี้ คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i อิทธิพลของปัจจัย A ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ i

β_j อิทธิพลของปัจจัย B ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ j

$(\tau\beta)_{ij}$ คืออิทธิพลร่วมของปัจจัย A ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ i และ ปัจจัย B ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ j

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

แผนการทดลองแบบแฟคตอเรียลทั่วไปมีรูปแบบ คือ $A \times B \times C \dots$ แฟคตอเรียล เช่น แฟคตอเรียล $3 \times 2 \times 3$ รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคตอเรียลที่สำคัญได้แก่

ก) 2^k แฟคตอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

ข) 3^k แฟคตอเรียลใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

2^k แฟคตอเรียลเหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรง ซึ่งจะทำให้สามารถตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรงไม่ดีแล้ว ใช้แบบ 3^k แฟคตอเรียล แทนจะเหมาะสมกว่า

2.1.6 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

1) การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลอง มีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือ ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดี จะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ให้น้อยที่สุด

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

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

1.1) เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

1.2) ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องแล้วออกแบบการทดลองใหม่

1.3) ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมาก ต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

2) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

$$\text{จากสมการ} \quad Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

ซึ่ง μ คือค่าเฉลี่ย

τ_i คืออิทธิพลอันเกิดจากปัจจัย

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ได้ ต้องให้ ε มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$

การตรวจสอบ ε มี 3 ขั้นตอน คือ

2.1) การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) หรือไม่ โดยใช้

- ก) การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test)
- ข) การทดสอบแบบโคโมโกรอฟ-สเมอร်นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test)
- ค) การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)

2.2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่

2.3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรความแปรปรวน

3) การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติ เป็นถ้อยแถลงที่เกี่ยวกับความน่าจะเป็นของตัวแปรแบบสุ่มที่มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งค่าพารามิเตอร์ โดยสมมติฐานแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

3.1) สมมติฐานที่กำหนด (Null Hypothesis) เป็นข้อสงสัยหรือข้อสมมติเกี่ยวกับลักษณะต่างๆ ในประชากรที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ โดยใช้สัญลักษณ์ H_0

3.2) สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) เป็นข้อความหรือความคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่หวังว่าจะเป็น โดยจะต้องมีความหมายที่แย้งกับสมมติฐานที่กำหนดโดยชัดเจนโดยใช้สัญลักษณ์ H_1

โดยโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะทำการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด (Reject H_0) จะถูกกำหนดโดยระดับนัยสำคัญ ซึ่งเป็นโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่น้อยมากที่ค่าพารามิเตอร์จะตกอยู่ในช่วงของการปฏิเสธสมมติฐานเมื่อสมมติฐานเป็นจริง โดยทั่วไปมักจะทำการเปลี่ยนช่วงของการ

ปฏิเสธสมมติฐานหรือระดับความมีนัยสำคัญเป็นค่าวิกฤติ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรือใช้ในการตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด

การตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้ 2 กรณีคือ

ก) ความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด โดยที่สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้องหรือมีความเป็นจริง เรียกว่า ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I error) ซึ่งความผิดพลาดนี้ คือ ระดับความมีนัยสำคัญในการตรวจสอบสมมติฐาน

ข) ความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานที่กำหนด โดยที่สมมติฐานที่กำหนดมีความไม่ถูกต้องหรือไม่มีความจริง เรียกว่า ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน

| สมมติฐานที่กำหนด | สมมติฐานที่กำหนด มีความถูกต้อง | สมมติฐานที่กำหนด ไม่มีความถูกต้อง |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| ยอมรับ | การตัดสินใจถูกต้อง | ความผิดพลาดแบบที่ 2 |
| ปฏิเสธ | ความผิดพลาดแบบที่ 1 | การตัดสินใจถูกต้อง |

โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 และแบบที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\alpha = P(\text{ความผิดพลาดแบบที่ 1})$$

$$\alpha = P(\text{การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด : สมมติฐานที่กำหนดถูกต้อง})$$

$$\beta = P(\text{ความผิดพลาดแบบที่ 2})$$

$$\beta = P(\text{การยอมรับสมมติฐานที่กำหนด : สมมติฐานที่กำหนดไม่ถูกต้อง})$$

$$\text{โดย } 1-\beta = \text{อำนาจของการทดสอบ}$$

$$= P(\text{การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด : สมมติฐานที่กำหนดถูกต้อง})$$

2.1.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลอง และทำการทดลองแล้ว งานขั้นต่อไปก็คือ การนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองวิเคราะห์ เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติหรือหาแนวโน้มต่อไป โดยใช้หลักการของ ANOVA หรือการถดถอย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีการคำนวณแบบเลขคณิต โดยการแยกผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Square : SST) ออกเป็นส่วนต่างๆ ตามแหล่งกำเนิดหรือสาเหตุ โดยจะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อการทดลองโดยพิจารณาความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่า แสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่าง โดยมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square : MS) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุดซึ่ง

$$MS = SS / df$$

เมื่อ SS คือ ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)

df คือ ชั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)

สามารถอธิบายการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละแบบการทดลองได้ดังนี้

1) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD)

เราจะแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น 2 ส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Mode)

$$\text{ตัวแบบ} \quad Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คืออิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) SST โดยที่

$$SST = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 \right) - (Y^2_{..} / N)$$

$$SSTr = \left(\sum_{j=1}^n Y_{.j}^2 / n \right) - (Y^2_{..} / N)$$

$$SSE = SST - SSTr$$

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 โดยที่ถ้าหากค่า $F_0 \leq F_{\alpha, v1, v2}$ แล้ว ถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ One-way ANOVA

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | F_0 |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| Treatment | SSTr | a-1 | MSTr | MSTr / MSE |
| Error | SSE | N-a | MSE | |
| Total | SST | N-1 | | |

2. การทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design : RCB)

เราจะแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน ความแปรปรวนเนื่องจากการบล็อก และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คืออิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

β_j คืออิทธิพลอันเกิดจากบล็อกที่ j

ϵ_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์จะทำได้โดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) SST โดยที่

$$SST = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 \right) - (Y^2_{..} / N)$$

$$SSTr = \left(\sum_{i=1}^a Y_{i.}^2 / b \right) - (Y^2_{..} / N)$$

$$SSB = \left(\sum_{j=1}^b Y_{.j}^2 / a \right) - (Y^2_{..} / N)$$

$$SSE = SST - SSTr - SSB$$

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยที่ถ้าหากค่า $F_o \leq F_a, v_1, v_2$ แล้ว ถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับการทดลองแบบสุ่มในบล็อก

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | F_o |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| Treatment | SSTr | a-1 | MSTr | MSTr / MSE |
| Blocks | SSB | b-1 | MSB | MSB / MSE |
| Error | SSE | (a-1)(b-1) | MSE | |
| Total | SST | N-1 | | |

3. การทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial Experiment)

เราจะแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจากการปัจจัยต่างๆ ความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลร่วม และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มีตัวแปร 2 ตัวของตัวแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

μ คือค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i อิทธิพลของปัจจัย A ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ i

β_j อิทธิพลของปัจจัย B ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ j

$(\tau\beta)_{ij}$ คืออิทธิพลร่วมของปัจจัย A ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ i และ ปัจจัย B ที่เกิดจากทรีทเมนต์ที่ j

ε_{ij} คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) SS_1 โดยที่

$$SS_1 = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 \right) - (Y^2 \dots / abn)$$

$$SS_A = \left(\sum_{i=1}^a Y_{i..}^2 / bn \right) - (Y^2 \dots / abn)$$

$$SS_B = \left(\sum_{j=1}^b Y_{.j.}^2 / an \right) - (Y^2 \dots / abn)$$

ผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมกันของปัจจัย 2 ตัว (The two factors interaction sum of squares)

$$SS_{AB} = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 / n \right) - (Y^2 \dots / abn) - SS_A - SS_B$$

$$= SS_{\text{subtotals (AB)}} - SS_A - SS_B$$

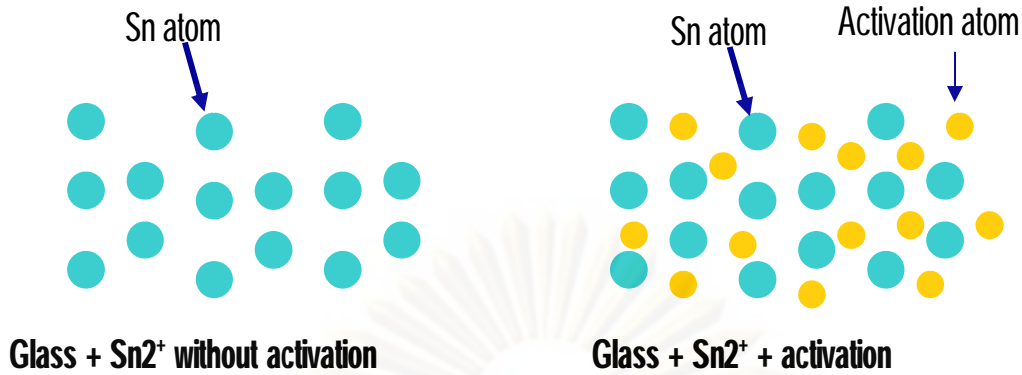
ดังนั้นเมื่อเอาผลรวมกำลังสองของ Main Effect แต่ละตัวของ Interaction ไปหักออกจากผลรวมกำลังสองของทั้งหมด ก็จะได้ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการ

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotals (AB)}}$$

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 โดยที่ถ้าหากค่า $F_0 < F_{\alpha, v_1, v_2}$ แล้ว ถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน สำหรับ Two-Factor Fixed effect Model

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | F_0 |
|---------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-----------------|
| A | SS_A | $a-1$ | MS_A | MS_A / MSE |
| B | SS_B | $b-1$ | MS_B | MS_B / MSE |
| AB | SS_{AB} | $(a-1)(b-1)$ | MS_{AB} | MS_{AB} / MSE |
| Error | SSE | $ab(n-1)$ | MSE | |
| Total | SST | $abn-1$ | | |



รูปที่ 2.5 ความแตกต่างของพื้นผิวกระจก ก่อนและหลังการกระตุ้นพื้นผิว

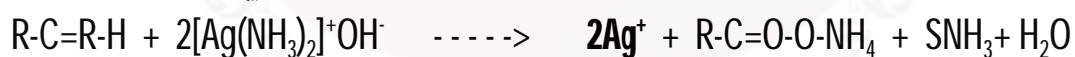
2.2.3 การเคลือบเงิน (Silvering)

การเคลือบเงิน (Silvering) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจาก AgNO_3 ละลายในน้ำได้เป็น Ag^+ ซึ่ง Ag^+ จะถูก reduced กลายเป็น Metallic Silver ด้วย Reducing Agent ปฏิกิริยาการเกิด Ag-Mirror เริ่มจากการหยด NH_4OH ลงใน AgNO_3 ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนดำของ Ag_2O

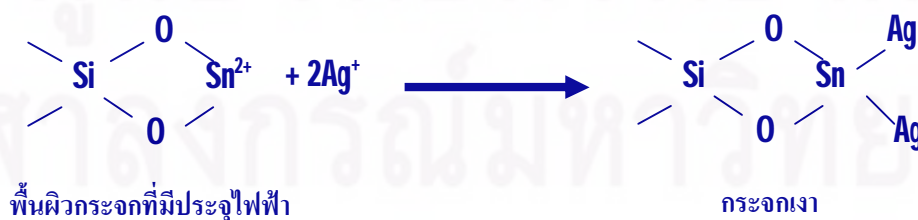
ทำการหยดจนกว่าตะกอนที่เกิดขึ้นหายไป จนได้สารละลายใส แต่อย่าให้ NH_4OH มากเกินไป ซึ่งได้ปฏิกิริยาเคมีดังนี้คือ



แล้วจึงใช้ Reducing Agent พวก Aldehyde ซึ่งจะถูก Oxidized ด้วย $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ ได้เป็น Ag-Mirror ดังปฏิกิริยา



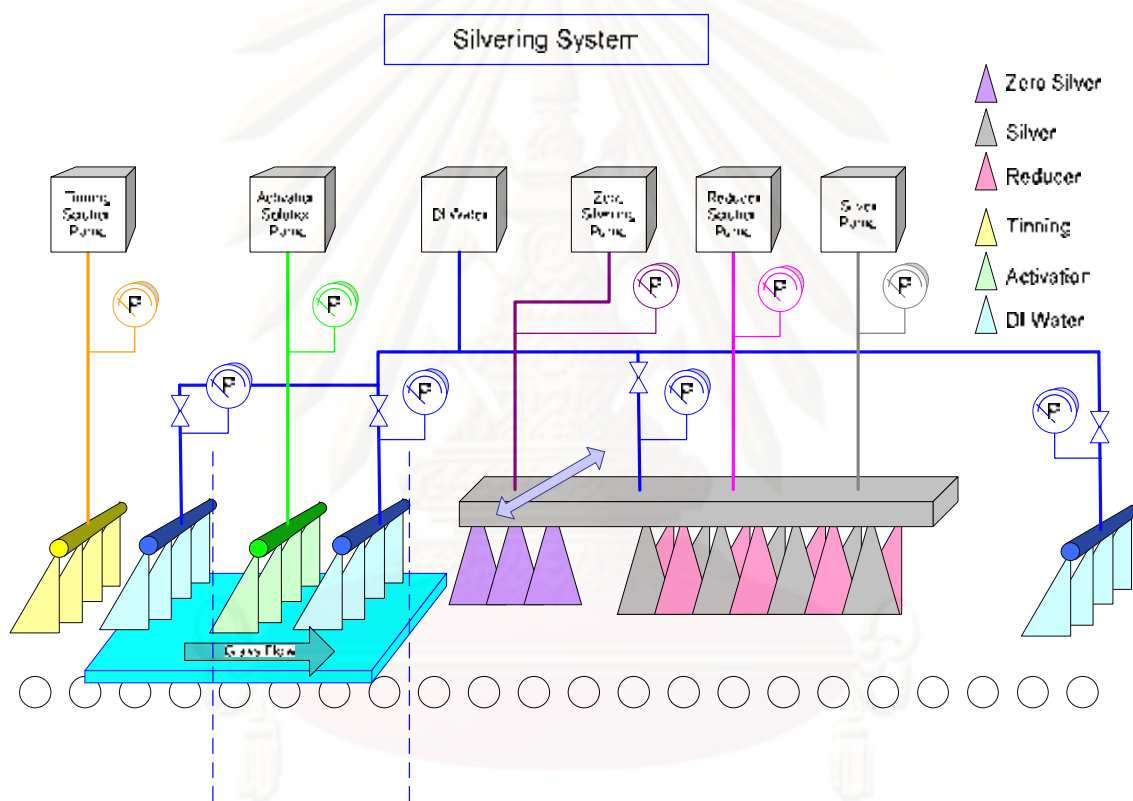
ซึ่งเงินไอออน (Ag^+) ที่ได้นี้ จะเข้าไปจับกับ ดิบุกออกอนบนผิวกระจก เกิดเป็นชั้นโลหะเงินบนผิวกระจก ตามปฏิกิริยาเคมี ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการเคลือบเงิน

2.2.4 การปกป้องชั้นเงินจากสิ่งแวดล้อม

เงินที่เกาะบนผิวกระจกใหม่ๆ สะท้อนแสงได้ดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะลดการสะท้อนแสง เพราะแม้ว่าจะจัดเงินอยู่ในกลุ่มโลหะมีสกุล แต่เงินก็ถูก **Oxidized** ได้เมื่อสัมผัสอากาศโดยเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับก๊าซกำมะถัน (S₂) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันเงินให้ใหม่อยู่เสมอ กระจกเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งในการป้องกันเงิน แต่ก็สามารถเพิ่มอายุความคงทนในการต้านทานต่อการเกิดสนิมในกระจก (**Corrosion**) ได้ โดยการเคลือบทับเงินด้วยทองแดง (**Copper**) และดี เนื่องจากทองแดงเป็นสารที่ออกซิไดส์ยากกว่าเงิน โดยภาพรวมของระบบการเคลือบเงิน จะเป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบการเคลือบเงิน

2.3 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ ได้สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

เรวัตกร กล่าวหาญ (6)

ศึกษาวิเคราะห์และควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ในกระบวนการผลิตกระจกเงา โดยใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิต และใช้เครื่องมือวิเคราะห์นี้ในการค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเกิดข้อบกพร่องของกระจกเงา ค่าความรุนแรงของข้อบกพร่อง การเกิดข้อบกพร่อง และการควบคุมกระบวนการ ถูกนำมาประเมินเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงชี้นำ (Risk Priority Number หรือ RPN) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความเสี่ยงที่จะเกิดข้อบกพร่อง ซึ่งผลการปรับปรุงมีทั้งการจำกัดให้มีระบบการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ การจัดทำระเบียบปฏิบัติงาน กำหนดมาตรฐานการทำงาน การจัดทำเอกสารที่ใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหา การจัดหาและแก้ไขตัดแปลงอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต รวมทั้งการปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงาน

สรียา กสิกันท์ (7)

ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความคงขนาดของแผ่นพาร์ทิเคิล และหาเงื่อนไขส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษแผ่นพาร์ทิเคิลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ โดยแผ่นพาร์ทิเคิลที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพตรงตามมาตรฐาน และเหมาะสมต่อการใช้งาน

ประเสริฐ งามวิเศษชัยกุล (8)

ศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการผลิต เพื่อนำไปคิดต้นทุนการผลิตในแต่ละประเภทของผลิตภัณฑ์ และทำการควบคุมต้นทุนโดยการใช้ต้นทุนโดยประมาณการในการเปรียบเทียบกับต้นทุนจริง นอกจากนี้ยังทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาในเรื่องความสูญเสียในกระบวนการผลิต และความสูญเสียในเรื่องของเวลาซึ่งมีผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการลดความสูญเสียนั้น แล้วดำเนินการตามวิธีที่คัดเลือกไว้

วิชาญ วรรณ (9)

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดเหล็กปลายสั้น ในกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการผลิตที่เกิดจากปัญหาการเกิดเหล็กปลายสั้นกว่ามาตรฐาน

สุรพล สุรบรรเจิดพร (10)

ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมตึ๊ก-ตะกั่วบนแผ่นลายวงจรมินิด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม พร้อมพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือ ความเร็วของสายพาน อุณหภูมิในส่วนการอบความร้อน ค่าความถี่ของพัลส์ และลักษณะการไหลของโลหะผสมซิลิโคน โดยมุ่งเน้นผลทางด้านคุณภาพที่สอดคล้องในเรื่องจำนวนการเกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม

อัจฉริยา เก่งวินิจ (12)

ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียน และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียนที่ทำให้ค่าเฉลี่ยมุมของแขนจับยึดหัวอ่านมีค่าใกล้เคียงกับข้อกำหนดของลูกค้ามากที่สุด โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้หลักการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อมุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียน จากนั้นใช้หลักการของการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ มาหาเงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสม โดยมุ่งเน้นผลด้านคุณภาพเพื่อให้มุมของแขนจับยึดหัวอ่านเขียนมีค่าใกล้เคียงข้อกำหนดของลูกค้ามากที่สุด

วัชรศักดิ์ ทวีสุข (11)

ศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูล ที่มีผลกระทบต่อค่าการโก่งตัวของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูล รวมทั้งพิจารณาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการโก่งตัว โดยการศึกษาครั้งนี้เริ่มจากการระบุปัจจัยทั้งหมดที่น่าจะมีผลกระทบต่อค่าการโก่งตัวโดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม และการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เป้าหมายเพื่อลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการโก่งตัวของตัวหัวอ่านเขียน

พัฒนพงษ์ แสงหัตถวัฒนา (13)

ศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการคัดเลือกผู้ส่งมอบและแนวทางในการกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการสั่งซื้อวัตถุดิบขององค์กรในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยการศึกษาจะเริ่มจากการสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดซื้อของบริษัทในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกตามเค้าโครงของแบบสอบถาม จากนั้นใช้การวิเคราะห์ทางสถิติมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม

ธนัฐชยา อุดรทักษ์ (14)

ศึกษาปัจจัยการควบคุมการอัดขึ้นรูปผงแทนทาลัม เป้าหมายเพื่อควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพการอัดขึ้นรูปผงแทนทาลัม และลดของเสียของชิ้นงานที่เกิดจากการอัดขึ้นรูป โดยการศึกษาอาศัยหลักการของการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม และการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ลดขางานโกงงน้อยที่สุด และลดความสูญเสียค่าวัตถุดิบแทนทาลัมในการผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

3.1 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาก่อนที่จะดำเนินการทดลองจะเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการเคลือบเงิน (Silvering Yield) บนกระจกเงา จะพิจารณาเฉพาะปัจจัยในส่วนของการกระบวนการเคลือบเงินเป็นหลัก คือ พิจารณาเฉพาะขั้นตอนการเคลือบเงินเท่านั้น ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวนี้ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ดังนั้นจึงคาดหมายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน บนกระจกเงา ตามลำดับของกระบวนการทั้งหมด ได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารละลายเงินตั้งต้น

สารละลายเงินตั้งต้นนั้น จะเป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยในการผลิตจะใช้สารละลายเงินที่มีความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 250 กรัมต่อลิตร ในทุกประเภทผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต ดังนั้นปัจจัยนี้จึงเป็นปัจจัยคงที่ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการผลิต

2. อัตราการจ่ายสารละลายเงิน

จะเป็นอัตราการจ่ายสารละลายเงินจากปั๊มจ่ายไปยังหัวสเปร์ย ซึ่งสามารถตั้งอัตราการจ่ายได้ โดยถ้าอัตราการจ่ายต่ำเกินไปก็จะทำให้ปริมาณของเงินที่เคลือบบาง และค่าการสะท้อนแสงไม่ดี รวมถึงค่าความสม่ำเสมอของการเคลือบก็จะมีไม่ดีด้วยเช่นกัน แต่ถ้าตั้งอัตราการจ่ายสารละลายเงินสูงเกินไปก็จะทำให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกหนาเกินไปเกิดความลื่นเปลือง

3. ขนาดของหัวสเปร์ย

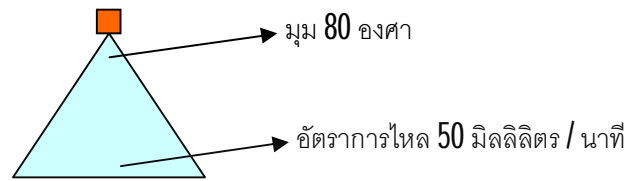
ขนาดของหัวสเปร์ย จะเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่จะกำหนดปริมาณของสารละลายเงิน ที่จะถูกพ่นลงบนผิวกระจก ว่าจะมีปริมาณมากน้อยแค่ไหน และมีรูปแบบในการพ่นเป็นมุมกี่องศา ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการระบุเบอร์ของหัวสเปร์ยดังนี้

000.XXXX

โดยที่ 000 จะเป็นตัวเลขที่บอกถึงมุมของการสเปร์ย

XXXX จะเป็นตัวเลขที่บอกอัตราการไหล มีหน่วยเป็น มิลลิลิตรต่ออนาที

เช่น หัวสเปร์ยเบอร์ 80.0050 จะมีมุมการสเปร์ย 80 องศา และมีอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที



รูปที่ 3.1 ความหมายของเบอร์หัวสเปร์ย์

ซึ่งถ้าขนาดของหัวสเปร์ย์มีขนาดใหญ่ก็หมายถึงปริมาณของสารละลายเงินปริมาณมากที่จะถูกพ่นลงไปบนผิวกระจกต่อหนึ่งรอบการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์

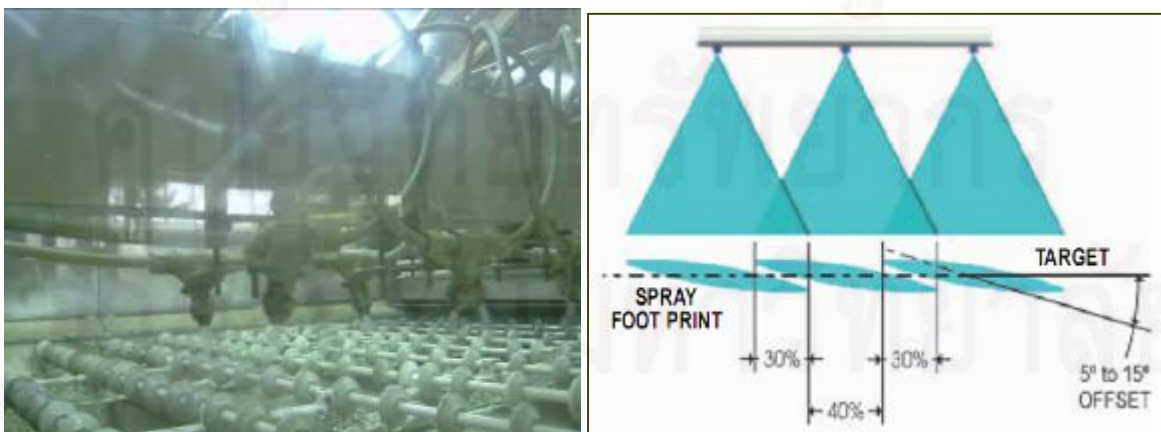
นอกจากนั้น เบอร์ของหัวสเปร์ย์ จะเป็นตัวกำหนดจำนวนหัวสเปร์ย์ที่ต้องการใช้ และการจัดวางตำแหน่งของหัวสเปร์ย์

4. จำนวนของหัวสเปร์ย์

ถือว่าเป็นปัจจัยตายตัวอีกตัวหนึ่ง เนื่องจากแต่ละหัวสเปร์ย์ จะใช้จำนวนคู่ของหัวสเปร์ย์ที่เหมาะสมแค่เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น โดยถ้าหากใช้จำนวนหัวสเปร์ย์น้อยไป จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าจำนวนหัวสเปร์ย์มากไป จะทำให้การเคลือบหนา และเกิดการสูญเสีย เช่น หัวสเปร์ย์เบอร์ 80.0050 จะใช้จำนวนหัวสเปร์ย์จำนวน 12 คู่ โดยแบ่งเป็น สารละลายเงิน 12 หัว และสารละลายรีดิวเซอร์ 12 หัว

5. การจัดวางตำแหน่งหัวสเปร์ย์

เป็นปัจจัยตายตัว ที่ขึ้นกับขนาดและเบอร์ของหัวสเปร์ย์ โดยระยะห่างระหว่างหัวสเปร์ย์แต่ละหัวจะได้จากการคำนวณจากมุมที่สารละลายแต่ละหัวพ่นออกมา เพื่อให้สารละลายที่ออกจากสเปร์ย์แต่ละหัวมีการเหลื่อมกันอย่างพอเหมาะ คือ 30% ของสารละลายที่แต่ละหัวสเปร์ย์พ่นออกมา จะเหลื่อมกัน เพื่อให้ปริมาณสารละลายบนผิวกระจก มีความสม่ำเสมอในทุกพื้นที่



รูปที่ 3.2 รูปการจัดวางหัวสเปร์ย์

6. ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ (รอบ / นาที)

ความถี่ในการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์นั้น ถ้าหากมีความถี่น้อยเกินไป ก็จะทำให้การเคลือบเงิน เกิดได้ไม่สมบูรณ์ และเกิดการเคลือบเป็นร่องขึ้น แต่ถ้าความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์สูงเกินไป ก็จะทำให้การเคลือบหนา เกิดการสูญเสีย

7. อุณหภูมิของน้ำ DI

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวกระจก กับอุณหภูมิของสารละลายที่เคลือบลงไป จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในการเคลือบเงิน โดยถ้าอุณหภูมิต่างกันน้อยเกินไป จะทำให้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี แต่ในทางกลับกัน ถ้าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมียิ่งมาก เท่าไหร่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็จะยิ่งเกิดได้ดีมากเท่านั้น ซึ่งในการผลิตจะควบคุมอุณหภูมิสารละลายโดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ DI ซึ่งใช้อุปกรณ์ Heat Pump เป็นตัวให้ความร้อน

