Engng.J.CMU.(2019) 26 (3), 197−213

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การลดปัญหาการแห้งสัมผัสของสีน้ำมัน
Reduction of Touch Dry Problem of Enamel Paint

พลัฏฐ์กร ใจผ่องอัครกุล และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์*

Phalatkorn Jaipongakkharakul and Napasssavong Osothsilp*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand
E-mail: phalatkorn.jai@gmail.com, napasssavong.o@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสีน้ำมัน (Enamel Paint) เพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพจากปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดโดยให้มีต้นทุนที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่ำที่สุด ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระยะคือ 1) การนิยามปัญหา โดยระบุสภาพปัญหาในปัจจุบันที่จะปรับปรุง 2) การวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี 3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยระดมสมองเพื่อระบุและคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะศึกษา ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญได้แก่ ระยะเวลาปั่นกวนสีและปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ 4) การปรับปรุงแก้ไขปัญหา โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติแบบ Two Proportions Z-Test เพื่อหาเวลาในการปั่นกวนสีที่เหมาะสมและใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบชนิดส่วนประสมกลางเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปริมาณสารเร่งแห้งสามชนิด 5) การติดตามควบคุม โดยการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงและกำหนดแผนควบคุม หลังการปรับปรุงพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตลดลงจาก 72% เป็น 21% และสามารถประหยัดต้นทุนที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพได้ 171,084 บาทต่อปี

คำสำคัญ: สีน้ำมัน, การแห้งสัมผัสของสี, การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ, การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ABSTRACT

The objective of this research is to improve a production process of Enamel paint. This research has an aim to reduce proportion of production cycles that needs quality improvement related to touch dry time over limit with the lowest the quality improvement cost. This research applied Six Sigma methodology, consisting of 5 phases: 1) Define phase: select and define important problem. 2) Measure phase: analyze the accuracy and precision of touch dry inspection system. 3) Analysis phase: brainstorm and select input factors for study, which were stirring time and drier quantity. 4) Improve phase: find out optimum stirring time using Two Proportions Z-Test and optimum drier quantity using Central Composite Design of Experiment (CCD). 5) Control phase: confirm experimental result after improvement and set up a control plan. After improvements, it was found that the proportion of production cycles that need unnecessary quality improvement over limit over one time reduced from 72% to 21% and saved the quality improvement cost of 171,084 bath per year.

Keywords: Enamel Paint, Touch Dry, Hypothesis Testing, Central Composite Design (CCD)

Received 20 November 2018
Revised 27 March 2019
Accepted 3 April 2019

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตสีน้ำมันต้องการให้ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของสี (Touch Dry) อยู่ในเวลาที่กำหนด แต่เมื่อผลิตรอบแรกตามสูตรเพื่อการผลิตแล้วมีบางรอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดทำให้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการเติมวัตถุดิบสารเร่งแห้งเพื่อทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาต้องเติมสารเร่งแห้งเพื่อการปรับปรุงคุณภาพจำนวนหลายรอบซึ่งเกินความจำเป็น เนื่องจากไม่ทราบปริมาณสารเร่งแห้งที่ต้องเติมที่เหมาะสม ซึ่งหากจำเป็นต้องมีการเติมสารเร่งแห้งควรมีการเติมเพียง 1 รอบเท่านั้นเพื่อที่จะทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในระยะเวลาที่กำหนด

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง เพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบ และมีต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพต่ำสุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แนวทางการปรับปรุงคุณภาพ [1-5] ตามแนวทางซิกซ์ ซิกมาซึ่งมี 5 ขั้นตอนดังนี้

1) การนิยามปัญหา (Define) ระบุสภาพปัญหาที่จะปรับปรุง กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

2) การวัด (Measure) วิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบคุณภาพการแห้งสัมผัสของสี

3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis) ระดมสมองเพื่อระบุและคัดเลือกปัจจัยนำเข้า การทดสอบสมมติฐานความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา

4) การปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve) หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งด้วยการออกแบบการทดลองชนิดพื้นผิวผลตอบ และหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

5) การตรวจติดตามควบคุม (Control) ทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมในการติดตามกระบวนการ

การแห้งตัวของสีน้ำมัน [6] คือ สีได้รับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันตามลำดับ สีเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นฟิล์มสีเคลือบปกป้องพื้นผิว นิยมใช้สารเร่งแห้ง (Drier) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองในการเร่งการแห้งตัวของแอลคีดเรซินซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสีน้ำมัน สารเร่งแห้งที่ใช้แบ่งออกได้ 3 ชนิด ดังนี้

1. Primary Drier ทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอลคีดเรซินให้เกิดการสลายตัวของฟรีแรดิคัลของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์และการแห้งตัวในขั้นตอนต่อไป ช่วยในการแห้งตัวชั้นบนสุดของฟิล์มสี นิยมใช้เป็นโคบอลต์ (Co)

2. Secondary Drier ทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของฟรีแรดิคัลของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ทำให้เชื่อมกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ให้เกิดการแห้งตัวเป็นฟิล์มสีของแอลคีดเรซิน ช่วยในการแห้งตัวทุกชั้นของฟิล์มสี นิยมใช้เป็นเซอร์โคเนียม (Zr)

3. Auxiliary Drier ทำหน้าที่ส่งเสริมการทำงานของ Primary Drier ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น นิยมใช้เป็นแคลเซียม (Ca) เมื่อแคลเซียมทำงานร่วมกับโคบอลต์จะช่วยในการแห้งตัวชั้นล่างสุดของฟิล์มสี

ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำเทียบกับปริมาณแอลคีดเรซินรวมในสูตรเพื่อการผลิตที่เหมาะสมต่อการแห้งสัมผัสของสีน้ำมันชนิดแอลคีดเรซินได้ถูกแนะนำไว้โดยงานวิจัยก่อนหน้า [7],[8] ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าที่แนะนำถูกกำหนดเป็นช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ควรจะใช้ ซึ่งในงานวิจัยผู้วิจัยต้องการทราบค่าที่เหมาะสมที่สุดกับกระบวนการผลิตที่ศึกษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะทำการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่ง

แห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง เพื่อนำสมการนั้นมาหาคำตอบค่าปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมที่ทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบลดลงและให้มีต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่ำที่สุด

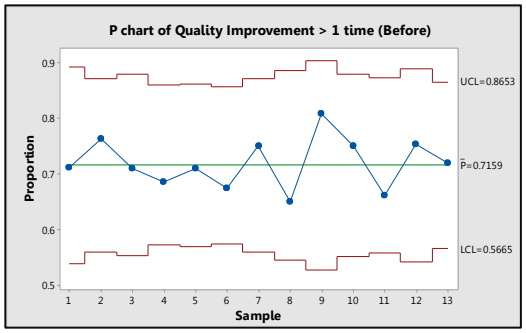
ตารางที่ 1 ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำเทียบกับปริมาณแอลคีดเรชินรวมในสูตรเพื่อการผลิต

Drier	(%Metal Recommend)	
	Minimum	Maximum
Co	0.06	0.20
Zr	0.30	0.40
Ca	0.02	0.30

3. วิธีการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การกำหนดปัญหาของงานวิจัย

