



การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบ ของชิ้นงานหล่อ

Reduction of Defective Rate from Rough Surface Defects of Casted Product

พิชญ์พันธ์ อุ่นชื่น และ นภัสวงค์ โอสอศิลป์*

Phichaphan Oonchuen and Napassavong 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: phichaphan@gmail.com, napassavong.o@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นงานผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) ใช้กับรถแทรกเตอร์ เพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานเหล็กหล่อ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา โดยแบ่งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ (1) การนิยามปัญหา โดยเลือกปัญหาและอธิบายสภาพปัญหาที่จะปรับปรุง (2) การวัด โดยการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบหน่วยนับเพื่อประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของกระบวนการวัด (3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าและพิสูจน์ความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้า (4) การปรับปรุง โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ (5) การควบคุมกระบวนการ โดยการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมใหม่ โดยหลังการปรับปรุงพบว่า สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานลดลงจาก 86.82% เป็น 46% ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ 139,922 บาทต่อปี

คำสำคัญ: ผิวไม่เรียบ, เหล็กหล่อ, ซิกซ์ ซิกมา, Multi-Vari Chart, การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ, การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

The objective of this research is to improve production processes of engine cover part (Case Mid), which is used in a tractor. This research has an aim to reduce the defective rate from rough inner surface of cast iron parts. This research applied the Six Sigma methodology, consisting of 5 phases, to solve the problem. In Phase 1, Define, important problem was selected and clearly defined. In Phase 2, Measure, the measurement system analysis was analyzed in terms of its accuracy and precision. In Phase 3, Analysis, all key process input variables were brainstormed and statistically tested whether they significantly affected the problem. In Phase 4, Improve, the Design of Experiments technique was performed to find out the optimal setting of the key process factors. In Phase 5, Control, a confirmatory experiment was performed to confirm the result after improvement. Then, control plan were updated. After improvement, the defective rate from rough inner surface defects was reduced from 86.82% to 46%. This improvement could save the rework cost of 139,922 baht per year.

Keywords: Rough Surface, Cast iron, Six Sigma, Multi-Vari Chart, Hypothesis Testing, Design of Experiment

1. บทนำ

อุตสาหกรรมรถยนต์มีสภาพการแข่งขันในตลาดที่รุนแรงส่งผลให้แต่ละบริษัทต้องควบคุมค่าใช้จ่ายการผลิตให้ลดลง โรงงานผลิตเหล็กหล่อชิ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษาประสบปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายการผลิตสูงเนื่องจากมีผลิตภัณฑ์จำนวนมากที่มีข้อบกพร่องผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน โดยข้อกำหนดของมาตรฐานผิวชิ้นงานคือชิ้นงานต้องเรียบเสมอผิว ไม่เกิดลักษณะเม็ดทรายเกาะที่ผิวด้านในของชิ้นงานและ/หรือต้องไม่มีรอยคมลักษณะฟันปลา เพราะจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่สูงสุดในการแก้ไขผิวชิ้นงาน ทำให้ค่าใช้จ่ายการผลิตสูงโดยไม่จำเป็น ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญและโรงงานต้องเร่งแก้ไขปัญหา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานเหล็กหล่อผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) และลดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม่เรียบของชิ้นงาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิด ชิคม่า ซึ่งมีขั้นตอนการปรับปรุง 5 ขั้นตอนดังนี้

1) การนิยามปัญหา (Define) โดยทำการเลือกปัญหาที่มีผลกระทบมากที่สุดมาแก้ไขก่อน และอธิบายสภาพปัญหาให้ชัดเจน

2) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure) โดยการวิเคราะห์ความแปรผันและความเที่ยงของกระบวนการวัดแบบหน่วยนับและประเมินความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุง

3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze) โดยการวิเคราะห์ตำแหน่งของชิ้นงานที่เกิดปัญหาและจากนั้นทำการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าเป็นสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังก้างปลา จากนั้นเลือก

ปัจจัยมาทดสอบความมีนัยสำคัญต่อปัญหาโดยการวิเคราะห์แผนภาพและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

4) การปรับปรุงแก้ไข (Improve) โดยกำหนดวิธีการปรับปรุงโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

5) การควบคุมกระบวนการ (Control) ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมใหม่ในการทำงาน [1]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การกำหนดปัญหา

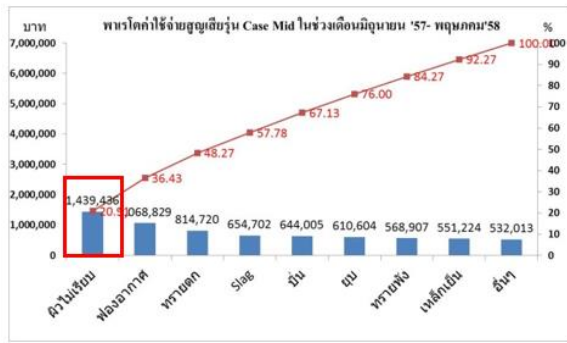
การสำรวจสัดส่วนของเสียแยกตามประเภทข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) ในช่วงมิถุนายน ปี 2557 ถึงพฤษภาคม ปี 2558 พบว่าของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในมีสัดส่วนมากที่สุด เป็น 86.82% ของปริมาณการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1 และก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายสูญเสียในการแก้ไขข้อบกพร่องมากที่สุด คิดเป็นเงิน 1,439,436 ล้านบาทต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาผิวไม่เรียบมาทำศึกษาวิจัยเพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องนี้

ตารางที่ 1 ของเสียรุ่น Case Mid ในช่วงเดือน มิ.ย. 2557-พ.ค. 2558

ประเภทข้อบกพร่อง	ชนิด	สัดส่วนของเสีย	ค่าใช้จ่ายสูญเสีย (ล้านบาท)
ผิวไม่เรียบ	Rework	86.82	1.44
ฟองอากาศ	Scrap	4.08	1.07
ทรายตก	Scrap	3.11	0.81
สิ่งแปลกปลอมปน	Scrap	2.50	0.65
บิ่น	Scrap	2.46	0.64
ยุบ	Scrap	2.33	0.61
ทรายฟุ้ง	Scrap	2.17	0.57
เหล็กเย็น	Scrap	2.10	0.55
อื่นๆ	Scrap	2.03	0.53