8. ความดันของน้ำ DI

ปริมาณน้ำ DI ที่ถูกจ่ายเข้าไปที่หัวสเปร์ย์ เป้าหมายก็เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลายเงินที่ถูกสเปร์ย์ลงบนผิวกระจก โดยยิ่งความดันของน้ำ DI มาก ปริมาณน้ำที่ออกไปพร้อมสารละลายเงินก็ยิ่งมาก ความเข้มข้นสารละลายเงินที่ออกมา ก็จะลดลง อีกทั้งยังทำให้ปริมาณน้ำบนผิวกระจกมาก การเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเกิดไม่ดี แต่ถ้าความดันของน้ำ DI ต่ำเกินไป ก็จะทำให้การกระจายตัวที่หัวสเปร์ย์ไม่ดี ทำให้ความสม่ำเสมอในการเคลือบไม่ดี และความเข้มข้นของสารละลายเงินที่พ่นลงไปบนผิวกระจกมากเกินไป ทำให้เกิดการเคลือบเป็นร่องหนาบางสลับกันไป

9. คุณภาพของน้ำ DI (ค่าความนำไฟฟ้า)

เป็นปัจจัยที่ตรงทางเดียว คือคุณภาพน้ำ DI ยิ่งดีเท่าไร การเกิดปฏิกิริยาก็จะยิ่งเกิดได้ดียิ่งขึ้นเท่านั้น โดยในการผลิตจะควบคุมคุณภาพน้ำ DI จากค่าความนำไฟฟ้าซึ่งยิ่งน้อยเท่าไร ก็ยิ่งดี เพราะจะไม่มีผลของประจุไฟฟ้าไปรบกวนการทำปฏิกิริยาเคมี

3.2 การเลือกปัจจัยที่จะนำมาศึกษา และระดับของแต่ละปัจจัย

จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 9 ปัจจัยในกระบวนการเคลือบเงิน จะสามารถตัดบางปัจจัยออกจาก การทดลองได้ ตามลำดับดังนี้

1. ปัจจัยสารละลายเงินตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีค่าตายตัวคงที่ จะไม่เปลี่ยนแปลงในทุกผลิตภัณฑ์ ที่ทำการผลิต
2. ปัจจัยจำนวนของหัวสเปร์ย ขึ้นอยู่กับเบอร์หัวสเปร์ยที่เลือกใช้ จึงถือเป็นปัจจัยตายตัว ที่ต้องปรับให้สอดคล้องตามปัจจัยเบอร์หัวสเปร์ยที่เลือกใช้
3. การจัดวางตำแหน่งหัวสเปร์ยนั้น ก็ขึ้นอยู่กับเบอร์หัวสเปร์ยที่เลือกใช้ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นปัจจัยตายตัว เช่นกัน
4. ปัจจัยคุณภาพน้ำ DI ถือเป็นปัจจัยแบบทิศทางเดียวคือยังมีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยเท่าไรยิ่งดี โดยตามมาตรฐานการผลิต จะควบคุมความนำไฟฟ้าให้มีค่าไม่เกิน $15 \mu\text{S}/\text{cm}^2$
5. ปัจจัยอุณหภูมิของน้ำ DI ถือเป็นปัจจัยแบบทิศทางเดียวเช่นกัน คือยิ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวกระจก กับอุณหภูมิของสารละลายที่เคลือบลงไปยิ่งมาก ก็ยิ่งส่งผลดีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปในการผลิต จะควบคุมอุณหภูมิของน้ำ DI ที่ 50 องศา ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุด ที่อุปกรณ์ต้มน้ำสามารถทำได้

ดังนั้น เมื่อตัดปัจจัยทั้ง 5 ตัวที่ได้กล่าวมาข้างต้นจากการพิจารณา แล้วนำปัจจัยที่เหลือทั้ง 4 ปัจจัยมาทำการศึกษาทีละปัจจัยเพื่อกำหนดระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งได้ผลดังนี้

1. อัตราการจ่ายสารละลายเงิน

อัตราการจ่ายสารละลายเงินในปัจจุบัน ถูกตั้งเอาไว้ที่ประมาณ 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง จึงทำการทดลอง เพิ่มและลดอัตราการจ่ายสารละลายเงิน ที่ค่าต่างๆกันดังนี้ 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง แล้วตรวจสอบความหนาของชั้นเงิน และค่าการสะท้อนแสง ซึ่งพบว่าที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินที่ต่ำกว่า 4.5 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้การเคลือบไม่สม่ำเสมอ และค่าการสะท้อนแสงไม่ดี (ผลการทดลองย่อยดังภาคผนวก ซ.)

จึงสามารถแบ่งอัตราการจ่ายสารละลายเงิน ที่ให้การเคลือบที่คุณภาพดี และมีค่าการสะท้อนแสงดี ออกได้เป็น 3 ระดับคือ

ระดับ 1 อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 4.5 ลิตร ต่อชั่วโมง

ระดับ 2 อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 ลิตร ต่อชั่วโมง

ระดับ 3 อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 6.5 ลิตร ต่อชั่วโมง

2. ขนาดของหัวสเปร์ย

สืบเนื่องจากหัวสเปร์ยมีราคาค่อนข้างสูงมาก ต้องใช้เวลาการสั่งจากต่างประเทศ เป็นเวลาหลายเดือน และมีเบอร์มาตรฐาน ให้เลือกใช้จำนวนจำกัดเพียงไม่กี่เบอร์ โดยการผลิตในปัจจุบัน โรงงานตัวอย่างใช้หัวสเปร์ยเบอร์ 80.0050 ในการเคลือบเงิน แต่เมื่อทำการตรวจสอบข้อมูลกับบริษัทในเครือเดียวกัน คือที่เบลเยียม และอินโดนีเซีย พบว่าจะใช้หัวสเปร์ยที่มีขนาด 120.0050 และ 120.0067 ตามลำดับ ในการเคลือบเงิน ซึ่งถ้าหากจะสั่งมาใช้ทำการทดลอง จะต้องใช้เวลาในการสั่งไม่น้อยกว่า 2 เดือน และจะเป็นการลงทุนที่ค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องตัดปัจจัยนี้ออกจากการทดลอง

3. ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย

ความถี่ของราวสเปร์ยที่ใช้ในปัจจุบัน คือ 15 รอบต่อนาที และเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ในการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ยของบริษัทอื่นๆ ในเครือ พบว่ามีการตั้งความถี่ในการเคลื่อนที่ต่ำกว่า คือประมาณ 11 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงทำการทดลองย่อย เพื่อตรวจสอบคุณภาพของการเคลือบเงินที่ความถี่ของราวสเปร์ยค่าต่างๆ 6 ค่า คือ 9, 11, 13, 15, 17, 19 รอบต่อนาที

โดยผลการทดลองพบว่า ผลการเคลือบเงินที่ได้ ที่ความถี่ 9 รอบต่อนาที มีการเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดการเคลือบเป็นร่อง ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ส่วนผลการเคลือบที่ความถี่ราวสเปร์ยตั้งแต่ 15 รอบต่อนาทีขึ้นไป พบว่าผลการเคลือบไม่แตกต่างกันมากนัก คือเคลือบได้เรียบสม่ำเสมอ

จากผลการทดลองย่อย จึงสามารถกำหนดระดับของความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ยในการเคลือบเงินออกได้เป็น 3 ระดับคือ (ผลการทดลองย่อยดังภาคผนวก ซ.)

ระดับ 1 ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย 11 รอบต่อนาที

ระดับ 2 ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย 13 รอบต่อนาที

ระดับ 3 ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย 15 รอบต่อนาที

4. ความดันของน้ำ DI

ความดันของน้ำ DI ในปัจจุบัน ถูกตั้งเอาไว้ที่ 3 บาร์ จึงทำการทดลองย่อยที่ความดันค่าต่างๆ 6 ค่า ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 บาร์ เพื่อดูรูปแบบในการกระจายตัวของหัวสเปร์ย และปริมาณของสารละลายในระยะเวลา 1 นาที วิ่งพบว่าที่ความดัน 1 บาร์การกระจายตัวของหัวสเปร์ยไม่ดี และที่ความดันตั้งแต่ 2 บาร์ขึ้นไป จะมีการกระจายตัวที่หัวสเปร์ยดี โดยที่ความดัน 4 บาร์ขึ้นไป จะได้ปริมาณน้ำที่ออกจากหัวสเปร์ยใน 1 นาทีใกล้เคียงกัน ตามค่าสูงสุดที่หัวสเปร์ยจ่ายได้ โดยที่ความดัน 5 บาร์ และ 6 บาร์ การเคลือบเงินเริ่มบาง และค่าการสะท้อนแสงลดลง

จากผลการทดลองย่อย จึงสามารถกำหนดระดับของความดันของน้ำ DI ในการเคลือบ

เงินออกได้เป็น 3 ระดับคือ (ผลการทดลองย่อยดังภาคผนวก ซ.)

ดังนั้นจึงทำการแบ่งระดับของค่าความดันของน้ำ DI เป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับ 1 ความดันของน้ำ DI 2 บาร์

ระดับ 2 ความดันของน้ำ DI 3 บาร์

ระดับ 3 ความดันของน้ำ DI 4 บาร์

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

| ปัจจัย | สัญลักษณ์ | ระดับของปัจจัย | | |
|--|-----------|----------------|----------|---------|
| | | ต่ำ (-) | กลาง (0) | สูง (+) |
| 1. อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตรต่อชม.) | A | 4.5 | 5.5 | 6.5 |
| 1. ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ (RPM) | B | 11 | 13 | 15 |
| 2. ความดันของน้ำ DI (บาร์) | C | 2 | 3 | 4 |

3.3 การวัดประสิทธิภาพในการเคลือบเงิน

1. ปริมาณเงินบนผิวกระจก

เป็นปริมาณของเนื้อเงินที่เคลือบอยู่บนผิวกระจก โดยตามมาตรฐานการผลิตกระจกเงา ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 700 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร

2. ค่าการสะท้อนแสง (Reflectivity Index, %)

เป็นตัวชี้วัด ความสามารถในการสะท้อนแสง ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด โดยค่าการสะท้อนแสงยิ่งมีค่ามาก ความสามารถในการสะท้อนแสงของกระจกเงาก็จะยิ่งดี โดยตามมาตรฐานอุตสาหกรรม จะต้องไม่ต่ำกว่า 80%

3. ค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน (Uniformity standard deviation)

เป็นการแบ่งกระจกที่ทำการทดลองออกเป็นส่วนต่างๆ จำนวน 24 ส่วน แล้วนำค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกแต่ละจุด มาหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อดูว่าค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกที่จุดต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างไรบ้าง โดยตามมาตรฐานการผลิต ค่าส่วนเบี่ยงเบนจะต้องมีค่าไม่เกิน 3σ

4. ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (Silvering Yield, %)

คือปริมาณของเงินที่อยู่บนผิวกระจก ต่อปริมาณของสารละลายเงินที่ใช้ไปทั้งหมด โดยค่าประสิทธิภาพในการเคลือบเงินนี้ จะบ่งบอกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการเคลือบเงินนั้น เกิดได้ดีแค่ไหน และมีการสูญเสียมากเพียงใด โดยค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินนี้ ยิ่งมีค่ามากก็ยิ่งดี เพราะแสดงว่าเกิดการสูญเสียน้อย

$$\text{ประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณเงินบนผิวกระจกต่อหน่วยพื้นที่ (mg/m}^2\text{)}}{\text{ปริมาณเงินที่ใช้ไปต่อหน่วยพื้นที่ (mg/m}^2\text{)}}$$

ปริมาณเงินบนผิวกระจกต่อหน่วยพื้นที่ (mg/m²) = ได้จากการวัดค่าจากผลการทดสอบจริง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเงินที่ใช้ไปต่อหน่วยพื้นที่ (mg/m}^2\text{)} &= \frac{\text{ปริมาณเงินที่ใช้ไปต่อหน่วยเวลา (mg/hr)}}{\text{พื้นที่การสเปรย์ต่อหน่วยเวลา (m}^2\text{/hr)}} \\ &= \frac{\text{ความเข้มข้นสารละลายเงิน (g/l)} \times \text{อัตราการใช้สารละลายเงิน (l/hr)} \times 1000 \text{ (mg/g)}}{\text{ความเร็วโรลเลอร์ (m/min)} \times \text{ระยะการวิ่งราวสเปรย์ (m)} \times 60 \text{ (min/hr)}} \end{aligned}$$

3.4 รูปแบบการทดลอง

1) การทดลองซ้ำ เป็นการกำหนด จำนวนซ้ำในการทดลอง ซึ่งควรมีจำนวนซ้ำอย่างน้อย 2 ซ้ำ โดยการทดลองนี้ จะมีจำนวนซ้ำทั้งหมด 2 ซ้ำ คือจะป้อนกระจกเข้าไปในกระบวนการครั้งละ 2 แผ่น โดยใช้กระจกเบสิคที่เหมือนกันทุกประการ และมาจากการผลิตชุดเดียวกัน

2) การทำแบบสุ่ม การทดลองนี้ใช้ใช้วิธีการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) เนื่องจากหน่วยทดลองที่ใช้ ซึ่งก็คือกระจกพื้นฐานนั้น จะมาจากการผลิตชุดเดียวกันจึงมีความสม่ำเสมอ และไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างแต่ละหน่วยการทดลองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 สรุปแผนการออกแบบการทดลอง

แผนการออกแบบการทดลอง

1. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลือบเงินในการผลิตกระจกเงา และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้การเคลือบเงินบนกระจกเงาได้คุณภาพตามมาตรฐาน และมีการสิ้นเปลืองวัตถุดิบน้อยที่สุด

2. ข้อมูลพื้นฐาน

ในกระบวนการเคลือบเงิน พบว่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (Silvering Yield) มีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเคลือบเงิน โดยในปัจจุบันจะเป็นการปรับตัวแปรแต่ละตัวแบบลองผิดลองถูกเสียส่วนใหญ่ และมักจะทำการตั้งปริมาณการใช้สารละลายเงินให้ค่อนข้างสูงเพื่อให้ชัดเจนความบกพร่องต่างๆในการเคลือบเงิน จึงทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณมาก ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบเงิน ให้มีประสิทธิภาพในการเคลือบเงินสูงขึ้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

3. ตัวแปรการทดลอง

3.1 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)

- 1) ปริมาณเงินบนผิวกระจก
- 2) ค่าการสะท้อนแสง
- 3) ค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน
- 4) ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

3.2 ปัจจัย

ระดับ

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน | 4.5, 5.5 และ 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง |
| 2) ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ | 11, 13 และ 15 รอบต่อนาที |
| 3) ความดันของน้ำ DI | 2, 3 และ 4 บาร์ |

สรุปแผนการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

| | |
|--|---|
| 3.3 ปัจจัยควบคุม | การควบคุม |
| 1) ขนาดหัวสเปร์ย์ | เบอร์ 80.0050 |
| 2) ความเข้มข้นสารละลายเงิน | ซิลเวอร์ไนเตรต 250 กรัมต่อลิตร |
| 3) จำนวนหัวสเปร์ย์จำนวน | 12 คู่ |
| 4) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ DI | มีค่าไม่เกิน 15 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ |
| 5) คุณหมุมิของน้ำ DI | 23-25 องศาเซลเซียส |
| 3. จำนวนซ้ำ | |
| ทำการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ ดังนั้นจะมีจำนวนการทดลอง $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$ การทดลอง | |
| 4. วิธีการสุ่ม | |
| ใช้วิธีการแฟกทอเรียลแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Factorial Design) แสดงลำดับการทดลองตามตารางที่ 3.2 | |
| 5. เมตริกการออกแบบ | |
| แสดงดังตารางที่ 3.3 | |

ตารางที่ 3.2 ลำดับการทดลอง

| ลำดับที่ | หมายเลขสภาวะการทดลอง | ลำดับที่ | หมายเลขสภาวะการทดลอง | ลำดับที่ | หมายเลขสภาวะการทดลอง |
|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| 1 | 31 | 19 | 41 | 37 | 49 |
| 2 | 33 | 20 | 5 | 38 | 25 |
| 3 | 42 | 21 | 53 | 39 | 14 |
| 4 | 36 | 22 | 39 | 40 | 46 |
| 5 | 22 | 23 | 1 | 41 | 2 |
| 6 | 8 | 24 | 23 | 42 | 54 |
| 7 | 27 | 25 | 44 | 43 | 13 |
| 8 | 50 | 26 | 35 | 44 | 29 |
| 9 | 11 | 27 | 51 | 45 | 32 |
| 10 | 7 | 28 | 26 | 46 | 48 |
| 11 | 17 | 29 | 4 | 47 | 47 |
| 12 | 52 | 30 | 45 | 48 | 28 |
| 13 | 12 | 31 | 19 | 49 | 30 |
| 14 | 15 | 32 | 43 | 50 | 40 |
| 15 | 20 | 33 | 24 | 51 | 38 |
| 16 | 37 | 34 | 10 | 52 | 21 |
| 17 | 34 | 35 | 9 | 53 | 3 |
| 18 | 18 | 36 | 16 | 54 | 6 |

ตารางที่ 3.3 เมตริกซ์การออกแบบ

| A | B | | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | | | 1 | | | 2 | | |
| | C | | | C | | | C | | |
| | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| 0 | 1* | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 1 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| 2 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |

* หมายเลขสภาวะการทดลอง

0 หมายถึง ระดับของปัจจัยระดับต่ำ

1 หมายถึง ระดับของปัจจัยระดับกลาง

2 หมายถึง ระดับของปัจจัยระดับสูง

A หมายถึง อัตราการจ่ายสารละลายเงิน

B หมายถึง ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์

C หมายถึง ความดันของน้ำ DI

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

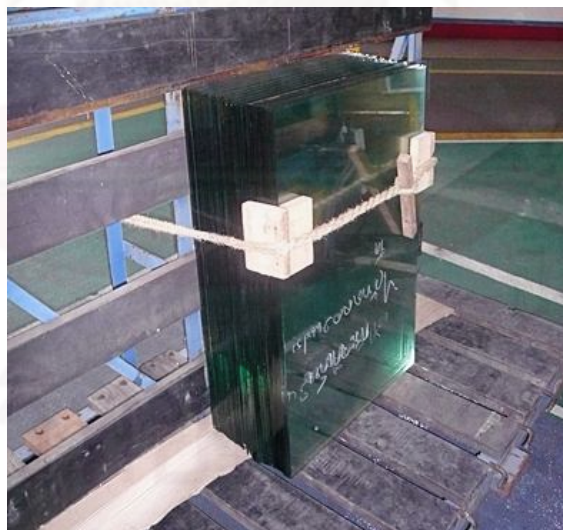
จากขั้นตอนการออกแบบการทดลองในบทที่ 3 จะนำมาใช้เป็นหลักการในการดำเนินการทดลองซึ่งข้อกำหนดต่างๆที่ได้กล่าวไว้ในแผนการทดลอง จะต้องได้รับการปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด เช่น จัดเตรียมวัสดุบิตต่างๆอย่างสุ่ม ลำดับการทดลองจะต้องถูกดำเนินการแบบสุ่มตามที่ได้ระบุไว้ค่าปรับตั้งต่างๆที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละชุดการทดลอง รวมทั้งปัจจัยที่ถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยควบคุม จะต้องทำการควบคุมอย่างเคร่งครัดเช่นเดียวกัน

4.1 การจัดเตรียมวัสดุบิตในการทดลอง

4.1.1 กระจกพื้นฐาน (Basic Glass)

กระจกแผ่นเรียบพื้นฐาน ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง จะต้องผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติตามเงื่อนไข ก่อนการใช้งาน คือเป็นกระจกความหนา 5 มม. ผลิตในช่วงเวลาเดียวกันทั้งหมด

โดยกระจกพื้นฐาน ที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้ว จะถูกตัดแบ่งบอกลงเป็นแผ่นย่อย ขนาดกว้าง 24 นิ้ว และยาว 36 นิ้ว จำนวน 54 แผ่น ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กระจกพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองจำนวน 54 แผ่น

4.1.2 สารละลายเงินตั้งต้น

สารละลายเงินตั้งต้นที่จะใช้ในการทดลอง คือสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 250 กรัมต่อลิตร ซึ่งจะต้องเป็นสารละลายเงินที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพตามเกณฑ์การผลิต เป็นสารละลายเงินชุดเดียวกันตลอดการทดลอง และยังไม่หมดอายุการใช้งาน

4.1.3 น้ำ DI

น้ำ DI ที่ใช้ตลอดการทดลอง จะต้องถูกควบคุมคุณภาพให้มีค่าคงที่ตามข้อกำหนดในบทที่ 3 ดังนี้

- ต้องมีค่าความนำไฟฟ้า $15 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ตลอดการทดลอง
- ต้องมีอุณหภูมิ 23 - 25 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

4.2 การดำเนินการทดลอง

4.2.1 ปรับตั้งปัจจัยควบคุม และปัจจัยที่จะทำการศึกษา ตามค่าที่กำหนดเอาไว้ในแผนการทดลอง สำหรับการทดลองลำดับที่ 1



รูปที่ 4.2 ปัจจัยทั้ง 3 ตัวที่ทำการศึกษา

4.2.2 บันทึกค่าตัวเลขมิเตอร์ตั้งต้น ของปริมาณการใช้สารละลายเงิน เพื่อใช้หาปริมาณสารละลายเงินที่ใช้ไปในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 4.3 ตัวเลขมิเตอร์ตั้งต้นตอนเริ่มการทดลอง

4.2.2 ป้อนกระจกพื้นฐาน จำนวน 1 แผ่น เข้าสู่กระบวนการผลิต



รูปที่ 4.4 การป้อนกระจกพื้นฐานเข้าสู่การทดลอง

4.2.3 กระจกจะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการล้าง การเคลือบดีบุก การเคลือบเงิน การเคลือบพาราเดียม การเคลือบไซเลน และเตาอบชั้นเงิน



รูปที่ 4.5 กระจกทดลองระหว่างการทดสอบเคลือบเงิน

4.2.4 นำกระจกออกจากกระบวนการผลิต บริเวณห้องเคลือบสี

4.2.5 ทำการสอดกระดาษระหว่างกระจกแต่ละแผ่น เพื่อป้องกันการกระแทก หรือหลุดลอกของชั้นเงิน พร้อมทั้งระบุหมายเลขลำดับการทดลองลงบนกระจกแต่ละแผ่น



รูปที่ 4.6 การนำกระจกทดลองออกจากการทดสอบและการจัดเก็บ

4.2.6 เมื่อเสร็จสิ้นในแต่ละการทดลอง ให้ทำการบันทึกปริมาณเงินที่ได้ใช้ไป จากมิเตอร์ ปริมาณการใช้สารละลายเงิน

4.2.7 ทำการปรับตั้งค่าของปัจจัยที่ศึกษา สำหรับการทดลองลำดับถัดไป และเริ่มทำการ ป้อนกระจกเข้าสู่การผลิตอีกครั้ง โดยทำเช่นนี้จนครบทุกการทดลอง

4.2.8 ทำการมัดกระจกทั้งหมดด้วยเชือกเพื่อป้องกันการล้ม ก่อนขนย้ายไปทำการตัดแบ่ง ชั้นทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

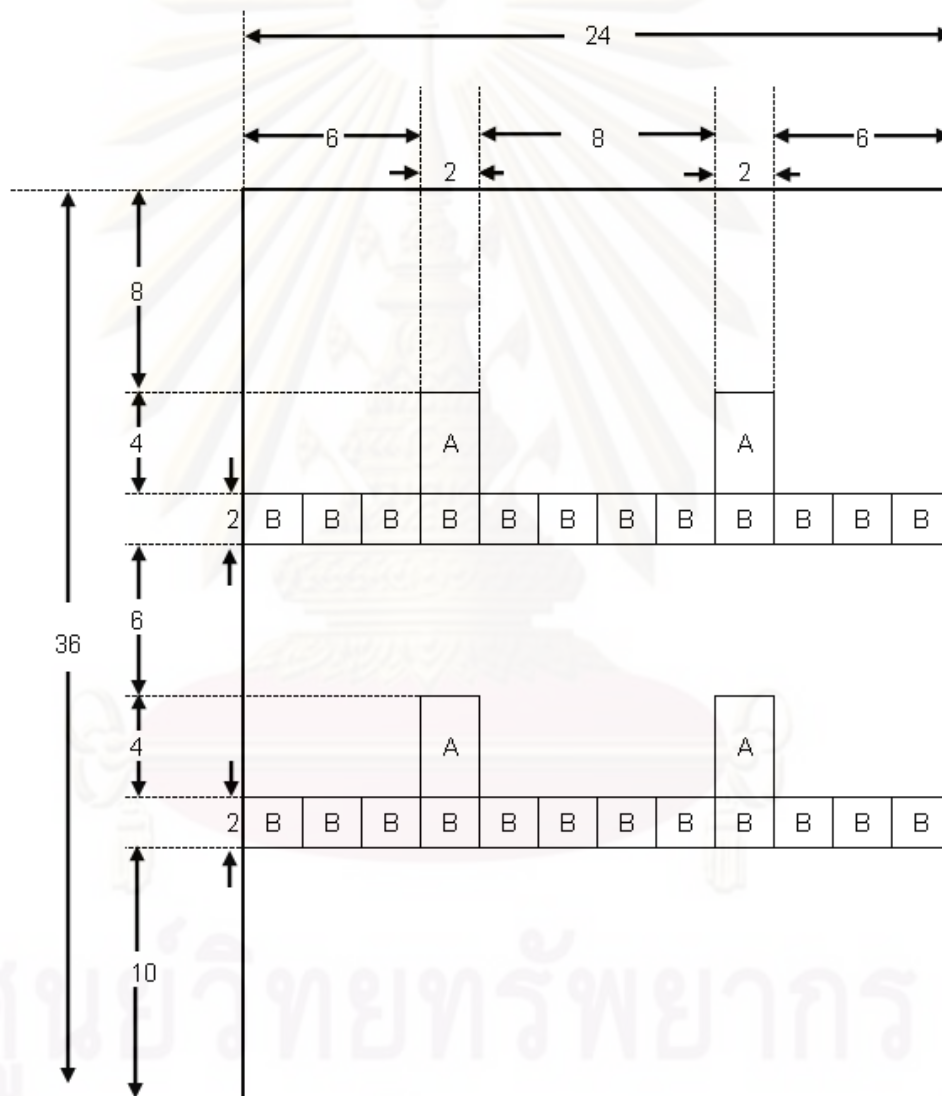
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การตัดแบ่งชั้นทดสอบ

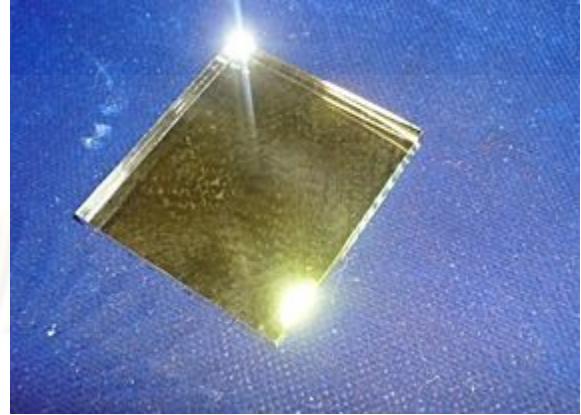
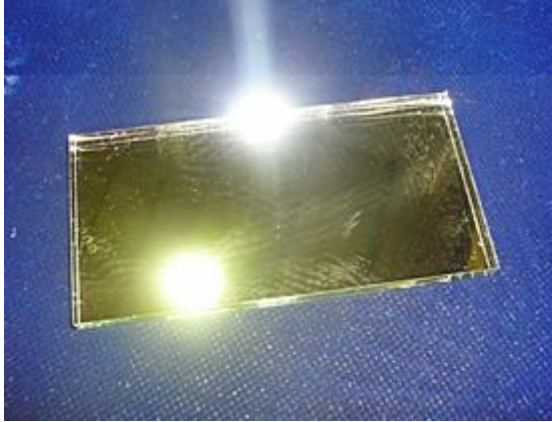
ตำแหน่งและการตัดแบ่งชั้นทดสอบสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 4.7

