Srinakharinwirot University Engineering Journal (2021) 16(3), 84-94 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2564

การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องสีแตกในกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

Reduction of Defective Rate from Crack Defects in Painting Process of Motorcycle Parts

ชนิกานต์ รักธงไทย* นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
Chanikan Rakthongthai* Napassavong Osothsilp
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330
*Corresponding author Email: chanikan.rak@hotmail.com
(Received: September 2, 2021; Revised: November 16, 2021; Accepted: December 5, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกในกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยประยุกต์ใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา เริ่มจากการศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน ต่อมาทำการวิเคราะห์ความแม่นและเที่ยงของระบบการวัด จากนั้นวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และนำปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการเกิดสีแตก 4 ปัจจัยไปทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งได้แก่ปัจจัย อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED และวิธีการขัดผิวชิ้นงาน ในขั้นตอนปรับปรุงกระบวนการ ได้ปรับปรุงวิธีการขัดชิ้นงาน เป็นแบบขัดทั้งแนวนอนและแนวตั้ง สำหรับ 3 ปัจจัยที่เหลือ ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ความดันในการล้างชิ้นงาน เท่ากับ 1.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED เท่ากับ 180 โวลต์ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปปรับใช้ในกระบวนการและจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงาน หลังจากปรับปรุงกระบวนการ พบว่า สามารถลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกจาก 3.82 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.98 เปอร์เซ็นต์ และจากปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ไว้ในปี 2564 จะมีการผลิตทั้งสิ้น 95,069 ชิ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกได้ 81,257 บาท

คำสำคัญ: การลดสัดส่วนของเสีย กระบวนการพ่นสี สีแตก ชิ้นส่วนโลหะ

ABSTRACT

This research aims to reduce the defective rate in the painting process of motorcycle parts. This research applied the Six Sigma approach. Firstly, the problem statement was defined. Secondly, the accuracy and precision of the inspection system were appraised. Next, the potential causes for crack defects were analyzed. Then, the four factors were statistically tested: cleaning temperature, cleaning pressure, electrodeposited paint voltage, and sanding method. In the improvement phase, the

sanding method was improved to be both horizontal and vertical sanding. In addition, Box-Behnken design was applied to find out the optimal levels of the three remaining factors. The optimal setting was at the cleaning temperature of 40 degrees Celsius, cleaning pressure of 1.4 kilograms per square centimeter, and electrodeposited paint voltage of 180 volts. After that, the optimal setting was applied in the process to confirm the experimental result. Finally, a new control plan and work instruction were adjusted to control the process after the improvement. After improvement, the defective rate due to crack defects decreased from 3.82 percent to 0.98 percent. The improvement is expected to reduce the rework cost of 81,257 baht based on the forecasted production volume of 95,069 units in 2021.

Keyword: Defective Rate Reduction, Painting Process, Crack Defect, Metal Part.

