

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อความหนาของชั้นสีเกินมาตรฐานในการเคลือบสีกันสนิมของฝากระโปรงรถยนต์

ชลิดา ซาญวิจิตร¹ อภิชาติ ชัยชวลิต^{2*} และ โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์²

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

² สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: apichartcha@pim.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 มกราคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 1 พฤษภาคม 2569; วันที่ตอบบทความ: 9 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมสำหรับชิ้นส่วนฝากระโปรงหน้ารถยนต์ เพื่อแก้ไขปัญหาความหนาของชั้นสีเกินค่ามาตรฐานซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและต้นทุนการผลิต โดยงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนในการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดความหนาของชั้นสีเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งปัจจัยประกอบด้วยผลกระทบของ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า 250-300 โวลต์ อุณหภูมิ 32-35 องศาเซลเซียส และปริมาณสารเคมีไปโอไซด์ 200-400 ลิตร ผลการทดลองพบว่าทั้งสามปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ แรงดันไฟฟ้า 252 โวลต์ อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไปโอไซด์ 345 ลิตร จากการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ค่าความหนาเท่ากับ 1.32 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมสำหรับชิ้นส่วนฝากระโปรงหน้ารถยนต์ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้

คำสำคัญ: การเคลือบสีกันสนิม; การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน; ความหนาของชั้นสี

Experimental Design for Optimization of Conditions Affecting Over-Standard Paint Thickness in Car Hood Electrodeposition Process

Chalida Chanwijitch¹ Apichart Chaichawalit^{2*} and Potiwat Ngamkajornwiwat²

¹ Department of Industrial Engineering and Mangement, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

² Department of Robotics and Automation Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

* Corresponding author, E-mail: apichartcha@pim.ac.th

Received: 12 January 2026; Revised 1 May 2026; Accepted: 9 June 2026

Online Published: 20 August 2026

Abstract: The objective of this research is to determine the optimal conditions for the electrodeposition (ED) painting process of car hoods to address the issue of over-standard paint thickness, which adversely affects product quality and production costs. This study applies the Box-Behnken Design to investigate factors influencing the occurrence of over-standard paint thickness. The three key factors examined include voltage (250–300 V), temperature (32–35 °C), and biocide concentration (200–400 L). The experimental results indicate that all three factors are statistically significant at a 95% confidence level. Through mathematical modeling and optimization, the optimal conditions were found to be a voltage of 252 V, a temperature of 32 °C, and a biocide concentration of 345 L. Confirmatory experiments were conducted to validate the accuracy of the mathematical model by comparing actual experimental values with predicted values. The results showed a percentage error of 1.32%, which is within the 5% limit. This demonstrates that the optimal conditions for the ED painting process of car hoods derived from the mathematical model are reliable and suitable for practical application.

Keywords: Electrodeposition painting; Box-Behnken Design; Submission procedure; Paint thickness



1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน อุตสาหกรรมยานยนต์มีการแข่งขันที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านสมรรถนะรถยนต์ การใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ รวมถึงความสวยงามของรูปลักษณ์ภายนอกก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญลำดับแรก โดยเฉพาะสีของรถยนต์ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค ซึ่งกระบวนการทำสีรถยนต์ที่ส่งผลต่อความสวยงามนอกจากกระบวนการเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation) กระบวนการเคลือบสี (Painting Process) ถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากทำให้สีจริงยึดเกาะได้ดี ป้องกันการกัดกร่อน และช่วยให้สีสม่ำเสมอ ปัญหาการผลิตที่มีความวิกฤต (Critical Process) [1] ได้แก่ สีแตก ความหนาไม่สม่ำเสมอ จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพความงาม (Appearance) และความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะกระบวนการชุบเคลือบสีกันสนิมด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition: ED) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มฐานรากในการป้องกันการกัดกร่อนของตัวถังรถยนต์ นอกจากเรื่องคุณภาพแล้ว การควบคุมความหนาสียังส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณการสูญเสียอันตรายนและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง Green Manufacturing ในอุตสาหกรรมยานยนต์ปัจจุบัน [2, 3]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาคุณภาพที่พบบ่อยครั้งในกระบวนการนี้คือความผันแปรของความหนาชั้นสี (Film Thickness Variation) ซึ่งเป็นการประเมินผลกระบวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear system) และมีความซับซ้อนของตัวแปร จากการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลของเสีย (Defect Data Analysis) ในสายการผลิตกรณีศึกษาช่วง 6 เดือนที่ผ่านมา พบว่า