4.3.1 ชั้นทดสอบ A สำหรับการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกและค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน มีขนาด 2×4 นิ้ว จำนวน 4 แผ่น ต่อ 1 แผ่นกระจกทดสอบ

4.3.2 ชั้นทดสอบ B สำหรับการทดสอบค่าการสะท้อนแสงและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง มีขนาด 2×2 นิ้ว จำนวน 24 แผ่น ต่อ 1 แผ่นกระจกทดสอบ



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งและการตัดแบ่งชั้นทดสอบ



รูปที่ 4.8 ชั้นทดสอบแบบ A และแบบ B

โดยเมื่อทำการตัดแบ่งชั้นทดสอบขนาดและตำแหน่งตามรูปที่ 4.7 เรียบร้อยแล้ว ก็ทำการจัดเก็บกระจกทดสอบ ระบุลำดับการทดลอง และคั่นกระดาษระหว่างกระจกแต่ละชั้นเพื่อป้องกันการกระเทาะของชั้นเงินดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การตัดแบ่งชั้นทดสอบและการจัดเก็บ

4.4 วิธีการตรวจสอบตัวแปรตอบสนอง

4.4.1 ปริมาณเงินบนผิวกระจก

การวัดปริมาณเงินบนผิวกระจก มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ผสมสารละลายกรดไนตริก (กรดไนตริก:น้ำบริสุทธิ์ = 1:1) ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000ml แล้วใช้ฝาปิด
- 2) นำสารละลายกรดไนตริกไปต้มบนเตาไฟฟ้าจนเดือด
- 3) วางชั้นทดสอบขนาด 2"x4" ลงใน บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร โดยชั้นทดสอบ 1 ชั้น ต่อบีกเกอร์ 1 ใบ
- 4) ดูดสารละลายกรดไนตริกที่ผ่านการให้ความร้อน โดยใช้ปิเปตมา 5 มิลลิลิตร

แล้วค่อยๆหยดลงไปบนชิ้นทดสอบ บนด้านเงินในบิกเกอร์

- 5) ใช้ **Policeman's club** จุ่มลงไปในสารละลายที่ด้านล่างของบิกเกอร์แล้วปาดลงไปบนผิวกระจก เพื่อจะละลายเงินที่เหลือออกมาจนหมด
- 6) ล้างกระจกด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเอาแผ่นกระจกตัวอย่างออกจากบิกเกอร์ โดยที่ปริมาตรสารละลายรวมน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 มิลลิลิตร ถึง 50 มิลลิลิตร
- 7) ต้มสารละลายบนเตาไฟฟ้าอีกครั้งจนกระทั่งเดือด เพื่อให้มีการละลายอย่างสมบูรณ์
- 8) หลังจากการละลายสมบูรณ์ ทั้งสารละลายไว้ให้เย็นลงจนเท่าอุณหภูมิห้อง
- 9) เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในสารละลายทดสอบที่เย็นลงแล้ว เพื่อให้มีปริมาณ 100 มิลลิลิตร
- 10) เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ **iron** ลงในสารละลายตัวอย่างเงิน ใช้หลอดปิเปตหยดลงไป 5ml และกวนให้เข้ากันอย่างดี แล้วจึงนำไปวางเตรียมที่แท่นบิวเรต
- 11) เตรียมสารละลายไทเตรนต์ (แอมโมเนียมไทโอไซยาเนต) ความเข้มข้น 0.01N ใส่ในหลอดบิวเรตขนาด 100 มิลลิลิตร เมื่อใส่สารดังกล่าวแล้วให้อ่านระดับ ของเหลวในบิวเรตแล้วบันทึกไว้ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเงิน
- 12) ใส่ **Magnetic bar** ลงในบิกเกอร์แล้วเปิดเครื่อง **Stirrer** กวนสารละลายจากนั้นเปิดวาล์วของบิวเรต เพื่อหยดสารละลาย การเปิดวาล์วหยดต้องเปิดให้หยดทีละหยดอย่างช้าๆ
- 13) ให้หยุดหยดสารละลายทันที เมื่อสารละลายเปลี่ยนจากไม่มีสี เป็นสีน้ำตาลแดง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนสีขณะทำการไตเตรต

- 14) อ่านระดับของบิวเรตที่ใช้ไป จากนั้นหาค่าแตกต่างระดับเริ่มต้นและระดับสิ้นสุด เมื่อได้แล้ว ให้คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณสารไทเตรนต์} \times (\text{factor ตามความเข้มข้นไทเตรนต์}) \times 0.209 = \text{ปริมาณ Ag (mg/m}^2\text{)}$$

- 15) บันทึกผลการทดสอบ

4.4.2 ค่าการสะท้อนแสง

- 1) ตัดกระจกตัวอย่างขนาด 2" x 2" จำนวน 24 แผ่น ตามรูปแบบ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6
- 2) ทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องโครมามิเตอร์ทุกครั้งก่อนเริ่มทำการวัด
- 3) นำกระจกที่จะทำการวัด วางลงบนหัววัด โดยหันด้านที่เคลือบเงินขึ้นด้านบน
- 4) ทำการวัดค่าการสะท้อนแสงของกระจกตัวอย่างด้วยเครื่องโครมามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.11 การวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่องโครมามิเตอร์

- 5) บันทึกผลการทดสอบ พร้อมจัดเก็บกระดาษบันทึกค่า
- 6) เมื่อทำการวัดกระจกตัวอย่างครบทุกการทดลองแล้ว ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าการสะท้อนแสงจากข้อมูลที่ได้

4.4.3 ค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

- 1) นำค่าการสะท้อนแสง ที่บันทึกได้จากการทดสอบที่ 4.4.2 มาทำการคำนวณเพื่อหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสงของแต่ละการทดลอง
- 2) บันทึกผลการทดสอบ

4.4.4 ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

- 1) นำค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกจากการตรวจสอบในข้อ 4.4.1 และปริมาณสารละลายเงินที่ใช้จริงที่ได้บันทึกเอาไว้ในแต่ละการทดลอง มาทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

โดยค่าทั้งหมดที่ทำการตรวจสอบควรมีค่าตามมาตรฐานการผลิตกระจกเงา ดังตารางที่ 4.1
 ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของการเคลือบเงิน ที่ต้องการตามมาตรฐานการผลิตกระจกเงา

| ลำดับที่ | คุณลักษณะ | เกณฑ์ที่กำหนด |
|----------|---|-------------------------------|
| 1 | ปริมาณเงินบนผิวกระจก (European Standard EN1036) (2) | มากกว่า 700 mg/m ² |
| 2 | ค่าการสะท้อนแสง (มอก. 1732-2541) (4) | มากกว่า 80% |
| 3 | ค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน | ต่ำที่สุด |
| 4 | ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน | สูงที่สุด |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การคำนวณและการวิเคราะห์ผล

5.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

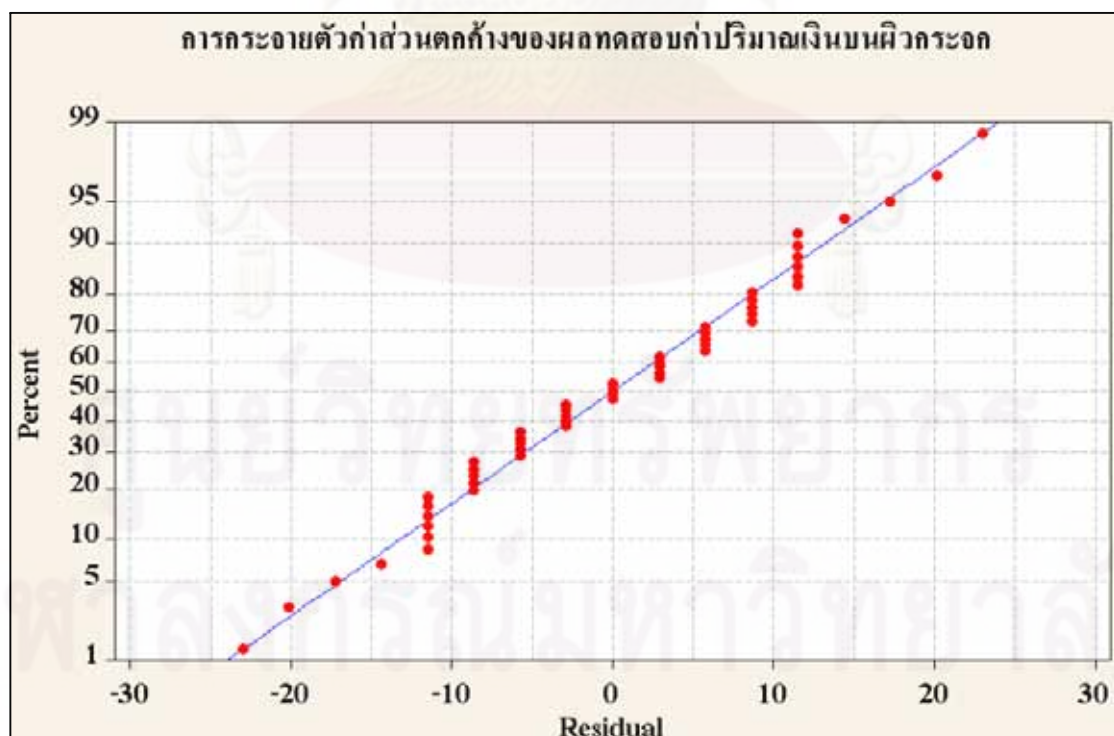
หลังจากทำการทดลองตามแผนการทดลองแล้ว จะนำผลที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ ว่าข้อมูลมีความเหมาะสมหรือไม่ แล้ววิเคราะห์ความแปรปรวนว่า ปัจจัยหรือปัจจัยร่วมตัวใดมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของการเคลือบเงิน นอกจากนี้จะนำผลการทดลองมาสร้างกราฟตัวแปรตอบสนอง เพื่อแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของการเคลือบเงิน

5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

5.1.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1. การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

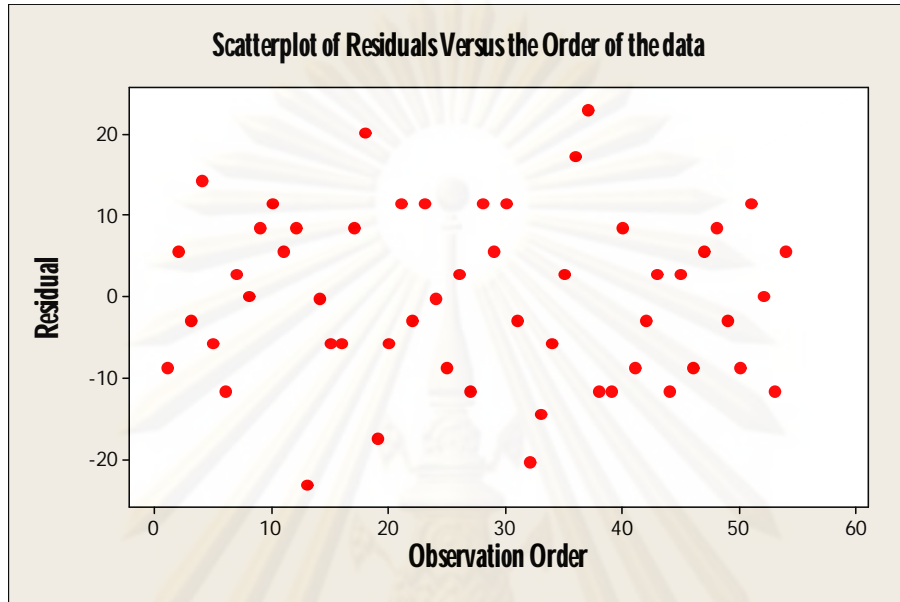
นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องโดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ



รูปที่ 5.1 การกระจายของข้อมูลของส่วนตกค้างการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

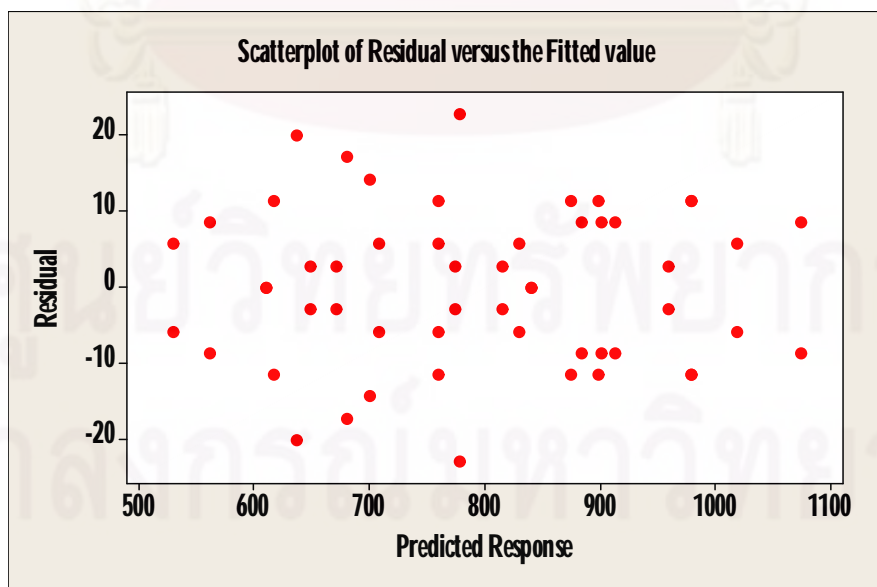
จะพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าเรซิดิวล ที่สัมพันธ์กับลำดับเวลาของการทดลองของชุดทดลองทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.2 โดยการกระจายตัวเป็นแบบไร้รูปแบบ สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.2 ส่วนตกค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลของการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยดูการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ในที่นี้คือค่าคาดหวังของผลตอบสนอง ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งสรุปได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลมีความเสถียร เพราะการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นแบบไร้รูปแบบ



รูปที่ 5.3 ส่วนตกค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบสนองการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

1.3) การทดสอบสมมติฐานของความดันของน้ำ DI

$$H_0 : \gamma_k = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \gamma_k \neq 0$$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่า ค่า F-Ratio > Fวิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ความดันของน้ำ DI มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

2.1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม ระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์

$$H_0 : (\tau\beta_{ij}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\beta_{ij}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > Fวิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์กับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\beta\gamma_k) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\beta\gamma_k) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่า F-Ratio < Fวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์กับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม อัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\tau\gamma_{ik}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\gamma_{ik}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่า **F-Ratio** > **F** วิฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่าปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ **DI** มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

5.1.1.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square และ R-Square Adjust (3)

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบนั้น จะต้องได้รับการตรวจสอบความเชื่อถือได้ โดยการวิเคราะห์ค่า R^2 และ R^2 -Adj ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2 = 99.50 \%$$

$$R^2\text{-Adj} = \frac{(\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรที่อธิบายได้}) \times 100\%}{(\text{ความผันแปรทั้งหมด} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรทั้งหมด})}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2 - \text{Adj} = 99.02 \%$$

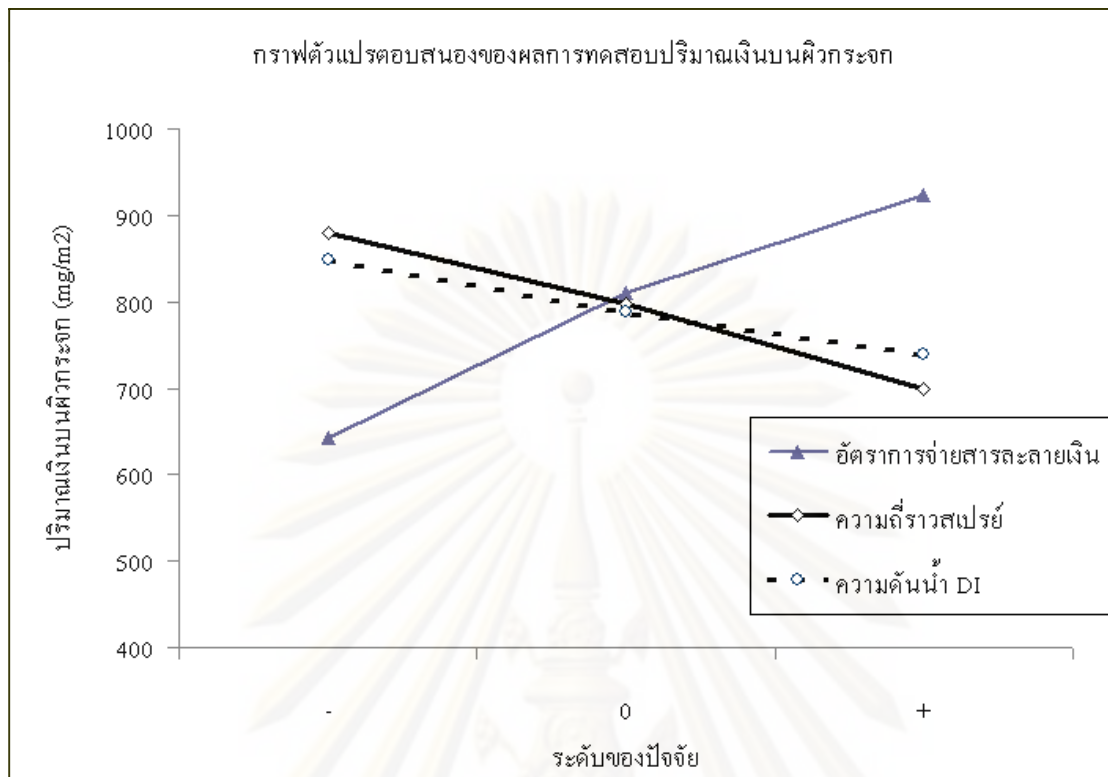
ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่า R^2 และ R^2 -Adj ของผลการทดสอบค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกพบว่ามีความสูงมากคือ **99.50 %** และ **99.02%** ตามลำดับ แสดงว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสม และจำนวนการทดลองที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสม

5.1.1.4 การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของปริมาณเงินบนผิวกระจก

ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกได้ผลดังรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

| ระดับของปัจจัย | ปัจจัย A | ปัจจัย B | ปัจจัย C |
|----------------|----------|----------|----------|
| - | 642.92 | 879.19 | 848.49 |
| 0 | 810.13 | 797.02 | 787.75 |
| + | 922.99 | 699.83 | 739.80 |



รูปที่ 5.4 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

จากรูปที่ 5.4 พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ปัจจัย A), ความถี่ราวสเปรย์ (ปัจจัย B) และความดันน้ำ DI (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อปริมาณเงินบนผิวกระจก โดยที่

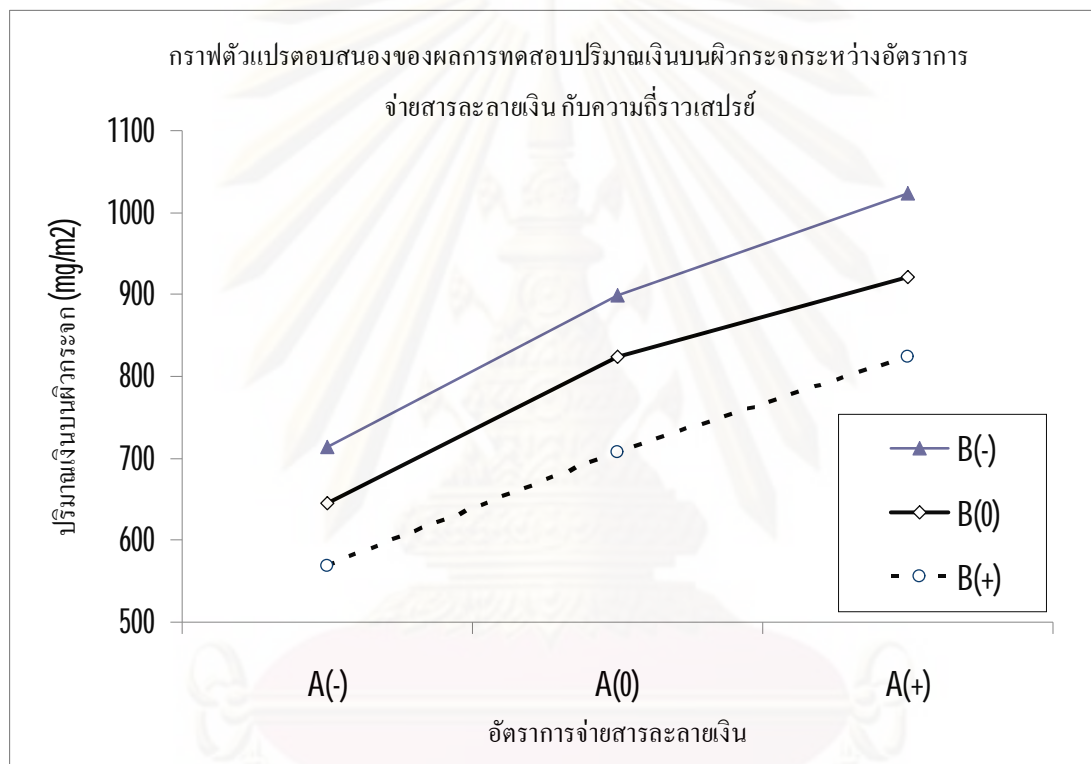
1) อัตราการจ่ายสารละลายเงินที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกมากขึ้น และจากกราฟจะเห็นว่า ที่อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 และ 4.5 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

2) ความถี่ราวสเปรย์ที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกลดลง และจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความถี่ราวสเปรย์ 11 รอบต่อนาที จะได้ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกที่มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือความถี่ราวสเปรย์ 13 และ 15 รอบต่อนาทีตามลำดับ

3) ความดันน้ำ DI ที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกลดลง และจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความดันน้ำ DI 2 บาร์ จะได้ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกที่มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือความดันน้ำ DI 3 บาร์ และ 4 บาร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปร์ย์

| ปริมาณเงินบนผิวกระจก (A) | ความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปร์ย์ (B) | | |
|--------------------------|------------------------------------|--------|--------|
| | B(-) | B(0) | B(+) |
| A(-) | 714.54 | 645.48 | 568.75 |
| A(0) | 899.65 | 823.88 | 706.87 |
| A(+) | 1023.37 | 921.71 | 823.88 |

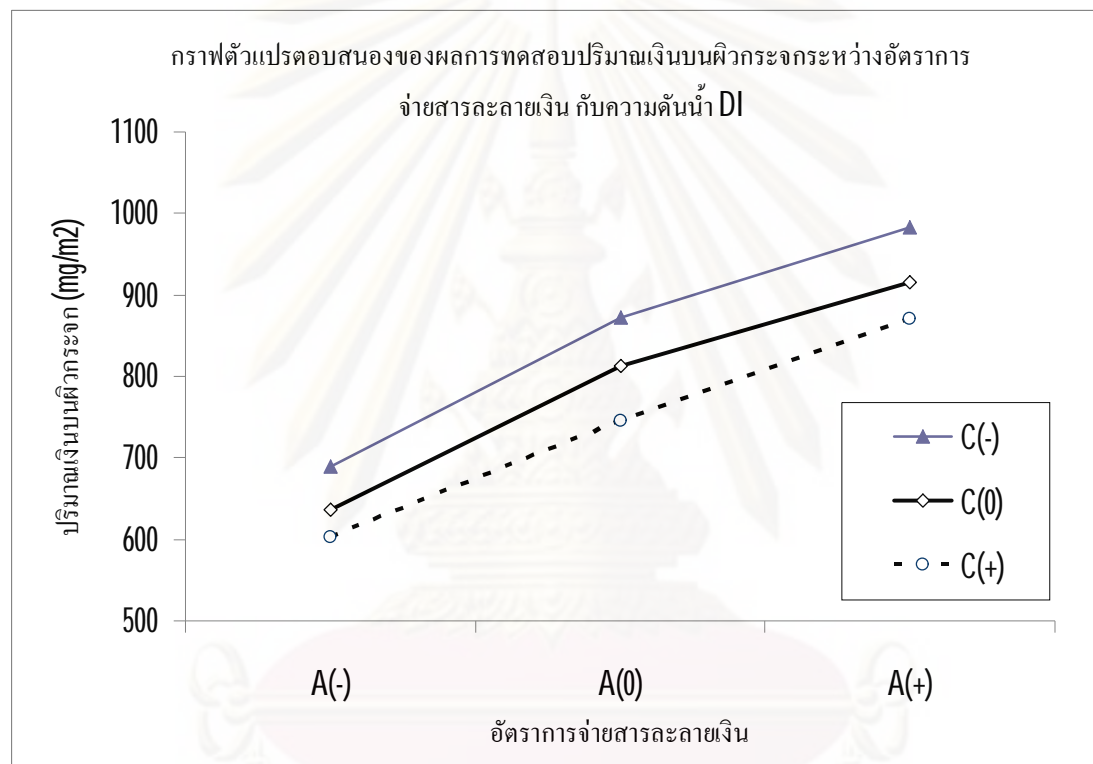


รูปที่ 5.5 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความถี่ราวสเปร์ย์

จากรูปที่ 5.5 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความถี่ราวสเปร์ย์ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าต่ำ จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ราวสเปร์ย์ต่ำกว่า ที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าอื่น และที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าสูง จะให้ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกสูง โดยที่ความถี่ราวสเปร์ย์คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มอัตราการจ่ายสารละลายเงิน จะส่งผลให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกสูงขึ้น

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความดันน้ำ DI

| ปริมาณเงินบนผิวกระจก (A) | ความดันน้ำ DI (C) | | |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|
| | C(-) | C(0) | C(+) |
| A(-) | 689.60 | 635.89 | 603.28 |
| A(0) | 872.79 | 812.37 | 745.23 |
| A(+) | 983.09 | 914.99 | 870.87 |



รูปที่ 5.6 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจกระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความดันน้ำ DI

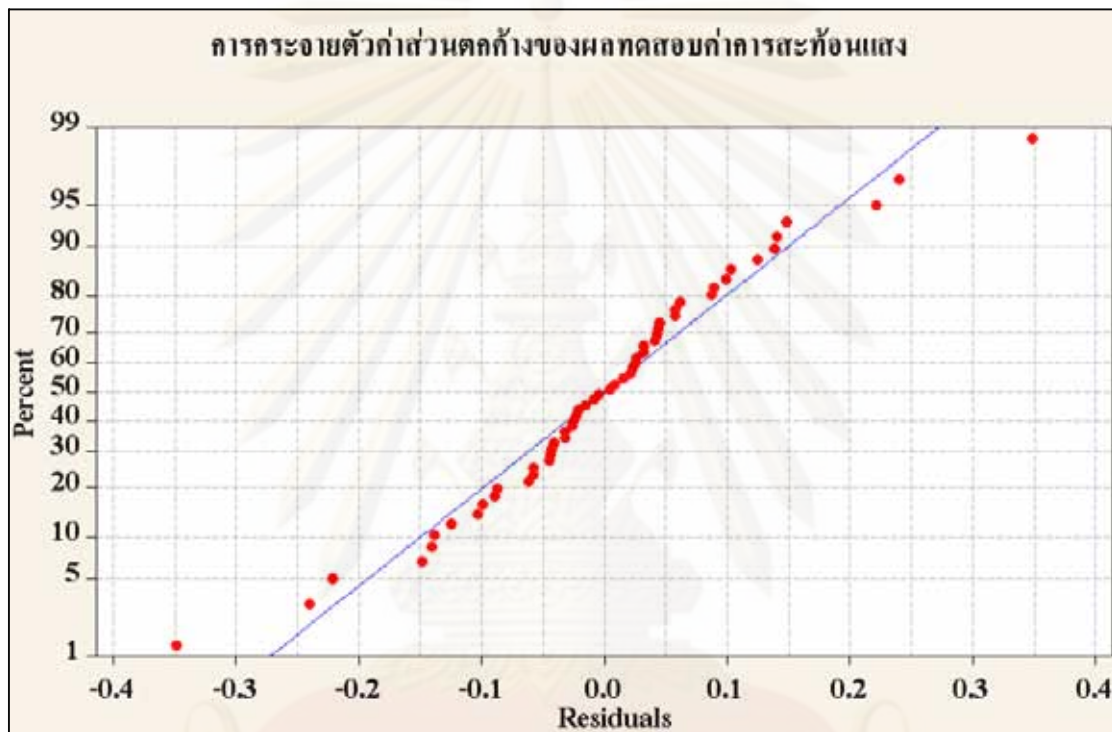
จากรูปที่ 5.6 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินและความดันน้ำ DI จะเห็นได้ว่าที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าต่ำ จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำ DI ต่ำกว่าที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าอื่น และที่อัตราการจ่ายสารละลายเงินค่าสูง จะให้ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกสูง โดยที่ความดันน้ำ DI คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มอัตราการจ่ายสารละลายเงิน จะส่งผลให้ปริมาณเงินบนผิวกระจกสูงขึ้น

