Engng.J.CMU.(2018) 25 (2), 44-54

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การลดของเสียประเภทขนาดเกินค่ามาตรฐาน ในกระบวนการผลิตสารเคลือบเซรามิกชนิดฟริต
Oversize Defect Reduction in Fritted Glazes Process

พิชญา พลฤทธิ์* และ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์
Pichaya Ponrit* and Jeerapat Ngaoprasertwong
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand
*E-mail: picchapan@gmail.com, Telephone Number +669 449 72065

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการผลิตสารเคลือบเซรามิกชนิดฟริต (Fritted Glazes) ด้วยการใช้น้ำหล่อเย็น (water cooling) วัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน โดยนำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ประกอบด้วยการดำเนินการ 5 ขั้นตอน เริ่มจากระยะการนิยามปัญหา ได้ศึกษาข้อมูลการผลิตและกำหนดเป้าหมาย คือ ลดสัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานสำหรับฟริตสูตรที่มีของเสียมากที่สุดให้ได้ 50% โดยการใช้เครื่องลำเลียงฟริตเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดขอบเขตการวิจัย ในระยะการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ได้วิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบการวัด และระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่ทำให้ฟริตมีขนาดเกินค่ามาตรฐานด้วยเครื่องมือ 3 ชนิด ได้แก่ แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) เมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และประเมินปัจจัยที่มีความเสี่ยงสูงด้วยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis: FMEA) ในระยะวิเคราะห์ปัญหาได้นำปัจจัยนำเข้าที่สำคัญมาออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k ต่อมาในระยะการปรับปรุงได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีเพิ่มระดับของปัจจัย จากการทดลองพบว่า การปล่อยน้ำจากท่อ ท่อบน ท่อข้าง และท่อเล็ก (รูปแบบ Y4) ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา 4 เซนติเมตร และความถี่อินเวอร์เตอร์ 37 เฮิรตซ์ ทำให้สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานมีค่าน้อยที่สุด ในระยะสุดท้ายได้วางแผนควบคุมการผลิตและทดลองผลิตโดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์จากการทดลองเป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการทดสอบแสดงว่า สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานลดลงจาก 7.96% เหลือเพียง 2.78% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงได้ 65.08%

คำสำคัญ: สารเคลือบฟริต, สารเคลือบเซรามิก, ซิกซ์ ซิกมา, การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

The fritted glaze process with water cooling method has been studied. The main objective was to reduce the oversize defect at 50% via frit conveyer machine. This research applies the Six Sigma process in order to better develop the process of producing fritted glazes. The research started from studying the problem, identifying the goal, outlining the parameters of improvement, and analyzing the assessment tool. A brainstorming session was initially needed to identify what potential factors cause the frit to be larger than the standard size. Three tools were used to help find these factors

Received 24 June 2016
Accepted 27 July 2016

including the Cause and Effect Diagram, Cause and Effect Matrix and Failure Mode Effective Analysis (FMEA). Following that, the hypothesized factors were used to design the experiment in order to find the real root cause of the problem, through the 2^k factorial design method. The significant factors were tested the parameter level and were afterward confirmed the results. The research showed that the optimum conditions were letting water into machine from top pipes, side pipes, and small pipes (Y4), width of brick furrow 4 centimeter and frequency of inverter at 37 Hz. The production of oversize frit reduced from 7.69% to 2.78% at 95% confident level which is translated into a reduction at 65.08%.
Keywords: Fritted Glazes, Ceramic Glazes, Six Sigma, Design of Experiments