รูปที่ 1 ฝากระโปรงหน้ารถยนต์

ปัญหาอันดับหนึ่งคือ ความหนาของสีในกระบวนการเคลือบสีกันสนิมเกินค่ามาตรฐาน (Over-standard Thickness) คิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 47.9% ของของเสียทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณฝากระโปรงหน้ารถยนต์ (Car Hood) ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่และเป็นจุดปะทะสายตา การที่ความหนาของสีเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 25 ไมโครเมตร ไม่เพียงแต่เป็นการสิ้นเปลืองวัตถุดิบสี แต่ยังนำไปสู่ข้อบกพร่องต่อเนื่อง (Sequential Defects) ในขั้นถัดไป เช่น ปัญหาผิวส้ม (Orange Peel) และสีไหลย้อย (Sagging) เนื่องจากฟิล์มสีที่หนาเกินไปจะอึดตัวทำละลายไว้มากเกินไปพอที่ รวมถึงปัญหาสีเดือด (Boiling) ในขั้นตอนการอบแห้ง [4]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

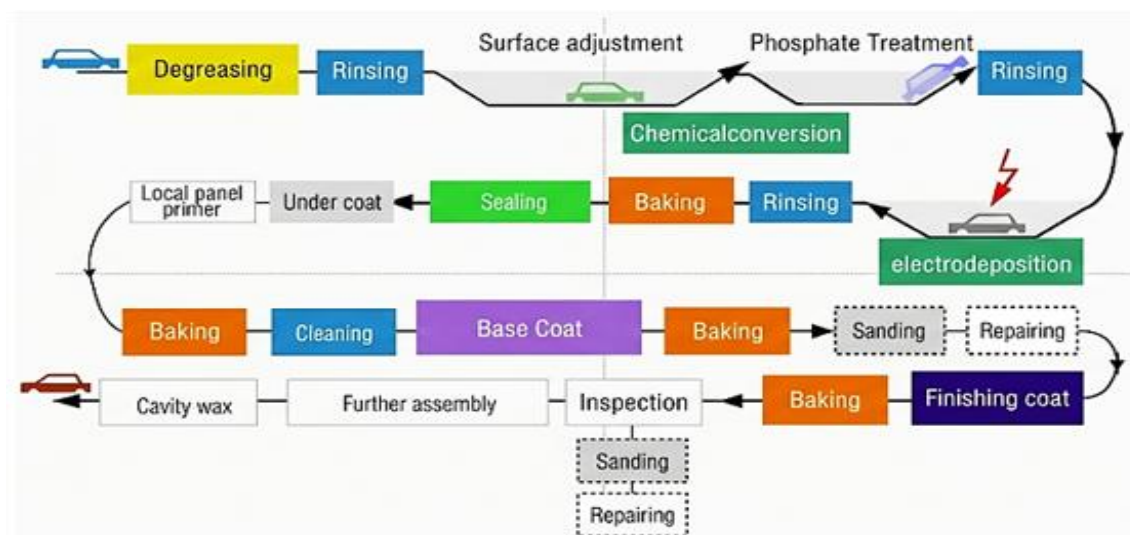
2.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ฝากระโปรงหน้ารถยนต์ (Car Hood) รุ่น AP32 ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เมื่อเข้าสู่กระบวนการเคลือบสีตัวถังรถยนต์จะมีขั้นตอนดังรูปที่ 2 ฝากระโปรงหน้ารถยนต์จะต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมผิว (Pre-Treatment) ล้างไขมันและเคลือบฟอสเฟตตาม