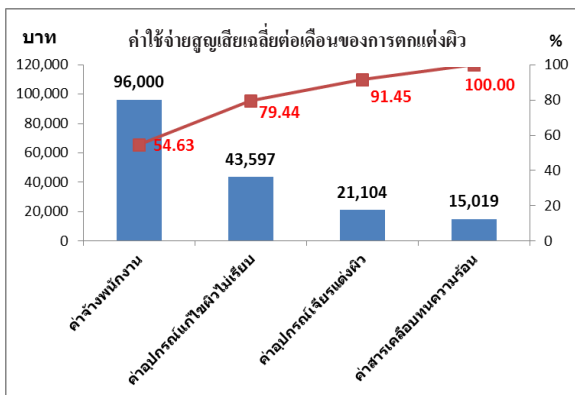
*Rework มีค่าใช้จ่ายสูญเสีย 50 บาทต่อชิ้น

*Scrap มีค่าใช้จ่ายสูญเสีย 800 บาทต่อชิ้น



รูปที่ 1 พารโตแสดงค่าใช้จ่ายสูญเสียของผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid)

เมื่อทำการศึกษาค่าใช้จ่ายสูญเสียประเภทข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบ พบว่า ค่าใช้จ่ายสูญเสียที่มากที่สุด คือ ค่าจ้างพนักงานตกแต่งผิวคิดเป็น 54.63% และค่าอุปกรณ์แก้ไขผิวไม่เรียบเป็นอันดับรองลงมาคิดเป็น 24.81% ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยค่าจ้างพนักงานตกแต่งผิวแบ่งเป็น ค่าจ้างพนักงานเจียรแต่งผิว 50% และ ค่าจ้างพนักงานแก้ไขผิวไม่เรียบ 50%



รูปที่ 2 พารโตแสดงค่าใช้จ่ายสูญเสียเฉลี่ยจากการตกแต่งผิว

ผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวชิ้นงานไม่เรียบให้เหลือ 50% ภายในเดือน เมษายน ปี 2559

ลักษณะของข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งมีลักษณะที่สามารถสังเกตได้คือ ผิวจะมีลักษณะคล้ายเม็ดทรายเกาะ ไม่เป็นระนาบ

เดียวกัน ทำให้ภายหลังนำไปใช้งานอาจทำให้เกิดเม็ดทรายหลุดและเกิดเสียงดังในตัวเครื่องยนต์ได้ ทั้งนี้การตรวจสอบในกระบวนการตกแต่งผิวสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และต้องตกแต่งผิวให้เรียบเป็นระนาบเดียว



รูปที่ 3 ของเสียประเภทข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน

3.2 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

เริ่มจากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบผิวไม่เรียบด้านในด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา (Measurement System Analysis) ซึ่งข้อมูลจากการตรวจสอบเป็นหน่วยนับด้วยวิธีแยกแยะตามข้อกำหนดเฉพาะ เป็นผ่าน (G) และไม่ผ่าน (NG) ซึ่งอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบที่กำหนดไว้ว่าผิวชิ้นงานต้องเรียบเสมอกับผิว ห้ามมีผิวขรุขระและรอยคม

การประเมินระบบการตรวจสอบชิ้นงาน มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดพนักงานผู้ทำการตรวจสอบเพื่อแยกแยะคุณภาพของชิ้นงาน 2 คน ซึ่งเป็นบุคคลที่กำหนดให้สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้
2. กำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนที่ทดลองซ้ำ โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ของ Fasser and Brettner [2] ซึ่งต้องตรวจสอบชิ้นงานอย่างน้อย 18 ชิ้น โดยแบ่งเป็น ชิ้นงานคุณภาพดี 6 ชิ้น ชิ้นงานคุณภาพดีแบบก้ำกึ่ง และไม่ดีแบบ

กำลังอย่างละ 3 ชั้น และและชั้นงานคุณภาพไม่ดี 6 ชั้น ซึ่งพนักงานแต่ละคนจะต้องทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง

3. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลตามลำดับอย่างสุ่ม เพื่อไม่ให้พนักงานจำค่าวัดเดิมของชิ้นงานตัวอย่างได้
4. วิเคราะห์ระบบการวัดของพนักงานเพื่อประเมินระบบการวัดจากค่าดัชนี เปอร์เซนต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซนต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เปอร์เซนต์ประสิทธิผลความสามารถในการวัดซ้ำ และ เปอร์เซนต์ประสิทธิผลความไม่ไบอัส
5. สรุปผลการวิเคราะห์ หากค่าไม่ผ่านเกณฑ์ต้องมีการสอนมาตรฐานใหม่เพื่อให้พนักงานเกิดความเข้าใจและตัดสินใจได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

เกณฑ์ยอมรับของระบบการวัด

ค่าดัชนีการยอมรับของระบบการวัด กำหนดเกณฑ์ไว้ที่ 100% [3] ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายของบริษัท ภูมิศึกษาที่ให้ความสำคัญด้านคุณภาพของสินค้าอย่างมากเพราะไม่ต้องการให้ชิ้นงานของเสียที่เกิดขึ้นถูกส่งไปถึงมือลูกค้าแม้แต่ชิ้นเดียว เพราะจะทำให้ส่งผลกระทบต่อชื่อเสียงของบริษัท

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด พบว่า ผลการประเมินดัชนีชี้วัดทั้ง 4 ค่า ไม่ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ดังนั้นจึงต้องทำการอบรม โดยให้เห็นชิ้นงานตัวอย่างจริงและสอนมาตรฐานใหม่ เพื่อให้พนักงานเกิดความเข้าใจและตัดสินใจได้ถูกต้องมากขึ้น จากนั้นทำการตรวจสอบหลังอบรมใหม่ทั้ง 2 คน พบว่า พนักงานสามารถตัดสินใจการคัดแยกได้ถูกต้องทุกชิ้น ดังนั้นความสามารถของระบบการวัดหรือการตรวจสอบข้อบกพร่องผิวชิ้นงานด้านในไม่เรียบ ในการทดสอบครั้งที่สองอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