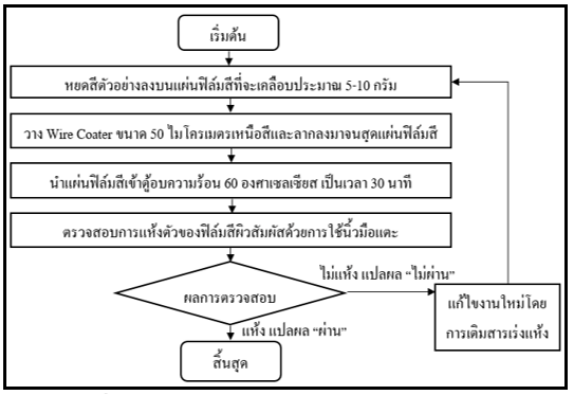
ผู้วิจัยได้สำรวจสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลากำหนดที่ต้องมีการเติมสารเร่งแห้งมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตในปี พ.ศ. 2560 ดังแสดงในแผนภูมิควบคุม p รูปที่ 1 คิดเป็นค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.72 ของจำนวนรอบการผลิตที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด จึงได้กำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนปัญหานี้ลง 50% จาก 0.72 เหลือเป็น 0.36



รูปที่ 1 แแผนภูมิควบคุม p ของสัดส่วนปัญหาก่อนปรับปรุงกระบวนการ

3.2 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

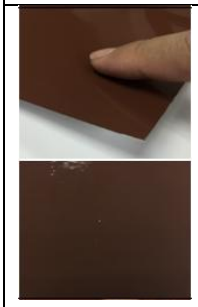
เริ่มจากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด (Measurement System Analysis) โดยการประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี โดยมีวิธีการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 2



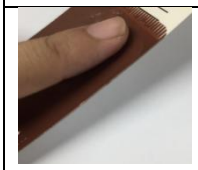
รูปที่ 2 วิธีการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี

การตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสีจะตรวจสอบหลังจากอบแผ่นฟิล์มสีในตู้อบความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีแล้ว หาก 30 นาทีแผ่นฟิล์มสีไม่แห้ง ซึ่งแปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” ต้องมีการเติมสารเร่งแห้งเพิ่มเพื่อทำให้การแห้งตัวของแผ่นฟิล์มสีอยู่ในเวลา 30 นาที ตามเกณฑ์ที่กำหนด เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบ

แผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบ	คำอธิบาย	การแปลผล
	สีไม่ติดนิ้วมือ	ผ่าน (G)
	สีไม่ติดนิ้วมือ แผ่นฟิล์มสีเหนียวหนืบเล็กน้อย เมื่อยกนิ้วออก แผ่นฟิล์มสีหลุดออกจากนิ้วมือ	ผ่าน (G)

ตารางที่ 2 (ต่อ) เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบ

แผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบ	คำอธิบาย	การแปลผล
	สีติดนิ้วมือ	ไม่ผ่าน (NG)
	ฟิล์มสีติดหนีบขึ้นมากับนิ้วมือเมื่อยกฟิล์มสี	ไม่ผ่าน (NG)

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสีดังนี้

1. คัดเลือกพนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพจำนวน 3 คน ที่มีความชำนาญเพื่อนำมาทดสอบการแห้งสัมผัสของสี

2. กำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนครั้งการตรวจสอบ อ้างอิงเกณฑ์ของ Fasser and Brettner [9] จึงได้กำหนดขนาดตัวอย่างต่ำสุดเป็น 12 รุ่นและพนักงานแต่ละคนจะต้องตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละรุ่น ตัวอย่างสีประกอบด้วย สีแห้งตัวอยู่ในเวลาที่กำหนดหรือไม่มีสีติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ผ่าน” จำนวน 4 รุ่น สีแห้งตัวเกินเวลาที่กำหนดหรือมีสีติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” จำนวน 4 รุ่น สีแห้งตัวอยู่ในเวลาที่กำหนดแบบก้ำกึ่งคือ ไม่มีสีติดนิ้วมือและแผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบเหนียวหนีบแต่เมื่อยกนิ้วออกแผ่นฟิล์มสีหลุดออกจากนิ้วมือ แปลผลเป็น “ผ่าน” จำนวน 2 รุ่น และสีแห้งตัวเกินเวลาที่กำหนดแบบก้ำกึ่งคือไม่มีสีติดนิ้วมือและแผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบเหนียวหนีบเมื่อยกนิ้วออกแผ่นฟิล์มสียังติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” จำนวน 2 รุ่น

3. กำหนดพนักงานแต่ละคนตรวจสอบการแห้งสัมผัสของตัวอย่างสี 12 รุ่นและตรวจสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งตามลำดับอย่างสุ่ม ประเมินผลการตรวจสอบสีนั้น “ผ่าน” และ “ไม่ผ่าน”

4. ทำการประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบด้วยโปรแกรมมินิแทป โดยเกณฑ์การยอมรับการประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบอ้างอิงเกณฑ์ของ AIAG [10]

Attribute Agreement Analysis

Within Appraisers

Assessment Agreement

Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
1	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
2	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
3	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.

Each Appraiser vs Standard

Assessment Agreement

Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
1	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
2	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
3	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: Appraiser's assessment across trials agrees with the known standard.

Assessment Disagreement

Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent
1	0	0.00	0	0.00	0	0.00
2	0	0.00	0	0.00	0	0.00
3	0	0.00	0	0.00	0	0.00

NG / G: Assessments across trials = NG / standard = G.
G / NG: Assessments across trials = G / standard = NG.
Mixed: Assessments across trials are not identical.

Between Appraisers

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: All appraisers' assessments agree with each other.

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: All appraisers' assessments agree with the known standard.

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการตรวจสอบพบว่า ดัชนีชี้วัดทั้งสี่ค่าได้แก่ เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซ็นต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัสของการตรวจสอบมีค่าเท่ากับ 100% ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับอ้างอิงจาก AIAG [10] แสดงว่าพนักงานทุกคนเข้าใจวิธีการตรวจสอบและสามารถตัดสินใจได้ถูกต้อง จึงยอมรับความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัดนี้ หลังจากนั้นจะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการต้องปรับปรุงคุณภาพเรื่องการแห้งสัมผัสของสีจำนวนหลายรอบ

3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ผู้วิจัยทำการระดมสมอง หาสาเหตุปัจจัยนำเข้าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา จัดลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหา และคัดเลือกสาเหตุเพื่อทำการปรับปรุงต่อไป

3.3.1 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

ผู้วิจัยได้ใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผลในการหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาการปรับปรุงคุณภาพการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดจำนวนหลายรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยแยกสาเหตุของปัญหาตามหมวดหมู่ ได้แก่

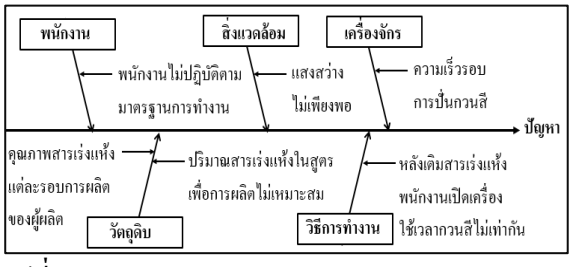
1) สาเหตุจากพนักงาน (Man) ได้แก่ ปัจจัยพนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานวิธีการทำงาน พนักงานเทสารเร่งแห้งออกจากภาชนะบรรจุไม่หมดทำให้ปริมาณสารเร่งแห้งไม่ครบตามที่กำหนด จึงสื่อสารให้เห็นความสำคัญของปริมาณสารเร่งแห้งส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

2) สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine) ได้แก่ ปัจจัยความเร็วรอบในการปั่นกวนสีอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี แต่มีข้อจำกัดว่าเครื่องจักรถูกกำหนดความเร็วไว้และไม่สามารถที่จะปรับเพิ่มลดความเร็วรอบได้ จึงต้องกำหนดความเร็วรอบเป็นค่าคงที่ 600 รอบต่อนาที

3) สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material) ได้แก่ ปัจจัยความผันแปรเปอร์เซ็นต์โลหะสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตเมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากเปอร์เซ็นต์โลหะถ้ามีเท่ากับหรือมากกว่าเกณฑ์จะทำให้เร่งปฏิกิริยาการแห้งของสีได้เร็วกว่าเปอร์เซ็นต์โลหะที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งในสูตรเพื่อการผลิตไม่เหมาะสม เนื่องจากสารเร่งแห้งที่ใส่ครบสูตรแล้วยังพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาอยู่ ก่อนการปรับปรุงมีแนวทางในการเติมคือ เติมสารเร่งแห้งรอบละ 10% ของน้ำหนักสารเร่งแห้งที่กำหนดไว้ในสูตรและเติมได้สูงสุด 5 รอบ การเติมสารเร่งแห้งรอบละ 10% ทำให้ต้องมีการเติมหลายรอบนั่นคือ ปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพแต่ละรอบไม่เหมาะสม ดังนั้นปัจจัยความผันแปรเปอร์เซ็นต์โลหะสารเร่งแห้งและปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งในสูตรเพื่อการผลิตไม่เหมาะสมอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

4) สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method) ได้แก่ ปัจจัยเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีแตกต่างกันส่งผลต่อสารเร่งแห้งไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับสี เวลาปั่นกวนสีที่น้อยเกินไปทำให้สารเร่งแห้งกระจายตัวไม่ทั่วถึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการเร่งแห้งของสีช้า ปัจจุบันพนักงานต่างคนใช้เวลาในการปั่นกวนสีไม่เท่ากันจึงต้องหาเวลามาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับปั่นกวนสี ดังนั้นปัจจัยเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

5) สาเหตุจากสภาพแวดล้อม (Environment) ได้แก่ ปัจจัยแสงสว่างไม่เพียงพอ การตรวจสอบการแห้งของสีใช้นิ้วสัมผัสแผ่นฟิล์มสีและดูว่ามีสีติดนิ้วมือหรือไม่ แสงสว่างจึงส่งผลต่อการพิจารณา ทุกเดือนมีการตรวจวัดแสงสว่างและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นปัจจัยแสงสว่างไม่เพียงพอไม่มีผลต่อการพิจารณาผลการตรวจสอบ



รูปที่ 4 แผนผังแสดงสาเหตุและผลของปัญหาการปรับปรุงคุณภาพการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดหลายรอบ

3.3.2 การจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาโดยเมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลปัจจัยทั้งหมดจากแผนผังแสดงสาเหตุและผลมาใส่ลงในเมทริกซ์สาเหตุและผลเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยมีเกณฑ์ประเมินดังนี้

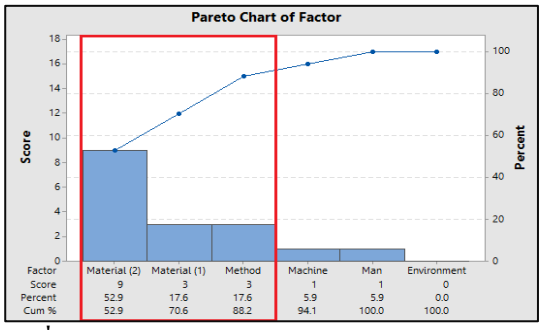
0 หมายถึง ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อปัญหา

1 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบน้อยต่อปัญหา

3 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบปานกลางต่อปัญหา

9 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบสูงต่อปัญหา

จากนั้นใช้กราฟคะแนนและเปอร์เซ็นต์สะสมของคะแนนความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อปัญหา เพื่อคัดกรองสาเหตุที่จะนำไปศึกษาในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟคะแนนและเปอร์เซ็นต์สะสมของคะแนนความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อปัญหา

จาก 6 ปัจจัยพบว่ามี 3 ปัจจัยที่มีเปอร์เซ็นต์สะสมคะแนนรวมมากกว่า 80% ที่จะนำไปศึกษาในงานวิจัย ซึ่งมีดังนี้

ลำดับ	หมวดหมู่	ปัจจัย
1	Material	สัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่ไม่เหมาะสมในสูตรเพื่อการผลิต
2	Material	ความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตของผู้ผลิต
3	Method	เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมสารเร่งแห้งแตกต่างกัน

3.4 การวิเคราะห์และทดสอบนัยสำคัญของปัจจัย

3.4.1 ปัจจัยความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตของผู้ผลิต

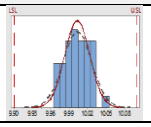
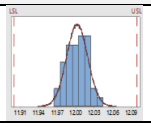
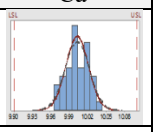
การศึกษานี้เพื่อดูว่าเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งมีระดับความผันแปรเป็นไปตามเกณฑ์การควบคุมคุณภาพที่กำหนดให้โคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียมมีเปอร์เซ็นต์โลหะเท่ากับ $10 \pm 0.10\%$, $12 \pm 0.10\%$ และ $10 \pm 0.10\%$ ในสารละลายตามลำดับ ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างสารเร่งแห้งชนิดละ 40 รอบการผลิตและหาปริมาณเปอร์เซ็นต์โลหะที่อยู่ในสารเร่งแห้ง

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ โดยพิจารณาความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งดังแสดงในตารางที่ 3 โดยคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่จำเป็นในการเก็บข้อมูล ดังสมการที่ 1

$$n = (Z_\alpha)^2 \frac{\left[\frac{1}{9(\hat{C}_{pk})^2}+\frac{1}{2}\right]}{\left[1-\frac{C_{pk}}{\hat{C}_{pk}}\right]^2} \quad (1)$$

จากการคำนวณพบว่าต้องใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 38, 36 และ 38 รอบการผลิต ในการประเมินความสามารถของกระบวนการในเรื่องเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้ง โคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียม ตามลำดับ ข้อมูล 40 รอบการผลิตที่จัดเก็บมาเพียงพอแล้วสำหรับการประเมิน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

Drier	Co	Zr	Ca
Histogram			
$\bar{x}$	10.0037	12.0027	10.0038
p-Value	0.115	0.062	0.067
C_p	1.42	1.96	1.69
C_{pk}	1.37	1.90	1.62

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการของข้อมูลเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้ง ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.115, 0.062 และ 0.067 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นไม่ปฏิเสธ H_0 สรุปว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

2) จากแผนภูมิฮิสโตแกรมพบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งทั้งสามชนิดอยู่ใกล้ค่าเป้าหมายและความผันแปรของกระบวนการมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนอนุโลม (Tolerance) โดยพิจารณาจากค่า C_p และ C_{pk} ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33

ดังนั้นปัจจัยความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตมีค่าน้อยและค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้ค่าเป้าหมาย ทำให้เชื่อว่าสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตมีเปอร์เซ็นต์โลหะโคบอลต์ 10% เซอร์โคเนียม 12% และแคลเซียม 10% ในสารละลาย

3.4.2 ปัจจัยเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมวัตถุดิบสารเร่งแห้ง

การทดสอบสมมติฐานเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมสารเร่งแห้งที่แตกต่างกันว่ามีผลต่อการแห้งสัมผัสของสีหรือไม่ เพื่อกำหนดเป็นเวลามาตรฐานสำหรับปั่นกวนสีในแต่ละรอบ ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างสีหลังจากที่พนักงานเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวนสี 5, 10, 15 และ 20 นาทีจำนวน 30 รอบการผลิตต่อระยะเวลาปั่นกวนสีค่าหนึ่ง ๆ

การทดสอบสมมติฐานความแตกต่างสัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดเมื่อเวลาปั่นกวนสีที่แตกต่างกันทำโดยการเปรียบเทียบข้อมูลสัดส่วนที่แต่ละคู่ของเวลาทดสอบด้วย Two Proportions Z-Test ที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

