การลดต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวรถบรรทุก

นางสาวศศิธร ขำกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# COST REDUCTION IN THE PROCESS OF ELECTRO DEPOSITION PAINTING ON A TRUCK SURFACE

Miss Sasithorn Khumgorn

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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การลดต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวรถบรรทุก |
| โดย | นางสาวศศิธร ขำกรณ์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมอุตสาหการ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศศิธร ขำกรณ์ : การลดต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวรถบรรทุก (COST REDUCTION IN THE PROCESS OF ELECTRO DEPOSITION PAINTING ON A TRUCK SURFACE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ, หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิถีทางแห่งซิกซ์ซิกมา เพื่อปรับปรุงกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรมรถยนต์ งานวิจัยนี้ดำเนินงานตามขั้นตอน DMAIC ขั้นแรกของการปรับปรุงเริ่มจากระยะนิยามปัญหา ซึ่งเป้าหมายคือความหนาสีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 ไมครอน และต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด ในระยะการวัด ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ระบบการวัดพบว่ามีความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการเท่ากับร้อยละ 27.05 และวัดดัชนีความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ได้เท่ากับ 0.49 จากนั้นระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจส่งผลต่อค่าความหนาสีและต้นทุนทางการผลิต และจัดลำดับความสำคัญด้วยวิธีการให้คะแนนโดยทีมงาน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสีที่ได้เลือกศึกษาต่อไปได้แก่ ความเข้มข้นของสี เวลาและแรงดันไฟฟ้า ในระยะวิเคราะห์สาเหตุ ได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อทดสอบหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาสี พบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อความหนาสี ส่วนต้นทุนการผลิตคิดมาจากความเข้มข้นของสีและแรงดันไฟฟ้าเท่านั้นที่มีผลต่อต้นทุนที่เกี่ยวข้องต่อกัน ถัดมาในระยะปรับปรุงมีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาการปรับตั้งค่าปัจจัยนำเข้าเพื่อให้ค่าตอบสนองมีค่าความหนาสีที่ค่า 20 ไมครอนและต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด โดยตั้งค่าต่อไปนี้คือ ค่าความเข้มข้นสีชุบ 17.5 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 โวลต์ ในระยะการควบคุมได้มีการปรับแผนควบคุมการตั้งค่าเครื่องจักรและวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสีโดยใช้แบบฟอร์มในการตรวจสอบ และแผนภูมิ X-MR ในการติดตามตรวจสอบความคงที่ของค่าความหนาสี

หลังจากการปรับปรุง ค่าความหนาสีเฉลี่ยของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าข้อมูลเพิ่มขึ้นจาก 18.32 ไมครอน เป็น 19.76 ไมครอน และดัชนีความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$ เพิ่มขึ้นจาก 0.49 เป็น 1.47 และสามารถลดต้นทุนทางการผลิตได้ร้อยละ 4 หรือเท่ากับ 2,599,400 บาทต่อปี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570947721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: ELECTRO DEPOSITION PAINTING (EDP) / COATING THICKNESS / SIX SIGMA / COST REDUCTION / PAINT

SASITHORN KHUMGORN: COST REDUCTION IN THE PROCESS OF ELECTRO DEPOSITION PAINTING ON A TRUCK SURFACE. ADVISOR: NAPASSAVONG ROJANAROWON, Asst.Prof.Phd., pp.

This research presents the application of Six sigma method to improve Electro Deposition Painting (EDP) process in Automotive industry. This research followed the DMAIC steps. In the define phase, the project goal to have the mean EDP thickness at 20 microns with the minimal production cost was set up. In the measure phase, the measuring system was analyzed. It was found that the precision to total variation ratio was at 27.05 % and the process capability index ($C_{pk}$) of thickness was at 0.49. Then, the possible causes of thickness were brainstormed and prioritized using the criteria of the scored rank. The factors, which were selected to be studied further, were the concentration of pigment, the dipping time and the dipping voltage. In the analyze phase, the full factorial design was applied. It was found that all factors significantly affect the thickness. The production cost per unit calculation from concentration of pigment and the dipping voltages. Next, in the improve phase, the response surface design with central composite design type was conducted to specify the optimal levels of factors that offer the thickness at 20 microns and the minimal production cost. It was found that the optimal setting was at the concentration of pigment of 17.5 %solid, the dipping time of 5.5 minutes and the dipping voltage of 329 volt. In the control phase, the control plan was updated to control the setting of these three factors at the optimal levels using check sheets. Moreover, the X-MR charts were set up to monitor the stability of the thickness value. After the improvement, the mean thickness increased from 18.32 microns to 19.76 microns, the process capability index $C_{pk}$ increased from 0.49 to 1.47, and it is expected to reduce the production cost by 4 % or 2,599,400 THB per year.

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2014

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือและเสียสละเวลาในการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาสำหรับความกรุณาให้ทำการศึกษาและโอกาสให้ทำงานวิจัย รวมถึงความร่วมมือในการประชุม จัดตั้งคณะทีมงานในการให้ข้อคิดเห็นระดมสมอง เก็บข้อมูลและร่วมทำการทดลองเป็นอย่างดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**สารบัญ**

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญรูป ..... ฎ
สารบัญตาราง ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 12
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย ..... 13
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ..... 13
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ ..... 15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 16
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ..... 16
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชุบสีด้วยไฟฟ้า ..... 17
2.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชุบสีด้วยไฟฟ้า ..... 17
2.2.2 สีที่ชุบด้วยไฟฟ้า ..... 18
2.2.3 ข้อดี-ข้อเสียในการใช้สีชุบด้วยไฟฟ้า ..... 18
2.2.4 กระบวนการทำงานพื้นฐานของ EDP ..... 19
2.2.5 สิ่งสำคัญในการควบคุมระบบการชุบสีด้วยไฟฟ้า ..... 19
2.3 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ..... 20
2.3.1 ความหมายของ ซิกซ์ ซิกมา ..... 20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3.2 กระบวนการของซิกซ์ซิกมา ..... 20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 36
2.4.1 งานวิจัยที่นำซิกซ์ ซิกมา นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและแก้ปัญหา ..... 36
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าหรือการชุบสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อมาช่วยแก้ปัญหา ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอื่นๆ ..... 37
2.4.3 งานวิจัยที่ใช้วิธีการออกแบบการทดลองโดยใช้พื้นผิวผลตอบเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด ..... 39
2.4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต ..... 40
บทที่ 3 การนิยามปัญหา ..... 41
3.1 การจัดตั้งคณะทีมงาน ..... 41
3.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าบนตัวถังรถบรรทุก ..... 41
3.2.1 กระบวนการผลิตอย่างละเอียดโดยแบ่งแยกตามกลุ่มงาน ..... 41
3.2.2 แผนภาพการผลิต ..... 43
3.2.3 กำลังการผลิต ..... 44
3.3 การนิยามปัญหา ..... 45
3.4 สรุปนิยามปัญหา ..... 55
บทที่ 4 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ..... 56
4.1 บทนำ ..... 56
4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis-MSA) ..... 56
4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตรถบรรทุกในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ..... 60
4.4 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV) ..... 61
4.5 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ..... 63
4.6 สรุปผลขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ..... 66
บทที่ 5 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ..... 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

5.1 บทนำ ..... 68
5.2 การเลือกรูปแบบในการทดลอง ..... 68
5.3 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า ..... 69
5.4 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง ..... 70
5.5 การออกแบบการทดลอง ..... 78
5.6 ผลการทดลอง ..... 80
5.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ..... 81
5.8 สรุปการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ..... 86
บทที่ 6 การปรับปรุง ..... 87
6.1 บทนำ ..... 87
6.2 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง ..... 87
6.3 การออกแบบการทดลองและระดับของปัจจัยในการทดลอง ..... 87
6.4 ผลการทดลอง ..... 90
6.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง เพื่อหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม ..... 91
6.6 สรุปผลขั้นตอนการปรับปรุง ..... 103
บทที่ 7 การทดสอบยืนยันผลและการตรวจติดตามควบคุม ..... 105
7.1 การทดสอบยืนยันผล ..... 105
7.2 การตรวจติดตามควบคุม ..... 111
7.3 การประยุกต์ใช้แผนควบคุม ..... 113
7.4 แผนปฏิบัติการแก้ไขเมื่อพบค่าความหนาสีเฉลี่ยต่อรถ 1 คัน ออกนอกค่าควบคุม (Out of Control Action Plan หรือ OCAP) ..... 115
7.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผลและการตรวจติดตามควบคุม ..... 116
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ..... 117

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

8.1 สรุประยะนิยามปัญหา ..... 117
8.2 สรุประยะการวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหา ..... 117
8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ..... 119
8.4 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ ..... 120
8.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผล และการตรวจติดตามควบคุม ..... 121
8.6 ข้อจำกัดในงานวิจัย ..... 121
8.7 ข้อเสนอแนะ ..... 122
รายการอ้างอิง ..... 123
ภาคผนวก ..... 125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 129

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 สัดส่วนต้นทุนทางการผลิต ..... 1
รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตรถบรรทุก ..... 2
รูปที่ 1.3 กราฟพาเรโตแสดงมูลค่าการสูญเสียจากข้อบกพร่องแต่ละประเภท ..... 4
รูปที่ 1.4 ปริมาณการผลิตรถบรรทุกในช่วงเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2556 ..... 5
รูปที่ 1.5 จุดวัดความหนาฟิล์มบนตัวรถ ..... 6
รูปที่ 1.6 กราฟต้นทุนทางการผลิตของกระบวนการทำสีเฉลี่ยต่อคันเทียบกับค่าเป้าหมายของค่าสีรถแต่ละคันในแต่ละเดือน ..... 8
รูปที่ 1.7 ความหนาฟิล์มที่พื้นที่ต่างๆบนผิวตัวถังรถบรรทุก ..... 9
รูปที่ 1.8 ความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการชุบสีปัจจุบัน ..... 11
รูปที่ 1.9 ความหนาสีรวมบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการพ่นสีปัจจุบัน . 11
รูปที่ 1.10 ความหนาสีที่พ่นบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการพ่นสีปัจจุบัน ..... 12
รูปที่ 2.1 แบบจำลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ..... 16
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการจำลองชุบตัวถังรถยนต์ด้วยระบบชุบสีด้วยไฟฟ้า (EDP) ..... 17
รูปที่ 2.3 กระบวนการพื้นฐานของ EDP ..... 19
รูปที่ 2.4 แบบทดลองทั่วไปสำหรับกระบวนการ ..... 24
รูปที่ 2.5 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ ..... 30
รูปที่ 2.6 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ ..... 30
รูปที่ 2.7 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ ..... 32
รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน แบบสามตัวแปร ..... 33
รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ k=2 และ k=3 ..... 34

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของกระบวนการ EDP ของรถรุ่น FML2 ..... 44
รูปที่ 3.2 ข้อบกพร่องตั้งแต่เดือน มกราคม 2557 – มิถุนายน 2557 ..... 46
รูปที่ 3.3 การสูญเสียต้นทุนทางการผลิตในแต่ละชนิดของข้อบกพร่อง ..... 47
รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา ..... 48
รูปที่ 3.5 ลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหาที่มีผลต่อความหนาฟิล์ม ..... 49
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์การสร้างฟิล์มของสี ..... 51
รูปที่ 3.7 Project Charter ที่มีส่วนร่วมในการวิจัย ..... 54
รูปที่ 4.1 เครื่องมือวัด Digital Coating Thickness Gauge ..... 57
รูปที่ 4.2 การทบทวนข้อมูลระบบการวัดค่าความหนาสีของกระบวนการ EDP ..... 60
รูปที่ 4.3 แผนภูมิแท่งเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าความหนาสีในกระบวนการ EDP ..... 64
รูปที่ 5.1 เครื่องวัดความหนาสี ยี่ห้อ Phynix Germany รุ่น Surfix F (Basic) ..... 70
รูปที่ 5.2 การนำเครื่อง Coating Thickness Gauge วัดบนผิวชิ้นงาน ..... 71
รูปที่ 5.3 รายละเอียดการออกแบบการทดลองความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ที่มีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ..... 79
รูปที่ 5.4 การทดสอบสมติฐานของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ความหนาสี ..... 82
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล ความหนาสี ..... 83
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ความหนาสี ..... 84
รูปที่ 5.7 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาสี ..... 85
รูปที่ 6.1 การทดสอบสมติฐานของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ความหนาสี ..... 92
รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล ความหนาสี ..... 93
รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ความหนาสี ..... 94
รูปที่ 6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อปรับปรุงความหนาสี ..... 95
รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบ Stepwise Regression ของความหนาสี ..... 97
รูปที่ 6.6 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ความหนาสี ..... 98

รูปที่ 6.7 Contour Plot ที่มีผลต่อความหนาสี ..... 98
รูปที่ 6.8 Contour Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต ..... 99
รูปที่ 6.9 ผลลัพธ์แสดงค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้สมการจาก Stepwise Regression ..... 100
รูปที่ 6.10 ค่าความหนาสีที่ค่าเป้าหมาย 20 ไมครอนและต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด ..... 101
รูปที่ 6.11 ผลลัพธ์แสดงค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้สมการจาก full model ..... 101
รูปที่ 6.12 ค่าความหนาสีที่ค่าเป้าหมาย 20 ไมครอนและต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด ..... 102
รูปที่ 7.1 ความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการชุบสีหลังการปรับปรุง ..... 108
รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ก่อนและหลังการปรับปรุง ..... 109
รูปที่ 7.3 แผนควบคุม X-MR ของค่าความหนาสีในกระบวนการชุบ EDP ..... 114
รูปที่ 7.4 แผนปฏิบัติการแก้ไขเมื่อค่าความหนาสีเฉลี่ยออกนอกค่าควบคุม ..... 116

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ข้อบกพร่องของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและมูลค่าการสูญเสียจากการผลิต ..... 4

ตารางที่ 1.2 ค่ามาตรฐานของความหนาฟิล์มของสีและต้นทุนค่าสีที่ค่ามาตรฐาน ..... 7

ตารางที่ 1.3 ต้นทุนทางการผลิตค่าสีที่เพิ่มขึ้น เมื่อสี EDP ต่ำกว่ามาตรฐาน ..... 7

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ One-way ANOVA ..... 27

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับการทดลองแบบสุ่มในบล็อก ..... 28

ตารางที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน แบบสามตัวแปร ..... 33

ตารางที่ 3.1 การจัดลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหา ..... 49

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์ม อ้างอิงข้อมูลจาก BASF The Chemical Company ..... 51

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบปัจจัยค่าปัจจุบันกับค่าในการทดลองที่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต ..... 52

ตารางที่ 3.4 ผลของสภาวะการทำงานของ 3 ปัจจัยที่มีต่อความหนาสี ..... 52

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหนาสีชิ้นงานบนตัวรถในการวิเคราะห์ความแม่นของเครื่องมือวัด ..... 58

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดความหนาสีด้วยเครื่อง Coating Thickness ... 59

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแบบ $2^k$ Full Factorial Design ..... 69

ตารางที่ 5.2 ราคาวัตถุดิบของสีที่ใช้ในการชุบ ..... 72

ตารางที่ 5.3 การคำนวณต้นทุนการผลิตของสีที่ใช้ในการชุบ ..... 72

ตารางที่ 5.4 ค่าใช้จ่ายในการผลิตรถ 1 คัน ..... 73

ตารางที่ 5.5 กำลังการผลิตรถที่เวลาต่างๆ ..... 74

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนค่าไฟฟ้าของเครื่อง Rectify ..... 75

ตารางที่ 5.7 กำลังไฟฟ้าที่แรงดันระดับต่างๆ ..... 76

ตารางที่ 5.8 ต้นทุนในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ ..... 76

ตารางที่ 5.9 แสดงต้นทุนการผลิตที่เกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละระดับ ..... 77
ตารางที่ 5.10 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) ของความหนาสี ..... 80
ตารางที่ 5.11 ระดับการทดลองในแต่ละปัจจัย ..... 80
ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองความหนาสีและต้นทุนการผลิต ..... 81
ตารางที่ 6.1 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) แบบ CCD ..... 88
ตารางที่ 6.2 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ..... 89
ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองของค่าความหนาสีและต้นทุนที่เกี่ยวข้องที่แต่ละสภาวะการทดลอง ..... 91
ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของ full model และ stepwise regression model ..... 102
ตารางที่ 6.5 ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า ความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า . 103
ตารางที่ 7.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำการปรับปรุง ..... 105
ตารางที่ 7.2 สภาวะการทำงานของทั้ง 3 ปัจจัยก่อนและหลังการปรับปรุง ..... 109
ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบต้นทุนทางการผลิตของแต่ละปัจจัยก่อนและหลังการปรับปรุง ..... 110
ตารางที่ 7.4 แบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าเวลาและแรงดันไฟฟ้าของรถทุกคัน ..... 112
ตารางที่ 7.5 แบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าความเข้มข้นสีในแต่ละเดือน ..... 113
ตารางที่ 7.6 แผนภูมิควบคุมกระบวนการชุบสี EDP ในรถรุ่น FML2 ..... 115

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

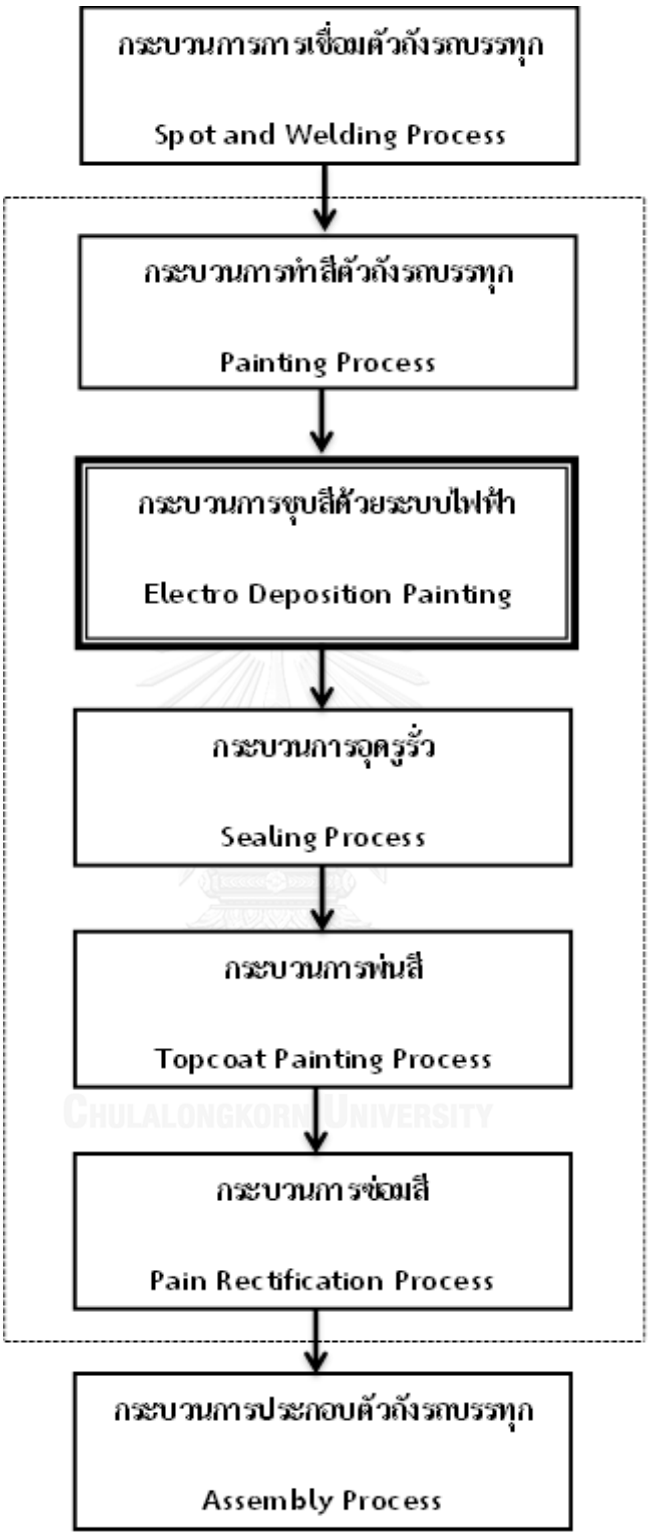
# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ดังนั้น ผู้ประกอบการทางยานยนต์จึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพ และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ รวมทั้งสร้างความเชื่อมั่นและความมั่นใจต่อลูกค้าว่าจะได้รับมอบรถที่ดีมีคุณภาพ จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ประกอบการทางยานยนต์

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกโรงงานผลิตรถบรรทุกแห่งหนึ่งเป็นกรณีศึกษา จากการศึกษาอุตสาหกรรมยานยนต์พบว่า กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับสีนั้น เป็นกระบวนการเน้นความสวยงาม คงทนต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงมีกระบวนการผลิตที่ละเอียด ต้องมีเทคนิคทางคุณภาพมากกว่ากระบวนการเชื่อมตัวถังและการประกอบ ซึ่งต้นทุนทางการผลิตของการทำสีคิดเป็น 60% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด การประกอบคิดเป็น 26% และกระบวนการเชื่อมตัวถังคิดเป็น 14% ดังแสดงในรูปที่ 1.1 รวมทั้งยังมีปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมในกระบวนการผลิตที่มาก เพราะต้องมีอุปกรณ์เชิงเทคนิคและเฉพาะทางกระบวนการทำสีจึงมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ถ้าเกิดปัญหาในกระบวนการทำสีที่ส่งผลต่อด้านคุณภาพของตัวรถ จะก่อให้เกิดผลเสียต่อลูกค้าทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เช่น การเกิดสนิม การไม่ทนต่อการกัดกรอนต่อสารเคมี สีลอกหรือสีล่อน ลักษณะของสีไม่สวยงาม เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาในกระบวนการทำสี ซึ่งมีกระบวนการผลิตดังรูปที่ 1.2

รูปที่ 1.1 สัดส่วนต้นทุนทางการผลิต




รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตรถบรรทุก

กระบวนการผลิตรถบรรทุก มีกระบวนการผลิตหลัก 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการเชื่อมตัวถังรถบรรทุก (Spot and Welding) กระบวนการทำสีตัวถังรถบรรทุก (Painting) และกระบวนการประกอบรถบรรทุก (Assembly) โดยมีรายละเอียดกระบวนการผลิตดังนี้

1. กระบวนการเชื่อมตัวถังรถบรรทุก (Spot and Welding) คือ กระบวนการที่ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ จนเป็นตัวถังรถบรรทุก ด้วยวิธีการเชื่อม

2. กระบวนการทำสีตัวถังรถบรรทุก (Painting) มีกระบวนการหลักทั้งหมด 4 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดการผลิตดังนี้

1) กระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า (Electro Deposition Painting) คือ กระบวนการชุบสีบนตัวถังรถบรรทุก ด้วยไฟฟ้า เพื่อป้องกันสนิมและความสวยงาม รวมทั้งป้องกันต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมี

2) กระบวนการอุดรูรั่ว (Sealing) คือ กระบวนการที่อุดรูรั่ว ตามขอบหรือตำแหน่งต่างๆ บนตัวถังรถบรรทุก เพื่อป้องกันน้ำรั่ว

3) กระบวนการพ่นสี (Painting) คือ กระบวนการที่นำสีมาพ่นบนตัวถังรถบรรทุก เพื่อความสวยงาม และทนทานต่อสารเคมี

4) กระบวนการซ่อมสี (Paint Rectification) คือ กระบวนการที่ซ่อมปัญหาสีบนผิวรถบรรทุก เพื่อความสวยงามและความพึงพอใจต่อลูกค้า

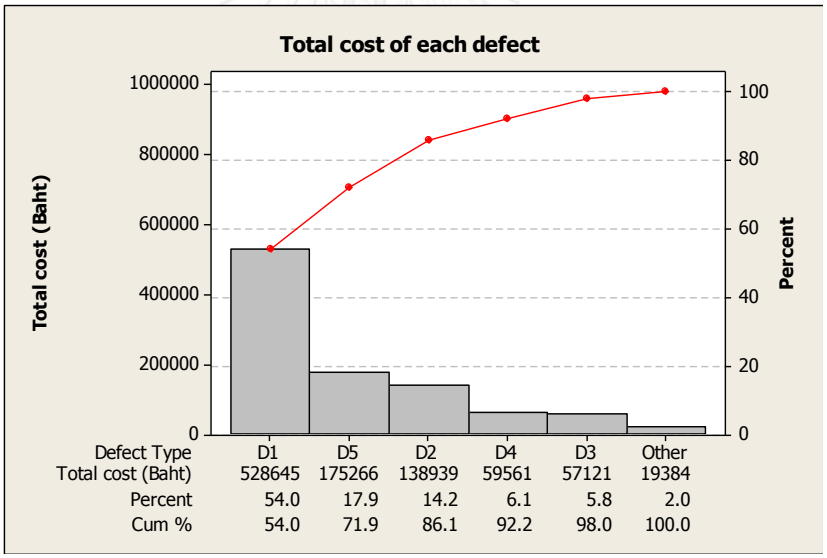
3. กระบวนการประกอบ (Assembly) คือ กระบวนการประกอบตัวถังรถบรรทุกเข้ากับแชสซี Chassis

จากการศึกษากระบวนการทำสี มีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ การชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า การอุดรูรั่ว การพ่นสีและการซ่อมสี พบว่าสภาพปัญหาปัจจุบันในกระบวนการทำสี ในขั้นตอนการชุบสีด้วยไฟฟ้านั้นมีปัญหาและส่งผลกระทบต่อคุณภาพและการผลิตมากที่สุด ซึ่งปัญหาในกระบวนการชุบสีมีดังตารางที่ 1.1 พร้อมทั้งแสดงมูลค่าการสูญเสียจากกระบวนการผลิต

ตารางที่ 1.1 ข้อบกพร่องของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและมูลค่าการสูญเสียจากการผลิต

| ลำดับ | ชนิด | ข้อบกพร่อง | ความวิกฤตเชิงต้นทุน(บาท) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | มูลค่าการสูญเสียจากกระบวนการผลิต | มูลค่าของเสียจากการร้องเรียนของลูกค้า | รวม |
| 1 | D1 | ความหนาฟิล์มไม่ได้ค่ากลางที่ 20 ไมครอนตามมาตรฐานของโรงงาน | 528,645 | - | 528,645 |
| 2 | D2 | สีชุบไม่ติดบริเวณใต้หลังคารถ | 138,939 | - | 138,939 |
| 3 | D3 | สีชุบเป็นหลุมบนตัวรถ | 57,121 | - | 57,121 |
| 4 | D4 | สีชุบไหลตามรูน็อตของรถบรรทุก | 59,561 | - | 59,561 |
| 5 | D5 | เม็ดเหล็กบนผิวสีชุบติดตามตะเข็บหลังคารถ | 175,266 | - | 175,266 |
| 6 | D6 | ขี้สีชุบติดตามตะเข็บหลังคารถ | 19,384 | - | 19,384 |

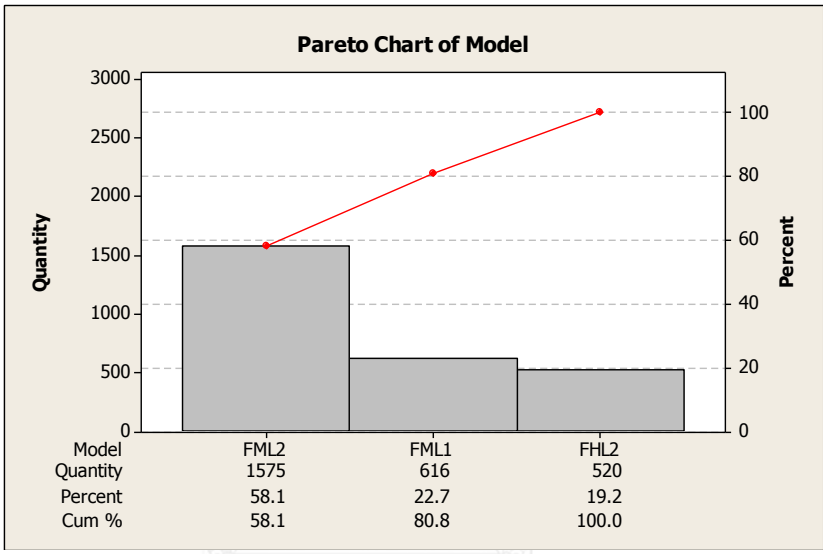
ลำดับของมูลค่าของเสียจากตารางที่ 1.1 สามารถแสดงในกราฟพาเรโตดังรูปที่ 1.3




รูปที่ 1.3 กราฟพาเรโตแสดงมูลค่าการสูญเสียจากข้อบกพร่องแต่ละประเภท

ดังนั้นจากรูปที่ 1.3 พบว่าปัญหาที่ก่อให้เกิดมูลค่าความสูญเสียมากที่สุดคือ D1 ความหนาฟิล์มไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 20 ไมครอน ซึ่งคิดเป็น 54% ของมูลค่าความสูญเสียทั้งหมดต่อคุณภาพในกระบวนการพ่นสีและมีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากที่สุด ส่วนปัญหารองลงมาคือ D5 เม็ดเหล็กบนผิวสีชุบติดตามตะเข็บหลังคารถ ไม่นำมาปรับปรุงเนื่องจากไม่อยู่ในขอบเขตของ

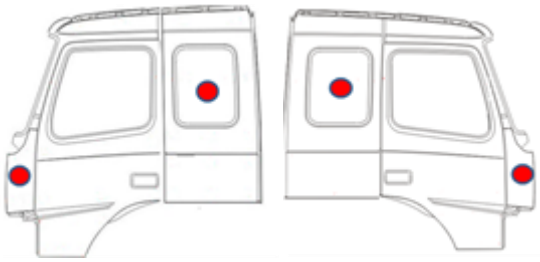
กระบวนการที่ผู้วิจัยศึกษา ซึ่งขึ้นกับความรับผิดชอบของกระบวนการเชื่อมตัวถังรถบรรทุก ดังนั้น ผู้วิจัยสนใจที่จะแก้ปัญหา D1 จึงได้เลือกรถบรรทุกที่มียอดปริมาณการผลิตที่มากที่สุดและมีปริมาณการผลิตตลอดทั้งปี คือ รถบรรทุกรุ่น FML2 ซึ่งมียอดปริมาณการผลิตเท่ากับ 1,575 คันต่อปีจากปริมาณการผลิตรถบรรทุกทั้งหมดคือ 2,711 คันต่อปี ซึ่งคิดเป็น 58% ของปริมาณการผลิตรถทั้งหมด ส่วนปริมาณการผลิตที่รองลงมาคือ รถรุ่น FML1 ที่ไม่นำมาศึกษาเพราะว่ามีปริมาณการผลิตที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษารถรุ่น FML2 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4



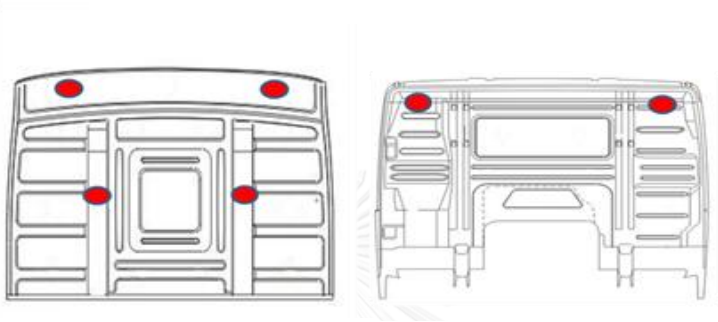

รูปที่ 1.4 ปริมาณการผลิตรถบรรทุกในช่วงเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการที่กล่าวถึงข้างต้นในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้านั้น มีปัญหาในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาสภาพปัญหา พบว่าความหนาสีที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุกมีค่าที่ไม่แน่นอน คือรถแต่ละคันมีความหนาของสีที่ไม่เท่ากัน และแต่ละจุดในรถคันเดียวกันมีความหนาของสีที่ไม่เท่ากัน ไม่อยู่ในค่ากลางที่กำหนดไว้ คือค่าความหนาสีเฉลี่ยไม่เท่าค่าเป้าหมายคือ 20 ไมครอน ซึ่งวิธีการวัดความหนาเฉลี่ยสามารถทำได้โดยการวัดความหนาของสีบนตัวถังจำนวน 10 จุด ดังนี้ หลังคา (Roof) ด้านหลัง (Rear wall) ด้านข้างซ้าย (Cab Left Sides) ด้านข้างขวา (Cab Right Sides) และด้านหน้า (Front) แสดงจุดวัดความหนาของสีบนตัวรถแต่ละจุด รูปที่ 1.5



จุดวัดความหนาฟิลม์ด้านข้างทั้งซ้ายและขวา
ด้านละ 2 จุด รวม 4 จุด



จุดวัดความหนาฟิลม์หลังคา 4 จุดวัดความหนาฟิลม์หลัง 2 จุด

รูปที่ 1.5 จุดวัดความหนาฟิล์มบนตัวรถ

ความหนาสีจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากตัวถังรถบรรทุกเป็นชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็ก ถ้ามีค่าความหนาสีที่ต่ำกว่ามาตรฐาน จะส่งผลคือ จะไม่ทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมี เกิดสนิม และผิวไม่เรียบ มีรอยแหว่ง ถ้ามีความหนาสีที่เกินกว่ามาตรฐาน จะสิ้นเปลืองการใช้สีในการชุบ เพราะสีมีราคาแพง และผิวฟิล์มจะไม่สวยงาม ไม่เรียบ แล้วยังจะส่งผลกระทบไปยังกระบวนการพ่นสีถัดไปคือ ถ้าความหนาสีได้ต่ำกว่ามาตรฐานจะทำให้สิ้นเปลืองสีที่ใช้ในกระบวนการพ่น เนื่องจากต้องทำให้ความหนารวมได้ตามกำหนด และถ้าความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้ามากเกินมาตรฐานก็จะทำให้สิ้นเปลืองสีที่ใช้ในการชุบที่จะใช้มากเกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการ ก็จะทำให้เพิ่มต้นทุนทางการผลิต ตารางที่ 1.2 แสดงต้นทุนค่าสีที่ค่าความหนามาตรฐาน

ตารางที่ 1.2 ค่ามาตรฐานของความหนาฟิล์มของสีและต้นทุนค่าสีที่ค่ามาตรฐาน

| ชั้นสี | ความหนาสี (ไมครอน/คัน) ค่าที่ควบคุมตามข้อกำหนด | ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย (ไมครอน/คัน) | ต้นทุนค่าสีที่ค่ามาตรฐาน (บาท/คัน) |
|---|---|---|---|
| สี EDP | 17 - 23 | 20 | 888 |
| สีพ่น | $\geq$ 60 | 60 | 11,700 |
| สีรวม | $\geq$ 80 | 80 | 12,588 |

ผู้วิจัยขอแสดงการคำนวณการสิ้นเปลืองการใช้สีดังนี้

จากข้อมูลจริงในปัจจุบันปี 2555 - 2556 ความหนาฟิล์มเฉลี่ยในกระบวนการชุบสี EDP เท่ากับ 18 ไมครอน ซึ่งต่ำกว่าค่าเป้าหมายคือ 20 ไมครอน ดังนั้นต้องพ่นสีเพิ่มในกระบวนการพ่นสีอีก 2 ไมครอนรวม 62 ไมครอน เพื่อให้ความหนาของสีรวมอยู่ในมาตรฐานเท่ากับ 80 ไมครอน

โดย ถ้าต้องการความหนาสีพ่นเพิ่มขึ้น 1 ไมครอนต้องใช้ปริมาณสี 0.13 ลิตรต่อรถ 1 คัน เมื่อราคาสี 1,500 บาทต่อลิตร

ราคาต้นทุนที่ต้องใช้ในการพ่นสีความหนาเพิ่ม 1 ไมครอน = 0.13 ลิตร *1,500 บาท/ลิตร

= 195 บาทต่อคัน

ต้นทุนทางการพ่นสีแสดงในตารางที่ 1.3

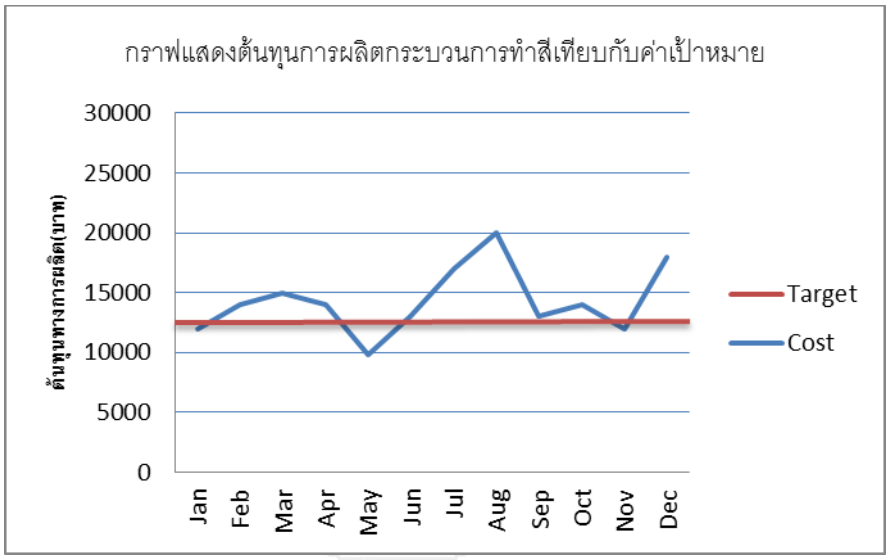
ตารางที่ 1.3 ต้นทุนทางการผลิตค่าสีที่เพิ่มขึ้น เมื่อสี EDP ต่ำกว่ามาตรฐาน

| ชั้นสี | ความหนาฟิล์ม (ไมครอน/คัน) ค่าที่ควบคุมตามข้อกำหนด | ค่าที่ได้ (ไมครอน/คัน) | ต้นทุนทางการผลิต (บาท/คัน) |
|---|---|---|---|
| สี EDP | 17 - 23 | 18 | 799 |
| สีพ่น | $\geq$ 60 | 60 | 11,700 |
| สีรวม | $\geq$ 80 | 78 | 12,499 |
| พ่นสีเพิ่ม | - | 2 | 390 |
| รวม | | | 12,889 |