5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

5.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

1. การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลโดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของการทดสอบค่าการสะท้อนแสง ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

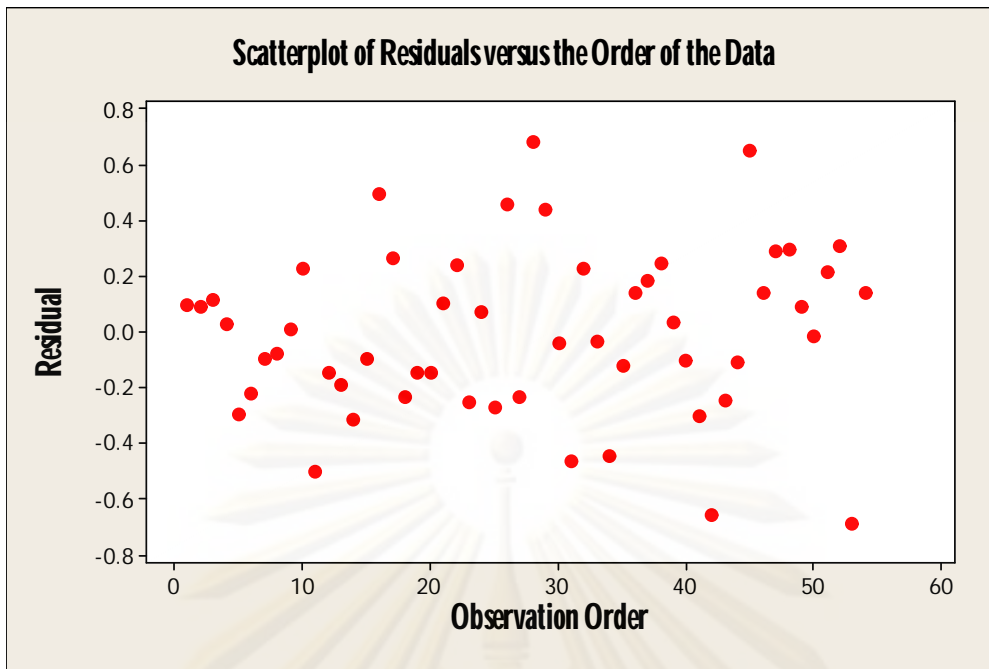


รูปที่ 5.7 กราฟการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จะพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าเรสซิดวอล ที่สัมพันธ์กับลำดับเวลาของการทดลองของชุดทดลองทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.8 โดยการกระจายตัวเป็นแบบไร้รูปแบบ สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

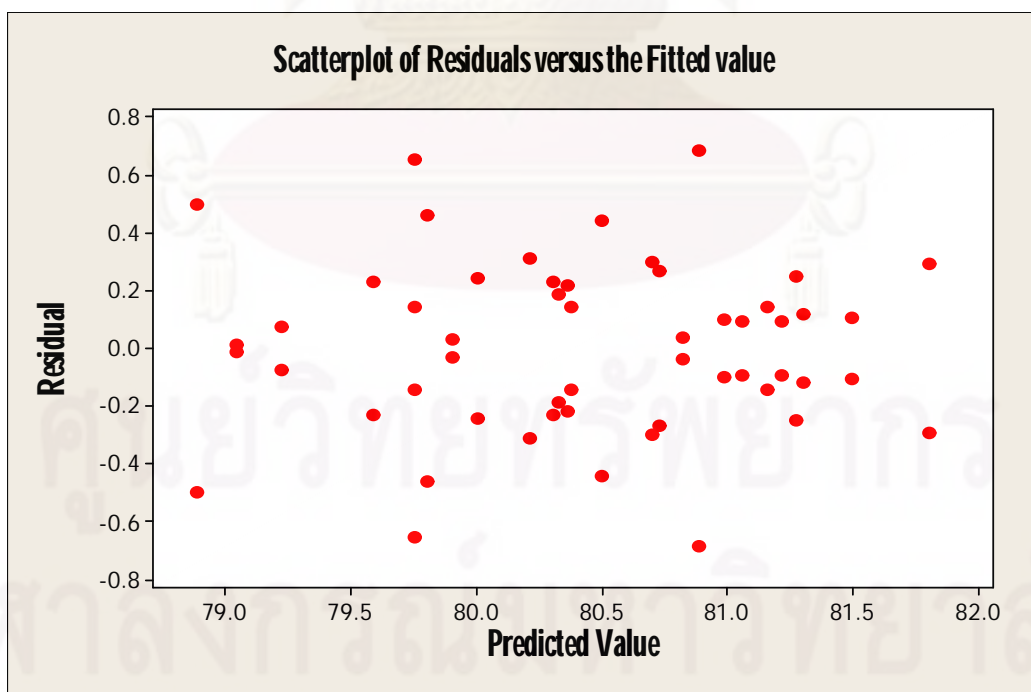
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 ส่วนตกค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลของการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยดูการกระจายตัวของค่า ส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ในที่นี้คือค่าคาดหวังของผลตอบสนอง ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของข้อมูลมีความเสถียร เพราะการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นแบบไร้รูปแบบ



รูปที่ 5.9 ส่วนตกค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบสนองการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

5.1.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าค่าการสะท้อนแสงที่ได้ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 5.5
 ตารางที่ 5.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

| แหล่ง ของ ความผัน | ผลรวม กำลังสอง | ชั้นของ ความอิสระ | ค่าเฉลี่ย กำลังสอง | F0 | F วิกฤต |
|-------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|--------|---------|
| A | 22.145 | 2 | 11.072 | 64.275 | 3.3541 |
| B | 1.347 | 2 | 0.674 | 3.910 | |
| C | 2.230 | 2 | 1.115 | 6.473 | |
| AB | 0.925 | 4 | 0.231 | 1.342 | 2.7278 |
| AC | 0.411 | 4 | 0.103 | 0.597 | 2.3053 |
| BC | 0.430 | 4 | 0.108 | 0.624 | |
| ABC | 2.836 | 8 | 0.355 | 2.058 | |
| Error | 4.651 | 27 | 0.172 | | |
| Total | 34.976 | 53 | | | |

F0.05,2,27= 3.3541

R Square = 86.70%

F0.05,4,27= 2.7278

Adj. R-Square = 73.90%

F0.05,8,27= 2.3053

จากตารางที่ 5.5 สามารถสรุปผลการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1) การทดสอบสมมติฐานของอัตราการจ่ายสารละลายเงิน

$$H_0 : \tau_i = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \tau_i \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > F วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อัตราการจ่ายสารละลายเงิน มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสงที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.2) การทดสอบสมมติฐานของความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \beta_j \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > F วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสงที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.3) การทดสอบสมมติฐานของความดันของน้ำ DI

$$H_0 : \gamma_k = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \gamma_k \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า $F\text{-Ratio} > F$ วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ค่าความดันของน้ำ DI มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสงที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

2.1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความเร็วการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์

$$H_0 : (\tau\beta_{ij}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\beta_{ij}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า $F\text{-Ratio} < F$ วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความเร็วการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์กับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\beta\gamma_{jk}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\beta\gamma_{jk}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า $F\text{-Ratio} < F$ วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วการเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์กับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\tau\gamma_{ik}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\gamma_{ik}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า $F\text{-Ratio} < F$ วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

5.1.2.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square และ R-Square Adjust

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบนั้น จะต้องได้รับการตรวจสอบความเชื่อถือได้ โดยการวิเคราะห์ค่า R^2 และ R^2 -Adj ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}}$$

ดังนั้น $R^2 = 86.70 \%$

$$R^2\text{-Adj} = \frac{(\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรที่อธิบายได้}) \times 100\%}{(\text{ความผันแปรทั้งหมด} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรทั้งหมด})}$$

ดังนั้น $R^2 - \text{Adj} = 73.90 \%$

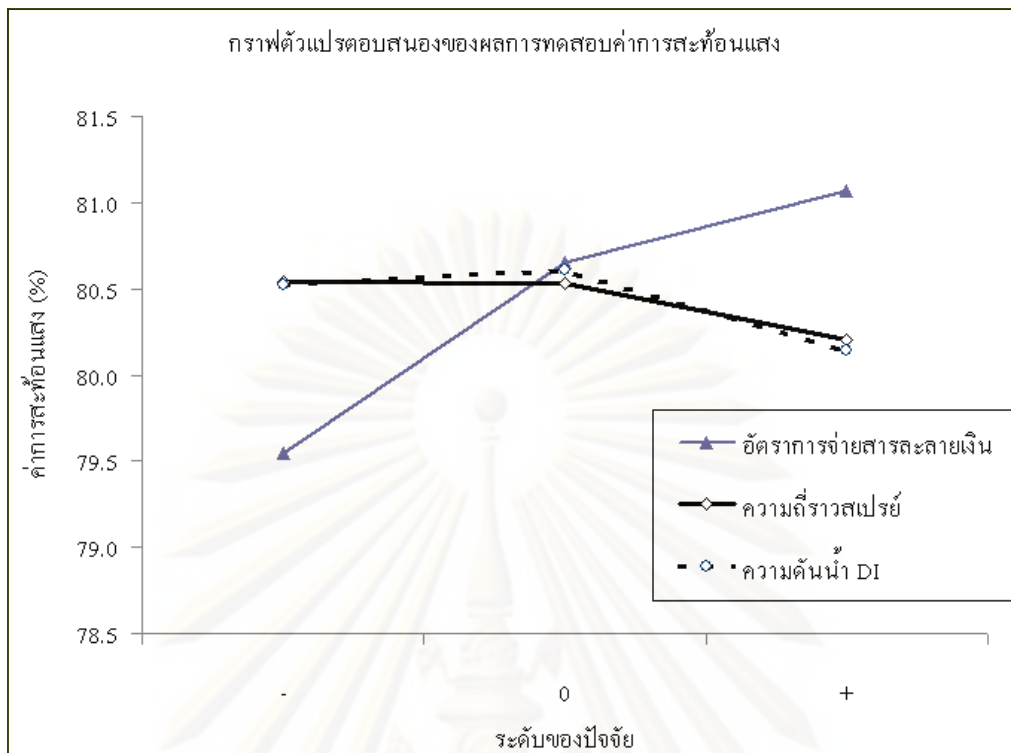
ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่า R^2 และ R^2 -Adj ของผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสงพบว่ามีความสูงคือ 86.70% และ 73.90% ตามลำดับ แสดงว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสม และจำนวนการทดลองที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสม

5.1.2.4 การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของค่าการสะท้อนแสง

ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสงได้ผลดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

| ระดับของปัจจัย | ปัจจัย A | ปัจจัย B | ปัจจัย C |
|----------------|----------|----------|----------|
| - | 79.55 | 80.54 | 80.52 |
| 0 | 80.65 | 80.53 | 80.61 |
| + | 81.07 | 80.20 | 80.14 |



รูปที่ 5.10 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

จากรูปที่ 5.10 พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ปัจจัย A), ความถี่ราวสเปรย์ (ปัจจัย B) และความดันน้ำ DI (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสง โดยที่

1) อัตราการจ่ายสารละลายเงินที่มากขึ้น จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงมากขึ้น และจากกราฟจะได้ว่า ที่อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 และ 4.5 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

2) ความถี่ราวสเปรย์ที่มากขึ้น จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงลดลง และจากกราฟจะได้ว่า ที่ความถี่ราวสเปรย์ 11 รอบต่อนาที จะได้ค่าการสะท้อนแสงที่มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือความถี่ราวสเปรย์ 13 และ 15 รอบต่อนาทีตามลำดับ

3) ความดันน้ำ DI 3 บาร์ จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าสูงที่สุด โดยเมื่อเพิ่มหรือลดความดันน้ำ DI เป็น 4 บาร์ และ 2 บาร์ ตามลำดับ จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าลดลง

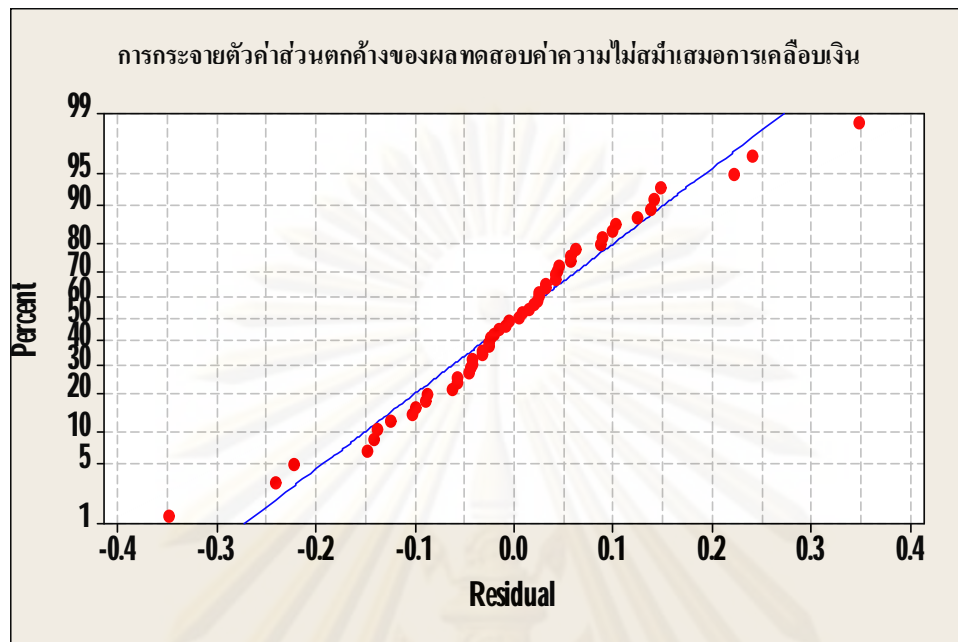
5.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

5.1.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

1. การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลโดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน ด้วย

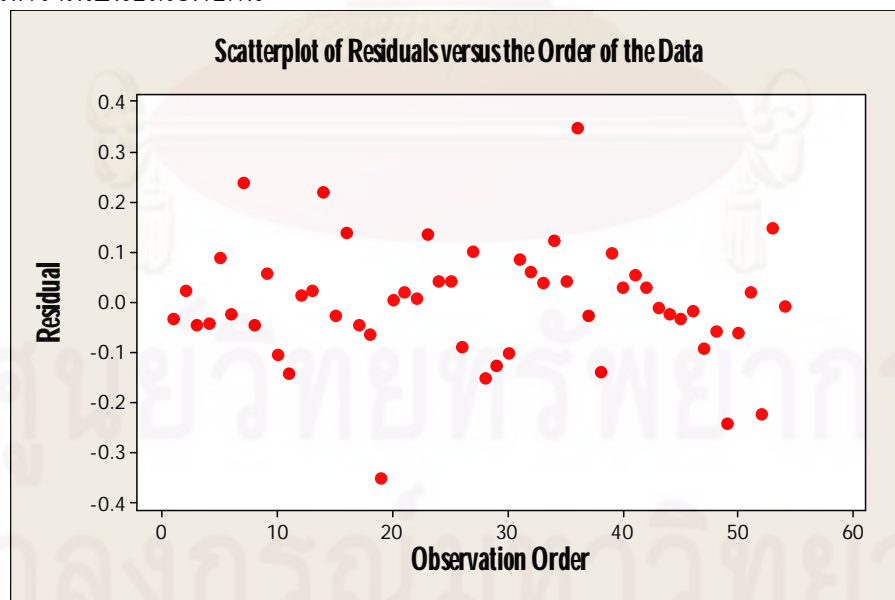
กราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ



รูปที่ 5.11 กราฟการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

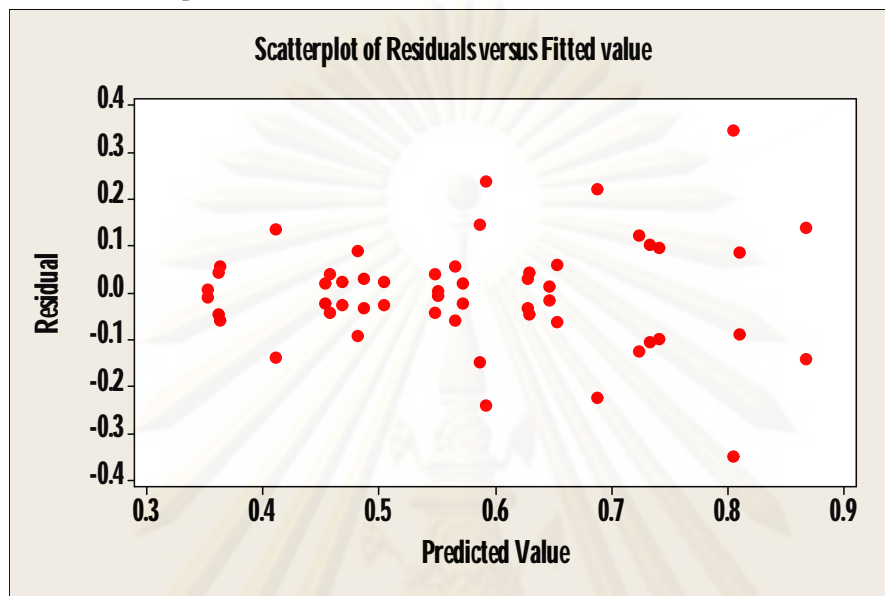
จะพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าเรสซิดวล ที่สัมพันธ์กับลำดับเวลาของการทดลองของชุดทดลองทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.11 โดยการกระจายตัวเป็นแบบไร้รูปแบบ สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.12 ส่วนตค้างกับลำดับการเก็บข้อมูลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยดูการกระจายตัวของค่า ส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ในที่นี้คือค่าคาดหวังของผลตอบสนอง ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของข้อมูลมีความเสถียร เพราะการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นแบบไร้รูปแบบ



รูปที่ 5.13 ส่วนตกค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอการเคลือบเงิน

5.1.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงินที่ได้ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดัง ตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

| แหล่งของความผัน | ผลรวมกำลังสอง | ขั้นของความ | ค่าเฉลี่ยกำลังสอง | F0 | F วิกฤต |
|-----------------|---------------|-------------|-------------------|-------|---------|
| A | 0.046 | 2 | 0.023 | 0.845 | 3.3541 |
| B | 0.028 | 2 | 0.014 | 0.516 | 2.7278 |
| C | 0.284 | 2 | 0.142 | 5.274 | |
| AB | 0.019 | 4 | 0.005 | 0.178 | 2.3053 |
| AC | 0.262 | 4 | 0.066 | 2.432 | |
| BC | 0.249 | 4 | 0.062 | 2.306 | |
| ABC | 0.164 | 8 | 0.020 | 0.760 | |
| Error | 0.728 | 27 | 0.027 | | |
| Total | 1.779 | 53 | | | |

$F_{0.05,2,27} = 3.3541$

$F_{0.05,4,27} = 2.7278$

$F_{0.05,8,27} = 2.3053$

R Square = 59.10%

Adj. R-Square = 19.71%

จากตารางที่ 5.7 สามารถสรุปผลการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1) การทดสอบสมมติฐานของอัตราการจ่ายสารละลายเงิน

$$H_0 : \tau_i = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \tau_i \neq 0$$

จากตารางที่ 5.7 จะเห็นว่าค่า **F-Ratio** < **F** วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า อัตราการจ่ายสารละลายเงิน ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.2) การทดสอบสมมติฐานของความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \beta_j \neq 0$$

จากตารางที่ 5.7 จะเห็นว่าค่า **F-Ratio** < **F** วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.3) การทดสอบสมมติฐานของความดันของน้ำ DI

$$H_0 : \gamma_k = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \gamma_k \neq 0$$

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่า **F-Ratio** > **F** วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ค่าความดันของน้ำ DI มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

2.1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงิน กับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์

$$H_0 : (\tau\beta_{ij}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\beta_{ij}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.7 จะเห็นว่าค่า **F-Ratio** < **F** วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความถี่การเคลื่อนที่ของ

ราวสเปรย์ ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์กับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\beta\gamma_k) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\beta\gamma_k) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่า F-Ratio < Fวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์กับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\tau\gamma_k) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\gamma_k) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่า F-Ratio < Fวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

5.1.3.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square และ R-Square Adjust

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบนั้น จะต้องได้รับการตรวจสอบความเชื่อถือได้ โดยการวิเคราะห์ค่า R^2 และ $R^2\text{-Adj}$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2 = 59.10 \%$$

$$R^2\text{-Adj} = \frac{(\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรที่อธิบายได้}) \times 100\%}{(\text{ความผันแปรทั้งหมด} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรทั้งหมด})}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2\text{-Adj} = 19.71 \%$$

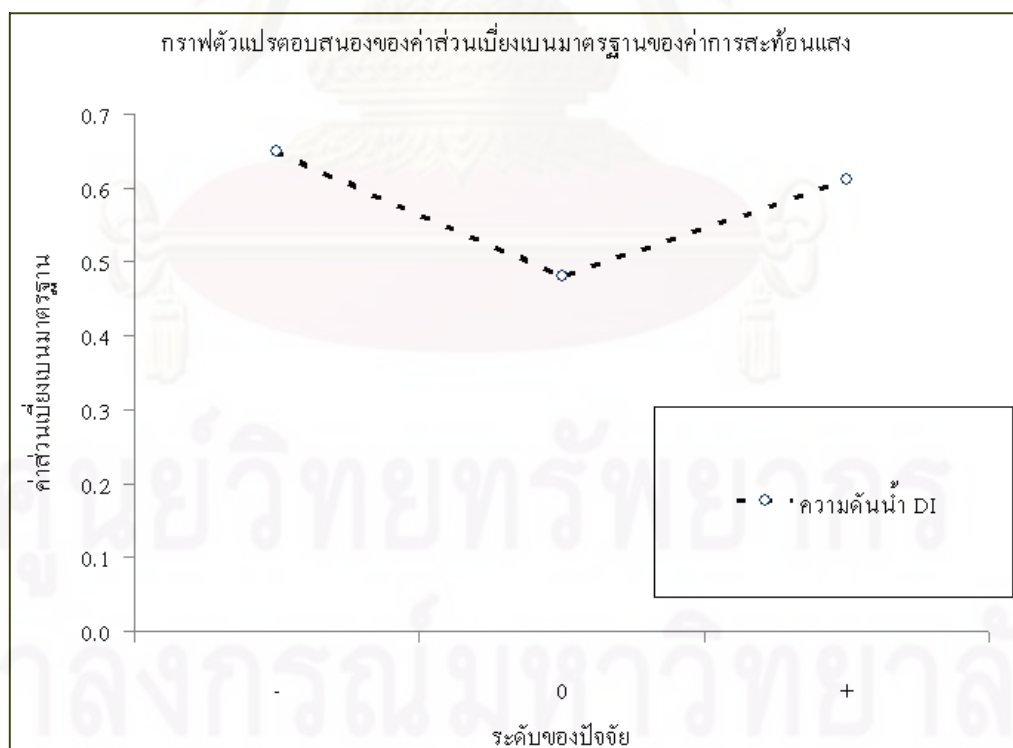
ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่า R^2 และ R^2 -Adj ของผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลื่อนไหวเงินพบว่ามีความปานกลางคือ 59.10 % และ 19.71% ตามลำดับ แสดงว่าการออกแบบที่ได้ ออกแบบขึ้นมาใช้ และจำนวนการทดลองที่ใช้ค่อนข้างมีความเหมาะสม

5.1.3.4 การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลื่อนไหวเงิน

ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลื่อนไหวเงินได้ผลดังรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการสะท้อนแสง

| ระดับของปัจจัย | ปัจจัย C |
|----------------|----------|
| - | 0.65 |
| 0 | 0.48 |
| + | 0.61 |



รูปที่ 5.14 กราฟตัวแปรตอบสนองผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลื่อนไหวเงิน

จากรูปที่ 5.13 พบว่าปัจจัยความดันน้ำ DI (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนแสงโดยที่

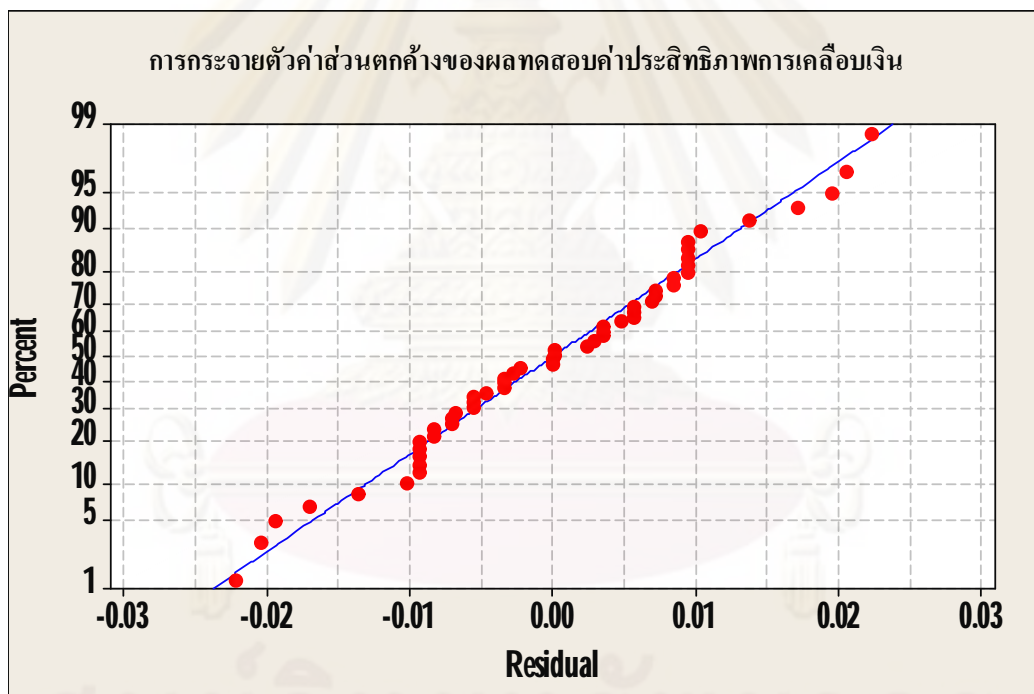
1) ความดันน้ำ DI 3 บาร์ จะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสงมีค่าต่ำที่สุด โดยเมื่อเพิ่มหรือลดความดันน้ำ DI เป็น 4 บาร์ และ 2 บาร์ ตามลำดับ จะทำให้ค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงินมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนโดยตรงต่อความสม่ำเสมอในการเคลือบเงิน