H_0: $p_1 = p_2$

H_1: $p_1 \neq p_2$

โดยที่

p_1 คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีเวลาที่ 1

p_2 คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีเวลาที่ 2

สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดถูกคำนวณดังสมการที่ 2 และผลการตรวจสอบดังแสดงในตารางที่ 4

$$p = \frac{x}{n} \qquad (2)$$

โดยที่

p คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด

x คือ จำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด

n คือ จำนวนรอบทั้งหมดที่ทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี

ตัวแปร	ผลการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสีหลังเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวน ณ เวลาต่าง ๆ			
	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที
x	21	19	10	10
n	30	30	30	30
p	0.70	0.63	0.33	0.33

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างสัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดที่คู่เวลาทดสอบต่าง ๆ

เวลาที่ 1	p_1	เวลาที่ 2	p_2	p-Value
5 นาที	0.70	10 นาที	0.63	0.291
10 นาที	0.63	15 นาที	0.33	0.007
15 นาที	0.33	20 นาที	0.33	0.500

จากการทดสอบพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาปั่นกวนสีที่ 5 และ 10 นาทีไม่แตกต่างกัน เวลา 10 และ15 นาทีแตกต่างกัน และเวลา 15 และ 20 นาทีไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 วิเคราะห์ได้ว่าหลังเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวนสี 5 และ 10 นาทีสารเร่งแห้งยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับสี แต่ที่เวลา 15 นาทีสารมีความเข้ากันมากกว่าที่ 10 นาที ซึ่งถ้าใช้เวลาปั่นกวนสีน้อยเกินไปสารเร่งแห้งกระจายตัวไม่ทั่วถึงเกิดปฏิกิริยาการเร่งแห้งของสีจะช้า ทำให้การแห้งสัมผัสของสีที่ตรวจสอบ ณ เวลา 10 และ 15 นาทีนั้นแตกต่างกัน แต่ ณ เวลา 15 และ 20 นาที ให้ผลไม่แตกต่างกัน แสดงว่าที่ช่วงเวลาปั่นกวนสี 15 ถึง 20 นาทีสารเร่งแห้งเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับสีแล้ว ผู้วิจัยจึงกำหนดเวลามาตรฐานสำหรับปั่นกวนสีในแต่ละรอบคือ 15 นาที แต่ที่ 15 นาทีนี้สัดส่วนปัญหายังมากอยู่คือ 33% ซึ่งเกิดจากปริมาณสารเร่งแห้งที่ใส่ไม่เหมาะสมจึงต้องศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนี้ต่อไป

3.4.3 ปัจจัยสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่ไม่เหมาะสมในสูตรเพื่อการผลิต

สารเร่งแห้ง 3 ชนิดทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาการแห้งตัวของสีแตกต่างกัน เมื่อพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดในระหว่างกระบวนการผลิตสีจะมีการเติมสารเร่งแห้งทันทีและมีจำนวนหลายรอบเนื่องจากไม่ทราบปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงจะปรับปรุงปัจจัยสำคัญนี้โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมสำหรับสูตรเพื่อการผลิตโดยจะแสดงรายละเอียดในระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา

4. การปรับปรุงแก้ไขปัญหา

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมกับสูตรเพื่อการผลิตที่ทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่พบปัญหาเวลาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา

ปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารเร่งแห้งโคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียม

4.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองสำหรับการทดลองคือ สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนวัตถุดิบสารเร่งแห้ง (Y_3) และต้นทุนการแก้ไขงานใหม่กรณีแต่งเฉดสีใหม่ (Y_4)

4.3 การกำหนดแบบการทดลอง

ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ชนิดส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เนื่องจากแบบการทดลอง CCD จะให้สมการความสัมพันธ์ที่มีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบการทดลองอื่น ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยทำให้สร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Matrix design) ได้จำนวน 20 การทดลอง (2^k Factorial Runs ระดับ ± 1 จำนวน 8 การทดลอง, Axial Runs ระดับ $\alpha = \pm 1.682$ จำนวน 6 การทดลอง, Center Runs ระดับ 0 จำนวน 6 การทดลอง)

4.4 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้าเป็นข้อมูลประเภทผันแปร (Variable Data) ซึ่งสามารถทำการทดลองที่ระดับ ±1.682 ได้ และระดับของปัจจัยนำเข้าคือ ปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมกับสูตรเพื่อการผลิต คำนวณดังสมการที่ 3

$$\%\ \text{Drier in Recipe} = \left[\frac{\%\ \text{Drier Recommend}}{\%\ \text{Metal in Drier}}\right] \times \%\ \text{Alkyd Resin} \times \left[\frac{\%\ \text{Solid Resin}}{100}\right] \quad (3)$$

โดยที่

% Drier in Recipe คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งแต่ละชนิดในสูตรเพื่อการผลิต

% Drier Recommend คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำในสูตรการผลิต แสดงไว้ในตารางที่ 1

% Metal in Drier คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณโลหะที่อยู่ในสารเร่งแห้งที่ใช้คือ Co 10%, Zr 12% และ Ca 10%

% Alkyd Resin คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารแอลคีดเรซินที่มีลักษณะเป็นของเหลวรวมทั้งหมดในสูตรเพื่อการผลิต

% Solid Resin คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณแอลคีดเรซินของแข็งที่อยู่ในสารละลายแอลคีดเรซินซึ่งมีค่าเท่ากับ 65%

ตารางที่ 6 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัย	ระดับที่ทำการทดลอง				
	-1.682	-1	0	+1	-1.682
A (Co)	0.63	0.70	0.80	0.89	0.96
B (Zr)	1.41	1.45	1.51	1.57	1.61
C (Ca)	0.77	0.91	1.11	1.31	1.45

หมายเหตุ: ปัจจัยนำเข้าหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์

ระดับต่ำสุดของแต่ละปัจจัย ($\alpha = -1.682$) กำหนดให้อยู่ที่ค่ากลางของช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งที่แนะนำเนื่องจากเป็นปริมาณที่ใช้ในสูตรเพื่อการผลิตปัจจุบันที่ยังพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด และยังต้องมีการใส่สารเร่งแห้งอีกหลายรอบ ส่วนระดับสูงสุดของแต่ละปัจจัย ($\alpha = +1.682$) กำหนดไว้ที่

ค่าสูงสุดของช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งที่แนะนำ ซึ่งเป็นปริมาณสารเร่งแห้งที่มากเกินความจำเป็นและอาจส่งผลให้ฟิล์มสีย่นได้เมื่อแห้งตัวเร็วเกินไป

4.5 การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดตัวอย่างในแต่ละการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนรอบในการผลิตที่ต้องเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองโดยใช้สมการคำนวณหาขนาดตัวอย่างกรณีที่ตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วน [11] ดังสมการที่ 4 และ 5

$$n = (Z_{1-\sigma/2} + Z_{1-\beta})^2/ (N)(\delta)^2 \quad (4)$$

$$\delta = \arcsin [\sqrt{p_0 + (\Delta/2)}]- \arcsin [\sqrt{p_0 - (\Delta/2)}] \quad (5)$$

โดยที่

n คือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในแต่ละการทดลอง

α คือ 0.05 จะได้ $Z_{1-\sigma/2} = 1.96$

β คือ 0.1 จะได้ $Z_{1-\beta} = 1.282$

N คือ 8 การทดลอง (จำนวนการทดลองเชิงแฟคทอเรียล)

δ คือ ค่าความแตกต่างของค่าที่ได้รับการแปลงข้อมูลแล้ว

p_0 คือ 0.72 (สัดส่วนปัญหาในปัจจุบัน)

Δ คือ 0.36 (ความเปลี่ยนแปลงที่ต้องการตรวจจับได้ คำนวณจากเป้าหมายที่ต้องการลดสัดส่วนปัญหาจาก 0.72 เป็น 0.36 คือ 0.72-0.36 = 0.36)