1. บทนำ

ในการผลิตรถจักรยานยนต์ กระบวนการพ่นสีนับได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญ โดยวัตถุประสงค์ในการพ่นสี คือ เพื่อสร้างความความสวยงามให้กับผลิตภัณฑ์และป้องกันพื้นผิวของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์จากมลภาวะต่าง ๆ โดยสีที่เคลือบผิวจะช่วยให้พื้นผิวของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์มีความทนทานต่ออากาศ น้ำ และสารเคมีต่าง ๆ อีกทั้งยังช่วยให้พื้นผิวของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์มีความแข็งแรง ทนทานต่อการขัดสีได้มากขึ้น และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น [1] แต่ในกระบวนการพ่นสี มักพบปัญหาของเสีย คือ เกิดข้อบกพร่องกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งสาเหตุในการเกิดข้อบกพร่องนั้นมีหลายประการ เช่น เตรียมพื้นผิวชิ้นส่วนที่ต้องการพ่นสีไม่ดีพอ ทำการพ่นสีภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม และเคลือบพื้นผิวบางหรือหนาเกินไป เป็นต้น ดังนั้น สามารถป้องกันการเกิดข้อบกพร่อง หรือให้เกิดน้อยที่สุดได้ โดยการหลีกเลี่ยงสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในการลดของเสียในกระบวนการพ่นสีในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งกระบวนการของซิกซ์ ซิกมา ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ การนิยามปัญหา (Define: D) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure: M) การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze: A) การปรับปรุง (Improve: I) และการควบคุม (Control: C) โดยในงานวิจัยของ K.Srinivasan และคณะ [2] ได้ใช้แนวคิด ซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียประเภทสีลอก และสีพองในกระบวนการพ่นสีโช้คอัพรถยนต์ โดยมุ่งเน้นที่จะลดของเสียจากกระบวนการเตรียมผิว (Pretreatment) เมื่อปรับปรุงกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงาน พบว่า ของเสียประเภทสีลอกและสีพองลดลง โดยกระบวนการมีระดับซิกมาเพิ่มขึ้นจาก 3.3 เป็น 4.5 ทิชา [3] ได้ทำการลดของเสียที่เป็นเม็ดฝุ่นในกระบวนการพ่นสีกันชนหน้าพลาสติกของรถยนต์ โดยประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา ซึ่งหลังปรับปรุงสามารถลดของเสียได้ 69 เปอร์เซ็นต์ และอาทิตย์ [4] ได้ทำการลดข้อบกพร่องในกระบวนการพ่นสีตัวถังรถยนต์ โดยได้เลือกแก้ไขข้อบกพร่องทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ เส้นใย สีเป็นคราบ สีเป็นรอยขีด เม็ดผง สีไหล เม็ดพื้น และสีเป็นหลุม โดยใช้แนวทางการปรับปรุงของซิกซ์ ซิกมาทั้ง 5 ขั้นตอน หลังปรับปรุงสามารถลดจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อรถ 1 คันลงได้ 57 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีรถจักรยานยนต์ โดยการนำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุนในกระบวนการผลิต เนื่องด้วยวิธีการของซิกซ์ ซิกมามีการ

พิสูจน์ความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยที่กระทบกับปัญหาและช่วยกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการพ่นสีได้อย่างมีประสิทธิผลโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ [5]

2. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานในการลดของเสียในกระบวนการพ่นสีรถจักรยานยนต์ มีดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้น

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จากนั้นนำข้อมูลสัดส่วนของเสียไปวิเคราะห์ด้วยแผนผังพาเรโต (Pareto Chart) เพื่อเลือกประเภทข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมากที่สุดมาปรับปรุง

2.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด

การวัดสัดส่วนของเสียจะทำโดยตรวจสอบข้อบกพร่องด้วยสายตา จึงต้องวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบด้วยเทคนิค Attribute Agreement Analysis โดยสุ่มพนักงานตรวจสอบทั้งหมด 3 คน มาทำการตรวจสอบชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ตามขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม [6] โดยคัดเลือกชิ้นงานมา 20 ชิ้น และตรวจสอบซ้ำชิ้นละ 3 ครั้ง แล้วบันทึกผลการตรวจสอบว่าพบข้อบกพร่องประเภทสีแตกหรือไม่ ในการตรวจสอบในแต่ละรอบของพนักงานแต่ละคน ได้จัดให้ลำดับในการตรวจสอบชิ้นงานเป็นแบบสุ่ม เมื่อตรวจสอบครบหนึ่งรอบแล้ว ในรอบต่อไป ได้กำหนดลำดับในการตรวจสอบชิ้นงานเป็นแบบสุ่มอีกเช่นกัน

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานได้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่คาดว่าทำให้เกิดปัญหาข้อบกพร่องประเภทที่เลือกในกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยระดมสมองจากคณะทำงาน (Brainstorming) โดยใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) [7] ซึ่งวิเคราะห์โดยแบ่งหัวข้อหลักออกเป็น 5 กลุ่ม คือ สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน (Man) สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine) สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material) สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method) และสาเหตุจากสิ่งแวดล้อม (Environment) จากนั้นเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) [8] ในการให้คะแนนของปัจจัย และคัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าส่งผลกระทบสูงต่อปัญหา เพื่อนำไปพิสูจน์ความมีนัยสำคัญและปรับปรุงต่อไป

2.4 การปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานได้ทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยที่เลือกมา และกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [9] โดยเริ่มจากการกำหนดตัวแปรตอบสนอง และตัวแปรอิสระ และพิจารณาข้อจำกัดที่จะส่งผลต่อการทดลอง จากนั้นเลือกแบบการทดลอง และกำหนดระดับของปัจจัย ต่อมากำหนดขั้นตอนการทดลอง และวิธีเก็บข้อมูล จากนั้นทำการทดลองตามแผนที่วางไว้ และวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอย [10] และสรุปผลการทดลอง