5.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

5.1.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

1. การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

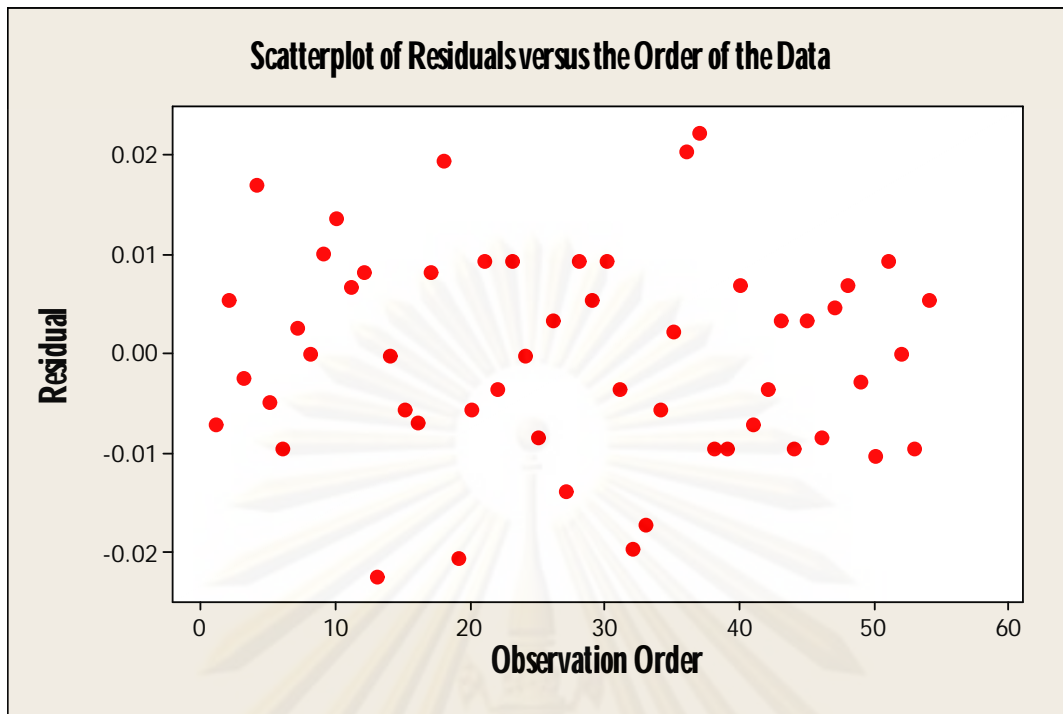
นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลโดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ



รูปที่ 5.15 กราฟการกระจายของข้อมูลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

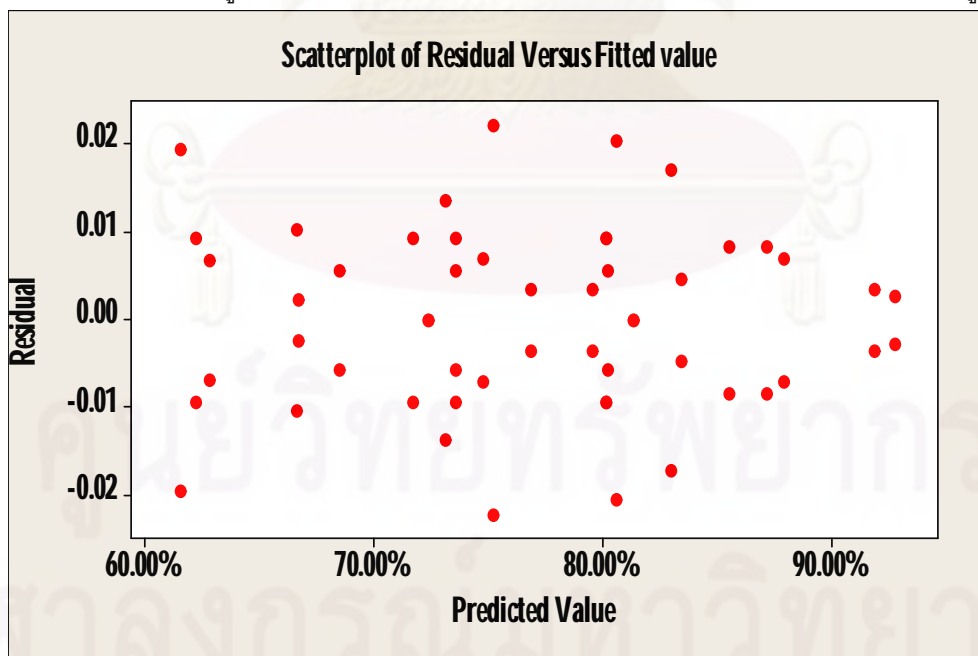
จะพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าเรสซิดวอล ที่สัมพันธ์กับลำดับเวลาของการทดลองของชุดทดลองทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.15 โดยการกระจายตัวเป็นแบบไร้รูปแบบ สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.16 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาเก็บข้อมูลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยดูการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ในที่นี้คือค่าคาดหวังของผลตอบสนอง ดังรูปที่ 5.16 ซึ่งสรุปได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลมีความเสถียร เพราะการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นแบบไร้รูปแบบ



รูปที่ 5.17 ส่วนตกค้างกับค่าคาดหวังของผลตอบการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

5.1.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ที่ได้ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 5.9 ตารางที่ 5.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

| แหล่ง ของความ ผันแปร | ผลรวม กำลังสอง | ชั้นของ ความอิสระ | ค่าเฉลี่ย กำลังสอง | F0 | Fวิกฤต |
|----------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|---------|--------|
| A | 0.008 | 2 | 0.0038 | 18.694 | 3.3541 |
| B | 0.274 | 2 | 0.1372 | 667.475 | |
| C | 0.102 | 2 | 0.0508 | 247.034 | |
| AB | 0.002 | 4 | 0.0004 | 2.188 | 2.7278 |
| AC | 0.002 | 4 | 0.0005 | 2.576 | |
| BC | 0.001 | 4 | 0.0002 | 1.145 | |
| ABC | 0.002 | 8 | 0.0002 | 0.948 | 2.3053 |
| Error | 0.006 | 27 | 0.0002 | | |
| Total | 0.396 | 53 | | | |

F0.05,2,27= 3.3541 R Square = 98.60%

F0.05,4,27= 2.7278 Adj. R-Square = 97.25%

F0.05,8,27= 2.3053

จากตารางที่ 5.9 สามารถสรุปผลการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1) การทดสอบสมมติฐานของอัตราการจ่ายสารละลายเงิน

$$H_0 : \tau_i = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \tau_i \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > F วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อัตราการจ่ายสารละลายเงิน มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.2) การทดสอบสมมติฐานของความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \beta_j \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > F วิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

1.3) การทดสอบสมมติฐานของความดันของน้ำ DI

$$H_0 : \gamma_k = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } \gamma_k \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า F-Ratio > Fวิกฤต จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า ค่าความดันของน้ำ DI มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

2.1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์

$$H_0 : (\tau\beta_{ij}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\beta_{ij}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า F-Ratio < Fวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ ไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์กับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\beta\gamma_{jk}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\beta\gamma_{jk}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า F-Ratio < Fวิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์กับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

2.3) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI

$$H_0 : (\tau\gamma_{ik}) = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ } (\tau\gamma_{ik}) \neq 0$$

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า $F\text{-Ratio} < F$ วิกฤต จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงินกับความดันของน้ำ DI ไม่มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

5.1.4.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square และ R-Square Adjust

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบนั้น จะต้องได้รับการตรวจสอบความเชื่อถือได้ โดยการวิเคราะห์ค่า R^2 และ $R^2\text{-Adj}$ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} \times 100}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2 = 98.60 \%$$

$$R^2\text{-Adj} = \frac{(\text{ความผันแปรที่อธิบายได้} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรที่อธิบายได้}) \times 100\%}{(\text{ความผันแปรทั้งหมด} / \text{ค่าความอิสระความผันแปรทั้งหมด})}$$

$$\text{ดังนั้น } R^2 - \text{Adj} = 97.25 \%$$

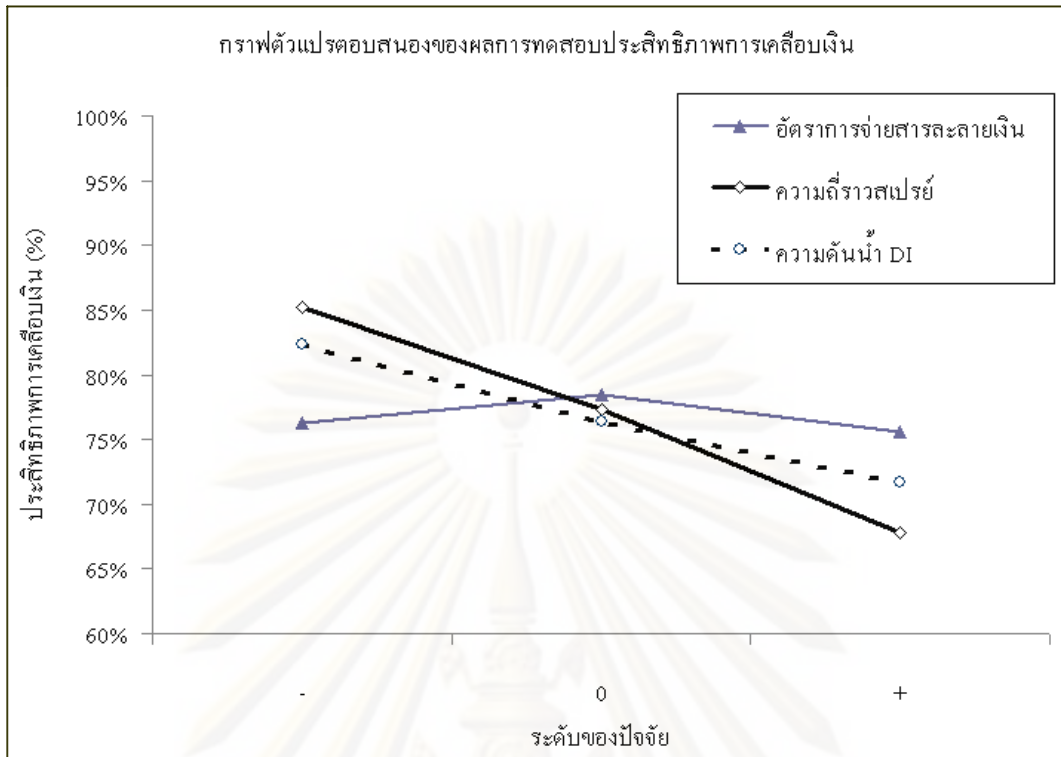
ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่า R^2 และ $R^2\text{-Adj}$ ของผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินพบว่ามีความสูงมากคือ 98.60 % และ 97.25% ตามลำดับ แสดงว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ และจำนวนการทดลองที่ใช้มีความเหมาะสมมาก

5.1.4.4 การวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

ทำการเขียนกราฟของตัวแปรตอบสนองปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินได้ผลดังรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

| ระดับของปัจจัย | ปัจจัย A | ปัจจัย B | ปัจจัย C |
|----------------|----------|----------|----------|
| - | 76% | 85% | 82% |
| 0 | 78% | 77% | 76% |
| + | 76% | 68% | 72% |



รูปที่ 5.18 กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

จากรูปที่ 5.17 พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ปัจจัย A), ความถี่ราวสเปรย์ (ปัจจัย B) และความดันน้ำ DI (ปัจจัย C) มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน โดยที่

1) อัตราการจ่ายสารละลายเงินที่ 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินสูงที่สุด และจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มหรือลดอัตราการจ่ายสารละลายเงินเป็น 6.5 และ 4.5 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จะมีผลให้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินลดลง

2) ความถี่ราวสเปรย์ที่ลดลง จะทำให้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินสูงขึ้น โดยจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความถี่ราวสเปรย์ 11 รอบต่อนาที จะได้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือความถี่ราวสเปรย์ 13 และ 15 รอบต่อนาทีตามลำดับ

3) ความดันน้ำ DI ที่ลดลง จะทำให้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินสูงขึ้น โดยจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความดันน้ำ DI 2 บาร์ จะได้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือความดันน้ำ DI 3 และ 4 บาร์ตามลำดับ

5.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

เนื่องจากการทดลองได้ทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆของการผลิตกระจกเงา จึงทำให้มีตัวแปรตอบสนองหลายตัว ทำให้มีค่าระดับของปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมแตกต่างกันไปในแต่ละ

คุณสมบัติ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวจึงต้องพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับของปัจจัยจากการประเมินผลของตัวแปรตอบสนองในแต่ละคุณสมบัติ จึงทำการกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง และพิจารณาผลคะแนนรวมของทุกตัวแปรตอบสนองเพื่อทำการตัดสินใจเลือกระดับของปัจจัย

การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง จะทำการกำหนดร่วมกับทางส่วนงานผลิต โดยกรณีผลตอบแทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง และผลตอบแทนประสิทธิภาพการเคลือบเงิน ซึ่งมีคุณลักษณะที่ต้องการคือ ยิ่งน้อยยิ่งดี และยิ่งมากยิ่งดีตามลำดับ จะอาศัยผลต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าคาดหมายของผลของตัวแปรตอบสนอง แล้วแบ่งช่วงระดับคะแนนออกเป็น 3 ช่วงเท่าๆกัน คือระดับคะแนน 3, 2 และ 1 โดยค่าผลตอบแทนที่อยู่นอกช่วงที่กำหนด ก็ให้มีระดับคะแนน 0

ในกรณีผลตอบแทนค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ซึ่งมีค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมรองรับรวมถึงเป็นค่าที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต ซึ่งมีค่ามาตรฐานคือต้องเกิน 700 มก./ ตร.ม. และจากการปรึกษากับส่วนผลิตทำให้ได้ข้อมูลว่า ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกที่สูงเกิน 900 มก./ ตร.ม. จะไม่ใช้ในการผลิตจริง เพราะเป็นปริมาณเงินที่มากเกินไปจนความจำเป็น จึงกำหนดให้ปริมาณเงินที่อยู่นอกช่วงดังกล่าวมีระดับคะแนน 0 นอกจากนี้ทางส่วนผลิตได้แนะนำว่า ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก 750 - 800 มก./ ตร.ม. ถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงกำหนดให้มีระดับคะแนน 3 จากนั้นทำการแบ่งช่วงค่าปริมาณเงินที่เหลือ เป็นช่วงละ 50 มก./ ตร.ม. และกำหนดระดับคะแนน 2 และ 1 ดังตารางที่ 5.11

ในส่วนของผลตอบแทนการสะท้อนแสง จะกำหนดให้ค่าผลตอบแทนที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานมีค่าคะแนนเป็น 0 จากนั้นแบ่งผลต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าคาดหมายออกเป็น 3 ช่วงระดับคะแนน เช่นเดียวกัน ซึ่งการกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนองแสดงดังตารางที่ 5.11 ตารางที่ 5.11 การกำหนดระดับคะแนนของตัวแปรตอบสนอง

| คุณสมบัติที่ทดสอบ | ระดับคะแนน | | | |
|---|------------|-----------------------------|---------------|---------------------|
| | 3 | 2 | 1 | 0 |
| ปริมาณเงินบนผิวกระจก (mg/m ²) | 750 - 800 | 800 - 850 หรือ 700 - 750 | 850 - 900 | > 900 หรือ < 700 |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | > 81.2 | 80.6 - 81.2 | 80.0 - 80.6 | < 80 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการสะท้อนแสง | < 0.52 | 0.52 - 0.70 | 0.70 - 0.87 | > 0.87 |
| ประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (%) | > 82.36 | 71.96 - 82.36 | 61.56 - 71.96 | < 61.56 |

เมื่อทราบช่วงระดับคะแนนของแต่ละตัวแปรตอบสนอง จะสามารถประเมินผลคะแนนรวมของแต่ละสภาวะที่ทำการทดสอบ โดยกำหนดให้ค่าความสำคัญของแต่ละตัวแปรตอบสนองมีค่าเท่ากันหมด โดยการประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมดังตารางที่ 5.12 ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคิดคะแนนได้ เช่น การทดสอบปริมาณเงินบนฝิวกระจก ในการทดลองลำดับที่ 1 คือค่าปริมาณเงินบนฝิวกระจก 774 มก./ตร.ม. (ตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก) ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามตารางที่ 5.11 จะได้ระดับคะแนนอยู่ในช่วงระดับ 3 คะแนน

ตารางที่ 5.12 การประเมินผลคะแนนรวมเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

| ลำดับที่ | สภาวะปัจจัย | | | ลำดับคะแนนการทดสอบคุณสมบัติ | | | | คะแนนรวม |
|----------|-------------|---|---|-----------------------------|---|---|---|-----------|
| | A | B | C | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | - | - | - | 3 | 0 | 1 | 3 | 7 |
| 2 | - | - | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 6 |
| 3 | - | - | + | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 |
| 4 | - | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 5 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 6 |
| 6 | - | 0 | + | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 |
| 7 | - | + | - | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 8 | - | + | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 |
| 9 | - | + | + | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | 0 | - | - | 0 | 2 | 2 | 3 | 7 |
| 11 | 0 | - | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 8 |
| 12 | 0 | - | + | 2 | 1 | 2 | 2 | 7 |
| 13 | 0 | 0 | - | 1 | 2 | 2 | 3 | 8 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 2 | <u>10</u> |
| 15 | 0 | 0 | + | 3 | 1 | 2 | 2 | 8 |
| 16 | 0 | + | - | 3 | 1 | 3 | 2 | 9 |
| 17 | 0 | + | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 18 | 0 | + | + | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 |
| 19 | + | - | - | 0 | 2 | 2 | 3 | 7 |
| 20 | + | - | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 21 | + | - | + | 0 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| 22 | + | 0 | - | 0 | 2 | 1 | 2 | 5 |
| 23 | + | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 7 |

| | | | | | | | | |
|-----------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|
| 24 | + | 0 | + | 1 | 3 | 3 | 1 | 8 |
| 25 | + | + | - | 1 | 3 | 3 | 2 | 9 |
| 26 | + | + | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 8 |
| 27 | + | + | + | 3 | 1 | 2 | 2 | 8 |

คะแนนที่ 1 คะแนนผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

คะแนนที่ 2 คะแนนค่าการสะท้อนแสง

คะแนนที่ 3 คะแนนค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

คะแนนที่ 4 คะแนนค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

จากตารางที่ 5.12 การประเมินคะแนนรวมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 จะเห็นได้ว่าผลคะแนนรวมของการทดลองที่ 14 ให้ผลคะแนนรวมสูงสุด ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบเงินคือ

- 1) ปัจจัย A คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง
- 2) ปัจจัย B คือความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปร์ย์ 13 รอบต่อนาที
- 3) ปัจจัย C คือความดันน้ำ DI 3 บาร์

โดยมีผลการทดสอบดังนี้

- 1) ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก 828.67 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร
- 2) ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง 81.22%
- 3) ผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน 0.47%
- 4) ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน 80.22%

5.3 การประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง

เมื่อนำเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง ไปทำการผลิตจริง พบว่าได้ค่าคุณสมบัติของกระจกเงาใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 5.13 แต่เมื่อพิจารณาค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก ซึ่งมีค่า 830.14 mg/m² พบว่ายังค่อนข้างสูงกว่าค่ามาตรฐาน (700 mg/m²) ซึ่งเมื่อประเมินในแง่ของต้นทุนการผลิตจึงถือเป็นการสิ้นเปลือง หรือใช้มากเกินไป

จึงพิจารณาการทดลองอื่นที่มีระดับคะแนนลดหลั่นลงมา อันได้แก่การทดลองที่ 16, 20 และ 25 ซึ่งมีระดับคะแนน 9 คะแนนเท่ากัน พบว่าการทดลองที่ 16 คือที่อัตราการจ่ายสารละลายระดับกลาง, ความถี่ราวสเปร์ย์ระดับสูง และแรงดันน้ำ DI ระดับต่ำ ให้ค่าผลตอบปริมาณเงินบนผิวกระจกที่ค่อนข้างดี ส่วนค่าการสะท้อนแสง ค่าความไม่สม่ำเสมอ และค่าประสิทธิภาพการเคลือบ

เงินที่ต่ำกว่าผลการทดสอบของการทดลองที่ 14 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว การทดลองที่ 16 ยังมีจุดด้อยกว่าการทดลองที่ 14 โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

ในขณะที่การทดลองที่ 20 และ 26 ให้ผลตอบที่ไม่สามารถใช้ทำการผลิตจริงได้ อันได้แก่ ค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกที่สูงมากเกินไป และค่าประสิทธิภาพที่ต่ำมากเกินไป ตามลำดับ

อย่างไรก็ดี เมื่อทำการพิจารณาจากผลคะแนน พบว่าเมื่อลดอัตราการจ่ายสารละลายเงินลงเป็นระดับต่ำ ขณะที่ปัจจัยอื่นยังคงเดิม ซึ่งก็คือที่การทดลองที่ 5 พบว่าระดับคะแนนจะมีค่าน้อยคือ 6 คะแนน เนื่องมาจากปริมาณเงินบนผิวกระจกและค่าการสะท้อนแสงไม่ผ่านมาตรฐาน แต่ยังคงให้ค่าความสม่ำเสมอและค่าประสิทธิภาพที่ดีอยู่ ดังนั้นเมื่อทำการปรึกษากับทางฝ่ายผลิต จึงทดลองปรับอัตราการจ่ายสารละลายเงิน ให้อยู่ระหว่างค่าระดับต่ำและระดับกลางกลาง คือที่ 5 mg/m² และคงปัจจัยอื่นเช่นเดิม พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก โดยค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกลดต่ำลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ค่าการสะท้อนแสงก็ยังคงอยู่ในมาตรฐาน ส่วนค่าความไม่สม่ำเสมอ และประสิทธิภาพการเคลือบเงินอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังตารางที่ 5.13 จึงได้สรุปใช้เงื่อนไขนี้เป็นมาตรฐานการผลิตในปัจจุบัน

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองผลิตจริง

| คุณสมบัติที่ทดสอบ | ผลการทดสอบคุณสมบัติ | | |
|--|---------------------|----------|-------------------|
| | ทดลอง | ผลิตจริง | ผลิตจริง-หลังปรับ |
| ปริมาณเงินบนผิวกระจก(mg/m ²) | 828.67 | 830.14 | 778.42 |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | 81.22 | 82.34 | 80.61 |
| ความไม่สม่ำเสมอการเคลือบเงิน (%) | 0.47 | 0.43 | 0.48 |
| ประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (%) | 80.22 | 81.08 | 80.45 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การสรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

เมื่อดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลตอบสนองจากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเงินบนผิวกระจก

- 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน
- 2) ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์
- 3) ความดันของน้ำ DI
- 4) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงิน กับความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์
- 5) ปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารละลายเงิน กับความดันน้ำ DI

6.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการสะท้อนแสง

- 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน
- 2) ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์
- 3) ความดันของน้ำ DI

6.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

- 1) ความดันของน้ำ DI

6.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

- 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน
- 2) ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์
- 3) ความดันของน้ำ DI

6.2 สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการเคลือบเงิน

จากผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์กราฟตัวแปรตอบสนองของผลการทดสอบคุณสมบัติ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.2.1 ผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเงินที่ให้ผลค่าปริมาณเงินบนผิวกระจกอยู่ในระดับที่ดี (750 - 800 mg/m²) คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง ความถี่ราวสเปร์ย์ 13 รอบต่อนาทีและความดันน้ำ DI 3 บาร์

6.2.2 ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเงินที่ให้ผลค่าการสะท้อนแสงที่สูงที่สุด คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง ความถี่ราวสเปร์ย์ 11 รอบต่อนาทีและความดันน้ำ DI 3 บาร์

6.2.3 ผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบเงิน

สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเงินที่ให้ผลค่าความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบเงินต่ำที่สุด คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 4.5 5.5 หรือ 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง ความถี่ราวสเปร์ย์ 11 13 หรือ 15 รอบต่อนาทีและความดันน้ำ DI 3 บาร์

6.2.4 ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเงินที่ให้ผลค่าประสิทธิภาพในการเคลือบเงินสูงที่สุด คืออัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง ความถี่ราวสเปร์ย์ 11 รอบต่อนาทีและความดันน้ำ DI 2 บาร์

จากการวิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนอง จะเห็นว่าผลของปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อดัชนีแปรตอบสนองไม่เหมือนกัน จึงทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยการประเมินผลคะแนนรวม ทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดดังนี้ คือ

- 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5.5 ลิตรต่อชั่วโมง
- 2) ความถี่ราวสเปร์ย์ 13 รอบต่อนาที
- 3) ความดันน้ำ DI 3 บาร์

โดยจากการใช้เงื่อนไขที่ได้มาทำการทดลองผลิตจริงร่วมกับฝ่ายผลิต ทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจริงซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินสูง และปัจจัยอื่น ๆ ในการเคลือบเงินที่ดีผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยเงื่อนไขที่ได้ คือ

- 1) อัตราการจ่ายสารละลายเงิน 5 ลิตรต่อชั่วโมง
- 2) ความถี่ราวสเปร์ย์ 13 รอบต่อนาที
- 3) ความดันน้ำ DI 3 บาร์

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม จนได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบเงิน ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวนี้ถูกใช้ในการผลิตจริงในเดือนสิงหาคม 2552 ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินเฉลี่ย 78.9% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินเฉลี่ยปี 2551 ซึ่งมีค่า 56.4% และค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินเฉลี่ยตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม 2552 ซึ่งฝ่ายผลิตได้ปรับรูปแบบการจัดวางหัวสเปร์ย์ใหม่โดยได้แนวทางปรับปรุงมาจากบริษัทแม่ที่ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีค่า 71.3% พบว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลือบเงินได้ 22.5% และ 7.6% ตามลำดับ

ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต โดยจากผลการคำนวณต้นทุนสารละลายเงินต่อหน่วยในการผลิตประจำเดือนสิงหาคม 2552 ซึ่งเป็นเดือนที่เริ่มใช้มาตรฐานที่ได้จากงานวิจัยนี้ในการผลิต พบว่าต้นทุนสารละลายเงินต่อหน่วยกระเจกเงาคือ 212.06 บาท/S.c/s ซึ่งเมื่อเทียบกับต้นทุนสารละลายเงินต่อหน่วยกระเจกเงาเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงตั้งแต่เดือน มกราคม - กรกฎาคม 2552 คือ 230.38 บาท/S.c/s ซึ่งสามารถลดต้นทุนการใช้สารละลายเงินได้ 18.32 บาท/S.c/s ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนการผลิตรวมที่สามารถลดลงได้ของเดือนสิงหาคม ที่ยอดผลิต 7,034 S.c/s คิดเป็นประมาณ 128,863 บาท สืบเนื่องต้นทุนการผลิตที่ลดลงเป็นที่น่าพอใจ ทางฝ่ายผลิตจึงได้กำหนดเงื่อนไขที่ได้จากการทดลองให้เป็นมาตรฐานในการผลิตสำหรับกระเจกเงาเกรดธรรมดาในปัจจุบัน

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมและการทำการทดลองจริง เพื่อศึกษาและหาระดับของปัจจัยที่ให้ประสิทธิภาพในการเคลือบเงินที่ดีที่สุดและคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ในการเคลือบเงินที่ดีเป็นไปตามเกณฑ์การผลิตที่ได้ทำการวิจัยมาแล้วนั้น แม้ว่าผลจากงานวิจัยจะทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ได้ บรรลุตามเป้าหมายและประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ แต่ประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ได้ยังคงสามารถปรับปรุงให้เพิ่มสูงขึ้นไปได้อีก รวมทั้งการเพิ่ม

ประสิทธิภาพการผลิตโดยรวม โดยการพิจารณาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงหรือศึกษาด้านอื่นๆ ทางผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้สำหรับผู้ที่สนใจจะศึกษาและทำเป็นงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ดังนี้

6.3.1 งานวิจัยศึกษาเฉพาะปัจจัยในกระบวนการเคลือบเงินเท่านั้น ดังนั้นจึงควรพิจารณาทดลองเพิ่มเติมในส่วนของการอื่นที่เกี่ยวข้อง ทั้งก่อนและหลังกระบวนการเคลือบเงิน เช่น **Activation, Passivation** และเตาอบชั้นเงิน ซึ่งอาจเป็นช่องทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบเงินให้สูงขึ้นได้

6.3.2 เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการลงทุน และสภาพเศรษฐกิจที่ไม่ดี จึงตัดปัจจัยเกี่ยวกับหัวสเปรย์ออกจากการทดลอง ดังนั้นจึงควรทำการทดลองเพิ่มเติมในส่วนของหัวสเปรย์ในอนาคต เมื่อมีความพร้อมเรื่องการลงทุน เพราะหัวสเปรย์น่าจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลตัวหนึ่งในกระบวนการเคลือบเงิน ซึ่งอาจมีผลให้ประสิทธิภาพการเคลือบเงินดีขึ้นได้อีก