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญสำหรับประเทศไทย เนื่องจากสามารถนำดินซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ในประเทศ มาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ถ้วยชาม กระเบื้อง เครื่องใช้ในบ้านเรือน วัสดุตกแต่งสวน เป็นต้น สิ่งที่สำคัญควบคู่กับการผลิตเซรามิก คือ สารเคลือบ (Glaze) ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิก มีคุณสมบัติคล้ายแก้ว วัตถุประสงค์ของการเคลือบชิ้นงานเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ป้องกันของเหลวและก๊าซซึมผ่าน เพิ่มความแข็งแรง ง่ายต่อการทำความสะอาด ทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น นอกจากนี้ความสวยงามก็เป็นเหตุผลสำคัญในการเคลือบผิวชิ้นงาน สารเคลือบมีหลายชนิดขึ้นกับเกณฑ์การจัดแบ่งกลุ่ม หากแบ่งตามวิธีการผลิต สามารถแบ่งสารเคลือบได้เป็น 2 ชนิด คือ สารเคลือบดิบ (Raw glazes) และสารเคลือบฟริต (Fritted glazes) [1] การเตรียมสารเคลือบดิบจะพบปัญหาเมื่อต้องใช้วัตถุดิบที่ละลายน้ำยาก หรือการใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนในชิ้นงาน [2] จึงมีการแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนสภาพของวัตถุดิบทำสารเคลือบ โดยการนำไปหลอมรวมในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 [3] เมื่อวัตถุดิบทั้งหมดหลอมละลายเข้าด้วยกันจะอยู่ในสภาพแก้วหลอมเหลว (Melted glazes) จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวทันทีด้วยน้ำหล่อเย็น (water-cooling) หรืออากาศเย็น (air-cooling) เกิดเป็นแก้วชิ้นเล็ก ๆ เรียกว่า สารเคลือบฟริต หรือฟริต ซึ่งจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคลือบโดยตรง หรือนำไปบดผสมกับสารเคลือบอื่น ๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตฟริตด้วยเตาเผาที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และใช้น้ำหล่อเย็นทำให้น้ำแก้วหลอมเหลวเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Thermal shock) กระบวนการผลิตในปัจจุบันพบปัญหาฟริตมีขนาดเกินค่ามาตรฐานข้อกำหนดของลูกค้า คือ ฟริตไม่ผ่านตะแกรงขนาด 3 เมช หรือมีขนาดเกิน 6.7 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน ASTM E-11) ทำให้บริษัทต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการนำฟริตเข้าสู่กระบวนการหลอมใหม่ (rework) จากการศึกษากระบวนการผลิตพบว่า น้ำจากการผลิตเมื่อหมุนเวียนผ่านเครื่องทำความเย็น (Cooling tower) ยังมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 38 องศาเซลเซียส เป็นเหตุให้น้ำแก้วหลอมเหลวเย็นตัวได้ช้า แต่การเปลี่ยนเครื่องทำความเย็นมีต้นทุนที่สูงเกินไป จึงมีความจำเป็นต้องปรับค่าปัจจัยการผลิตอื่น ๆ เพื่อให้ได้ฟริตที่มีขนาดตรงตามความต้องการ นอกจากนี้ การผลิตฟริตในปัจจุบัน ยังเกิดปัญหาฟริตละเอียดตกค้างในบ่อรับน้ำ ซึ่งเป็นฟริตที่มีขนาดได้มาตรฐานแต่ไม่สามารถจำหน่ายได้ เนื่องจากมีการปนเปื้อน งานวิจัยนี้จึงปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการใช้เครื่องลำเลียงฟริตแทนกรรมวิธีผลิตแบบดั้งเดิม โดยนำแนวทาง ซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการวิจัย ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อลดความแปรปรวนที่เกิดจากกระบวนการผลิต นอกจากจะปรับปรุงคุณภาพแล้วยังเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิต [4] ซิกมา (σ) คือ สัญลักษณ์ทางสถิติที่แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งบ่งชี้

ถึงการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย การผลิตในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะมีความผันแปรโดยธรรมชาติ 1.5 SD ค่าซิกมา 6 ซิกมา จะทำให้มีช่วงแห่งการยอมรับหรือเทียบได้กับผลผลิตดี 99.99966% และมีของเสียเพียง 3.4 ส่วนในล้านส่วน [5] ดังนั้น ซิกซ์ ซิกมา จึงเป็นเป้าหมายสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพ ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 5 ขั้นตอน นิยมเรียกว่า DMAIC ได้แก่ การนิยามปัญหา (Define phase) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure phase) การวิเคราะห์ปัญหา (Analyze phase) การปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase) และการควบคุมกระบวนการ (Control phase) [6]