2.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานนำค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการมาปรับใช้ในกระบวนการจริง และทำการเก็บข้อมูล เพื่อยืนยันผลการปรับปรุงที่ได้ พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงาน เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน และควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาของเสียเพิ่มขึ้นอีก

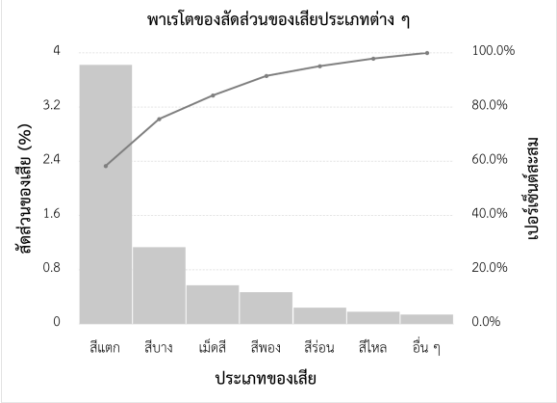
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการกำหนดปัญหา

เมื่อพิจารณาข้อมูลสัดส่วนของเสียประเภทต่าง ๆ จากกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.

2562 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 พบว่า สัดส่วนของเสียที่มากเป็นอันดับหนึ่งเกิดจากข้อบกพร่องสีแตก โดยมีสัดส่วนของเสียเท่ากับ 3.82 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต ซึ่งคิดเป็น 58.3 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมด ทำให้เกิดต้นทุนของเสีย 132,898 บาท ดังนั้นจึงเลือกศึกษาและปรับปรุงเพื่อลดข้อบกพร่องประเภทสีแตกที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสี

ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตกที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ คือ สีทับหน้ามีการแตกและทะลุผิวเคลือบอย่างน้อย 1 ชั้น ที่บริเวณตัวหนังสือของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านความสวยงามของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1 แผนผังพาเรโตของสัดส่วนของเสีย

รูปที่ 2 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตกของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

3.2 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

จากผลการวิเคราะห์ระบบการวัด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ค่าดัชนีชี้วัดของระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คน ผ่านเกณฑ์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ทุกค่า ดังนั้น ระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือ

3.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

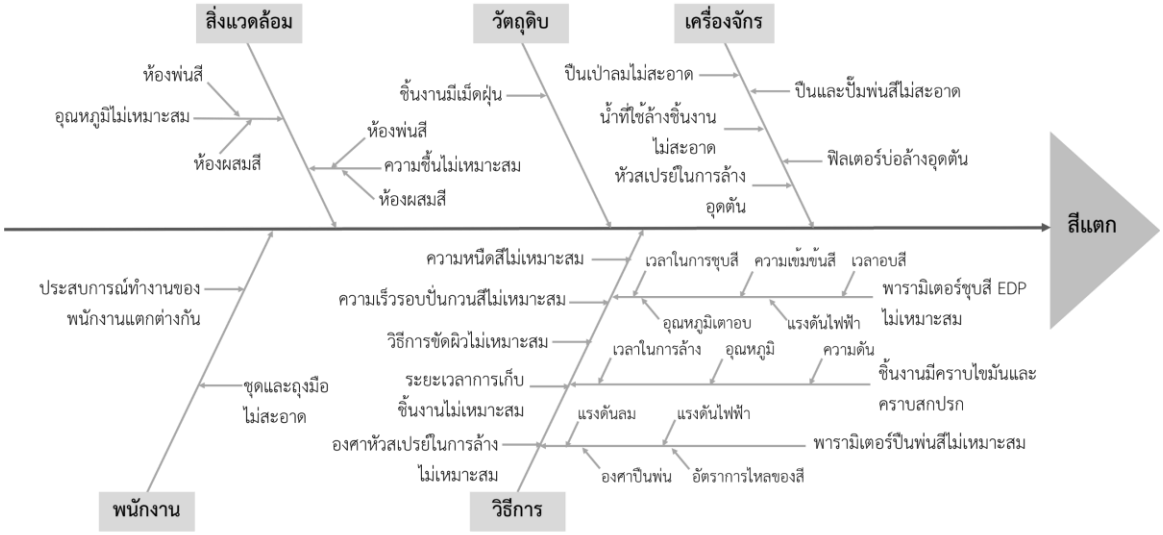
จากการระดมสมองและใช้แผนผังสาเหตุและผล พบปัจจัยที่เป็นไปได้ที่มีผลต่อสีแตก ดังรูปที่ 3 จากนั้นเรียงลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยการให้คะแนนในตารางแสดงเหตุและผล หลังจากนั้นนำคะแนนที่ได้มาเรียงลำดับจากมากไปน้อย โดยปัจจัยที่มีคะแนนสูง แสดงดังตารางที่ 2 หลังจากคัดเลือกปัจจัยที่มีคะแนนสูงและไม่ติดข้อจำกัดในการทดลอง พบว่า มีทั้งหมด 4 ปัจจัยที่เลือกมาศึกษาต่อ ได้แก่ อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED และวิธีการขัดผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ดัชนีชี้วัด	พนักงาน คนที่ 1	พนักงาน คนที่ 2	พนักงาน คนที่ 3
ความสามารถในการวัดซ้ำ	100%	100%	100%
ความไม่ไบอัส	100%	100%	100%
ความพ้องกันของค่าวัด	100%		
ความพ้องกันและถูกต้องของค่าวัด	100%		