6.3.3 จากงานวิจัย จะเห็นได้ว่าการควบคุมความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวกระจก กับสารละลายที่เคลือบลงไปในขณะที่เคลือบเงิน จะใช้การควบคุมอุณหภูมิของน้ำ DI ซึ่งระบบปัจจุบันก็มีขีดจำกัดในการทำความเย็นให้กับน้ำ DI ซึ่งทำได้แค่ 23 - 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มความสามารถในการทำความเย็นให้น้ำ DI ได้มากกว่านี้ การทำปฏิกิริยาอาจจะเกิดได้ดีขึ้น และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบเงินได้สูงขึ้นอีก

6.3.4 ประเภทกระจกเงาที่ทำการศึกษา เป็นกระจกเงาระดับธรรมดาใช้งานทั่วไป ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการผลิตสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามยังมีกระจกเงาประเภทอื่นๆอีกที่ต้องทำการผลิตเช่นกระจกเงาสำหรับกระจกรถยนต์ ซึ่งต้องการค่าการสะท้อนแสงที่สูงและปริมาณเงินบนผิวกระจกมากเป็นพิเศษ จึงควรขยายผลจากงานวิจัยนี้ โดยทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหามาตรฐานสำหรับกระจกประเภทอื่นๆที่มีการผลิต เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงที่สุดและมีการสูญเสียต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

6.3.5 ในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง อาจจะใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีการนี้จะเหมาะสมกับการทดลองที่มีหลายปัจจัยและหลายผลตอบ โดยมีความเป็นไปได้ที่จะได้เงื่อนไขที่ดีและเหมาะสมกว่า หรืออาจจะได้ช่วงของเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่กว้างกว่า เงื่อนไขที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์และให้คะแนนแบบจุดในงานวิจัยนี้

รายการอ้างอิง

- (1) J.Schotsaert & X.Mevisse. **Glaverbel Khow-how transfer of New Generation Mirrors.**
AGC Headquarters : Research Center.
- (2) European Committee for standardization. **Glass in building – Mirrors from silver - coated float glass for internal use European Standard.** EN 1036. Brussels : European Committee for standardization, 1999
- (3) Minitab Inc., **User's Guide 2 : Data Analysis and Quality Tools .** USA, 1998.
- (4) คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระจกเงา.** มอก.1732-2541. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2544
- (5) ปารเมศ ชูติมา. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม .** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- (6) เรวัตกร กล้าหาญ. **การวิเคราะห์และควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ในกระบวนการผลิตกระจกเงา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2546
- (7) สรียา กลสิกพันธุ์. **การนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริบมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2543
- (8) ประเสริฐ งามวิเศษชัยกุล. **การปรับปรุงระบบต้นทุนการผลิต การลดและควบคุมต้นทุนในกระบวนการผลิตกระจกสะท้อนแสง .** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2543
- (9) วิชาญ วรรณนา. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง โดยวิธีการออกแบบการทดลอง .** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2545
- (10) สุรพล สุบรรณเจตพร. **การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมตีบุก-ตะกั่วบนแผ่น วงจรพิมพ์ ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542

- (11) วัชรศักดิ์ ทวีสุข. การศึกษาปัจจัยในกระบวนการประกอบชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูลสารคดีสีก์ ที่มีผลกระทบต่อการใช้งานตัวของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูลโดยให้การออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2546
- (12) อัคริยา เกิ่งวินิจ. การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงดัชนีคุณภาพการผลิตของมูมที่กระทำระหว่างตัวงานกับสารดีสีก์ ในอุตสาหกรรมแขนจับยึดหัวอ่านเขียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2544
- (13) พัฒนพงษ์ แสงหัตถวัฒนา. การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดกลยุทธ์ในการสั่งซื้อ : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมยานยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2549
- (14) ธนัฐชยา อุดรทักษ์. การศึกาปัจจัยการควบคุมการอัดขึ้นรูปผงแทนทาลัมในอุตสาหกรรมการผลิตตัวเก็บประจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2549



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
ผลการทดสอบคุณสมบัติ

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก (mg/m²)

| อัตราการจ่าย สารละลายเงิน (A) | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ (B) | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 11 รอบ / นาที | | | 13 รอบ / นาที | | | 15 รอบ / นาที | | |
| | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | |
| | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ |
| 4.5 ลิตร / ชม. | 771.1 | 684.8 | 667.5 | 696.3 | 644.5 | 610.0 | 604.2 | 552.4 | 535.2 |
| | 776.9 | 713.6 | 673.3 | 661.8 | 650.3 | 610.0 | 627.3 | 569.7 | 523.7 |
| 5.5 ลิตร / ชม. | 961.0 | 909.2 | 840.2 | 892.0 | 822.9 | 753.9 | 799.9 | 702.1 | 656.0 |
| | 955.3 | 892.0 | 840.2 | 874.7 | 834.4 | 765.4 | 753.9 | 713.6 | 615.8 |
| 6.5 ลิตร / ชม. | 1064.6 | 1012.8 | 966.8 | 966.8 | 903.5 | 886.2 | 886.2 | 817.2 | 771.1 |
| | 1081.9 | 1024.3 | 989.8 | 989.8 | 920.7 | 863.2 | 909.2 | 811.4 | 748.1 |

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง (%)

| อัตราการจ่าย สารละลายเงิน (A) | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ (B) | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 11 รอบ / นาที | | | 13 รอบ / นาที | | | 15 รอบ / นาที | | |
| | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | |
| | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ |
| 4.5 ลิตร / ชม. | 79.34 | 79.87 | 79.10 | 79.89 | 80.25 | 79.15 | 79.36 | 79.03 | 78.39 |
| | 80.26 | 79.93 | 80.41 | 79.61 | 79.76 | 79.30 | 79.82 | 79.05 | 79.39 |
| 5.5 ลิตร / ชม. | 80.96 | 80.99 | 80.52 | 81.01 | 81.12 | 80.23 | 80.51 | 80.05 | 80.07 |
| | 81.15 | 80.46 | 79.90 | 81.30 | 81.31 | 80.52 | 80.14 | 80.93 | 80.53 |
| 6.5 ลิตร / ชม. | 80.40 | 81.51 | 80.20 | 80.86 | 81.09 | 81.02 | 81.39 | 81.18 | 80.58 |
| | 81.00 | 82.09 | 81.57 | 80.78 | 80.88 | 81.52 | 81.60 | 81.42 | 80.15 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความไม่เสมอของการเคลือบเงิน

| อัตราการจ่าย สารละลายเงิน | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวลแปรย์ (B) | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 11 รอบ / นาที | | | 13 รอบ / นาที | | | 15 รอบ / นาที | | |
| | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | |
| (A) | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ |
| 4.5 ลิตร / ชม. | 0.8965 | 0.4986 | 0.6594 | 1.1524 | 0.3607 | 0.5055 | 0.8359 | 0.3047 | 0.7254 |
| | 0.7209 | 0.416 | 0.5958 | 0.4551 | 0.3448 | 0.5904 | 0.6295 | 0.4199 | 1.0068 |
| 5.5 ลิตร / ชม. | 0.8321 | 0.317 | 0.4654 | 0.6614 | 0.4414 | 0.5555 | 0.4785 | 0.8486 | 0.591 |
| | 0.3518 | 0.4065 | 0.9092 | 0.6299 | 0.4933 | 0.5457 | 0.5296 | 0.5979 | 0.7149 |
| 6.5 ลิตร / ชม. | 0.6223 | 0.5703 | 0.7349 | 0.8391 | 0.4542 | 0.5485 | 0.4322 | 0.6724 | 0.5948 |
| | 0.5075 | 0.3911 | 0.4381 | 0.6413 | 0.5175 | 0.2719 | 0.4741 | 0.5854 | 0.5491 |

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

| อัตราการจ่าย สารละลายเงิน | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวลแปรย์ (B) | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 11 รอบ / นาที | | | 13 รอบ / นาที | | | 15 รอบ / นาที | | |
| | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | | ความดันของน้ำ DI (C) | | |
| (A) | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ | 2 บาร์ | 3 บาร์ | 4 บาร์ |
| 4.5 ลิตร / ชม. | 91.5% | 81.3% | 79.2% | 82.7% | 76.5% | 72.4% | 71.7% | 65.6% | 63.5% |
| | 92.2% | 84.7% | 79.9% | 78.6% | 77.2% | 72.4% | 74.5% | 67.6% | 62.2% |
| 5.5 ลิตร / ชม. | 93.0% | 88.0% | 81.3% | 86.4% | 79.7% | 73.0% | 77.4% | 68.0% | 63.5% |
| | 92.5% | 86.4% | 81.3% | 84.7% | 80.8% | 74.1% | 73.0% | 69.1% | 59.6% |
| 6.5 ลิตร / ชม. | 87.2% | 83.0% | 79.2% | 79.2% | 74.0% | 72.6% | 72.6% | 67.0% | 63.2% |
| | 88.6% | 83.9% | 81.1% | 81.1% | 75.4% | 70.7% | 74.5% | 66.5% | 61.3% |

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบค่าปริมาณเงินบนผิวกระจก

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินจุดที่1 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่2 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่3 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่4 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 4.5 | 11 | 2 | 1 | 828.673 | 782.635 | 667.542 | 805.654 | 771.126 |
| 2 | 4.5 | 11 | 3 | 1 | 713.579 | 667.542 | 644.523 | 713.579 | 684.80575 |
| 3 | 4.5 | 11 | 4 | 1 | 690.561 | 621.505 | 690.561 | 667.542 | 667.54225 |
| 4 | 4.5 | 13 | 2 | 1 | 667.542 | 713.579 | 713.579 | 690.561 | 696.31525 |
| 5 | 4.5 | 13 | 3 | 1 | 690.561 | 667.542 | 621.505 | 598.486 | 644.5235 |
| 6 | 4.5 | 13 | 4 | 1 | 598.486 | 621.505 | 598.486 | 621.505 | 609.9955 |
| 7 | 4.5 | 15 | 2 | 1 | 644.523 | 598.486 | 598.486 | 575.467 | 604.2405 |
| 8 | 4.5 | 15 | 3 | 1 | 552.449 | 552.449 | 552.449 | 552.449 | 552.449 |
| 9 | 4.5 | 15 | 4 | 1 | 552.449 | 529.43 | 552.449 | 506.411 | 535.18475 |
| 10 | 5.5 | 11 | 2 | 1 | 1012.822 | 943.766 | 920.748 | 966.785 | 961.03025 |
| 11 | 5.5 | 11 | 3 | 1 | 897.729 | 874.71 | 943.766 | 920.748 | 909.23825 |
| 12 | 5.5 | 11 | 4 | 1 | 759.617 | 805.654 | 897.729 | 897.729 | 840.18225 |
| 13 | 5.5 | 13 | 2 | 1 | 851.692 | 874.71 | 897.729 | 943.766 | 891.97425 |
| 14 | 5.5 | 13 | 3 | 1 | 805.654 | 874.71 | 828.673 | 782.635 | 822.918 |
| 15 | 5.5 | 13 | 4 | 1 | 736.598 | 736.598 | 759.617 | 782.635 | 753.862 |
| 16 | 5.5 | 15 | 2 | 1 | 805.654 | 805.654 | 805.654 | 782.635 | 799.89925 |
| 17 | 5.5 | 15 | 3 | 1 | 667.542 | 759.617 | 690.561 | 690.561 | 702.07025 |
| 18 | 5.5 | 15 | 4 | 1 | 667.542 | 644.523 | 644.523 | 667.542 | 656.0325 |

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก (ต่อ)

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปร์ย์ | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินจุดที่1 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่2 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่3 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่4 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 19 | 6.5 | 11 | 2 | 1 | 1104.897 | 1035.841 | 1058.86 | 1058.86 | 1064.6145 |
| 20 | 6.5 | 11 | 3 | 1 | 1104.897 | 1058.86 | 943.766 | 943.766 | 1012.82225 |
| 21 | 6.5 | 11 | 4 | 1 | 989.804 | 943.766 | 920.748 | 1012.822 | 966.785 |
| 22 | 6.5 | 13 | 2 | 1 | 966.785 | 966.785 | 1012.822 | 920.748 | 966.785 |
| 23 | 6.5 | 13 | 3 | 1 | 920.748 | 920.748 | 897.729 | 874.71 | 903.48375 |
| 24 | 6.5 | 13 | 4 | 1 | 874.71 | 874.71 | 897.729 | 897.729 | 886.2195 |
| 25 | 6.5 | 15 | 2 | 1 | 851.692 | 920.748 | 920.748 | 851.692 | 886.22 |
| 26 | 6.5 | 15 | 3 | 1 | 713.579 | 851.692 | 828.673 | 874.71 | 817.1635 |
| 27 | 6.5 | 15 | 4 | 1 | 736.598 | 759.617 | 805.654 | 782.635 | 771.126 |
| 28 | 4.5 | 11 | 2 | 2 | 805.654 | 713.579 | 828.673 | 759.617 | 776.88075 |
| 29 | 4.5 | 11 | 3 | 2 | 713.579 | 736.598 | 713.579 | 690.561 | 713.57925 |
| 30 | 4.5 | 11 | 4 | 2 | 690.561 | 621.505 | 644.523 | 736.598 | 673.29675 |
| 31 | 4.5 | 13 | 2 | 2 | 644.523 | 621.505 | 713.579 | 667.542 | 661.78725 |
| 32 | 4.5 | 13 | 3 | 2 | 644.523 | 644.523 | 667.542 | 644.523 | 650.27775 |
| 33 | 4.5 | 13 | 4 | 2 | 621.505 | 598.486 | 644.523 | 575.467 | 609.99525 |
| 34 | 4.5 | 15 | 2 | 2 | 598.486 | 598.486 | 644.523 | 667.542 | 627.25925 |
| 35 | 4.5 | 15 | 3 | 2 | 552.449 | 575.467 | 575.467 | 575.467 | 569.7125 |
| 36 | 4.5 | 15 | 4 | 2 | 506.411 | 575.467 | 506.411 | 506.411 | 523.675 |

ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงผลการทดสอบปริมาณเงินบนผิวกระจก (ต่อ)

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่การเคลื่อนที่ของราวสเปรย์ | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินจุดที่1 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่2 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่3 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินจุดที่4 (มก/ตร.ม) | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 37 | 5.5 | 11 | 2 | 2 | 897.729 | 1012.822 | 920.748 | 989.804 | 955.27575 |
| 38 | 5.5 | 11 | 3 | 2 | 943.766 | 874.71 | 897.729 | 851.692 | 891.97425 |
| 39 | 5.5 | 11 | 4 | 2 | 782.635 | 828.673 | 874.71 | 874.71 | 840.182 |
| 40 | 5.5 | 13 | 2 | 2 | 874.71 | 897.729 | 805.654 | 920.748 | 874.71025 |
| 41 | 5.5 | 13 | 3 | 2 | 828.673 | 874.71 | 851.692 | 782.635 | 834.4275 |
| 42 | 5.5 | 13 | 4 | 2 | 759.617 | 782.635 | 759.617 | 759.617 | 765.3715 |
| 43 | 5.5 | 15 | 2 | 2 | 782.635 | 713.579 | 736.598 | 782.635 | 753.86175 |
| 44 | 5.5 | 15 | 3 | 2 | 690.561 | 690.561 | 759.617 | 713.579 | 713.5795 |
| 45 | 5.5 | 15 | 4 | 2 | 598.486 | 621.505 | 621.505 | 621.505 | 615.75025 |
| 46 | 6.5 | 11 | 2 | 2 | 1173.953 | 1127.916 | 1012.822 | 1012.822 | 1081.87825 |
| 47 | 6.5 | 11 | 3 | 2 | 1058.86 | 1058.86 | 989.804 | 989.804 | 1024.332 |
| 48 | 6.5 | 11 | 4 | 2 | 1035.841 | 966.785 | 989.804 | 966.785 | 989.80375 |
| 49 | 6.5 | 13 | 2 | 2 | 966.785 | 966.785 | 966.785 | 1058.86 | 989.80375 |
| 50 | 6.5 | 13 | 3 | 2 | 851.692 | 966.785 | 943.766 | 920.748 | 920.74775 |
| 51 | 6.5 | 13 | 4 | 2 | 851.692 | 874.71 | 897.729 | 828.673 | 863.201 |
| 52 | 6.5 | 15 | 2 | 2 | 851.692 | 966.785 | 943.766 | 874.71 | 909.23825 |
| 53 | 6.5 | 15 | 3 | 2 | 805.654 | 828.673 | 782.635 | 828.673 | 811.40875 |
| 54 | 6.5 | 15 | 4 | 2 | 713.579 | 759.617 | 736.598 | 782.635 | 748.10725 |

ผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง (ซ้ำ 1)

| สภาวะการทดลอง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | |
| ความถาวรสปริง(รอบ/นาท) | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | |
| ความดันนา DI(บาร์) | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | |
| การทดลองซ้ำ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 79.3 | 80.0 | 77.0 | 80.4 | 79.9 | 79.3 | 78.8 | 79.3 | 78.1 | 77.7 | 80.7 | 81.1 | 81.2 | 81.7 |
| | แผ่น 2 | 79.1 | 80.3 | 79.3 | 84.6 | 80.3 | 78.4 | 79.7 | 79.1 | 77.8 | 81.4 | 81.0 | 80.2 | 81.4 | 80.3 |
| | แผ่น 3 | 79.9 | 80.1 | 78.0 | 79.7 | 80.7 | 79.5 | 79.7 | 78.8 | 78.1 | 81.1 | 80.6 | 80.4 | 80.7 | 81.9 |
| | แผ่น 4 | 79.4 | 80.3 | 78.7 | 80.7 | 80.2 | 79.1 | 80.6 | 79.1 | 77.6 | 81.6 | 80.9 | 79.9 | 80.7 | 81.5 |
| | แผ่น 5 | 77.8 | 79.4 | 79.4 | 80.5 | 80.1 | 79.0 | 80.3 | 78.6 | 77.3 | 81.2 | 80.8 | 80.6 | 81.1 | 81.4 |
| | แผ่น 6 | 77.7 | 79.7 | 79.7 | 79.5 | 80.0 | 79.3 | 79.0 | 79.0 | 78.4 | 80.7 | 81.1 | 80.6 | 81.1 | 81.6 |
| | แผ่น 7 | 79.1 | 79.5 | 79.3 | 79.1 | 80.2 | 78.7 | 80.2 | 78.8 | 78.3 | 81.0 | 81.1 | 80.9 | 80.9 | 80.9 |
| | แผ่น 8 | 80.1 | 80.5 | 78.9 | 80.6 | 80.4 | 78.7 | 79.8 | 79.2 | 78.1 | 81.4 | 80.8 | 80.6 | 81.3 | 80.9 |
| | แผ่น 9 | 79.0 | 80.5 | 79.4 | 80.1 | 80.7 | 80.1 | 80.1 | 78.8 | 78.6 | 81.2 | 81.1 | 80.4 | 80.9 | 81.2 |
| | แผ่น 10 | 79.8 | 80.0 | 79.4 | 79.7 | 80.3 | 79.8 | 77.8 | 79.3 | 78.8 | 80.6 | 81.2 | 81.2 | 80.8 | 81.7 |
| | แผ่น 11 | 79.7 | 80.0 | 79.6 | 79.0 | 80.2 | 79.1 | 77.8 | 79.4 | 79.1 | 81.4 | 81.6 | 80.9 | 82.5 | 81.4 |
| | แผ่น 12 | 79.6 | 78.6 | 78.8 | 80.2 | 79.0 | 79.6 | 79.2 | 78.9 | 78.3 | 81.6 | 81.2 | 80.8 | 80.8 | 81.3 |
| | แผ่น 13 | 77.2 | 79.5 | 79.8 | 79.9 | 80.1 | 79.2 | 79.5 | 79.5 | 79.7 | 81.5 | 80.8 | 79.9 | 81.3 | 81.2 |
| | แผ่น 14 | 80.0 | 80.1 | 79.3 | 79.6 | 80.6 | 79.4 | 79.6 | 79.1 | 78.8 | 81.4 | 81.2 | 81.2 | 81.0 | 81.6 |
| | แผ่น 15 | 79.3 | 79.5 | 78.9 | 79.4 | 80.3 | 78.9 | 79.9 | 78.9 | 79.1 | 81.1 | 80.6 | 80.4 | 81.4 | 80.8 |
| | แผ่น 16 | 80.6 | 80.0 | 78.7 | 80.5 | 80.6 | 79.5 | 79.0 | 78.8 | 78.7 | 80.6 | 80.9 | 79.9 | 81.0 | 80.8 |
| | แผ่น 17 | 79.1 | 79.5 | 79.6 | 78.8 | 79.9 | 79.6 | 80.2 | 78.8 | 77.3 | 81.1 | 81.4 | 79.5 | 81.5 | 80.5 |
| | แผ่น 18 | 80.1 | 79.1 | 79.8 | 79.1 | 80.5 | 79.9 | 79.4 | 79.0 | 78.7 | 81.1 | 80.9 | 80.9 | 81.0 | 81.6 |
| | แผ่น 19 | 81.0 | 80.0 | 80.0 | 79.6 | 80.4 | 79.2 | 77.5 | 79.5 | 79.0 | 80.0 | 81.5 | 80.5 | 78.6 | 80.4 |
| | แผ่น 20 | 79.7 | 80.7 | 79.3 | 79.6 | 80.3 | 78.4 | 78.5 | 79.1 | 78.4 | 80.0 | 81.0 | 79.9 | 81.2 | 80.8 |
| | แผ่น 21 | 79.6 | 79.2 | 79.2 | 79.1 | 79.9 | 78.8 | 79.4 | 78.9 | 79.1 | 81.0 | 80.2 | 80.5 | 81.6 | 81.0 |
| | แผ่น 22 | 79.2 | 80.1 | 78.2 | 79.4 | 80.5 | 78.0 | 79.0 | 78.2 | 79.0 | 81.6 | 81.1 | 80.3 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 78.2 | 80.1 | 79.4 | 79.6 | 80.4 | 78.7 | 80.4 | 79.3 | 78.9 | 81.4 | 80.9 | 80.7 | 80.5 | 80.6 |
| | แผ่น 24 | 80.1 | 80.2 | 78.8 | 78.8 | 80.6 | 79.4 | 79.4 | 79.5 | 76.5 | 81.2 | 81.2 | 81.2 | 80.6 | 81.0 |
| ค่าการสะท้อนแสงเฉลี่ย | 79.34 | 79.87 | 79.10 | 79.89 | 80.25 | 79.15 | 79.36 | 79.03 | 78.39 | 80.96 | 80.99 | 80.52 | 81.01 | 81.12 | |

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง (ซ้ำ 1)

| สภาวะการทดลอง | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | |
| การทดลองซ้ำ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 80.6 | 80.8 | 80.3 | 80.6 | 81.7 | 81.8 | 79.6 | 78.9 | 81.2 | 81.2 | 81.7 | 79.2 | 79.9 |
| | แผ่น 2 | 80.3 | 80.1 | 80.8 | 80.2 | 80.4 | 81.4 | 80.1 | 81.5 | 81.0 | 80.7 | 81.7 | 81.5 | 80.7 |
| | แผ่น 3 | 80.3 | 80.2 | 79.4 | 80.6 | 80.9 | 82.0 | 80.0 | 81.1 | 81.0 | 80.7 | 81.2 | 81.2 | 80.8 |
| | แผ่น 4 | 80.8 | 81.0 | 79.7 | 80.5 | 79.8 | 81.4 | 79.3 | 81.1 | 81.0 | 81.6 | 81.5 | 81.6 | 80.3 |
| | แผ่น 5 | 80.5 | 80.8 | 80.1 | 80.5 | 80.6 | 82.3 | 80.6 | 81.1 | 81.6 | 81.5 | 80.7 | 81.8 | 80.3 |
| | แผ่น 6 | 80.5 | 80.2 | 80.3 | 80.4 | 80.8 | 81.4 | 80.4 | 81.6 | 81.4 | 81.4 | 81.9 | 79.7 | 80.7 |
| | แผ่น 7 | 80.4 | 80.2 | 81.0 | 78.8 | 80.6 | 81.1 | 82.3 | 81.2 | 80.8 | 80.8 | 81.7 | 80.8 | 81.1 |
| | แผ่น 8 | 79.9 | 80.3 | 80.9 | 80.4 | 80.2 | 81.6 | 79.2 | 81.4 | 81.3 | 81.6 | 82.0 | 81.0 | 81.2 |
| | แผ่น 9 | 80.8 | 80.8 | 79.6 | 80.2 | 79.2 | 81.1 | 80.2 | 78.4 | 81.1 | 80.5 | 81.3 | 81.6 | 80.6 |
| | แผ่น 10 | 78.6 | 80.7 | 81.0 | 80.2 | 80.2 | 81.7 | 80.1 | 80.3 | 81.6 | 80.4 | 81.5 | 81.4 | 81.2 |
| | แผ่น 11 | 80.2 | 80.1 | 80.7 | 79.3 | 79.2 | 82.3 | 79.5 | 81.1 | 81.6 | 81.1 | 80.9 | 80.2 | 80.0 |
| | แผ่น 12 | 80.4 | 80.1 | 80.2 | 80.2 | 80.5 | 81.3 | 80.0 | 81.2 | 80.9 | 81.5 | 81.5 | 81.9 | 81.2 |
| | แผ่น 13 | 80.1 | 81.0 | 78.0 | 79.4 | 79.4 | 81.7 | 78.6 | 80.5 | 81.0 | 81.4 | 81.2 | 81.1 | 80.8 |
| | แผ่น 14 | 80.9 | 81.1 | 79.3 | 80.2 | 80.5 | 79.9 | 80.4 | 80.4 | 81.5 | 81.2 | 81.4 | 81.3 | 81.2 |
| | แผ่น 15 | 80.1 | 80.4 | 80.1 | 80.4 | 79.7 | 81.2 | 80.8 | 81.5 | 81.1 | 81.4 | 81.6 | 82.0 | 80.2 |
| | แผ่น 16 | 79.3 | 80.9 | 80.8 | 80.1 | 80.7 | 81.6 | 81.1 | 81.2 | 79.5 | 79.9 | 81.4 | 81.3 | 80.2 |
| | แผ่น 17 | 80.9 | 80.1 | 80.7 | 79.5 | 80.4 | 81.1 | 80.5 | 81.3 | 81.5 | 79.6 | 81.8 | 81.8 | 80.9 |
| | แผ่น 18 | 80.4 | 80.8 | 80.4 | 80.5 | 80.3 | 80.6 | 80.0 | 81.2 | 80.9 | 81.7 | 80.5 | 81.6 | 80.1 |
| | แผ่น 19 | 80.5 | 79.4 | 77.7 | 80.6 | 80.6 | 82.2 | 79.9 | 81.0 | 80.4 | 80.9 | 81.9 | 81.6 | 81.1 |
| | แผ่น 20 | 79.5 | 80.6 | 79.3 | 80.7 | 80.8 | 80.8 | 79.9 | 81.2 | 81.0 | 81.3 | 81.4 | 81.6 | 80.7 |
| | แผ่น 21 | 80.2 | 79.6 | 80.4 | 80.6 | 80.7 | 82.1 | 80.8 | 79.4 | 81.6 | 80.6 | 81.7 | 80.7 | 78.6 |
| | แผ่น 22 | 80.5 | 81.0 | 80.6 | 79.8 | 80.4 | 82.0 | 80.8 | 81.2 | 81.2 | 81.0 | 80.4 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 79.4 | 80.9 | 80.2 | 79.2 | 80.5 | 82.0 | 80.6 | 81.2 | 81.3 | 81.2 | 81.6 | 81.4 | 80.6 |
| | แผ่น 24 | 80.4 | 81.3 | 80.0 | 78.8 | 81.5 | 81.7 | 80.1 | 81.6 | 80.8 | 81.4 | 81.0 | 80.9 | 80.7 |
| ค่าการสะท้อนแสงเฉลี่ย | 80.23 | 80.51 | 80.05 | 80.07 | 80.40 | 81.51 | 80.20 | 80.86 | 81.09 | 81.02 | 81.39 | 81.18 | 80.58 | |