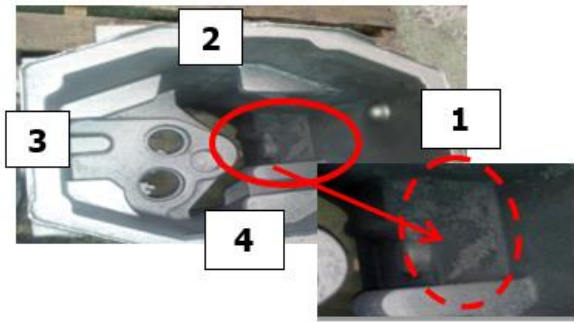
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ก่อนอบรม	% ความสามารถในการวัดซ้ำ	% ความไม่ไบอัส	% ประสิทธิภาพความสามารถในการวัดซ้ำ	% ประสิทธิภาพความไม่ไบอัส
พนักงานคนที่ 1	83.33	83.33	83.33	83.33
พนักงานคนที่ 2	88.89	88.89		
หลังอบรม	% ความสามารถในการวัดซ้ำ	% ความไม่ไบอัส	% ประสิทธิภาพความสามารถในการวัดซ้ำ	% ประสิทธิภาพความไม่ไบอัส
พนักงานคนที่ 1	100	100	100	100
พนักงานคนที่ 2	100	100		

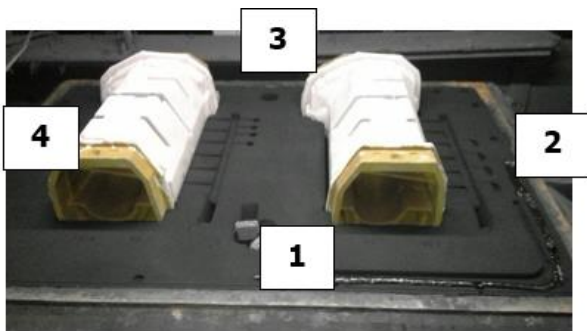
เมื่อความสามารถของระบบการวัดผ่านเกณฑ์แล้ว จึงทำการเก็บข้อมูลเพื่อหาสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบใหม่ โดยทำการทดลองเพิ่มเติมจำนวน 1 เตา (80 ชิ้นงาน) พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 67 ชิ้น คิดเป็น 83.75% เมื่อนำมาคำนวณขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้เพื่อประมาณค่าสัดส่วนของเสียแบบไม่ทราบขนาดประชากร พบว่าต้องใช้ขนาดตัวอย่างอย่างน้อย 53 ชิ้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าจำนวนชิ้นงานที่เก็บมาแล้ว 80 ชิ้น จึงสามารถนำสัดส่วนของเสียที่ประมาณจากขนาดตัวอย่างเท่ากับ 80 ชิ้นมาใช้ได้ หลังปรับปรุงความสามารถระบบการวัด พบว่า สัดส่วนของเสียเป็น 83.75% ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินเป้าหมายของงานวิจัยนี้ จึงต้องทำการหาสาเหตุของปัญหาและปรับปรุงต่อไป

3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเริ่มจากการหาตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในเพื่อระบุสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจทำให้เกิดปัญหา จากการผลิต 1 เตา (80 ชิ้นงาน) เมื่อทำการตรวจสอบผิวไม่เรียบด้านในทั้ง 4 ด้านพบว่า ตำแหน่งของกระสวน (Pattern) ฝาล่าง จะเกิดผิวไม่เรียบเพียงด้านเดียว (ด้านที่ 1 ในรูปที่ 4) เนื่องจากทรายใส่แบบมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้ความร้อนของน้ำเหล็กไม่สามารถระเหยขึ้นด้านบนได้ ทำให้ทรายใส่แบบได้รับความร้อนที่สูงเป็นเวลานาน เกิดการขยายตัวของเม็ดทรายใส่แบบทำให้น้ำเหล็กแทรกกระหว่างเม็ดทรายได้ จึงเกิดผิวไม่เรียบที่ชิ้นงานหล่อ แสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 4 บริเวณการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 5 ตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของไส้แบบ

จากผลการทดลอง พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 67 ชิ้น คิดเป็น 83.75% โดยบริเวณการเกิดข้อบกพร่องเกิดที่ด้านที่ 1 ทั้งหมดซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไส้แบบกดทับแบบทราย (ด้านที่ 1 ในรูปที่ 5) แต่ตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องนั้นไม่แน่นอน (ส่วนบน กลาง ล่าง) นอกจากนี้ข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในไม่ได้เกิดขึ้นทุกชิ้นงาน แสดงว่าสาเหตุอาจมาจากการเคลือบสารทนความร้อนที่ไส้แบบบางตำแหน่งไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนของน้ำเหล็ก ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษากระบวนการทำไส้แบบที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่พิจารณาคือ ความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ รวมถึงวิธีการเคลือบที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบ

การวิเคราะห์หาสาเหตุที่ชั้นสารเคลือบไม่สม่ำเสมอทำโดยใช้ฝังก้างปลา โดยการระดมสมองของทีมงานที่จัดตั้งขึ้น พบว่าอาจมีสาเหตุหลักมาจาก 1) ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อนน้อยเกินไป ส่งผลต่อชั้นความหนาของสารเคลือบที่ไม่เพียงพอที่จะทนอุณหภูมิของน้ำเหล็ก 2) วิธีการในการพ่นสเปรย์เคลือบสารทนความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจากวิธีการพ่นสเปรย์เคลือบสามารถควบคุมการทำงานได้ยากและชั้นความหนาสารเคลือบแต่ละตำแหน่งไม่สม่ำเสมอ ทำให้บางจุดอาจบางเกินไป และ 3) อุปกรณ์ในการพ่นเคลือบสารทนความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจากเป็นหัวฉีดแบบสเปรย์ทำให้เกิดการฟุ้งของสารเคลือบทนความร้อน อาจส่งผลให้พนักงานไม่สามารถตรวจสอบการเคลือบผิวไส้แบบได้อย่างทั่วถึง อาจทำให้บางตำแหน่งของไส้แบบไม่ได้ความหนาตามต้องการ

ทั้งนี้ปัจจัยในข้อ 2 และ 3 ส่งผลให้ความหนาของชั้นสารเคลือบไม่เหมาะสม หากความหนาของชั้นสารเคลือบน้อยเกินไป จะส่งผลให้เกิดผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีแนวทางในการปรับปรุงวิธีการเคลือบสารจากการพ่นสเปรย์เป็นการราดสารแทน จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบระหว่างวิธีการพ่นสเปรย์และวิธีการราดสาร โดยใช้กล้อง Dino-Lite โดยตั้งสมมติฐานว่าการราดสารเคลือบจะทำให้ชั้นสารเคลือบมีความสม่ำเสมอมากกว่าและมีความหนามากกว่าการพ่นสเปรย์เคลือบ ซึ่งจะทำให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานน้อยกว่า นอกจากนี้จะทำการทดสอบว่าจำนวนรอบในการหมุนเคลือบและความเข้มข้นของสารเคลือบมีผลต่อชั้นความหนาสารเคลือบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และหาจำนวนรอบและความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความหนาชั้นสารเคลือบที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมจากการแก้ไขข้อบกพร่องและค่าใช้จ่ายของสารเคลือบต่ำที่สุด