2. การทบทวนวรรณกรรม

ยศวิน ศรีศักดิ์สรชาติ (2557) [7] ได้ศึกษาบริษัทผลิตเม็ดพลาสติก โดยนำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา มาใช้ในการดำเนินการวิจัย เริ่มต้นจากการนิยามปัญหา (Define) จากการเก็บข้อมูลย้อนหลังเป็นเวลา 1 ปี พบว่าผลิตภัณฑ์รุ่น AU2020Y มีของเสียมากที่สุด จึงนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาเก็บข้อมูลพบว่าเกิดจากข้อบกพร่องประเภทจุดสีมากที่สุด จึงเลือกแก้ปัญหาผลิตภัณฑ์และข้อบกพร่องดังกล่าวมาวิเคราะห์ระบบการวัดของการตรวจสอบข้อบกพร่องประเภทจุดสีในขั้นตอนการวัด (Measure phase) และวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาโดยวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาจากการระดมสมอง ได้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ จำนวน 35 ปัจจัย นำมาวิเคราะห์ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่สำคัญ จึงเหลือปัจจัย 14 ปัจจัย นำมาวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis: FMEA) ได้ปัจจัย 4 ปัจจัย นำมาออกแบบการทดลองในเฟสการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze phase) โดยการทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k แบบ ซ้ำ 2 ครั้ง พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญมี 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความเร็วในการนวดเม็ดพลาสติก อุณหภูมิที่ใช้ในการนวด และผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนวัตถุดิบกับความเร็วในการนวดและความเร็วในการนวดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการนวด จึงทำการทดลองในขั้นตอนการปรับปรุง (Improve phase) โดยนำ 3 ปัจจัยมาทดลองโดยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) กำหนดปัจจัยละ 3 ระดับ นำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด และนำค่าการปรับตั้งค่าที่คำนวณได้มาใช้ผลิตในขั้นตอนการควบคุมกระบวนการ (Control phase) เป็นเวลา 1 เดือน และควบคุมกระบวนการด้วยการใช้แผนภูมิ I-MR ผลการผลิตแสดงว่ากระบวนการผลิตอยู่ภายใต้การควบคุมของค่าตัวแปรตอบสนอง และการดำเนินการวิจัยสามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทจุดสีของกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก คิดเป็นร้อยละที่ลดลงเท่ากับ 88.68 และลดมูลค่าความสูญเสียได้ 1,639,547 บาท/ปี

ปาริชาติ บุญเกลี้ยง (2552) [8] ได้ศึกษากระบวนการตัดเทปโฟมอะคริลิคที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อแก้ปัญหาขนาดหน้ากว้างไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับ โดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา และดำเนินการตาม DMAIC เป้าหมายของงานวิจัยคือปรับปรุงความสามารถของกระบวนการโดยไม่กระทบต่อความสามารถอื่นๆ ที่สัมพันธ์กัน วิเคราะห์ระบบการวัดโดยใช้ Gage Repeatability and Reproducibility Analysis (GR&R) จัดทำแผนผังกระบวนการ (Process Mapping) เพื่อให้ทราบปัจจัยนำเข้า และระดมสมองโดยใช้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ ออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางสำหรับปัจจัยที่เป็นปัจจัยแปรผัน (2^{4-1} with center points) ทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง เนื่องจากมีจำนวนตัวอย่างน้อย จากนั้นนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาหาระดับที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดมาทดลองยืนยันผล พบว่า

ของเสียลดลงจาก 4.0% เป็น 0.01% คิดเป็นมูลค่าที่ลดลงได้ 4,847,490 บาท/ปี

ธีรยุทธิ์ ยกซิ้ว (2552) [9] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของกระเบื้องบิสกิต โดยการนิยามปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบจาก FMEA และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-p} Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Fractional Factorial Design) จากการทดลองสามารถปรับปรุงค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ผลิตกระเบื้องด้าน 8 นิ้ว และด้าน 10 นิ้ว จากเดิม 0.69 และ 0.83 เป็น 0.81 และ 1.02 ตามลำดับ คิดเป็นผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่ไม่ได้มาตรฐานลดลงจาก 19,117 DPPM (Defect Part Per Million) และ 10,625 DPPM เป็น 8,196 DPPM และ 1,378 DPPM ตามลำดับ