จากตารางที่ 1.3 แสดงว่าถ้าค่าความหนาฟิล์มต่ำกว่ามาตรฐานโดยมีค่าเท่ากับ 18 ไมครอน จะต้องพ่นสีเพิ่มด้วยความหนาอีก 2 ไมครอน เพื่อให้ได้ความหนารวมเท่ากับ 80 ไมครอน ทำให้ต้นทุนทางการผลิตค่าสีทุกที่เพิ่มขึ้น 390 บาทต่อคัน ทำให้ต้นทุนทางการผลิตเป็น 25,388 บาทต่อคัน

เมื่อคิดจากปริมาณการผลิตรถต่อปีคือ 2,711 คัน จะทำให้ต้องสูญเสียเงินจากปริมาณการพ่นสีเพิ่มคิดเป็น 1,057,290 บาทต่อปี

ต้นทุนในกระบวนการทำสี มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความหนาสีเฉลี่ยในแต่ละชั้นที่ทำได้ ดังจะแสดงต้นทุนในแต่ละเดือนแสดงดังรูปที่ 1.6 โดยจะเห็นว่าส่วนใหญ่ต้นทุนค่าสีมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนเป้าหมายที่โรงงานกำหนดไว้

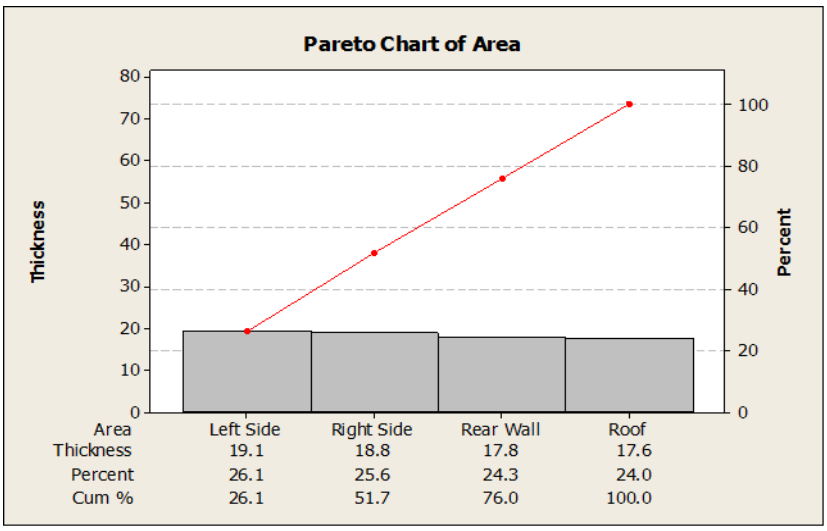



รูปที่ 1.6 กราฟต้นทุนทางการผลิตของกระบวนการทำสีเฉลี่ยต่อคันเทียบกับค่าเป้าหมายของค่าสีรถแต่ละคันในแต่ละเดือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ต้นทุนทางการผลิตของกระบวนการชุบสีและพ่นสีคิดเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ของกระบวนการทำสีทั้งหมด ต้นทุนการผลิตที่มีผลน้อยคือ การซีลอุดรอยรั่ว และการซ่อมสี

เมื่อพิจารณาจากสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุก พบว่า ค่าความหนาฟิล์มที่หลังผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า มีความหนาฟิล์มไม่แน่นอน คือไม่อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 20 ไมครอน ตามที่โรงงานกำหนดไว้ จากการศึกษาข้อมูลความหนาฟิล์มแต่ละด้านของผิวตัวถังรถบรรทุกมีดังนี้คือ ด้านหลังคารถ (ROOF) ด้านหลังของตัวรถ (REAR WALL) ด้านข้างของตัวรถด้านซ้าย (CAB LEFT SIDE) ด้านข้างของตัวรถด้านขวา (CAB RIGHT SIDE) ซึ่งพบว่าค่าความหนาฟิล์มที่หลังจากผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าด้านหลังคาของตัวรถมีค่าต่ำสุดและมีมูลค่าสูญเสียทางต้นทุนมากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่มากที่สุด รองลงมาคือ ด้านหลังของตัวรถ ด้านขวาของตัวรถและด้านซ้าย ซึ่งดูค่าความหนาฟิล์มโดยรวมของแต่ละด้านแล้วไม่แตกต่างกันมากนัก ดูข้อมูลได้ดังรูปภาพที่ 1.7




รูปที่ 1.7 ความหนาฟิล์มที่พื้นที่ต่างๆบนผิวตัวถังรถบรรทุก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาความหนาฟิล์มที่หลังจากผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า บริเวณด้านหลังคารถมาศึกษา รวมถึงยังมีปัญหาเกี่ยวกับการกำหนดสภาวะการทำงานในหลายปัจจัยที่ยังไม่แน่นอน การควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการชุบที่ยังไม่เหมาะสม จึงทำให้ได้ค่าความหนาฟิล์มที่หลังจากผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18 ไมครอน ซึ่งค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 20 ไมครอน ปัญหาดังกล่าวจึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการถัดไปคือกระบวนการพ่นสี ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เหตุนี้โรงงานกรณีศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุก โดยได้มอบหมายให้ผู้วิจัยทำการศึกษาถึงการกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าที่ให้ได้ค่าความหนาสีเท่ากับ 20 ไมครอน ในการให้ได้ค่าความหนาที่ 20 ไมครอน มีหลายการตั้งค่าสภาวะปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าที่ 20 ไมครอนเท่ากัน แต่สภาวะเหล่านั้นให้ต้นทุนที่ต่างกัน เช่น ที่ความเข้มข้นและแรงดันต่างกันให้ค่าที่ 20 ไมครอนเท่ากันได้ แต่ต้นทุนการผลิตต่างกัน ดังนั้นจะหาสภาวะที่ให้ต้นทุนที่เกี่ยวข้องต่ำที่สุด

จากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถของกระบวนการ เพื่อทราบถึงความผันแปรของความหนาฟิล์มของสี EDP เมื่อเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (Specification limits) และจะใช้ค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) เป็นดัชนีความสามารถของกระบวนการผลิตในเรื่องของค่าความหนาสี EDP ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. หาขนาดตัวอย่างในการประเมินความสามารถของกระบวนการซึ่งวัดโดยค่า ( $C_{pk}$ ) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP ใช้วิธีการคำนวณดังสมการที่ 1-1 อ้างอิงจาก [1]

$$n = z_{\alpha}^{2}\left(1/9\hat{C}_{pk}^{2}\right) + 0.5/(1 - C_{pk}/\hat{C}_{pk})^{2} \qquad (1\text{-}1)$$

n คือ ขนาดตัวอย่าง

$Z_{\alpha}$ คือ ค่าปกติมาตรฐานที่ได้จากตารางการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น (1-$\alpha$) % ในที่นี้กำหนดระดับ $\alpha$ เท่ากับ .05 ซึ่งได้ผลเท่ากับ ($Z_{0.05}$ = -1.64)

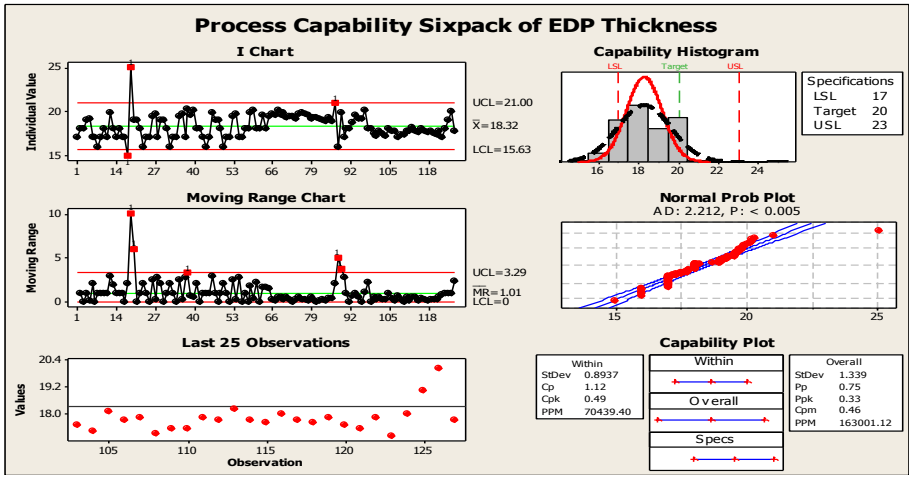
$\hat{C}_{pk}^{2}$ คือ ค่าประมาณ $C_{pk}$ ของกระบวนการ ซึ่งจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้น พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.61 จากการเก็บตัวอย่างข้อมูลมาจำนวน 100 ข้อมูล

$Cpk/\hat{C}\mathrm{pk}$ คือ สัดส่วนของค่าความสามารถของกระบวนการที่แท้จริงต่อความสามารถของกระบวนการที่ได้จากการ ประมาณการจากขนาดตัวอย่าง ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.9

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่าขนาดตัวอย่างในการประมาณการค่าความสามารถของกระบวนการดังนี้ $n = ( -1.64)^{2} \times ((1/9 \times 1.61^{2})) + 0.5)/ (1 - 0.9)^{2} = 128$

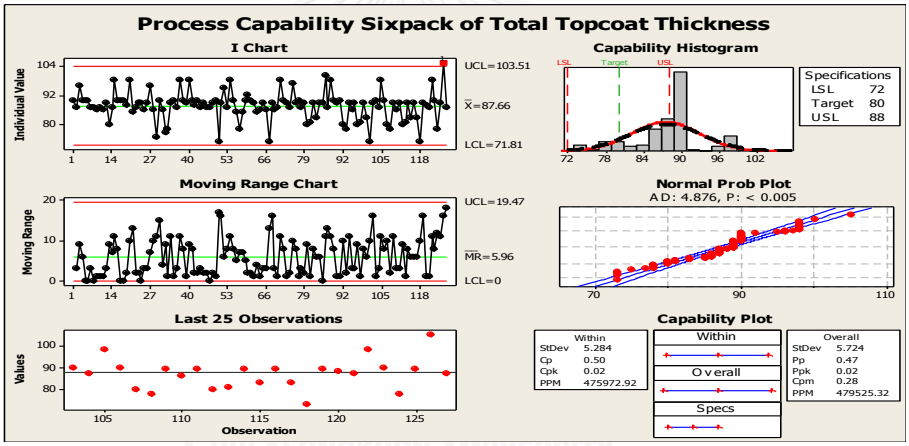
ดังนั้นจะได้ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้คือ 128 ข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณดัชนีความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$

2. ทำการเก็บจำนวนข้อมูล 128 ข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษา แล้วนำมาคำนวณดัชนีความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$ ในเรื่องความหนาสีชุบ EDP นำข้อมูลมาพล็อตกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ความหนาสีรวม ดังแสดงในรูปที่ 1.9 และความหนาสีพ่น ดังแสดงในรูปที่ 1.10 ตามลำดับ



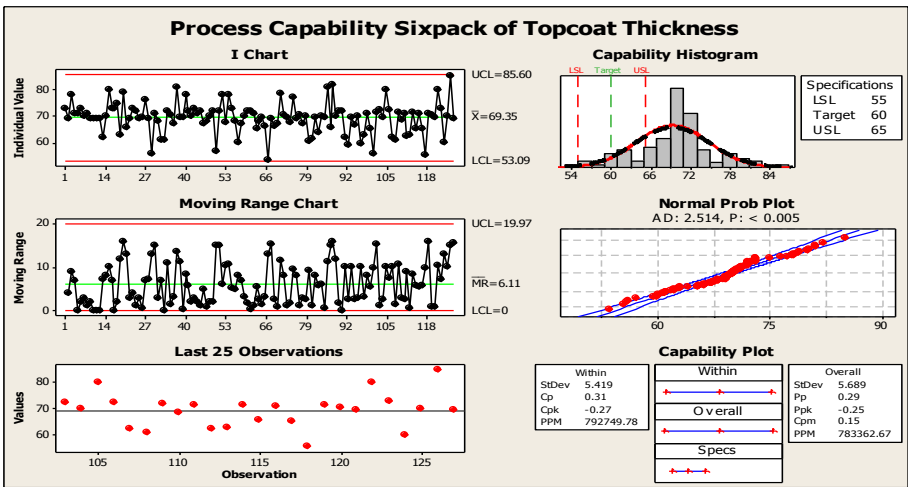
รูปที่ 1.8 ความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการชุบสีปัจจุบัน

จากรูปที่ 1.8 พบว่าข้อมูลความหนาสี ไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ อีกทั้งยังมีสภาวะออกนอกการควบคุม (out-of-control) ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถ จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการตามที่กล่าวมา จากค่า $C_p$ = 1.12 ที่น้อยกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีปัญหาในเรื่องความผันแปรที่มากเกินไป และจากค่า $C_{pk}$ = 0.49 ที่แตกต่างจากค่า $C_p$ อย่างเห็นได้ชัด แสดงว่ากระบวนการมีปัญหาในเรื่องค่าเฉลี่ยที่เบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมาย ฉะนั้นจึงควรปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มค่า $C_{pk}$ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้ความหนาฟิล์มตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้และให้ความผันแปรลดลง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนทางการผลิตลง




รูปที่ 1.9 ความหนาสีรวมบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการพ่นสีปัจจุบัน

จากรูปที่ 1.9 พบว่าข้อมูลค่าความหนารวมของชั้นสีเฉลี่ยหลังจากผ่านกระบวนการพ่นสีเท่ากับ 88 ไมครอน ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ความหนารวมของสีต้องไม่ต่ำกว่าค่าเท่ากับ 80 ไมครอน ซึ่งค่าความหนาสี 88 ไมครอนเป็นค่าที่มากเกินความจำเป็นทำให้เปลืองต้นทุน แต่จากข้อมูลพบว่าไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ อีกทั้งยังมีสภาวะออกนอกการควบคุม (out-of-control) ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีรวมมีค่าเท่ากับ 0.03 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถ และจากค่า $C_p$ = 0.50 ที่น้อยกว่า 1.33 แสดงว่ากระบวนการมีปัญหาเรื่องความผันแปรมากเกินไป และจากค่า $C_{pk}$ = 0.02 ที่แตกต่างจากค่า $C_p$ อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาที่กระบวนการชุบสี EDP ให้ได้ความหนาสีที่ค่ามาตรฐานตามที่กล่าวมา เพื่อช่วยควบคุมกระบวนการพ่นสีรวมให้ดีขึ้นและให้ความผันแปรลดลง รวมทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต




รูปที่ 1.10 ความหนาสีที่พ่นบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการพ่นสีปัจจุบัน

จากรูปที่ 1.10 พบว่าข้อมูลความหนาสีพ่น ไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ อีกทั้งยังมีสภาวะออกนอกการควบคุม (out-of-control) ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีพ่นมีค่าเท่ากับ -0.27 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 $C_{pk}$ มีค่าติดลบเพราะว่าค่าเฉลี่ยมีค่ามากกว่า upper specification limit หมายความว่า พ่นที่ความหนาเกินที่ต้องการไปมาก แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถ จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการ EDP ตามที่กล่าวมา จากค่า $C_p$ = 0.31 ที่น้อยกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีปัญหาในเรื่องความผันแปรที่มากเกินไป และจากค่า $C_{pk}$ = -0.27 ที่แตกต่างจากค่า $C_p$ อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งถ้าดูข้อมูลสีพ่นอย่างเดียวตามรูปที่ 3-4 ความหนาสีขั้นต่ำอยู่ที่ 55 ไมครอน ซึ่งความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 69 ไมครอน ซึ่งเกินมาตรฐานและทำให้สิ้นเปลืองสีจากการพ่นมากเกินความจำเป็น ความหนาของสี EDP นั้นต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงต้องมาพ่นความหนาของสีเพิ่มที่กระบวนการพ่นสี Topcoat เพื่อให้ความหนาสีรวมได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผู้วิจัยยังจะไม่ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีเนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงสูง เนื่องจากการปรับปรุงจะเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรและสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปรับปรุงกระบวนการชุบสี EDP ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพราะไม่ต้องมีการลงทุนมาก สามารถปรับปรุงจากเครื่องจักรและวิธีการทำงานที่มีอยู่ การปรับปรุงจึงจะสามารถช่วยให้ความผันแปรลดลงและยังช่วยลดต้นทุนทางการผลิตได้ด้วย รายละเอียดของนิยามของปัญหาจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 3

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า (EDP Painting) บนผิวตัวถังรถบรรทุก

2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า เพื่อให้ได้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ในเรื่องความหนาฟิล์มสูงขึ้น และเพื่อให้ได้สภาวะต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำลงสำหรับกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า

**1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย**

1. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าของรถบรรทุกรุ่น FML2 เท่านั้น

2. การคำนึงถึงต้นทุนในการผลิตเพื่อให้ได้ความหนาฟิล์มที่ 20 ไมครอนต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนดังนี้ คือ ต้นทุนความเข้มข้นของสี พิจารณาในวัตถุดิบและค่าแรง, ต้นทุนจากแรงดันไฟฟ้า พิจารณาในค่าใช้จ่ายการผลิต และต้นทุนจากระยะเวลาในการชุบ พิจารณาในค่าแรงงานและค่าใช้จ่ายในการผลิต

**1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย**

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ระยะนิยามปัญหา (Define Phase)

2.1 ศึกษากระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า เพื่อรวบรวมข้อมูลในการอธิบายสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

2.2 รวบรวมข้อมูลปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า จากนั้นตัดสินใจเลือกหัวข้อที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไข

2.3 กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต เป้าหมาย และระยะเวลาของการศึกษาวิจัย

2.4 สรุปผลและวางแผนกำหนดแนวทางการดำเนินงานขั้นตอนต่อไป

3.ระยะการวัดเพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับปัญหา (Measurement Phase)

3.1 ประเมินความแม่นและเที่ยงของระบบการวัด (Measurement System Analysis)

3.2 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ความสามารถในปัจจุบันของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า

3.3 ระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV)

1) หาสาเหตุที่เป็นไปได้ในการเกิดข้อบกพร่องของความหนาที่ไม่ได้ตามค่าเป้าหมาย โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

2) กำหนดปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผล (KPIV) โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และจัดเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยเบื้องต้นด้วยการระดมสมองเพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลหรือส่งผลกระทบน้อยต่อการเกิดข้อบกพร่องของความหนาสีที่ไม่ได้ตามเป้าหมายออกไป

3.4 สรุปผลและวางแผนกำหนดแนวทางการดำเนินงานขั้นตอนต่อไป

4. ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase) ทำการศึกษา Full Factorial Design 3 ปัจจัย เพื่อทดสอบว่าปัจจัยใดมีความสำคัญ จะนำไปวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยในระยะปรับปรุงส่วนถัดไป ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานดังนี้

4.1 นำปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (KPIV) จากการวิเคราะห์ในระยะการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหามาออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) แบบเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ Full Factorial Design ซึ่งจะทำให้ทราบถึงการมีอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัย ในการสร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) จะกำหนดให้มีการสุ่มลำดับการทดลอง (randomization) เพื่อให้ค่าสังเกตจากการทดลองต้องเป็นอิสระต่อกัน เพื่อคัดกรองหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มของสี อย่างมีนัยสำคัญของสาเหตุที่กรองมา

4.2 ทำการทดลองตามแผนที่กำหนดไว้และทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าตอบสนอง โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการคำนวณ

4.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพื่อเลือกสาเหตุปัจจัยที่ต้องนำไปทดลองขั้นตอนต่อไป

5. ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase)

5.1 ออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้แบบการทดลอง Central Composite Design (CCD) โดยเพิ่มจุด Center Point และจุด Axial Point เพื่อหาระดับที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ค่าตอบสนองเหมาะสมที่สุด โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าต้นทุนรวมและค่าความหนาสี

5.2 กำหนดระดับปัจจัยโดยพิจารณาข้อจำกัดต่างๆที่อาจจะส่งผลกระทบต่อการทดลอง

5.3 กำหนดขั้นตอนการทดลองและการเก็บข้อมูล

5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองของปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตจริงขั้นตอนต่อไป

6. ระยะการติดตาม ควบคุมและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Control Phase)

6.1 ทดสอบผลยืนยัน โดยการเก็บข้อมูลหลังการให้ระดับของปัจจัยที่สรุปจากระยะการปรับปรุง แก้ไขกระบวนการ (Improve Phase) เป็นระยะเวลา 3 วัน

6.2 จัดทำแผนควบคุม (Control Plan) โดยกำหนดสิ่งที่จะควบคุม วิธีการควบคุม ขนาดกลุ่มตัวอย่างและความถี่ในการวัดและเก็บข้อมูล

6.3 ปรับปรุงมาตรฐานการทำงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง

6.4 สรุปผลการปรับปรุงที่ได้โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง จากในตัวชี้วัดดังนี้ ค่าเฉลี่ยของความหนาฟิล์มของสี ความแปรปรวนและค่า $C_{pk}$ ของความหนาฟิล์ม

7. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

**1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ**

1. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มของสีภายในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อลดปริมาณการใช้สีในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถบรรทุก
3. เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานให้กับโรงงานกรณีศึกษา
4. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ตังถังรถบรรทุกรุ่นอื่นๆ
5. เพื่อเพิ่มความสามารถของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพ

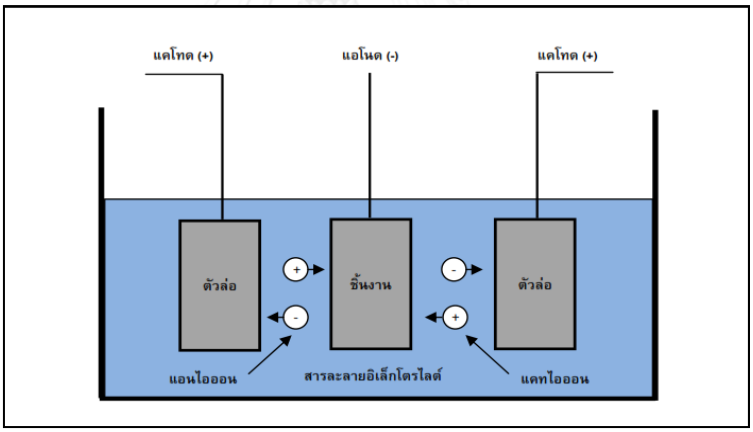


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

[2] กล่าวว่า กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ไว้ว่าเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะชนิดหนึ่งไปเคลือบผิวโลหะอีกชนิดหนึ่งด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยชิ้นงานที่ต้องการชุบจะถูกจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ และกำหนดชิ้นงานดังกล่าวให้เป็นขั้วลบ (Anode) ในส่วนของตัวล่อซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่เคลือบผิวจะกำหนดให้เป็นขั้วบวก (Cathode) ขั้วทั้งสองจะถูกต่อเข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์ อนุภาคเล็กๆ พวกหนึ่งของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วบวกเรียกอนุภาคเหล่านั้นว่า แอนไอออน (Anions) และอนุภาคเล็กๆ อีกพวกหนึ่งของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วลบ เรียกอนุภาคเหล่านั้นว่า แคทไอออน (Captions) ดังแสดงในภาพที่ 2.1




รูปที่ 2.1 แบบจำลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์และระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านทั้งหมด 2 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระด้วยกระแสไฟฟ้า จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้

2. น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆกัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมีของไอออนเหล่านั้น

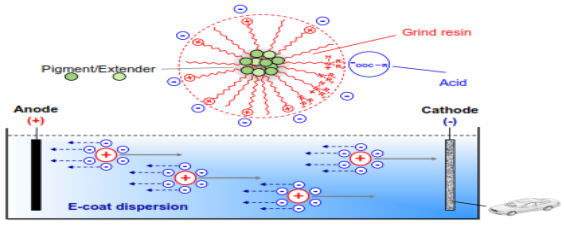
จากกฎข้อที่หนึ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้ ในกรณีที่ต้องการให้โลหะไปเกาะขั้วลบที่ความหนาจำนวนหนึ่ง สามารถทำได้ทั้งหมด 2 วิธี วิธีแรกคือ กำหนดกระแสไฟฟ้าน้อยๆ แต่ใช้ระยะเวลานานๆ วิธีที่สองคือ กำหนดกระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ใช้ระยะเวลาสั้นๆ ทั้งสองวิธีนี้จะทำให้โลหะที่ไปเกาะติดอยู่ที่ขั้วลบมีปริมาณเท่าๆกัน

จากกฎข้อที่สอง ทำให้ทราบว่าโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการแยกสลายที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากัน โลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายด้วยปริมาณไม่เท่ากัน โดยที่โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย โลหะบางชนิดจะแยกออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหรือสมมูลเคมีของโลหะนั้นๆ

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชุบสีด้วยไฟฟ้า

### 2.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการชุบสีด้วยไฟฟ้า

(ภักดี ฐานปัญญา, 2526: 210) ได้กล่าวว่า พื้นฐานเกี่ยวกับการชุบสี ด้วยไฟฟ้า คือ การจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบสีที่อยู่ในขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วลบ ลงไปในสารละลายอิเล็กโตรไลต์(E-Coat) ที่นำไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์(E-Coat) อนุภาคเล็กๆ พวกหนึ่งของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วบวกเรียกอนุภาคเหล่านั้นว่า แอนไอออน (Anions) และอนุภาคเล็กๆ อีกพวกหนึ่งของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วลบ เรียกอนุภาคเหล่านั้นว่า แคทไอออน (Captions) โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปยังชิ้นงานที่อยู่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกคือแอโนดจะแขวนตัวล่อกระแสไฟฟ้าจะไปบังคับให้ ประจุของสีมาแกะติดเคลือบกับผิวชิ้นงาน ในปัจจุบันการเคลือบสี โดยการชุบสีด้วยไฟฟ้า เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง โดยเฉพาะกับชิ้นงานที่มีความสลับซับซ้อน อย่างเช่น บริเวณตัวถังรถยนต์ ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการความคงทนต่อการเป็นสนิม (Anti-Corrosive) และโดยเฉพาะบริเวณร่องลึก ส่วนที่เป็นสันหรือขอบ (Complex Prowled Mea) ดังแสดงในรูปที่ 2.2




รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการจำลองชุบตัวถังรถยนต์ด้วยระบบชุบสีด้วยไฟฟ้า (EDP)

### 2.2.2 สีที่ชุบด้วยไฟฟ้า

สีที่ชุบด้วยไฟฟ้าแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. สีที่อิออนเป็นลบ (Anodic Electrodeposition Paint, AEP) สีที่มีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อน อะตอมของโลหะซึ่งให้อิเล็กตรอนออกมาเป็นอิออนบวกสีเป็นขั้วลบ

2. สีที่อิออนเป็นบวก (Cathodic Electrodeposition Paint, CEP) ใช้กระแสบังคับแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้ โลหะกลายเป็นขั้วลบสี เป็นขั้วบวก เป็นสีที่พึ่งพัฒนาขึ้นมาใหม่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน

สีประเภท CED-Paint เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าดีที่สุดในด้าน การลงทุนของสีอีกทั้งความทนทานต่อสนิมเป็นเลิศ ดังนั้นตั้งแต่ ค.ศ. 1977 จึงมีการเปลี่ยนเป็น Cathodic กันอย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมตลอดมาจนถึงปัจจุบันจากการทดลองปรากฏว่าสี ชนิดนี้มีความสามารถป้องกันสนิมได้ดี กว่าเก่า โดยตรวจสอบได้จากผลการทนต่อสภาพความเป็นเกลือ โดยใช้ที่สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้ความเข้มข้นของเกลือ Nacl 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารป้องกันสนิมได้ถึง 800 ชั่วโมง ในขณะที่สีชนิดเดิม (AED-Paint) ป้องกันได้เพียง 240 ชั่วโมง

### 2.2.3 ข้อดี-ข้อเสียในการใช้สีชุบด้วยไฟฟ้า

1. ข้อดี

1) ได้ฟิล์มสีที่เรียบ มีความสม่ำเสมอ ทั่วบริเวณมุมปลายแหลมและขอบ

2) สี มี แรงเหวี่ยงเข้าเกาะกุมที่ดีเยี่ยม และสามารถคลุมเนื้อที่ ตรงขอบมุมได้อย่างดี

3) การควบคุม pH เป็นไปตามอัตโนมัติ และต่อเนื่อง โดยใช้แรงงาน เพียงเล็กน้อย

4) ประสิทธิภาพการเกาะติด และความทนทานต่อการเกิดสนิมดีเยี่ยม ความคงทนดีมาก

5) ทำให้ประหยัดสี ได้มากไม่สูญเสียไปในอากาศ เหมือนกับการพ่นเพราะสามารถ Recovery กลับมาใช้ได้อีกโดยใช้ระบบ Ultrafiltration

2. ข้อเสีย

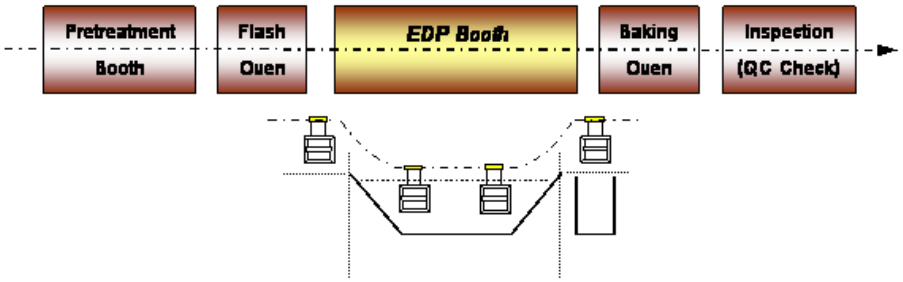
1) มีจุดเสียในการคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศจึงต้องพ่นสี อีกชั้นหนึ่ง

2) ต้องมีการดูแลรักษาราวแขวน (Hanger) อยู่เสมอ

3) ไม่เหมาะสมกับ Production Line ที่เล็กๆ เนื่องจากเวลาในการหมุนกลับจะนานเกินไปทำให้คุณสมบัติสีเปลี่ยนได้

4) ใช้เคลือบเฉพาะชิ้นงานที่ นำไฟฟ้าได้เท่านั้น

### 2.2.4 กระบวนการทำงานพื้นฐานของ EDP




รูปที่ 2.3 กระบวนการพื้นฐานของ EDP

หลักสำคัญในการดำเนินงาน EDP อย่าง มีคุณภาพและสมบูรณ์แบบ ก็คือขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานให้ปราศจากสิ่งสกปรกคราบไขมันต่าง ๆ จนหมดสิ้นเป็นอันดับแรก ซึ่งก็คือกระบวนการ Pretreatment ถัดมาต้องทำการอุ่นชิ้นงานให้แห้ง เพื่อป้องกันสารเคมีปะปนไปยังห้อง EDP เมื่อชิ้นงานเคลือบสีที่ห้อง EDP แล้ว ต้องส่งเข้าเตาอบแห้งอุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการ set ตัวของสี สุดท้ายจึงทำการตรวจเบื้องต้น และตรวจสอบคุณสมบัติชั้นฟิล์มสีตามมาตรฐานต่อไป

### 2.2.5 สิ่งสำคัญในการควบคุมระบบการชุบสีด้วยไฟฟ้า

- ควรทำการผสมสารเคมีในแต่ละชนิดเสียก่อนที่จะเทลงไปในถัง ED เพื่อให้เกิดการเข้ากันของเนื้อสีก่อนที่จะสัมผัสกับชิ้นงาน

- ต้องติดตั้งเครื่องกวนอัตโนมัติภายในถัง ED ตลอดเวลา เพื่อให้เกิดการกวนอยู่ตลอดเวลา เป็นการป้องกันการตกตะกอนของสี

- ต้องระมัดระวังเรื่องไฟฟ้าดูด โดยจัดทำป้ายเตือนอันตรายไว้ทุกจุด และมองเห็นได้ชัดเจน

- ต้องระมัดระวังอย่าให้คราบน้ำมันต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มากจากราง Conveyor ตกลงไปในถัง ED โดยอาจทำเป็นรางปิดครอบไว้อีกชั้นหนึ่ง

- ในส่วนของ Baking oven ควรปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้น เนื่องจากการ set ตัวของสีต้องใช้เวลานานกว่าสีที่ใช้สำหรับพ่นเล็กน้อย

- ควรเอาใจใส่ในเรื่องการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาคุณภาพให้ดีอยู่ตลอดเวลา

## 2.3 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma)

### 2.3.1 ความหมายของ ซิกซ์ ซิกมา

(Rama and Samy, 2009: 13.4) กล่าวว่า ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงประสิทธิภาพชอกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นความพึงพอใจของลูกค้าและมุ่งเน้นคุณภาพ

(Verma and Boyer, 2009: 49) กล่าวว่า ซิกซ์ซิกมา เป็นระบบที่ครอบคลุมและมีความยืดหยุ่นเพื่อประสบความสำเร็จในความยั่งยืนทางธุรกิจ โดยเน้นความต้องการของลูกค้าด้วยการใช้ข้อมูลที่เป็นข้อเท็จจริง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยมุ่งมั่นในเรื่องของการบริหารจัดการ การปรับปรุง และการนำเสนอกระบวนการธุรกิจในรูปแบบใหม่

(Russell and Taylor, 2011: 76) กล่าวว่า ซิกซ์ซิกมา คือ โครงการที่มุ่งเน้นวิธีการ หรือระบบ ซึ่งได้จัดเตรียมให้ธุรกิจที่มีเครื่องมือทางสถิติและความเชี่ยวชาญในการปรับปรุงกระบวนการของพวกเขา โดยการเพิ่มประสิทธิภาพและลดความแปรปรวนในระบบการผลิต อันนำไปสู่การลดของเสียกระบวนการผลิต (ของเสียเข้าใกล้ศูนย์) การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการ และการเพิ่มผลกำไร

สรุปคือ ซิกซ์ซิกมา เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตด้วยการใช้ข้อมูลที่เป็นข้อเท็จจริง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความแปรปรวนในระบบการผลิต โดยยอมให้มีของเสียในกระบวนการผลิตได้เพียง 3.4 ชิ้นต่อการผลิตสินค้าล้านชิ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 2.3.2 กระบวนการของซิกซ์ซิกมา

ซิกซ์ซิกมา เป็นวิธีการปรับปรุงกระบวนการ 5 ขั้นตอนด้วยกัน

1. การกำหนดแผนงานในการแก้ไขปัญหา (Define Phase)

Define คือ ขั้นตอนการระบุและคัดเลือกหัวข้อเพื่อการดำเนินการตามโครงการ ซิกซ์ซิกมาในองค์กร โดยมีขั้นตอนการคัดเลือกโครงการดังนี้

ก. โครงการนั้นต้องสอดคล้องกับเป้าหมายหลักขององค์กร (Business Goal)

ข. มอบหมายให้ฝ่ายต่างๆ ที่เสนอโครงการไปพิจารณาหากลยุทธ์ (Strategy) ในการดำเนินงานที่สอดคล้องกับเป้าหมายหลักขององค์กร (ตามข้อ ก.)