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง (ซ้ำ 2)

| สภาวะการทดลอง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | |
| การทดลองซ้ำ | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 79.3 | 79.9 | 79.3 | 79.8 | 79.6 | 78.6 | 79.0 | 78.9 | 79.4 | 80.7 | 81.0 | 80.4 | 80.8 | 81.5 |
| | แผ่น 2 | 81.2 | 79.7 | 80.1 | 78.6 | 79.4 | 79.4 | 79.2 | 79.1 | 77.8 | 81.2 | 80.8 | 80.6 | 80.5 | 81.8 |
| | แผ่น 3 | 80.4 | 79.7 | 80.5 | 79.0 | 79.3 | 79.1 | 80.1 | 78.8 | 77.7 | 81.5 | 80.4 | 81.7 | 80.6 | 81.3 |
| | แผ่น 4 | 80.4 | 79.4 | 80.6 | 79.4 | 79.5 | 79.6 | 79.7 | 79.5 | 79.1 | 81.0 | 80.6 | 80.7 | 81.1 | 81.8 |
| | แผ่น 5 | 81.3 | 80.4 | 80.9 | 79.3 | 79.4 | 79.2 | 79.1 | 78.5 | 79.8 | 80.7 | 80.6 | 80.1 | 80.6 | 80.7 |
| | แผ่น 6 | 80.3 | 79.7 | 80.7 | 79.1 | 79.5 | 79.5 | 78.9 | 79.7 | 81.1 | 81.3 | 81.5 | 80.8 | 81.0 | 81.8 |
| | แผ่น 7 | 80.5 | 80.1 | 81.6 | 79.6 | 80.2 | 79.2 | 79.2 | 78.8 | 80.3 | 80.3 | 80.8 | 81.2 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 8 | 81.2 | 80.3 | 80.5 | 80.1 | 79.9 | 79.5 | 79.0 | 79.6 | 77.6 | 81.0 | 79.9 | 80.8 | 82.0 | 82.0 |
| | แผ่น 9 | 81.4 | 80.1 | 80.9 | 80.1 | 79.6 | 79.5 | 79.2 | 78.7 | 79.8 | 81.3 | 80.6 | 81.0 | 81.2 | 82.0 |
| | แผ่น 10 | 80.4 | 80.5 | 79.8 | 79.6 | 80.2 | 80.2 | 79.5 | 78.9 | 79.0 | 81.2 | 80.0 | 81.3 | 80.5 | 81.3 |
| | แผ่น 11 | 80.8 | 79.0 | 80.9 | 79.2 | 79.3 | 78.4 | 79.2 | 79.3 | 79.6 | 81.3 | 80.5 | 79.5 | 81.7 | 81.1 |
| | แผ่น 12 | 80.4 | 80.8 | 80.3 | 80.2 | 79.6 | 79.0 | 80.4 | 79.2 | 80.2 | 81.2 | 79.7 | 79.3 | 80.7 | 81.6 |
| | แผ่น 13 | 78.2 | 79.7 | 81.2 | 79.4 | 79.6 | 79.8 | 79.4 | 79.2 | 79.5 | 80.8 | 80.3 | 79.3 | 80.2 | 81.0 |
| | แผ่น 14 | 79.5 | 80.2 | 80.9 | 79.7 | 79.6 | 80.4 | 80.4 | 78.4 | 80.5 | 81.0 | 80.2 | 79.1 | 81.1 | 80.7 |
| | แผ่น 15 | 80.5 | 79.7 | 80.4 | 79.8 | 79.7 | 80.0 | 80.0 | 79.7 | 78.5 | 81.0 | 80.2 | 79.4 | 81.7 | 81.0 |
| | แผ่น 16 | 80.1 | 79.8 | 80.8 | 79.6 | 80.4 | 78.6 | 80.8 | 78.6 | 79.5 | 81.3 | 80.6 | 78.9 | 81.8 | 81.4 |
| | แผ่น 17 | 80.7 | 80.4 | 79.2 | 79.9 | 79.9 | 79.6 | 80.5 | 79.3 | 81.3 | 81.3 | 79.9 | 79.6 | 82.0 | 81.6 |
| | แผ่น 18 | 80.0 | 80.0 | 80.8 | 80.1 | 79.6 | 80.4 | 80.7 | 78.8 | 80.8 | 80.8 | 80.5 | 79.4 | 82.2 | 79.9 |
| | แผ่น 19 | 80.3 | 79.9 | 80.5 | 79.5 | 79.8 | 78.2 | 79.6 | 79.5 | 79.4 | 81.2 | 80.1 | 79.3 | 81.7 | 81.4 |
| | แผ่น 20 | 79.9 | 79.3 | 80.3 | 80.6 | 80.1 | 79.5 | 80.4 | 78.8 | 78.4 | 81.1 | 80.4 | 79.2 | 81.7 | 81.8 |
| | แผ่น 21 | 79.5 | 79.8 | 80.1 | 79.0 | 79.6 | 79.3 | 80.6 | 79.5 | 79.3 | 82.0 | 80.1 | 78.6 | 81.5 | 81.3 |
| | แผ่น 22 | 79.9 | 80.3 | 79.8 | 79.2 | 79.7 | 78.9 | 80.4 | 78.6 | 79.1 | 81.5 | 80.5 | 78.9 | 81.9 | 80.5 |
| | แผ่น 23 | 79.6 | 80.1 | 80.2 | 79.6 | 80.5 | 78.6 | 79.7 | 79.5 | 78.5 | 81.7 | 80.6 | 79.5 | 81.0 | 81.5 |
| | แผ่น 24 | 80.5 | 79.6 | 79.4 | 80.0 | 80.0 | 78.7 | 80.3 | 78.5 | 79.3 | 81.1 | 81.0 | 78.8 | 82.5 | 81.4 |
| ค่าการสะท้อนแสงเฉลี่ย | 80.26 | 79.93 | 80.41 | 79.61 | 79.76 | 79.30 | 79.82 | 79.05 | 79.39 | 81.15 | 80.46 | 79.90 | 81.30 | 81.31 | |

ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนแสง (ซ้ำ 2)

| สภาวะการทดลอง | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| การทดลองซ้ำ | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 80.9 | 80.3 | 80.2 | 80.0 | 81.5 | 82.2 | 82.1 | 81.3 | 81.4 | 80.8 | 81.6 | 82.2 | 80.9 |
| | แผ่น 2 | 80.9 | 81.3 | 79.8 | 81.2 | 80.9 | 82.3 | 81.6 | 80.3 | 81.4 | 81.2 | 81.4 | 81.3 | 79.3 |
| | แผ่น 3 | 80.7 | 81.1 | 80.2 | 79.6 | 80.7 | 81.0 | 80.6 | 81.2 | 81.4 | 81.2 | 82.4 | 81.7 | 80.1 |
| | แผ่น 4 | 80.6 | 80.9 | 80.9 | 80.2 | 81.4 | 81.6 | 82.2 | 81.0 | 81.0 | 81.7 | 81.2 | 80.0 | 79.8 |
| | แผ่น 5 | 80.2 | 80.5 | 80.6 | 80.2 | 81.0 | 81.7 | 81.4 | 80.9 | 80.9 | 81.4 | 81.5 | 81.3 | 79.7 |
| | แผ่น 6 | 80.9 | 79.7 | 80.5 | 79.7 | 81.4 | 82.2 | 81.6 | 79.5 | 81.1 | 82.0 | 81.4 | 80.9 | 79.9 |
| | แผ่น 7 | 80.7 | 80.0 | 80.8 | 81.6 | 81.0 | 82.3 | 81.6 | 80.4 | 81.2 | 81.9 | 82.0 | 81.9 | 79.9 |
| | แผ่น 8 | 80.4 | 79.5 | 80.7 | 79.8 | 81.5 | 82.4 | 81.0 | 80.9 | 80.9 | 81.3 | 82.0 | 81.6 | 79.5 |
| | แผ่น 9 | 80.3 | 80.0 | 80.8 | 79.3 | 81.5 | 81.6 | 82.0 | 81.1 | 80.9 | 81.5 | 82.4 | 81.7 | 80.4 |
| | แผ่น 10 | 82.4 | 79.8 | 81.3 | 79.1 | 81.6 | 82.0 | 81.9 | 79.0 | 79.8 | 81.7 | 80.5 | 81.3 | 80.2 |
| | แผ่น 11 | 81.0 | 80.2 | 80.8 | 81.3 | 81.3 | 82.2 | 81.6 | 80.3 | 80.8 | 81.4 | 81.9 | 81.6 | 80.2 |
| | แผ่น 12 | 80.5 | 80.2 | 80.9 | 80.9 | 80.0 | 82.1 | 81.2 | 80.7 | 79.6 | 81.6 | 81.6 | 81.5 | 80.7 |
| | แผ่น 13 | 80.4 | 80.1 | 79.7 | 80.9 | 81.2 | 82.1 | 81.7 | 80.8 | 81.7 | 81.4 | 82.0 | 82.3 | 79.9 |
| | แผ่น 14 | 81.0 | 80.4 | 81.4 | 81.1 | 81.2 | 82.2 | 81.6 | 80.5 | 80.8 | 81.5 | 81.1 | 82.6 | 80.7 |
| | แผ่น 15 | 80.1 | 79.8 | 81.8 | 80.7 | 81.5 | 82.4 | 81.0 | 81.3 | 80.1 | 81.1 | 81.5 | 81.5 | 79.4 |
| | แผ่น 16 | 80.3 | 79.2 | 80.6 | 80.5 | 80.8 | 82.4 | 80.8 | 81.3 | 80.6 | 82.0 | 81.9 | 80.9 | 80.4 |
| | แผ่น 17 | 80.1 | 80.5 | 80.8 | 81.3 | 79.9 | 82.4 | 81.6 | 81.3 | 80.4 | 81.5 | 82.1 | 81.8 | 79.2 |
| | แผ่น 18 | 80.5 | 79.9 | 81.6 | 80.1 | 81.3 | 82.7 | 81.5 | 80.8 | 81.2 | 81.5 | 82.0 | 80.6 | 79.4 |
| | แผ่น 19 | 80.4 | 80.3 | 81.1 | 81.0 | 80.5 | 82.6 | 82.4 | 80.3 | 80.6 | 81.6 | 81.5 | 81.6 | 80.8 |
| | แผ่น 20 | 79.8 | 80.2 | 82.0 | 79.8 | 80.0 | 82.3 | 81.3 | 81.0 | 80.9 | 81.7 | 81.7 | 81.7 | 80.9 |
| | แผ่น 21 | 80.4 | 79.8 | 81.5 | 80.7 | 81.0 | 81.5 | 82.0 | 80.9 | 81.1 | 81.5 | 81.6 | 81.5 | 80.2 |
| | แผ่น 22 | 80.1 | 79.2 | 81.6 | 81.0 | 81.6 | 81.6 | 81.8 | 80.9 | 81.6 | 81.6 | 81.0 | 80.9 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 80.0 | 80.6 | 81.5 | 81.4 | 80.6 | 82.3 | 81.8 | 80.7 | 80.8 | 81.8 | 81.1 | 81.0 | 80.8 |
| | แผ่น 24 | 79.7 | 79.7 | 81.1 | 81.2 | 80.6 | 82.2 | 81.5 | 82.3 | 81.1 | 81.5 | 80.9 | 80.6 | 80.1 |
| ค่าการสะท้อนแสงเฉลี่ย | | 80.52 | 80.14 | 80.93 | 80.53 | 81.00 | 82.09 | 81.57 | 80.78 | 80.88 | 81.52 | 81.60 | 81.42 | 80.15 |

ผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบเงิน

ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ (ซ้ำ 1)

| สภาวะการทดลอง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
|---|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | |
| การทดลองซ้ำ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 79.3 | 80.0 | 77.0 | 80.4 | 79.9 | 79.3 | 78.8 | 79.3 | 78.1 | 77.7 | 80.7 | 81.1 | 81.2 | 81.7 |
| | แผ่น 2 | 79.1 | 80.3 | 79.3 | 84.6 | 80.3 | 78.4 | 79.7 | 79.1 | 77.8 | 81.4 | 81.0 | 80.2 | 81.4 | 80.3 |
| | แผ่น 3 | 79.9 | 80.1 | 78.0 | 79.7 | 80.7 | 79.5 | 79.7 | 78.8 | 78.1 | 81.1 | 80.6 | 80.4 | 80.7 | 81.9 |
| | แผ่น 4 | 79.4 | 80.3 | 78.7 | 80.7 | 80.2 | 79.1 | 80.6 | 79.1 | 77.6 | 81.6 | 80.9 | 79.9 | 80.7 | 81.5 |
| | แผ่น 5 | 77.8 | 79.4 | 79.4 | 80.5 | 80.1 | 79.0 | 80.3 | 78.6 | 77.3 | 81.2 | 80.8 | 80.6 | 81.1 | 81.4 |
| | แผ่น 6 | 77.7 | 79.7 | 79.7 | 79.5 | 80.0 | 79.3 | 79.0 | 79.0 | 78.4 | 80.7 | 81.1 | 80.6 | 81.1 | 81.6 |
| | แผ่น 7 | 79.1 | 79.5 | 79.3 | 79.1 | 80.2 | 78.7 | 80.2 | 78.8 | 78.3 | 81.0 | 81.1 | 80.9 | 80.9 | 80.9 |
| | แผ่น 8 | 80.1 | 80.5 | 78.9 | 80.6 | 80.4 | 78.7 | 79.8 | 79.2 | 78.1 | 81.4 | 80.8 | 80.6 | 81.3 | 80.9 |
| | แผ่น 9 | 79.0 | 80.5 | 79.4 | 80.1 | 80.7 | 80.1 | 80.1 | 78.8 | 78.6 | 81.2 | 81.1 | 80.4 | 80.9 | 81.2 |
| | แผ่น 10 | 79.8 | 80.0 | 79.4 | 79.7 | 80.3 | 79.8 | 77.8 | 79.3 | 78.8 | 80.6 | 81.2 | 81.2 | 80.8 | 81.7 |
| | แผ่น 11 | 79.7 | 80.0 | 79.6 | 79.0 | 80.2 | 79.1 | 77.8 | 79.4 | 79.1 | 81.4 | 81.6 | 80.9 | 82.5 | 81.4 |
| | แผ่น 12 | 79.6 | 78.6 | 78.8 | 80.2 | 79.0 | 79.6 | 79.2 | 78.9 | 78.3 | 81.6 | 81.2 | 80.8 | 80.8 | 81.3 |
| | แผ่น 13 | 77.2 | 79.5 | 79.8 | 79.9 | 80.1 | 79.2 | 79.5 | 79.5 | 79.7 | 81.5 | 80.8 | 79.9 | 81.3 | 81.2 |
| | แผ่น 14 | 80.0 | 80.1 | 79.3 | 79.6 | 80.6 | 79.4 | 79.6 | 79.1 | 78.8 | 81.4 | 81.2 | 81.2 | 81.0 | 81.6 |
| | แผ่น 15 | 79.3 | 79.5 | 78.9 | 79.4 | 80.3 | 78.9 | 79.9 | 78.9 | 79.1 | 81.1 | 80.6 | 80.4 | 81.4 | 80.8 |
| | แผ่น 16 | 80.6 | 80.0 | 78.7 | 80.5 | 80.6 | 79.5 | 79.0 | 78.8 | 78.7 | 80.6 | 80.9 | 79.9 | 81.0 | 80.8 |
| | แผ่น 17 | 79.1 | 79.5 | 79.6 | 78.8 | 79.9 | 79.6 | 80.2 | 78.8 | 77.3 | 81.1 | 81.4 | 79.5 | 81.5 | 80.5 |
| | แผ่น 18 | 80.1 | 79.1 | 79.8 | 79.1 | 80.5 | 79.9 | 79.4 | 79.0 | 78.7 | 81.1 | 80.9 | 80.9 | 81.0 | 81.6 |
| | แผ่น 19 | 81.0 | 80.0 | 80.0 | 79.6 | 80.4 | 79.2 | 77.5 | 79.5 | 79.0 | 80.0 | 81.5 | 80.5 | 78.6 | 80.4 |
| | แผ่น 20 | 79.7 | 80.7 | 79.3 | 79.6 | 80.3 | 78.4 | 78.5 | 79.1 | 78.4 | 80.0 | 81.0 | 79.9 | 81.2 | 80.8 |
| | แผ่น 21 | 79.6 | 79.2 | 79.2 | 79.1 | 79.9 | 78.8 | 79.4 | 78.9 | 79.1 | 81.0 | 80.2 | 80.5 | 81.6 | 81.0 |
| | แผ่น 22 | 79.2 | 80.1 | 78.2 | 79.4 | 80.5 | 78.0 | 79.0 | 78.2 | 79.0 | 81.6 | 81.1 | 80.3 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 78.2 | 80.1 | 79.4 | 79.6 | 80.4 | 78.7 | 80.4 | 79.3 | 78.9 | 81.4 | 80.9 | 80.7 | 80.5 | 80.6 |
| | แผ่น 24 | 80.1 | 80.2 | 78.8 | 78.8 | 80.6 | 79.4 | 79.4 | 79.5 | 76.5 | 81.2 | 81.2 | 81.2 | 80.6 | 81.0 |
| ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง | 0.90 | 0.50 | 0.66 | 1.15 | 0.36 | 0.51 | 0.84 | 0.30 | 0.73 | 0.83 | 0.32 | 0.47 | 0.66 | 0.44 | |

ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ (ซ้ำ 1)

| สภาวะการทดลอง | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| การทดลองซ้ำ | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ค่าเบี่ยงเบน (%) | แผ่น 1 | 80.6 | 80.8 | 80.3 | 80.6 | 81.7 | 81.8 | 79.6 | 78.9 | 81.2 | 81.2 | 81.7 | 79.2 | 79.9 |
| | แผ่น 2 | 80.3 | 80.1 | 80.8 | 80.2 | 80.4 | 81.4 | 80.1 | 81.5 | 81.0 | 80.7 | 81.7 | 81.5 | 80.7 |
| | แผ่น 3 | 80.3 | 80.2 | 79.4 | 80.6 | 80.9 | 82.0 | 80.0 | 81.1 | 81.0 | 80.7 | 81.2 | 81.2 | 80.8 |
| | แผ่น 4 | 80.8 | 81.0 | 79.7 | 80.5 | 79.8 | 81.4 | 79.3 | 81.1 | 81.0 | 81.6 | 81.5 | 81.6 | 80.3 |
| | แผ่น 5 | 80.5 | 80.8 | 80.1 | 80.5 | 80.6 | 82.3 | 80.6 | 81.1 | 81.6 | 81.5 | 80.7 | 81.8 | 80.3 |
| | แผ่น 6 | 80.5 | 80.2 | 80.3 | 80.4 | 80.8 | 81.4 | 80.4 | 81.6 | 81.4 | 81.4 | 81.9 | 79.7 | 80.7 |
| | แผ่น 7 | 80.4 | 80.2 | 81.0 | 78.8 | 80.6 | 81.1 | 82.3 | 81.2 | 80.8 | 80.8 | 81.7 | 80.8 | 81.1 |
| | แผ่น 8 | 79.9 | 80.3 | 80.9 | 80.4 | 80.2 | 81.6 | 79.2 | 81.4 | 81.3 | 81.6 | 82.0 | 81.0 | 81.2 |
| | แผ่น 9 | 80.8 | 80.8 | 79.6 | 80.2 | 79.2 | 81.1 | 80.2 | 78.4 | 81.1 | 80.5 | 81.3 | 81.6 | 80.6 |
| | แผ่น 10 | 78.6 | 80.7 | 81.0 | 80.2 | 80.2 | 81.7 | 80.1 | 80.3 | 81.6 | 80.4 | 81.5 | 81.4 | 81.2 |
| | แผ่น 11 | 80.2 | 80.1 | 80.7 | 79.3 | 79.2 | 82.3 | 79.5 | 81.1 | 81.6 | 81.1 | 80.9 | 80.2 | 80.0 |
| | แผ่น 12 | 80.4 | 80.1 | 80.2 | 80.2 | 80.5 | 81.3 | 80.0 | 81.2 | 80.9 | 81.5 | 81.5 | 81.9 | 81.2 |
| | แผ่น 13 | 80.1 | 81.0 | 78.0 | 79.4 | 79.4 | 81.7 | 78.6 | 80.5 | 81.0 | 81.4 | 81.2 | 81.1 | 80.8 |
| | แผ่น 14 | 80.9 | 81.1 | 79.3 | 80.2 | 80.5 | 79.9 | 80.4 | 80.4 | 81.5 | 81.2 | 81.4 | 81.3 | 81.2 |
| | แผ่น 15 | 80.1 | 80.4 | 80.1 | 80.4 | 79.7 | 81.2 | 80.8 | 81.5 | 81.1 | 81.4 | 81.6 | 82.0 | 80.2 |
| | แผ่น 16 | 79.3 | 80.9 | 80.8 | 80.1 | 80.7 | 81.6 | 81.1 | 81.2 | 79.5 | 79.9 | 81.4 | 81.3 | 80.2 |
| | แผ่น 17 | 80.9 | 80.1 | 80.7 | 79.5 | 80.4 | 81.1 | 80.5 | 81.3 | 81.5 | 79.6 | 81.8 | 81.8 | 80.9 |
| | แผ่น 18 | 80.4 | 80.8 | 80.4 | 80.5 | 80.3 | 80.6 | 80.0 | 81.2 | 80.9 | 81.7 | 80.5 | 81.6 | 80.1 |
| | แผ่น 19 | 80.5 | 79.4 | 77.7 | 80.6 | 80.6 | 82.2 | 79.9 | 81.0 | 80.4 | 80.9 | 81.9 | 81.6 | 81.1 |
| | แผ่น 20 | 79.5 | 80.6 | 79.3 | 80.7 | 80.8 | 80.8 | 79.9 | 81.2 | 81.0 | 81.3 | 81.4 | 81.6 | 80.7 |
| | แผ่น 21 | 80.2 | 79.6 | 80.4 | 80.6 | 80.7 | 82.1 | 80.8 | 79.4 | 81.6 | 80.6 | 81.7 | 80.7 | 78.6 |
| | แผ่น 22 | 80.5 | 81.0 | 80.6 | 79.8 | 80.4 | 82.0 | 80.8 | 81.2 | 81.2 | 81.0 | 80.4 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 79.4 | 80.9 | 80.2 | 79.2 | 80.5 | 82.0 | 80.6 | 81.2 | 81.3 | 81.2 | 81.6 | 81.4 | 80.6 |
| | แผ่น 24 | 80.4 | 81.3 | 80.0 | 78.8 | 81.5 | 81.7 | 80.1 | 81.6 | 80.8 | 81.4 | 81.0 | 80.9 | 80.7 |
| ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง | | 0.56 | 0.48 | 0.85 | 0.59 | 0.62 | 0.57 | 0.73 | 0.84 | 0.45 | 0.55 | 0.43 | 0.67 | 0.59 |

ตารางที่ ง.3 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ (ซ้ำ 2)

| สภาวะการทดลอง | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| อัตราการจ่ายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 |
| ความถี่ราวสเปรย์(รอบ/นาที) | | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| การทดลองซ้ำ | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 79.3 | 79.9 | 79.3 | 79.8 | 79.6 | 78.6 | 79.0 | 78.9 | 79.4 | 80.7 | 81.0 | 80.4 | 80.8 | 81.5 |
| | แผ่น 2 | 81.2 | 79.7 | 80.1 | 78.6 | 79.4 | 79.4 | 79.2 | 79.1 | 77.8 | 81.2 | 80.8 | 80.6 | 80.5 | 81.8 |
| | แผ่น 3 | 80.4 | 79.7 | 80.5 | 79.0 | 79.3 | 79.1 | 80.1 | 78.8 | 77.7 | 81.5 | 80.4 | 81.7 | 80.6 | 81.3 |
| | แผ่น 4 | 80.4 | 79.4 | 80.6 | 79.4 | 79.5 | 79.6 | 79.7 | 79.5 | 79.1 | 81.0 | 80.6 | 80.7 | 81.1 | 81.8 |
| | แผ่น 5 | 81.3 | 80.4 | 80.9 | 79.3 | 79.4 | 79.2 | 79.1 | 78.5 | 79.8 | 80.7 | 80.6 | 80.1 | 80.6 | 80.7 |
| | แผ่น 6 | 80.3 | 79.7 | 80.7 | 79.1 | 79.5 | 79.5 | 78.9 | 79.7 | 81.1 | 81.3 | 81.5 | 80.8 | 81.0 | 81.8 |
| | แผ่น 7 | 80.5 | 80.1 | 81.6 | 79.6 | 80.2 | 79.2 | 79.2 | 78.8 | 80.3 | 80.3 | 80.8 | 81.2 | 81.1 | 81.0 |
| | แผ่น 8 | 81.2 | 80.3 | 80.5 | 80.1 | 79.9 | 79.5 | 79.0 | 79.6 | 77.6 | 81.0 | 79.9 | 80.8 | 82.0 | 82.0 |
| | แผ่น 9 | 81.4 | 80.1 | 80.9 | 80.1 | 79.6 | 79.5 | 79.2 | 78.7 | 79.8 | 81.3 | 80.6 | 81.0 | 81.2 | 82.0 |
| | แผ่น 10 | 80.4 | 80.5 | 79.8 | 79.6 | 80.2 | 80.2 | 79.5 | 78.9 | 79.0 | 81.2 | 80.0 | 81.3 | 80.5 | 81.3 |
| | แผ่น 11 | 80.8 | 79.0 | 80.9 | 79.2 | 79.3 | 78.4 | 79.2 | 79.3 | 79.6 | 81.3 | 80.5 | 79.5 | 81.7 | 81.1 |
| | แผ่น 12 | 80.4 | 80.8 | 80.3 | 80.2 | 79.6 | 79.0 | 80.4 | 79.2 | 80.2 | 81.2 | 79.7 | 79.3 | 80.7 | 81.6 |
| | แผ่น 13 | 78.2 | 79.7 | 81.2 | 79.4 | 79.6 | 79.8 | 79.4 | 79.2 | 79.5 | 80.8 | 80.3 | 79.3 | 80.2 | 81.0 |
| | แผ่น 14 | 79.5 | 80.2 | 80.9 | 79.7 | 79.6 | 80.4 | 80.4 | 78.4 | 80.5 | 81.0 | 80.2 | 79.1 | 81.1 | 80.7 |
| | แผ่น 15 | 80.5 | 79.7 | 80.4 | 79.8 | 79.7 | 80.0 | 80.0 | 79.7 | 78.5 | 81.0 | 80.2 | 79.4 | 81.7 | 81.0 |
| | แผ่น 16 | 80.1 | 79.8 | 80.8 | 79.6 | 80.4 | 78.6 | 80.8 | 78.6 | 79.5 | 81.3 | 80.6 | 78.9 | 81.8 | 81.4 |
| | แผ่น 17 | 80.7 | 80.4 | 79.2 | 79.9 | 79.9 | 79.6 | 80.5 | 79.3 | 81.3 | 81.3 | 79.9 | 79.6 | 82.0 | 81.6 |
| | แผ่น 18 | 80.0 | 80.0 | 80.8 | 80.1 | 79.6 | 80.4 | 80.7 | 78.8 | 80.8 | 80.8 | 80.5 | 79.4 | 82.2 | 79.9 |
| | แผ่น 19 | 80.3 | 79.9 | 80.5 | 79.5 | 79.8 | 78.2 | 79.6 | 79.5 | 79.4 | 81.2 | 80.1 | 79.3 | 81.7 | 81.4 |
| | แผ่น 20 | 79.9 | 79.3 | 80.3 | 80.6 | 80.1 | 79.5 | 80.4 | 78.8 | 78.4 | 81.1 | 80.4 | 79.2 | 81.7 | 81.8 |
| | แผ่น 21 | 79.5 | 79.8 | 80.1 | 79.0 | 79.6 | 79.3 | 80.6 | 79.5 | 79.3 | 82.0 | 80.1 | 78.6 | 81.5 | 81.3 |
| | แผ่น 22 | 79.9 | 80.3 | 79.8 | 79.2 | 79.7 | 78.9 | 80.4 | 78.6 | 79.1 | 81.5 | 80.5 | 78.9 | 81.9 | 80.5 |
| | แผ่น 23 | 79.6 | 80.1 | 80.2 | 79.6 | 80.5 | 78.6 | 79.7 | 79.5 | 78.5 | 81.7 | 80.6 | 79.5 | 81.0 | 81.5 |
| | แผ่น 24 | 80.5 | 79.6 | 79.4 | 80.0 | 80.0 | 78.7 | 80.3 | 78.5 | 79.3 | 81.1 | 81.0 | 78.8 | 82.5 | 81.4 |
| ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง | | 0.72 | 0.42 | 0.60 | 0.46 | 0.34 | 0.59 | 0.63 | 0.42 | 1.01 | 0.35 | 0.41 | 0.91 | 0.63 | 0.49 |