วราภรณ์ ขำสนิท (2551) [10] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา ในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีของเสียจากข้อบกพร่องชนิดครีบ (Flash) และฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short Mold) จากการคัดเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญ พบว่ามี 5 ปัจจัย จึงออกแบบการทดลองด้วยวิธี 25 Full Factorial Design เมื่อทดลองพบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญมี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความดันฉีด (Injection Pressure) ความเร็วฉีด (Injection Velocity) และระยะย้ำ (Holding Position) นำมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการออกแบบการทดลองวิธีส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design with Center; CCD) ผลการปรับปรุงพบว่า ของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องชนิดครีบ (Flash) ลดลงจาก 565,399 PPM เหลือเพียง 27,173 PPM แต่ของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องชนิดฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short Mold) เพิ่มขึ้นจาก 11,720 PPM เป็น 12,186 PPM แต่ต้นทุนของเสียรวมสามารถลดลงได้ถึง 90.83% โดยการแก้ไขข้อบกพร่องชนิดครีบ (Flash) เท่านั้น

อุรคินทร์ พลนิกร (2550) [11] ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียในกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นท่อสเตนเลส เกรด 304 โดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา และการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมไม่ก่อให้เกิดปัญหารอยเชื่อมทะลุ การปรับระยะลูกรีดที่ส่งผลให้ท่อเหล็กไม่ได้ขนาด และกำหนดปัจจัยได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะอาร์ค และเวลา ที่ใช้ในการเชื่อม รวมถึงระยะการปรับตั้งลูกรีด โดยการออกแบบการทดลอง 23 Fractional with center point (2 replicate) งานวิจัยนี้สามารถลดผลิตภัณฑ์ที่เกิดข้อบกพร่องจากกระบวนการผลิตได้ 6.6% คิดเป็นความสูญเสียที่สามารถลดลงได้ 62.64 ล้านบาท

3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

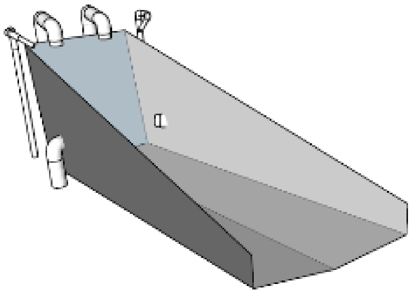
การดำเนินการวิจัยตามขั้นตอน DMAIC มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระยะการนิยามปัญหา

การศึกษาข้อมูลการผลิตในเดือนตุลาคม 2557 ถึงเดือนกันยายน 2558 พบว่า ฟริตสูตร 2 มีการผลิตมากที่สุด 74.1% ของการผลิตฟริตสูตรอื่น ๆ เมื่อพิจารณาปริมาณของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน ฟริตมีลักษณะเป็นเส้นแก้ว ฟริตมีสิ่งสกปรกเจือปน และฟริตเปลี่ยนสี พบว่า ฟริตสูตร 2 มีปริมาณของเสียมากที่สุดคิดเป็น 87.2% ของปริมาณของเสียในการผลิตฟริตสูตรอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาปริมาณของเสียสำหรับฟริตสูตร 2 พบว่า เกิดข้อบกพร่องฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานมากที่สุดคิดเป็น 78% ของข้อบกพร่องประเภทอื่น ซึ่งมีสัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน 7.96% ทำให้ต้องใช้น้ำมันเตาในการนำฟริต กลับไปหลอมใหม่เท่ากับ 224,511 ลิตรต่อปี และเป็นปัญหาหลักที่พบในการผลิตฟริต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนฟริตสูตร 2 ที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน จาก 7.96% เหลือ 3.98% คิดเป็นสัดส่วนของ