ค. แต่ละฝ่ายนำเสนอกลยุทธ์ในการดำเนินการให้ผู้บริหารทราบ และเมื่อผู้บริหารเห็นชอบแล้ว ให้ไปกำหนดพื้นที่ที่จะดำเนินงาน (High Potential Area)

ง. ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย หลังจากกำหนดพื้นที่ที่จำดำเนินการได้แล้ว ให้แต่ละฝ่ายกลับไปพิจารณาหัวข้อย่อยที่จะใช้ในการดำเนินการ

2. การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement system analysis)

Measure เป็นขั้นตอนการวัดความสามารถของกระบวนการที่เป็นจริงในปัจจุบัน วิธีการเก็บข้อมูลให้เหมาะสมกับความต้องการและกระบวนการทำงาน หลังจากนั้น จะนำข้อมูลมาหาประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่กำหนดว่า มีความใกล้เคียงหรือแตกต่างจากเป้าหมาย ซึ่งเป้าหมายก็คือ สิ่งที่ลูกค้าต้องการ (Specification)

[3] กล่าวว่า ผลกระทบของระบบการวัดที่มีต่อการควบคุมและปรับปรุงกระบวนการ แบ่งผลกระทบของระบบการวัดได้ดังนี้

ก. ผลกระทบของค่าวัดต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งออกเป็น กรณีที่จะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ดี แต่มีการตัดสินใจจากข้อมูลของระบบการวัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์บกพร่อง เป็นความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ I (type I error) ถือเป็นความเสี่ยงของผู้ผลิต (producer's risk) หรือกรณีที่พบว่าผลิตภัณฑ์บกพร่อง แต่มีการตัดสินใจจากข้อมูลของระบบการวัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดี เป็นความผิดพลาดของการตัดสินใจประเภทที่ II (type II error) ถือเป็นความเสี่ยงผู้บริโภค

ข. ผลกระทบของค่าวัดต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับกระบวนการ ซึ่งในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการดำเนินการให้บรรลุตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- อยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ
- กระบวนการมีตำแหน่งตรงกับค่าเป้าหมาย
- ความผันแปรมีขนาดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

โดยเครื่องมือที่ใช้ควบคุมคุณภาพของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิผล คือ แผนภูมิควบคุมคุณภาพ (SPC Chart)

ค. ผลกระทบของค่าวัดต่อการปรับปรุงกระบวนการ

ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการ จะอาศัยการตัดสินใจจากข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการในเทอมของดัชนีความสามารถของกระบวนการ, Cp

ความผันแปรของระบบการวัด สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ

1) ความผันแปรของตำแหน่ง หมายถึง คุณสมบัติของการเข้าใกล้ของค่าเฉลี่ยจากผลจากการวัดหลายๆ ครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Reference value) โดยจะกำหนดด้วย

- ค่า ไบอัส(bias) ซึ่งคือ ความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้บนคุณลักษณะและชิ้นงานเดียวกัน
- ความผันแปรเชิงเส้นตรง (Linearity) คือ ความแตกต่างของค่าไบอัสตลอดช่วงการใช้งานอุปกรณ์วัด
- ความผันแปรด้านความเสถียร (Stability) คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าไบอัสเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

2) ความผันแปรของความกว้าง “ความเที่ยง (precision)” หมายถึง อิทธิพลโดยรวมของความสามารถในการแยกความแตกต่าง แบ่งออกเป็น

- รีพีททะบิลิตี้ (repeatibility) หรือความสามารถในการวัดซ้ำตลอดช่วงการใช้งานของระบบการวัด เป็นความผันแปรภายในเงื่อนไขของระบบการวัด
- รีโปรดิวซิบิลิตี้ (reproducibility) หมายถึงความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้เครื่องมือวัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกัน ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแสดงถึงความแตกต่างของพนักงานวัด

การประเมินผลรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ซึ่งมีทั้งหมด 3 วิธี คือ

1) วิธีอาศัยค่าพิสัย (Range Method) เหมาะกับการทดลองในช่วงสั้นๆ และไม่มีการวัดซ้ำ มีข้อดีคือประเมินผลได้ง่าย แต่มีข้อเสียที่สำคัญ คือ ไม่สามารถแยกรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ได้
2) วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and Range Method) เหมาะกับการทดลองซ้ำในแต่ละสิ่งตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน วิธีการนี้ทำให้สามารถแยกรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่ารีพีททะบิลิตี้ได้
3) วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาพนักงานและชิ้นงานเป็นสาเหตุของความผันแปรหรือไม่

3. การวิเคราะห์เพื่อระบุสาเหตุของปัญหา (Analysis phase)

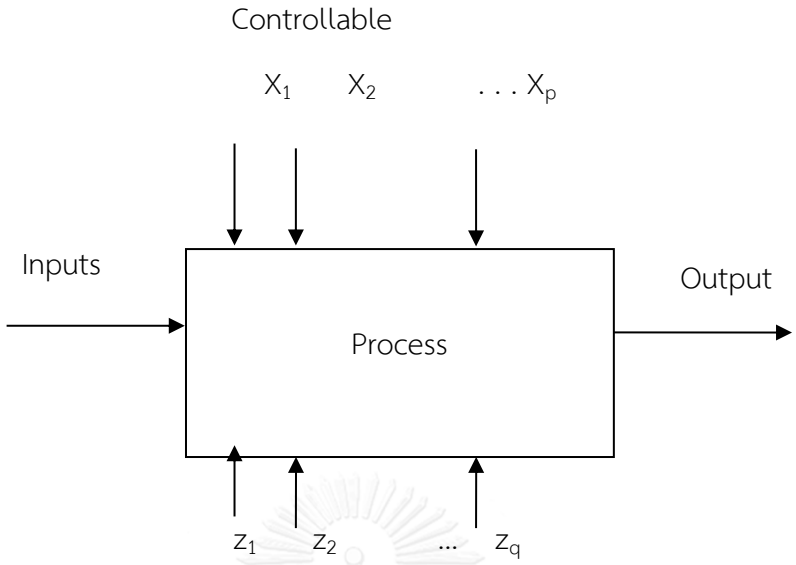
เมื่อทราบจุดที่ต้องทำการแก้ไข จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าวิกฤตของคุณภาพ ซึ่งหมายถึงขอบเขตที่ลูกค้าไม่ยอมรับสินค้า สร้างสมมติฐานที่สนใจและทำการทดสอบ หาที่มาของความผันแปรในกระบวนการผลิต หาความสัมพันธ์ของตัวแปร ใช้วิธีการที่เหมาะสมทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้เครื่องมือทางสถิติด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) มาใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

1) ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

[4] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ การออกแบบการทดลองยังเป็นเทคนิคสถิติชั้นสูงในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติถือว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ สิ่งสำคัญสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ข้อดีของการออกแบบการทดลอง คือ ให้ความถูกต้องของข้อมูลและแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลได้มาก โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ รวมทั้งยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา

กระบวนการ คือ การรวมเอาคน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากร เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งในกระบวนการจะมีทั้งตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factors) และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors)

การทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.4




รูปที่ 2.4 แบบทดลองทั่วไปสำหรับกระบวนการ

หลักการพื้นฐานมี 3 ข้อหลักสำหรับการออกแบบการทดลอง ดังนี้

1. เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ มีความสำคัญ 2 อย่างคือ ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของค่าความผิดพลาดในการทดลอง ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้ให้กลายเป็นหน่วยวัดขั้นพื้นฐานเพื่อพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำไปใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชันทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบและกำหนดจำนวนซ้ำโดยใช้ OC-Curve (Operation Characteristic Curve)

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้ หลีกเลี่ยงการทำการทดลองอย่างลำเอียง และทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีความน่าจะเป็นเท่ากันที่จะถูกหยิบขึ้นมาทำการทดลอง

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) หมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตของวัสดุ เป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง โดยการจัดกลุ่มวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกันให้อยู่ด้วยกัน

2) วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ y

2. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อทำให้ y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ

3. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อทำให้ y มีค่าน้อย

4. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบของ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

3) แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจะเป็นที่ทุกฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องต้องมีความเข้าใจในการทดลองล่วงหน้าอย่างดี ว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ ต้องทำอย่างไรบ้าง จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานมีดังนี้

1. กำหนดปัญหา (Identify Problem) เป็นขั้นตอนที่ต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ปัญหาต้องมีความชัดเจนและจะมีผลต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ดังนั้นการออกแบบการทดลองทุกครั้งต้องทำงานเป็นทีม

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ต้องกำหนดขอบเขตปัจจัยที่จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการมาก และจะต้องตรวจสอบว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ การกรองปัจจัย (Screening) ควรจกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยควรเลือกขอบให้มีความกว้างมากๆ

3. เลือกตัวแปรผลตอบ การเลือกตัวแปรผลตอบ ต้องเป็นตัวแปรที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ ส่วนใหญ่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ

4. การออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบที่เกี่ยวข้องพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชัน ในการเลือกการออกแบบ จำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา

5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ นำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วยโดยเฉพาะในการนำเสนอให้ผู้อื่นฟังนอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

4) การเลือกการออกแบบการทดลอง

1. การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) แยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น 2 ส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตัวอย่าง การสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

ซึ่ง : $Y_{ijkl} = \mu + \tau i + \varepsilon ij$ ; $i = 1,2,...,a$

$j = 1,2,...,n$

โดยที่ $Y_{ij}$ คือ ค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

$\mu$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของประชากร

$\tau_i$ คือ อิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

$\varepsilon_{ij}$ คือ ความคาดเคลื่อนสุ่ม

ในการวิเคราะห์ จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) $SS_T$ โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{y_{i.}^2}{n_i} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A$$

ซึ่งผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยที่ ถ้าหากค่า $F_0 \leq F_{\alpha,v1,v2}$ แล้ว แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ One-way ANOVA

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | $F_0$ |
|---|---|---|---|---|
| Treatment | $SS_A$ | a-1 | $MS_A$ | $MS_A/MS_E$ |
| Error | $SS_E$ | N-a | $MS_E$ | |
| Total | $SS_T$ | N-1 | | |

2. การทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCB)

จะแบ่งความแปรปรวนออกเป็น *3* ส่วน คือ ความแปรปรวนจากการให้ทรีทเมนต์ต่างกัน ความแปรปรวนเนื่องจากการบล็อก และความแปรปรวนเนื่องจากความคาดเคลื่อนของการทดลอง ตัวอย่าง การสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

ซึ่ง: $Y_{ijkl} = \mu + \tau i + \beta j + \varepsilon ij$ ; i = 1,2,...,a

j = 1,2,...,n

โดยที่ $Y_{ij}$ คือ ค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับทรีทเมนต์ i

$\mu$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของประชากร

$\tau_i$ คือ อิทธิพลอันเกิดจากทรีทเมนต์ i

$B_j$ คือ อิทธิพลเกิดจากบล็อกที่ j

$\varepsilon_{ij}$ คือ ความคาดเคลื่อนสุ่ม

การวิเคราะห์จะทำโดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็นส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (The Total Sum of Squares) $SS_T$ โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$$

$$SS_A = \frac{1}{b}\sum_{i=1}^{a} y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_B = \frac{1}{a}\sum_{j=1}^{b} y_{.j}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$$

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

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับการทดลองแบบสุ่มในบล็อก

| Source of Variation (SOV) | Sum of Squares (SS) | Degree of Freedom (df) | Mean Squares (MS) | $F_0$ |
|---|---|---|---|---|
| Treatment | $SS_A$ | a-1 | $MS_A$ | $MS_A/MS_E$ |
| Blocks | $SS_B$ | b-1 | $MS_B$ | $MS_B/MS_E$ |
| Error | $SS_E$ | (a-1)(b-1) | $MS_E$ | |
| Total | $SS_T$ | N-1 | | |

3. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล $2^k$ ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียง *2* ระดับ คือระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการช่วยกรองปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกก่อนสำหรับการทดลองที่มีหลายปัจจัย

4. การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง $2^k$ ใช้เมื่อจำนวนปัจจัยในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล $2^k$ เพิ่มขึ้น จำนวนการทดลองสำหรับเรพลิเคตที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นด้วยบางครั้งมากกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่า อันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวสามารถปล่อยได้ การทดลองจะน้อยลงโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง $2^k$ เนื่องจากโดยส่วนใหญ่จะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบสนองต่อสิ่งที่พิจารณาอยู่ ดังนั้นการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง $2^k$ ถูกนำมาใช้เพื่อกรองหาปัจจัยที่มีผลและช่วยในการหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ

หลังจากการทดลองเพื่อกรองปัจจัยแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อๆไป

5. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง $3^k$ ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัย 3 ระดับ ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับ ใน k ปัจจัย คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง $3^k$ เหมาะสมกับผู้ทดลองที่สนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

6. การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)

ใช้การวางแผนการทดลอง (Design of Experiments: DOE) หรือกระบวนการอื่นๆ ทางสถิติที่เหมาะสมกับสายงาน เพื่อควบคุมความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการ งานวิจัยฉบับนี้เป็นการปรับปรุงเพื่อหาระดับที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีที่เรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM)” โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology,RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ ($X_1$) และความดัน ($X_2$) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$Y = f(X_1, X_2) + \varepsilon$$

โดยที่ $\varepsilon$ คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ *y* ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(X_1, X_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ คือ

$$\eta = f(X_1, X_2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)”

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟฟิก ตัวอย่างในรูปที่ 2.5 โดยที่ $\eta$ จะถูกพล็อตกับระดับของ $X_1$ และ $X_2$ เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วเราจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ $X_1$ และ $X_2$ เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

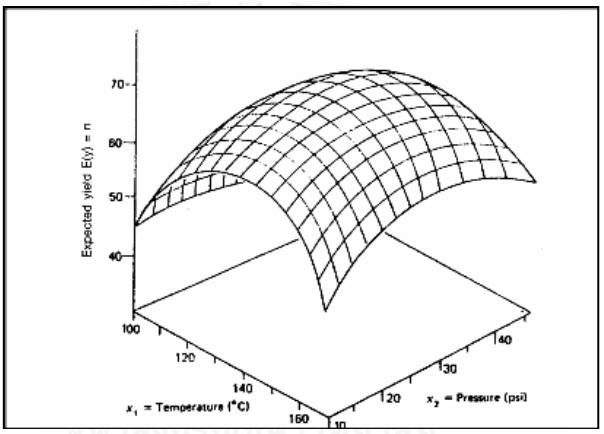
ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกคือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดง

ความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

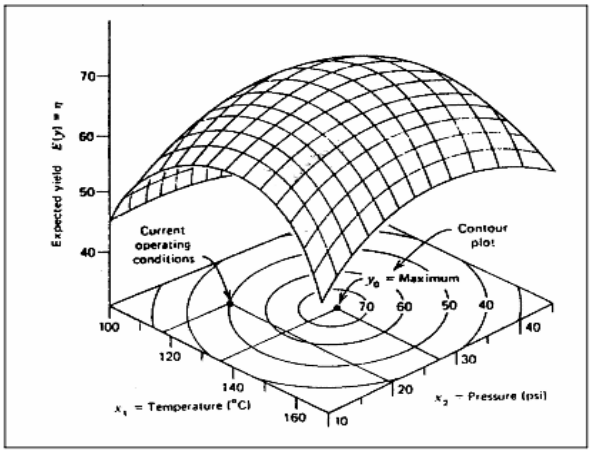
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

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




รูปที่ 2.5 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ

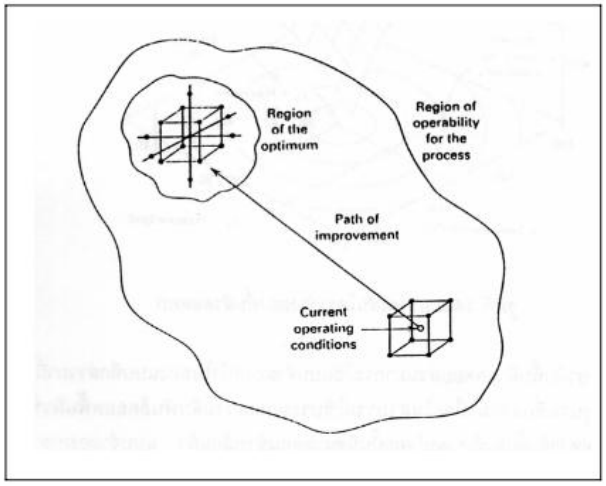



รูปที่ 2.6 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมา แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Squares method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขการทำงานปัจจุบันในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ก็คือ การนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อเราพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากภาพที่ 2.7 พบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันจะเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุด หรือถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุด ในที่นี้อาจจะคิดเสมือนว่า กำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบก็คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ




รูปที่ 2.7 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

2) การออกแบบสำหรับฟิตจำลองอันดับที่สอง

1.การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

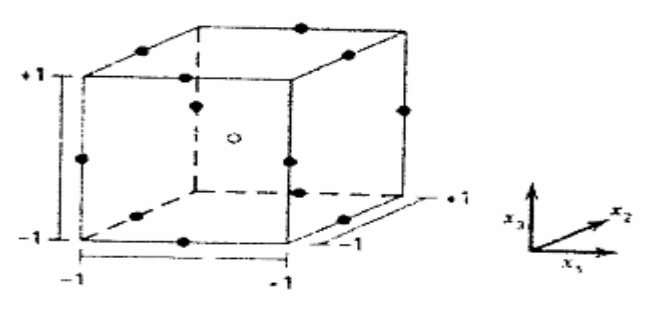
การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box – Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล $2^k$ กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน ที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.8 สังเกตว่า การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน เป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน

ไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจีชุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือการรวมของปัจจัยระดับ (Factor – Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.3 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน แบบสามตัวแปร

| Run | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | 0 |
| 2 | -1 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | -1 | 0 | -1 |
| 6 | -1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | -1 |
| 8 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | -1 | -1 |
| 10 | 0 | -1 | 1 |
| 11 | 0 | 1 | -1 |
| 12 | 0 | 1 | 1 |
| 13 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

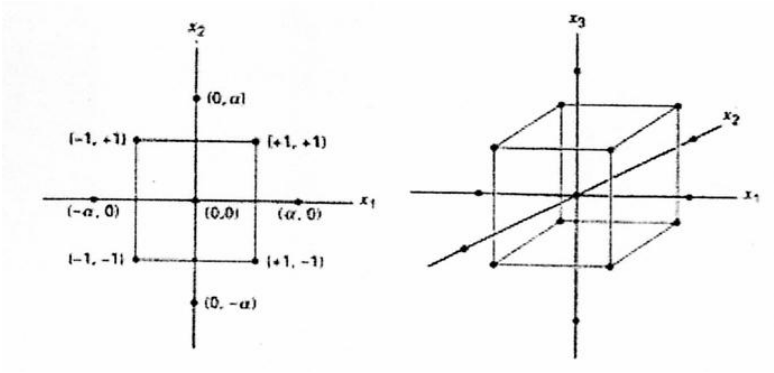



รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน แบบสามตัวแปร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.การออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ Central Cubic Design (CCD)

การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ซึ่งใช้ในการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการฟิตแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย $2^k$ แฟกทอเรียลที่มี $n_f$ การทดลอง, การทดลอง $2^k$ ในแนวแกนหรือแนวรูปดาว (Star) และ $n_c$ การทดลองที่จุดศูนย์กลางดังรูปที่ 2.9 จะเป็นการแสดง CCD สำหรับ k=2 และ k=3 ปัจจัย




รูปที่ 2.9 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ k=2 และ k=3

1) CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Spherical) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้ เมื่อบริเวณที่สนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้อง 100% ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่สนใจอยู่นั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ $\alpha$ หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลและการออกแบบในแนวแกนให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมีเท่ากับ $\sqrt{k}$

2) จุดศูนย์กลางของการทดลองใน CCD

การเลือก $\alpha$ ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่สนใจอยู่ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการทดลองเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อว่าจะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบสนองที่พยากรณ์ได้ มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้วจะให้ใช้ 3-5 รัน (Run)

5. การติดตามควบคุม (Control Phase)

กำหนดแผนควบคุม ปรับปรุงแผนควบคุม ติดตามเฝ้าดูกระบวนการให้อยู่ในขอบเขตที่ควบคุม

โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) การจัดทำเอกสารและสร้างมาตรฐาน เพื่อนำมาใช้กับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงต้องมีการจัดทำเอกสารขึ้นมาใหม่หรือปรับปรุงของเดิมที่มีอยู่ และทำการอบรมให้กับพนักงานที่

เกี่ยวข้องได้เข้าใจและนำไปปฏิบัติจริงได้ ยกตัวอย่างเอกสาร เช่น คู่มือการปฏิบัติงาน เอกสารการประเมินพนักงาน และเอกสารการฝึกอบรม เป็นต้น

2) แผนภูมิควบคุม โดยการสร้างเป็นแผนภูมิหรือกราฟเทียบกับเวลาหรือขนาดตัวอย่าง ต้องอาศักข้อมูลจากข้อกำหนดทางเทคนิคที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพของชิ้นงานที่ทำการผลิตและต้องการจะควบคุม เพื่อเป็นแนวทางในการติดตามผลจากกระบวนการผลิต โดยการตรวจวัดค่า ซึ่งวัดได้ (Variable) ที่เรียกว่า ค่าวัด หรือการนับจำนวนของค่าที่เป็นหน่วยนับ (Attribute) แล้วสร้างเป็นแผนภูมิขึ้น จะมี 3 เส้น ได้แก่ เส้นค่ากลางหรือเส้นที่กำหนดค่าเป้าหมายของการผลิต เส้นแสดงขอบเขตค่าสูง และเส้นแสดงขอบเขตค่าต่ำ ที่อนุโลมให้มีค่าความคลาดเคลื่อนในการผลิตเกิดขึ้นได้ หากอยู่ในเขตควบคุมนี้ ถือว่า ผลผลิตอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ แต่ถ้าค่าอยู่นอกเหนือเขตควบคุม ถือว่าการผลิตไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และต้องมีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องต่อไป

ความผันแปรต่างๆ มีสาเหตุสำคัญ 2 อย่างคือ สาเหตุที่หนึ่งสาเหตุปกติวิสัยหรือสาเหตุโดยบังเอิญ (Chance Cause) เป็นกลุ่มของความผันแปรที่ไม่มีความรุนแรงและไม่มีผลต่อคุณภาพสินค้าที่ผลิต เกิดจากความผันแปรเล็กๆน้อยๆ ของวัตถุดิบและปัจจัยต่างๆ เป็นสาเหตุที่เป็นปกติวิสัยของการผลิต จึงเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ สาเหตุที่สอง หรือสาเหตุที่กำจัดได้ (Assignable Cause) เป็นกลุ่มสาเหตุของความผันแปรที่เกิดจากความผิดพลาด ความผิดปกติ ชำรุด ความไม่ได้ตามมาตรฐานของปัจจัยการผลิตต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และไม่เป็นปกติวิสัยหรือธรรมชาติของการผลิต ต้องมีการแก้ไขหรือกำจัด จึงจะทำให้คุณภาพของการผลิตกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แผนภูมิควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลที่มีค่าต่อเนื่องหรือเป็นข้อมูลจากหน่วยการวัดประกอบด้วยแผนภูมิ $\bar{x} - R$ และแผนภูมิ x

2) แผนภูมิควบคุมชนิดข้อมูลที่มีค่าแจงนับ เป็นข้อมูลจากหน่วยนับ ประกอบด้วยแผนภูมิ np แผนภูมิ p แผนภูมิ C และแผนภูมิ U

โดยงานวิจัยฉบับนี้ข้อมูลเป็นลักษณะแบบ Variable ข้อมูลแบบต่อเนื่อง จึงต้องใช้แผนภูมิแบบ $\bar{x} - R$ และแผนภูมิ x

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 งานวิจัยที่นำซิกซ์ ซิกมา นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและแก้ปัญหา

ปัจจุบันมีการนำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีขั้นตอนและระบบการทำงานที่ชัดเจน เป็นที่ยอมรับขององค์กรต่างๆ มี 5 ขั้นตอนหลักคือ นิยามปัญหา การวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการและการตรวจติดตามและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ขอดีที่ได้จากซิกซ์ ซิกมาคือการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพ ลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต และลดต้นทุนทางการผลิตให้น้อยลง ยกตัวอย่างงานวิจัยที่นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมามาใช้ ของ [5] งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและปรับปรุงคุณภาพผิวงานชุบโครเมียมโดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า โดยมีเป้าหมาย คือการลดอัตราของเสียที่เกิดขึ้นลง 70 เปอร์เซ็นต์ การดำเนินงานจะเริ่มจากขั้นตอนการกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้นโดยระบุถึงขอบเขตปัญหาที่จะทำการแก้ไข และกำหนดตัวชี้วัดการปรับปรุงกระบวนการ โดยอาศัยการวัดความสามารถกระบวนการ พบว่าการเกิดเม็ดหรือตามดบนผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดของเสียมากที่สุด ขั้นตอนที่สองจะเป็นการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา โดยการสร้างแผนที่กระบวนการทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละงานในกระบวนการ จากนั้น จะทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหา โดยสร้างแผนภาพสาเหตุและผล ซึ่งจะนำมาเชื่อมโยงกับค่าระดับความเสี่ยง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบ อันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ เพื่อค้นหาสาเหตุที่น่าจะมีผลกระทบต่อปัญหามากที่สุด จากนั้นจะศึกษาระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบชิ้นงานก่อนชุบโครเมียม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในระบบการตรวจสอบ ขั้นตอนที่สามเป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบกับค่าความหยาบผิวชิ้นงานโดย การวิเคราะห์ความแปรปรวน และนำมาหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการโดยเทคนิคการออกแบบการทดลองและการหาพื้นที่ตอบสนอง ขั้นตอนสุดท้ายจะดำเนินการควบคุมตัวแปรต่างๆ โดยอาศัยคู่มือการปฏิบัติงาน และเทคนิคการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่นเดียวกับ [6] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากงานซ่อมข้อบกพร่องหลักและจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อรถ 1 คันโดยที่เลือกแก้ไขข้อบกพร่องที่มีจำนวนมากและก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมสูง 7 ชนิด ได้แก่ข้อบกพร่องประเภทเส้นใย, สีเป็นคราบ, สีเป็นรอยขีด, เม็ดผง, สีไหล, เม็ดพื้น และสีเป็นหลุมในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์ โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงอยู่ที่ 40% ทั้งค่าใช้จ่ายในการซ่อมและจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ย การดำเนินงานวิจัยได้ใช้แนวทางการปรับปรุงของซิกซ์ ซิกม่า ทั้ง 5 ขั้นตอน เริ่มจากระยะการนิยามปัญหาได้ศึกษาสภาพปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการปรับปรุง จากนั้นในระยะการวัด

เพื่อหาสาเหตุของปัญหา ได้วิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับข้อมูลเชิงนับโดยวิเคราะห์ทั้งความถูกต้องและความแม่นยำของระบบการวัด จากนั้นวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการในปัจจุบัน แล้วจึงระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่อาจมีผลต่อการเกิดเส้นใย, สีเป็นคราบ, สีเป็นรอยขีด, เม็ดผง, สีไหล, เม็ดพื้น และสีเป็นหลุมโดยใช้แผนภาพและตารางแสดงความสัมพันธ์ของเหตุและผล และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ จากนั้นในระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่องได้นำเอาปัจจัยที่เลือกมาทำการทดสอบนัยสำคัญด้วยวิธีการทางสถิติและปรับปรุงโดยหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยโดยการออกแบบการทดลอง จากนั้นทดสอบยืนยันผลและกำหนดแผนควบคุมและมาตรฐานวิธีการปฏิบัติงานใหม่ในระยะการติดตามควบคุม และ [7] งานวิจัยอุตสาหกรรมนี้ มีวัตถุประสงค์คือ เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุง คุณภาพโดยวิธีการซิกซ์ซิกม่า และทำการประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการ เคลือบสีในบริษัทออโต้อัลลายแอนซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตรถกระบะและรถยนต์ นั่งส่วนบุคคลยี่ห้อฟอร์ด และมาสด้า โดยผู้ทำโครงงานวิจัยจะถูกกำหนดให้ทำโครงการ ร่วมกับคณะทำงานซิกซ์ซิกม่าตลอดระยะเวลาโครงการ จากการสำรวจสภาพปัญหาของผลิตภัณฑ์รถกระบะภายในกระบวนการเคลือบผิวชั้น บนสุดของแผนกสี พบว่าปัญหาประเภทสีหยดเป็นปัญหาหนึ่งซึ่งยังไม่เคยได้รับการแก้ไข, ยากต่อการหาสาเหตุ และมีต้นทุนการซ่อมแซมที่สูงระดับหนึ่ง โดยมีระดับปัญหาเฉลี่ย ปลายปี พ.ศ.2543 อยู่ที่ 0.2 จุดบกพร่องต่อหน่วยผลิตภัณฑ์และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีระดับ 0.37 จุดบกพร่องต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ต้นปี พ.ศ.2544 ผู้จัดทำจึงได้ร่วมกับคณะทำงานในการดำเนินการแก้ไขปัญหาสีหยดนี้โดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่าเป็นแนวทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าหรือการชุบสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อมาช่วยแก้ปัญหา ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอื่นๆ**

ในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า จะควบคุมความหนาฟิล์มของสีให้อยู่ในมาตรฐาน จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลักคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการชุบและความเข้มข้นของสี จึงต้องใช้วิธีการออกแบบการทดลอง และวิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาจุดที่เหมาะสม เพื่อนำมาปรับปรุงกระบวนการ เบื้องต้นต้องทราบก่อนว่าปัจจัยไหนมีผลต่อความหนาฟิล์ม ตัวอย่างงานวิจัย [8] ได้ทำการศึกษาความหนาฟิล์มและการยึดเกาะของสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ในโลหะผสม 2 ชนิด คือ AL 2024-T3 และ Al cold 2014-T3 ที่แตกต่างกันด้วยวิธีการทำความสะอาดพื้นผิวและพารามิเตอร์การชุบที่แตกต่างกัน ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าน้ำยาทำความสะอาดผิวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการยึดเกาะของสี ในการชุบ แต่ความหนาของสีเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มแรงดันและเวลา รวมถึง

ยังมีเทคนิคเกี่ยวกับกระบวนการชุบสีจากงานวิจัยของ [9] ความต้านทานระหว่างแหล่งไฟฟ้าและตัวอย่างชิ้นงานในการชุบ ต้องการลดความคมและการตกของแรงดันไฟฟ้า ในกระบวนการชุบ โดยใช้เทคนิคในการ Phosphate พื้นผิวที่แตกต่างกัน (เหล็กสังกะสีในการชุบและเหล็กชุบสังกะสีร้อนจุ่ม) แสดงถึงเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการลดความขรุขระและคมของฟิล์มสี รวมถึงการลดการตกของแรงดันไฟฟ้าบนเหล็ก Phosphate ได้ดีขึ้น และงานวิจัย [10] ศึกษาโลหะแมกนีเซียมว่ามีประสิทธิภาพในการชุบเคลือบผิวที่ไม่ซ้ำกัน จึงศึกษากระบวนการเคลือบผิวบนโลหะแมกนีเซียม พบว่าที่ฟิล์มบางสามารถเกิดได้เร็วในโลหะแมกนีเซียมผสม AZ91D ซึ่งมีเสถียรภาพในการเคลือบผิวและป้องกันการกัดกร่อนได้ดี

[11] ทำการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผิวอลูมิเนียมออกไซด์ในกระบวนการทำอโนไดซ์ (Anodized) เพื่อหาความเหมาะสมของกระบวนการ รวมถึงวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผิวอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นการศึกษาปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการทำอะโนไดซ์ ซึ่ง ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการชุบ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก และอุณหภูมิในการชุบ ซึ่งได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง พบว่า วัสดุและลักษณะรูปร่างชิ้นงาน ไม่ส่งผลต่อความหนาผิวอลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับการศึกษาปัจจัยภายในพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาผิวอลูมิเนียมออกไซด์มากที่สุด คือ ระยะเวลาในการชุบ รองลงม คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิในการชุบ และงานวิจัยที่ใช้ปัจจัยที่คล้ายกันของ [5] จากการศึกษาต้องการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบโครเมียมกันชนท้ายรถยนต์ที่มีปริมาณของเสียเฉลี่ยต่อเดือนสูงถึง 146,295 PPM และสภาพปัญหาผิวชิ้นงานเป็นตามดหรือเม็ด มีปริมาณของเสีย 70.5 เปอร์เซ็นต์ จากของเสียทั้งหมด พบว่ามี 4 ปัจจัย ประกอบด้วย วิธีการล้างชิ้นงาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของน้ำยาชุบ และค่าพีเอชในบ่อชุบ จากนั้นนำปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้งหมดมาออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง มีอีกหนึ่งงานวิจัยของ [12] ที่เกี่ยวกับการชุบโครเมียม ซึ่งมีปัญหาเรื่องความหนาและความสว่างที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ความหนาที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง CCD

**2.4.3 งานวิจัยที่ใช้วิธีการออกแบบการทดลองโดยใช้พื้นผิวผลตอบเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด**

การใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรที่เราต้องการ แล้วรวมทั้งยังต้องหาจุดที่เหมาสมที่สุดหรือได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ ยกตัวอย่างงานวิจัย [13] ทำการศึกษากระบวนการชุบโครเมียมเคลือบผิวท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ พบว่าปัญหาความหนาผิวชุบโครเมียมไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.2 ถึง 0.6 ไมครอน ได้นำปัจจัยมาศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบไปด้วย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารเคมี และระยะเวลในการชุบ ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวชุบโครเมียม จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อความหนาผิวชุบโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบ Box-Behnken Design เพื่อหาสภาวะที่ทำให้ความหนาของผิวชุบโครเมียมเท่ากับ 0.4 ไมครอน และ [14] งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง CCD สำหรับกระบวนการออกหน้ายาง การทดลองทำการศึกษาผลของ ความเร็วสกรู, อุณหภูมิน้ำ หล่อเย็นและความยาวเครื่องตัด ซึ่งส่งผลต่อน้าหนัก ความกว้าง และความยาวหน้ายาง โดยท้าการทดลองทั้งหมด 19 การทดลอง พบว่า ความยาวเครื่อง ตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าน้าหนักของหน้ายางมากที่สุด และปัจจัยอื่นๆ ไม่ส่งผลต่อความกว้าง และความยาวของหน้ายาง และ [15] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับเพื่อทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำ, ความเข้มข้นของเกลือ และอุณหภูมิของน้ำ ที่คาดว่ามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของ Electrolyzed Oxidizing Water Generator (EO generator) โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ $3^3$ Factorial Design จากการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปัจจัยทั้ง 3 ตัว ไม่มีอิทธิพลต่อ EO generator แต่ผู้ทำวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ Electric Current จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods to Process Optimization) พบว่าค่า Electric Current เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของน้ำ และอัตราการไหลของน้ำ และประสิทธิภาพของ Electric Current จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นของเกลือ และ [16] ศึกษาถึงผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidized white liquor, OWL) ต่อคุณภาพของเยื่อซึ่งได้แก่ ความขาวสว่าง ความหนืด ค่าแคปป้า และสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ ทดแทนการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต

โดยศึกษาร่วมกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการฟอก การศึกษานี้ใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในการทำการทดลองเพื่อให้มีจำนวนการทดลองเท่าที่จำเป็น จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสี่ที่จะให้ตัวแปรตอบสนองทุกตัวได้ค่าตามต้องการด้วยวิธีการหาจุดที่เหมาะสม พบว่า การใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ความขาวสว่างของเยื่อลดลง สัดส่วนของ OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้ได้เท่ากับ 34:66 ซึ่งสัดส่วนนี้ต้องใช้ร่วมกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.0 กรัมต่อกิโลกรัม อุณหภูมิในการฟอกเท่ากับ 85.5 องศาเซลเซียส และเวลาในการฟอกเท่ากับ 93 นาที ซึ่งประมาณการว่าจะสามารถประหยัดต้นทุนค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 3,300,000 บาทต่อเดือน

**2.4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต**

การคิดต้นทุนทางการผลิตนั้นจะประกอบด้วย วัตถุดิบทางตรง (Direct Material) หมายถึง วัตถุดิบที่เป็นส่วนสำคัญของผลิตภัณฑ์ที่คิดเข้าหน่วยผลิตภัณฑ์โดยตรง แรงงานทางตรง (Direct Labor) หมายถึง ค่าแรงงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสภาพวัตถุดิบทางตรงให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป รวมถึงค่าทำงานล่วงเวลา และค่าใช้จ่ายโรงงาน (Overhead Cost) หมายถึงต้นทุนการผลิตทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการผลิตสินค้า เช่น ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าโสหุ้ย เป็นต้น ซึ่งมีตัวอย่างงานวิจัยของ [17] ศึกษาต้นทุนการผลิตของแท่งชิ้นงาน ซึ่งผลิตภัณฑ์มีอยู่ 4 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้ต้นทุนแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย ปัญหาเนื่องจากโรงงานผู้ผลิตไม่ทราบต้นทุนที่ถูกต้องจึงทำให้เสียเปรียบคู่แข่งทางการค้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องนำระบบการคิดต้นทุนมาใช้ในการแก้ปัญหา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 3
# การนิยามปัญหา

ขั้นตอนการนิยามปัญหา (Define Phase) ที่จะทำการกล่าวถึงในบทนี้ เป็นขั้นตอนแรกที่จะนำไปสู่การหาจุดเริ่มต้นของงานวิจัยด้วยวิธีการซิกซ์ ซิกมา โดยทำการศึกษากระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า เพื่อรวบรวมข้อมูลในการอธิบายปัญหาที่เกิดขึ้น จากนั้นเลือกหัวข้อที่จะมาปรับปรุง กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย แล้วก็สรุปผลและวางแผนกำหนดแนวทางการดำเนินงาน เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตในการทำสีรถยนต์ ควบคุมความหนาของสีในการชุบด้วยระบบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดและเพิ่มความสามารถของกระบวนการให้มากขึ้นกว่าในปัจจุบัน รวมทั้งการลดต้นทุนในการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความหนาสีที่ต้องการ