โดยมีสมมติฐานว่าแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบต่อการเกิดสีแตก ดังนี้

1. ถ้าใช้อุณหภูมิในการล้างทำความสะอาดชิ้นงานไม่เหมาะสม คราบไขมันหรือคราบสกปรกที่ผิวชิ้นงานอาจจะออกไม่หมด ส่งผลให้ผิวชิ้นงานไม่สะอาด ซึ่งถ้าผิวของชิ้นงานไม่สะอาด จะส่งผลให้สารเคมีปรับสภาพพื้นผิวและสารฟอสเฟตเคลือบที่ผิวชิ้นงานได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างสีและผิวชิ้นงานจะลดลง ทำให้เกิดสีแตกขึ้นได้ [11, 12]



รูปที่ 3 แผนผังสาเหตุและผล

2. ถ้าใช้ความดันในการล้างทำความสะอาดชิ้นงานไม่เหมาะสม ทำให้ความแรงที่พุ่งออกจากหัวสเปรย์ของน้ำสารเคมีปรับสภาพพื้นผิวและสารฟอสเฟตไม่เหมาะสม ส่งผลให้ทำความสะอาดผิวชิ้นงานได้ไม่สะอาด ซึ่งถ้าผิวของชิ้นงานไม่สะอาดจะส่งผลให้เมื่อนำไปพ่นสี ประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างสีและผิวของชิ้นงานลดลง ทำให้เกิดสีแตกขึ้นได้ [11, 12]

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีคะแนนสูง

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า
1	อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน
2	ความดันในการล้างชิ้นงาน
3	แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED
4	วิธีการขัดผิวชิ้นงาน
5	หัวสเปรย์ในการล้างชิ้นงานอุดตัน
6	ระยะเวลาในการล้างชิ้นงาน
7	องศาของหัวสเปรย์ในการล้างชิ้นงาน
8	ความเข้มข้นของสี ED
9	ระยะเวลาในการชุบสี ED
10	ระยะห่างในการพ่นสี
11	ความหนืดของสี
12	แรงดันไฟฟ้าของปืนพ่น
13	อัตราการไหลของสี

3. หากแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้สีมีความหนามากเกินไป ทำให้สีไม่สามารถขยายตัวและหดตัวได้ในอัตราที่เท่ากันระหว่างกรรมวิธีการแห้งตัวของฟิล์ม เนื่องจากความเค้นจากการเคลือบสีตรงบริเวณผิวจะหดตัวเร็วกว่าฟิล์มสี ส่งผลให้สีเกิดการแตกขึ้นได้ [13]

4. วิธีการขัดผิวชิ้นงานไม่เหมาะสม หากขัดลูบไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน จะทำให้สียึดเกาะได้น้อย ทำให้เกิดสีแตกได้ เนื่องจากการขัดผิวเป็นการเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยทำให้สียึดเกาะได้ดีขึ้น [14]

จากนั้นทดสอบความมีนัยสำคัญของ 4 ปัจจัย และกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญในระยะต่อไป

3.4 ผลการปรับปรุงกระบวนการ

เริ่มจากการออกแบบการทดลอง โดยได้เลือกรูปแบบการทดลองออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ การทดลองทีละปัจจัยสำหรับวิธีการขัดผิวชิ้นงาน เพื่อทดสอบว่าวิธีการขัดผิวชิ้นงานแบบใดให้สัดส่วนของเสียน้อยกว่า เมื่อได้วิธีการขัดผิวชิ้นงานที่เหมาะสมแล้ว จึงจะไปหาค่าที่เหมาะสมของ 3 ปัจจัยที่เหลือ โดยการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) สำหรับ 3 ปัจจัยที่เหลือ