เสียที่ลดลงได้ 50% ทั้งนี้ จะปรับปรุงการผลิตโดยใช้เครื่องลำเลียงฟริตแทนการผลิตแบบดั้งเดิม เพื่อพัฒนากระบวนการผลิต การผลิตแบบดั้งเดิมมีวิธีการโดยสังเขป คือ เมื่อให้ความร้อนวัตถุดิบทำสารเคลือบฟริตจนกระทั่งหลอมเหลวจะกลายสภาพเป็นน้ำแก้วหลอมเหลวแล้วจะไหลส่งสู่รางน้ำ โดยมีการฉีดน้ำเพิ่มเติมเพื่อทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นฟริต และไหลต่อเนื่องลงสู่ถังเก็บฟริตที่อยู่ในบ่อรับน้ำ เมื่อฟริตเต็มถังที่ 1 จะใช้ตะขอเกี่ยวถังยกขึ้นจากบ่อรับน้ำเพื่อสะเด็ดน้ำและสลับมาใช้ถังที่ 2 รองรับฟริต จากนั้นนำฟริตจากถังที่ 1 ใส่ในเครื่องคัดขนาด (Screening machine) ที่มีตะแกรงขนาด 3 เมช วิธีการนี้ทำให้เกิดฟริตละเอียดตกค้างในบ่อรับน้ำ ซึ่งฟริตเหล่านี้เป็นฟริตที่มีขนาดได้มาตรฐานแต่ไม่สามารถส่งมอบให้แก่ลูกค้าได้ เนื่องจากเกิดการปนเปื้อนสิ่งสกปรกในบ่อรับน้ำ

เครื่องลำเลียงฟริตที่ออกแบบขึ้นมีการติดตั้งท่อปล่อยน้ำ 3 ตำแหน่ง คือ ท่อบนขนาด 2 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ ท่อบนขนาด 0.5 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ และท่อน้ำบริเวณด้านข้างขนาด 2 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองแสดงตำแหน่งท่อน้ำในเครื่องลำเลียงฟริต

การเก็บฟริตที่ได้จากการผลิตสามารถทำได้ง่ายเพียงนำถังเก็บฟริตรองรับที่ปลายปากเครื่องลำเลียงฟริต ซึ่งฟริตเคลื่อนตัวจากจุดรับน้ำแก้วหลอมเหลวไปยังปลายปากเครื่องได้จากการทำงานของมอเตอร์ (ยี่ห้อ Oli รุ่น MVE 700/15) ที่ควบคุมความถี่ด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยเมื่อปล่อยกระแสไฟผ่านอินเวอร์เตอร์ ลูกเบี้ยวด้านหัวและท้ายแกนมอเตอร์จะหมุน เกิดแรงเหวี่ยงและการสั่นเป็นแรงกระทำให้ฟริตเคลื่อนตัวไปด้านหน้า

ขอบเขตการวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยปรับค่าพารามิเตอร์เท่าที่จะสามารถทำได้สำหรับเครื่องลำเลียงฟริตที่ได้มีออกแบบและสร้างไว้แล้ว โดยไม่นำสาเหตุที่เกิดจากการออกแบบมาเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง และปรับปรุงเฉพาะปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และไม่ใช้เงินลงทุนสูง

3.2 ระยะการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

ในระยะนี้จะวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบการวัด เพื่อตรวจสอบว่าผลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองมีความน่าเชื่อถือเพียงใด เนื่องจากผลที่ได้จากการวัดจะเป็นข้อมูลนำเข้าในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากนั้นดำเนินการหาปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด

การวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบการวัด ดำเนินการโดย มีวิธีการดำเนินการดังนี้

1) สุ่มตัวอย่างฟริตจากการผลิตมาจำนวน 10 วัน วันละ 6 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 100 กิโลกรัม เนื่องจากไม่สามารถทดลองซ้ำในตัวอย่างเดิมได้ ดังนั้น มีตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 60 ตัวอย่าง [12] โดยตัวอย่างในวันเดียวกันจะคงที่ปัจจัยการผลิตทั้งหมด เช่น อัตราการป้อนวัตถุดิบ แรงดันน้ำ จำนวนหัวฉีดน้ำ ทิศทางหัวฉีดน้ำ เป็นต้น และในการเก็บตัวอย่างได้สุ่มตัวอย่างในแต่ละวันเพื่อป้องกันไม่ให้ข้อมูลเกิดแนวโน้ม