## 3.1 การจัดตั้งคณะทีมงาน

งานวิจัยนี้ได้จัดตั้งคณะทีมงานขึ้นมาเพื่อช่วยทำการวิเคราะห์ปัญหา เก็บรวบรวมข้อมูล แล้วนำมาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง โดยการให้คะแนนของแต่ละคนในทีมเพื่อนำมาแก้ปัญหาแล้วช่วยกันวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการแก้ไขควบคุมความหนาสีให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แล้วยังลดต้นทุนในการผลิต รวมทั้งเพิ่มความสามารถของกระบวนการให้ดีขึ้น ซึ่งสมาชิกในคณะทีมงานมีดังนี้คือ ผู้จัดการฝ่ายผลิต 1 คน วิศวกรประจำกระบวนการชุบสี 1 คน หัวหน้างานกระบวนการชุบสี 1 คน หัวหน้ากระบวนการพ่นสี 1 คน เจ้าหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพ 1 คน เจ้าหน้าที่เอกสาร 1 คนและวิศวกรควบคุมโครงการจัดทำงานวิจัย

## 3.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าบนตัวถังรถบรรทุก

กระบวนการชุบสี EDP ในโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการชุบในตัวถังรถบรรทุก ซึ่งมีรถหลายรุ่นด้วยกัน ผู้วิจัยได้เลือกทำการศึกษารถบรรทุกรุ่น FML2 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60% ของจำนวนการผลิตทั้งหมด โดยมีขั้นตอนกระบวนการชุบสี EDP บนตัวถังรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรายละเอียดในแต่ละกระบวนการดังนี้

### 3.2.1 กระบวนการผลิตอย่างละเอียดโดยแบ่งแยกตามกลุ่มงาน

Pre-Degreasing: มีหน้าที่ในการล้างคราบน้ำมัน ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกต่างๆ เศษเหล็กที่มาจากในกระบวนการเชื่อมตัวถังรถบรรทุก เบื้องต้น

Degreasing: มีหน้าที่ในการล้างคราบน้ำมัน ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกต่างๆ เศษเหล็กที่มาจากในกระบวนการเชื่อมตัวถังรถบรรทุก อีกครั้งเพื่อความสะอาดมากขึ้นจากกระบวนการแรกใน Pre-Degreasing

Water Rinse 1: มีหน้าที่ในการล้างคราบเคมีจากในบ่อ De-greasing และเพื่อปรับสภาพค่า pH ให้อยู่ในค่ากลางระหว่าง 6-7

Activate: มีหน้าที่ในการปรับสภาพผิวบนตัวรถเพื่อให้กระบวนการถัดไปทำปฏิกิริยาในการสร้างผลึกบนผิวได้ดีขึ้น

Phosphate: มีหน้าที่ในการกัดผิวและสร้างผลึกบนผิวรถบรรทุก เพื่อให้สีที่ใช้ในการชุบยึดเกาะได้ดีและผิวเรียบเนียนมากที่สุด

Water Rinse 2: มีหน้าที่ในการล้างคราบเคมีจากในบ่อ Phosphate และเพื่อปรับสภาพค่า pH ให้อยู่ในค่ากลางระหว่าง 6-7

Passivate: มีหน้าที่ในการปิดผิวที่สร้างผลึกจากบ่อ Phosphate ให้ผิวเรียบเนียนมากขึ้น และปรับสภาพผิวให้ pH อยู่ในค่ากลางระหว่าง 6-7

DI Rinse 1: มีหน้าที่ในการล้างสิ่งสกปรกต่างๆ จากกระบวนการก่อนหน้านี้ ด้วยน้ำที่สะอาดบริสุทธิ์ปราศจากไอออน

E-Coat (EDP): มีหน้าที่ในการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า EDP บนผิวรถบรรทุก เพื่อความสวยงาม ป้องกันสนิม และเตรียมผิวให้ดีเพื่อสำหรับใช้ในกระบวนการพ่นสี

UF Rinse: มีหน้าที่ในการล้างคราบสีส่วนเกินจากกระบวนการ E-Coat (EDP) เพื่อดึงกลับไปในกระบวนการ E-Coat (EDP) ช่วยในการประหยัดต้นทุนในการผลิตได้

DI Rinse 2: มีหน้าที่ในการล้างสิ่งสกปรกต่างๆ จากกระบวนการก่อนหน้านี้ ด้วยน้ำที่สะอาดบริสุทธิ์ปราศจากไอออน

Spray Water Rinse: มีหน้าที่ในการล้างคราบน้ำหรือสีที่เกาะบนตัวรถ เพื่อความสะอาดมากขึ้น โดยใช้สายยางฉีกด้วยน้ำสะอาด

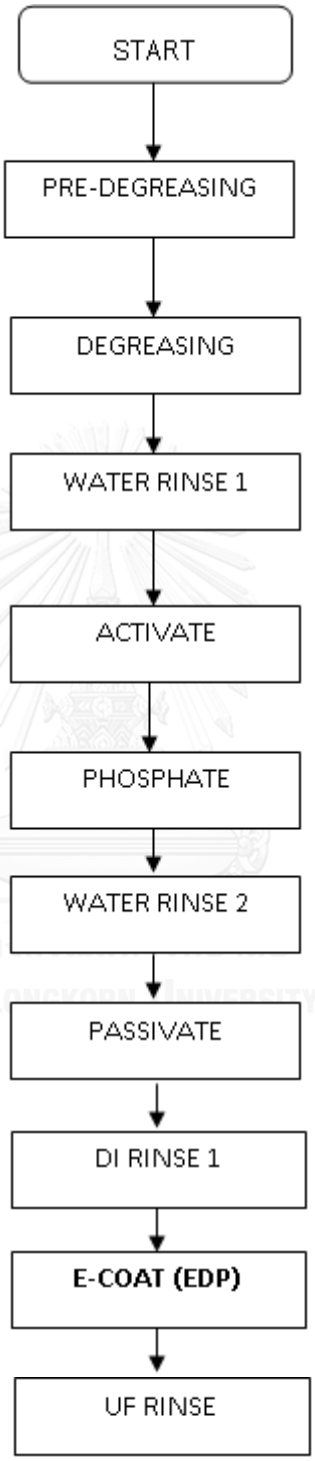
Air Blow: มีหน้าที่ในการเป่าน้ำที่ค้างตามรู หรือซอกต่างๆบนตัวรถ เพื่อป้องกันปัญหาคราบสี EDP หรือสีไหลตามรูต่างๆ

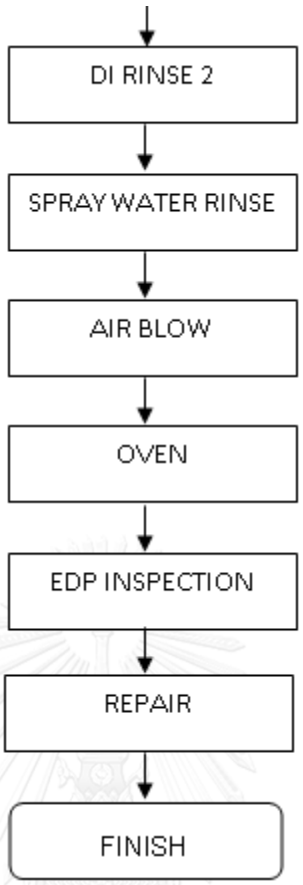
Oven: มีหน้าที่ในการอบสี EDP ที่อุณหภูมิ180 องศาเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สีแห้งตัวแล้วผิวเรียบเนียน

EDP Inspection: มีหน้าที่ในการตรวจสอบปัญหาที่เกิดในกระบวนการ EDP และตรวจสอบคุณภาพหลังจากผ่านการอบแล้ว ว่ามีปัญหาอะไรบ้าง เช่น สีไหล สีเดือดหรือความหนาสีไม่ได้

Repair: มีหน้าที่ในการขัดซ่อมในการแก้ปัญหาต่างๆ ในกระบวนการ EDP

### 3.2.2 แผนภาพการผลิต






รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของกระบวนการ EDP ของรถรุ่น FML2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**3.2.3 กำลังการผลิต**

โรงงานตัวอย่างใน 1 วัน มีการทำงานช่วงเช้าอย่างเดียว ไม่มีการเข้ากะกลางคืน ซึ่งระยะเวลาในการทำงานมีดังนี้ ช่วงเวลาทำงานคือ 7.30 – 16.30 น.โดยมีเวลาที่ไม่ทำการผลิตคือเวลาพักกลางวัน 40 นาที เวลาพักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน 2 ช่วงๆละ 10 นาที ช่วงแรกเวลา 9.30 - 9.40 น.และช่วงเวลา 14.30 - 14.40 น.เวลาในการประชุมตอนเช้า 10 นาที และเวลาในการเก็บอุปกรณ์ทำความสะอาดก่อนเลิกงาน 10 นาที รวมเวลาทั้งหมดเท่ากับ 80 นาที ซึ่งเมื่อนำไปหักลบจากเวลาทำงานปกติ จะเหลือเวลาทำงานจริงเท่ากับ 460 นาที

โรงงานตัวอย่างมีระบบสายการผลิตแบบระบบสายพาน (Conveyor) ผสมกับแบบระบบผลัก (Push) ซึ่งแต่ละจุดจะมีการปรับระบบให้สอดคล้องกันที่ทุกๆ 15 นาที หรือที่เรียกว่า Takt time = 15 นาที/คัน

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณกำลังการผลิตต่อวันได้ด้วยการคำนวณดังนี้

กำลังการผลิต = [(เวลาทำงาน – เวลาที่ไม่มีการผลิต)/Takt Time]

X ประสิทธิภาพการทำงานที่ 85%

= [(540-80)/15] x 0.85

= 25 คัน / วัน

ดังนั้นใน 1 วันทำงานสามารถชุบสี EDP ได้ 25 คัน/วัน

### 3.3 การนิยามปัญหา

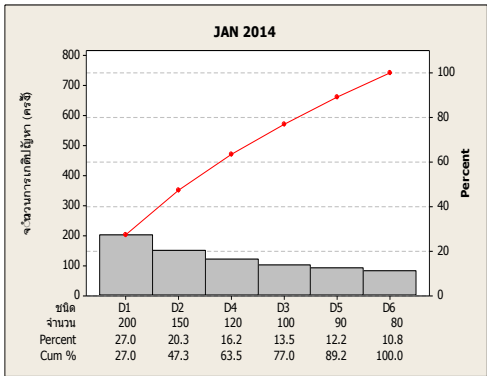
ผู้วิจัยต้องการปรับปรุงกระบวนการทำสี จึงมีการเก็บข้อมูลปัญหาเพิ่มเติมย้อนหลัง 6 เดือน (มกราคม – มิถุนายน 2557) เพื่อสรุปปัญหาหลักที่พบมากที่สุด

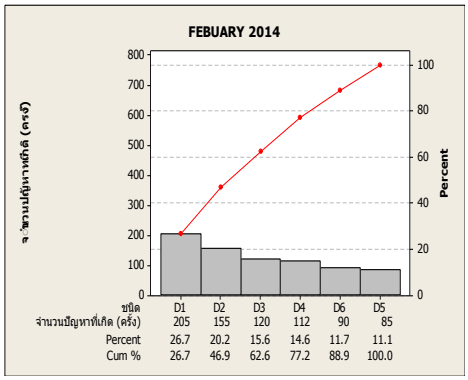
หลังจากทำการศึกษาปัญหาที่พบในกระบวนการชุบสี EDP สามารถดูชนิดของปัญหาทั้งหมดได้จากตารางที่ 1.1 ซึ่งมีทั้งหมด 6 ปัญหาด้วยกัน มีดังนี้คือ

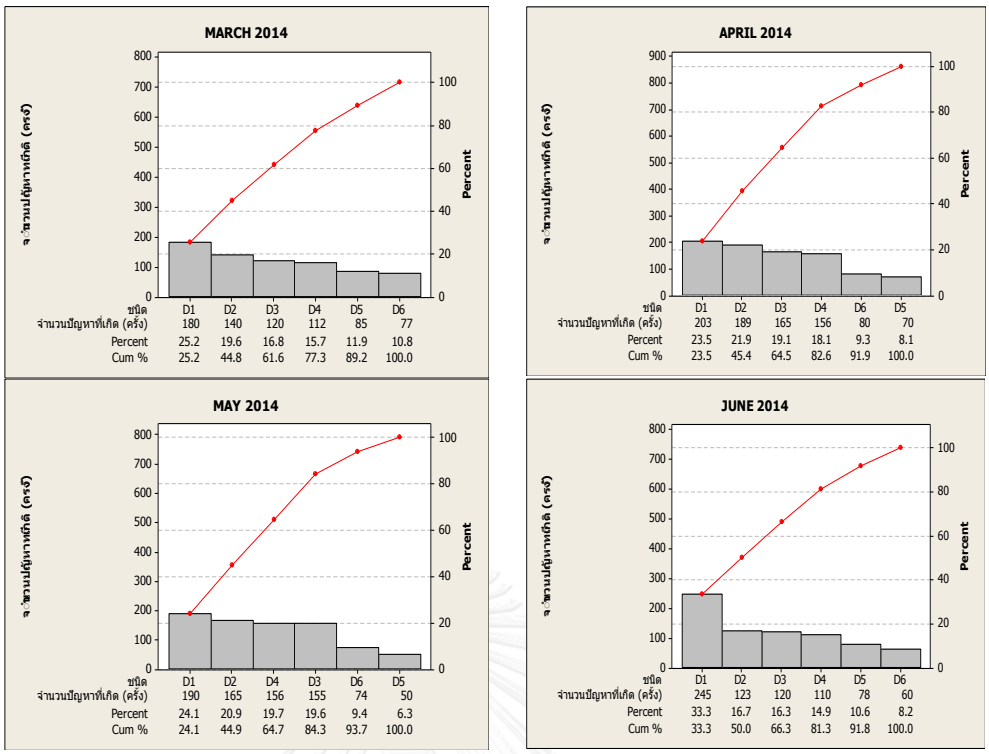
- D1 คือ ความหนาสี EDP ไม่ได้ค่ากลางที่ 20 ไมครอน ตามมาตรฐานของโรงงาน
- D2 คือ สี EDP ไม่ติดบริเวณใต้หลังคารถ
- D3 คือ สี EDP เป็นหลุมบนตัวรถ
- D4 คือ สี EDP ไหลตามรูน็อตของรถบรรทุก
- D5 คือ เม็ดเหล็กบนผิว EDP ติดตามตะเข็บหลังคารถ
- D6 คือ ขี้สี EDP ติดตามตะเข็บหลังคารถ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.2 แสดงข้อบกพร่อง 6 อันดับตั้งแต่เดือน มกราคม 2557 – มิถุนายน 2557

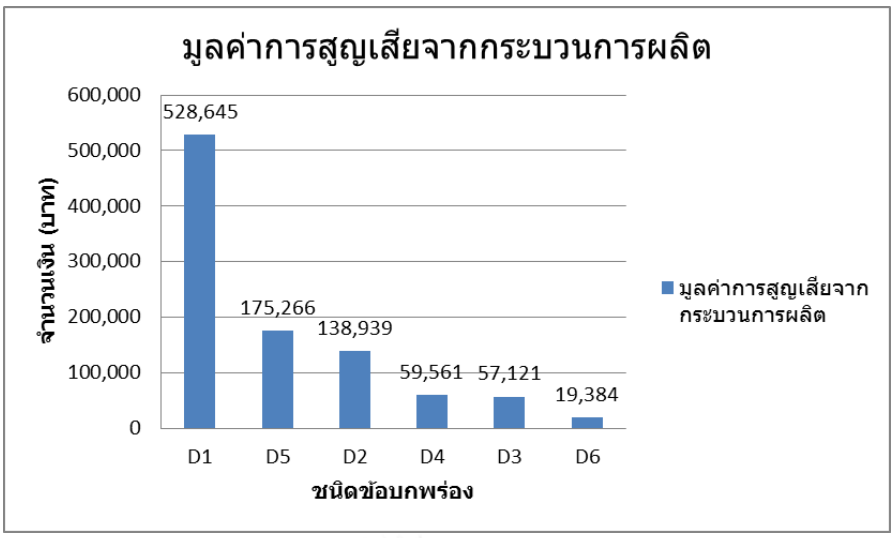





รูปที่ 3.2 ข้อบกพร่องตั้งแต่เดือน มกราคม 2557 – มิถุนายน 2557

จากข้อบกพร่องที่พบมีทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งในแต่ละข้อบกพร่องจะมีผลต่อค่าสูญเสียต่อต้นทุนทางการผลิตในแต่ละชนิด ซึ่งปัญหา D1 คือ ความหนาสีไม่ได้ค่ากลางที่ 20 ไมครอนตามมาตรฐานของโรงงาน ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากที่สุด มูลค่าความสูญเสียจากต้นทุนการผลิตเท่ากับ 528,645 บาท และค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) เท่ากับ 0.49 ซึ่งแสดงถึงกระบวนการที่ไม่มีความสามารถ รองลงมาคือ D5 คือ เม็ดเหล็กบนผิว EDP และ D2 คือสี EDP ไม่ติดบริเวณใต้หลังคารถ ซึ่งปัญหา D5 สามารถแก้ไขได้ง่ายโดยการทำความสะอาดผิวก่อนเข้ากระบวนการผลิต ส่วน D2 สามารถแก้ไขโดยการติดอุปกรณ์เพื่อไล่ฟองอากาศ ดังนั้นปัญหา D1 จึงส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากที่สุด และวิธีการแก้ไขจะยากกว่าไม่สามารถแก้ไขได้โดยทันที จึงแสดงมูลค่าการสูญเสียจากกระบวนการผลิตในรูปที่ 3.3 ดังนี้




รูปที่ 3.3 การสูญเสียต้นทุนทางการผลิตในแต่ละชนิดของข้อบกพร่อง

จากการกล่าวรายละเอียดที่มาและความสำคัญของปัญหาในบทที่ 1 มาบ้างแล้ว เช่น ความสามารถของกระบวนการ เป็นต้น ส่วนในบทที่ 3 จะกล่าวเพิ่มเติมถึงสาเหตุของปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับกระบวนการทำสี

จากการศึกษากระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุก พบว่าไม่เคยมีผู้วิจัยท่านใดเคยทำมาก่อน ส่วนใหญ่จะพบงานวิจัยที่เกี่ยวกับการชุบแข็งด้วยไฟฟ้าเรียกว่าการชุบอะโนไดซ์ในชิ้นส่วนยานยนต์หรืออิเล็กทรอนิกส์ การชุบเคลือบด้วยสารเคมีเรียกว่า ซิงค์ฟอสเฟตในชิ้นส่วนยานยนต์ และในส่วนการชุบสีด้วยไฟฟ้าในอุตสาหกรรมยานยนต์จะมีแต่งานวิจัยที่เคยทำในชิ้นส่วนยานยนต์ จึงเป็นอีกสาเหตุที่ผู้วิจัยสนใจทำกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุก เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ผู้วิจัยได้จัดให้ทีมงานของโรงงานกรณีศึกษา ที่มีความเชี่ยวชาญในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและการพ่นสี ช่วยทำการวิเคราะห์เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาโดยทีมงานให้คะแนนประกอบด้วย 6 คนดังนี้

คนที่ 1 คือ ผจก.ฝ่ายผลิต

คนที่ 2 คือ วิศวกรควบคุมคุณภาพ

คนที่ 3 คือ วิศวกรควบคุมกระบวนการชุบสี

คนที่ 4 คือ หัวหน้างานกระบวนการชุบสี

คนที่ 5 คือ หัวหน้างานกระบวนการพ่นสี

คนที่ 6 คือ หัวหน้าโครงการ หรือ วิศวกร

จากการวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นของปัญหาตามหลัก 5M1E จากทีมงานมีดังนี้

1. สาเหตุเกิดจากคน คือ พนักงานที่เป็นพนักงานใหม่หรือยังขาดความชำนาญในการปฏิบัติงาน ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตามที่กำหนดไว้

2. สาเหตุเกิดจากเครื่องจักร คือ ตัวแม่เหล็กที่เป็นตัวกลางในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเข้ากับตัวชิ้นงานอาจจะไม่แน่นหรือไม่สะอาด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้สะดวก รวมถึงจะเกี่ยวกับการดูแลรักษาและเครื่องจักรไม่ทันสมัย

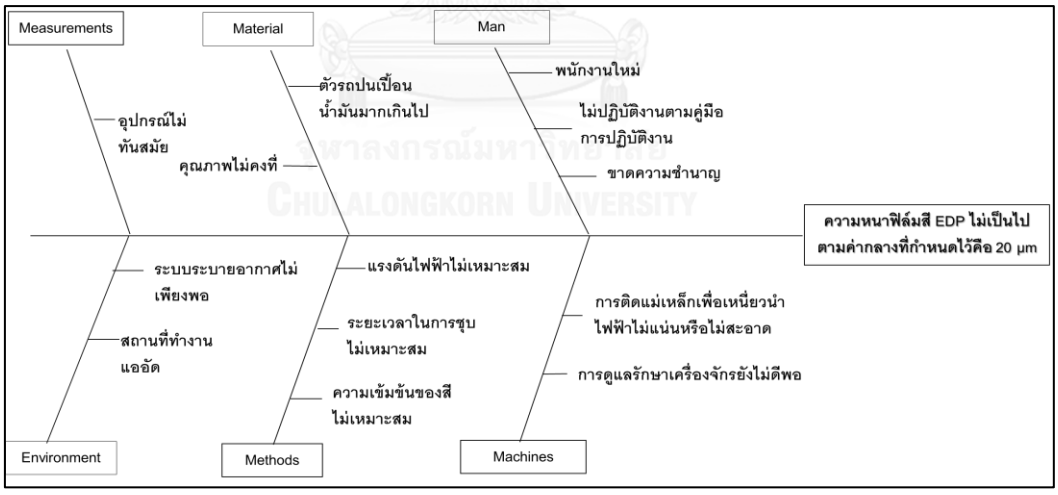
3. สาเหตุเกิดจากวัตถุดิบ คือ ตัวรถปนเปื้อนน้ำมันมามาก และคุณภาพวัสดุของรถแต่ละคันไม่คงที่

4. สาเหตุเกิดจากวิธีการทำงาน คือ การที่กำหนดสภาวะการทำงานที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากในปัจจุบันสภาวะการทำงานจะกำหนดโดยอาศัยประสบการณ์ของพนักงานเท่านั้น จึงทำให้ไม่มีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมแน่นอน จากการศึกษากระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลัก 3 ปัจจัยคือ ระยะเวลาในการชุบ ความเข้มข้นของสี และแรงดันไฟฟ้า

5. สาเหตุเกิดจากการวัด คือ อุปกรณ์ไม่ทันสมัย

6. สาเหตุเกิดจากสิ่งแวดล้อม คือ ระบบระบายอากาศไม่เพียงพอและสถานที่ทำงานแออัด

จากการกล่าวถึงการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ด้านต่างๆ ซึ่งมีผลต่อความหนาฟิล์มสี EDP ไม่เป็นไปตามค่ากลางที่กำหนดไว้คือ 20 ไมครอน สามารถแสดงด้วยแผนผังก้างปลา ดังรูปที่ 3.4




รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา

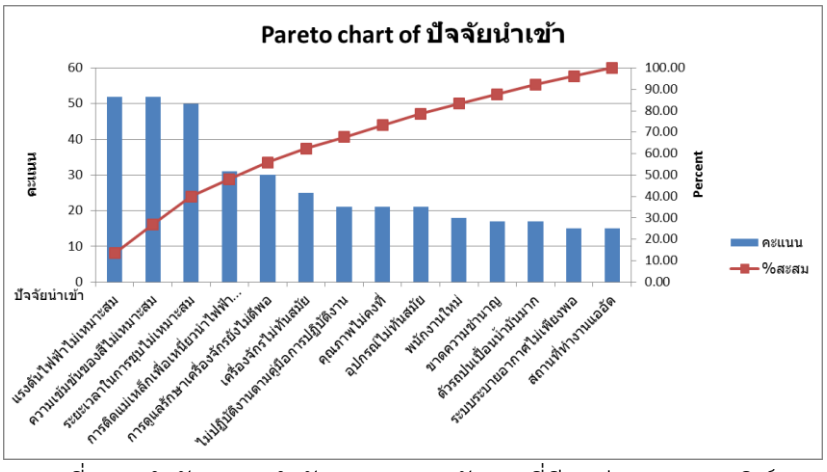
จากนั้นผู้วิจัยได้จัดให้ทีมงานของโรงงานกรณีศึกษา ที่มีความเชี่ยวชาญในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและการพ่นสี ช่วยทำการวิเคราะห์เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหา โดยให้

แต่ละคนลงคะแนนผลกระทบของสาเหตุต่างๆที่มีผลต่อความหนาสี ซึ่งผลคะแนนแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การจัดลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหา

| ลำดับ | ปัจจัยนำเข้า | ผลการให้คะแนนของผู้ประเมิน | | | | | | คะแนน |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | แรงดันไฟฟ้าไม่เหมาะสม | 9 | 8 | 9 | 8 | 10 | 8 | 52 |
| 2 | ความเข้มข้นของสีไม่เหมาะสม | 8 | 9 | 8 | 10 | 8 | 9 | 52 |
| 3 | ระยะเวลาในการชุบไม่เหมาะสม | 7 | 9 | 10 | 9 | 8 | 7 | 50 |
| 4 | การติดแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าไม่แน่นหรือไม่สะอาด | 3 | 2 | 6 | 7 | 5 | 8 | 31 |
| 5 | การดูแลรักษาเครื่องจักรยังไม่ดีพอ | 4 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 30 |
| 6 | เครื่องจักรไม่ทันสมัย | 4 | 3 | 3 | 4 | 6 | 5 | 25 |
| 7 | ไม่ปฏิบัติงานตามคู่มือการปฏิบัติงาน | 1 | 3 | 2 | 4 | 6 | 5 | 21 |
| 8 | คุณภาพไม่คงที่ | 5 | 1 | 3 | 2 | 4 | 6 | 21 |
| 9 | อุปกรณ์ไม่ทันสมัย | 3 | 2 | 4 | 6 | 5 | 1 | 21 |
| 10 | พนักงานใหม่ | 2 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 18 |
| 11 | ขาดความชำนาญ | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 | 17 |
| 12 | ตัวรถปนเปื้อนน้ำมันมาก | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 17 |
| 13 | ระบบระบายอากาศไม่เพียงพอ | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 15 |
| 14 | สถานที่ทำงานแออัด | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 15 |

จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้แผนภาพพาเรโตในการเรียงลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหาที่มีผลต่อความหนาฟิล์มจากมากสุดถึงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



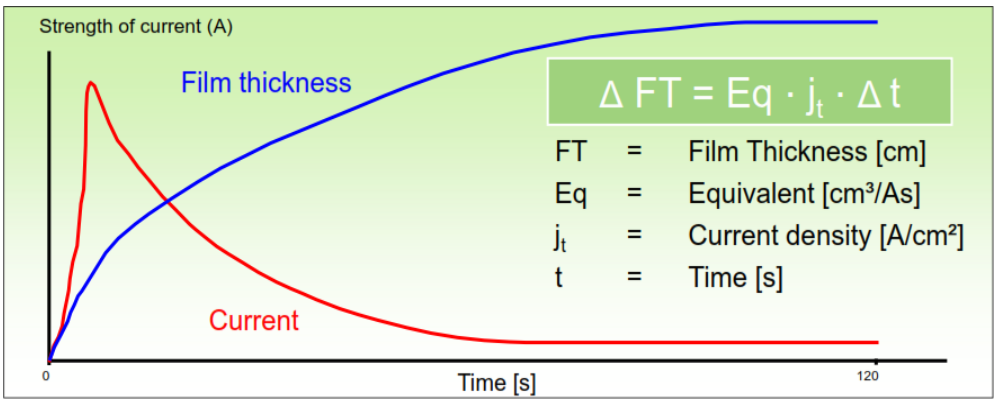

รูปที่ 3.5 ลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหาที่มีผลต่อความหนาฟิล์ม

จากตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของปัญหามากที่สุดอยู่ในหมวดของ Method คือ ความเข้มข้นของสีไม่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าไม่เพียงพอและระยะเวลาในการชุบไม่เหมาะสม รองลงมาอยู่ในหมวดของ Machines คือ การติดแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าไม่แน่นหรือไม่เหมาะสม และการดูแลรักษาเครื่องจักรไม่ดีพอ สามารถแก้ไขปัญหาโดยการอบรมพนักงานเพิ่มเติมเพราะมีขั้นตอนการปฏิบัติงานจากโรงงานกรณีศึกษา ปัญหาด้านคุณภาพผิวรถมาไม่คงที่ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการแจ้งปัญหากลับไปทางบริษัทผู้ผลิตให้ทำการควบคุมคุณภาพให้คงที่ ปัญหาอุปกรณ์ไม่ทันสมัย สามารถแก้ปัญหาโดยการสั่งซื้ออุปกรณ์มาเพิ่มเติม เพื่อการปฏิบัติงานที่ดีขึ้น ปัญหาด้านคน คือ พนักงานไม่ปฏิบัติตามคู่มือปฏิบัติงาน ขาดความชำนาญ สามารถแก้ไขได้โดยการจัดอบรมพนักงานและมีการประเมินผลงานทุก 3 เดือน และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สามารถแก้ไขได้โดยการแจ้งเจ้าหน้าที่สิ่งแวดล้อมมาดำเนินการแก้ไขปัญหา ดังนั้นปัญหาด้านต่างๆ สามารถแก้ไขได้ง่ายและต้องมีเงินลงทุน ยกเว้น ด้านขั้นตอนวิธีการทำงานที่ต้องใช้เวลาในการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสม และไม่ต้องใช้เงินลงทุนมาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากวิธีการทำงานได้แก่ การตั้งค่าปัจจัยความเข้มข้นของสี แรงดันไฟฟ้า และระยะเวลาในการชุบ มาปรับปรุง ซึ่งจะสามารถทำการปรับปรุงและแก้ไขได้ง่ายกว่าด้านอื่นด้วย รวมถึงไม่ต้องใช้เงินลงทุนมาก โดยจะนำวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสภาวะการทำงานของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาต้นทุนทางการชุบสี EDP ที่เกี่ยงข้องกับระดับการตั้งค่าของทั้ง 3 ปัจจัย เพื่อให้ได้ความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุก ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 20 ไมครอน และมีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทำงานที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะกำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานให้กับโรงงานกรณีศึกษา

ต่อไปผู้วิจัยจะได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสามที่มีต่อความหนาสีจากงานวิจัยในอดีตที่ได้ค้นคว้ามา จากกราฟดังรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและเวลา ที่มีผลต่อความหนาฟิล์ม ในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปบนตัวชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นตอนแรก เนื่องจากชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะทำให้ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น แต่ ณ จุดหนึ่งเมื่อความหนาฟิล์มเกิดมากขึ้นจะยิ่งทำให้เป็นฉนวน คือการนำไฟฟ้าได้ลดลง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าก็จะลดลง ดังรูปที่ 3.6

Chulalongkorn University




รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์การสร้างฟิล์มของสี

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาจากทฤษฎีการชุบสีด้วยไฟฟ้า จากบริษัทที่ขายสีให้กับโรงงานที่นักวิจัยทำการศึกษา พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสีไม่ใช่มีแค่แรงดันไฟฟ้าและเวลา นอกจากนี้ยังมีความเข้มข้นของสี ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีต้นทุนทางการผลิตที่สูงที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษาปัจจัยที่มีผล ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์ม อ้างอิงข้อมูลจาก [18]

| พารามิเตอร์ | การเปลี่ยนแปลง | ความหนาฟิล์ม |
|---|---|---|
| แรงดันไฟฟ้า | เพิ่ม | เพิ่ม |
| ระยะเวลาในการชุบ | เพิ่ม | เพิ่ม |
| ความเข้มข้นสี | เพิ่ม | เพิ่ม |

ผู้วิจัยสรุปสิ่งที่จะดำเนินการปรับปรุงเพื่อให้ความหนาฟิล์มของสี EDP อยู่ที่ค่าเกณฑ์ตามมาตรฐานคือ 20 ไมครอน ดังนี้คือ จะทำการหาสภาวะการทำงานของทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี แรงดันไฟฟ้า และระยะเวลาในการชุบ โดยการกำหนดสภาวะของปัจจัยทั้งสามนี้ จะทำภายหลังจากการปรับความสูงของบ่อให้สูงขึ้นจากในปัจจุบัน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการชุบสี EDP ให้ผิวเรียบเนียน สวยงามมากขึ้นและปรับปรุงอัตราการไหลของสี EDP ในบ่อ เพื่อช่วยป้องกันการตกตะกอนของสี โดยในการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของทั้งสามปัจจัย จะพิจารณาต้นทุนจากแต่ละปัจจัยว่าสภาวะการทำงานไหนที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้ต้นทุนจากการใช้สภาวะนั้นต่ำที่สุด ซึ่งการคิดต้นทุนในแต่ละปัจจัยนั้นจะอ้างอิงจากค่าการปรับตั้งปัจจัยในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าปรับตั้งของปัจจัยในแต่ละการทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลอง

นั้นต้นทุนทางการผลิตลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างไรขึ้นกับว่าระดับค่าปรับตั้งของปัจจัยในการทดลองนั้นๆ เปลี่ยนแปลงจากค่าปรับตั้งในปัจจุบันเท่าไร แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบปัจจัยค่าปัจจุบันกับค่าในการทดลองที่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต

| ปัจจัย | ค่าอ้างอิงจากปัจจุบัน | ค่าปรับตั้งในการทดลอง | ต้นทุนทางการผลิต(บาท) |
|---|---|---|---|
| ความเข้มข้นของสี (%Solid) | 18.5 | ต่ำ | ลดลง |
| แรงดันไฟฟ้า (Volt) | 320 | ต่ำ | ลดลง |
| เวลาในการชุบ (Min) | 5.5 | ต่ำ | ลดลง |

ต้นทุนของแต่ละปัจจัยมีทั้งในส่วนของค่าวัตถุดิบ คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบต่างๆ เช่น สีในการชุบ หรือ สีในการพ่น ค่าใช้จ่ายแรงงานทางตรง คือ ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับพนักงานหรือกำลังคนหลักที่มีส่วนสำคัญในการผลิต และค่าใช้จ่ายในการผลิต คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าก๊าซ และส่วนสนับสนุนของการผลิต ซึ่งต้นทุนทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับแต่ละปัจจัยจะแสดงวิธีการคำนวณในบทที่ 6

ผู้วิจัยได้แสดงตัวอย่างให้เห็นว่ามีสภาวะการทำงานหรือมีการตั้งค่าของทั้ง 3 ปัจจัยได้แตกต่างกัน แต่ยังสามารถให้ค่าความหนาสีอยู่ที่ 20 ไมครอนตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.4 ผลของสภาวะการทำงานของ 3 ปัจจัยที่มีต่อความหนาสี

| สภาวะการทำงาน | ปัจจัย | | | ความหนาสี (ไมครอน) |
|---|---|---|---|---|
| | ความเข้มข้นของสี (% Solid) | แรงดันไฟฟ้า (Volt) | ระยะเวลาในการชุบ (min) | |
| 1 | สูง | ต่ำ | ปานกลาง | 20 ไมครอน |
| 2 | ปานกลาง | สูง | ต่ำ | 20 ไมครอน |
| 3 | ต่ำ | ปานกลาง | สูง | 20 ไมครอน |

จากตารางสามารถอธิบายได้ว่า ถ้าต้องการความหนาฟิล์มอยู่ที่ค่ามาตรฐาน อาจจะปรับปัจจัยแค่ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ โดยไม่ต้องปรับทุกตัว หรือสามารถลดปัจจัยบางตัวให้อยู่ที่ค่าควบคุมที่ค่าต่ำได้ เช่น ที่สภาวะการทำงานที่ 1 การเพิ่มความเข้มข้นของสีแต่แรงดันไฟฟ้าอาจจะอยู่ที่ค่าต่ำและระยะเวลาในการชุบอยู่ที่ค่าปานกลาง ก็สามารถได้ความหนาฟิล์มอยู่ที่ค่ามาตรฐาน หรือสภาวะการทำงานที่ 2 ปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูง ความเข้มข้นสีปานกลาง แต่ระยะเวลาในการชุบจะลดลงได้ เนื่องจากตามทฤษฎีของการชุบเคลือบสี EDP แรงดันไฟฟ้าจะแปรผกผันกับเวลา ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตรถได้มากขึ้นด้วย แล้วยังปรับปรุงขั้นตอนที่เป็นคอขวดในกระบวนการชุบสี EDP ซึ่งทั้ง 2 กรณีให้ความหนาฟิล์มที่ได้มาตรฐาน เช่นกัน ดังนั้นก็ต้องไปดูที่ต้นทุนของแต่ละสภาวะการทดลองว่า สภาวะไหนต่ำที่สุด