มาตรฐานอุตสาหกรรม ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการชุบสีกันสนิมในบ่อชุบระบบปิด (Closed System Tank) ขั้นตอนเคลือบสีกันสนิม (Electro Deposition: ED) จะเป็นบ่อที่นำฝากระโปรงหน้ารถยนต์ที่เป็นโครงเหล็กลงชุบในบ่อสีกันสนิมด้วยแรงดันไฟฟ้า กระบวนการทำงานของระบบการเคลือบสีกันสนิมจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิภายในบ่อกันสนิม และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบสีกันสนิม ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการควบคุมความหนาของสี เพื่อควบคุมการเกิดสนิมทั้งภายในภายนอก โดยในแต่ละลำดับการเคลือบสีและวัสดุในการพ่นสีมีความแตกต่างกันในแต่ละทุกชั้นสี และจะมีความสัมพันธ์กันในทุกชั้น รายละเอียดดังรูปที่ 3 เช่น ถ้าชั้นสีกันสนิมมีความหนาเกินไป หรือพื้นผิวที่หนามากจะส่งผลให้ชั้นสี

รองพื้น (Primer) มีความหนา และทำให้ฝากระโปรงหน้ารถยนต์ที่เคลือบสีมีความหนา โดยค่าความหนาของการเคลือบสีกันสนิม (ED) อยู่ระหว่าง 15 -25 ไมโครเมตร [5] การวัดค่าความหนาของสี ใช้เครื่องมือวัดความหนาสี (Coating Thickness Gauge) ระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ยี่ห้อ Fischer รุ่น Dualscope ซึ่งได้รับการสอบเทียบ (Calibration) ตามมาตรฐาน ISO 2178 และตรวจสอบความถูกต้องด้วยแผ่นฟิล์มมาตรฐาน (Standard Foil) ที่มีความหนาอ้างอิง 24 ไมโครเมตร และ 50 ไมโครเมตร ก่อนการวัดทุกครั้ง เพื่อยืนยันว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมืออยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (± 1 ไมโครเมตร)



รูปที่ 2 กระบวนการเคลือบสีตัวถังรถยนต์



รูปที่ 3 ความหนาของชั้นสี

2.2 การกำหนดตัวแปรและออกแบบการทดลอง

จากการระดมสมอง (Brainstorming) ร่วมกับวิศวกรฝ่ายผลิตและศึกษาข้อมูลย้อนหลัง (Historical Data) โดยกำหนดตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อความหนาสี 3 ปัจจัย และกำหนดช่วงระดับการทดลอง (Levels) ตามแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร รวมถึงความเป็นไปได้ในการผลิตจริง ดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้า (X1) กำหนดช่วง 250 - 300 โวลต์ โดยค่าปกติของการผลิต (Baseline) อยู่ที่ 275 โวลต์ การเพิ่มแรงดันจะเพิ่มแรงขับเคลื่อนของประจุ แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ฟิล์มแตก (Rupture) [6]
2. อุณหภูมิ (X2) กำหนดช่วง 32 - 35 องศาเซลเซียส โดยค่าปกติอยู่ที่ 33.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิมีผลต่อความหนืดและการเคลื่อนที่ของอนุภาคสี (Ion Mobility) [7]
3. สารเคมีไบโอไซด์ (X3) เป็นปัจจัยนี้ถูกนำมาศึกษาเพื่อควบคุมการปนเปื้อนทางชีวภาพที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของบ่อสี [8,9] และมีสำคัญของบ่อเคลือบสีกันสนิม หากปล่อยให้แบคทีเรียหรือเชื้อราเติบโตในระบบสี จะทำให้ค่า pH ของสีไม่คง ส่งผลต่อการแตกตัวของเนื้อสี เกิดจุด (Seed) รูเข็ม (Pinholes) หรือสีไม่เรียบเนียนบนชิ้นงาน [10] โดยกำหนดช่วง

ตารางที่ 1 ระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
แรงดัน (โวลต์)	250	275	300
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	32	33.5	35
สารเคมีไบโอไซด์ (ลิตร)	200	300	400