2) คัดเลือกพนักงาน 3 คน ที่จะเป็นผู้ดำเนินการทดลองในระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ระยะการปรับปรุง ตลอดจนระยะการควบคุม มาเป็นผู้ทำการทดสอบ

3) ออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาระบบการวัดและทำการทดลอง

4) นำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองใส่เครื่องคัดขนาดและนำฟริตที่ไม่ผ่านตะแกรง 3 เมช ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณสัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน

นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของระบบการวัดในส่วนรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ (Gage Repeatability and Reproducibility Analysis; GR&R) ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดแสดงค่า Part-To-Part เท่ากับ 95.07% โดยค่า Total Gage R&R มีเพียง 4.93 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าค่าความแปรปรวนส่วนใหญ่มาจากความแตกต่างของตัวอย่าง และผลการวิเคราะห์แสดงค่า Number of Distinct Categories เท่ากับ 6 แสดงว่าระบบการวัดที่ใช้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงเพียงพอในการใช้วัดฟริตที่มีขนาดค่าเกินมาตรฐาน [12]

3.2.2 การหาปัจจัยนำเข้า

การดำเนินการหาปัจจัยนำเข้าเริ่มต้นจากการจัดตั้งทีมงานที่มีความรู้และประสบการณ์ในการผลิตฟริตมากกว่า 10 ปี จำนวน 5 คน ร่วมกันระดมสมองหาสาเหตุที่ทำให้ฟริตมีขนาดเกินค่ามาตรฐาน โดยใช้แผนผังสาเหตุและผลระบุสาเหตุที่มาจาก คน เครื่องจักร วัตถุดิบ วิธีการ การวัด และสิ่งแวดล้อม (5M1E) นำปัจจัยทั้งหมดมาให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลด้วยเมทริกซ์สาเหตุและผล โดยการให้คะแนน 0, 1, 3 และ 9 และวิเคราะห์ผลด้วยหลักการพาเรโต พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลให้ฟริตมีขนาดเกินค่ามาตรฐาน จำนวน 9 ปัจจัย คิดเป็น 89% ของปัจจัยทั้งหมด แสดงคะแนนของปัจจัย ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยนำเข้าและคะแนนของแต่ละปัจจัย

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	คะแนน
1	ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา	9
2	ระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริต	9
3	ความถี่อินเวอร์เตอร์	9
4	รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต	9
5	พนักงานไม่มีมาตรฐานในการปฏิบัติงาน	9

ตารางที่ 1 (ต่อ) ปัจจัยนำเข้าและคะแนนของแต่ละปัจจัย

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	คะแนน
6	เครื่องทำความเย็นทำงานหนักเมื่อใช้เตาร่วมกัน	9
7	แรงดันน้ำไม่เหมาะสม	3
8	พนักงานขาดประสบการณ์	3
9	พนักงานไม่ได้รับการฝึกอบรม	3

จากนั้นดำเนินการหาปัจจัยที่มีความเสี่ยงสูงมาดำเนินการก่อน ด้วยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis: FMEA) เมื่อนำคะแนนความเสี่ยง (Risk of Priority Number) มาวิเคราะห์ด้วยหลักการพาเรโต พบปัจจัยที่มีความเสี่ยงสูง จำนวน 6 ปัจจัย คิดเป็น 82.7% ของปัจจัยทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 แผนภาพพาเรโตปัจจัยนำเข้าที่ผ่านการประเมิน FMEA

ปัจจัย ทั้ง 6 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่นำมาพิจารณาปรับปรุง โดยปัจจัยนำเข้าสำหรับการทดลองได้แก่ รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา ความถี่อินเวอร์เตอร์ และ ระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริต สำหรับปัจจัยแรงดันน้ำเป็นข้อจำกัดเนื่องจากไม่สามารถปรับค่าแรงดันปั๊มได้ จึงกำหนดเป็นปัจจัยควบคุม โดยให้แรงดันน้ำท่อหลักคงที่ 26 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และปัจจัยที่เกี่ยวกับพนักงานจะปรับปรุงโดยการจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Work Instruction)