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความไม่สม่ำเสมอ (ซ้ำ 2)

| สภาวะการทดลอง | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| อัตราการทำลายสารละลายเงิน(ลิตร / ชม.) | | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| ความถี่ราวสเปร์ย์(รอบ/นาที) | | 13 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 |
| ความดันน้ำ DI(บาร์) | | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| การทดลองซ้ำ | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ค่าการสะท้อนแสง (%) | แผ่น 1 | 80.9 | 80.3 | 80.2 | 80.0 | 81.5 | 82.2 | 82.1 | 81.3 | 81.4 | 80.8 | 81.6 | 82.2 | 80.9 |
| | แผ่น 2 | 80.9 | 81.3 | 79.8 | 81.2 | 80.9 | 82.3 | 81.6 | 80.3 | 81.4 | 81.2 | 81.4 | 81.3 | 79.3 |
| | แผ่น 3 | 80.7 | 81.1 | 80.2 | 79.6 | 80.7 | 81.0 | 80.6 | 81.2 | 81.4 | 81.2 | 82.4 | 81.7 | 80.1 |
| | แผ่น 4 | 80.6 | 80.9 | 80.9 | 80.2 | 81.4 | 81.6 | 82.2 | 81.0 | 81.0 | 81.7 | 81.2 | 80.0 | 79.8 |
| | แผ่น 5 | 80.2 | 80.5 | 80.6 | 80.2 | 81.0 | 81.7 | 81.4 | 80.9 | 80.9 | 81.4 | 81.5 | 81.3 | 79.7 |
| | แผ่น 6 | 80.9 | 79.7 | 80.5 | 79.7 | 81.4 | 82.2 | 81.6 | 79.5 | 81.1 | 82.0 | 81.4 | 80.9 | 79.9 |
| | แผ่น 7 | 80.7 | 80.0 | 80.8 | 81.6 | 81.0 | 82.3 | 81.6 | 80.4 | 81.2 | 81.9 | 82.0 | 81.9 | 79.9 |
| | แผ่น 8 | 80.4 | 79.5 | 80.7 | 79.8 | 81.5 | 82.4 | 81.0 | 80.9 | 80.9 | 81.3 | 82.0 | 81.6 | 79.5 |
| | แผ่น 9 | 80.3 | 80.0 | 80.8 | 79.3 | 81.5 | 81.6 | 82.0 | 81.1 | 80.9 | 81.5 | 82.4 | 81.7 | 80.4 |
| | แผ่น 10 | 82.4 | 79.8 | 81.3 | 79.1 | 81.6 | 82.0 | 81.9 | 79.0 | 79.8 | 81.7 | 80.5 | 81.3 | 80.2 |
| | แผ่น 11 | 81.0 | 80.2 | 80.8 | 81.3 | 81.3 | 82.2 | 81.6 | 80.3 | 80.8 | 81.4 | 81.9 | 81.6 | 80.2 |
| | แผ่น 12 | 80.5 | 80.2 | 80.9 | 80.9 | 80.0 | 82.1 | 81.2 | 80.7 | 79.6 | 81.6 | 81.6 | 81.5 | 80.7 |
| | แผ่น 13 | 80.4 | 80.1 | 79.7 | 80.9 | 81.2 | 82.1 | 81.7 | 80.8 | 81.7 | 81.4 | 82.0 | 82.3 | 79.9 |
| | แผ่น 14 | 81.0 | 80.4 | 81.4 | 81.1 | 81.2 | 82.2 | 81.6 | 80.5 | 80.8 | 81.5 | 81.1 | 82.6 | 80.7 |
| | แผ่น 15 | 80.1 | 79.8 | 81.8 | 80.7 | 81.5 | 82.4 | 81.0 | 81.3 | 80.1 | 81.1 | 81.5 | 81.5 | 79.4 |
| | แผ่น 16 | 80.3 | 79.2 | 80.6 | 80.5 | 80.8 | 82.4 | 80.8 | 81.3 | 80.6 | 82.0 | 81.9 | 80.9 | 80.4 |
| | แผ่น 17 | 80.1 | 80.5 | 80.8 | 81.3 | 79.9 | 82.4 | 81.6 | 81.3 | 80.4 | 81.5 | 82.1 | 81.8 | 79.2 |
| | แผ่น 18 | 80.5 | 79.9 | 81.6 | 80.1 | 81.3 | 82.7 | 81.5 | 80.8 | 81.2 | 81.5 | 82.0 | 80.6 | 79.4 |
| | แผ่น 19 | 80.4 | 80.3 | 81.1 | 81.0 | 80.5 | 82.6 | 82.4 | 80.3 | 80.6 | 81.6 | 81.5 | 81.6 | 80.8 |
| | แผ่น 20 | 79.8 | 80.2 | 82.0 | 79.8 | 80.0 | 82.3 | 81.3 | 81.0 | 80.9 | 81.7 | 81.7 | 81.7 | 80.9 |
| | แผ่น 21 | 80.4 | 79.8 | 81.5 | 80.7 | 81.0 | 81.5 | 82.0 | 80.9 | 81.1 | 81.5 | 81.6 | 81.5 | 80.2 |
| | แผ่น 22 | 80.1 | 79.2 | 81.6 | 81.0 | 81.6 | 81.6 | 81.8 | 80.9 | 81.6 | 81.6 | 81.0 | 80.9 | 81.0 |
| | แผ่น 23 | 80.0 | 80.6 | 81.5 | 81.4 | 80.6 | 82.3 | 81.8 | 80.7 | 80.8 | 81.8 | 81.1 | 81.0 | 80.8 |
| | แผ่น 24 | 79.7 | 79.7 | 81.1 | 81.2 | 80.6 | 82.2 | 81.5 | 82.3 | 81.1 | 81.5 | 80.9 | 80.6 | 80.1 |
| ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง | | 0.55 | 0.53 | 0.60 | 0.71 | 0.51 | 0.39 | 0.44 | 0.64 | 0.52 | 0.27 | 0.47 | 0.59 | 0.55 |

ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

ตารางที่ จ.1 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่ราวสเปร์ย์ (รอบ/นาที) | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ปริมาณสารละลายเงินที่ใช้ไป (ลิตร / ชั่วโมง) | ความเร็วโรลเลอร์ (เมตร / นาที) | ระยะการวิ่งราวสเปร์ย์ (เมตร) | ปริมาณเงินที่ใช้ไปเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน |
|---------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 4.5 | 11 | 2 | 1 | 771.126 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 92% |
| 2 | 4.5 | 11 | 3 | 1 | 684.80575 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 81% |
| 3 | 4.5 | 11 | 4 | 1 | 667.54225 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 79% |
| 4 | 4.5 | 13 | 2 | 1 | 696.31525 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 83% |
| 5 | 4.5 | 13 | 3 | 1 | 644.5235 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 77% |
| 6 | 4.5 | 13 | 4 | 1 | 609.9955 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 72% |
| 7 | 4.5 | 15 | 2 | 1 | 604.2405 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 72% |
| 8 | 4.5 | 15 | 3 | 1 | 552.449 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 66% |
| 9 | 4.5 | 15 | 4 | 1 | 535.18475 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 64% |
| 10 | 5.5 | 11 | 2 | 1 | 961.03025 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 93% |
| 11 | 5.5 | 11 | 3 | 1 | 909.23825 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 88% |
| 12 | 5.5 | 11 | 4 | 1 | 840.18225 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 81% |
| 13 | 5.5 | 13 | 2 | 1 | 891.97425 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 86% |
| 14 | 5.5 | 13 | 3 | 1 | 822.918 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 80% |
| 15 | 5.5 | 13 | 4 | 1 | 753.862 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 73% |
| 16 | 5.5 | 15 | 2 | 1 | 799.89925 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 77% |
| 17 | 5.5 | 15 | 3 | 1 | 702.07025 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 68% |
| 18 | 5.5 | 15 | 4 | 1 | 656.0325 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 64% |

ตารางที่ ๑.2 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (ต่อ)

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่ราวสเปรย์ (รอบ/นาที) | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ปริมาณสารละลายเงินที่ใช้ไป (ลิตร / ชั่วโมง) | ความเร็วโรลเลอร์ (เมตร / นาที) | ระยะการวิ่งราวสเปรย์ (เมตร) | ปริมาณเงินที่ใช้ไปเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 19 | 6.5 | 11 | 2 | 1 | 1064.6145 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 87% |
| 20 | 6.5 | 11 | 3 | 1 | 1012.82225 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 83% |
| 21 | 6.5 | 11 | 4 | 1 | 966.785 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 79% |
| 22 | 6.5 | 13 | 2 | 1 | 966.785 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 79% |
| 23 | 6.5 | 13 | 3 | 1 | 903.48375 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 74% |
| 24 | 6.5 | 13 | 4 | 1 | 886.2195 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 73% |
| 25 | 6.5 | 15 | 2 | 1 | 886.22 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 73% |
| 26 | 6.5 | 15 | 3 | 1 | 817.1635 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 67% |
| 27 | 6.5 | 15 | 4 | 1 | 771.126 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 63% |
| 28 | 4.5 | 11 | 2 | 2 | 776.88075 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 92% |
| 29 | 4.5 | 11 | 3 | 2 | 713.57925 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 85% |
| 30 | 4.5 | 11 | 4 | 2 | 673.29675 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 80% |
| 31 | 4.5 | 13 | 2 | 2 | 661.78725 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 79% |
| 32 | 4.5 | 13 | 3 | 2 | 650.27775 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 77% |
| 33 | 4.5 | 13 | 4 | 2 | 609.99525 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 72% |
| 34 | 4.5 | 15 | 2 | 2 | 627.25925 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 74% |
| 35 | 4.5 | 15 | 3 | 2 | 569.7125 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 68% |
| 36 | 4.5 | 15 | 4 | 2 | 523.675 | 4.5118 | 5.9 | 2.5908 | 842.46 | 62% |

ตารางที่ จ.3 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน (ต่อ)

| สภาวะการทดลอง | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | ความถี่ราวสเปรย์ (รอบ/นาที) | ความดันของน้ำ DI (บาร์) | การทดลองซ้ำ | ปริมาณเงินบนผิวกระจกเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ปริมาณสารละลายเงินที่ใช้ไป (ลิตร / ชั่วโมง) | ความเร็วโรตเลออร์ (เมตร / นาที) | ระยะการวิ่งราวสเปรย์ (เมตร) | ปริมาณเงินที่ใช้ไปเฉลี่ย (มก/ตร.ม) | ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงิน |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 37 | 5.5 | 11 | 2 | 2 | 955.27575 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 92% |
| 38 | 5.5 | 11 | 3 | 2 | 891.97425 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 86% |
| 39 | 5.5 | 11 | 4 | 2 | 840.182 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 81% |
| 40 | 5.5 | 13 | 2 | 2 | 874.71025 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 85% |
| 41 | 5.5 | 13 | 3 | 2 | 834.4275 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 81% |
| 42 | 5.5 | 13 | 4 | 2 | 765.3715 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 74% |
| 43 | 5.5 | 15 | 2 | 2 | 753.86175 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 73% |
| 44 | 5.5 | 15 | 3 | 2 | 713.5795 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 69% |
| 45 | 5.5 | 15 | 4 | 2 | 615.75025 | 5.5321 | 5.9 | 2.5908 | 1032.96 | 60% |
| 46 | 6.5 | 11 | 2 | 2 | 1081.87825 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 89% |
| 47 | 6.5 | 11 | 3 | 2 | 1024.332 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 84% |
| 48 | 6.5 | 11 | 4 | 2 | 989.80375 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 81% |
| 49 | 6.5 | 13 | 2 | 2 | 989.80375 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 81% |
| 50 | 6.5 | 13 | 3 | 2 | 920.74775 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 75% |
| 51 | 6.5 | 13 | 4 | 2 | 863.201 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 71% |
| 52 | 6.5 | 15 | 2 | 2 | 909.23825 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 74% |
| 53 | 6.5 | 15 | 3 | 2 | 811.40875 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 66% |
| 54 | 6.5 | 15 | 4 | 2 | 748.10725 | 6.5365 | 5.9 | 2.5908 | 1220.51 | 61% |

ค่าส่วนตกค้างของผลตอบ

ตารางที่ จ.1 ค่าส่วนตกค้าง (Residual) การทดสอบค่าปริมาณเงินบนฉิวกระจก

| Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual | Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual |
|-----------|----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|-----------------|----------|
| 1 | 771.13 | 774.00 | -2.88 | 28 | 776.88 | 774.00 | 2.88 |
| 2 | 684.81 | 699.19 | -14.39 | 29 | 713.58 | 699.19 | 14.39 |
| 3 | 667.54 | 670.42 | -2.88 | 30 | 673.30 | 670.42 | 2.88 |
| 4 | 696.32 | 679.05 | 17.26 | 31 | 661.79 | 679.05 | -17.26 |
| 5 | 644.52 | 647.40 | -2.88 | 32 | 650.28 | 647.40 | 2.88 |
| 6 | 610.00 | 610.00 | 0.00 | 33 | 610.00 | 610.00 | 0.00 |
| 7 | 604.24 | 615.75 | -11.51 | 34 | 627.26 | 615.75 | 11.51 |
| 8 | 552.45 | 561.08 | -8.63 | 35 | 569.71 | 561.08 | 8.63 |
| 9 | 535.18 | 529.43 | 5.75 | 36 | 523.68 | 529.43 | -5.75 |
| 10 | 961.03 | 958.15 | 2.88 | 37 | 955.28 | 958.15 | -2.88 |
| 11 | 909.24 | 900.61 | 8.63 | 38 | 891.97 | 900.61 | -8.63 |
| 12 | 840.18 | 840.18 | 0.00 | 39 | 840.18 | 840.18 | 0.00 |
| 13 | 891.97 | 883.34 | 8.63 | 40 | 874.71 | 883.34 | -8.63 |
| 14 | 822.92 | 828.67 | -5.75 | 41 | 834.43 | 828.67 | 5.75 |
| 15 | 753.86 | 759.62 | -5.75 | 42 | 765.37 | 759.62 | 5.75 |
| 16 | 799.90 | 776.88 | 23.02 | 43 | 753.86 | 776.88 | -23.02 |
| 17 | 702.07 | 707.82 | -5.75 | 44 | 713.58 | 707.82 | 5.75 |
| 18 | 656.03 | 635.89 | 20.14 | 45 | 615.75 | 635.89 | -20.14 |
| 19 | 1064.61 | 1073.25 | -8.63 | 46 | 1081.88 | 1073.25 | 8.63 |
| 20 | 1012.82 | 1018.58 | -5.75 | 47 | 1024.33 | 1018.58 | 5.75 |
| 21 | 966.79 | 978.29 | -11.51 | 48 | 989.80 | 978.29 | 11.51 |
| 22 | 966.79 | 978.29 | -11.51 | 49 | 989.80 | 978.29 | 11.51 |
| 23 | 903.48 | 912.12 | -8.63 | 50 | 920.75 | 912.12 | 8.63 |
| 24 | 886.22 | 874.71 | 11.51 | 51 | 863.20 | 874.71 | -11.51 |
| 25 | 886.22 | 897.73 | -11.51 | 52 | 909.24 | 897.73 | 11.51 |
| 26 | 817.16 | 814.29 | 2.88 | 53 | 811.41 | 814.29 | -2.88 |
| 27 | 771.13 | 759.62 | 11.51 | 54 | 748.11 | 759.62 | -11.51 |

| Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual | Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual |
|-----------|----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|-----------------|----------|
| 1 | 79.34 | 79.80 | -0.46 | 28 | 80.26 | 79.80 | 0.46 |
| 2 | 79.87 | 79.90 | -0.03 | 29 | 79.93 | 79.90 | 0.03 |
| 3 | 79.10 | 79.75 | -0.65 | 30 | 80.41 | 79.75 | 0.65 |
| 4 | 79.89 | 79.75 | 0.14 | 31 | 79.61 | 79.75 | -0.14 |
| 5 | 80.25 | 80.00 | 0.25 | 32 | 79.76 | 80.00 | -0.25 |
| 6 | 79.15 | 79.22 | -0.07 | 33 | 79.30 | 79.22 | 0.07 |
| 7 | 79.36 | 79.59 | -0.23 | 34 | 79.82 | 79.59 | 0.23 |
| 8 | 79.03 | 79.04 | -0.01 | 35 | 79.05 | 79.04 | 0.01 |
| 9 | 78.39 | 78.89 | -0.50 | 36 | 79.39 | 78.89 | 0.50 |
| 10 | 80.96 | 81.05 | -0.09 | 37 | 81.15 | 81.05 | 0.09 |
| 11 | 80.99 | 80.73 | 0.27 | 38 | 80.46 | 80.73 | -0.27 |
| 12 | 80.52 | 80.21 | 0.31 | 39 | 79.90 | 80.21 | -0.31 |
| 13 | 81.01 | 81.15 | -0.14 | 40 | 81.30 | 81.15 | 0.14 |
| 14 | 81.12 | 81.22 | -0.09 | 41 | 81.31 | 81.22 | 0.09 |
| 15 | 80.23 | 80.37 | -0.14 | 42 | 80.52 | 80.37 | 0.14 |
| 16 | 80.51 | 80.33 | 0.19 | 43 | 80.14 | 80.33 | -0.19 |
| 17 | 80.05 | 80.49 | -0.44 | 44 | 80.93 | 80.49 | 0.44 |
| 18 | 80.07 | 80.30 | -0.23 | 45 | 80.53 | 80.30 | 0.23 |
| 19 | 80.40 | 80.70 | -0.30 | 46 | 81.00 | 80.70 | 0.30 |
| 20 | 81.51 | 81.80 | -0.29 | 47 | 82.09 | 81.80 | 0.29 |
| 21 | 80.20 | 80.88 | -0.69 | 48 | 81.57 | 80.88 | 0.69 |
| 22 | 80.86 | 80.82 | 0.04 | 49 | 80.78 | 80.82 | -0.04 |
| 23 | 81.09 | 80.99 | 0.10 | 50 | 80.88 | 80.99 | -0.10 |
| 24 | 81.02 | 81.27 | -0.25 | 51 | 81.52 | 81.27 | 0.25 |
| 25 | 81.39 | 81.49 | -0.11 | 52 | 81.60 | 81.49 | 0.11 |
| 26 | 81.18 | 81.30 | -0.12 | 53 | 81.42 | 81.30 | 0.12 |
| 27 | 80.58 | 80.36 | 0.22 | 54 | 80.15 | 80.36 | -0.22 |

ตารางที่ ๑.2 ค่าส่วนตกค้าง (Residual) การทดสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการสะท้อนแสง

| Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual | Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual |
|-----------|----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|-----------------|----------|
| 1 | 0.90 | 0.81 | 0.09 | 28 | 0.72 | 0.81 | -0.09 |
| 2 | 0.50 | 0.46 | 0.04 | 29 | 0.42 | 0.46 | -0.04 |
| 3 | 0.66 | 0.63 | 0.03 | 30 | 0.60 | 0.63 | -0.03 |
| 4 | 1.15 | 0.80 | 0.35 | 31 | 0.46 | 0.80 | -0.35 |
| 5 | 0.36 | 0.35 | 0.01 | 32 | 0.34 | 0.35 | -0.01 |
| 6 | 0.51 | 0.55 | -0.04 | 33 | 0.59 | 0.55 | 0.04 |
| 7 | 0.84 | 0.73 | 0.10 | 34 | 0.63 | 0.73 | -0.10 |
| 8 | 0.30 | 0.36 | -0.06 | 35 | 0.42 | 0.36 | 0.06 |
| 9 | 0.73 | 0.87 | -0.14 | 36 | 1.01 | 0.87 | 0.14 |
| 10 | 0.83 | 0.59 | 0.24 | 37 | 0.35 | 0.59 | -0.24 |
| 11 | 0.32 | 0.36 | -0.04 | 38 | 0.41 | 0.36 | 0.04 |
| 12 | 0.47 | 0.69 | -0.22 | 39 | 0.91 | 0.69 | 0.22 |
| 13 | 0.66 | 0.65 | 0.02 | 40 | 0.63 | 0.65 | -0.02 |
| 14 | 0.44 | 0.47 | -0.03 | 41 | 0.49 | 0.47 | 0.03 |
| 15 | 0.56 | 0.55 | 0.00 | 42 | 0.55 | 0.55 | 0.00 |
| 16 | 0.48 | 0.50 | -0.03 | 43 | 0.53 | 0.50 | 0.03 |
| 17 | 0.85 | 0.72 | 0.13 | 44 | 0.60 | 0.72 | -0.13 |
| 18 | 0.59 | 0.65 | -0.06 | 45 | 0.71 | 0.65 | 0.06 |
| 19 | 0.62 | 0.56 | 0.06 | 46 | 0.51 | 0.56 | -0.06 |
| 20 | 0.57 | 0.48 | 0.09 | 47 | 0.39 | 0.48 | -0.09 |
| 21 | 0.73 | 0.59 | 0.15 | 48 | 0.44 | 0.59 | -0.15 |
| 22 | 0.84 | 0.74 | 0.10 | 49 | 0.64 | 0.74 | -0.10 |
| 23 | 0.45 | 0.49 | -0.03 | 50 | 0.52 | 0.49 | 0.03 |
| 24 | 0.55 | 0.41 | 0.14 | 51 | 0.27 | 0.41 | -0.14 |
| 25 | 0.43 | 0.45 | -0.02 | 52 | 0.47 | 0.45 | 0.02 |
| 26 | 0.67 | 0.63 | 0.04 | 53 | 0.59 | 0.63 | -0.04 |
| 27 | 0.59 | 0.57 | 0.02 | 54 | 0.55 | 0.57 | -0.02 |

| Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual | Treatment | Observed Value | Predicted Value | Residual |
|-----------|----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|-----------------|----------|
| 1 | 91.53% | 91.87% | -0.34% | 28 | 92.22% | 91.87% | 0.34% |
| 2 | 81.29% | 82.99% | -1.71% | 29 | 84.70% | 82.99% | 1.71% |
| 3 | 79.24% | 79.58% | -0.34% | 30 | 79.92% | 79.58% | 0.34% |
| 4 | 82.65% | 80.60% | 2.05% | 31 | 78.55% | 80.60% | -2.05% |
| 5 | 76.51% | 76.85% | -0.34% | 32 | 77.19% | 76.85% | 0.34% |
| 6 | 72.41% | 72.41% | 0.00% | 33 | 72.41% | 72.41% | 0.00% |
| 7 | 71.72% | 73.09% | -1.37% | 34 | 74.46% | 73.09% | 1.37% |
| 8 | 65.58% | 66.60% | -1.02% | 35 | 67.63% | 66.60% | 1.02% |
| 9 | 63.53% | 62.84% | 0.68% | 36 | 62.16% | 62.84% | -0.68% |
| 10 | 93.04% | 92.76% | 0.28% | 37 | 92.48% | 92.76% | -0.28% |
| 11 | 88.02% | 87.19% | 0.84% | 38 | 86.35% | 87.19% | -0.84% |
| 12 | 81.34% | 81.34% | 0.00% | 39 | 81.34% | 81.34% | 0.00% |
| 13 | 86.35% | 85.52% | 0.84% | 40 | 84.68% | 85.52% | -0.84% |
| 14 | 79.67% | 80.22% | -0.56% | 41 | 80.78% | 80.22% | 0.56% |
| 15 | 72.98% | 73.54% | -0.56% | 42 | 74.09% | 73.54% | 0.56% |
| 16 | 77.44% | 75.21% | 2.23% | 43 | 72.98% | 75.21% | -2.23% |
| 17 | 67.97% | 68.52% | -0.56% | 44 | 69.08% | 68.52% | 0.56% |
| 18 | 63.51% | 61.56% | 1.95% | 45 | 59.61% | 61.56% | -1.95% |
| 19 | 87.23% | 87.93% | -0.71% | 46 | 88.64% | 87.93% | 0.71% |
| 20 | 82.98% | 83.46% | -0.47% | 47 | 83.93% | 83.46% | 0.47% |
| 21 | 79.21% | 80.15% | -0.94% | 48 | 81.10% | 80.15% | 0.94% |
| 22 | 79.21% | 80.15% | -0.94% | 49 | 81.10% | 80.15% | 0.94% |
| 23 | 74.03% | 74.73% | -0.71% | 50 | 75.44% | 74.73% | 0.71% |
| 24 | 72.61% | 71.67% | 0.94% | 51 | 70.72% | 71.67% | -0.94% |
| 25 | 72.61% | 73.55% | -0.94% | 52 | 74.50% | 73.55% | 0.94% |
| 26 | 66.95% | 66.72% | 0.24% | 53 | 66.48% | 66.72% | -0.24% |
| 27 | 63.18% | 62.24% | 0.94% | 54 | 61.29% | 62.24% | -0.94% |

ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อกำหนดระดับของปัจจัย

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นปัจจัยอัตราการจ่ายสารละลายเงิน

| สถานะ | อัตราการจ่ายสารละลายเงิน (ลิตร / ชม.) | กระจกแผ่นที่ | ค่าการสะท้อนแสง (%) | คุณสมบัติภายนอก |
|-------|---------------------------------------|--------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 2.5 | 1 | 71 | NG |
| | | 2 | 69 | NG |
| 2 | 3.5 | 1 | 75 | Good |
| | | 2 | 72 | Good |
| 3 | 4.5 | 1 | 81 | Good |
| | | 2 | 82 | Good |
| 4 | 5.5 | 1 | 84 | Good |
| | | 2 | 84 | Good |
| 5 | 6.5 | 1 | 90 | Good |
| | | 2 | 91 | Good |

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นปัจจัยความถี่การเคลื่อนที่ราวสเปร์ย์

| สถานะ | ความถี่ราวสเปร์ย์ (รอบ/นาที) | กระจกแผ่นที่ | ค่าการสะท้อนแสง (%) | คุณสมบัติภายนอก |
|-------|------------------------------|--------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 9 | 1 | 78 | NG |
| | | 2 | 81 | NG |
| 2 | 11 | 1 | 82 | Good |
| | | 2 | 82 | Good |
| 3 | 13 | 1 | 84 | Good |
| | | 2 | 83 | Good |
| 4 | 15 | 1 | 83 | Good |
| | | 2 | 84 | Good |
| 5 | 17 | 1 | 86 | Good |
| | | 2 | 85 | Good |
| 6 | 19 | 1 | 85 | Good |
| | | 2 | 84 | Good |

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบเบื้องต้นปัจจัยความดันน้ำ DI

| สถานะ | ความดันน้ำ DI (บาร์) | กระจกแผ่นที่ | ค่าการสะท้อนแสง (%) | คุณสมบัติภายนอก |
|-------|----------------------|--------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 1 | 1 | 72 | NG |
| | | 2 | 75 | NG |
| 2 | 2 | 1 | 82 | Good |
| | | 2 | 81 | Good |
| 3 | 3 | 1 | 83 | Good |
| | | 2 | 82 | Good |
| 4 | 4 | 1 | 82 | Good |
| | | 2 | 83 | Good |
| 5 | 5 | 1 | 80 | NG |
| | | 2 | 81 | NG |
| 6 | 6 | 1 | 76 | NG |
| | | 2 | 74 | NG |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิชาฉาน เวชกิจ เกิดวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง วิศวกรอาวุโส ฝ่ายวิศวกรรม บริษัท กระจกไทยอาชีพ จำกัด มหาชน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย