

การลดของเสียจากข้อบกพร่องสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจก ของหลังคาถระบอบเนกประสงค์

Defective Reduction from Cracking Paint and Thin Paint in Powder Coated Painting Process of Window Frame of Canopy

พิชญา วาดสูงเนิน* นักสวสค์ โอสถศิลป์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Pichaya Wadsungnoen* Napassavong Osothsilp

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330

*Corresponding author Email: 6370198621@student.chula.ac.th,

(Received: December 5, 2022; Revised: April 8, 2023 ; Accepted: May 11, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคาถระบอบเนกประสงค์ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six-Sigma) ในการปรับปรุงโดยเริ่มจากการศึกษาสภาพปัญหาในปัจจุบัน วิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง จากนั้นได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยการระดมความคิด จัดทำแผนผังสาเหตุและผล เมทริกซ์สาเหตุและผล เพื่อกำหนดปัจจัยนำเข้าหลัก และนำปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง 5 ปัจจัยไปออกแบบการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากนั้นใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อหาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่จะช่วยลดสัดส่วนของเสียรวม หลังจากนั้นได้จัดทำแผนควบคุมและเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน ผลลัพธ์ที่ได้หลังการปรับปรุงกระบวนการ พบว่า สามารถลดสัดส่วนของเสียจาก 8 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.13 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากของเสียได้ 6,877,484 บาทต่อปี

คำสำคัญ: กระบวนการพ่นสีฝุ่น การลดสัดส่วนของเสีย ชิ้นส่วนยานยนต์ ซิกซ์-ซิกมา

ABSTRACT

This research aims to reduce the defective rate from cracking paint and thin paint defects in Powder Coated Painting process of window frame of canopy. This research applied the Six Sigma approach for improvement. Firstly, the problem was defined. Secondly, the accuracy and the precision of the inspection system were appraised. After that, the potential causes for cracking and thin paint defects were analyzed by brain storming and using the cause and effect diagram and the cause and effect matrix to identify key process input variables. Then, the five factors were experimented to find the regression equation showing the relationship between the defective rate and the significant factors.

Next, the optimal values of significant factors were found and implemented. The improvement led to the reduction of defective rate from 8 percent to 1.13 percent and the reduction of the rework cost of 6,877,484 baht per year.

Keyword: Powder coated process, Defective rate reduction, Automotive part, Six-sigma

1. บทนำ

ในปัจจุบันกระบวนการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์พบข้อบกพร่องหลังจากกระบวนการพ่นสีบางชนิด เช่น สีแตก ฟันสีไม่ติด เม็ดฝุ่น ความหนาสีไม่ได้ตามมาตรฐาน ความเงาไม่ได้ตามมาตรฐาน และสีไหล ฯลฯ ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้ไม่สามารถพบได้ในกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานก่อนพ่นสีหรือการเตรียมผิวชิ้นงาน แต่ตรวจพบในขั้นตอนสุดท้ายในการตรวจสอบคุณภาพ จึงทำให้เกิดปัญหาและความสูญเสียเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการพ่นสีฝุ่นนั้นผ่านขั้นตอนหลายขั้นตอนและใช้เวลานานจึงจะสามารถพบว่าข้อบกพร่องเหล่านี้เกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ข้อบกพร่องเหล่านี้จะเกิดคล้าย ๆ กันภายในล็อตการผลิตเดียวกัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียต่าง ๆ เช่น วัตถุดิบในการผลิต ต้นทุนในการผลิตต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนแรงงาน และต้นทุนเครื่องจักร อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดต้นทุนในการผลิตที่ไม่จำเป็นจึงต้องมีการปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์ โดยการกำหนดค่าของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการพ่นสีฝุ่นที่เหมาะสม

ดังนั้นสำหรับการวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) [1] มาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดจำนวนของเสีย เนื่องจากแนวคิดนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีประสิทธิภาพอย่างมากในการช่วย

ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต โดยแนวคิดซิกซ์ ซิกมาได้ทำการแบ่งระยะในการศึกษาออกเป็น 5 ระยะ [2] ได้แก่ การนิยามปัญหา การวัดผลและการเก็บข้อมูลของปัญหา การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา การปรับปรุง และการควบคุมกระบวนการ

2. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนดำเนินงานในการลดของเสียในกระบวนการพ่นสีฝุ่น มีดังนี้

2.1 การศึกษา วิเคราะห์ข้อมูลและกำหนดปัญหา

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานได้ศึกษากระบวนการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับกระบวนการพ่นสีฝุ่น เช่น จำนวนในการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกอเนกประสงค์ในแต่ละเดือน และค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการพ่นสีฝุ่น รวมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทต่าง ๆ โดยใช้แผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) เพื่อเลือกประเภทของข้อบกพร่องที่จะแก้ไข และกำหนดขอบเขตในการปรับปรุง

2.2 การวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง

ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นการประเมินผลข้อมูลแบบนับ (Attribute data) คือ ผ่าน (Good: G) หรือไม่ผ่าน (No Good: NG) โดยจะวิเคราะห์ทั้งความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของระบบการตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดบนกรอบกระจกหลังคารถยนต์อเนกประสงค์ว่า สามารถยอมรับได้หรือไม่ โดยทำ

การทดลอง ให้พนักงาน 3 คนตรวจสอบกรอบกระจกคนละ 12 ชิ้น โดยทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 ชิ้น โดยลำดับการตรวจสอบเป็นแบบสุ่ม และสลับลำดับของชิ้นงาน [2], [3]

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเป็นการค้นหาปัจจัยที่มีโอกาสเป็นรากที่แท้จริงซึ่งก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการโดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดมความคิด (Brain storming) จัดทำแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และเมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อกำหนดปัจจัยนำเข้าหลัก (Key process Input Variable) เพื่อนำไปศึกษาเพิ่มเติม [4]

2.4 การปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE) เพื่อกำหนดแผนการทดลอง และใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization)[5] เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่จะช่วยลดสัดส่วนของเสียรวมจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง จากนั้นสรุปผลการทดลอง [5], [6]

2.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานนำค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่ได้จากการปรับปรุงกระบวนการมาใช้ในกระบวนการผลิตจริง และจัดทำแผนควบคุม เอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพื่อกำหนดมาตรฐานในการทำงาน เพื่อลดของเสียที่เกิดในกระบวนการผลิตได้อย่างยั่งยืน

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการกำหนดปัญหา

เมื่อพิจารณาข้อมูลของเสียที่เกิดจากกระบวนการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.

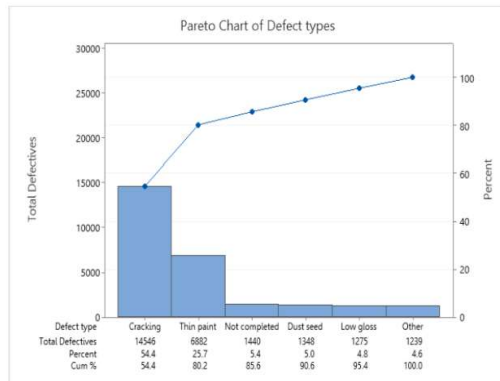
2564 พบว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในชิ้นงาน ได้แก่ สีแตก ฟันสีไม่ติด เม็ดฝุ่น ความหนาสีไม่ได้ตามมาตรฐาน ความเงาไม่ได้ตามมาตรฐาน สีไหล ฯลฯ จากการพิจารณาสัดส่วนของเสียซึ่งแสดงในรูปที่ 1 พบว่าของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตก (Cracking) มีจำนวนของเสียมากเป็นอันดับหนึ่ง โดยคิดเป็นสัดส่วนของเสียคือ 54.4 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมด และจำนวนของเสียที่มากเป็นอันดับที่สอง คือของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีบาง (Thin paint) โดยคิดเป็นสัดส่วนคือ 25.7 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมด ข้อบกพร่องทั้งสองประเภททำให้เกิดของเสียคิดเป็นสัดส่วน 80.2 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปี 2564 และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทุกประเภทมีกระบวนการซ่อมข้อบกพร่องในรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการซ่อมสีต่อหน่วยชิ้นงานจึงเท่ากัน เมื่อพิจารณาข้อมูลค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องจากกระบวนการพ่นสีฝุ่น พบว่าค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องประเภทสีแตกมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมเป็นอันดับหนึ่ง คือ 5,436,567 บาท และค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องประเภทสีบางมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมเป็นอันดับสอง คือ 2,572,148 บาท โดยทั้งสองข้อบกพร่องนี้มีสาเหตุร่วมกัน หากปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขจะส่งผลให้สามารถลดจำนวนของเสีย ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการซ่อมสี และยังสามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางมาทำการศึกษาวิจัย

ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตกที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ คือสีที่เคลือบชิ้นงานเกิดการแยกตัว เกิดรอยแตกร้าวและสีไม่ยึดเกาะกับชิ้นงาน จนร่อนออกมาเป็นแผ่นได้ แสดงดังรูปที่ 2 และลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีบาง คือ สีที่เคลือบผิวของชิ้นงานมีความหนาดำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ และสีไม่กลบผิวชิ้นงานได้อย่างทั่วถึงจนมองเห็นเนื้อผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3

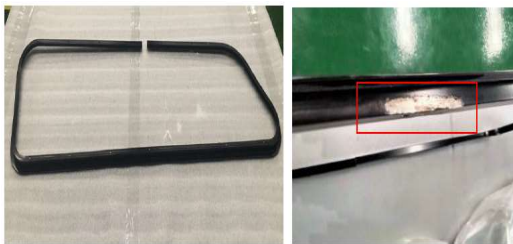
3.2 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

จากผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ค่า

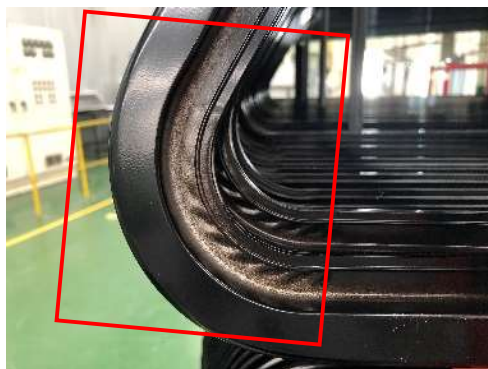
ดัชนีชี้วัดของระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คน ผ่านเกณฑ์ในทุกดัชนีการวัด ดังนั้นระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 1 แผนผังพาเรโตของสัดส่วนของเสีย



รูปที่ 2 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตก



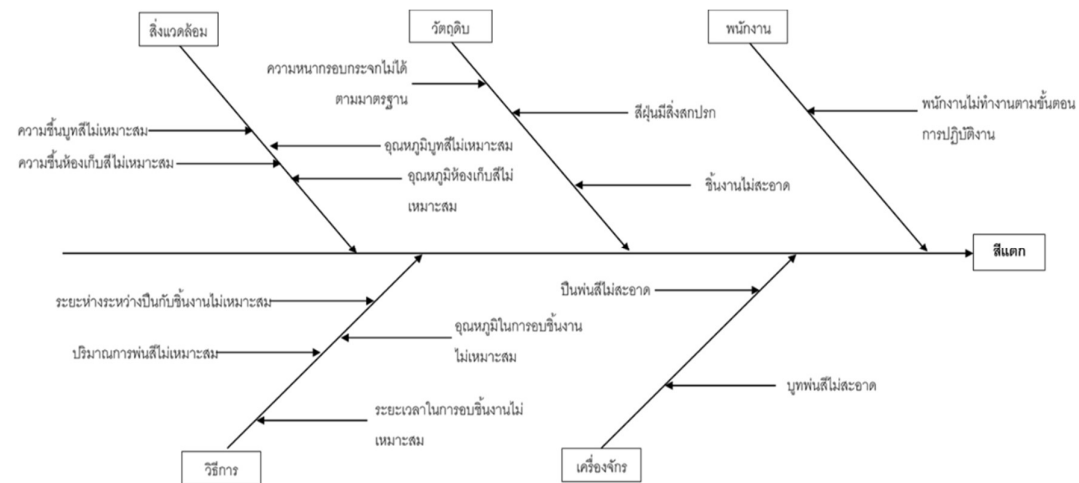
รูปที่ 3 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีบาง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

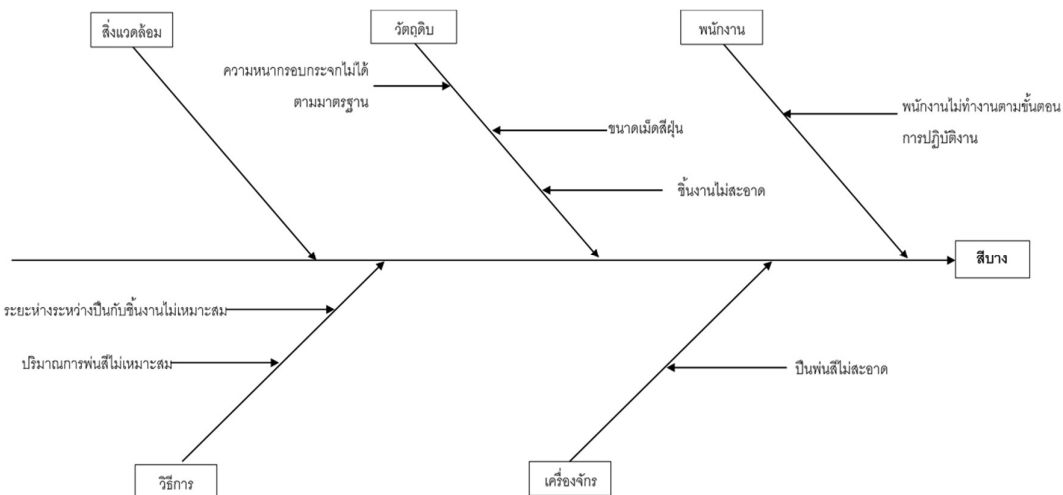
ดัชนีการวัด	พนักงานคนที่ 1	พนักงานคนที่ 2	พนักงานคนที่ 3
ดัชนีความมีประสิทธิภาพ (O _E)	100%	100%	100%
ดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธที่ผิดพลาด (I _{FA})	0%	0%	0%
ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับที่ผิดพลาด (I _{MISS})	0%	0%	0%
ความพ้องกันของค่าวัด	100%		
ความพ้องกันและถูกต้องของค่าวัด	100%		

3.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากงานวิจัยของ K.Srinivasan ได้ทำการวิจัยเพื่อลดปัญหาคุณภาพสีแตกหลุดร่อนของใช้คัพ โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสีย ได้แก่ อุณหภูมิในการทำความสะอาด ค่า pH การเคลือบฟอสเฟต และอุณหภูมิในการพ่น [7] ผู้วิจัยได้นำมาบางปัจจัยข้างต้นมาพิจารณา ระดมสมองกับทีมงานและหลังจากนั้นได้ใช้แผนผังสาเหตุและผล ซึ่งเป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอาการของปัญหาและสาเหตุที่เกี่ยวข้องและมีโอกาส พบสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากนั้นได้เรียงลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยการให้คะแนนในตารางเมทริกซ์สาเหตุและผล เพื่อช่วยจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ เพื่อช่วยในการตัดปัจจัยที่ส่งผลน้อยในการทำให้เกิดข้อบกพร่องออกไป โดยในการให้คะแนนจะทำการประชุมกับคณะทำงานทุกคน หลังจากนั้นนำคะแนนที่ได้มาเรียงลำดับจากมากไปน้อย โดยปัจจัยที่มีคะแนนสูงแสดงดังตารางที่ 2 และได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีคะแนนและผลกระทบสูงไปศึกษาต่อ โดยพบว่าทั้งหมด 5 ปัจจัยที่เลือกมาศึกษาต่อ ได้แก่ ความหนาของกรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ และระยะเวลาในการอบ โดยมีสมมติฐานว่าแต่ละปัจจัยมีผลกระทบต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางดังนี้



รูปที่ 5 แผนผังสาเหตุและผลกระทบสีแตก



รูปที่ 6 แผนผังสาเหตุและผลกระทบสีบาง

1. ความหนาของกรอบกระจก (Thickness) : ความหนาของกรอบกระจกมีค่ามาตรฐานควบคุมอยู่ที่ 25.4 ± 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งหากความหนาของกรอบกระจกมีค่ามากจะส่งผลเกี่ยวข้องกับระยะห่างของปืนกับชิ้นงานที่มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ความหนาของสีหลังพ่นมากเกินไป 120

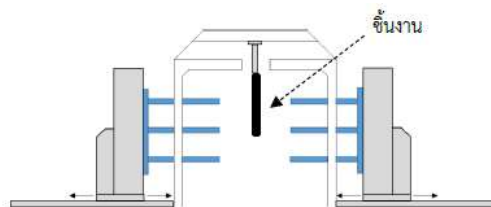
ไมครอน ซึ่งทำให้เกิดสีหนาและส่งผลให้เกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากความหนาของกรอบกระจกมีค่าน้อยจะส่งผลให้ระยะห่างของปืนกับผิวชิ้นงานมีค่ามากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอนจึงเกิดข้อบกพร่องประเภทสีบางได้

ตารางที่ 2 คะแนนรวมของแต่ละปัจจัยนำเข้า

คะแนนความสำคัญ		10	5	รวม
ที่	ปัจจัยนำเข้า	สี่แตก	สี่บาง	
1	ความหนากรอบ กระจก	9	9	135
2	ปริมาณการพ่นสี	9	9	135
3	ระยะห่างระหว่าง ปืนกับชิ้นงาน	9	9	135
4	อุณหภูมิในการอบ ชิ้นงาน	9	0	90
5	ระยะเวลาในการ อบชิ้นงาน	9	0	90
6	พนักงานไม่ทำงาน ตามขั้นตอน	3	3	45
7	ความสะอาด ชิ้นงาน	1	1	15
8	ขนาดเม็ดสีฝุ่น	1	1	15
9	ปืนพ่นสี	1	1	15
10	ความชื้นบูท	1	0	10
11	ความชื้นห้องเก็บสี	1	0	10
12	อุณหภูมิในบูท	1	0	10
13	อุณหภูมิห้องเก็บสี	1	0	10
14	สีฝุ่นมีสิ่งสกปรก	1	0	10
15	บูทพ่นสี	1	0	10

2. ปริมาณการพ่นสี (Feed) : ปริมาณการพ่นสีคือ ปริมาณในการพ่นสีออกจากปืนพ่นสี โดยมีหน่วยวัดเป็น กรัมต่อนาที ซึ่งถูกตั้งค่าและควบคุมด้วยตัวควบคุมเครื่องพ่นสีเพื่อให้ได้ปริมาณการพ่นสีตามที่ถูกกำหนดไว้ โดยมีช่วงควบคุมปริมาณการพ่นสีอยู่ที่ 0.5 – 0.8 กรัมต่อนาที โดยหากตั้งค่าปริมาณการพ่นสีสูง จะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาสีเกิน 120 ไมครอน เมื่อนำไปอบตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด จะส่งผลให้เกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากตั้งค่าปริมาณการพ่นสีต่ำ จะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอน จึงเกิดข้อบกพร่องประเภทสีบางได้

3. ระยะห่างปืน : ระยะห่างปืนคือ ระยะห่างระหว่างปืนกับจุดแขวนชิ้นงาน มีหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร โดยมีช่วงควบคุมระยะห่างปืนอยู่ระหว่าง 24 - 25 เซนติเมตร เป็นต้น จุดปรับตั้งระยะห่างปืนจะมีล้อเลื่อนสามารถเลื่อนเข้าหรือเลื่อนออกได้ หากต้องการลดระยะห่างปืนจะต้องเลื่อนปืนเข้าไปใกล้จุดแขวนชิ้นงานให้มากขึ้น หากต้องการเพิ่มระยะห่างปืนจะต้องเลื่อนปืนออกจากจุดแขวนชิ้นงาน โดยตัวอย่างการปรับระยะห่างปืนแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งในการตั้งค่าระยะห่างปืนให้ใกล้กับชิ้นงาน จะส่งผลให้ความหนาสีมากกว่า 120 ไมครอนและเกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากตั้งค่าระยะห่างของปืนไกลจากชิ้นงาน จะส่งผลให้ความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอน เนื่องจากความฟุ้งของสีฝุ่นไม่สามารถยึดเกาะชิ้นงานได้ดี จึงทำให้เกิดปัญหาสีบางได้



รูปที่ 6 ตัวอย่างการปรับระยะห่างปืน

4. อุณหภูมิในการอบ (Temp): อุณหภูมิในการอบคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบสีฝุ่นให้ละลายติดชิ้นงาน โดยมีหน่วยวัดเป็นองศาเซลเซียส (°C) โดยอุณหภูมินี้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม การปรับตั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับประเภทของสีและประเภทชิ้นงานที่ใช้ในการอบ โดยมีช่วงควบคุมที่ทางผู้ผลิตสีแนะนำอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 180 - 200 °C หากตั้งค่าอุณหภูมิในการอบสูงเกินไป จะส่งผลให้เกิดปัญหาสีกรอบจนทำให้สีที่ยึดเกาะผิวชิ้นงานแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิต่ำเกินไปส่งผลให้เกิดปัญหาสีไม่ละลายและไม่สามารถยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดี

5. เวลาในการอบ (Time) : เวลาในการอบคือ เวลาที่ใช้ในการอบสีฝุ่นให้ละลายติดชิ้นงาน โดยมีหน่วยวัดเวลา

เป็นนาที (min) ระยะเวลาในการอบจะถูกควบคุมด้วยเครื่องจับเวลาที่ผู้ควบคุม โดยมีช่วงควบคุมที่ทางผู้ผลิตแนะนำให้อยู่ในช่วงระยะเวลาในการอบประมาณ 50 - 60 นาที การปรับตั้งระยะเวลาในการอบที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับประเภทของสีและประเภทชิ้นงานที่ใช้ในการอบ หากตั้งค่าระยะเวลาในการอบสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาสีกรอบจนทำให้สีที่ยึดเกาะผิวชิ้นงานแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้หลังจากการอบเป็นเวลานาน แต่หากตั้งค่าระยะเวลาในการอบต่ำเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาสีไม่ละลายและไม่สามารถยึดเกาะชิ้นงานได้ดี

3.4 ผลการปรับปรุงกระบวนการ

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ความหนาของกรอบกระจกหากลอตมีค่าแตกต่างกันแต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในลอตเดียวกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางการปรับปรุงโดยการทำการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียรวมประเภทสีแตกและสีบางและปัจจัยทั้งห้า เมื่อทราบสมการความสัมพันธ์แล้วจะใช้สมการนั้นในการหาค่าของปัจจัยทั้งสี่ ได้แก่ ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ และระยะเวลาในการอบ ที่เหมาะสมกับความหนากรอบกระจกของลอตที่กำลังจะเริ่มทำการผลิต

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยนำเข้า 5 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาของกรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ ระยะเวลาในการอบ ผู้วิจัยจึงได้เลือกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด CCF (Face-Centered Central Composite Design: CCF) เนื่องจากการใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบชนิดอื่น โดยใช้ Central Composite Half ที่มีจำนวนการทดลองเพียง 32 การทดลอง ซึ่งน้อยกว่าแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบชนิดบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีจำนวนการทดลอง 46 การทดลอง เมื่อมีจำนวน 5 ปัจจัย และใช้ชนิด CCF เนื่องจากต้องการทดลองปัจจัยใด ๆ เพียง 3 ระดับ ทำให้สามารถเป็นไปได้ในการจัดเตรียมกรอบกระจกที่มีความหนา 3 ระดับให้มีขนาดตัวอย่าง

เพียงพอในแต่ละระดับความหนา ปัจจัยใด ๆ จะถูกทำการทดลองอยู่ที่ 3 ระดับในหน่วยแบบค่ารหัส ได้แก่ $-\alpha$, 0, α , โดย α มีค่าเท่ากับ 1.000 ซึ่งแสดงหน่วยที่เป็นค่าจริงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
	-1	0	+1	
Thickness	25	25.35	25.7	Mm
Feed	0.5	0.65	0.8	g/min
Distance	24	24.5	25	Cm
Temp	180	190	200	°C
Time	50	55	60	Min

3.4.2 การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง

การคำนวณขนาดตัวอย่างจะคำนวณจากค่าสัดส่วนโดยประมาณของเสียที่ระดับต่ำและระดับสูงของแต่ละปัจจัย โดยใช้จากข้อมูลเดิมที่มี และกำหนดกำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% โดยผลจากการคำนวณขนาดตัวอย่างของแต่ละปัจจัยใน Program Minitab ได้เลือกใช้ขนาดตัวอย่างที่มากที่สุดในการทำการทดลอง โดยในการทดลองต้องใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 6,289 ชิ้นงาน โดยในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง จะมีการทดลองที่ปัจจัยระดับต่ำ 8 การทดลอง และที่ปัจจัยระดับสูง 8 การทดลอง พบว่าในแต่ละการทดลองต้องใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 787 ชิ้นงาน เพราะฉะนั้นผู้ทดลองจึงใช้ชิ้นงานจำนวน 1,000 ชิ้นงานในแต่ละการทดลอง เพื่อให้ได้ตามปริมาณขั้นต่ำของแผนการผลิตปัจจุบันและรอบการพ่นสีฝุ่นของกรอบกระจกโดยไม่กระทบกับเวลาและต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นแผนการในรอบปกติ

3.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากนั้นได้นำเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบลดตัวแปร (Backward Elimination) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและเทอมที่มี

นัยสำคัญ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยดังแสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีเทอมที่มีนัยสำคัญทั้งหมด 11 เทอม ได้แก่ ผลกระทบหลักของความหนา กรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบ และ เทอมกำลังสองของปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน และอุณหภูมิในการอบ และผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณในการพ่นสีและระยะห่างปืน ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีกับเวลาในการอบ ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนกับอุณหภูมิในการอบ โดยผลกระทบหลักของปริมาณการพ่นสีและอุณหภูมิค่า P-Value มากกว่า 0.05 เนื่องจากผลกระทบของ 2 ปัจจัยนี้มีน้อยแต่เมื่อมีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ จะส่งผลกระทบต่อ การเกิดของเสีย จึงต้องนำมาคำนวณในสมการการถดถอยแบบลดตัวแปร เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์ R-Sqr(adj) มีค่า 88.30 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซนต์ ดังนั้น สมการถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้สมมติฐานทั้ง 3 ข้อ ได้แก่ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ส่วนตกค้างที่มีความเป็นอิสระ และ ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 โดยอธิบายได้ว่า ในกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) มีการจัดเรียงค่าส่วนตกค้างในรูปแบบเส้นตรง จงสรุปได้ว่าการแจกแจงปกติ ในส่วนของกราฟส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง (Versus order) มีความเป็นอิสระต่อกัน มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม และไม่เป็นรูปแบบ และสำหรับกราฟส่วนตกค้างและค่าฟิต (Versus Fits) ไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม สรุปได้ว่าการแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองนี้เป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองสมการถดถอยนำไปใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญของปัจจัยที่ทดสอบและตัวแปรตอบสนองได้

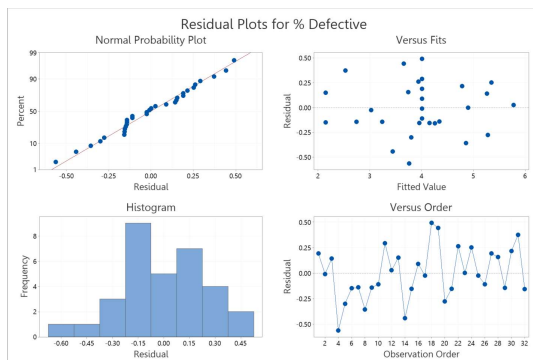
จากการพิจารณากราฟพื้นผิวตอบ (Surface plot) ซึ่งแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีและระยะห่างปืนแสดงดังรูปที่ 8 จากกราฟจะพบว่า เมื่อ

ระยะห่างปืนมาก ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 25 เซนติเมตร เมื่อปริมาณการพ่นสีเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กรัมต่อนาที ไปยัง 0.8 กรัมต่อนาที เปอร์เซนต์ของเสียไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และสัดส่วนของเสียอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่เมื่อระยะห่างปืนอยู่ตำแหน่ง 24 เซนติเมตร เมื่อปริมาณการพ่นสีเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กรัมต่อนาที ไปยัง 0.8 กรัมต่อนาที เปอร์เซนต์ของเสียเพิ่มขึ้นมากและอยู่ในระดับสูง จึงสามารถอธิบายเหตุผลของผลการทดลองนี้ได้ว่า เมื่อระยะห่างปืนใกล้กับชิ้นงานมากส่งผลให้ปริมาณสีฝุ่นที่ระดับการพ่นใด ๆ ไปเกาะชิ้นงานมาก ส่งผลให้ความหนา สีของชิ้นงานมากกว่ามาตรฐานและเกิดของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการพ่นสีก็จะเกิดจำนวน เปอร์เซนต์ของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น ในขณะที่เมื่อระยะห่างปืนห่างกับชิ้นงานจะส่งผลให้เกิดของเสียประเภทสีบางแต่จะมีจำนวนไม่มาก

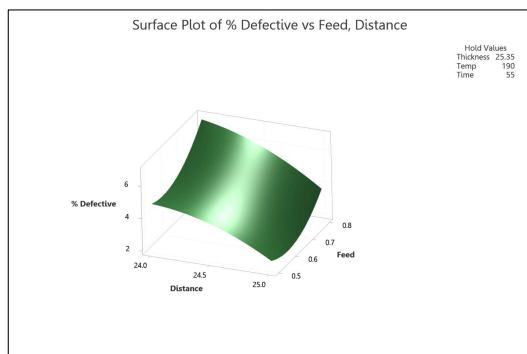
ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนและอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 10 จากกราฟจะพบว่า ที่อุณหภูมิในการอบต่ำไม่ว่าจะใช้ระยะห่างปืนเท่าใด ในช่วง 24 – 25 เซนติเมตร เปอร์เซนต์ของเสียจะต่ำและไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อที่อุณหภูมิในการอบสูงเมื่อระยะห่างปืนใกล้ชิ้น เปอร์เซนต์ของเสียซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปรับระยะห่างปืนใกล้กับชิ้นงานส่งผลให้ความหนาสีมาก และเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิสูง ยังจะส่งผลร่วมให้เกิดของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการอบและปริมาณการพ่นสีแสดงดังรูปที่ 11 จากกราฟพบว่า ที่ปริมาณการพ่นสีสูงไม่ว่าจะใช้เวลาในการอบเท่าใด เปอร์เซนต์ของเสียจะสูงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ปริมาณการพ่นสีต่ำเมื่อใช้เวลาในการอบน้อย จะเกิดเปอร์เซนต์ของเสียน้อย แต่เมื่อใช้เวลาในการอบเพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์ของเสียจะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากที่ปริมาณการพ่นสีต่ำและเวลาที่ต่ำจะมีเกิดของเสียประเภทสีบางเล็กน้อย แต่เมื่อใช้เวลานานในการอบจะส่งผลให้สีฝุ่นที่ยึดเกาะชิ้นงานแตกหลุดร่อนออกมาได้ดังนั้นเมื่อที่เวลาในการอบสูงจะมีของเสียประเภทสีแตกเพิ่มขึ้นมาก ส่วนที่ปริมาณการพ่นสีสูง ทำ

ให้ความหนาแน่นมาก ดังนั้นไม่ว่าใช้เวลาในการรอบเท่าใด
เปอร์เซ็นต์ของเสียจากสีแตกก็จะมาก



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง



รูปที่ 8 ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีและ
ระยะห่าง

3.4.4 การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

หลังจากได้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับ
เปอร์เซ็นต์สัดส่วนของเสีย ซึ่งแสดงด้วยสมการถดถอย
จากนั้นได้นำมาหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วย
Response Optimization โดยผู้วิจัยได้ทดลองยืนยันผล
โดยการทดสอบกับกรอบกระจกที่มีความหนาต่าง ๆ กัน 5
ลวดความหนาดังนี้ 25, 25.2, 25.3, 25.5 และ 25.7
มิลลิเมตร ในแต่ละลวด ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Response
Optimization ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสิ้นที่
รองรับกับความหนากรอบกระจกที่ค่าต่างๆ พบว่าที่ความ

หนากรอบกระจกค่าใด ๆ จะเกิดสัดส่วนของเสียน้อยสุด
เมื่อตั้งค่าปริมาณการพ่นสี 0.58 กรัมต่อนาที ระยะห่าง
ปืน 25 เซนติเมตร อุณหภูมิในการอบ 188 องศาเซลเซียส
และเวลาในการอบ 50 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

Thickness (mm)	Feed (g/min)	Distance (cm)	Temp (°C)	Time (min)
25	0.58	25	188	50
25.2	0.58	25	188	50
25.3	0.58	25	188	50
25.5	0.58	25	188	50
25.7	0.58	25	188	50

3.5 ผลการควบคุมกระบวนการ

ผู้วิจัยได้ปรับตั้งค่าปัจจัยตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากระยะ
การปรับปรุงกระบวนการ และเก็บข้อมูลการผลิต 5 ลวด
ที่มีความหนาที่แตกต่างกันดังนี้ 25, 25.2, 25.3, 25.5 และ
25.7 มิลลิเมตรเพื่อให้ครอบคลุมช่วงความหนาของกระจก
ที่ได้รับมาจากผู้ส่งมอบในแต่ละลวด ซึ่งมีปริมาณการผลิต
รวม 6,550 ชิ้น โดยใช้ขนาดตัวอย่างลวดละ 1,310 ชิ้น
ตามการคำนวณขนาดตัวอย่างทางสถิติ เพื่อยืนยันผลการ
ปรับปรุงที่ได้ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสีแตกและ
สีบางในแต่ละกลุ่มความหนา ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปอร์เซนต์ของเสียหลังปรับปรุง

กลุ่ม ตัวอย่าง	ขนาด ตัวอย่าง	เปอร์เซนต์ ของเสียสีแตก	เปอร์เซนต์ ของเสียสีบาง
1	1,310	0%	1.60%
2	1,310	1.16%	0%
3	1,310	1.30%	0%
4	1,310	0.69%	0%
5	1,310	0.92%	0%

ตารางที่ 7 ผลการทดลอง

StdOrder	RunOrder	Thickness	Feed	Distance	Temp	Time	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีแตก	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีบาง	เปอร์เซ็นต์ ของเสียรวม
1	19	25.00	0.5	24	180	60	0	4.1	4.1
2	9	25.70	0.5	24	180	50	3.1	0	3.1
3	24	25.00	0.8	24	180	50	5.6	0	5.6
4	21	25.70	0.5	24	180	60	4	0	4
5	31	25.00	0.5	25	180	50	0	2.9	2.9
6	12	25.70	0.8	24	180	60	5.8	0	5.8
7	20	25.00	0.8	24	180	60	5	0	5
8	8	25.70	0.8	25	180	50	4.5	0	4.5
9	29	25.00	0.5	24	180	50	0	2.6	2.6
10	22	25.70	0.5	25	180	60	0	4.2	4.2
11	14	25.00	0.5	25	180	60	3	0	3
12	17	25.70	0.5	25	180	50	3	0	3
13	7	25.00	0.5	25	200	60	0	4.2	4.2
14	25	25.70	0.5	25	180	50	3	0	3
15	3	25.00	0.8	25	200	50	5.4	0	5.4
16	30	25.70	0.8	25	180	60	5	0	5
17	4	25.00	0.65	24.5	190	55	0	3.2	3.2
18	32	25.70	0.65	24.5	190	55	4.1	0	4.1
19	10	25.35	0.65	24.5	190	55	0	3.9	3.9
20	16	25.35	0.65	24.5	190	55	4.1	0	4.1
21	23	25.35	0.65	24	190	55	4.9	0	4.9
22	6	25.35	0.65	25	190	55	2	0	2
23	28	25.35	0.65	24.5	180	55	3.9	0	3.9
24	13	25.35	0.65	25	190	55	2.3	0	2.3
25	5	25.35	0.65	24.5	190	50	3.5	0	3.5
26	15	25.35	0.65	24.5	180	60	3.8	0	3.8
27	26	25.35	0.65	24.5	190	55	3.9	0	3.9
28	18	25.35	0.65	24.5	190	55	4.5	0	4.5
29	2	25.35	0.65	24.5	190	55	4	0	4
30	27	25.35	0.65	24.5	190	55	4.2	0	4.2
31	1	25.35	0.65	24.5	190	55	4.2	0	4.2
32	11	25.35	0.65	24.5	190	55	4.3	0	4.3

จากนั้นได้จัดทำแผนควบคุมและเอกสารขั้นตอนปฏิบัติงานใหม่ เพื่อกำหนดมาตรฐานในการทำงานที่ได้จากการทดลองในระยะปรับปรุงกระบวนการ พบว่า จากข้อมูลสัดส่วนของเสียในเดือนพฤษภาคม 2564 – เมษายน 2565 มีสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกและสีบางรวม 8 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนของเสีย 14,546 ชิ้น ในปริมาณการ

ผลิต 176,236 ชิ้น ได้มีสัดส่วนของเสียลดเป็น 1.13 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิตจากจำนวนการทดลอง 6,550 ชิ้น พบว่ามีจำนวนของเสีย 74 ชิ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางได้ 6,877,484 บาทต่อปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ในปี 2566

Response Surface Regression: % Defective versus Thickness, Feed, Distance, Temp, Time

α to remove = 0.05

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-1727	520	-3.32	0.003	
Thickness	0.710	0.247	2.87	0.009	1.37
Feed	32.4	37.2	0.87	0.395	4912.87
Distance	134.8	40.6	3.32	0.003	78518.53
Temp	0.63	1.14	0.55	0.586	15773.19
Time	0.2557	0.0753	3.39	0.003	25.94
Feed*Feed	42.0	14.4	2.91	0.009	1218.89
Distance*Distance	-1.940	0.857	-2.26	0.035	83972.53
Temp*Temp	0.01258	0.00339	3.71	0.001	19519.38
Feed*Distance	-2.58	1.17	-2.19	0.040	2915.23
Feed*Time	-0.329	0.121	-2.72	0.013	183.54
Distance*Temp	-0.2147	0.0429	-5.00	0.000	19291.84

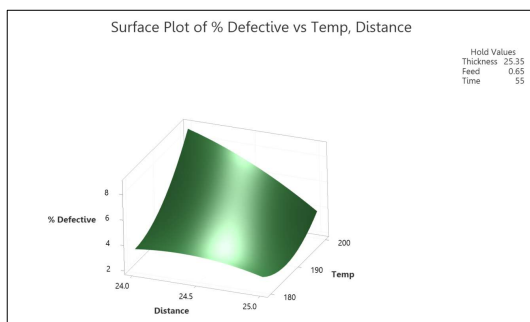
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.313773	92.45%	88.30%	75.35%

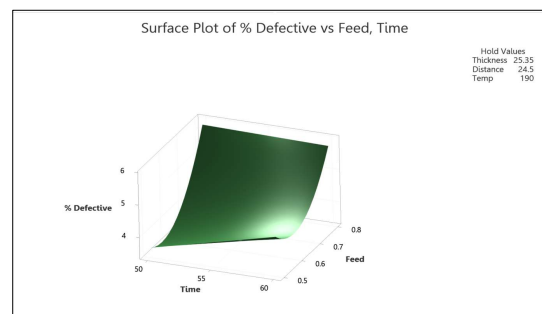
Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \% \text{Defective} = & -1727 + 0.710 \text{ Thickness} + 32.4 \text{ Feed} \\ & + 134.8 \text{ Distance} + 0.63 \text{ Temp} + 0.2557 \text{ Time} \\ & + 42.0 \text{ Feed*Feed} - 1.940 \text{ Distance*Distance} \\ & + 0.01258 \text{ Temp*Temp} \\ & - 2.58 \text{ Feed*Distance} - 0.329 \text{ Feed*Time} \\ & - 0.2147 \text{ Distance*Temp} \end{aligned}$$

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบลดตัวแปร



รูปที่ 10 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนและอุณหภูมิ



รูปที่ 11 ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการอบและปริมาณการพ่นสี

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคาถระกระบะอเนกประสงค์ เพื่อลดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีฝุ่น โดยผู้วิจัยได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมาเข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียภายในกระบวนการ จากนั้นได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและสัดส่วนของเสียและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุม และเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานใหม่ เพื่อกำหนดมาตรฐานใหม่ในการทำงาน หลังจากปรับปรุงกระบวนการทำงาน พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียลงจาก 8 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.13 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้แนะนำวิธีการทางสถิติ ตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา เข้ามาประยุกต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีฝุ่นของชิ้นงานเหล็กอื่น ๆ ที่มีความหนาของชิ้นงานในแต่ละล็อตการผลิตที่แตกต่างกัน และต้องตั้งค่าปัจจัย ได้แก่ ปริมาณในการพ่นสี ระยะห่างปืน อุนท์ทมิ และเวลาในการพ่นสีที่เหมาะสม โดยจะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเฉพาะที่แตกต่างกันของแต่ละชิ้นงานที่จะทำการปรับปรุงด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Saleasing, *Process Revolution by Six Sigma techniques of Champion and Black Belt*. Bangkok: Sirivatana Interprint, 2005.
- [2] N. Thawesaengskulthai, *Quality Engineering and management: Guide to Continual Improvement and Innovation Creation*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2019.
- [3] A. Hongsapan, "Defect Reduction in Painting Process of Car-bodywork By Six Sigma Approach," M.S. thesis, Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering, Culalongkorn University, 2010.
- [4] K. Ploypanichcharoen. *Measurement System Analysis (MSA) by Minitab 15 (Revised edition)*. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2006.
- [5] N. Osothsilp. *Quality Improvement Handbook*. Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering, Culalongkorn University, 2020.
- [6] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. 10th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2019.
- [7] 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.