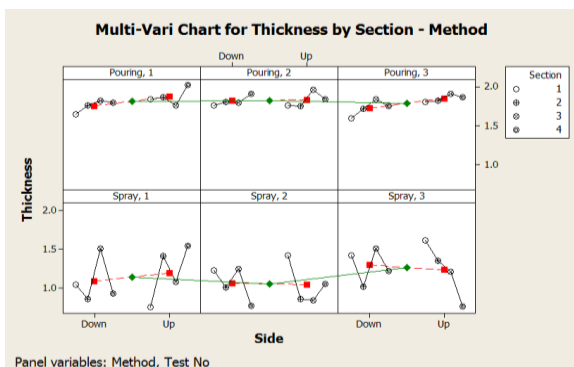
3.3.1 การวิเคราะห์ความหนาชั้นสารเคลือบเชิงเปรียบเทียบระหว่างวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

ขั้นตอนในการวัดความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบ จะทำการวัดส่วนบนและล่างของด้านทั้งสี่ของไส้แบบหลังเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร โดยสุ่มวัดวิธีการละ 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนี้



รูปที่ 6 รูปร่างของไส้แบบในแต่ละด้าน

ทำการบันทึกความหนาของชั้นสารเคลือบที่วัดได้ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และวิธีการราดสาร โดยการทำ Multi-Vari Chart [4] พบว่า ความหนาของชั้นสารเคลือบของกระบวนการเคลือบด้วยการราดสาร มีความสม่ำเสมอและให้ค่าเฉลี่ยของความหนามากกว่าการพ่นสเปรย์ โดยความหนาชั้นสารเคลือบของวิธีการราดสารอยู่ในช่วง 1.5 - 2.0 มม. โดยมีค่าเฉลี่ย 1.81 มม. และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.09 มม. ในขณะที่ความหนาชั้นสารเคลือบของวิธีการพ่นสเปรย์อยู่ในช่วง 0.7 - 1.7 มม. โดยมีค่าเฉลี่ย 1.15 มม. และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.27 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7



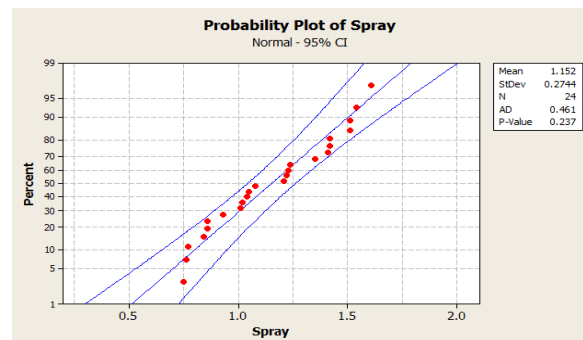
รูปที่ 7 Multi-Vari Chart ของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

จากนั้นจึงทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อพิสูจน์ว่ากระบวนการราดสารเคลือบมีผลต่อความหนาของชั้นสารเคลือบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

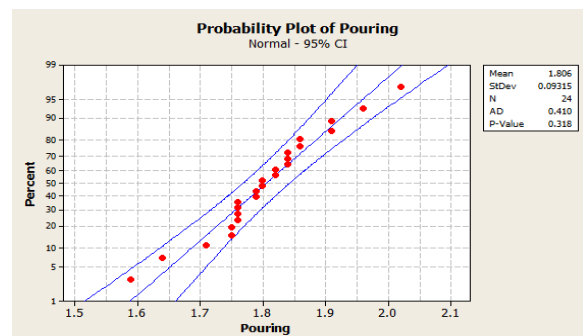
3.3.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติว่าวิธีการราดสารให้ค่าเฉลี่ยความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบมากกว่า และสัดส่วนของเสียน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

1) การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล

ค่าความหนาของชั้นสารเคลือบทนความร้อนด้วยวิธีทั้งสองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ เนื่องจากค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ดังนี้



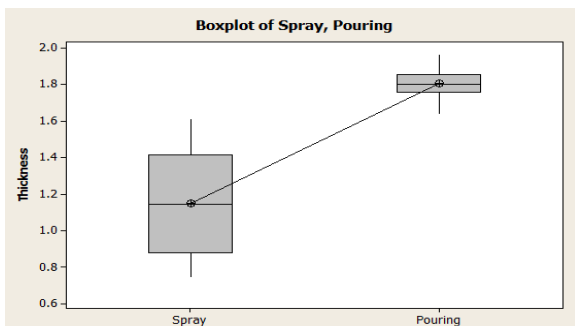
รูปที่ 8 Normal probability plot ของค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์



รูปที่ 9 Normal probability plot ของค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการราดสาร

2) การทดสอบสมมติฐานเรื่องความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟแสดงค่าความหนาชั้นสารเคลือบทั้งสองวิธีการโดยการพิจารณา Box plot พบว่าวิธีการราดสารมีค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบมากกว่าและความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบค่าน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

ผู้วิจัยจึงต้องการพิสูจน์สมมติฐานว่าวิธีการราดสารจะทำให้ความหนาของชั้นสารเคลือบมีความสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือมีสมมติฐานว่าความแปรปรวนของค่าความหนาจากวิธีการพ่นสเปรย์มีค่ามากกว่าความแปรปรวนของค่าความหนาจากวิธีการราดสารซึ่งสามารถเขียนสมมติฐานทางสถิติได้

ดังนี้
$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

โดย σ_1^2, σ_2^2 แทนค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสารตามลำดับ

ผลการทดสอบความแปรปรวน พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์มีค่ามากกว่าวิธีการราดสารที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 11

Test for Equal Variances: Spray, Pouring

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

	N	Lower	StDev	Upper
Spray	24	0.206047	0.274411	0.405576
Pouring	24	0.057224	0.076210	0.112637

F-Test (normal distribution)
Test statistic = 12.97, p-value = 0.000

Levene's Test (any continuous distribution)
Test statistic = 40.86, p-value = 0.000