จากการศึกษาปัญหาที่มีผลต่อความหนาฟิล์มของสีในกระบวนการชุบ ผู้วิจัยจึงได้สรุปสภาพปัญหา และวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงดังแสดงใน Project Charter ได้ดังรูปที่ 3.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**Project Charter**

**Project Title:การลดต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวรถบรรทุก**

**Business Cases:**

โรงงานเกิดปัญหาความหนาสีในการชุบบนผิวรถบรรทุกไม่อยู่ในค่ากลางที่กำหนดไว้ที่ 20 ไมครอน โดยไม่สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นได้อย่างถาวร ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งอาจจะส่งผลต่อด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์คือสีลอกหรือสีล่อนได้ในระยะยาว

**Objective Statement:**

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวตัวถังรถบรรทุกและหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ได้ความหนาฟิล์มที่ 20 ไมครอน ให้ได้ค่า Cpk สูงขึ้น รวมทั้งเพื่อลดต้นทุนทางการผลิตลง

**Project Scope:**

- ขอบเขตการศึกษาคือ กระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าโดยเลือกรถรุ่น $FML_2$ มาทำการทดลอง
- ขอบเขตต้นทุนจากกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับปัจจัยดังนี้ เวลาที่ใช้ในการชุบ,ความเข้มข้นของสี และแรงดันไฟฟ้า

**Project Assumption:**

- ได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารในการทดลอง ลงทุนเครื่องมือและการดำเนินการค่าใช้จ่ายต่างๆ
- ทีมงานระดับปฏิบัติการ ให้ความร่วมมือในการปรับปรุงงานเต็มเวลา และทีมงานทุกคนเข้าร่วมประชุมหาสาเหตุของปัญหาและการแก้ปัญหาของโครงการ

**Project Constraints:**

- ในการปรับปรุงแก้ไข หากมีความจำเป็นจะต้องมีการดัดแปลงเครื่องจักร หรือปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตต้องได้รับการอนุมัติจากผู้จัดการฝ่ายผลิต

**Problem Statement:**

เกิดมูลค่าการสูญเสียจากกระบวนการผลิตในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าบนผิวรถบรรทุก มีมูลค่าการสูญเสียจากต้นทุนการผลิต 528,645 บาท ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม 2556 โดยของเสียเกิดขึ้นจากความหนาฟิล์ม ไม่ได้ค่ากลางที่ 20 ไมครอน และค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) เท่ากับ 0.49 และคิดเป็นการสูญเสียต้นทุนทางการผลิตต่อคันที่เพิ่มขึ้นจากค่ามาตรฐานคิดเป็น 390 บาทต่อคัน

เมื่อคิดจากการผลิตรถรุ่น FML2 ต่อปีคือ 2,711 คัน จะทำให้สูญเสียต้นทุนทางการผลิตเพิ่มเป็น 1,057,290 บาทต่อปี

**Team Member:**

| | |
|---|---|
| นายธวัชชัย ชุติวรรณ | ผู้จัดการฝ่ายผลิต |
| นายชุณหรัตน์ เหลืองไพศาลกิจ | วิศวกรควบคุมคุณภาพ |
| นายโยธิน โอฬาริการ | วิศวกรควบคุมกระบวนการชุบสี |
| นายอมรศักดิ์ ใจดี | หัวหน้างานกระบวนการชุบสี |
| นายจีรศักดิ์ เชิดชู | หัวหน้างานกระบวนการพ่นสี |
| นางสาวพรณัชชา แก้วชิงดวง | เจ้าหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพ |
| นางสาวปิยธิดา เสริมสุข | เจ้าหน้าที่ด้านเอกสาร |
| นางสาวศศิธร ขำกรณ์ | หัวหน้าโครงการ |

**Time Line:**

| | แผนสิ้นสุด | Actual |
|---|---|---|
| Define Phase | 29 พ.ค. 57 | _____ |
| Measurement Phase | 20 มิ.ย. 57 | _____ |
| Analysis Phase | 21 ก.ค.57 | _____ |
| Improve Phase | 29 ส.ค.57 | _____ |
| Control Phase | 30 ต.ค.57 | _____ |

รูปที่ 3.7 Project Charter ที่มีส่วนร่วมในการวิจัย

### 3.4 สรุปนิยามปัญหา

ในระยะนิยามปัญหาจากการจัดตั้งคณะทีมงานจากที่กล่าวในบทที่ 1 ทางทีมงานได้ศึกษาและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับจำนวนปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบสี EDP เพื่อจะเป็นหลักฐานอ้างอิงในการทำการวิเคราะห์และแก้ไขต่อไป ทางผู้วิจัยจะเน้นปัญหาเรื่อง ความหนาสี EDP ที่ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากที่สุด และมีผลกระทบต่อต้นทุนทางการผลิตมากที่สุด ทางผู้วิจัยและทีมงานจึงสนใจในการนำปัญหานี้มาทำการแก้ไข เพื่อลดต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุดและการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการชุบสี EDP เพื่อให้ค่าความหนาที่ต้องการตามมาตรฐานที่ 20 ไมครอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 4
# การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

## 4.1 บทนำ

จากที่ผู้วิจัยได้นิยามปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้นบทนี้จะทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยใช้เครื่องมือทางคุณภาพและสถิติ มาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความแม่นและเที่ยงของระบบการวัด ในการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตในปัจจุบัน จากนั้นระดมสมองเพื่อกรองหาปัจจัยนำเข้าที่มีผล (Key Process Input Variable หรือ KPIV) โดยใช้เครื่องมือต่างๆมาช่วยในการวิเคราะห์ เช่น ผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

## 4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis-MSA)

การเริ่มดำเนินการก่อนเก็บข้อมูลเพื่องานวิจัยนี้ ต้องทำการวิเคราะห์ระบบการวัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาเพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลได้ว่า การวัดได้มาตรฐาน ความเที่ยงและแม่นไม่มีผลต่อความผันแปรของข้อบกพร่องที่เกิดในกระบวนการ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรที่มีลักษณะเชิงผันแปร (Variable Characteristic) คือการนับข้อมูลแบบตัวเลข โดยใช้เครื่องมือวัดเข้ามาช่วย ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบความเที่ยงของระบบการวัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

1. ความแม่น (Accuracy) ของระบบการวัด คือการตรวจสอบระบบการวัดมีคุณสมบัติความถูกต้องทั้ง 3 ด้านคือ ด้านไบอัส ความเสถียร และคุณสมบัติเชิงเส้นตรงของระบบการวัด ซึ่งทางโรงงานมีการสอบเทียบ (Calibration) อยู่แล้ว ส่วนการตรวจสอบความเที่ยง (Precision) ของระบบการวัด แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และความสามารถในการทำเหมือน (Reproducibility) ซึ่งการประเมินผลความแม่นจะพิจารณาโดยใช้วิธีการที่เรียกว่า GR&R (Gage Repeatability and Reproducibility Analysis)
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์เที่ยงของระบบการวัดมีดังนี้

1) เครื่องมือวัดที่ใช้

กำหนดให้มีการใช้เครื่องมือวัดเรียกว่าเครื่อง Digital Coating Thickness Gauge ที่ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) ตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้คือปีละ 2 ครั้ง

รูปที่ 4.1 เครื่องมือวัด Digital Coating Thickness Gauge

2) จำนวนพนักงานวัดที่ใช้

ทำการสุ่มพนักงานที่มีหน้าที่ในการวัดงานที่ผ่านการฝึกอบรมในด้านการใช้งานและทำงานประจำที่จุดวัดงานมาทำการศึกษา 2 คน จากทั้งหมด 4 คน

3) จำนวนรถตัวอย่างที่ใช้วัด

ทำการคัดแยกรถที่จะทำการวัดที่มีค่าแตกต่างกันในช่วงของความผันแปรของกระบวนการจำนวนรถ 10 คัน

4) จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับชิ้นงานตัวอย่างแต่ละชิ้น กำหนดให้พนักงานวัดแต่ละคนมีการวัดซ้ำคนละ 3 ครั้งต่อคัน อ้างอิงจากงานวิจัยเรื่องขนาดตัวอย่าง GRR [19]

5) การดำเนินการทดลอง

ใช้การทดลองแบบบล็อก (Randomized Block Design) โดยมีพนักงานวัดเป็นปัจจัยที่ทำการศึกษา และรถคือบล็อก ซึ่งลำดับในการทดลองเป็นไปจากการสุ่ม และได้ผลการทดลอง

3. หลักเกณฑ์ในการพิจารณาค่า % Gage R&R ตามมาตรฐานที่กำหนดคือ

1) % Gage R&R < 10% แสดงว่าสามารถยอมรับผลจากระบบการวัดได้

2) 10% <% Gage R&R < 30% แสดงว่าอาจจะยอมรับผลจากระบบการวัดได้

3) % Gage R&R > 30% แสดงว่าไม่สามารถยอมรับผลจากระบบการวัดได้

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความหนาสีชิ้นงานบนตัวรถในการวิเคราะห์ความแม่นของเครื่องมือวัด

| ตัวอย่างรถ วัดความหนาสี | พนักงานวัดคนที่ 1 | | | พนักงานวัดคนที่ 2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| 1 | 18.6 | 18.3 | 18.2 | 18.6 | 18 | 18.3 |
| 2 | 21.2 | 21.2 | 21 | 20.6 | 22.2 | 21 |
| 3 | 21 | 21 | 21.2 | 21.2 | 21.5 | 21.3 |
| 4 | 20.1 | 20.6 | 20.5 | 20.8 | 20.8 | 20.5 |
| 5 | 20.8 | 20.6 | 20.5 | 20.6 | 21.2 | 20.8 |
| 6 | 19.9 | 19.9 | 19.8 | 19.7 | 20.2 | 20 |
| 7 | 19.4 | 19.2 | 19.4 | 19.3 | 20.3 | 19.7 |
| 8 | 19.4 | 19.3 | 19.2 | 19.7 | 19.5 | 19.5 |
| 9 | 19.7 | 19 | 19.5 | 19.1 | 19.6 | 19.3 |
| 10 | 18 | 18.3 | 18.2 | 17.9 | 18.6 | 18 |

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดความหนาสีด้วยเครื่อง Coating Thickness

# Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Thickness

Gage name: Coating Thickness measurement
Date of study: 30-05-2014
Reported by: Sasithorn Khumgorn
Tolerance:
Misc:

## Two-Way ANOVA Table With Interaction

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Parts | 9 | 63.4827 | 7.05363 | 165.895 | 0.000 |
| Operators | 1 | 0.3840 | 0.38400 | 9.031 | 0.015 |
| Parts * Operators | 9 | 0.3827 | 0.04252 | 0.470 | 0.886 |
| Repeatability | 40 | 3.6200 | 0.09050 | | |
| Total | 59 | 67.8693 | | | |

## Two-Way ANOVA Table Without Interaction

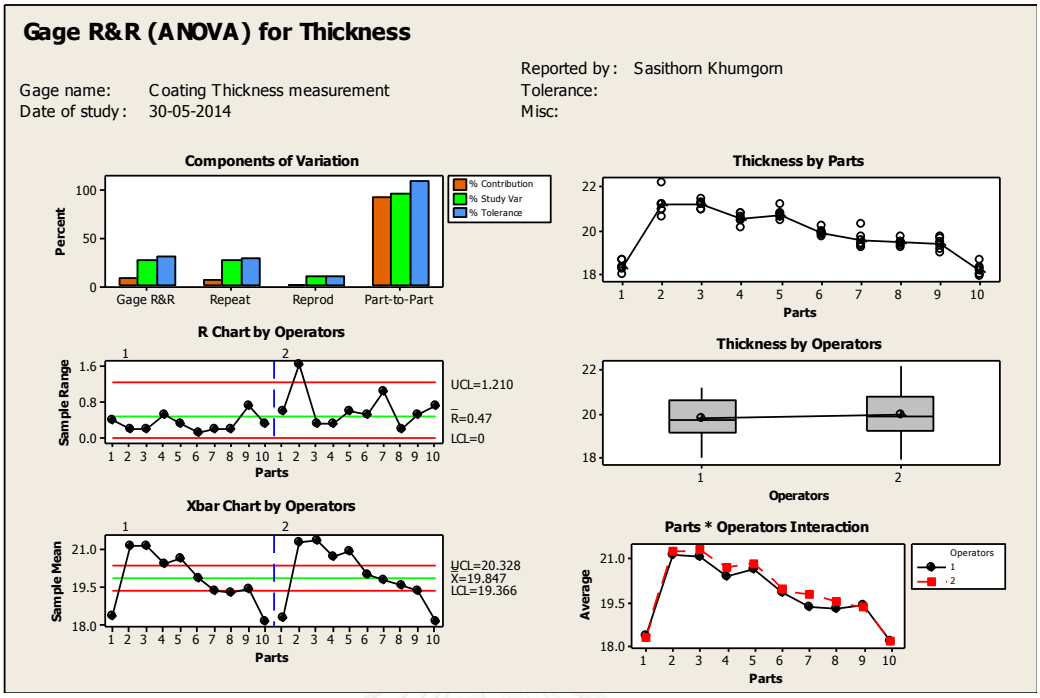
| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Parts | 9 | 63.4827 | 7.05363 | 86.3494 | 0.000 |
| Operators | 1 | 0.3840 | 0.38400 | 4.7009 | 0.035 |
| Repeatability | 49 | 4.0027 | 0.08169 | | |
| Total | 59 | 67.8693 | | | |

## Gage R&R

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|---|---|---|
| Total Gage R&R | 0.09176 | 7.32 |
| Repeatability | 0.08169 | 6.52 |
| Reproducibility | 0.01008 | 0.80 |
| Operators | 0.01008 | 0.80 |
| Part-To-Part | 1.16199 | 92.68 |
| Total Variation | 1.25375 | 100.00 |

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|---|---|---|---|---|
| Total Gage R&R | 0.30293 | 1.81756 | 27.05 | 30.29 |
| Repeatability | 0.28581 | 1.71486 | 25.53 | 28.58 |
| Reproducibility | 0.10038 | 0.60231 | 8.97 | 10.04 |
| Operators | 0.10038 | 0.60231 | 8.97 | 10.04 |
| Part-To-Part | 1.07796 | 6.46774 | 96.27 | 107.80 |
| Total Variation | 1.11971 | 6.71827 | 100.00 | 111.97 |

Number of Distinct Categories = 5




รูปที่ 4.2 การทบทวนข้อมูลระบบการวัดค่าความหนาสีของกระบวนการ EDP

จากตารางที่ 4.2 พบว่าความผันแปรของการวัดทั้งระบบ (%GR&R) หรือ Precision to total variation Ratio) มีค่าเท่ากับ 27.05% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของการยอมรับได้เนื่องจากตามมาตรฐานที่กำหนดคือ 10% < % Gage R&R < 30% ค่าน้อยกว่า 30% แสดงว่ายอมรับระบบการวัดได้ พิจารณาจากตัววัด %Gage R&R หรือ P/TV เป็นหลัก ไม่พิจารณาค่า P/T ซึ่งเทียบกับ Tolerance เพราะจุดประสงค์หลักของการวัด เพื่อแยกแยะความแตกต่างของงานที่มีความผันแปรในกระบวนการ จึงได้พิจารณาค่า Precision เทียบกับ Total Variation ไม่เทียบกับ Tolerance

## 4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตรถบรรทุกในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า

เนื่องจากการวิเคราะห์ความเที่ยงและแม่นของระบบการวัดของการตรวจสอบความหนาสีของกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดังนั้นการศึกษาความสามารถของกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ในรถรุ่น FML2 สามารถศึกษาได้จากข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ความเที่ยงและแม่นของระบบการวัดข้อมูลจากจำนวนข้อมูลวัดเก็บข้อมูลความหนาสีต่อจำนวนปริมาณการผลิต ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตด้วยข้อมูลระหว่างเดือนมกราคมจนถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ.2556 ทำการเก็บข้อมูล 128 ตัวอย่าง ซึ่งใช้ขนาดตัวอย่างตามสูตร โดย

การวัดข้อมูลเชิงตัวเลขโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี บนตัวรถรุ่น FML2 ที่ทำการผลิตออกมา ดังรูปที่ 3.4 ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 พบว่าข้อมูลความหนาสี ไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ อีกทั้งยังมีสภาวะออกนอกการควบคุม (out-of-control) ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถ จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการตามที่กล่าวมา

**4.4 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV)**

จากการระดมสมองของทีมงานวิจัย และการอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม พบว่าสาเหตุของความหนาฟิล์มสี EDP ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ค่ากลาง 20 ไมครอน และทำให้เปลืองต้นทุนในทางการผลิต มีปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลโดยแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ทั้งหมด 6 กลุ่ม ดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
2. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
4. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
5. ปัจจัยที่เกิดจากการวัด (Measurement)
6. ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

โดยแสดงรายละเอียดในแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ของข้อบกพร่องความหนาฟิล์มสี EDP ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ค่ากลาง 20 ไมครอน ดังรูปที่ 3.7 ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

จากแผนผังแสดงเหตุและผล(Cause and Effect Diagram) ในรูปที่ 3.7 พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องความหนาสี EDP ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ มีทั้งหมด 6 หมวดหมู่ของปัจจัย ดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material) วัตถุดิบในกระบวนการชุบสี EDP ได้แก่ ตัวรถที่มีการปนเปื้อนของปริมาณน้ำมันมากเกินไป ถ้าในกระบวนการล้างทำความสะอาดคราบน้ำมันไม่หมด อาจจะส่งผลกระทบถึงการชุบสี EDP ไม่ติดและไม่ได้คุณภาพ และคุณภาพของตัวรถเข้ามาไม่คงที่คือ ผิวรถหรือวัสดุอาจจะมีรอยขีดข่วน ความหนาของผิว

วัสดุไม่คงที่ในแต่ละจุดของตัวรถ อาจส่งผลกระทบถึงความหนาหลังจากการชุบสี EDP ไม่สม่ำเสมอและไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

2. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine) เครื่องจักรในกระบวนการชุบสี EDP ที่มีผลต่อคุณภาพความหนาสีไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ ได้แก่ การติดแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าไม่แน่นหรือไม่สะอาด การดูแลรักษาเครื่องจักรยังไม่ดีพอ อาจส่งผลกระทบต่อความหนาสีไม่ได้มาตรฐานที่กำหนดไว้
3. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method) จากประสบการณ์ของทีมงานวิจัย พบว่าในกระบวนการชุบสี EDP อาจจะมีวิธีการทำงานที่ไม่เหมาะสม ในการป้อนแรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นของสีและระยะเวลาในการชุบ ซึ่งบางวิธีการทำงานอาจจะไม่เหมาะสมหรือเกินความจำเป็นมากเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพความหนาสีไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้แล้วยังเปลืองต้นทุนในการผลิตมากขึ้นด้วย
4. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man) พนักงานในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า มีหลายขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยากและต้องใช้รายละเอียดเยอะในการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้พนักงานที่มีทักษะและความชำนาญสูง สาเหตุที่มาจากพนักงาน มีดังนี้

   4.1 พนักงานไม่ปฏิบัติตามคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction: WI)

   4.2 พนักงานยังขาดความชำนาญ ในการปฏิบัติงาน

   4.3 พนักงานใหม่ยังขาดประสบการณ์และทักษะในการทำงาน
5. ปัจจัยที่เกิดจากการวัด (Measurement) การวัดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตอย่างมาก เพราะการวัดเป็นเครื่องมือในการควบคุมกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นการประกันคุณภาพให้แก่ลูกค้า โดยตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบของระบบการวัดได้แก่ อุปกรณ์ที่ไม่ทันสมัย ซึ่งอาจจะวัดข้อมูลได้ล่าช้าและไม่แม่นยำมากพอ รวมทั้งไม่สามารถเตรวจสอบพารามิเตอร์สารเคมีบางตัวได้ อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพความหนาสีในกระบวนการ EDP ได้
6. ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environment) ปัจจัยภายนอกที่อาจจะมีผลต่อคุณภาพความหนาสี ได้แก่ ระบบระบายอากาศไม่เพียงพอและสถานที่ทำงานที่แออัด ทำให้พนักงานที่ปฏิบัติงานเกิดความเมื่อยล้าและเสียสมาธิในการทำงานได้ง่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**4.5 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า**

ในงานวิจัยฉบับนี้ ทางผู้วิจัยสนใจศึกษาเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า เพื่อให้ได้ค่าความหนาที่อยู่ในมาตรฐาน การลดต้นทุนในการผลิต และการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้สูงขึ้น โดยการปรับปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความหนาสีให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการระดมสมองจากทีมงานวิจัยเพื่อค้นหาปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่เกี่ยวข้องและนำเทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาจากตารางแสดงเหตุและผล(Cause and Effect Matrix) มาใช้คัดกรองปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบมาก เพื่อใช้เป็นปัจจัยในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลและรายละเอียดของปัจจัยนำเข้าต่างๆ ในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า จากนั้นระดมสมองกับทีมงานเพื่อค้นหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความหนาสี โดยทีมงานทุกคนมีอิสระในการเสนอความคิด เสนอแนะ และเทคนิคต่างๆ โดยไม่มีการปรึกษากัน จากนั้นคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะใช้วิเคราะห์ที่มีผลกระทบต่อความหนาสี
2. การตั้งค่าปัจจัยนำเข้าแต่ละค่านั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ปัจจัยนำเข้าที่ปรับค่าได้และปัจจัยนำเข้าที่ไม่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้
   2.1 ปัจจัยนำเข้าที่สามารถปรับค่าได้ หมายถึง ปัจจัยนำเข้าที่อ้างอิงจากมาตรฐานการทำงานของกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ที่ระบุค่าปัจจัยนำเข้าเป็นช่วงของการปรับตั้งค่า ซึ่งช่วงของการปรับตั้งค่านี้มาจากทางผู้ผลิตสารเคมีและได้ร่วมทำการทดลองในช่วงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หากมีการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยนำเข้าเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความหนาสี ดังนั้นจึงพิจารณานำค่าปัจจัยนำเข้าเหล่านี้มาทดลอง เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในช่วงที่กำหนดในมาตรฐาน เพื่อปรับปรุงความหนาสีในรถรุ่น FML2
   2.2 ปัจจัยนำเข้าที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้ หมายถึง ปัจจัยนำเข้าที่อ้างอิงตามมาตรฐานการปฏิบัติงานกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ที่ระบุเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่ในการปรับตั้งค่านี้ได้มาจากการทดลองในช่วงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หากมีการปรับค่าปัจจัยนำเข้าเหล่านี้เป็นค่าคงที่ จะไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาสี ดังนั้นจึงไม่นำมาทดลองปรับตั้งค่าเพื่อแก้ปัญหาความหนาสีในรถรุ่น FML2

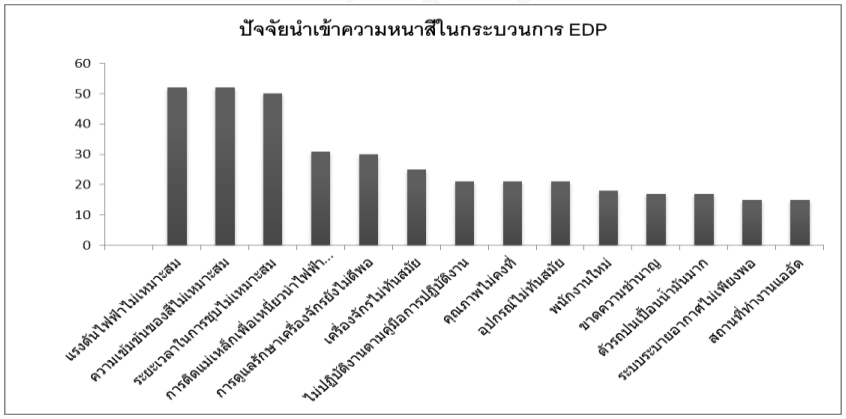
3. นำปัจจัยนำเข้าที่ปรับค่าเป็นช่วงทั้งหมด ใส่ลงในตารางแสดงเหตุและผล(Cause and Effect Matrix) โดยให้ทีมงานที่เกี่ยวข้องทำการลงคะแนนความสำคัญให้กับปัจจัยนำเข้า ซึ่งการให้คะแนนจะขึ้นอยู่กับทักษะ ความรู้และประสบการณ์การทำงานของพนักงานที่ทำการประเมินแต่ละคน โดยการให้คะแนนจะเป็นอิสระต่อกัน คะแนนที่ให้แต่ละคนจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 คะแนน ซึ่งเกณฑ์การให้คะแนนมีความสัมพันธ์ ดังนี้

   1 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้านั้นกับตัวแปรตอบสนองน้อยมาก

   10 = มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้านั้นกับตัวแปรตอบสนองมากที่สุด

4. รวบรวมคะแนนของทีมงานแต่ละคน จากนั้นทำการรวบรวมคะแนนที่ได้ทั้งหมดในแต่ละปัจจัยนำเข้า และสรุปผลคะแนนที่ได้จากตารางแสดงเหตุและผล(Cause and Effect Diagram) ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการให้คะแนนของทีมงานที่เกี่ยวข้องมีแนวโน้วไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นนำคะแนนที่ได้มาจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าโดยเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อย ดังตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3

จากการให้คะแนนของทีมงานแต่ละคน พบว่าผลที่ได้จากการให้คะแนนของทีมงานมีความคิดที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นนำคะแนนที่ได้มารวมกันเป็นผลรวมในแต่ละปัจจัยนำเข้า และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าโดยเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อยของผลรวม ดังนี้




รูปที่ 4.3 แผนภูมิแท่งเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าความหนาสีในกระบวนการ EDP

จากตารางผลการให้คะแนนของทีมงานที่เกี่ยวข้องและแผนภูมิแท่งเพื่อจัดเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า พบว่าผลรวมคะแนนทั้งหมดเท่ากับ 385 คะแนน หลังจากนั้นเลือกปัจจัยนำเข้าตามลำดับความสำคัญมากที่สุด 3 ลำดับแรก เพื่อนำไปเป็นปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยเทคนิคการออกแบบการทดลอง ดังนี้

ความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า มีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้

1) แรงดันไฟฟ้าไม่เหมาะสม คะแนนรวม 52 คะแนน
2) ความเข้มข้นของสีไม่เหมาะสม คะแนนรวม 52 คะแนน
3) ระยะเวลาในการชุบไม่เหมาะสม คะแนนรวม 50 คะแนน

และผลรวมคะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยทั้งหมดที่นำไปเป็นปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยเทคนิคการออกแบบการทดลอง เท่ากับ 154 คะแนน คิดเป็น 40% ของคะแนนรวมทั้งหมด

ทีมงาน สรุปว่าปัจจัยที่มีผลกระทบน้อยต่อความหนาในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า และกำหนดให้เป็นปัจจัยควบคุมในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าในรถรุ่น FML2 ได้แก่ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material) เนื่องจากสามารถควบคุมปัญหามาจากผู้ผลิตวัตถุดิบได้ ปัจจัยที่เกิดจากพนักงาน (Man) สามารถแก้ไขได้โดยการอบรมและการประเมินวิธีการทำงานของพนักงาน ปัจจัยที่เกิดจากการวัด (Method) สามารถสั่งซื้ออุปกรณ์ที่ทันสมัยมาควบคุมวิธีการวัดพารามิเตอร์ต่างๆได้แม่นยำมากขึ้น ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environment) สามารถแจ้งเจ้าหน้าที่ฝ่ายสิ่งแวดล้อมมาตรวจสอบสภาพแวดล้อมการทำงานและดำเนินการแก้ไข ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine) สามารถแก้ไขการต่อความสูงบ่อและอัตราการไหลที่เหมาะสมโดยวิศวกรโครงการ เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสีต่อไปได้ ส่วนวิธีการดูแลเครื่องจักรแก้ไขโดยการให้ผู้ผลิตเครื่องจักรมาทำการอบรมพนักงานฝ่ายซ่อมบำรุง เพื่อเข้าใจวิธีการดูแลรักษาเครื่องจักรที่ดีขึ้น แต่ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีผลกระทบต่อความหนาสีในกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าที่ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ เนื่องจากพนักงานไม่ทราบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการชุบของรถรุ่น FML2 ซึ่งอาจจะตั้งค่าปรับตั้งพารามิเตอร์บางตัวมากเกินความจำเป็น แล้วยังจะส่งผลถึงต้นทุนการผลิตที่สูง ในวิธีการปรับแรงดันไฟฟ้า ระยะเวลาในการชุบและความเข้มข้นของสีไม่เหมาะสม จึงจะกำหนดเป็นปัจจัยนำเข้าในการทดลองสำหรับงานวิจัยฉบับนี้

ผู้วิจัยจึงเลือกปรับปรุง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสี เวลาในการชุบ และแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและลดต้นทุนทางการผลิต

## 4.6 สรุปผลขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

ผลที่ได้รับจากการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา สามารถสรุปได้ ดังนี้

4.6.1 การวิเคราะห์ความแม่นและเที่ยงของระบบการวัดข้อมูลแบบ Variable

ในระบบการวัดความสามารถในการตรวจสอบความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ในรถรุ่น FML2 พบว่า ผลการวิเคราะห์ %GR&R มีค่าเท่ากับ 27.05% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของการยอมรับได้เนื่องจากตามมาตรฐานที่กำหนด

4.6.2 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

จากผลการวิเคราะห์ความแม่นและเที่ยงของระบบการวัด ของพนักงานตรวจสอบทุกคนผ่านที่กำหนด ดังนั้น การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า สามารถศึกษาได้จากการเก็บข้อมูล 128 ข้อมูลในระหว่างเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม ปี พ.ศ. 2556 พบว่ารถรุ่น FML2 มีความแปรผันค่อนข้างสูง จากข้อมูลพบว่าค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าเป้าหมาย จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการ

4.6.3 การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable)

จากการระดมสมองของสมาชิกทีมงานวิจัย พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาสี มีทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
2. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)

4. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)

5. ปัจจัยที่เกิดจากการวัด (Measurement)

6. ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

จากนั้นแล้วพิจารณาทั้ง 6 ปัจจัยและพบว่าปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ(Method) ในการกำหนดเงื่อนไขการตั้งค่าด้วยการปรับค่าปัจจัยนำเข้าของความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ในรถรุ่น FML2 ส่วนปัจจัยด้านอื่นมีอิทธิพลน้อยต่อความหนาสี ดังนั้นจึงกำหนดทั้ง 3 ปัจจัยในวิธีการ (Method) เป็นปัจจัยควบคุมในการทดลองของงานวิจัยนี้

4.6.4 การวิเคราะห์ปัจจัยจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

จากการระดมสมองของสมาชิกทีมงานวิจัย พบว่า ปัจจัยนำเข้ามาพิจารณาทั้งหมด 14 ปัจจัย เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลของกระบวนการ (KPOV) และปัจจัยนำเข้า (KPIV) ในตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) จากนั้นเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญโดยพิจารณาจากผลรวมของคะแนนของแต่ละปัจจัย พบว่ามีปัจจัย 3 ปัจจัยคือ

1. ความเข้มข้นของสี
2. ระยะเวลาในการชุบ
3. แรงดันไฟฟ้า

จากการให้คะแนนและความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) พบว่า ผลรวมคะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยทั้งหมดที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบการทดลอง เท่ากับ 154 คะแนน จากคะแนนรวมทั้งหมด 385 คะแนน คิดเป็น 40% ของคะแนนรวมทั้งหมด จึงนำไปวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 5
# การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

## 5.1 บทนำ

นี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่มีผลต่อปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ที่ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามค่ากลางที่กำหนดไว้ที่ 20 ไมครอน ซึ่งส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพแล้วยังส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงใช้ขั้นตอนและคัดกรองปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหา แล้วยังสามารถสรุปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบว่ามีอะไรบ้าง

## 5.2 การเลือกรูปแบบในการทดลอง

ในการทดลองความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้านั้น จะนำตัวรถมาผ่านกระบวนการทางเคมีในขั้นตอนต่างๆ เพื่อชำระทำความสะอาดผิวรถเบื้องต้น หลังจากนั้นจึงผ่านการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ผิวรถก็จะเกิดการสร้างความหนาฟิล์มขึ้นมาด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี แต่เนื่องจากตัวรถที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูงจึงต้องเลือกรูปแบบการทดลองที่จำนวนการทดลองไม่มาก และส่งผลกระทบต่อตัวรถน้อยที่สุดในด้านคุณภาพและกำลังความสามารถในการผลิต ดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงตัดสินใจเลือกรูปแบบการทดลองเป็นการออกแบบทดลองแบบเชิงแฟคเทอเรียล $2^k$ แบบ 1 เรพลิเคต ($2^k$ Factorial Design Single Replicate) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าและต้นทุนทางการผลิต แบบการทดลองที่เลือกนี้เหมาะสมสำหรับการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Experiment) ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) โดยการทดลองนี้แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับที่มีข้อมูลเป็นแบบผันแปร (Variable Characteristic) และแบบการทดลองนี้ช่วยให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง และสามารถทดสอบการมีอันตรกริยาระหว่างปัจจัยในการทดลอง

**5.3 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า**

จากการวิเคราะห์และคัดเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาสีที่ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ด้วยการระดมสมองจากสมาชิกในทีมงานวิจัยด้วยตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) สามารถคัดกรองเลือกปัจจัยนำเข้าที่อาจจะมีผลกระทบต่อความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ดังนี้

ในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า มีปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสี ซึ่งจะทดสอบทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้ แรงดันไฟฟ้า เวลา และความเข้มข้นของสี รวมทั้งยังมีการคิดต้นทุนในแต่ละสภาวะการทดลองและจะกำหนดเป็นค่าตัวแปรตอบสนองอีกตัวแปรหนึ่ง เพื่อมาคัดกรองหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนทางการผลิตที่เกี่ยวข้องที่ต่ำที่สุด

การกำหนดระดับของปัจจัยที่นำเข้า จะกำหนดตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐานของกระบวนการผลิตหรืออยู่ในช่วงมาตรฐานของวัตถุดิบที่ได้ข้อมูลมาจากผู้ผลิตสีที่ใช้ในการชุบ ซึ่งไม่ใช่ค่าการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่ระดับต่ำที่สุดและระดับสูงที่สุดที่เครื่องจักรปรับตั้งค่าได้

ซึ่งแต่ละปัจจัยนำเข้าแบ่งได้เป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) โดยระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแสดงดังตาราง ที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแบบ $2^k$ Full Factorial Design

| สัญลักษณ์ของปัจจัย | ปัจจัยนำเข้า | หน่วย | ระดับต่ำ (-1) | ระดับสูง (+1) |
|---|---|---|---|---|
| A | ความเข้มข้นของสี | %Solid | 18.11 | 19.89 |
| B | เวลา | นาที | 3.51 | 4.99 |
| C | แรงดันไฟฟ้า | โวลต์ | 310 | 340 |

**5.4 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง**

ในการทดลองนี้ ผู้ทำงานวิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาตัวแปรตอบสนอง (Response) 2 ตัวแปร ได้แก่ความหนาสีและต้นทุนในการผลิต ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งสามคือ ความเข้มข้นของสี แรงดันไฟฟ้าและเวลาในการชุบ โดยศึกษาในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ของรถรุ่น FML2

5.4.1 ตัวแปรตอบสนองด้านความหนาสี

ขั้นตอนในการตรวจวัดความหนาสี จะใช้เครื่องมือทดสอบ Coating Thickness Gauge ยี่ห้อ Phynix Germany รุ่น Surfix F (Basic) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1 และมีขั้นตอนในการตรวจสอบดังนี้

รูปที่ 5.1 เครื่องวัดความหนาสี ยี่ห้อ Phynix Germany รุ่น Surfix F (Basic)

1. นำตัวรถที่ผ่านกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้วไปเก็บไว้บริเวณพื้นที่ตรวจสอบคุณภาพของตัวรถ
2. หลังจากนั้นนำรถมาทำการตรวจสอบความหนาสีด้วยเครื่องมือวัด Coating Thickness Gauge ที่ช่วงค่ามาตรฐาน 17 – 23 ไมครอนตามมาตรฐานของโรงงาน ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการควบคุมอยู่ที่ค่ากลางคือที่ 20 ไมครอน โดยนำหัว Probe ของเครื่อง Coating Thickness Gauge ไปวางให้แนบสนิทบนผิวชิ้นงาน บริเวณที่ต้องการจะวัด ดังรูปที่ 5.2

รูปที่ 5.2 การนำเครื่อง Coating Thickness Gauge วัดบนผิวชิ้นงาน

3. อ่านค่าตรงหน้าปัดของเครื่องที่เป็นตัวเลขแบบ Digital
4. ทำการบันทึกค่าที่วัดได้ในเอกสารของโรงงานกรณีศึกษา

5.4.2 ตัวแปรตอบสนองด้านต้นทุนทางการผลิต

ในการคำนวณต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ปัจจัยที่เลือกศึกษาถึงผลกระทบที่มีผลต่อต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสี เวลาในการชุบ และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ

1. ความเข้มข้นของสี

ความเข้มข้นของสีมีผลต่อต้นทุนทางการผลิตคือ ถ้าความเข้มข้นของสีมาก จะทำให้ความหนาสีบนตัวรถมากขึ้นเช่นกัน ถ้าบนตัวรถมีความหนามากแสดงว่าปริมาณสีที่ไปติดบนตัวรถก็มากด้วย ดังนั้นการชุบที่ความเข้มข้นต่างๆ จึงมีผลต่อต้นทุนทางการผลิต ข้อมูลประกอบในการคำนวณหาต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสี มีดังนี้

1.1 ราคาต้นทุนสีที่ใช้ในการชุบ

ตารางที่ 5.2 ราคาวัตถุดิบของสีที่ใช้ในการชุบ

| รายการ | ชื่อวัตถุดิบ | ขนาดบรรจุภัณฑ์ (1 ถัง) | ราคา (บาท/กก.) |
|---|---|---|---|
| 1 | Pigment | 252 kg | 250 |
| 2 | Binder | 210 kg | 305 |
| 3 | Solvent no.1 | 30 kg | 166 |
| 4 | Solvent no.2 | 50 kg | 420 |

จากตารางที่ 5.2 จะนำมาคำนวณต้นทุนของสีในการชุบที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งวิธีการคำนวณคือ ที่ความเข้มข้นของสีที่ระดับต่างๆ มีต้นทุนการผลิตต่อคันเป็นเท่าไร แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การคำนวณต้นทุนการผลิตของสีที่ใช้ในการชุบ

| สารเคมี | ปริมาณการใช้สีที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (กิโลกรัมต่อคัน) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 17.5% | 18.5% | 19.0% | 19.89% | 20.5% |
| Pigment | 8.89 | 9.40 | 9.65 | 10.10 | 10.41 |
| Binder | 6.51 | 6.88 | 7.07 | 7.40 | 7.63 |
| Solvent 1 | 0.29 | 0.31 | 0.31 | 0.33 | 0.34 |
| Solvent 2 | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.23 |
| ต้นทุนของสีในการชุบ (บาทต่อคัน) | 4,340 | 4,588 | 4,713 | 4,933 | 5,083 |

จากตารางที่ 5.3 สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าความเข้มข้นสูงที่ 20.5 % ต้นทุนทางการผลิตจะมากที่สุด ส่วนที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 17.5 % ต้นทุนทางการผลิตจะต่ำที่สุด ส่วนต้นทุนค่าแรงในการ

เติมสีจะถือว่าเป็นค่าคงที่ เนื่องจากค่าแรงในการเติมสีที่ความเข้มข้นต่างๆใช้เวลาในการเติมและจำนวนคนเท่ากัน จึงไม่นำมาคำนวณในต้นทุนของสี

ดังนั้นจากข้อมูลต้นทุนความเข้มข้นของสีในการชุบที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของต้นทุนกับความเข้มข้นของสี ดังนี้

$$C_1 = 4.46 + 248\ X_1 \qquad (5\text{-}1)$$

$C_1$ = ต้นทุนในการเติมสี (บาทต่อคัน)

$X_1$ = ความเข้มข้นของสี (%Solid)

2. ระยะเวลาในการชุบ

การคำนวณต้นทุนจากระยะเวลาในการชุบ ที่เวลาชุบเปลี่ยนไปจะไม่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต ซึ่งต้นทุนที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ คือ ปริมาณการใช้น้ำ ไฟฟ้า ก๊าซและค่าแรง ทางโรงงานกรณีศึกษาการคิดต้นทุนจะให้ปริมาณการใช้น้ำ ไฟฟ้า และก๊าซ เป็นค่าคงที่ว่ารถ 1 คันใช้ปริมาณเท่าไร ส่วนค่าแรงก็จะเป็นค่าคงที่เช่นกัน อ้างอิงการผลิตที่ 25 คันต่อวัน แสดงต้นทุนต่อรถ 1 คัน ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าใช้จ่ายในการผลิตรถ 1 คัน

| รายการ | ปริมาณการใช้ต่อคัน | ราคาต่อหน่วย | ต้นุทนการผลิตต่อคัน(บาทต่อคัน) |
|---|---|---|---|
| น้ำ | 0.31 ลบ.ม | 10.5 บาท/ลบ.ม | 3 |
| ไฟฟ้า | 17.45 KWHr | 3.2 บาท/KWHr | 56 |
| ก๊าซ | 1.94 กิโลกรัม | 28.5 บาท/กิโลกรัม | 55 |
| ค่าแรง | - | - | 128 |
| ต้นทุนการผลิตรวม (บาท/คัน) | | | 242 |

จากตารางที่ 5.4 สามารถอธิบายได้ว่า รถ 1 คันจะมีต้นทุนทางการผลิตที่เกี่ยวกับการใช้ค่าใช้จ่ายในการผลิตและค่าแรง เท่ากับ 242 บาทต่อคัน

เวลาในการชุบมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตปัจจุบัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการชุบสีปัจจุบันเท่ากับ 5.5 นาที ซึ่งเป็นคอขวดของกระบวนการทำให้กำลังความสามารถในการผลิตรถได้น้อย ดังนั้นถ้าสามารถลดเวลาในการชุบลงได้ จะทำให้เพิ่มกำลังการผลิตรถได้มากขึ้น ดังนั้นเวลาในการชุบจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการชุบสี แสดงวิธีการคำนวณและความสามารถในการผลิตรถได้ที่เวลาชุบต่างกัน ในตารางที่ 5.5 ดังนี้

แสดงวิธีการคำนวณ

จำนวนรถที่ผลิตได้ต่อวัน = เวลาการทำงานจริง (นาที/วัน) / Takt time

เวลาทำงานจริง = 430 นาที/วัน

Takt time การทำงานปัจจุบัน = 5.5 นาที

ดังนั้นจำนวนรถที่ผลิตได้ = 430/5.5 = 78 คันต่อวัน

จากตัวอย่างวิธีการคำนวณที่ Takt time ปัจจุบัน จะสามารถผลิตรถได้ 78 คันต่อวัน แต่เนื่องจากยอดการสั่งซื้อจากลูกค้ามีปริมาณน้อย โรงงานกรณีศึกษาจึงมีการผลิตเพียงวันละ 25 คัน สามารถแสดงจำนวนรถที่ผลิตได้ในเวลาชุบที่ต่างกันดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 กำลังการผลิตรถที่เวลาต่างๆ

| เวลาใน การชุบ(นาที) | จำนวนรถ ที่ผลิตได้/วัน |
|---|---|
| 3.00 | 143 |
| 3.51 | 123 |
| 4.25 | 101 |
| 4.99 | 86 |
| 5.50 | 78 |

จากตารางที่ 5.5 สามารถอธิบายได้ว่า ที่เวลาในการชุบ 3 นาทีสามารถผลิตรถได้เป็นจำนวนมากกว่าที่เวลาในการชุบ 5.5 นาที สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 65 คันต่อวัน ดังนั้นถ้าผู้วิจัยสามารถปรับปรุงเวลาในการชุบให้น้อยลงได้ ในอนาคตจะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตที่มากขึ้นได้

3. แรงดันไฟฟ้า

การปรับแรงดันไฟฟ้าจะคิดแค่ในส่วนของค่าใช้จ่ายการผลิตคือ ค่าไฟฟ้าที่ใช้จ่ายเครื่อง Rectify ซึ่งเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ ซึ่งค่าใช้จ่ายจากส่วนนี้จะเป็นค่าคงที่ เนื่องจากเป็นไฟฟ้าที่ใช้ในการจ่ายเครื่องเท่านั้นจึงไม่มีผลต่อการปรับแรงดันไฟฟ้า แต่ในส่วนของการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ จะมีผลต่อการใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบ ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณดังนี้

1) ค่าไฟฟ้าที่ใช้จ่ายเครื่อง Rectify ซึ่งเป็นค่าคงที่ทุกสภาวะการทดลอง ราคาค่าไฟฟ้า 3.2 บาท/KWHr แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนค่าไฟฟ้าของเครื่อง Rectify

| Volt | กำลังของเครื่อง Rectify (KWHr) | Fix cost Rectify(Baht) |
|---|---|---|
| 300 | 3,420 | 10,944 |
| 310 | 3,420 | 10,944 |
| 325 | 3,420 | 10,944 |
| 340 | 3,420 | 10,944 |
| 350 | 3,420 | 10,944 |

จากตารางที่ 5.6 สามารถอธิบายได้ว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน ต้นทุนค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่อง Rectify จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อการนำไปคิดต้นทุนเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้า

2) ค่าไฟฟ้าในส่วนของการปรับแรงดันไฟฟ้าที่การทดลองระดับต่างๆ

แสดงวิธีการคิดกำลังไฟฟ้า หรือ Power คิดที่เวลาทำงาน 7.6 ชั่วโมงหรือ 430 นาทีดังนี้

กำลังไฟฟ้า = [(Volt (Volt) x Current (Amp))/1000 ] x 7.6 ชั่วโมง

= [(300 x 500)/1000] x 7.6

= 1,140 KWHr

ดังนั้นการคิดกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน ไฟฟ้า 300 โวลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 500 แอมแปร์จะได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,140 KWHr การชุบเป็นแบบที่กระแสไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ ตารางที่ 5.7 แสดงกำลังไฟฟ้าที่แรงดันระดับต่างๆดังนี้

ตารางที่ 5.7 กำลังไฟฟ้าที่แรงดันระดับต่างๆ

| Volt | Current(A) | Power (KWHr) |
|---|---|---|
| 300 | 500 | 1,140 |
| 310 | 500 | 1,178 |
| 325 | 500 | 1,235 |
| 340 | 500 | 1,292 |
| 350 | 500 | 1,330 |

จากตารางที่ 5.7 เมื่อได้ค่ากำลังการใช้ไฟฟ้าแล้ว สามารถนำข้อมูลไปคำนวณต้นทุนทางแรงดันไฟฟ้าดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ต้นทุนในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ

| Volt | Power (KWHr) | Cost (Baht) |
|---|---|---|
| 300 | 1,140 | 3,648 |
| 310 | 1,178 | 3,770 |
| 325 | 1,235 | 3,952 |
| 340 | 1,292 | 4,134 |
| 350 | 1,330 | 4,256 |

ดังนั้นต้นทุนการผลิตทั้งหมดในส่วนของการปรับแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 5.9 ดังนี้

ตารางที่ 5.9 แสดงต้นทุนการผลิตที่เกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละระดับ

| แรงดันไฟฟ้า | ต้นทุนการผลิต แรงดันไฟฟ้า (บาท) | จำนวนรถที่ผลิต/วัน (คัน) | ต้นทุนการผลิตต่อคัน (บาท/คัน) |
|---|---|---|---|
| 300 | 3,648 | 25 | 146 |
| 310 | 3,770 | 25 | 151 |
| 325 | 3,952 | 25 | 158 |
| 340 | 4,134 | 25 | 165 |
| 350 | 4,256 | 25 | 170 |

จากตารางที่ 5.9 จะพบว่าถ้าแรงดันไฟฟ้ายิ่งต่ำต้นทุนทางการผลิตก็จะลดลงเช่นกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าการคิดเป็นการใช้ต่อคัน จะอ้างอิงจากจำนวนรถผลิตต่อวัน 25 คัน จึงได้สมการแสดงความสัมพันธ์การคิดต้นทุนและแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$C_2 = \frac{[(\text{Volt (Volt)} \times 500)/1000\ ] \times 7.6 \text{ ชั่วโมง}}{\text{จำนวนรถที่ผลิตได้/วัน}} \times 3.2 \text{ บาท/KWHr}$$

ดังนั้น $C_2 = 0.49\ X_3$ (5–2)

$C_2$ = ต้นทุนแรงดันไฟฟ้า (บาทต่อคัน)

$X_3$ = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

ดังนั้นต้นทุนในการปรับของเวลาจะน้อยที่สุด ถ้าเทียบกับความเข้มข้นของสีและแรงดันไฟฟ้า แต่เวลาในการชุบเป็นค่าคงที่จึงไม่นำมาคำนวณในต้นทุนการผลิต จึงทำการคำนวณต้นทุนการผลิตจาก 2 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสีชุบและแรงดันไฟฟ้าในการชุบ รวมทั้ง 2 สมการ เพื่อเป็นต้นทุนการผลิตรวมทั้งหมดในแต่ละปัจจัย แสดงดังนี้

$$\text{Total Cost (Baht)} = 4.46 + 248\ X_1 + 0.49\ X_3 \quad (5\text{-}3)$$

Total Cost = ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด (บาทต่อคัน)

$X_1$ = ความเข้มข้นของสี (%Solid)

$X_3$ = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

แสดงตัวอย่างการคำนวณ ที่ระดับ 3 ซึ่ง ความเข้มข้นของสี เท่ากับ 19% Solid เวลาในการชุบ เท่ากับ 4.25 นาที และแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 325 โวลต์

แทนค่าในสมการที่ (5 – 3) : Total Cost = 4.46 + 248(19) + 0.49(325) ได้ดังนี้

= 4,876 บาทต่อคัน

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนในการผลิต 4,876 บาทต่อคัน

สภาวะการทำงานปัจจุบันในกระบวนการชุบมี ดังนี้คือ ความเข้มข้นของสี เท่ากับ 18.5 %Solid เวลาในการชุบ เท่ากับ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 320 โวลต์

แทนค่าในสมการที่ (5 – 4) : Total Cost = 4.46 + 248(18.5) + 0.49(320) ได้ดังนี้

= 4,749 บาทต่อคัน

ดังนั้นคิดเป็นต้นทุนในการผลิต 4,749 บาทต่อคัน ในสภาวะการทำงานในปัจจุบัน

**5.5 การออกแบบการทดลอง**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า จะใช้การทดลองแบบ$2^k$ Full Factorial Design และ 1 Replicate เพื่อใช้ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย จำนวนการทดลองมีทั้งหมด 3 ปัจจัยนำเข้าจะเท่ากับ $2^3$ จุดของแฟคตอเรียล จะเท่ากับ 8 การทดลอง ซึ่งในการทดลองนอกจากจะทราบปัจจัยที่มีนัยสำคัญแล้ว ยังทำให้ทราบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab ในการสร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) โดยกำหนดให้มีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ค่าสังเกตจากการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งมีรายละเอียดของการออกแบบการทดลองและเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ด้วยโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 5.10 ดังนี้

**Full Factorial Design**

Factors: 3 Base Design: 3, 8

Runs: 8 Replicates: 1

Blocks: 1 Center pts (total): 0

| Run | A | B | C |
|---|---|---|---|
| 1 | +1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | +1 | +1 |
| 3 | +1 | +1 | +1 |
| 4 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | -1 | +1 | -1 |
| 6 | -1 | -1 | +1 |
| 7 | +1 | +1 | -1 |
| 8 | +1 | -1 | +1 |

รูปที่ 5.3 รายละเอียดการออกแบบการทดลองความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า ที่มีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ สัญลักษณ์ – หรือ -1 หมายถึงระดับของปัจจัยที่มีระดับต่ำ (Low)

สัญลักษณ์ + หรือ +1 หมายถึงระดับของปัจจัยที่มีระดับสูง (High)

จากการออกแบบการทดลองใน Minitab แบบ $2^k$ Full Factorial Design จะสามารถสร้างเป็นตารางการออกแบบการทดลองได้ ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) ของความหนาสี

| StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | A | B | C |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 7 | 2 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 8 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | 5 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 5 | 6 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 4 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 6 | 8 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 |

จากผลการออกแบบการทดลองแบบ $2^k$ Full Factorial Design ในตารางที่ 5.10 พบว่าจะมีระดับการทดลองหลัก 2 ระดับในแต่ละปัจจัย ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ระดับการทดลองในแต่ละปัจจัย

| ระดับ | ความเข้มข้นของสี(%Solid) | เวลา(นาที) | แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) |
|---|---|---|---|
| -1 | 18.11 | 3.51 | 310 |
| +1 | 19.89 | 4.99 | 340 |

**5.6 ผลการทดลอง**

จากตารางที่ 5.12 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง ความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและรวมถึงต้นทุนในแต่ละสภาวะการทดลอง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองความหนาสีและต้นทุนการผลิต

| RunOrder | A | B | C | Thickness (μm) | Cost/Unit (Baht) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | -1 | -1 | 19.74 | 5,089 |
| 2 | -1 | 1 | 1 | 19.94 | 4,662 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 21.69 | 5,104 |
| 4 | -1 | -1 | -1 | 15.48 | 4,648 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | 18.80 | 4,648 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | 18.38 | 4,662 |
| 7 | 1 | 1 | -1 | 20.55 | 5,089 |
| 8 | 1 | -1 | 1 | 20.62 | 5,104 |

## 5.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลอง หลังจากนั้นถ้าหากว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดจึงจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในขั้นตอนดังต่อไปนี้

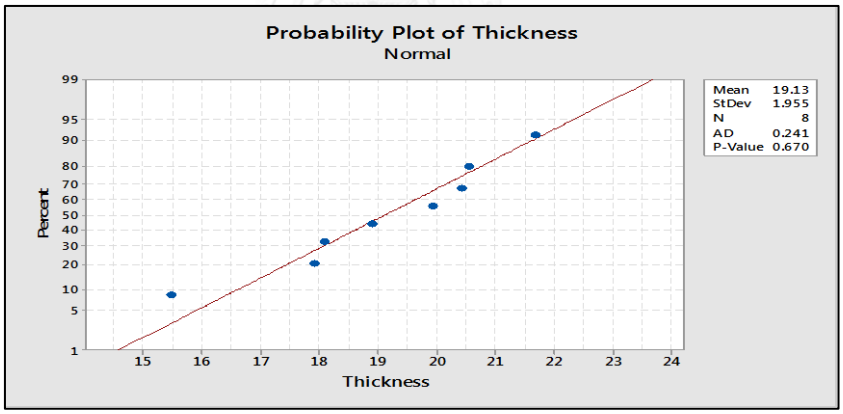
1. การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การออกแบบการทดลองความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์ โดยทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ว่ามีรูปแบบความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ

$\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}\ (0, \sigma^2)$ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคาดเคลื่อนของการทดสอบสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล สมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล มีค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างเท่ากับ 0 และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal Distribution)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของค่าตัวแปรตอบสนองว่ามีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ หากพิจารณา Normal Probability Plot ควรมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และหากทดสอบโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05

ผลการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล Normality Test แสดงดังรูปที่ 5.4

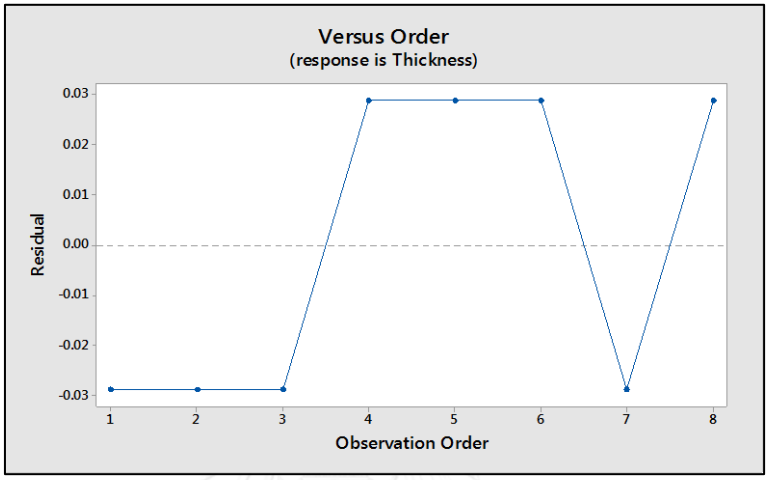



รูปที่ 5.4 การทดสอบสมติฐานของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ความหนาสี

เมื่อพิจารณากราฟแสดงค่าส่วนตกค้างของข้อมูล ในรูปที่ 5.4 เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.670 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) การทดสอบสมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independently of Residual)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบที่แน่นอน

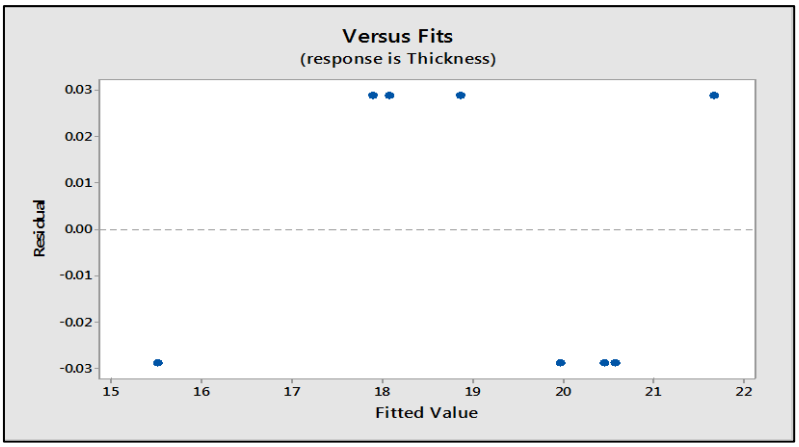



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล ความหนาสี

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองในรูปที่ 5.5 เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ฉะนั้น จึงสรุปได้ว่าลำดับของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองอยู่ภายใต้ความสุ่ม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3) การทดสอบสมมติฐานของความมีสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Constant Variance)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด




รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ความหนาสี

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (Fitted Value) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวไม่มีลักษณะเป็นรูปพัดหรือปากแตร จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรตอบสนอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างเท่ากับ 0 และมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จึงเป็นไปตามเงื่อนไข $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}\ (0, \sigma^2)$ ของการออกแบบการทดลอง ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้

2. การวิเคราะห์ผลการทดลองความหนาสีหลังจากที่ข้อมูลผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลมาแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองความหนาสี และต้นทุนในการผลิตด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ออกแบบการทดลอง ดังนี้

ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาสี ด้วยโปรแกรม Minitab

**Factorial Regression: Thickness versus A, B, C**

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 6 | 26.7598 | 4.4600 | 674.47 | 0.029 |
| Linear | 3 | 25.9396 | 8.6465 | 1307.61 | 0.020 |
| A | 1 | 12.7765 | 12.7765 | 1932.18 | 0.014 |
| B | 1 | 7.1253 | 7.1253 | 1077.55 | 0.019 |
| C | 1 | 6.0378 | 6.0378 | 913.09 | 0.021 |
| 2-Way Interactions | 3 | 0.8201 | 0.2734 | 41.34 | 0.114 |
| A*B | 1 | 0.3655 | 0.3655 | 55.28 | 0.085 |
| A*C | 1 | 0.3321 | 0.3321 | 50.22 | 0.089 |
| B*C | 1 | 0.1225 | 0.1225 | 18.53 | 0.145 |
| Error | 1 | 0.0066 | 0.0066 | | |
| Total | 7 | 26.7664 | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---|---|---|---|
| 0.0813173 | 99.98% | 99.83% | 98.42% |

Coded Coefficients

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Constant | | 19.1263 | 0.0287 | 665.26 | 0.001 | |
| A | 2.5275 | 1.2638 | 0.0287 | 43.96 | 0.014 | 1.00 |
| B | 1.8875 | 0.9438 | 0.0287 | 32.83 | 0.019 | 1.00 |
| C | 1.7375 | 0.8688 | 0.0287 | 30.22 | 0.021 | 1.00 |
| A*B | -0.4275 | -0.2138 | 0.0287 | -7.43 | 0.085 | 1.00 |
| A*C | -0.4075 | -0.2037 | 0.0287 | -7.09 | 0.089 | 1.00 |
| B*C | -0.2475 | -0.1238 | 0.0287 | -4.30 | 0.145 | 1.00 |

รูปที่ 5.7 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสี ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ ปัจจัยหลัก (Main Effect) จำนวน 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) แต่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

**5.8 สรุปการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา**

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า สามารถสรุปสาเหตุของปัญหา ดังนี้

การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปร คือ ความหนาสีและต้นทุนทางการผลิต ซึ่งปัจจัยที่มีผลนำมาทำการทดลองมี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) จึงใช้การทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ แบบ 1 เรพลิเคต ($2^k$ Factorial Design Single Replicate) เพื่อหาความมีนัยสำคัญของปัจจัยแต่ละระดับที่มีการเปลี่ยนจากระดับต่ำ (-1) ไปยังระดับสูง (+1) โดยมี 3 ปัจจัย จึงได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง การทดลองนี้จะทำให้ทราบผลกระทบหลักและอันตรกิริยา เพื่อกรองปัจจัยก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อหาระดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ผลการทดลองจากโปรแกรม Minitab พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อนำไปปรับปรุงหาปัจจัยที่เหมาะสม ดังนี้ ความหนาสี มีปัจจัยหลัก (Main Effect) จำนวน 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) แต่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) ในส่วนของต้นทุนทางการผลิต มีปัจจัยหลักจำนวน 2 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) และแรงดันไฟฟ้า (C) ส่วนเวลาในการชุบ (B) ไม่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต ดังนั้นสามารถคำนวณต้นทุนการผลิตได้ในสมการที่ (5-3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 6
# การปรับปรุง

## 6.1 บทนำ

หลังจากการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$ และ 1 เรพลิเคต ($2^k$ Factorial Design Single with 1 Replicate) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองได้จากการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม Minitab เพื่อยืนยันว่าทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นสี เวลาและแรงดันไฟฟ้า มีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการกำหนดตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปรคือ ความหนาสีและต้นทุนทางการผลิต เมื่อได้ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองดังกล่าวแล้ว นำปัจจัยเหล่านี้มาทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งในระยะการปรับปรุงนี้จะนำปัจจัยที่ได้จากการคัดกรองไปทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Point) และจุดแนวแกน (Axial Point) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมสำหรับการตั้งปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ค่าความหนาสีใกลเคียงค่า 20 ไมครอนมากที่สุด และต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด

## 6.2 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

ปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ที่จะนำมาทำการทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการควบคุมความหนาสีให้ได้ค่าที่ 20 ไมครอน มีจำนวน 3 ปัจจัยดังนี้คือ ความเข้มข้นของสี เวลาในการชุบและแรงดันไฟฟ้าในการชุบ และต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด มีจำนวน 2 ปัจจัยดังนี้คือ ความเข้มข้นของสีและแรงดันไฟฟ้าในการชุบ ซึ่งตัวแปรตอบสนองคือความหนาสีและต้นทุนทางการผลิตที่เกี่ยวข้อง

## 6.3 การออกแบบการทดลองและระดับของปัจจัยในการทดลอง

การออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า จะใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง หรือเรียกว่า CCD เพื่อใช้ในการหาระดับการปรับตั้งปัจจัยที่จะทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนด แบบการทดลอง CCD สำหรับ 3 ปัจจัยประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ 1)

Full Factorial points จำนวน 8 จุด ซึ่งได้ทำการทดลองไปแล้วดังกล่าวในบทที่ 5 2) Center points จำนวน 6 จุด และ 3) Axial points จำนวน 6 จุด รวมจำนวนจุดการทดลองทั้งหมด 20 จุด การทดลองดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มในส่วน Center points และ Axial points และนำผลมาวิเคราะห์ร่วมกับผลจาก Factorial points ที่ได้ทำไปแล้ว ในการทดลองแบบ CCD ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ค่าสังเกตจากการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งมีเมทริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ด้วยโปรแกรม Minitab ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) แบบ CCD

| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | A | B | C |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | 3 | 1 | 1 | -1 | +1 | +1 |
| 12 | 4 | -1 | 1 | 0 | 1.68 | 0 |
| 11 | 5 | -1 | 1 | 0 | -1.68 | 0 |
| 4 | 6 | 1 | 1 | +1 | +1 | -1 |
| 18 | 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 9 | 1 | 1 | +1 | +1 | +1 |
| 13 | 10 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1.68 |
| 3 | 11 | 1 | 1 | -1 | +1 | -1 |
| 9 | 12 | -1 | 1 | -1.68 | 0 | 0 |
| 5 | 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | +1 |
| 15 | 14 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 15 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 16 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 17 | 1 | 1 | +1 | -1 | -1 |
| 10 | 18 | -1 | 1 | 1.68 | 0 | 0 |
| 14 | 19 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1.68 |
| 1 | 20 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการออกแบบการทดลองแบบ CCD ในตารางที่ 6.1 พบว่าในแบบการทดลอง CCD ได้กำหนดให้แต่ละปัจจัยถูกทำการทดลอง 5 ระดับ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดระดับของปัจจัยนำเข้าตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐานของกระบวนการผลิตหรืออยู่ในช่วงมาตรฐานของวัตถุดิบที่ได้ข้อมูลมาจากผู้ผลิตสีที่ใช้ในการชุบ ซึ่งไม่ใช่ค่าการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่ระดับต่ำสุดและระดับสูงที่สุดที่เครื่องจักรปรับตั้งค่าได้ เพราะต้องอ้างอิงมาตรฐานตามวัตถุดิบและข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

ซึ่งแต่ละปัจจัยนำเข้าแบ่งได้เป็น 5 ระดับ คือ – $\alpha$(-1.682) ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) และ+ $\alpha$(+1.682) โดยระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแสดงดังตาราง ที่ 6.2 ดังนี้

ตารางที่ 6.2 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

| สัญลักษณ์ของปัจจัย | ปัจจัยนำเข้า | หน่วย | -$\alpha$ (-1.682) | ระดับต่ำ (-1) | ระดับกลาง (0) | ระดับสูง (+1) | +$\alpha$ (+1.682) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | ความเข้มข้นของสี | %Solid | 17.5 | 18.1 | 19 | 19.89 | 20.5 |
| B | เวลา | นาที | 3 | 3.51 | 4.25 | 4.99 | 5.50 |
| C | แรงดันไฟฟ้า | โวลต์ | 300 | 310 | 325 | 340 | 350 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคำนวณต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าที่แต่ละสภาวะการทดลองได้มาจากวิธีการคำนวณในบทที่ 5 ซึ่งปัจจัยที่เลือกศึกษาถึงผลกระทบที่มีผลต่อต้นทุนในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้ามี 3 ปัจจัย ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสี

สมการความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสี เป็นดังนี้

$$C_1 = 4.46 + 248\ X_1 \qquad (5\text{-}1)$$

$C_1$ = ต้นทุนในการเติมสี (บาทต่อคัน)

$X_1$ = ความเข้มข้นของสี (%Solid)

2. ระยะเวลาในการชุบ

เวลาในการชุบที่เปลี่ยนไป ไม่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต ซึ่งได้ค่าคงที่ดังนี้

ต้นทุนทางการผลิต = 242 บาท/คัน

3. แรงดันไฟฟ้า

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้า เป็นดังนี้

$$C_2 = 0.49\ X_3 \qquad (5\text{-}2)$$

$C_2$ = ต้นทุนในการเติมสี (บาทต่อคัน)

$X_3$ = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

ดังนั้นต้นทุนการผลิตรวมทั้งหมดจากทุกปัจจัย แสดงได้ดังนี้

$$\text{Total Cost (Baht)} = 4.46 + 248\ X_1 + 0.49\ X_3 \qquad (5\text{–}3)$$

TC = ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด (บาทต่อคัน)

$X_1$ = ความเข้มข้นของสี (%Solid)

$X_3$ = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**6.4 ผลการทดลอง**

จากตารางที่ 6.3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง ความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าและรวมถึงต้นทุนในแต่ละสภาวะการทดลอง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองของค่าความหนาสีและต้นทุนที่เกี่ยวข้องที่แต่ละสภาวะการทดลอง

| Std Order | Run Order | A | B | C | Thickness [µm] | Cost/Unit [Baht] | Std Order | Run Order | A | B | C | Thickness [µm] | Cost/Unit [Baht] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 18.11 | 3.51 | 310 | 15.48 | 4,648 | 11 | 5 | 19 | 3 | 325 | 15.79 | 4,876 |
| 2 | 17 | 19.89 | 3.51 | 310 | 19.74 | 5,089 | 12 | 4 | 19 | 5.5 | 325 | 21.39 | 4,876 |
| 3 | 11 | 18.11 | 4.99 | 310 | 18.8 | 4,648 | 13 | 10 | 19 | 4.25 | 300 | 17.64 | 4,863 |
| 4 | 6 | 19.89 | 4.99 | 310 | 20.55 | 5,089 | 14 | 19 | 19 | 4.25 | 350 | 23.54 | 4,888 |
| 5 | 13 | 18.11 | 3.51 | 340 | 18.38 | 4,662 | 15 | 14 | 19 | 4.25 | 325 | 19.5 | 4,876 |
| 6 | 2 | 19.89 | 3.51 | 340 | 18.62 | 5,104 | 16 | 8 | 19 | 4.25 | 325 | 18.7 | 4,876 |
| 7 | 3 | 18.11 | 4.99 | 340 | 19.94 | 4,662 | 17 | 15 | 19 | 4.25 | 325 | 17.9 | 4,876 |
| 8 | 9 | 19.89 | 4.99 | 340 | 21.69 | 5,104 | 18 | 7 | 19 | 4.25 | 325 | 19.25 | 4,876 |
| 9 | 12 | 17.5 | 4.25 | 325 | 17.5 | 4,876 | 19 | 16 | 19 | 4.25 | 325 | 18.92 | 4,876 |
| 10 | 18 | 20.5 | 4.25 | 325 | 20.07 | 5,248 | 20 | 1 | 19 | 4.25 | 325 | 18.59 | 4,876 |

## 6.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง เพื่อหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลอง หลังจากนั้นถ้าหากว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดจึงจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญและใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในขั้นตอนดังต่อไปนี้

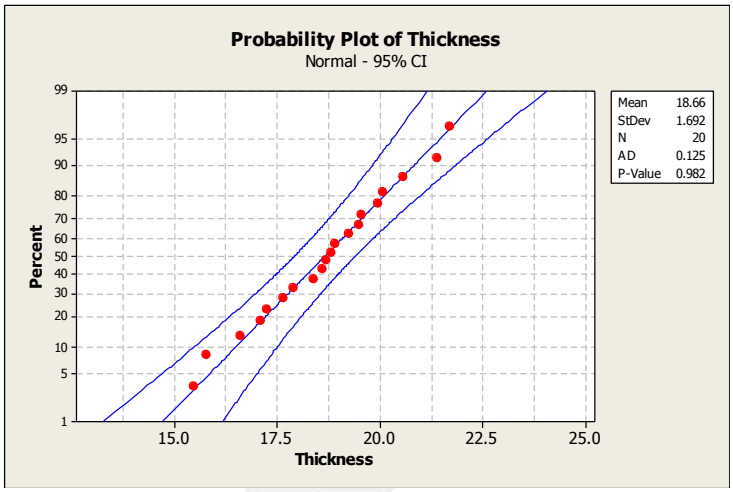
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การออกแบบการทดลองความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์ โดยทำการตรวจสอบว่าข้อมูลมีรูปแบบความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}\,(0, \sigma^2)$ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคาดเคลื่อนของการทดสอบสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล สมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล มีค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างเท่ากับ 0 และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal Distribution)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

ของค่าตัวแปรตอบสนองว่ามีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ หากพิจารณา Normal Probability Plot ควรมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และหากทดสอบโดยการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) จะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05

ผลการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล Normality Test แสดงดังรูปที่ 6.1

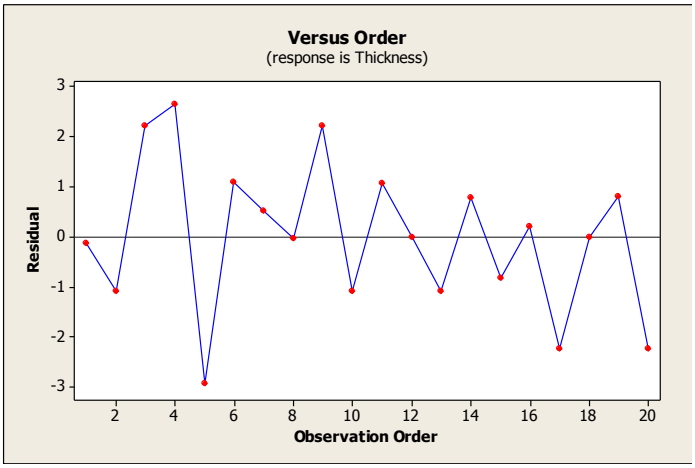



รูปที่ 6.1 การทดสอบสมติฐานของการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ความหนาสี

เมื่อพิจารณากราฟแสดงค่าส่วนตกค้างของข้อมูล ในรูปที่ 6.1 เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.982 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independently of Residual)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบที่แน่นอน