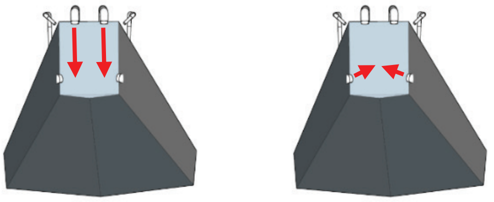
3.3 ระยะการวิเคราะห์ปัญหา

ในระยะนี้ได้ทำการทดลองหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดฟริตขนาดเกิดค่ามาตรฐาน โดยออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k แบบ 2 เรพลิเคต [13] เพื่อทดลองปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย และทำการทดลองที่ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (1) ที่สามารถปรับได้ของปัจจัยนั้น ๆ แสดงดังตารางที่ 2 ตัวแปรตอบสนองของการทดลอง (Response) คือ สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		หน่วย
		ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (1)	
A	รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต	X1	X2	-
B	ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา	4	6	เซนติเมตร
C	ความถี่อินเวอร์เตอร์	34	37	เฮิรตซ์
D	ระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียง ฟริต	310	320	เซนติเมตร

ปัจจัยรูปแบบการปล่อยน้ำในการทดสอบเบื้องต้นเลือกการปล่อยน้ำจากท่อบน (X1) แสดงดังรูปที่ 3 (ก) และการปล่อยน้ำจากท่อข้าง (X2) แสดงดังรูปที่ 3 (ข) เนื่องจากได้ตั้งสมมติฐานว่ารูปแบบการปล่อยน้ำที่ทำให้เกิดแรงกระทำกับน้ำแก้วหลอมเหลวจะส่งผลให้น้ำแก้วเย็นตัวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

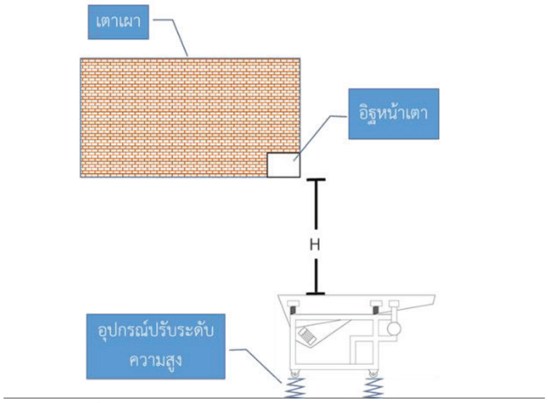


(ก) X1 (ข) X2

รูปที่ 3 (ก) – (ข) รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต

อิฐหน้าเตา คือ วัสดุที่รองรับน้ำแก้วหลอมเหลวที่ไหลจากเตาเผา เป็นอิฐทนไฟที่มีมีลักษณะเป็นร่อง อิฐหน้าเตาที่มีร่องอิฐจำนวน 2 ร่อง แต่ละร่องจะมีความกว้าง 6 เซนติเมตร สำหรับร่องอิฐที่มีจำนวน 3 ร่อง แต่ละร่องจะมีความกว้าง 4 เซนติเมตร ซึ่งตั้งสมมติฐานว่าร่องอิฐที่มีขนาดเล็กลงจะทำให้น้ำแก้วหลอมเหลวมีขนาดเล็กลง และจะเย็นตัวได้รวดเร็วยิ่งขึ้นเมื่อปะทะกับน้ำ

ระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริตเกิดจากการตั้งสมมติฐานของทีมระดมสมองว่า น้ำแก้วหลอมเหลวจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วได้ดีเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิน้ำแก้วหลอมเหลวกับอุณหภูมิน้ำ แสดงระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริต (H) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแสดงระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริต

นำสัดส่วนของฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐานจากการทดลองทั้งหมด 32 การทดลองมาตรวจสอบ