จากการคำนวณพบว่า ขนาดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในแต่ละการทดลองที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับ 8 ตัวอย่างหรือ 8 รอบการผลิต

4.6 วิธีทำการทดลอง

วิธีการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้คือ ชั่งน้ำหนักและผสมวัตถุดิบตามสูตรเพื่อการผลิตได้แก่ สารเพิ่มเนื้อ สารยึด สารเติมแต่ง แม่สี และตัวทำละลาย ผสมกันเป็นสีตัวอย่าง จากนั้นแบ่งสีออกเป็น 160 ตัวอย่าง (20 การทดลอง ๆ ละ 8 ตัวอย่าง) นำสีแต่ละตัวอย่างเติมสารเร่งแห้งตามสัดส่วนปริมาณตามที่ออกแบบการทดลองไว้แล้วนำมาปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสี 15 นาทีจากนั้นตรวจสอบคุณภาพการแห้งสัมผัสของสีว่าแห้งหรือไม่และตรวจสอบคุณภาพค่าความแตกต่างสี (DE) หาก DE > 0.5 ซึ่งเกินช่วงที่ยอมรับต้องแก้ไขเฉดสีโดยแต่งเฉดสีใหม่ให้ DE < 0.5

4.7 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 7 โดยแต่ละการทดลองคำนวณต้นทุนจาก 8 รอบการผลิต ซึ่งมีน้ำหนักการผลิตเฉลี่ย 2,500 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต

ตารางที่ 7 ผลการทดลอง

การทดลอง	ระดับปัจจัยนำเข้า			ตัวแปรตอบสนอง			
	A	B	C	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	1	-1	1	0.00	84163	77857	6306
2	-1	1	-1	1.00	68343	68343	0
3	0	0	0	0.00	73100	73100	0
4	-1	1	1	1.00	72992	72386	606
5	0	0	0	0.00	73100	73100	0
6	-1.682	0	0	1.00	67106	66500	606
7	0	0	0	0.00	73100	73100	0
8	1.682	0	0	0.00	87456	79700	7756
9	0	0	-1.682	1.00	70606	69700	906
10	0	0	0	0.00	73100	73100	0
11	0	0	0	0.00	73100	73100	0
12	-1	-1	1	1.00	70814	70008	806
13	1	-1	-1	0.00	78649	73814	4836
14	0	-1.682	0	0.00	76746	75100	1646
15	1	1	-1	0.00	79908	76192	3716
16	0	1.682	0	1.00	72206	71100	1106
17	0	0	1.682	0.00	82046	76500	5546
18	0	0	0	0.00	73100	73100	0
19	-1	-1	-1	1.00	65965	65965	0
20	1	1	1	0.00	85541	80235	5306

4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด (Best Subset Regression) เลือกสมการลดรูปที่มีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีที่สุด โดยใช้เกณฑ์ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้วสูงที่สุด

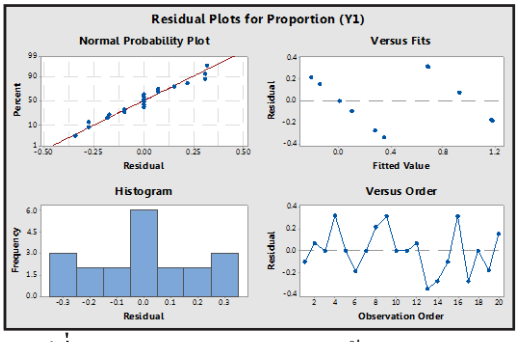
ก. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กรณีตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) โดยการตรวจสอบสมมติฐาน 3 ข้อดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.057 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าส่วนตกค้างจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงใน Normal Probability Plot ในรูปที่ 6

2. การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลอง พบว่าไม่แสดงสัญญาณของการเกิดแนวโน้ม สรุปว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

3. การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าฟิตของข้อมูลพบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มไม่มีรูปแบบที่เป็นแนวโน้มเพิ่มตามค่าฟิต สรุปว่าความแปรปรวนส่วนตกค้างมีค่าคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon = NID \quad (0, \sigma^2)$ จึงสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ในการพยากรณ์ได้



รูปที่ 6 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างของตัวแปรตอบสนอง Y_1 ของสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่ส่งผลต่อสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด พบว่า สมการถดถอยมีเทอมของผลกระทบหลักของปัจจัยและเทอมกำลังสองของทั้งสามปัจจัยคือ A, B, C, AA, BB และ CC สมการถดถอยมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (s) เท่ากับ 0.236134 และมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R-Sq (adj)) เท่ากับ 76.72% ดังแสดงในรูปที่ 7

Proportion (Y1) = 0.0010-0.4160 A-0.1231 B - 0.1231 C+0.1704 A*A+ 0.1704 B*B + 0.1704 C*C (6)

Regression Analysis: Proportion (Y1) versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	3.82513	0.63752	11.43	0.000
A	1	2.36385	2.36385	42.39	0.000
B	1	0.20711	0.20711	3.71	0.076
C	1	0.20711	0.20711	3.71	0.076
A*A	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
B*B	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
C*C	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
Error	13	0.72487	0.05576		
Lack-of-Fit	8	0.72487	0.09061	*	*
Pure Error	5	0.00000	0.00000		
Total	19	4.55000			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.236134	84.07%	76.72%	26.21%

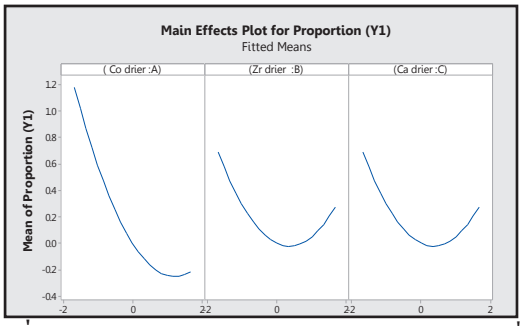
Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.0010	0.0963	0.01	0.992	
A	-0.4160	0.0639	-6.51	0.000	1.00
B	-0.1231	0.0639	-1.93	0.076	1.00
C	-0.1231	0.0639	-1.93	0.076	1.00
A*A	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02
B*B	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02
C*C	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02

Regression Equation

Proportion (Y1) = 0.0010 - 0.4160 A - 0.1231 B - 0.1231 C + 0.1704 A*A + 0.1704 B*B + 0.1704 C*C

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณสารเร่งแห้งและตัวแปรตอบสนอง Y_1



รูปที่ 8 กราฟผลกระทบของปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง Y_1

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณโคบอลต์ (A) ต่อสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณโคบอลต์ระดับต่ำส่งผลให้พบสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณโคบอลต์มากขึ้นทำให้พบสัดส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น สีรับออกซิเจนในอากาศ

ที่ผิวหน้าได้มากทำให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลคีดเรซินในสีเกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์และเร่งการสลายตัวเป็นฟรีแรดิคัลซึ่งปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นฟรีแรดิคัลเกิดเร็วขึ้น นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเร็วขึ้น สีจะแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว สัดส่วนปัญหาจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และระดับ 0 ถึง 2 ปริมาณโคบอลต์มีเกินพอที่จะรับออกซิเจน ปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นจากระดับ 0 หรือมากกว่านั้นการแห้งสัมผัสของสีก็อยู่ในเวลาที่กำหนดเช่นเดิม สัดส่วนปัญหาจึงไม่เปลี่ยนแปลง