200 - 400 ลิตร ค่าปกติอยู่ที่ 300 ลิตร งานวิจัยนี้เลือกใช้ออกแบบการทดลองแบบ แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย ($k=3$) [11,12] ซึ่งประกอบด้วยจุดแฟกทอเรียลและจุดกึ่งกลาง (Center points) จำนวน 3 จุด รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 สิ่งทดลอง (Runs) ดังตารางที่ 2 และแสดงรหัสระดับตัวแปรในตารางที่ 1 โดยกำหนดค่าผลตอบแทนเป็นค่าความหนาของสี (Y)

2.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab เวอร์ชัน 19 ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมในงานวิศวกรรมในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (X) และค่าตอบสนอง (Y) ที่มีความสัมพันธ์ส่วนโค้งจะเลือกใช้การวิเคราะห์การถดถอยกำหนด



แบบจำลองอันดับสอง (Second – Order Model) รูปแบบสมการทั่วไปแสดงดังสมการ (1) [13, 14]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

โดยมีลำดับการการวิเคราะห์ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) โดยพิสูจน์จากการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effects) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction Effects) ที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

3. การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยเลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer

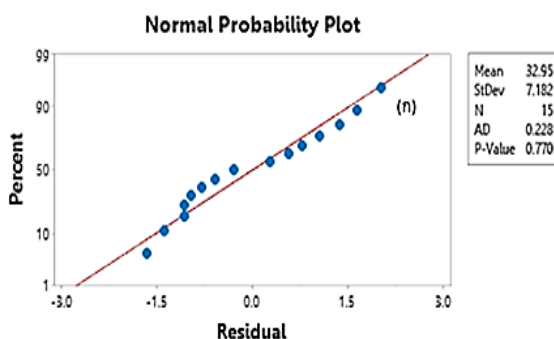
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการดำเนินการทดลองตามแผนแบบ แบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ทั้ง 15 สิ่งทดลอง ภายใต้สภาวะการผลิตจริงร่วมกับฝ่ายผลิต ผลลัพธ์ค่าความหนาของสีกันสนิมที่วัดได้ (Thickness) แสดงดังตารางที่ 2

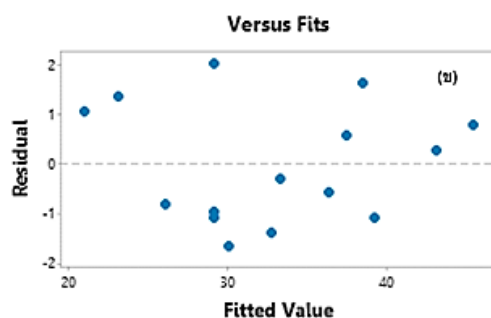
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง โดยรูปแบบของการทดลองจะต้องเป็นไปตามหลักการ 3 ประการ ประกอบด้วย

1) การตรวจสอบข้อมูลมีการแจกแจงปกติ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ด้วยกราฟแสดงการแจกแจงข้อมูลปกติ (Normality Plot) จากรูปที่ 4 โดยพิจารณาจากค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่มีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงระบุได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ 2) การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability) พิจารณาด้วยกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับค่าที่พยากรณ์ (Residual Versus Fitted Value) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การตรวจสอบการแจกแจงปกติ



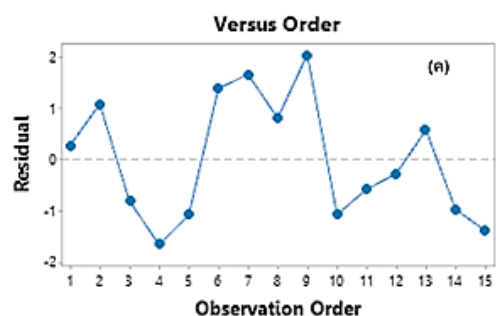
รูปที่ 5 การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง



ตารางที่ 2 ผลการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	แรงดันไฟฟ้า (X_1) (โวลต์)	อุณหภูมิ (X_2) (องศาเซลเซียส)	ไบโอไซด์ (X_3) (ลิตร)	ความหนา (Y) (ไมโครเมตร)
1	250	32.0	300	22.1
2	275	32.0	200	25.3
3	275	33.5	300	28.2
4	275	32.0	400	28.4
5	300	35.0	300	38.2
6	250	35.0	300	31.4
7	275	35.0	400	46.3
8	250	33.5	400	38.1
9	275	35.0	200	40.2
10	300	33.5	400	43.4
11	250	33.5	200	33.1
12	275	33.5	300	31.2
13	300	33.5	200	35.8
14	300	32.0	300	24.5
15	275	33.5	300	28.1

ซึ่งการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างกระจายรอบแนวแกนศูนย์ และไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนที่คงที่ 3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างด้วยกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residual Versus Observation) รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีการกระจายเป็นบวก และลบบอย่างสม่ำเสมอไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปร่างที่แน่นอนจึงระบุได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 6 การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง



3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 92.31% ซึ่งมีค่าสูงจึงอธิบายได้ว่าแต่ละปัจจัยในการทดลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ถึง 92.31% และการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.430 ซึ่งมากกว่าค่านัยสำคัญดังตารางที่ 3 แสดงว่าถดถอยพหุนามกำลังสองมีความสมรูปกับข้อมูล จากตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาสีกันสนิม เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดที่ส่งผล ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่า แรงดัน ไฟฟ้ามีค่า P-Value 0.028 อุณหภูมิมีค่า P-Value 0.000 และ ไบโอดีมีค่า P-Value 0.012 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่ามีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ 2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสองที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่า ปัจจัยไบโอดีมีค่า P-Value 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่ามีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ 3) การวิเคราะห์ปัจจัยอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิม พบว่าไม่มีปัจจัยอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนาสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปของ Regression Equation in coded Units โดยจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย ค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (2)

$$Y = -269 - 2.05X_1 + 34.8X_2 - 0.645X_3 + 0.000722X_3^2 \quad (2)$$

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย ในสมการที่ (2) จะได้ แรงดันไฟฟ้ามีสัมประสิทธิ์ เป็น - หมายถึงว่า ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลให้ค่าความหนาสีกันสนิมมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิมีสัมประสิทธิ์ สูงขึ้น +34.8 หมายความว่าอุณหภูมิยิ่งสูงค่าความหนาสีกันสนิมยิ่งเพิ่มขึ้น และไบโอดีมีสัมประสิทธิ์ +0.000722 ถ้าเพิ่มสูงขึ้น อัตราการลดลงของความหนาจะเริ่มชะลอตัวลง

3.3 การหาค่าที่เหมาะสมและการยืนยันผล

ในการค้นหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อให้ได้ค่าความหนาสีกันสนิมที่เหมาะสมจากการศึกษากระบวนการผลิตเดิม พบว่าค่าความหนาสีกันสนิมจะมีค่าเกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนเกิน 25 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 7 ดังนั้นเพื่อลดการแก้ไขงานจึงกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 23.0 ไมโครเมตร เนื่องจากเป็นค่าความหนาของสีกันสนิมที่น้อยสุดที่ทำให้ได้และป้องกันค่าความหนาของสีเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ภายใต้สภาวะดังกล่าวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายว่าค่าความหนาสีจะอยู่ที่ 23 ไมโครเมตร โดยมีช่วงความเชื่อมั่นของการพยากรณ์ที่ระดับ 95% (95% Prediction Interval: PI) อยู่ในช่วง 16.26 – 29.74 ไมโครเมตรโดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน ความพึงพอใจ (Desirability Function Approach: D) ของ Harrington ซึ่งเป็นเทคนิคที่เปลี่ยนการตอบสนองหลายตัวแปรให้เป็นค่าดัชนีเดียวที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า D ที่เข้าใกล้ 1 แสดงถึงสภาวะที่น่าพึงพอใจสูงสุด