รูปที่ 11 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

3) การทดสอบสมมติฐานเรื่องค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบ

เนื่องด้วยจากพิจารณาค่าความแปรปรวนของค่าความหนาชั้นสารเคลือบระหว่างกระบวนการพ่นสเปรย์และกระบวนการราดสาร พบว่าความแปรปรวนมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ยเป็นแบบความแปรปรวนต่างกัน โดยมีสมมติฐานว่าวิธีการราดสารจะทำให้ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นสารเคลือบมีค่ามากกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ ซึ่งแสดงสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2$$

โดย μ_1, μ_2 แทนค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสารตามลำดับ

ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์มีค่าน้อยกว่าวิธีการราดสารที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 12

Two-Sample T-Test and CI: Spray, Pouring

Two-sample T for Spray vs Pouring

	N	Mean	StDev	SE Mean
Spray	24	1.152	0.274	0.056
Pouring	24	1.8058	0.0762	0.016

Difference = mu (Spray) - mu (Pouring)
 Estimate for difference: -0.654167
 95% upper bound for difference: -0.555012
 T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -11.25 P-Value = 0.000 DF = 26

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	67	80	0.837500
2	56	80	0.700000

Difference = p (1) - p (2)
 Estimate for difference: 0.1375
 95% CI for difference: (0.00858603, 0.266414)
 Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 2.09 P-Value = 0.037

รูปที่ 12 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าความหนาชั้นเคลือบด้วยวิธีการเคลือบแบบพ่นสเปรย์และราดสาร

4) การทดสอบสมมติฐานเรื่องสัดส่วนของเสีย

ต่อไปพิจารณาค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของชิ้นงานด้วยวิธีการราดสารว่ามีค่าน้อยกว่าค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของชิ้นงานด้วยวิธีการพ่นสเปรย์หรือไม่ โดยสามารถเขียนสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดย p_1, p_2 แทนสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสารตามลำดับ

ผลการทดสอบค่าสัดส่วนของเสีย พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 หรือสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้วยวิธีการราดสารมีค่าน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยแสดงผลดังรูปที่ 13

เนื่องจากได้ข้อสรุปว่าวิธีการราดสารให้สัดส่วนของเสียที่น้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ซึ่งเป็นวิธีการเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกกระบวนการเคลือบสารทนความร้อนด้วยการราดสารมาใช้ โดยจะศึกษาต่อเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารเคลือบที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด

รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนของเสียจากวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนาที่พิจารณาได้แก่ ความเข้มข้นสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ โดยมีแนวคิดที่ว่า ความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบการหมุนเคลือบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาชั้นสารเคลือบมากขึ้นด้วยส่งผลให้ของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบน้อยลง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขข้อบกพร่องลดลงด้วย ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการหาค่าของสองปัจจัยนี้ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด

3.4 การปรับปรุงแก้ไข

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

ในขณะนี้ เริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองและทำการทดลองเพื่อหาว่าปัจจัยนำเข้าใดบ้างที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในอย่างมีนัยสำคัญ และมีผลในทิศทางใด จากนั้น ทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น โค้งและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัจจัยที่จะส่งผลให้สัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานต่ำที่สุด โดยการออกแบบการทดลองแบบพ่นผิวคอบสองแบบส่วนประสมกลาง [5] ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 14 การทดลอง ทั้งนี้ได้ใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ Face Centered ซึ่งมีกำหนดให้ค่า α เป็น ± 1 เนื่องจากข้อจำกัดของปัจจัยจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ไม่สามารถปรับให้ละเอียดเป็นทศนิยมได้ และข้อจำกัดของปัจจัยความเข้มข้นสาร ไม่สามารถปรับค่าให้ละเอียดไปกว่านี้ได้ เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้คนในการปรุงแต่งสารเพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ ช่วงค่าความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบอยู่ในขอบต่ำสุดและ

สูงสุดของมาตรฐานในกระบวนการผลิตแล้ว [6] หากปัจจัยทั้งสองมีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้สารเคลือบมีความหนืดสูงเกิดเป็นก้อนไม่สามารถเคลือบได้ แต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ชั้นสารเคลือบที่บางเกินไปจนเกิดของเสียจำนวนมาก ทั้งนี้แต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 3 ระดับ โดยค่าที่แต่ละระดับของปัจจัย แสดงไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้า (X)		ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
A	ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อน (Baume)	28 (27-29)	31 (30-32)	34 (33-35)
	จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ (รอบ)	1	2	3

ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือร้อยละของชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน โดยในการทดลอง 1 ครั้ง ทดสอบชิ้นงานจำนวน 20 ชิ้น และจะศึกษาตัวแปรตอบสนองเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมด้วย เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของเสียต่ำสุด อาจจะไม่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำสุด เพราะค่าใช้จ่ายโดยรวม ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายจากการแก้ไขตกแต่งชิ้นงาน ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของเสียต่ำลง และค่าใช้จ่ายของสารเคลือบ ซึ่งอาจจะมีค่ามากขึ้นเมื่อสัดส่วนของเสียต่ำลงเช่นเดียวกัน

3.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแล้วได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนข้อบกพร่องผิวไม่เรียบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P-Value < 0.05) ได้แก่ ผลหลัก (Main effects) ของทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารเคลือบ และ จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ โดยอันตรกิริยา (A*B interaction) ไม่มีนัยสำคัญ และ

อิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ก็ไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 4 ตารางออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

A	B	สัดส่วนของเสีย
-1	-1	90
0	1	55
0	-1	85
1	1	45
-1	1	70
0	0	70
0	0	70
-1	0	80
0	0	80
1	-1	70
0	0	70
1	0	60
0	0	75

Response Surface Regression: %Reject inside versus A, B

Analysis of Variance

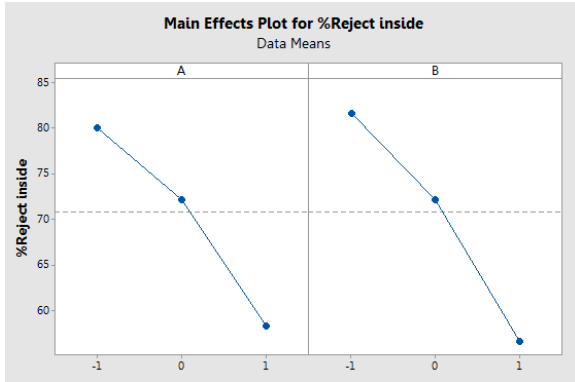
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1689.36	337.872	22.97	0.000
Linear	2	1641.67	820.833	55.81	0.000
A	1	704.17	704.167	47.88	0.000
B	1	937.50	937.500	63.75	0.000
Square	2	41.45	20.723	1.41	0.306
A*A	1	12.83	12.828	0.87	0.381
B*B	1	12.83	12.828	0.87	0.381
2-Way Interaction	1	6.25	6.250	0.42	0.535
A*B	1	6.25	6.250	0.42	0.535
Error	7	102.95	14.706		
Lack-of-Fit	3	22.95	7.648	0.38	0.772
Pure Error	4	80.00	20.000		
Total	12	1792.31			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.83490	94.26%	90.15%	80.84%