3.4.1 ผลการทดลองของปัจจัยวิธีการขัดผิวชิ้นงาน

ก่อนพ่นสีจะมีการขัดผิวชิ้นงานก่อนพ่นสี จากเดิมมีการขัดผิวชิ้นงานตามแนวนอนเพียงแนวเดียว (วิธีที่ 1) ซึ่งอาจทำให้สียึดเกาะได้ไม่มากนัก จึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการขัด โดยขัดทั้งแนวนอนและแนวตั้ง (วิธีที่ 2) ในลักษณะของตาข่าย เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของสีให้มากขึ้น โดยสมมติฐานที่ทดสอบ เป็นดังนี้

H_0 : สัดส่วนของเสียเรื่องสีแตกเมื่อใช้วิธีการขัดผิวแบบที่ 1 และวิธีการขัดผิวแบบที่ 2 ไม่แตกต่างกัน

H_1 : สัดส่วนของเสียเรื่องสีแตกเมื่อใช้วิธีการขัดผิวแบบที่ 1 มากกว่าวิธีการขัดผิวแบบที่ 2

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนของเสียประเภทสีแตก ดังนั้น ในการเก็บข้อมูลจึงต้องคำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมมติฐานแบบค่าสัดส่วน 2 ประชากร ได้จากสมการ

$$n = \frac{2\left(z_{\alpha/2} + z_{\beta}\right)^2 \frac{p_1+p_2}{2}\left(1-\frac{p_1+p_2}{2}\right)}{(p_1-p_2)^2} \qquad (1)$$

จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของวิธีการขัดผิววิธีละ 7,800 ชิ้น พบว่า ค่าสัดส่วนของเสียจากการขัดผิวชิ้นงานแนวนอนเพียงแนวเดียว p_1 เท่ากับ 0.0423 และสัดส่วนของเสียจากการขัดผิวชิ้นงานทั้งแนวนอนและแนวตั้ง p_2 เท่ากับ 0.0286 กำหนดกำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.95 และระดับนัยสำคัญ 0.05 ต้องใช้ขนาดตัวอย่าง อย่างน้อยวิธีละ 3,941 ชิ้น ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาแล้วเพียงพอ

จากผลการทดสอบสมมติฐาน เมื่อปรับปรุงวิธีการขัดโดยขัดทั้งแนวนอนและแนวตั้งในลักษณะของตาข่าย พบว่า สัดส่วนของเสียลดลงจาก 4.23 เปอร์เซ็นต์ เป็น 2.86 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังตารางที่ 3 ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าวิธีการขัดผิวชิ้นงานทั้งแนวนอนและแนวตั้งเกิดสัดส่วนของเสียน้อยกว่าการขัดผิวชิ้นงานตามแนวนอนเพียงแนวเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐานของวิธีการขัดผิวชิ้นงานก่อนพ่นสี

วิธีการขัดผิวชิ้นงาน	จำนวนของเสีย	จำนวนชิ้นงาน	สัดส่วนของเสีย	P-Value
แนวนอน	330	7,800	0.0423	<0.0005
แนวนอนและแนวตั้ง	223	7,800	0.0286	

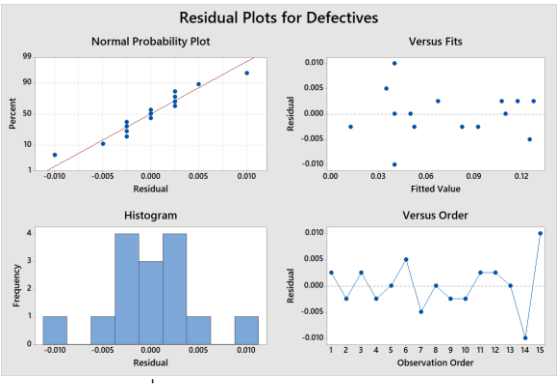
3.4.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

สำหรับอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED ได้ทำการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ทั้งหมด 15 การทดลอง เนื่องจากมีจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางที่มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง และการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะไม่มีการทดลองในสภาวะที่รวมของปัจจัยระดับสูงทั้งหมดหรือระดับต่ำทั้งหมด ซึ่งหลีกเลี่ยงการทดลองในสภาวะที่อาจเกิดของเสียที่มากได้ โดยกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองตามช่วงของค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุดของสภาวะการใช้งานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดลองที่ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับสูง (+1) และที่จุดศูนย์กลาง (0) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
		-1	0	+1	
Temp	อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน	38	40	42	องศาเซลเซียส (°C)
Pressure	ความดันในการล้างชิ้นงาน	0.5	1	1.5	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)
Voltage ED	แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED	180	200	220	โวลต์ (V)

ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญของปัจจัยที่ทดสอบและตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนของเสียจากสีแตก ก่อนที่จะเชื่อถือในแบบจำลองสมการถดถอย จำเป็นต้องทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยต้องเป็นไปตามสมมติฐาน 3 ข้อ ซึ่งทดสอบด้วยการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง ดังแสดงในรูปที่ 4 ในส่วนสมมติฐานที่ 1 คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ จะเห็นได้ว่าฮิสโตแกรมจะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ และจากกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ ค่าส่วนตกค้างมีการจัดเรียงในลักษณะเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานที่ 2 ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน จะเห็นได้ว่ากราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการทดลอง (Observation Order) มีการกระจายอย่างสุ่ม สรุปได้ว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน และสมมติฐานที่ 3 ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ จะเห็นได้ว่ากราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม สรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงสามารถนำแบบจำลองสมการถดถอยไปใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญของปัจจัยที่ทดสอบและตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนของเสียจากสีแตกได้



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอย ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญ คือ เทอมที่มีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีอยู่ 7 เทอม ได้แก่ ผลกระทบหลักของอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED เทอมกำลังสองของอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED และผลกระทบร่วมระหว่างความดันในการล้างชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED

จากการพิจารณากราฟพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อความดันในการล้างชิ้นงานเพิ่มขึ้น จะได้สัดส่วนของเสียที่น้อยลง และเมื่อแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED ลดลง จะได้สัดส่วนของเสียที่น้อยลง และเมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความดันในการล้างชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED จะพบว่า ที่ความดันในการล้างชิ้นงาน 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED เปลี่ยนจาก 220 โวลต์ ไปที่ 180 โวลต์ สัดส่วนของเสียจะลดลงมากกว่าที่ความดันในการล้างชิ้นงานที่ 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากการพิจารณากราฟผลกระทบหลักอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 เมื่อใช้อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน 38 องศาเซลเซียส จะได้สัดส่วนของเสียที่มากที่สุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการล้างชิ้นงานเป็น 40 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเกิดสัดส่วนของเสียต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการล้างชิ้นงานเป็น 42 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าสัดส่วนของเสียจะเพิ่มขึ้น แต่ไม่มากนัก

3.4.3 การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับสัดส่วนของเสีย ซึ่งแสดงด้วยสมการถดถอย จากนั้นนำสมการถดถอยที่ได้มาหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab

Response Surface Regression: Defectives versus Temp, Pressure, VoltageED

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.020033	0.002862	66.78	0.000
Linear	3	0.014900	0.004967	115.89	0.000
Temp	1	0.000450	0.000450	10.50	0.014
Pressure	1	0.003200	0.003200	74.67	0.000
VoltageED	1	0.011250	0.011250	262.50	0.000
Square	3	0.004233	0.001411	32.93	0.000
Temp*Temp	1	0.001131	0.001131	26.38	0.001
Pressure*Pressure	1	0.001869	0.001869	43.62	0.000
VoltageED*VoltageED	1	0.001869	0.001869	43.62	0.000
2-Way Interaction	1	0.000900	0.000900	21.00	0.003
Pressure*VoltageED	1	0.000900	0.000900	21.00	0.003
Error	7	0.000300	0.000043		
Lack-of-Fit	5	0.000100	0.000020	0.20	0.936
Pure Error	2	0.000200	0.000100		
Total	14	0.020333			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0065465	98.52%	97.05%	94.34%