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณเซอร์โคเนียม (B) ต่อสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณเซอร์โคเนียมระดับต่ำส่งผลให้พบสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียมมากขึ้นทำให้พบสัดส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณเซอร์โคเนียมที่เพิ่มขึ้นจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของฟรีแรดิคัลจำนวนมากเข้าเชื่อมโยงกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่เร็วขึ้น สีจะแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว สัดส่วนปัญหาจึงลดลง และระดับ 0 ถึง 2 พบเส้นโค้งมีจุดวกกลับนั่นคือมีสัดส่วนปัญหาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเซอร์โคเนียมที่มากเกินไปทำให้ฟรีแรดิคัลในแอลคีดเรซินเกิดการเคลื่อนย้ายองค์ประกอบภายในทำให้การเชื่อมกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ช้า การแห้งตัวของสีจะช้าลง

ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณแคลเซียม (C) ต่อสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณแคลเซียมระดับต่ำส่งผลให้พบสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณแคลเซียมมากขึ้นทำให้พบสัดส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นจะเร่งการเปิดช่องนำออกซิเจนในอากาศที่ผิวหน้าสีเข้าสู่ชั้นล่างสุดของฟิล์มสีไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคล้ายกับโคบอลต์และเป็นช่องทางทำให้ตัวทำละลายระเหยออกได้ง่าย ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น ฟรีแรดิคัลเกิดเร็วขึ้น ตัวทำละลายระเหยออกได้มากขึ้น สีแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว สัดส่วนปัญหาจึงลดลง และระดับ 0 ถึง 2 พบเส้นโค้งมีจุดวกกลับนั่นคือมีสัดส่วนปัญหาเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่มากเกินไปได้นำน้ำจากอากาศเข้ามาด้วย ตามสมการเคมี $Ca + O_2 + H_2O = H_2 + Ca(OH)_2$ ทำให้ฟิล์มสีมีน้ำเข้ามาในระบบ การแห้งสัมผัสของสีจึงช้าลง

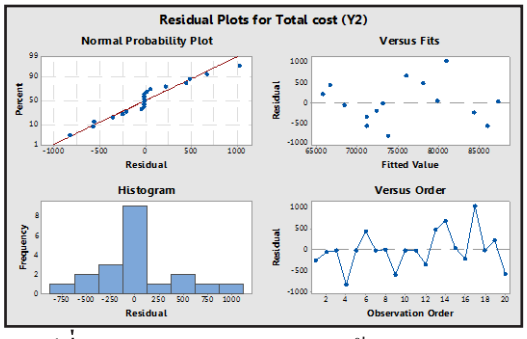
ข. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กรณีตัวแปรตอบสนองเป็นต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) โดยการตรวจสอบสมมติฐาน 3 ข้อดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.084 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าส่วนตกค้างจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงใน Normal Probability Plot ในรูปที่ 9

2. การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลองในรูปที่ 9 พบว่า ไม่แสดงสัญญาณของการเกิดแนวโน้ม สรุปว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

3. การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟแสดงความ สัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าฟิตของข้อมูลพบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มไม่มีรูปแบบที่เป็นแนวโน้มเพิ่มตามค่าฟิต สรุปว่าความแปรปรวนส่วนตกค้างมีค่าคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon = NID \quad (0, \sigma^2)$ จึงสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ในการพยากรณ์ได้



รูปที่ 9 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างของตัวแปรตอบสนอง Y_2 ของสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง พบว่า สมการถดถอยมีเทอมของผลกระทบหลักของปัจจัยเทอมกำลังสองของทั้งสามปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ A, B, C, AA, BB, CC, AB และ AC สมการมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (s) เท่ากับ 572.652 และมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R-Sq (adj)) เท่ากับ 99.11% ดังแสดงในรูปที่ 10

Total cost (Y2) = 73113 + 6178 A + 1086 B + 2920 C + 1392 A*A + 400 B*B + 1054 C*C - 240 A*B + 206 A*C (7)

Regression Analysis: Total cost (Y2) versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	695241950	86905244	265.01	0.000
A	1	521242421	521242421	1589.49	0.000
B	1	16101741	16101741	49.10	0.000
C	1	116483239	116483239	355.21	0.000
A*A	1	27925488	27925488	85.16	0.000
B*B	1	2309426	2309426	7.04	0.022
C*C	1	16021511	16021511	48.86	0.000
A*B	1	460800	460800	1.41	0.261
A*C	1	339554	339554	1.04	0.331
Error	11	3607231	327930		
Lack-of-Fit	6	3607231	601205	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	698849181			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
572.652	99.48%	99.11%	97.01%

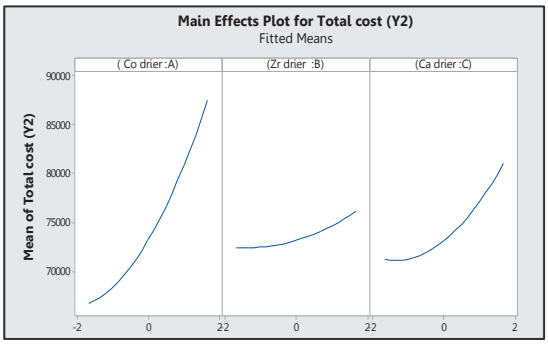
Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	73113	234	313.04	0.000	
A	6178	155	39.87	0.000	1.00
B	1086	155	7.01	0.000	1.00
C	2920	155	18.85	0.000	1.00
A*A	1392	151	9.23	0.000	1.02
B*B	400	151	2.65	0.022	1.02
C*C	1054	151	6.99	0.000	1.02
A*B	-240	202	-1.19	0.261	1.00
A*C	206	202	1.02	0.331	1.00

Regression Equation

Total cost (Y2) = 73113 + 6178 A + 1086 B + 2920 C + 1392 A*A + 400 B*B + 1054 C*C - 240 A*B + 206 A*C

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณสารเร่งแห้งและตัวแปรตอบสนอง Y_2



รูปที่ 11 กราฟผลกระทบของปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง Y_2

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณโคบอลต์ (A) ต่อต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ ที่ปริมาณโคบอลต์ระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อปริมาณโคบอลต์มากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้น โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ช่วงระดับ 0 ถึง 2 ต้นทุนรวมสูงขึ้นมาก เนื่องจากโคบอลต์มีสีม่วงเข้มถ้าเติมปริมาณมากจะทำให้เฉดสีเพี้ยนไปจากเฉดสีมาตรฐานต้องมีการปรับเฉดสีด้วยการเติมแม่สีเพิ่มทำให้มีต้นทุนการแก้ไขงานใหม่กรณีแต่งเฉดสีใหม่รวมอยู่ด้วย

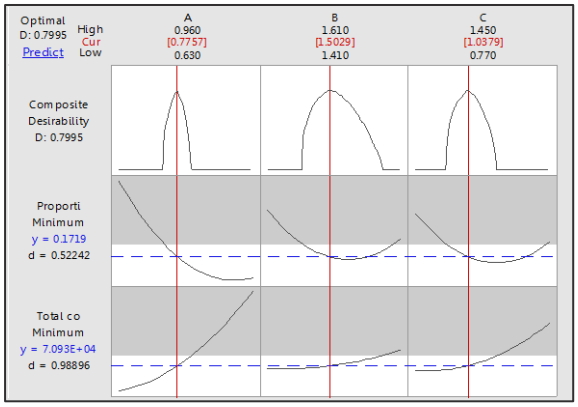
ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณเซอร์โคเนียม (B) ต่อต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ ที่ปริมาณเซอร์โคเนียมระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียมมากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้น โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเซอร์โคเนียมที่เพิ่มขึ้น สำหรับเซอร์โคเนียมมีสีใสการเติมปริมาณมากไม่ได้มีผลทำให้เฉดสีเพี้ยนไปจากเฉดสีมาตรฐานจึงไม่มีต้นทุนการแก้ไขงานใหม่

ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณแคลเซียม (C) ต่อต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ ที่ปริมาณแคลเซียมระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อปริมาณแคลเซียมมากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นโดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น แต่ช่วงระดับ 0 ถึง 2 ต้นทุนรวมสูงขึ้นมาก เนื่องจากแคลเซียมมีสีเหลืองเข้มถ้าเติมปริมาณมากจะทำให้เฉดสีเพี้ยนไปจากเฉดสีมาตรฐานต้องมีการปรับเฉดสีด้วยการเติมแม่สีเพิ่มทำให้เกิดต้นทุนการแก้ไขงานใหม่กรณีแต่งเฉดสีใหม่รวมอยู่ด้วย

4.9 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยโปรแกรมมินิแทปฟังก์ชัน Response Optimization งานวิจัยกำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนปัญหาจาก 0.72 เป็น 0.36 แต่ต้องการทราบค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ไม่พบปัญหาเลยนั่นคือ สัดส่วนปัญหาเท่ากับศูนย์ จึงกำหนดจุดประสงค์ตัวแปร Y_1 เป็นแบบค่าต่ำสุด (Minimum)

กำหนดค่า Upper เท่ากับ 0.36 เป็นสัดส่วนมากที่สุดที่ยอมรับได้ และสำหรับตัวแปรตอบสนองต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายไว้ให้มีค่าต่ำที่สุด จากผลการทดลองพบว่ามีหนึ่งการทดลองที่มีค่า Y_1 เท่ากับ 0.00 ได้และมีต้นทุนรวม (Y_2) เป็น 73,100 บาท ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น ๆ แต่ผู้วิจัยต้องหาปริมาณสารเร่งแห้งที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนอง Y_1 และ Y_2 ที่ดีกว่าค่าที่ระดับการทดลองนี้ จึงกำหนดจุดประสงค์ของตัวแปร Y_2 เป็นแบบค่าต่ำสุด (Minimum) และกำหนดค่า Upper ของ Y_2 เท่ากับ 73,100 บาท ให้เป็นต้นทุนรวมมากที่สุดที่ยอมรับได้และกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ลดลงอีก 3% จาก 73,100 บาทได้ซึ่งเท่ากับ 69,445 บาท ผลการหาค่าที่เหมาะสมได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

จากผลการหาค่าที่เหมาะสมพบว่า การพยากรณ์ทำให้ได้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเท่ากับ 17% และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งเท่ากับ 70,931 บาทต่อ 8 รอบการผลิต สามารถหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ ปริมาณโคบอลต์ 0.7757% เซอร์โคเนียม 1.5029% และแคลเซียม 1.0379% ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนระดับการผลิตจริงจะเป็นต้นทุนจากวัตถุดิบสารเร่งแห้งเท่านั้นได้เท่ากับ 71,464 บาท ผู้วิจัยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมและสัดส่วนใหม่ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมและสัดส่วนใหม่

หัวข้อ	สัดส่วนเดิม	สัดส่วนใหม่	สัดส่วนใหม่
Co (%)	0.630	0.7757	0.7950
Zr (%)	1.410	1.5029	1.5110
Ca (%)	0.770	1.0379	1.1100
ต้นทุนสารเร่งแห้ง 8 รอบการผลิต (บาท)	61,100	71,464	73,100
ต้นทุนสารเร่งแห้ง 1 รอบการผลิต (บาท)	7,638	10,364	12,000
ต้นทุนสารเร่งแห้งที่เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนเดิม 1 รอบการผลิต (บาท)	-	+1,295	+1,500
ต้นทุนค่าแรงงานและค่าไฟฟ้า 1 รอบการผลิต (บาท)	-	+50.74	+50.74
ต้นทุนรวมต่อ 1 รอบการผลิต (บาท)	-	1,345.74	1,550.74
สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ	30% (จริง)	17% (ผลจาก Response Optimization)	0% (ผลการทดลอง)

ก่อนการปรับปรุงพบว่า มีเพียง 30% ของจำนวนรอบการผลิตทั้งหมดที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเท่านั้นเป็นเพราะแต่ละรอบการผลิตได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน แสดงว่า ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมมีความเหมาะสมกับสูตรอยู่ในระดับหนึ่ง หากใช้ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนใหม่ตามการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนปัญหาเป็นศูนย์ทำให้ต้นทุนรวมจะเพิ่มสูงมาก จึงตัดสินใจให้ใช้

ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมในการผลิตสีปกติแต่จะใช้สัดส่วนใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพเมื่อพบปัญหาหลังจากการใช้ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมแล้วเพื่อลดจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพจาก 3-4 รอบให้เหลือ 1-2 รอบ

ผู้วิจัยมีแนวคิดจะทำให้ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด โดยแนวคิดในการกำหนดปริมาณสารเร่งแห้งที่จะใช้มี 2 แนวทางดังนี้คือ

แบบที่ 1 ใช้สัดส่วนใหม่ตามการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ แสดงว่าจะมีการปรับปรุงคุณภาพเพียง 1 รอบต่อรอบการผลิตโดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 เลย ซึ่งมีต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 1,550.74 บาทต่อรอบการผลิต

แบบที่ 2 ใช้สัดส่วนใหม่ที่ได้จากหาค่าที่เหมาะสมด้วย Response Optimization ในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 โดยยอมให้มีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 17% แต่จะสามารถลดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงจากแบบที่ 1 เท่ากับ 205 บาทต่อรอบการผลิต พิจารณาผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 17% ซึ่งน้อยกว่าเป้าหมายที่กำหนด ผู้บริหารยอมเสียเวลาในการแก้ไขงานใหม่เพราะเวลามีเหลือทันตามเวลาในการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้ 2 วัน แต่ยังสามารถประหยัดต้นทุนรวมเพิ่มได้อีกด้วย ซึ่งมีต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 1,345.74 บาทต่อรอบการผลิตในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 และเมื่อปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 ตามปริมาณที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแล้วยังพบปัญหาอยู่ต้องปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 โดยเติมสารเร่งแห้งเพิ่มอีกให้เป็นไปตามสัดส่วนของการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ ซึ่งต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 255.74 บาทต่อรอบการผลิตในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2

ผู้วิจัยคำนวณต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแบบที่ 1 และ 2 โดยอ้างอิงจากข้อมูล 30% หรือ 641 รอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพในปี พ.ศ. 2560 ดังนั้นต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแบบที่ 1 เท่ากับ 994,024.3 บาท และแบบที่ 2 เท่ากับ 890,495 บาท โรงงานกรณีศึกษาจึงตัดสินใจที่จะใช้ปริมาณสารเร่งแห้งในการปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิดแบบที่ 2 คือ ยอมให้มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 อีก 17% สามารถประหยัดต้นทุนจากแบบที่ 1 ได้ 103,529.3 บาทต่อปี สรุปปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพ แสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพ

สารเร่งแห้ง	สัดส่วนเดิม	ปริมาณสารเร่งแห้งที่ต้องเติมในการปรับปรุงคุณภาพ	
		รอบที่ 1	รอบที่ 2
Co (%)	0.630	+0.1457	+0.0193
Zr (%)	1.410	+0.0929	+0.0072
Ca (%)	0.770	+0.2678	+0.0722

5. การติดตามควบคุมกระบวนการ

5.1 การทดสอบเพื่อยันยืนผล

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบยืนยันผลหลังการปรับปรุงจำนวน 81 รอบการผลิตที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด โดยใช้ปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 และ 2 ตามตารางที่ 9 จากนั้นคำนวณหาขนาดตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าสัดส่วนแบบ Two Proportions ก่อนและหลังปรับปรุง ดังแสดงในสมการที่ 8 โดยจะเป็นสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเฉพาะที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตเท่านั้น

$$n = \frac{\left(z_{1-\alpha/2}\sqrt{2\bar{p}\bar{q}} + z_{1-\beta}\sqrt{p_1q_1 + p_0q_0}\right)^2}{(p_1 - p_0)^2} \quad (8)$$