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน

จากการวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง พบว่า เมื่อความเข้มข้นสารเคลือบมีค่าสูงขึ้น และ จำนวนรอบในการหมุนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในกราฟผลหลักดังรูปที่ 15 ดังนี้



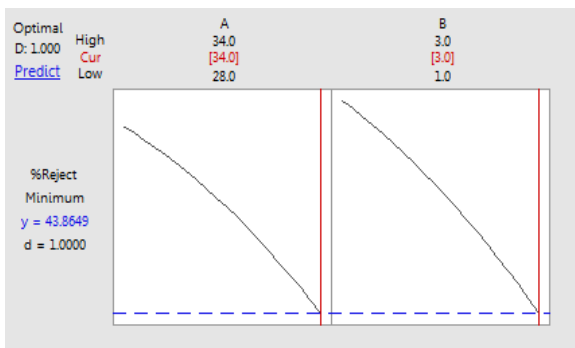
รูปที่ 15 ผลหลักของปัจจัยที่มีต่อสัดส่วนของเสีย ข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน

จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญและค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน โดยใช้เทคนิค Backward Stepwise Regression ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\%Reject\ inside = 70.77 - 10.83 A - 12.50 B$$

จากสมการ Stepwise Regression พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 90.15% ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ (>80%) จึงสรุปได้ว่า สมการถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำมาพยากรณ์สัดส่วนของเสียได้

เมื่อได้ปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญแล้ว จึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมให้กับแต่ละปัจจัย โดยการให้หลักการ Optimization โดยใช้โปรแกรม Minitab ได้ผลการหาค่าที่เหมาะสมดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลการทำ Response optimizer เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมเพื่อให้สัดส่วนของเสียต่ำที่สุด

จากการทำ Response optimizer ได้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้

- ความเข้มข้นสารเคลือบ 34 Baume
- จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 3 รอบ

ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ค่าสัดส่วนของเสียจากการประมาณโดยโปรแกรม Response Optimizer ที่ 43.86% และ พบว่ามีความสัมพันธ์กับปัญหาผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารเคลือบ ควรอยู่ในระดับสูง เนื่องจาก ยิ่งความเข้มข้นของสารมาก ยิ่งสามารถต่อต้านอุณหภูมิที่สูงของน้ำเหล็กได้ดี ทำให้น้ำเหล็กสัมผัสกับเม็ดทรายได้น้อย เกิดการขยายตัวของเม็ดทรายได้ยาก น้ำเหล็กจึงไม่สามารถแทรกระหว่างเม็ดทรายได้ จึงทำให้สัดส่วนของเสีย น้อย
- 2) จำนวนรอบในการ หมุนเคลือบ ควรอยู่ในระดับสูง เนื่องจาก จำนวนรอบในการเคลือบแปรผันตรงกับชั้นความหนาของสารเคลือบ ความหนาชั้นสารเคลือบยิ่งมาก โอกาสน้ำเหล็กสัมผัสกับเม็ดทรายจะน้อยลง เม็ดทรายขยายตัวได้ยาก ทำให้น้ำเหล็กไม่สามารถแทรกกระหว่างเม็ดทรายได้ จึงทำให้สัดส่วนของเสีย น้อยลง

การปรับตั้งค่าของระดับปัจจัยความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ค่าสูงจะทำให้เกิดสัดส่วนของเสีย น้อย ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไข ตกแต่งชิ้นงานน้อยตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของสารเคลือบสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้สารในปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นอาจเกิดค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ไม่ต่ำที่สุดได้ ดังนั้นในการหาค่าที่เหมาะสมของสองปัจจัยดังกล่าวนี้ จึงไม่สามารถนำเพียงสัดส่วนของเสียมาเป็นผลตอบสนองได้ ผู้วิจัยจึงเลือกค่าใช้จ่ายโดยรวม ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างค่าใช้จ่ายจากการแก้ไขข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน และค่าใช้จ่ายจากการใช้สารเคลือบทนความร้อนมาเป็นตัวแปรตอบสนองแทน โดยรายละเอียดของค่าใช้จ่ายมีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน 16 บาทต่อชิ้นงาน คิดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขผิวไม่เรียบ 1 ทริตเมนต์ได้คือ $(20 \text{ ชิ้นงาน}) \times (16 \text{ บาทต่อชิ้น}) \times (\text{สัดส่วนของเสีย})$ โดยก่อนการปรับปรุง มีค่าสัดส่วนของเสีย 83.75% คิดเป็นเงิน 268 บาทต่อทริตเมนต์
- 2) ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบทนความร้อนจะเพิ่มขึ้น หากมีการใช้ความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้นหรือจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งรายละเอียดค่าใช้จ่ายค่าสารเคลือบมีรายละเอียดดังนี้

ในสายการผลิตปัจจุบัน มีการจัดซื้อสารเคลือบทนความร้อนกิโลกรัมละ 20 บาท และการใช้สารเคลือบ 25 กิโลกรัม สามารถใช้ในการเคลือบสารได้ 60 ชิ้นงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร 1 ระดับ โดยจำนวนรอบเท่าเดิม ส่งผลให้ต้องใช้สารเคลือบจำนวนมากขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าคิดที่ขนาดตัวอย่างในการทดลอง 1 ทริตเมนต์ (20 ชิ้นงาน) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ขณะที่จำนวนรอบในการหมุนเคลือบเท่ากัน สามารถแสดงในตารางที่ 5

จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนระดับของจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 1 ระดับโดยความเข้มข้นของสารเคลือบเท่าเดิม ส่งผลให้มีการใช้ปริมาณชิ้นงานที่เคลือบได้เพิ่มขึ้นหรือลดลง 2 ชิ้นงาน ซึ่งค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบจะเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นถ้าคิดที่ความเข้มข้นสารเคลือบระดับ 0 (31 Baume) สามารถคิดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบใน 1 ทริตเมนต์ คือ $(20 \text{ ชิ้นงาน}) \times [(25 \text{ กิโลกรัม} \times 20 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}) / (\text{จำนวนชิ้นงานที่เคลือบได้})]$ โดยสรุปค่าใช้จ่าย การใช้จำนวนรอบในการหมุนเคลือบเมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ขณะที่ความเข้มข้นสารเคลือบเท่ากัน ได้ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ความเข้มข้นระดับต่างๆ ที่มีจำนวนรอบการหมุนระดับ 0 (2 รอบ)

จำนวนชิ้นงานเคลือบ (ชิ้น)	ความเข้มข้นสารเคลือบ			หน่วย
	-1 (28 Baume)	0 (31 Baume)	1 (34 Baume)	
ปริมาณการใช้สารเคลือบสำหรับ 60 ชิ้นงาน	22	25	29	กิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบ	440	500	580	บาท
ปริมาณการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน	7.33	8.33	9.67	กิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน (1 ทริตเมนต์)	146.67	166.67	193.33	บาท

ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่จำนวนรอบการหมุนระดับต่างๆ ที่มีความเข้มข้นระดับ 0 (31 Baume)

ความเข้มข้นสารเคลือบ 31 Baume (ค่าใช้จ่ายสารเคลือบ 500 บาท)	จำนวนรอบหมุนเคลือบ			หน่วย
	-1 (1 รอบ)	0 (2 รอบ)	1 (3 รอบ)	
จำนวนชิ้นงานเคลือบได้	62	60	58	ชิ้น
ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบต่อชิ้น	8.06	8.33	8.62	บาท
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน (1 ทริตเมนต์)	161.20	166.60	172.40	บาท

จากตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 จึงนำมาสรุปเป็นค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบได้ (ค่าใช้จ่ายที่ระดับความเข้มข้นสารเคลือบต่างๆ + ค่าใช้จ่ายที่ระดับจำนวนรอบเคลือบต่างๆ) ดังแสดงในตารางที่ 7

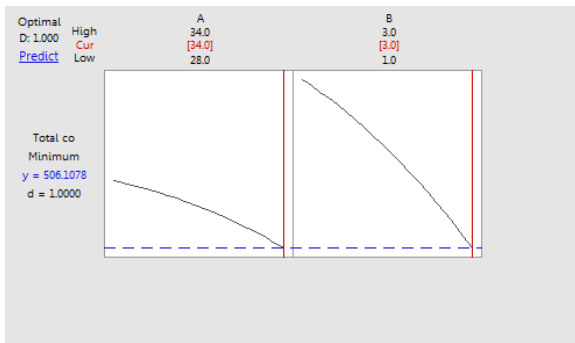
ตารางที่ 7 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ระดับความเข้มข้น i จำนวนรอบหมุนเคลือบ j ใน 1 ทริตเมนต์

ค่าใช้จ่าย การใช้สารเคลือบ 1 ทริตเมนต์ (Z)	ความเข้มข้นสารเคลือบ (i)		
	-1	0	1
จำนวนรอบหมุนเคลือบ (j)	-1	0	1
	307.79	327.87	354.53
	313.34	333.34	360.00
	319.08	339.08	365.74

เมื่อได้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบแล้ว ทางผู้วิจัยสามารถสรุปค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ดังสมการที่ 1

$$(\text{Total cost}) = \text{cost rework} + Z_{ij} \quad (1)$$

จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม้เรียบก่อนการปรับปรุงซึ่งเป็นวิธีการพ่นสเปรย์เคลือบ ต่อ 1 ทริตเมนต์ ซึ่งใช้ระดับความเข้มข้นสารเคลือบที่ 0 (31 Baume) และ มีปริมาณชิ้นงานที่เคลือบได้เท่ากับจำนวนรอบหมุนเคลือบที่ -1 (62 ชิ้นงาน) เพราะฉะนั้นค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวก่อนปรับปรุงมีค่าเท่ากับ $268 + 327.87 = 595.87$ บาทต่อทริตเมนต์ จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าปรับตั้งที่ดีที่สุดให้กับแต่ละปัจจัย โดยผลตอบสนองเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด ได้ผลการทำ Response Optimizer ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ผลการทำ Response optimizer เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำที่สุด

จากการทำ Response optimizer ได้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้

- ความเข้มข้นสารเคลือบ 34 Baume
- จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 3 รอบ

จากการวิเคราะห์หาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการตกแต่งผิวจากการประมาณ โดยโปรแกรม Response Optimizer ที่ 506.10 บาท และพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ทำให้สัดส่วนของเสียต่ำที่สุดและค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุดเป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการแก้ไขของเสียมีสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายของสารเคลือบ

3.4.3 สรุปกระบวนการปรับปรุง

การปรับตั้งค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในวิธีการราดสารเคลือบด้วยวิธีการ optimization พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อนที่ 34 Baume และ จำนวนรอบการหมุนเคลือบที่ 3 รอบ ประมาณการว่า สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม้เรียบจะลดลงจาก 83.75% เหลือ 43.86% ลดลง 39.89% ซึ่งแม้ว่าจะลดสัดส่วนของเสียลงได้มาก แต่สัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงก็ยังสูงอยู่ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียและค่าใช้จ่ายในอนาคต

3.5 การติดตามควบคุม

3.5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังปรับปรุงโดยเลือกค่าปรับตั้งที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารเคลือบที่ 34 Baume และ จำนวนรอบการหมุนเคลือบ 3 รอบ จำนวน 1 เตา (80 ชิ้นงาน) พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 36 ชิ้น คิดเป็น 46.25% เมื่อนำมาคำนวณขนาดตัวอย่างจากกรณีต้องการประมาณค่าสัดส่วนแบบไม่ทราบขนาดประชากร พบว่า ต้องใช้ขนาดตัวอย่าง อย่างน้อย 96 ชิ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าจำนวนข้อมูลที่เก็บมาแล้ว ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มอีก 1 ทริตเมนต์ (20 ชิ้นงาน) เพื่อให้เพียงพอต่อขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ เมื่อทำการเก็บข้อมูลเพิ่มอีก 20 ชิ้นงาน พบว่ามีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 9 ชิ้น ซึ่งรวมเป็นปริมาณของเสียทั้งหมด 46 จาก 100 ชิ้นงาน คิดเป็น 46% ซึ่งผลสัดส่วนของเสียจะใกล้เคียงกับ Response Optimizer (43.67%) หลังจากผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลหลังปรับปรุงแล้ว พบว่าสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม้เรียบลดลงจาก 83.75% เป็น 46% โดยค่าใช้จ่ายหลังปรับปรุงจากการคำนวณจากสมการที่ (1) เท่ากับ $147.2 + 365.74 = 512.94$ บาทต่อทริตเมนต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม้เรียบก่อนการปรับปรุงต่อ 1 ทริตเมนต์ มีค่าเท่ากับ 595.87 บาทต่อทริตเมนต์ ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 82.93 บาทต่อทริตเมนต์ ทั้งนี้ในแต่ละเดือนจะทำ