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

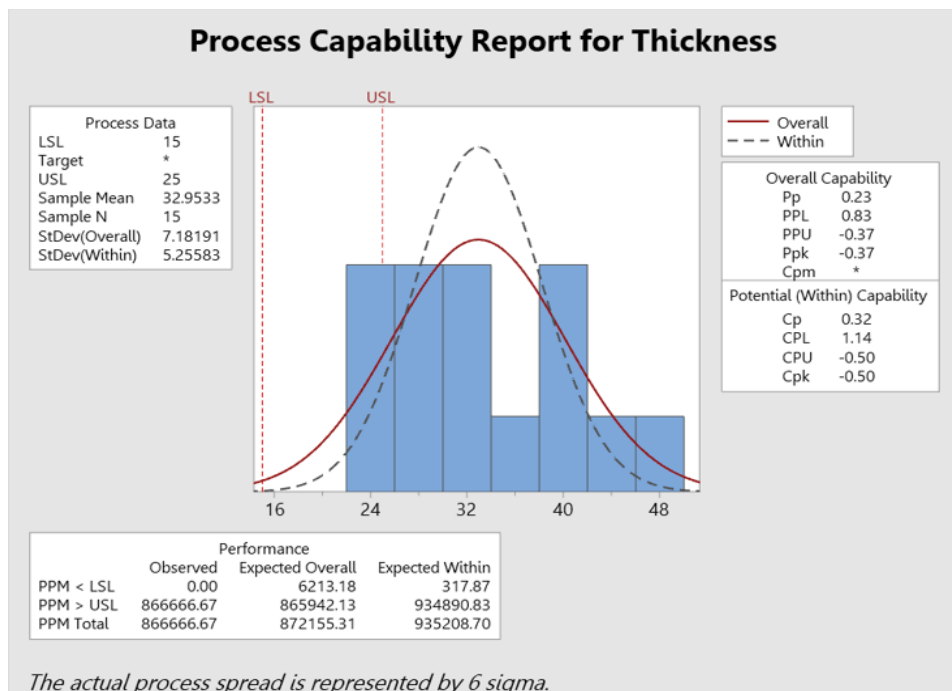
Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
Model	9	702.281	78.031	19.67	0.002*
Linear	3	485.590	161.863	40.80	0.001*
X_1 - Voltage	1	36.980	36.980	9.32	0.028*
X_2 - Temp	1	389.205	389.205	98.10	0.000*
X_3 - Biocide	1	59.405	59.405	14.97	0.012*
Square	3	207.911	69.304	17.47	0.004*
X_1^2	1	5.466	5.466	1.38	0.293
X_2^2	1	6.564	6.564	1.65	0.255
X_3^2	1	192.296	192.296	48.47	0.001*
2-Way Interaction	3	8.780	2.927	0.74	0.573
$X_1 * X_2$	1	4.840	4.840	1.22	0.320
$X_1 * X_3$	1	1.690	1.690	0.43	0.543
$X_2 * X_3$	1	2.250	2.250	0.57	0.485
Error	5	19.837	3.967	-	-
Lack-of-Fit	3	13.630	4.543	1.46	0.430
Pure Error	2	6.207	3.103	-	-
Total	14	727.117	-	-	-
Model Summary	S	R - Sq	R - Sq (adj)	R - Sq (Pred)	
	1.99182	97.25 %	92.31 %	67.87 %	



ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยในรูปหน่วยรหัส (Coded Coefficients)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-269	599	-0.45	0.672	
X_1	-2.05	1.28	-1.60	0.171	2065.22
X_2	34.8	31.8	1.09	0.324	4583.74
X_3	-0.645	0.256	-2.52	0.053*	1318.56
X_1^2	0.00195	0.00166	1.17	0.293	1049.68
X_2^2	-0.593	0.461	-1.29	0.255	4323.75
X_3^2	0.000722	0.000104	6.96	0.001*	79.01
$X_1 * X_2$	0.0293	0.0266	1.10	0.320	1240.56
$X_1 * X_3$	0.000260	0.000398	0.65	0.543	261.00
$X_2 * X_3$	0.00500	0.00664	0.75	0.485	1016.56

หมายเหตุ * หมายถึงค่าที่มีผลต่อค่าความหนาของสีกันสนิมอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05)



รูปที่ 7 ความสามารถของกระบวนการ



จากนั้นทำการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยวิธีวิธีพื้นผิวตอบสนองซึ่งเลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่ทำการทดลองดังแสดงรูปที่ 8