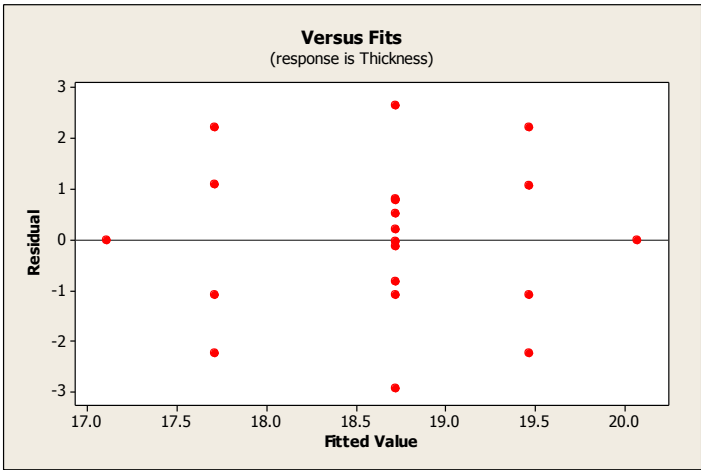



รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล ความหนาสี

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองในรูปที่ 6.2 เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ ฉะนั้น จึงสรุปได้ว่าลำดับของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองอยู่ภายใต้ความสุ่ม

3) การทดสอบสมมติฐานของความมีสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Constant Variance)

สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด




รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต ความหนาสี

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (Fitted Value) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวไม่มีลักษณะเป็นรูปพัดหรือปากแตร จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรตอบสนอง สรุปได้ว่าข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างเท่ากับ 0 และมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จึงเป็นไปตามเงื่อนไข $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}\ (0, \sigma^2)$ ของการออกแบบการทดลอง ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้

4) การวิเคราะห์ผลการทดลองความหนาสีหลังจากที่ข้อมูลผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลมาแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองความหนาสี และต้นทุนในการผลิตด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ออกแบบการทดลอง ดังนี้

ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนาสี ด้วยโปรแกรม Minitab

## Response Surface Regression: Thickness versus A, B, C

```
The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Thickness

Term          Coef  SE Coef       T      P
Constant   18.8143   0.4062  46.314  0.000
A           0.9503   0.2695   3.526  0.005
B           1.3311   0.2695   4.939  0.001
C           1.0239   0.2695   3.799  0.003
A*A        -0.1060   0.2624  -0.404  0.695
B*B        -0.1060   0.2624  -0.404  0.695
C*C         0.6011   0.2624   2.291  0.045
A*B        -0.1250   0.3522  -0.355  0.730
A*C        -0.5025   0.3522  -1.427  0.184
B*C         0.0625   0.3522   0.177  0.863


S = 0.996037   PRESS = 68.8717
R-Sq = 85.60%  R-Sq(pred) = 0.02%  R-Sq(adj) = 72.63%


Analysis of Variance for Thickness

Source           DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS      F      P
Regression        9  58.9615  58.9615   6.5513   6.60  0.003
  Linear          3  50.8452  50.8452  16.9484  17.08  0.000
    A             1  12.3331  12.3331  12.3331  12.43  0.005
    B             1  24.1960  24.1960  24.1960  24.39  0.001
    C             1  14.3161  14.3161  14.3161  14.43  0.003
  Square          3   5.9401   5.9401   1.9800   2.00  0.179
    A*A           1   0.3334   0.1620   0.1620   0.16  0.695
    B*B           1   0.3996   0.1620   0.1620   0.16  0.695
    C*C           1   5.2071   5.2071   5.2071   5.25  0.045
  Interaction     3   2.1763   2.1763   0.7254   0.73  0.557
    A*B           1   0.1250   0.1250   0.1250   0.13  0.730
    A*C           1   2.0200   2.0200   2.0200   2.04  0.184
    B*C           1   0.0312   0.0312   0.0312   0.03  0.863
Residual Error   10   9.9209   9.9209   0.9921
  Lack-of-Fit     5   8.3505   8.3505   1.6701   5.32  0.045
  Pure Error      5   1.5704   1.5704   0.3141
Total            19  68.8824
```

รูปที่ 6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อปรับปรุงความหนาสี

จากผลการออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Minitab เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสี ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ ผลหลัก (Main Effect) ของทั้ง 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) แต่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลต่อตัวแปร

ตอบสนอง นอกจากนี้ยังพบว่ามีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ของปัจจัยแรงดันไฟฟ้า (C) เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองนี้

จากนั้นสามารถแสดงสมการถดถอยแบบ full model ได้ดังนี้

โดยมีหน่วยของปัจจัยนำเข้าเป็นแบบ Coded Unit

$$\text{Thickness} = 18.81 + 0.95(A) + 1.33(B) + 1.02(C) - 0.11(A^2) - 0.11(B^2) + 0.6(C^2) - 0.13(AB) - 0.5(AC) + 0.06(BC) \quad (6\text{-}1)$$

| | | |
|---|---|---|
| A | คือ | ความเข้มข้นของสี (%Solid) |
| B | คือ | เวลาในการชุบ (Min) |
| C | คือ | แรงดันไฟฟ้า (Volt) |
| Thickness | คือ | ความหนาของชิ้นงาน (ไมครอน) |

จะสังเกตได้ว่าสมการถดถอยแบบ full model จากรูปที่ 6.4 มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 72.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ สรุปได้ว่าเทอมของตัวแปรอิสระในตัวแบบถดถอยสามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นของตัวแปรตอบสนอง แต่จะมีตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในสมการด้วย

ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม โดยทำการวิเคราะห์หาสมการถดถอยแบบ Stepwise Regression เพื่อหาสมการถดถอยที่แสดงเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การวิเคราะห์ Stepwise Regression สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5

**Stepwise Regression: Thickness versus A, B, C, AA, BB, CC, AB, AC**

```
Forward selection.  Alpha-to-Enter: 0.25

Response is Thickness on 8 predictors, with N = 20

Step            1      2      3      4      5
Constant    19.08  19.08  19.08  18.66  18.66

B            1.33   1.33   1.33   1.33   1.33
T-Value      3.12   3.68   4.63   5.41   5.71
P-Value     0.006  0.002  0.000  0.000  0.000

C                   1.02   1.02   1.02   1.02
T-Value             2.83   3.56   4.16   4.40
P-Value            0.012  0.003  0.001  0.001
```

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A | | | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| T-Value | | | 3.31 | 3.86 | 4.08 |
| P-Value | | | 0.004 | 0.002 | 0.001 |
| CC | | | | 0.62 | 0.62 |
| T-Value | | | | 2.61 | 2.76 |
| P-Value | | | | 0.020 | 0.015 |
| AC | | | | | -0.50 |
| T-Value | | | | | -1.65 |
| P-Value | | | | | 0.121 |
| S | 1.58 | 1.34 | 1.06 | 0.909 | 0.861 |
| R-Sq | 35.13 | 55.91 | 73.81 | 82.01 | 84.94 |
| R-Sq(adj) | 31.52 | 50.72 | 68.90 | 77.21 | 79.57 |
| Mallows Cp | 33.4 | 19.6 | 7.9 | 3.7 | 3.5 |

รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบ Stepwise Regression ของความหนาสี

จากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบ Stepwise Regression จึงได้สมการแบบถดถอย โดยมีหน่วยของปัจจัยนำเข้าเป็นแบบ Coded Unit ดังนี้คือ

$$\text{Thickness} = 18.66 + 0.95(A) + 1.33\,(B) + 1.02\,(C) + 0.62\,(C^2) - 0.5\,(AC) \qquad (6\text{-}2)$$

A คือ ความเข้มข้นของสี (%Solid)

B คือ เวลาในการชุบ (Min)

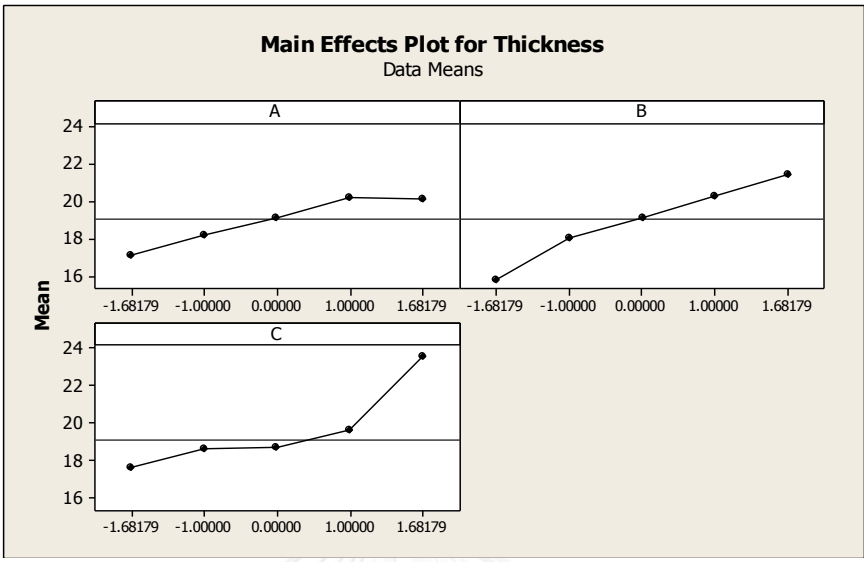
C คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)

Thickness คือ ความหนาของชิ้นงาน (ไมครอน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จะสังเกตได้ว่าสมการถดถอยแบบ Stepwise Regression ของสมการที่ 6-2 มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 79.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า R-Sq (adj) ที่ได้จาก full model และมีค่าที่สามารถยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าเทอมของตัวแปรอิสระในตัวสมการถดถอยสามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นของตัวแปรตอบสนอง และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ต่างๆได้

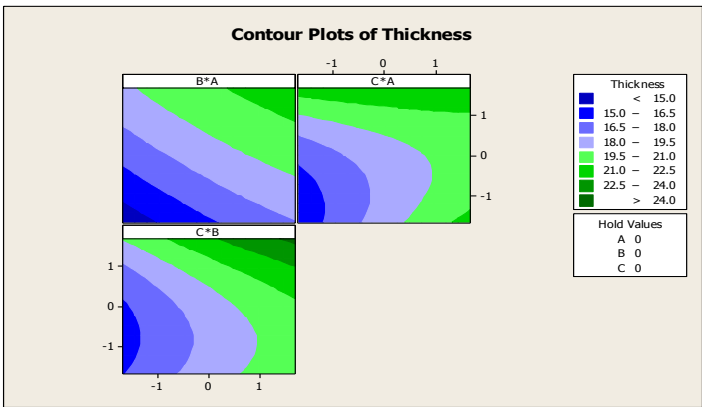
รูปที่ 6.6 แสดงผลของปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ความหนาสี ดังนี้




รูปที่ 6.6 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ความหนาสี

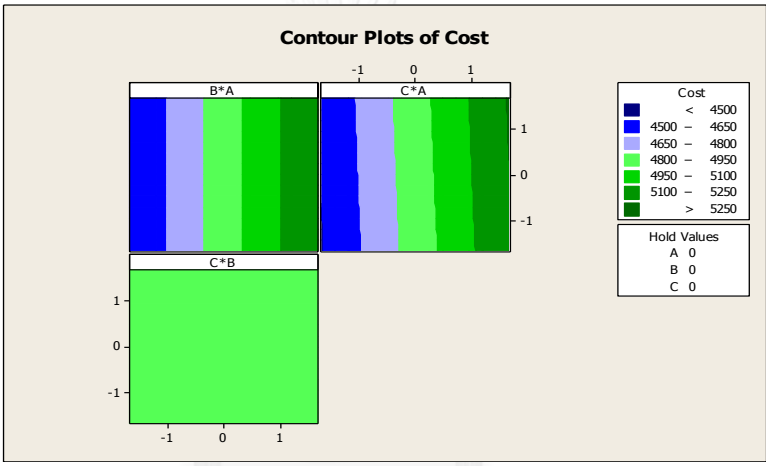
จากรูปที่ 6.6 สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าความเข้มข้นสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ (C) เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความหนาสีเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่พอ C เปลี่ยนจาก 1.00 เป็น 1.68 ความหนาเพิ่มขึ้นมาก ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นตรง

จากนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์ Contour Plot ของความหนาสีและต้นทุนการผลิต ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 ดังนี้




รูปที่ 6.7 Contour Plot ที่มีผลต่อความหนาสี

จากรูปที่ 6.7 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นสี (A) และระยะเวลาในการชุบ (B) ที่มีต่อความหนาสีพบว่า ถ้าหากต้องการความหนาสีเท่ากับ 20 ไมครอน หากใช้ความเข้มข้นของสีน้อยจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้ามาก หรือหากใช้ความเข้มข้นของสีที่มาก ก็จะใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยลง เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสี (A) และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ (C) ที่มีต่อความหนาสีพบว่า หากใช้ความเข้มข้นของสีมาก จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่น้อย หรือหากใช้ความเข้มข้นของสีน้อย ก็จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ (C) ที่มีต่อความหนาสีพบว่า หากใช้เวลาในการชุบน้อย จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่มาก หรือหากใช้เวลาในการชุบมาก จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่น้อยลง




รูปที่ 6.8 Contour Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต

จากรูปที่ 6.8 ถ้าหากต้องการต้นทุนการผลิตต่ำๆ จากกราฟ B*A, C*A และ C*B สามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสีและแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ จะทำให้ต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำลง โดยแรงดันไฟฟ้ามีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตน้อยกว่าความเข้มข้นของสีมาก ส่วนเวลาไม่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิตเลย

ดังนั้นจากการพิจารณาความหนาสีให้ได้ค่าเท่ากับ 20 ไมครอน จะใช้ความเข้มข้นของสี ระยะเวลาในการชุบและแรงดันไฟฟ้า ที่ระดับสูงหรือต่ำก็ได้ แต่ถ้าหากพิจารณาต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด ต้องใช้ความเข้มข้นของสีที่ระดับต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่ระดับสูง ส่วนเวลาจะใช้ที่ระดับต่ำหรือสูงก็ได้เพราะไม่มีผลต่อต้นทุนทางการผลิต

จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมด้วย การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมโดยใช้สมการถดถอยที่ได้จาก Stepwise Regression เนื่องจากมีค่าความผันแปรของความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ที่น้อยกว่าจาก full model แต่จะหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมโดยใช้สมการถดถอยที่ได้จาก full model ด้วยเช่นกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

ในการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ได้กำหนดเป้าหมายค่าความหนาสีให้เท่ากับ 20 ไมครอน และกำหนดค่าต่ำสุดอยู่ที่ 17 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดจากช่วงค่ามาตรฐานที่ได้รับจากผู้ผลิตสี และกำหนดค่ามากที่สุดเท่ากับ 23 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดจากช่วงค่ามาตรฐานที่ได้รับจากผู้ผลิตสี ส่วนค่าต้นทุนทางการผลิตที่ต้องการต่ำที่สุด โดยในการคำนวณต้องมีการกำหนดค่าเป้าหมายเบื้องต้น จึงได้กำหนดค่าเป้าหมายเท่ากับ 4,416 บาท ซึ่งได้มาจากการนำค่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดใน 20 การทดลองแล้วลดลงอีก 5% และกำหนดค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 4,648 บาท ได้มาจากค่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดใน 20 การทดลอง จากนั้นใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์เพื่อหาค่าของปัจจัยนำเข้าที่ให้ค่าความหนาสีที่ 20 ไมครอนและต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

ซึ่งสามารถแสดงผลการหาสภาวะการที่เหมาะสมจากสมการถดถอยที่ได้จาก Stepwise Regression ได้ดังนี้ คือ ความเข้มข้นสี เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 volt จะได้ค่าต้นทุนทางการผลิตต่ำที่สุด เท่ากับ 4,506 บาทต่อคัน แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 6.9 และ 6.10 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## Response Optimization

Parameters

| | Goal | Lower | Target | Upper | Weight | Import |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Thickness | Target | 17 | 20 | 23 | 10 | 10 |
| Cost | Minimum | 4416 | 4416 | 4648 | 1 | 1 |

Global Solution

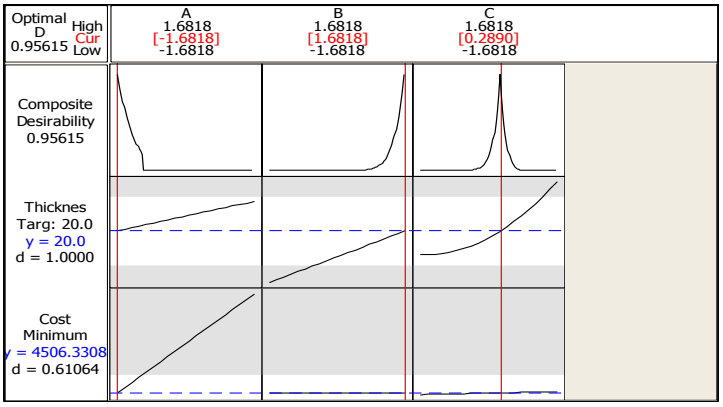
A = -1.68179
B = 1.68179
C = 0.289045

Predicted Responses

Thickness = 20.00 , desirability = 1.000000
Cost = 4506.33 , desirability = 0.610643

Composite Desirability = 0.956150

รูปที่ 6.9 ผลลัพธ์แสดงค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้สมการจาก Stepwise Regression



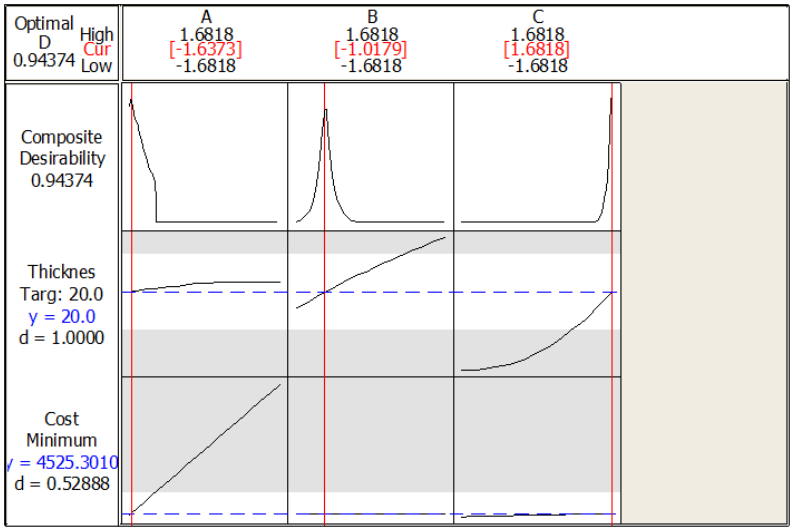

รูปที่ 6.10 ค่าความหนาสีที่ค่าเป้าหมาย 20 ไมครอนและต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด

ซึ่งสามารถแสดงผลการหาสภาวะการที่เหมาะสมจากสมการถดถอยที่ได้จาก full model ได้ดังนี้ พบว่า จะได้ค่าความหนาสีมีค่าที่ 20 ไมครอน เมื่อกำหนดให้ ความเข้มข้นสีมีค่า เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 3.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 350 volt ซึ่งจะได้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด เท่ากับ 4,525 บาทต่อคัน และค่า R-Sq (adj) จากรูปที่ 6.4 มีค่าเท่ากับ 72.63 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 6.11 และ 6.12 ตามลำดับ

## Response Optimization

```
Parameters

           Goal     Lower  Target  Upper  Weight  Import
Thickness  Target      17      20     23      10      10
Cost       Minimum   4416    4416   4648       1       1


Local Solution

A    =   -1.63729
B    =   -1.01786
C    =    1.68179


Predicted Responses

Thickness   =     20.00  ,   desirability =   1.000000
Cost        =   4525.30  ,   desirability =   0.528875


Composite Desirability = 0.943735
```

รูปที่ 6.11 ผลลัพธ์แสดงค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใช้สมการจาก full model




รูปที่ 6.12 ค่าความหนาสีที่ค่าเป้าหมาย 20 ไมครอนและต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด

ผู้วิจัยสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ได้จากสมการถดถอยจาก full model และ stepwise regression model ดังนี้

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของ full model และ stepwise regression model

| วิธีการ | R-Sq (adj) | สภาวะการทำงานที่เหมาะสม | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ความเข้มข้นสี (%solid) | เวลา (นาที) | แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) | ต้นทุนการผลิต (บาท/คัน) |
| Full model regression | 72.63 % | 17.5 | 3.5 | 350 | 4,525 |
| Stepwise regression | 79.57% | 17.5 | 5.5 | 329 | 4,506 |

จากตารางที่ 6.4 สมการถดถอยแบบ Stepwise Regression แนะนำให้ใช้ระยะเวลาในการชุบที่ 5.5 นาที ซึ่งสูงกว่าระยะเวลาในการชุบที่แนะนำโดย full model ซึ่งมีค่า 3.5 นาที แต่ในสถานการณ์

ปัจจุบันของโรงงาน สามารถนำระยะเวลา 5.5 นาที มาใช้ได้ในสถานการณ์ปัจจุบัน เนื่องจากในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีปริมาณยอดการผลิตที่ต่ำ แต่ถ้าในอนาคตโรงงานกรณีศึกษามีปริมาณยอดการผลิตที่เพิ่มขึ้น ก็สามารถใช้ระยะเวลาในการชุบที่ได้จากสมการถดถอยแบบ Full model regression ที่ 3.5 นาที เพราะว่าสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึงร้อยละ 57 โดยสภาวะการทำงานที่ได้จาก full model ก็ยังมีความน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจาก full model มีค่า Adjust R-square เกิน 70 % และค่าพยากรณ์ของความหนาสีที่ได้สภาวะการทำงานที่ดีที่สุดที่ได้จาก full model ก็มีค่าเท่ากับ 20 ไมครอน สรุปว่าในสถานการณ์ปัจจุบันนี้ ผู้วิจัยได้แนะนำให้ใช้สภาวะการทำงานที่ได้จากสมการ stepwise regression แสดงในตารางที่ 6.5 ดังนี้

ตารางที่ 6.5 ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า ความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า

| ปัจจัยนำเข้า | สัญลักษณ์ | เงื่อนไขที่เหมาะสม | | ค่าที่ปรับตั้งจริง | หน่วย |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระดับ | ค่าปรับตั้ง | | |
| ความเข้มข้นของสี | A | -1.6818 | 17.5 | 17.5 | %Solid |
| เวลาในการชุบ | B | 1.6818 | 5.5 | 5.5 | Min |
| แรงดันไฟฟ้าในการชุบ | C | 0.289045 | 329.2005 | 329 | Volt |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 6.5 เมื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า ค่าความหนาสีมีค่าที่ 20 ไมครอน เมื่อกำหนดให้ ความเข้มข้นมีค่า เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 โวลต์

## 6.6 สรุปผลขั้นตอนการปรับปรุง

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการเป็นการปรับปรุงเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ เพื่อให้ได้ความหนาสีที่ค่า 20 ไมครอน และต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด โดยมีการกำหนดปัจจัยนำเข้า การออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง ดังนี้

สำหรับตัวแปรตอบสนองเรื่องความหนาสี มีปัจจัยที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 3 ปัจจัย ดังนี้ คือ คือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบ

ส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมด้วย CCD พบว่า เทอมที่มีนัยสำคัญคือ ผลหลัก (Main Effect) ของทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) และมีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ของปัจจัยแรงดันไฟฟ้า (C) เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองนี้ ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นมี เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 volt ทำให้ตัวแปรค่าตอบสนอง คือ ความหนาสีมีค่าเป้าหมายที่ 20

สำหรับตัวแปรตอบสนองเรื่องต้นทุนทางการผลิต มีปัจจัยที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 3 ปัจจัย ดังนี้ คือ คือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมด้วย CCD พบว่า เทอมที่มีนัยสำคัญคือ ผลหลัก (Main Effect) ของทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) และไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นมี เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 volt ทำให้ตัวแปรค่าตอบสนอง คือ ความหนาสีมีค่าเป้าหมายที่ 20 และได้ค่าต้นทุนทางการผลิตต่ำที่สุด เท่ากับ 4,506 บาทต่อคัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 7
# การทดสอบยืนยันผลและการตรวจติดตามควบคุม

การทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามควบคุมเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) ซึ่งประกอบไปด้วย การเก็บข้อมูลความหนาที่ได้จากการปรับค่าของปัจจัยนำเข้าให้เป็นไปตามที่สรุปในบทที่ 6 เพื่อมาตรวจสอบความหนาสีว่าได้ 20 ไมครอน ตามที่กำหนดหรือไม่ โดยต้นทุนการผลิตจะต้องต่ำที่สุด จากนั้นทำแผนควบคุมเพื่อกำหนดความถี่ในการตรวจสอบ และวิธีในการตรวจสอบปัจจัยปรับตั้งให้เป็นไปตามที่ได้ทำการทดลองไว้ และการนำแผนภูมิควบคุมเข้ามาเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าควบคุม ถ้าหากออกนอกค่าควบคุมให้ดำเนินตามแผนการแก้ไขเมื่อกระบวนการออกนอกเส้นควบคุม รวมถึงจัดทำมาตรฐานการทำงานควบคุมพารามิเตอร์ให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

## 7.1 การทดสอบยืนยันผล

การทดสอบยืนยันผลเป็นการยืนยันสรุปปัจจัยที่ทำการปรับปรุงทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยเลือกระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งรายละเอียดจะแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำการปรับปรุง

| สัญลักษณ์ของปัจจัย | ปัจจัย | ระดับที่เหมาะสม | หน่วย |
|---|---|---|---|
| A | ความเข้มข้นของสีในการชุบ | 17.5 | % Solid |
| B | เวลาในการชุบ | 5.5 | นาที |
| C | แรงดันไฟฟ้าในการชุบ | 329 | โวลต์ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.1.1 ขั้นตอนในการทดลอง

ขั้นตอนแรกของการทดสอบยืนยันผล ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลอง ดังนี้

- หาขนาดตัวอย่างในการประเมินความสามารถของกระบวนการ EDP ($C_{pk}$) ด้วยสมการที่ 1-1

$$n = z_{\alpha}^{2}\left(1/9\hat{C}_{pk}^{2}\right) + 0.5/(1 - C_{pk}/\hat{C}_{pk})^{2}$$

$Z_{\alpha}$ คือ ค่าปกติมาตรฐานที่ได้จากตารางการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น (1-$\alpha$) % ในที่นี้กำหนดระดับ $\alpha$ เท่ากับ .05 ซึ่งได้ผลเท่ากับ ($Z_{0.05}$ = -1.64)

$\hat{C}_{pk}^{2}$ คือ ค่าประมาณ $C_{pk}$ ของกระบวนการ ซึ่งจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้น จำนวน 60 ข้อมูล มีค่าเท่ากับ 1.47

$Cpk/\hat{C}\mathrm{pk}$ คือ สัดส่วนของค่าความสามารถของกระบวนการที่แท้จริงต่อความสามารถของกระบวนการที่ได้จากการประมาณการจากขนาดตัวอย่าง กำหนดให้เป็น 0.9

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการจะได้ขนาดตัวอย่างในการประมาณการค่าความสามารถของกระบวนการดังนี้ $n = (-1.64)^2 \times ((1/9 \times 1.47^2)) + 0.5) / (1 - 0.9)^2 = 115$

แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในการวิจัย คือ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอ อีกทั้งช่วงของการวิจัยทางโรงงานมีปริมาณการผลิตที่น้อยลง อันเนื่องมาจากเป็นช่วงที่มีปริมาณการสั่งซื้อจากลูกค้าน้อยลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ค่า $Cpk/\hat{C}\mathrm{pk}$ ซึ่งก็คือสัดส่วนของค่าความสามารถของกระบวนการที่แท้จริงต่อความสามารถของกระบวนการที่ได้จากการประมาณการจากขนาดตัวอย่าง ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.85 เพื่อลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลให้น้อยลง

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่าขนาดตัวอย่างในการประมาณการค่าความสามารถของกระบวนการดังนี้ $n = (-1.64)^2 \times ((1/9 \times 1.47^2)) + 0.5) / (1 - 0.85)^2 = 51$

จากการคำนวณได้ขนาดตัวอย่างคือ 51 ข้อมูล ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่จำนวน 60 ข้อมูล ดังนั้นขนาดตัวอย่าง 60 ข้อมูล จึงเพียงพอสำหรับการนำมาคำนวณดัชนีความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$ หลังการปรับปรุง

ขั้นตอนที่สอง ผู้วิจัยได้ทำการแจ้งหัวหน้างานและพนักงานให้ทราบถึงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการปรับตั้งที่หน้างาน โดยการปรับตั้งค่าความเข้มข้นของสีจะปรับตั้งตามค่าที่กำหนด คือ 17.5 %solid และจะมีการตรวจสอบความเข้มข้นของสีตามตารางการปรับค่าน้ำยาของสารเคมีแต่ละตัว ดังแสดงในภาคผนวก ตารางที่ ผ.1 ในส่วนของการปรับตั้งค่าเวลาในการชุบและแรงดันไฟฟ้าในการชุบด้วยวิธีการควบคุม จะกำหนดที่ 5.5 นาที และ 329 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งพนักงานจะต้องตรวจสอบระดับปัจจัยทุกครั้งก่อนเริ่มงาน ว่าปรับตั้งตามที่กำหนดหรือไม่

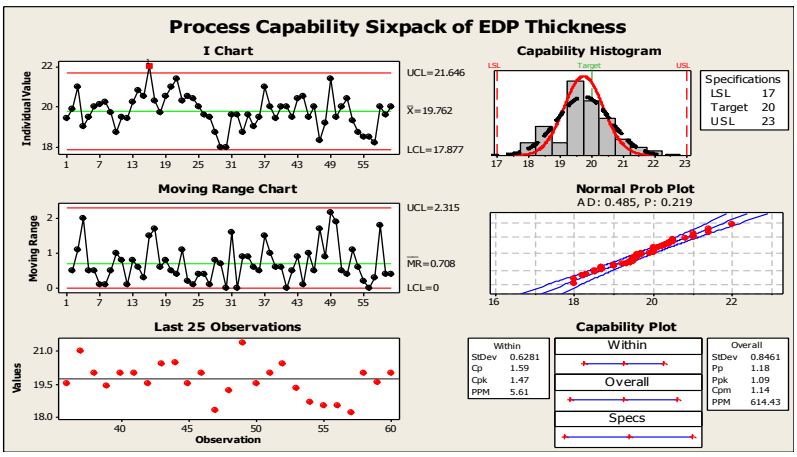
ขั้นตอนที่สาม ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจำนวน 60 ชุดข้อมูล โดยใช้ระยะเวลาทั้งหมด 3 วัน และบันทึกข้อมูลความหนาสีของรถที่ผ่านกระบวนการชุบ ดังแสดงในภาคผนวก ผ.2 เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

7.1.2 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังปรับปรุงว่า ค่าความหนาสีที่ได้ใกล้เคียง 20 ไมครอนหรือไม่ โดยที่ต้นทุนในการผลิตจะต้องต่ำที่สุด ซึ่งในส่วนข้อมูลหลังการปรับปรุงผู้วิจัยได้ใช้รถตัวอย่างจำนวน 60 คัน มาทำการวิเคราะห์

ในส่วนดัชนีความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$ เรื่องความหนาสีชุบ EDP หลังการปรับปรุงคำนวณมาจากค่าความหนาสีจำนวน 60 ข้อมูล แสดงในภาคผนวก ตารางที่ ผ.3 จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ผลแสดงดังรูปที่ 7.1 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 7.1 ความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ได้หลังจากกระบวนการชุบสีหลังการปรับปรุง

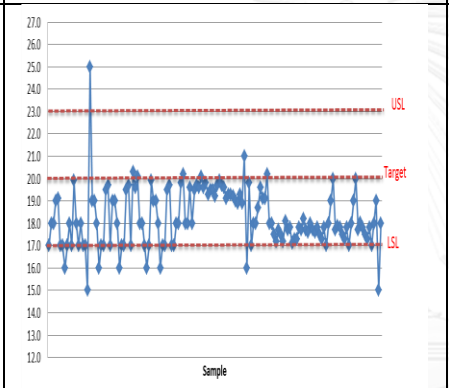
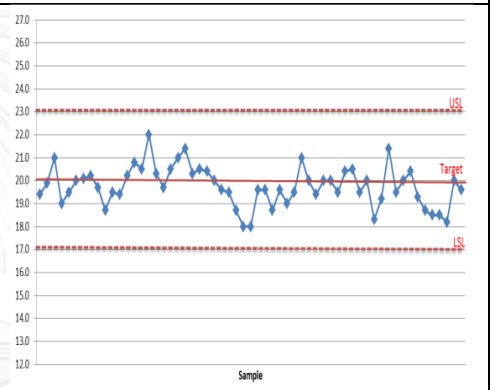
จากรูปที่ 7.1 พบว่าข้อมูลความหนาสีมีการกระจายตัวแบบปกติ เพราะค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 และเนื่องจากข้อมูลมีเพียง 1 ค่า ที่ออกนอกเขตควบคุม ซึ่งถือว่าน้อยมาก โดยค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 1.47 ซึ่งสูงกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีความสามารถที่ดี หลังจากมีการปรับปรุงกระบวนการตามที่กล่าวมา จากค่า $C_p$ = 1.59 ที่มากกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไม่มีปัญหาเรื่องความผันแปร และจากค่า $C_{pk}$ = 1.47 ที่ไม่แตกต่างมากจากค่า $C_p$ แสดงว่ากระบวนการได้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย ฉะนั้นสามารถปรับปรุงกระบวนการโดยการเพิ่มค่า $C_{pk}$ ได้ดีขึ้น โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้ความหนาฟิล์มตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้และให้ความผันแปรลดลง

จากการทดลองทำให้ผู้วิจัยสามารถยืนยันได้ว่าสภาวะหลังการปรับปรุงเป็นสภาวะการทำงานที่เหมาะสมได้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะการทำงานก่อนการปรับปรุง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 สภาวะการทำงานของทั้ง 3 ปัจจัยก่อนและหลังการปรับปรุง

| ปัจจัย | ก่อนปรับปรุง | หลังปรับปรุง |
|---|---|---|
| ความเข้มข้นสีในการชุบ | 18.5 %solid | 17.5 %solid |
| เวลาในการชุบ | 5.5 นาที | 5.5 นาที |
| แรงดันไฟฟ้าในการชุบ | 320 โวลต์ | 329 โวลต์ |

การเปรียบเทียบความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP ก่อนและหลังการปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 7.2

| Response | Before | After (Optimal Setting) |
|---|---|---|
| Thickness [µm] |  |  |



รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบความหนาสีบนผิวตัวถังรถบรรทุกเฉลี่ยต่อคันที่ก่อนและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาสีเฉลี่ยก่อนปรับปรุงค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 0.49 และความหนาสีเฉลี่ยอยู่ที่ 18.32 ไมครอน ซึ่งหลังจากการปรับปรุงพบว่าที่สภาวะการทำงานที่ได้จากการทดลองคือ ความเข้มข้นสีที่ 17.5 %solid เวลาในการชุบ 5.5 นาทีและแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 โวลต์ ได้ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 1.47 และความหนาสีเฉลี่ยอยู่ที่ 19.76 ไมครอน ดังนั้นแสดงว่าหลังจาการปรับปรุงกระบวนการสภาวะการทำงานชุบได้ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) และความหนาสีเฉลี่ยที่ดีขึ้น

7.1.3 การคำนวณต้นทุนทางการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง และสรุปต้นทุนที่ลดได้

การคำนวณต้นทุนทางการผลิตจะคิดจากปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสีคือ ความเข้มข้นของสี เวลาในการชุบ และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ ซึ่งจะเกี่ยวกับแรงงานทางตรง (Direct Labor) ค่าวัตถุดิบ (Direct Material) และค่าโสหุ้ยทางการผลิต (Overhead Cost) ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ส่วนวิธีการคิดคำนวณได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 โดยการแทนค่าปัจจัยใส่ในแต่ละสมการ ดังนั้นสามารถแสดงตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต้นทุนการผลิตก่อนและหลังปรับปรุงได้ ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบต้นทุนทางการผลิตของแต่ละปัจจัยก่อนและหลังการปรับปรุง

| ปัจจัย | ต้นทุนการผลิตก่อนปรับปรุง (บาท/คัน) | ต้นทุนการผลิตหลังปรับปรุง (บาท/คัน) | ลดต้นทุนการผลิต (บาท/คัน) | ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงของต้นทุน |
|---|---|---|---|---|
| ความเข้มข้นสีในการชุบ | 4,593 | 4,345 | 248 | ลดลง 5 |
| แรงดันไฟฟ้าในการชุบ | 157 | 161 | เพิ่มขึ้น 4 | เพิ่มขึ้น 3 |
| ต้นทุนการผลิตสีชุบ EDP | 4,750 | 4,506 | 244 | ลดลง 5 |
| ต้นทุนการผลิตสีพ่น Topcoat | 12,090 | 11,700 | 390 | ลดลง 3 |
| ต้นทุนการผลิตรวม | 16,840 | 16,206 | 634 | ลดลง 4 |

จากการคิดต้นทุนการผลิตในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า การพ่นสี Topcoat รวมเป็นต้นทุนทางการผลิตรวมทั้งหมด จากตารางที่ 7.3 แสดงว่าหลังการปรับปรุงสามารถลดต้นทุนการผลิตสีชุบ EDP ได้ 244 บาทต่อคัน ลดต้นทุนการพ่นสี Topcoat ได้ 390 บาทต่อคัน สุดท้ายสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมลดลงร้อยละ 4 หรือ 2,599,400 บาทต่อปี โดยคิดที่กำลังการผลิต 4,100 คันต่อปี