การผลิตชิ้นงาน Case Mid เฉลี่ย 2,800 ชิ้นต่อเดือน ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายตกแต่งผิวลงได้ 139,922 บาทต่อปี

จึงทำการทดสอบ แบบ two proportion เพื่อทดสอบว่าค่าสัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงหรือไม่ โดยสามารถเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดย p_1 คือ สัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง

p_2 คือ สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุง

ผลการทดสอบค่าสัดส่วนของเสีย พบว่า P-Value < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือ สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 18

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	67	80	0.837500
2	46	100	0.460000

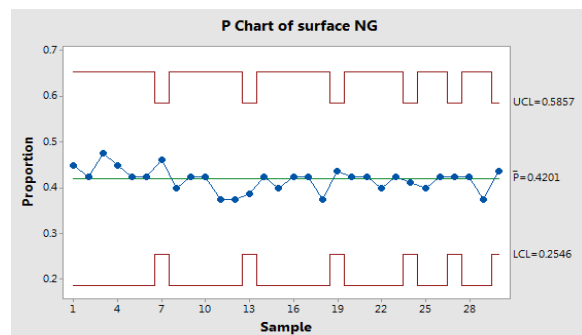
Difference = p (1) - p (2)
 Estimate for difference: 0.3775
 95% CI for difference: (0.250704, 0.504296)
 Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 5.84 P-Value = 0.000

รูปที่ 18 ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุง

3.5.2 การควบคุมกระบวนการหลังปรับปรุง

ได้จัดทำแผนการควบคุม p chart ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ใช้ตรวจติดตาม และควบคุมกระบวนการที่มีการวัดหน่วยนับ เพื่อใช้ในการควบคุมสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น หากมีความผิดปกติจะได้กลับไปตรวจสอบกระบวนการผลิตได้อย่างทันที่ [7] และจัดทำ Check Sheet เพื่อทำการตรวจสอบปัจจัยความเข้มข้นของสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอในการทำงานทุก ๆ กะ โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

1) ลักษณะของ p chart ต้องมีขนาดตัวอย่าง (n) ที่มากพอเพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานการกระจาย โดยทั่วไปต้องมี $n \geq 30$ โดย $np \geq 5$ และ $n(1-p) \geq 5$ ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่า $n = 40$ และ $p = 0.42$ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลสามารถประมาณค่าการแจกแจงทวินามด้วยการแจกแจงแบบปกติได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตชิ้นงานซึ่งมีการตรวจสอบข้อบกพร่องบนชิ้นงาน โดยทำการผลิตเป็น Lot ละละ 40-80 ชิ้น โดยทำการตรวจสอบด้วยสายตา หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องก็จะถือเป็นของเสีย เนื่องจากขนาดของ Lot size ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงนำข้อมูลมาจัดทำ p chart ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ลักษณะของ p chart ชิ้นงานผิวไม่เรียบ

โดย p chart สามารถใช้ในการควบคุมและตรวจติดตามกระบวนการได้ในกรณีที่เกิดของเสียมากกว่าปกติ และยังสามารถหยุดกระบวนการและตรวจสอบกระบวนการได้ทันที่

2) ลักษณะของ Check sheet ในรูปที่ 20 แสดงถึงการตรวจสอบควบคุมความเข้มข้นสารเคลือบ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบสองด้าน (two sided) ซึ่งการควบคุมต้องอยู่ภายในค่า 34 ± 1 Baume ดังนี้

Check sheet ความเข้มข้นสารเคลือบ Rhyotex		Month.....Y.....																													
Line.....																															
ความเข้มข้นสารเคลือบ (Baume)	36																														
	35																														
	34																														
	33																														
	32																														
Date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

รูปที่ 20 ลักษณะของ Check sheet ตรวจสอบความเข้มข้นสารเคลือบ

เกณฑ์การตัดสินใจ

- ถ้าการตรวจสอบอยู่ในแถบเขียว (อยู่ในช่วง 34 +/- 1 Baume) สามารถใช้ได้
- ถ้าการตรวจสอบอยู่นอกแถบเขียวต้องทำการผสมน้ำเพิ่มเพื่อให้อยู่ในแถบเขียวก่อนจึงสามารถใช้ได้

- ถ้าการตรวจสอบอยู่ในแถบเขียวต้องทำการผสมสารเพิ่มเพื่อให้อยู่ในแถบเขียวก่อนจึงสามารถใช้ได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการดำเนินการวิจัยใช้แนวคิดของซิกซ์ ซิกมา ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน เริ่มจาก ระเบียบวิธีมาตรฐาน การวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ระยะเวลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ระยะเวลาปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และระยะเวลาติดตามควบคุม มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลดสัดส่วนของเสียลง ได้ผลการแก้ไข ปัญหาผิวไม่เรียบมีปริมาณข้อบกพร่องก่อนการปรับปรุง 86.82% และหลังการปรับปรุง 46% ลดลง 40.82% เมื่อเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ 139,922 บาทต่อปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Evans, J.R., and Lindsay, W.M. An introduction to six sigma & process improvement. Mason, Ohio: Thomsan/South-Western, 2005.
- [2] Fasser, Y., and Brettner, D. Quality and Reliability Engineering International. NY : John Wiley & Sons, 1992.
- [3] AIAG, A. Measurement system analysis (MSA). Third Edition.: The Automotive Industries Action Group, 2002.
- [4] Breyfogle, Forrest W. Implementing Six Sigma Smarter Solutions Using Statistical Methods. : John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. Eighth Edition, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., and Escalera, L.A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 2008 ; 76(5): 965-977.
- [7] Montgomery, D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Third Edition, John Wiley & Sons, 1996.