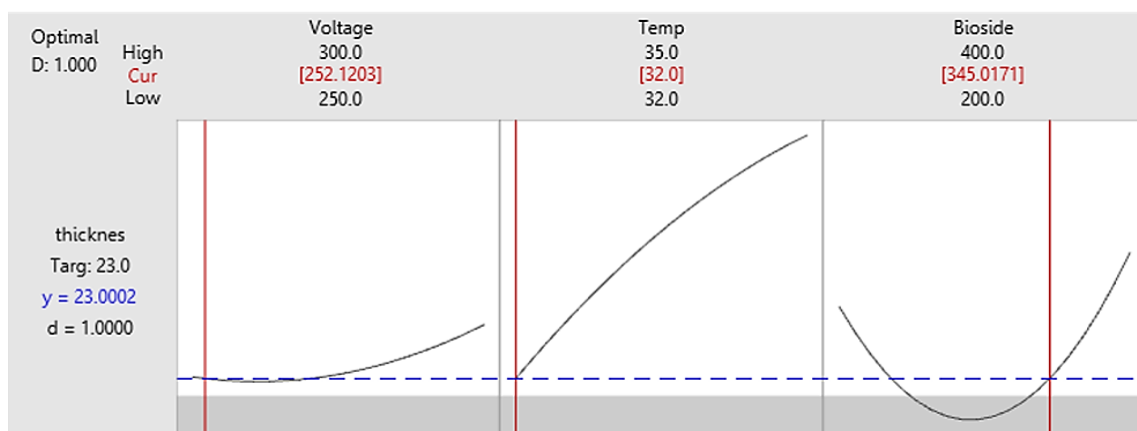
จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ให้ค่าความพึงพอใจรวม (Composite Desirability: D) เท่ากับ 1.0000 ซึ่งเป็นค่าอุดมคติ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 252 โวลต์ อุณหภูมิที่ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไบโอไซด์ 345 ลิตร ภายใต้สภาวะดังกล่าว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายว่าค่าความหนาจะอยู่ที่ 23 ไมโครเมตร โดยมีช่วงความเชื่อมั่นของการพยากรณ์ที่ระดับ 95% (95% Prediction Interval: PI) อยู่ในช่วง 16.26 - 29.74 ไมโครเมตร เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและการปรับปรุงกระบวนการจึงดำเนินการทดลองยืนยันผล (Confirmatory Experiment) โดยปรับตั้งเครื่องจักรตามค่าที่เหมาะสมและเก็บข้อมูลชิ้นงานจำนวน 15 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยตามคู่มือเทคนิคของชั้นสีรองพื้นกันสนิมด้วยวิธีประจุไฟฟ้า (Cathodic Electrocoat) สำหรับตัวถังรถยนต์

จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 15-25 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS D 0202 ซึ่งนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ด้วยวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) แสดงดังสมการที่ (3) [15]

$$\begin{aligned} \text{MAPE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{|A_i|} \times 100 \\ &= \frac{19.862}{15} = 1.32 \% \end{aligned} \quad (3)$$

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ในการแก้ปัญหาวิกฤตเรื่องสีหนาเกินมาตรฐาน (Over-standard Thickness) ในกระบวนการชุบสี ED ของฝากระโปรงหนักรถยนต์ ซึ่งเป็นปัญหาเรื้อรังที่คิดเป็นสัดส่วนของเสียสูงถึง 47.9% พบว่ากระบวนการเดิมประสบปัญหาจากวิธีการปรับตั้งค่าแบบลองผิดลองถูก (Trial-and-Error) และการขาดองค์ความรู้เรื่องอิทธิพลของปัจจัยทาง



รูปที่ 8 กำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสม



เคมีชีวภาพ (Biochemical Factors) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้ค่า pH ของสีไม่นิ่ง ส่งผลต่อการแตกตัวของเนื้อสีที่มีนัยสำคัญต่อความหนาสี ซึ่งแตกต่างจากเดิมที่มุ่งเน้นเพียงการปรับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลให้กระบวนการขาดเสถียรภาพ