**7.2 การตรวจติดตามควบคุม**

การตรวจติดตามควบคุมเป็นการปรับปรุงเพื่อให้กระบวนการมีการปรับค่าระดับของปัจจัยให้เป็นไปตามที่ได้ทำการทดลองสรุปผลไว้ โดยมีการจัดทำแผนการควบคุมที่มีการกำหนดผู้ตรวจสอบ รอบเวลาที่ต้องทำการตรวจสอบ รวมถึงการจัดทำมาตรฐานการทำงานใหม่ในปัจจัยที่ได้ปรับปรุง และการประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อให้มีการตรวจติดตามผล เพื่อไม่ให้รถที่ผ่านกระบวนการชุบสีได้ค่าความหนาที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือออกนอกค่าที่กำหนด ซึ่งได้มีการจัดทำแผนการแก้ไขเมื่อกระบวนการออกนอกเส้นควบคุม เพื่อให้กระบวนการเป็นไปตามที่กำหนด

7.2.1 แผนการควบคุม

ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนำมาพิจารณากำหนดแผนการควบคุมนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือปัจจัยปรับตั้งค่า และปัจจัยเชิงความผันแปรซึ่งมีการกำหนด ดังนี้

1) แผนการควบคุมปัจจัยปรับตั้งค่า มีทั้งหมด 2 ปัจจัยคือ เวลาในการชุบ และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยมีลักษณะการปรับที่เหมือนกันคือ ปรับตั้งค่าผ่านสวิตซ์ที่ตู้ควบคุม โดยการควบคุม 2 ปัจจัยนี้ กำหนดให้พนักงานฝ่ายผลิตทำการจดบันทึกค่าทุกคัน รวมทั้งการกำหนดให้พนักงานซ่อมบำรุงทำการตรวจสอบตู้ควบคุมทุก 1 เดือน ว่าตู้ควบคุมนั้นสามารถอ่านค่าจริงได้ตรงกับค่าที่ปรับตั้งหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามนั้นต้องทำการแก้ไขทันที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 7.4 แบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าเวลาและแรงดันไฟฟ้าของรถทุกคัน

| Date | NO. | Model | | | Chassis No. | Voltage (Volt) | Current (Ampere) | Time (min) | Person record | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | FML1 | FML2 | FH | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

2) แผนการควบคุมปัจจัยเชิงความผันแปรมีอยู่ 1 ปัจจัย คือความเข้มข้นสีจะปรับตั้งค่าด้วยวิธีการไตเตรตโดยพนักงานฝ่ายผลิต จะใช้วิธีการทำเอกสารการปฏิบัติของพนักงาน ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 ความถี่ในการไตเตรตทำ 1 ครั้งต่อวันก่อนเริ่มงาน ซึ่งทำในห้องแลปของโรงงานกรณีศึกษา การบันทึกค่าความเข้มข้นสี จะบันทึกในแบบฟอร์ม ดังตารางที่ 7.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 7.5 แบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าความเข้มข้นสีในแต่ละเดือน

| PROPERTIES | Month | Oct-14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Date. | 1 | 2 | 3 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 20 | 21 | 22 | 24 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| CED PAINT | SPEC. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH @ 20 °C | 5.7 - 6.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Conductivity (20 °C) | 700 - 2200 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| %Solids @ 180 °C 30 min | 17.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

**7.3 การประยุกต์ใช้แผนควบคุม**

โรงงานกรณีศึกษามีรูปแบบการเก็บข้อมูลแบบหน่วยวัด จากการสุ่มตรวจค่าความหนาสีเฉลี่ยต่อรถ 1 คัน เก็บข้อมูลวันละ 2 ครั้งคือ ครึ่งเช้า 1 คัน และครึ่งบ่าย 1 คัน ซึ่งแผนภูมิที่เหมาะกับงานวิจัยนี้คือ แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวและแผนภูมิควบคุมค่าพิสัยเคลื่อนไหว (X – MR Control Chart) ซึ่งจะใช้สำหรับการเก็บข้อมูลครั้งละ 1 ค่าเท่านั้น เนื่องจากกระบวนการผลิตมีอัตราการผลิตช้า (ศุภชัย นาทะพันธ์, 2551) ซึ่งผู้วิจัยได้คำนวณขีดจำกัดควบคุม (control limits) ข้อมูลความหนาสีผลการทดลองปรับตั้งระดับที่เหมาะสมของปัจจัยของรถ 60 คัน การคำนวณทำแผนภูมิควบคุม X-MR แสดงดังนี้

1) ขีดจำกัดควบคุมสำหรับแผนภูมิควบคุม X คือ

$$\text{UCL, LCL} = \bar{\mathbf{X}} \pm 3\frac{\overline{\mathbf{MR}}}{d_2}$$

โดยที่ค่าของ $\bar{\mathbf{X}}$ หรือ CL = $\frac{\text{ค่าความหนาสีทั้งหมด}}{\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด}}$

= 1165.70/60 = 19.76

$$\overline{\mathrm{MR}} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}|x_{i+1} - x_i| \quad ; \text{n = 60}$$

$$= 0.71$$

$$d_2 = 1.128$$

ดังนั้น UCL = 19.76 + (3 x (0.71/1.128)) = 21.65

LCL = 19.76 - (3 x (0.71/1.128)) = 17.87

2) ขีดจำกัดควบคุมสำหรับแผนภูมิควบคุม MR

$UCL = D_4 \overline{\mathrm{MR}}$

$LCL = D_3 \overline{\mathrm{MR}}$

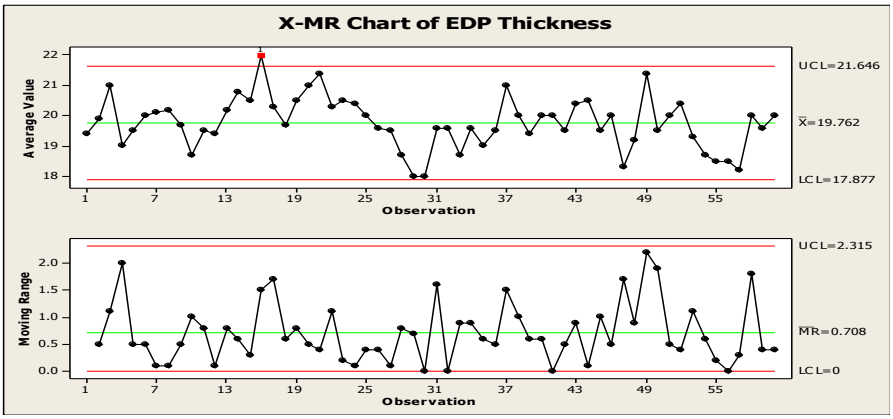
โดยที่ค่า $D_4 = 3.267$

$D_3 = 0$

ดังนั้น UCL = 3.267(0.71) = 2.32

LCL = 0(0.73) = 0

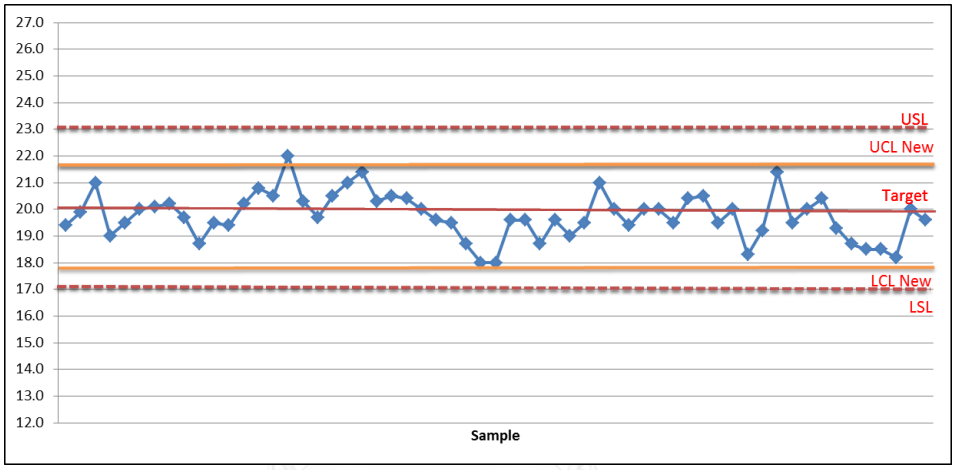
3) การแสดงแผนภูมิควบคุม X-MR โดยการรันในโปรแกรม Minitab แสดงผลดังนี้




รูปที่ 7.3 แผนควบคุม X-MR ของค่าความหนาสีในกระบวนการชุบ EDP

จากรูปที่ 7.3 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อพิจารณาแผนภูมิควบคุม X ค่าความหนาสีรถอยู่ในค่าช่วงที่สามารถควบคุมได้ (in-of-control) แต่มีเพียง 1 ค่าที่ออกนอกเขตควบคุม (out-of-control) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีผลน้อยมาก แต่เนื่องจากแผนภูมิควบคุม X และ MR ไม่เปนอิสระต่อกัน การสรุปผลว่ากระบวนการอยู่ในสภาวะควบคุมได้หรือไม่ จึงพิจารณาได้จากแผนภูมิ X (Montgomery book) สรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง 60 จุดนี้มาจากกระบวนการที่อยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ จึงสามารถนำขีดจำกัดควบคุมที่ได้ไปใช้ติดตามค่าความหนาสีในอนาคตต่อไปได้

ตารางที่ 7.6 แผนภูมิควบคุมกระบวนการชุบสี EDP ในรถรุ่น FML2

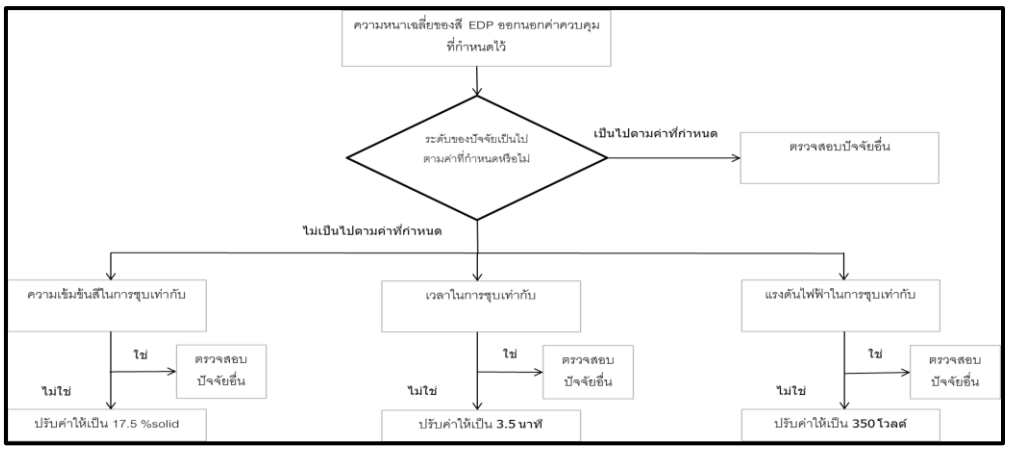



จากตารางที่ 7.6 จะพบว่าค่าความหนาสีเฉลี่ยมีเพียง 1 จุดอาจจะเกินค่าขีดจำกัดควบคุมเส้นสีส้ม แต่ค่าความหนาสีเฉลี่ยก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานรับได้คือ 17 ถึง 23 ไมครอน จากเส้นปะสีแดง

## 7.4 แผนปฏิบัติการแก้ไขเมื่อพบค่าความหนาสีเฉลี่ยต่อรถ 1 คัน ออกนอกค่าควบคุม (Out of Control Action Plan หรือ OCAP)

การใช้แผนภูมควบคุมกระบวนการเป็นการช่วยตรวจสอบความผิดปกติของกระบวนการผลิตได้ ว่าค่าความหนาสีเฉลี่ยออกจากค่าควบคุมหรือไม่ ถ้าหากพบว่าค่าออกนอกควบคุมต้องทำการแก้ไขตามแผนปฏิบัติการแก้ไข ดังนี้

Chulalongkorn University




รูปที่ 7.4 แผนปฏิบัติการแก้ไขเมื่อค่าความหนาสีเฉลี่ยออกนอกค่าควบคุม

## 7.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผลและการตรวจติดตามควบคุม

การทดสอบยืนยันผลใช้เวลาการทดลอง 3 วัน จำนวน 60 ชุดข้อมูล พบว่าค่าความหนาสีเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 18.32 ไมครอนเป็น 19.76 ไมครอน ซึ่งได้ค่าใกล้เคียง 20 ไมครอนตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 1.47 ซึ่งสูงกว่า 1.33 ดีกว่าก่อนปรับปรุงมาก ค่า $C_p$ = 1.59 ที่มากกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไม่มีปัญหาเรื่องความผันแปรหลังจากผ่านการปรับปรุง รวมทั้งต้นทุนทางการผลิตที่สามารถลดลงได้คิดเป็นร้อยละ 4 หรือ 2,599,400 บาทต่อปี ต่อจำนวนการผลิตรถ 4,100 คันต่อปี

จากนั้นได้มีการจัดทำแผนควบคุมทั้งปัจจัยปรับตั้งค่าและปัจจัยเชิงความผันแปร โดยปัจจัยการปรับตั้งค่าได้ออกแบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าของ เวลาในการชุบและแรงดันไฟฟ้าของรถทุกคัน โดยพนักงานฝ่ายผลิต ส่วนปัจจัยเชิงความผันแปรคือ ความเข้มข้นของสีได้ทำโดยวิธีการไตเตรต สร้างวิธีการทำงานแบบฟอร์มการบันทึกและทดสอบข้อมูล ทำการตรวจสอบวันละ 1 ครั้งก่อนเริ่มงาน โดยพนักงานฝ่ายผลิต

ขั้นตอนสุดท้ายได้ออกแบบควบคุมความหนาสีเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ด้วยแผนภูมิควบคุม X และ MR Chart เพื่อทำการควบคุมไม่ให้กระบวนการออกนอกเส้นเขตควบคุมที่มีช่วงแคบมากกว่าเดิม เพื่อควบคุมความหนาสีให้ใกล้เคียงค่าที่ 20 ไมครอน โดยที่ยังคงขอบเขตความหนาสีเดิมไว้ที่ 17 ถึง 23 ไมครอนตามค่าควบคุมของโรงงาน หากค่าความหนาสีออกนอกค่าควบคุม ต้องมีการดำเนินการแก้ไขทันทีตามแผนปฏิบัติการแก้ไข เพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนดไว้

# บทที่ 8
# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการซิกซ์ ซิกมา เพื่อควบคุมความหนาสีให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายคือ 20 ไมครอน ลดต้นทุนทางการผลิตที่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยให้ต่ำที่สุดได้เท่ากับ 4,506 บาทต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 5 ซึ่งที่กำลังการผลิต 4,100 คันต่อปี สามารถลดต้นทุนการผลิตรวมลดลงร้อยละ 4 หรือเท่ากับ 2,599,400 บาทต่อปี รวมทั้งเพิ่มความสามารถของกระบวนการ $C_{pk}$ ได้เท่ากับ 1.47 ซึ่งได้ค่าที่สูงขึ้นและลดความผันแปรของกระบวนการให้ลดลงได้เท่ากับ 0.63 ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอนคือ ระยะการนิยามปัญหา ระยะการวัดและเก็บข้อมูลสภาพปัญหา ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ระยะการปรับปรุงแก้ไข และระยะการทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามควบคุม โดยบทสรุปของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน มีดังนี้

## 8.1 สรุประยะนิยามปัญหา

ระยะนิยามปัญหาเริ่มจากการจัดตั้งคณะทีมงาน ซึ่งทางทีมงานได้ศึกษาและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบสี EDP เพื่อจะเป็นหลักฐานอ้างอิงในการทำการวิเคราะห์และแก้ไขต่อไป ทางผู้วิจัยจะเน้นปัญหาเรื่อง ความหนาสี EDP ที่ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากที่สุด และมีผลกระทบต่อต้นทุนทางการผลิตมากที่สุด ทางผู้วิจัยและทีมงานจึงสนใจในการนำปัญหานี้มาทำการแก้ไข เพื่อลดต้นทุนทางการผลิตลงและการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการชุบสี EDP เพื่อให้ค่าความหนาที่ต้องการตามมาตรฐานที่ 20 ไมครอน

## 8.2 สรุประยะการวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหา

จากการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา สามารถสรุปได้ ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความถูกต้องความแม่นและเที่ยงของระบบการวัดข้อมูลแบบผันแปร

ในการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า ในรถรุ่น FML2 พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่า %GR&R มีค่าเท่ากับ 27.05% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของการยอมรับได้ตามมาตรฐาน AIAG (AIAG, 2010)

2) การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

เนื่องจากสามารถเชื่อถือผลจากระบบการวัดที่มีได้ ดังนั้น การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า สามารถศึกษาได้จากการเก็บข้อมูล 128 ข้อมูลในระหว่างเดือนมกราคม ถึง ธันวาคม ปี พ.ศ. 2556 พบว่ารถรุ่น FML2 มีความแปรผันค่อนข้างสูง จากข้อมูลพบว่าค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 แสดงถึงกระบวนการไม่มีความสามารถ จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการ

3) การระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable)

จากการระดมสมองของสมาชิกทีมงานวิจัย พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาสีในกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า มีทั้งหมด 6 หมวดหมู่ ดังนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
2. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
4. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
5. ปัจจัยที่เกิดจากการวัด (Measurement)
6. ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

4) การวิเคราะห์ปัจจัยจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

จากการระดมสมองของสมาชิกทีมงานวิจัย พบว่า มีปัจจัยนำเข้าที่นำมาพิจารณาทั้งหมด 16 ปัจจัยจาก 6 หมวดหมู่ จากนั้นนำมาหาตัววัดในกระบวนการผลิตที่ต้องการปรับปรุง (KPOV) และปัจจัยนำเข้า (KPIV) ในตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) จากนั้นเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญโดยพิจารณาจากผลรวมของคะแนนของแต่ละปัจจัย พบว่ามีปัจจัย 3 ปัจจัยคือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. ความเข้มข้นของสี
2. ระยะเวลาในการชุบ
3. แรงดันไฟฟ้า

จากการให้คะแนนและความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) พบว่า ผลรวมคะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยทั้งหมดที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบการทดลอง เท่ากับ 154 คะแนน จากคะแนนรวมทั้งหมด 385 คะแนน คิดเป็น 40% ของคะแนนรวมทั้งหมด จึงนำไปวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาต่อไป

**8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา**

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้า สามารถสรุปสาเหตุของปัญหา ดังนี้

การออกแบบการทดลองในกระบวนการชุบสีด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปร คือ ความหนาสีและต้นทุนทางการผลิต ซึ่งปัจจัยที่มีผลนำมาทำการทดลองมี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) จึงใช้การทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล $2^k$ แบบ 1 เรพลิเคต ($2^k$ Factorial Design Single Replicate) เพื่อหาความมีนัยสำคัญของปัจจัยแต่ละระดับที่มีการเปลี่ยนจากระดับต่ำ (-1) ไปยังระดับสูง (+1) จึงได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง การทดลองนี้จะทำให้ทราบผลกระทบหลักและอันตรกิริยา เพื่อกรองปัจจัยก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อหาระดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ผลการทดลองจากโปรแกรม Minitab พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ มีดังนี้

1. สำหรับตัวแปรตอบสนองเรื่องความหนาสี มีปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ จำนวน 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) แต่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect)

2. สำหรับตัวแปรตอบสนองเรื่องต้นทุนทางการผลิต มีปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ จำนวน 2 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสี (A) และแรงดันไฟฟ้า (C) ส่วนเวลาในการชุบ (B) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย (Interaction Effect) แต่การคิดต้นทุนทางการผลิตจริงจำเป็นต้องคิดทั้ง 3 ปัจจัยเพื่อสามารถนำไปอ้างอิงการใช้ในโรงงานกรณีศึกษาถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์จะมีผลนัยสำคัญแค่ 2 ปัจจัยก็ตาม

**8.4 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ**

การปรับปรุงกระบวนการทำโดยหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสาม โดยทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการควบคุมความหนาสีให้อยู่ที่ค่า 20 ไมครอน และต้นทุนทางการผลิตที่ต่ำที่สุด โดยการกำหนดปัจจัยนำเข้า รูปแบบของการออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง ดังนี้

1. ความหนาสี มีปัจจัยที่จะทำการทดลองเพิ่มเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 3 ปัจจัย ดังนี้คือ ความเข้มข้นของสี (A) เวลาในการชุบ (B) และแรงดันไฟฟ้า (C) โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมด้วย CCD จากผลการทดลองพบว่า มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ของปัจจัยแรงดันไฟฟ้า (C) และระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นสี เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 volt ทำให้ตัวแปรค่าตอบสนอง คือ ความหนาสีมีค่าเป้าหมายที่ 20 ไมครอน

2. ต้นทุนทางการผลิต มีปัจจัยที่จะทำการทดลองเพิ่มเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุด จำนวน 2 ปัจจัย ดังนี้ คือ ความเข้มข้นของสี (A) และแรงดันไฟฟ้า (C) โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมด้วย CCD จากผลการทดลองพบว่า ไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) และระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นสี เท่ากับ 17.5 % solid เวลาในการชุบ 5.5 นาที และแรงดันไฟฟ้าในการชุบ 329 volt ทำให้ตัวแปรค่าตอบสนอง คือ

ความหนาสีมีค่าเป้าหมายที่ 20 ไมครอน และได้ค่าต้นทุนทางการผลิตต่ำที่สุดเท่ากับ 4,506 บาทต่อคัน

**8.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผล และการตรวจติดตามควบคุม**

การทดสอบยืนยันผลใช้เวลาการทดลอง 3 วัน จำนวน 60 ชุดข้อมูล พบว่าค่าความหนาสีเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 18.32 ไมครอนเป็น 19.76 ไมครอน ซึ่งได้ค่าใกล้เคียง 20 ไมครอนตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ ค่าความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk}$) ของความหนาสีในกระบวนการ EDP มีค่าเท่ากับ 1.47 ซึ่งสูงกว่า 1.33 ดีกว่าก่อนปรับปรุงมาก ค่า $C_p$ = 1.59 ที่มากกว่า 1.33 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไม่มีปัญหาเรื่องความผันแปรหลังจากผ่านการปรับปรุง รวมทั้งต้นทุนทางการผลิตที่สามารถลดลงคิดเป็นร้อยละ 12 หรือ 2,599,400 บาทต่อปี หรือ ซึ่งคิดจากจำนวนการผลิตรถ 4,100 คันต่อปี

จากนั้นได้มีการจัดทำแผนควบคุมทั้งปัจจัยปรับตั้งค่าและปัจจัยเชิงความผันแปร โดยปัจจัยการปรับตั้งค่าได้ออกแบบฟอร์มการตรวจสอบและบันทึกค่าของ เวลาในการชุบและแรงดันไฟฟ้าของรถทุกคัน โดยพนักงานฝ่ายผลิต ส่วนปัจจัยเชิงความผันแปรคือ ความเข้มข้นของสีได้ทำโดยวิธีการไตเตรต สร้างวิธีการทำงานแบบฟอร์มการบันทึกและทดสอบข้อมูล ทำการตรวจสอบวันละ 1 ครั้งก่อนเริ่มงาน โดยพนักงานฝ่ายผลิต

ขั้นตอนสุดท้ายได้ออกแบบควบคุมความหนาสีเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ด้วย X และ MR Chart เพื่อทำการติดตามความผิดปกติของค่าความหนาสี หากค่าความหนาสีออกนอกค่าควบคุม ต้องมีการดำเนินการแก้ไขทันทีตามแผนปฏิบัติการแก้ไข เพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนดไว้

**8.6 ข้อจำกัดในงานวิจัย**

1) การทดลองต้องทำควบคู่ไปกับการผลิตรถปกติ จึงทำให้การทดลองแต่ละครั้งต้องทำสัญลักษณ์หรือเครื่องหมายเอาไว้ที่รถเพื่อทำการทดลองนั้น และไม่สามารถทำการทดลองต่อเนื่องได้ เพราะอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตได้

2) การเก็บข้อมูลการทดลองต้องทำซ้ำหลายรอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีค่าเชื่อถือได้ จึงทำให้เสียเวลาและอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

3) ต้องเสียเวลารอรถรุ่น FML2 ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากบางครั้งรถมาไม่ต่อเนื่องและการสั่งรถจากลูกค้าบางช่วงลดลง

**8.7 ข้อเสนอแนะ**

1) ผลของการปรับปรุงกระบวนการชุบสีด้วยระบบไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรถรุ่นอื่นๆได้ หรือนำวิธีการไปใช้กับกระบวนการพ่นสีต่อเนื่องได้ เพราะเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องกัน

2) สามารถนำแนวคิดไปปรับปรุงคุณภาพลักษณะทางกายภาพในกระบวนการชุบสีได้

3) การปรับปรุงกระบวนการชุบสีหลังจากได้ค่าการปรับตั้งและการควบคุมแล้ว ต้องทำการสอนหัวหน้างานและพนักงานให้เข้าใจถึงวิธีการทำงาน การควบคุม และการแก้ไขปัญหา

4) การควบคุมความเข้มข้นของสี ต้องการตรวจสอบที่รวดเร็วและแม่นยำกว่านี้ อาจจะต้องลงทุนเพิ่มเติมในการสั่งซื้อเครื่องไตเตรตอัตโนมัติ และการเพิ่มเครื่องเติมสารเคมีแบบอัตโนมัติและต่อเนื่อง เพื่อรักษาค่าความเข้มข้นของสีให้คงที่ตลอดเวลา ไม่ต้องเสียเวลารอพนักงานไตเตรตและต้องทำการเติมสารเคมี สามารถลดพนักงานที่ต้องเสียเวลาเติมสารเคมี ไปทำอย่างอื่นได้และปลอดภัยกับตัวพนักงานที่ไม่ต้องทนสัมผัส หรือสูดดมกับสารเคมีที่เติม

5) สำหรับมีรถรุ่นใหม่ๆมา สามารถใช้สภาวะการทดลองนี้ได้ กรณีที่พื้นที่รถมีขนาดใกล้เคียงกัน และวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน

6) การศึกษางานวิจัยนี้บุคคลอื่นสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติม เรื่องการควบคุมความหนาสีทุกตำแหน่งของตัวรถทำอย่างไร ให้ได้ค่าความหนาสีใกล้เคียงกันมากที่สุด

# รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

2. สิทธิพร อารักษ์วรกุล, การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอะโนไดซ์พิสตันวาล์วด้วยวิธีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, วิศวกรรมอุตสาหการ. 2553, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
3. กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, การวิเคราะห์ระบบการวัด(MSA)(ประมวลผลด้วย Minitab 15). 2553, กรุงเทพฯ.
4. ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2545, กรุงเทพ.
5. วสันต์ พุกผาสุก และ อรรถกร เก่งพล, การลดของเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม โดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า: กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมชุบโครเมียม, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2551, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
6. อาทิตย์ หงสพันธ์, การลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์โดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2553, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. จรัสพงษ์ รักการ, การประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่าในการปรับปรุงคุณภาพการเคลือบสีสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2543, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
11. เยาวภา เลาหทวีโชค, การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบอลูมิเนียม, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2544, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
13. นิรันดร์ คะวะณะเสวิน, การพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการชุบโครเมี่ยมเคลือบผิวท่อไอเสียรถจักรยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2551, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
14. จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์, ธัญวรรณ มาศวิวัฒน์ และ ภัสสร หล่อวงศ์สกุล, การหาจุดเหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลอง CCD ในกระบวนการออกหน้ายาง, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2555, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
16. นพดนัย ขจรไพศาล, ผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดซ์ที่ขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

17. ดุษฎี บุญธรรม, การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตแท่งชิ้นงานในอุตสาหกรรมโดยใช้ระบบต้นทุน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ, 2556. **36**(2).

19. สมสกุล คูเจริญทรัพย์, การออกแบบคู่มือปฏิบัติงานสำหรับการจัดการเพื่อลดปัญหาการสูญเสียในโรงงานตัวอย่าง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2551, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ภาษาอังกฤษ

1. Wu, C., H. Lin, and Kuo, *Sample Size Determination for the Estimate of Process Capability Indics.* Information and Management Sciences, 2004. **15**: p. 1-12.

8. Reddy, C.M., et al., *Influence of surface pretreatment and electrocoating parameters on the adhesion of cathodic electrocoat to the Al alloy surfaces*, in *Department of Chemical Engineering*. 1998, University of Missouri.

9. Vatistas, N., *A new electrocoating technique to avoid cratering and increase voltage rupture*, in *Department of Chemical Engineering*. 1997, University of Pista.

10. Song, G., *Electroless deposition of a pre-film of electrophoresis coating and its corrosion resistance on a Mg alloy*, in *GM Research and Department Center*. 2009.

12. Bayramoglu M., B. Onat, and N. Geren, *Statistical optimization of process parameters to obtain maximum thickness and brightness in chromium plating*, in *Mechanical Engineering Department*. 2007, The University of Cukurova.

15. Hsu, S.Y., *Effects of water flow rate, salt concentration and water temperature on efficiency of an electrolyzed oxidizing water generator.* Journal of Food Engineering, 2003. **60**: p. 469-473.

18. BASF Coatings, *Coating Akademic Introduce to Electrodeposition*. 2012.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# ภาคผนวก


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| สารเคมี | KGS | $M^3$ | POINT (ML) | TOTAL ACID (ML) | FREE ACID (ML) | Zn g/L | Ni g/L | Mn g/L | % SOLID | SOVENT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RIDOLINE 1250 I | 25 | 39 | 0.42 | - | - | - | - | - | - | - |
| GRAANODINE 958 E | 30 | 44 | - | 0.42 | 0.07 | 0.05 | 0.00 56 | 0.00 95 | - | - |
| GRANODINE 958 A | 30 | 44 | - | 0.43 | 0.1 | 0.0 169 | 0.01 54 | 0.01 71 | - | - |
| GRANODINE TONER 65 | 25 | 44 | 2.0 | - | - | - | - | - | - | - |
| INTENSIFER # 3 | 35 | 44 | - | 0.4 | 0.1 | - | 0.05 8 | - | - | - |
| INTENSIFER # 8 | 35 | 44 | - | 0.5 | 0.1 | - | - | 0.44 4 | - | - |
| STARTER # 1 | 35 | 44 | - | 0.5 | 0.03 | 0.1 | - | - | - | - |
| PRIMER 40 | 25 | 44 | 0.3 | - | - | - | - | - | - | - |
| DEOXYLYTE 54NC | 30 | 39 | 1.74 | - | - | - | - | - | - | - |
| TONER 80 | 20 | 39 | 6.4 | - | - | - | - | - | - | - |
| FIXODINE | 20 | 39 | 1.0 | - | - | - | - | - | - | - |
| PIGMENT | 252 | - | - | - | - | - | - | - | 0.22 | - |
| BINDER/RESIN | 210 | - | - | - | - | - | - | - | 0.13 | - |
| SOLVENT F2 600 | 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.03 |
| SOLVENT BUTYL | 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.03 |

รูปที่ ผ.1 ตารางการปรับคุณภาพน้ำยาและสี

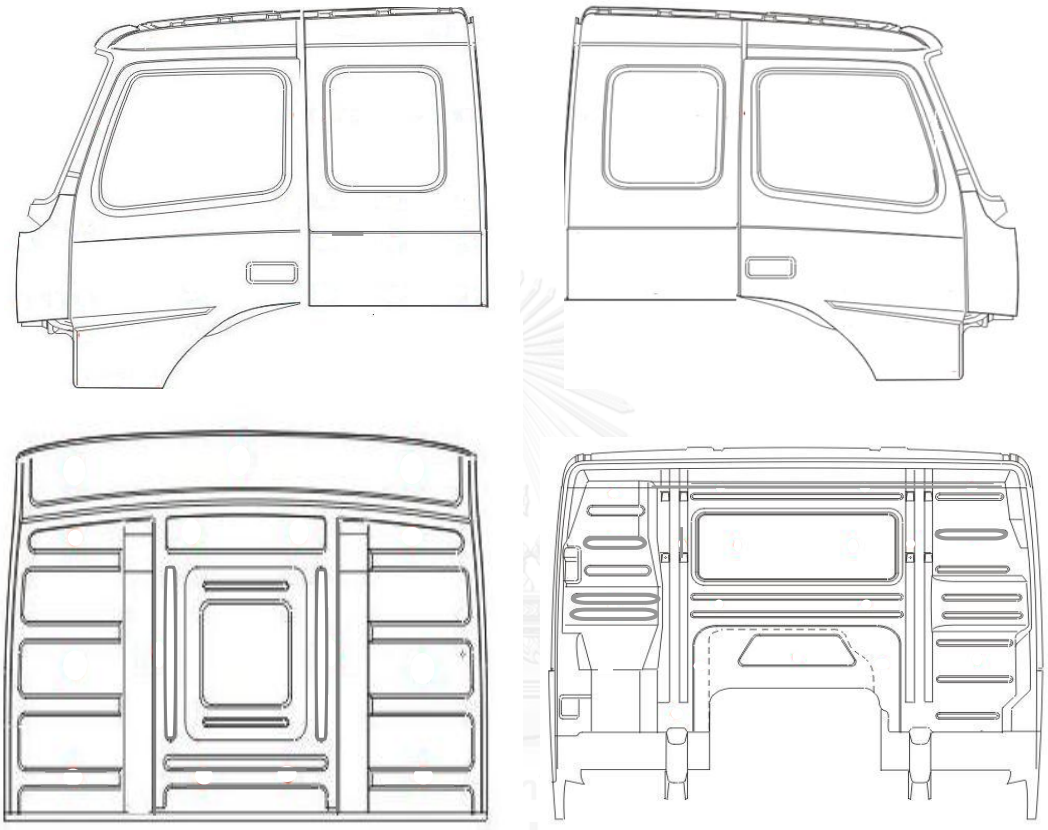
**THAI-SWEDISH ASSEMBLY CO., LTD. & TMBP LIMITED**

**CHECK THICKNESS AND CROSS CUT VOLVO TRUCK CAB ( B- SHOP )**

☐ เช็คความหนาสี ED ( THICKNESS )  ☐ CALIBRATION THICKNESS METER

☐ เช็คการยึดเกาะสี ( CROSS CUT )

**DATE ……..……..……..…CAB NO. ..……..……..…. . MODEL ……..…..**



| RESULT CROSS CUT | | | | **บันทึกการแก้ไข** | REPORT BY ID NO. |
|---|---|---|---|---|---|
| RESULT THICKNESS (MICRON) | | | | | |
| Station | STD. | ED | Pass | | |
| LH. | 17-23 | | | | APPROVED BY ID NO. |
| RH. | | | | | |
| Roof | | | | | |
| Rear Wall | | | | | |

**FM -707-05-14 / REV04**

รูปที่ ผ.2 แบบฟอร์มการบันทึกค่าความหนาสี

| ลำดับ | ความหนาสี (ไมครอน) | ลำดับ | ความหนาสี (ไมครอน) |
|---|---|---|---|
| 1 | 19.4 | 31 | 19.6 |
| 2 | 19.9 | 32 | 19.6 |
| 3 | 21.0 | 33 | 18.7 |
| 4 | 19.0 | 34 | 19.6 |
| 5 | 19.5 | 35 | 19.0 |
| 6 | 20.0 | 36 | 19.5 |
| 7 | 20.1 | 37 | 21.0 |
| 8 | 20.2 | 38 | 20.0 |
| 9 | 19.7 | 39 | 19.4 |
| 10 | 18.7 | 40 | 20.0 |
| 11 | 19.5 | 41 | 20.0 |
| 12 | 19.4 | 42 | 19.5 |
| 13 | 20.2 | 43 | 20.4 |
| 14 | 20.8 | 44 | 20.5 |
| 15 | 20.5 | 45 | 19.5 |
| 16 | 22.0 | 46 | 20.0 |
| 17 | 20.3 | 47 | 18.3 |
| 18 | 19.7 | 48 | 19.2 |
| 19 | 20.5 | 49 | 21.4 |
| 20 | 21.0 | 50 | 19.5 |
| 21 | 21.4 | 51 | 20.0 |
| 22 | 20.3 | 52 | 20.4 |
| 23 | 20.5 | 53 | 19.3 |
| 24 | 20.4 | 54 | 18.7 |
| 25 | 20.0 | 55 | 18.5 |
| 26 | 19.6 | 56 | 18.5 |
| 27 | 19.5 | 57 | 18.2 |
| 28 | 18.7 | 58 | 20.0 |
| 29 | 18.0 | 59 | 19.6 |
| 30 | 18.0 | 60 | 20.0 |

รูปที่ ผ.3 ผลการทดลองความหนาสีหลังการปรับปรุง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศศิธร ขำกรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 13 มีนาคม 2530 ที่จังหวัด กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีอ่างทอง จังหวัดอ่างทอง และเข้าศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 ภายหลังจบการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัท วอลโว่ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรฝ่ายวิศวกรรม จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University