โดยที่

n คือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องจัดเก็บก่อนและหลังปรับปรุง

p_0 คือ สัดส่วนปัญหาปัจจุบันก่อนปรับปรุงกระบวนการ โดย $p_0 = 0.72$ และ $q_0 = 1 - p_0$

p_1 คือ สัดส่วนปัญหาเป้าหมายที่จะลดลงหลังปรับปรุงกระบวนการ โดย $p_1 = 0.36$ และ $q_1 = 1 - p_1$

$\bar{p}$ คือ ค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัจจุบันก่อนปรับปรุงกระบวนการและสัดส่วนปัญหาเป้าหมายที่จะลดลงหลังปรับปรุงกระบวนการ $[(p_0 + p_1)/2]$ โดยที่ $\bar{q} = 1 - \bar{p}$

$1-\alpha/2$ คือ ระดับความเชื่อมั่นกำหนดให้เป็น 95%

$1-\beta$ คือ กำลังการทดสอบ กำหนดเป็น 0.9

จากการคำนวณพบว่า ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้เท่ากับ 39 ตัวอย่าง ก่อนปรับปรุงมี 641 รอบการผลิตและหลังปรับปรุงมี 81 รอบการผลิต พบว่าจำนวนข้อมูลมีเพียงพอแล้ว ใน 81 รอบการผลิตพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอยู่จำนวน 17 รอบการผลิตที่ต้องปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 ดังนั้นหลังปรับปรุงสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบจะเท่ากับ 0.21 ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่ต้องการคือ 0.36

5.2 การทดสอบสมมติฐานของการเปรียบเทียบค่าสัดส่วน

การทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปัญหาที่ว่าหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าก่อนปรับปรุง ทำการทดสอบโดยใช้ Two Proportions Z-Test ซึ่งมีสมมติฐานที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

$H_0: p_1 = p_2$

$H_1: p_1 > p_2$

โดยที่

p_1 คือ สัดส่วนปัญหาก่อนปรับปรุงกระบวนการ

p_2 คือ สัดส่วนปัญหาหลังปรับปรุงกระบวนการ

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	459	641	0.716069
2	17	81	0.209877

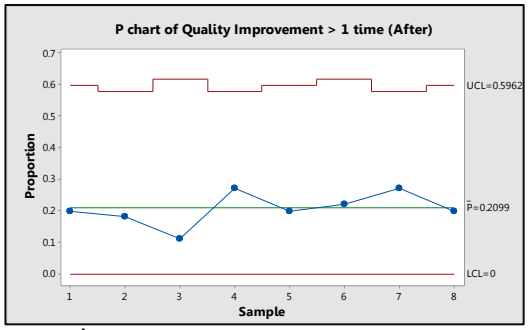
Difference = p (1) - p (2)
Estimate for difference: 0.506192
95% lower bound for difference: 0.426210
Test for difference = 0 (vs > 0): Z = 10.41 P-Value = 0.000

รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแตกต่างสัดส่วนปัญหาก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

ค่า p-Value จากการทดสอบมีค่า <0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่า สัดส่วนหลังการปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.3 การกำหนดแผนภูมิควบคุม

ผู้วิจัยจัดทำแผนภูมิควบคุม p หลังปรับปรุงกระบวนการเพื่อติดตามความเสถียรของสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลากำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 แผนภูมิควบคุม p ของสัดส่วนปัญหาหลังปรับปรุงกระบวนการ

จากแผนภูมิควบคุม p พบว่า หลังปรับปรุงกระบวนการไม่มีจุดใดออกนอก LCL และ UCL หมายถึงกระบวนการอยู่ในสภาวะการควบคุมหรือมีความเสถียร ก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.7159 และหลังปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.2099 ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.4 สรุปผลการปรับปรุงกระบวนการ

การปรับปรุงกระบวนการทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลากำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตจาก 0.72 ลดลงเหลือ 0.21 น้อยกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 0.36 และเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่อ 1 รอบการผลิต ก่อนปรับปรุงกระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,576 บาทต่อรอบการผลิต และหลังปรับปรุงกระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,307 บาทต่อรอบการผลิต สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 269 บาท

ต่อรอบการผลิต ทั้งนี้ในแต่ละเดือนจะพบปัญหาที่ต้องปรับปรุงคุณภาพเฉลี่ย 53 รอบการผลิตต่อเดือน ซึ่งสามารถประหยัดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงได้ 171,084 บาทต่อปี

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยตาม 5 ขั้นตอนหลัก เริ่มจากการกำหนดปัญหา การประเมินความแม่นและความเที่ยงของระบบการวัด การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและการทดสอบสมมติฐานความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้า การปรับปรุงแก้ไขปัญหา และการติดตามควบคุมกระบวนการผลิตสีน้ำมันเพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิต โดยมีแนวทางการปรับปรุงหลักคือ ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) แบบพื้นผิวผลตอบชนิดส่วนประสมกลางในการหาสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการปรับปรุงคือ การปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 โดยเติมสารเร่งแห้งในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนเดิมให้เป็นตามสัดส่วนที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด ซึ่งจะทำให้ยังพบจำนวนรอบการผลิตที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 21% ในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 จะเติมสารเร่งแห้งเพิ่มอีกให้เป็นไปตามสัดส่วนที่เคยทำการทดลองแล้วพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ เมื่อได้ใช้แนวทางในการปรับปรุงนี้แล้วพบว่าสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลากำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบลดลงจากก่อนปรับปรุง 72% เป็น 21% หลังจากปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 แล้วไม่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเลยแสดงว่าไม่มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบถัดไป ซึ่งลดลงจากที่ก่อนปรับปรุงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 เท่ากับ 50% มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 3 เท่ากับ 16% และมีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 4 เท่ากับ 6% จึงจะทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนดได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 10 และหลังปรับปรุงกระบวนการสามารถประหยัดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงได้จากก่อนปรับปรุงเท่ากับ 171,084 บาทต่อปี

ตารางที่ 10 สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีจำนวนรอบในการปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ แล้วการแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด ก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ

จำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพแล้วการแห้งตัวของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด	สัดส่วนจำนวนรอบการผลิต	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	0.28	0.79
2	0.50	0.21
3	0.16	0.00
4	0.06	0.00
รวม	1.00	1.00

เอกสารอ้างอิง

[1] Allen, T. T. Introduction to Engineering Statistic and Lean Sigma. 2rd ed. London: Springer Publications, 2010.

[2] Pyzdek, T. and Keller, P. A. The Six Sigma Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

[3] Montgomery, D. C. and Runger, G. C. Applied Statistic and Probability for Engineers. 6th ed. John Wiley & Sons, 2014.

[4] Rojanarowan, N. and Senprom, T. Glass-mold defective reduction in plastic lenses manufacturing process using six sigma approach. *Advanced Materials Research*, 2011; 156-157: 451-458.

[5] พิชญ์พันธ์ อุ่นชื่น และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์. การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบของชิ้นงานหล่อ, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2561; 25(1): 95-108.

[6] อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์). โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
[7] Calbo, L. J. Handbook of Coatings Additives. New York: Marcel Dekker, 1987.
[8] Bielman, J. H. Surface Coating. Chapman & Hall, 1993.
[9] Fasser, Y. and Brettner, D. Quality and Reliability Engineering International. NY: John Wiley & Sons, 1992.
[10] AIAG, A. Measurement systems analysis (MSA). 3rd ed. The Automotive Industries Action Group, 2002.
[11] Bisgaard, S.and Fuller, H. T. Sample Size Estimate for Two-Level Factorial Designs with Binary Response. *Journal of Quality Engineering*, 1994.