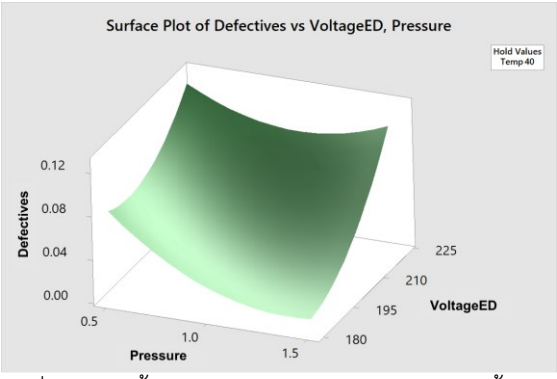
Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.04000	0.00378	10.58	0.000	
Temp	-0.01500	-0.00750	0.00231	-3.24	0.014	1.00
Pressure	-0.04000	-0.02000	0.00231	-8.64	0.000	1.00
VoltageED	0.07500	0.03750	0.00231	16.20	0.000	1.00
Temp*Temp	0.03500	0.01750	0.00341	5.14	0.001	1.01
Pressure*Pressure	0.04500	0.02250	0.00341	6.60	0.000	1.01
VoltageED*VoltageED	0.04500	0.02250	0.00341	6.60	0.000	1.01
Pressure*VoltageED	0.03000	0.01500	0.00327	4.58	0.003	1.00

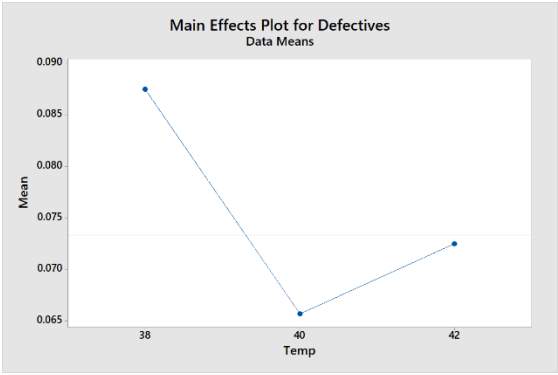
Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Defectives} = 9.50 - 0.3538\ \text{Temp} - 0.5200\ \text{Pressure} - 0.02212\ \text{VoltageED} + 0.004375\ \text{Temp}^*\text{Temp} + 0.0900\ \text{Pressure}^*\text{Pressure} + 0.000056\ \text{VoltageED}^*\text{VoltageED} + 0.001500\ \text{Pressure}^*\text{VoltageED}$$

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนของเสียสีแตก



รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวผลตอบของความดันในการล้างชิ้นงานและแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED

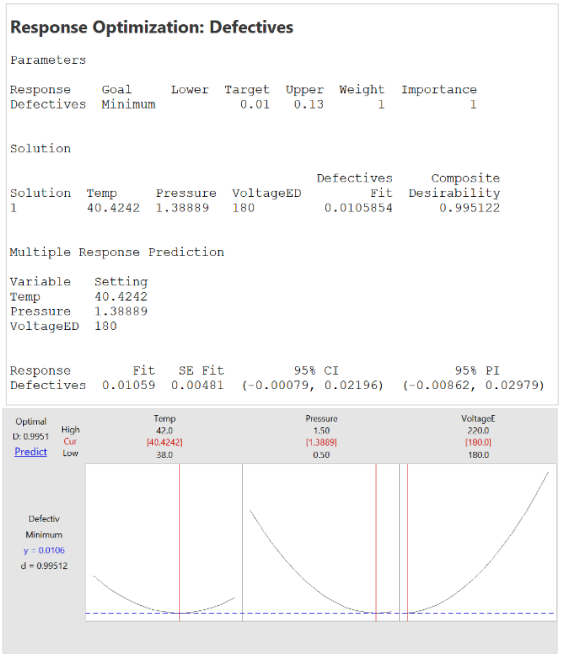


รูปที่ 7 กราฟผลกระทบหลักของอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน

ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า จะเกิดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกน้อยที่สุดเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน 40.4242 องศาเซลเซียส ความดันในการล้างชิ้นงาน 1.3889 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED 180 โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถตั้งค่าของปัจจัยในตำแหน่งทศนิยมที่จะละเอียดเช่นนี้ได้ จึงต้องปรับค่าปัจจัยเหล่านี้ให้มีตำแหน่งทศนิยมตามที่สามารถปรับตั้งเครื่องจักรได้ และทำให้ได้ค่า Composite Desirability สูงที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้สัดส่วนของเสียประเภทสีแตกต่ำที่สุด จึงได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย คือ อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ความดันในการล้างชิ้นงาน เท่ากับ 1.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED เท่ากับ 180 โวลต์ หลังจากนั้นนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมนี้ไปปรับใช้จริงในกระบวนการ เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้