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การปรับตั้งค่า พารามิเตอร์ใหม่ที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 252 โวลต์ อุณหภูมิที่ 32 องศาเซลเซียส และสารเคมีไบโอไฮดรอกไซด์ 345 ลิตร สามารถลดความหนาสีกันสนิมจากค่าเฉลี่ยเดิม 39.33 ไมโครเมตร ลงเหลือ 23.30 ไมโครเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายคือ 23 ไมโครเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความหนาสีไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE เท่ากับ 1.32 เปอร์เซ็นต์ การปรับปรุงนี้ไม่เพียงแต่แก้ปัญหาคุณภาพได้ 100% (Zero Defect) แต่ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตจากการสูญเสียและลดเวลาในการแก้ไขงาน (Rework) ได้อย่างเป็นรูปธรรมในอนาคต ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้สามารถองค์ความรู้และระเบียบวิธีวิจัยจากงานนี้นำไปขยายผล (Horizontal Deployment) ปรับใช้กับชิ้นส่วนยานยนต์อื่นๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพซับซ้อน หรือใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเจตสีใหม่ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดไปสู่การศึกษาวิจัยขั้นสูง เช่น การนำระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ Real-time (Real-time Process Control) มาใช้ร่วมกับสมการทำนายที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อให้

กระบวนการผลิตสามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.J. Streibberger and K.F. Dössel, Automotive paints and coatings, 2nd Ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008.
- [2] P. Chaturvedi, M. Parvez and P. Pachauri, A systematic review on green manufacturing of automotive parts, 2023 6th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Proceeding, 2023, 2144-2151.
- [3] Y.W. Chek and D.T.-C. Ang, Progress of bio-based coatings in waterborne system: Synthesis routes and monomers from renewable resources, Progress in Organic Coatings, 2024, 188, 108190.
- [4] M.M. Almomani, Y.O. Mayyas, O.H. Alomari, G.M. Tashtoush, S. Cherdkeattikul and N.K. Akafuah, Augmenting energy efficiency in automotive paint ovens: a review of future prospects and potential for lean, six sigma, AI, and IoT integration, Management of Environmental Quality: An International Journal, 2026, 37(2), 474-497.
- [5] B. Müller and U. Poth, Coatings Formulation: An International Textbook, 3rd Ed., Vincentz Network, Hanover, Germany, 2017.

- [6] X. Qiao, H. Li, W. Zhao and D. Li, Effects of deposition temperature on electrodeposition of zinc-nickel alloy coatings, *Electrochimica Acta*, 2013, 89, 771-777.
- [7] M. Assadian, M.R. Shirdar, M.H. Idris, S. Izman, D. Almasi, M.M. Taheri and M.R.A. Kadir, Optimisation of electrophoretic deposition parameters in coating of metallic substrate by hydroxyapatite using response surface methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40, 923-933.
- [8] R. Jia, T. Unsal, D. Xu, Y. Lekbach and T. Gu, Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 137, 42-58.
- [9] T. Nguyen, F.A. Roddick and L. Fan, Biofouling of water treatment membranes: A review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures, *Membranes*, 2012, 2(4), 804-840.
- [10] A.R. Elkais, M.M. Gvozdenović, B.Z. Jugović and B.N. Grgur, The influence of thin benzoate-doped polyaniline coatings on corrosion protection of mild steel in different environments, *Progress in Organic Coatings*, 2013, 76, 670-676.
- [11] S. Roy, A.K. Saha, S. Panda and G. Dey, Optimization of turmeric oil extraction in an annular supercritical fluid extractor by comparing BBD-RSM and FCCD-RSM approaches, *Materials Today: Proceedings*, 2023, 76, 47-55.
- [12] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David and G.C. Brandão, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, *Analytica Chimica Acta*, 2007, 597(2), 179-186.
- [13] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th Ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2019.
- [14] H.M. Nazha, B. Ammar, M.A. Darwich and M. Assaad, Response surface analysis of Zn-Ni coating parameters for corrosion resistance applications: a Plackett-Burman and Box-Behnken design of experiments approach, *Journal of Materials Science*, 2023, 58, 12465-12480.
- [15] A. de Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand and F. Rossi, Mean Absolute Percentage Error for regression models, *Neurocomputing*, 2016, 192, 38-48.