3.5 ผลการควบคุมกระบวนการ

ในระยะนี้ผู้วิจัยได้ปรับตั้งค่าปัจจัยตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากระยะการปรับปรุงกระบวนการ และเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 21 วัน จากปริมาณการผลิตทั้งหมด 5,717 ชิ้น เพื่อยืนยันผลการปรับปรุงที่ได้ พบว่า เกิดของเสีย 56 ชิ้น ซึ่งคิดเป็น 0.98 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น จัดทำเอกสารปฏิบัติงานใหม่ และจัดทำแผนควบคุม เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน โดยกำหนดให้มีการตรวจสอบการปรับตั้งค่าอุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน และแรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED ทุก 2 ชั่วโมง และบันทึกข้อมูลลงแผ่นรายการตรวจสอบ สำหรับวิธีการขัดผิวชิ้นงาน ให้ทำการตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตาทุกครั้งก่อนพ่นสีว่าได้ถูกขัดทั้งแนวนอนและแนวตั้ง และหลังจากปรับปรุงและควบคุมกระบวนการ พบว่า มีสัดส่วนของเสียลดลงจาก 3.82 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.98 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังตารางที่ 5 ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าสัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจากปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ไว้ในเดือนปี 2564 จะมีการผลิตทั้งสิ้น 95,069 ชิ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกได้ 81,257 บาท



รูปที่ 8 ผลการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบยืนยันผลเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

สัดส่วนของเสีย		P-Value
ก่อนปรับปรุง	0.0382	<0.0005
หลังปรับปรุง	0.0098	

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ เพื่อลดข้อบกพร่องประเภทสีแตกที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ ทำให้สามารถหาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องได้ จากนั้นทำการทดลองหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย และนำค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้มาปรับใช้ในกระบวนการจริง พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงาน หลังจากปรับปรุงกระบวนการ พบว่า

สามารถลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกจาก 3.82 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.98 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต

งานวิจัยนี้แสดงถึงการนำวิธีการทางสถิติต่าง ๆ ตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นชิ้นส่วนเหล็ก ที่ต้องตั้งค่าปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการล้างชิ้นงาน ความดันในการล้างชิ้นงาน แรงดันไฟฟ้าในการชุบสี ED และวิธีการขัดผิวชิ้นงาน วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้สำหรับชิ้นส่วนเหล็กอื่น ๆ ที่มีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างไปได้ ในการกำหนดระดับปัจจัยที่จะทดสอบจะต้องคำนึงถึงขนาด รูปร่าง คุณสมบัติของเหล็ก และข้อกำหนดเฉพาะที่แตกต่างกันไปของแต่ละชิ้นส่วนที่จะปรับปรุงด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

[1] O. Saravari, *Surface Coating (Paint, Varnish and Lacquer)*. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2001.

[2] K. Srinivasan, S. Muthu, N. K. Prasad, and G. Satheesh, "Reduction of Paint line Defects in Shock Absorber Through Six Sigma DMAIC Phases," *Procedia Engineering,* vol. 97, pp. 1755-1764, 2014.

[3] T. Sansom, "Black-Seed Defect Reduction in Painting Process of Plastic Front Car-Bumper By Six Sigma Approach," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.

[4] A. Hongsapan, "Defect Reduction in Painting Process of Car-Bodywork By Six Sigma Approach," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2010.

[5] T. Pyzdek, *The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2018.

[6] Y. Fasser and D. Brettner, *Process Improvement in the Electronics Industry*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1992.

[7] N. Thawesaengskulthai, *Quality Engineering and Management Guide to Continual Improvement and Innovation Creation*. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2019.

[8] T. Senprom, "Glass-Mold Defective Reduction in Plastic Lens Manufacturing Process Using Six Sigma Approach," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2007.

[9] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 10th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2019.

[10] J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 9th ed. USA: Brooks/Cole, 2016.

[11] N. Akafuah, S. Poozesh, A. Salaimeh, G. Patrick, K. Lawler, and K. Saito, "Evolution of the Automotive Body Coating Process—A Review," *Coatings,* vol. 6, no. 2, 2016.

[12] S. Narayanan, "Surface Pretreatment by Phosphate Conversion Coatings - a Review," *Advanced Materials Science,* vol. 9, pp. 130-177, 2005.

[13] Y. Oyabu, N. Furuno, Y. Hirasawa, and H. Omori, "Electrodeposition Coating Process

for Automobile Bodies," *Transactions ISIJ,* vol. 23, pp. 994-1008, 1983.

[14] B. Müller and U. Poth, *Coatings Formulation: An International Textbook*. Germany: Vincentz Network, 2011.