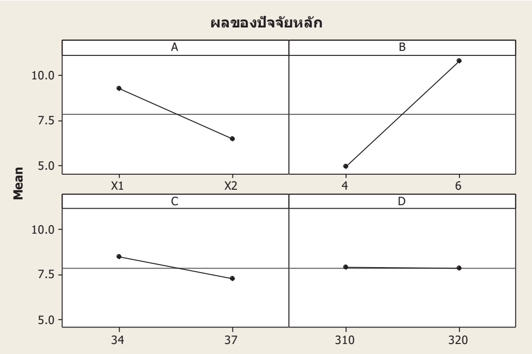
ความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ด้วยการทดสอบ 3 ประการ ได้แก่

1) สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ โดยทดสอบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของสัดส่วนฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน พบว่า ข้อมูลสัดส่วนของฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน มีการแจกแจงแบบปกติ ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยค่า P-Value เท่ากับ 0.134

2) สมมติฐานความเป็นอิสระ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการเก็บข้อมูล (Observation Order) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลไม่เป็นลักษณะแนวโน้ม และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

3) สมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล ทดสอบได้จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและตัวแปรตอบสนอง พบว่า สัดส่วนตกค้างของตัวแปรตอบสนอง ไม่มีลักษณะการกระจายตัวรูปแบบแนวโน้ม หรือรูปกรวยปากเปิด แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ หรือมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

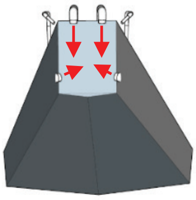
เมื่อข้อมูลจากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานจึงนำมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติ พบว่า ปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต (A) ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา (B) และ ความถี่อินเวอร์เตอร์ (C) ดังนั้น ปัจจัยทั้งสามจึงมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน ที่ความเชื่อมั่น 95% และปัจจัยระยะห่างระหว่างอิฐหน้าเตากับเครื่องลำเลียงฟริต (D) ไม่มีผลสอดคล้องกับกราฟแสดงผลของปัจจัยหลัก ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปรับตั้งค่าปัจจัย A ระดับสูง ปัจจัย B ระดับต่ำ และปัจจัย C ระดับสูง ทำให้สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานน้อยที่สุด



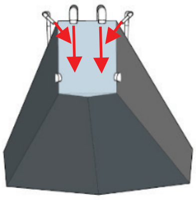
รูปที่ 5 ผลของปัจจัยหลัก

3.4 ระยะการปรับปรุงกระบวนการ

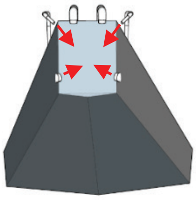
จากการทดลองในระยะการวิเคราะห์ปัญหาทำให้ทราบว่ารูปแบบการปล่อยน้ำทำให้เกิดแรงกระทำกับน้ำแก้วหลอมเหลวส่งผลให้เกิดฟริตขนาดเล็กจริงตามสมมติฐาน และการปรับปัจจัย B ระดับต่ำ และปัจจัย C ระดับสูง ทำให้สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานน้อยที่สุด ดังนั้น การทดลองในระยะการปรับปรุงกระบวนการจึงเพิ่มปัจจัยรูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริตอีก 4 ระดับ คือ การปล่อยน้ำจากท่อบนและท่อข้าง (Y1) ท่อบนและท่อเล็ก (Y2) ท่อข้างและท่อเล็ก (Y3) และท่อบนท่อข้างและท่อเล็ก (Y4) แสดงดังรูปที่ 6 (ก) – (ง) ตามลำดับ



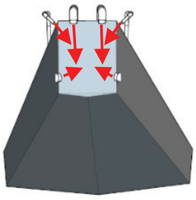
(ก) Y1



(ข) Y2



(ค) Y3



(ง) Y4

รูปที่ 6 (ก) – (ง) รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริตเพิ่มเติม

นำสัดส่วนของฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐานของการทดลองทั้งหมด 48 การทดลองมาตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง พบว่า ข้อมูลสัดส่วนของฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน มีการแจกแจงแบบปกติ ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยค่า P-Value เท่ากับ 0.072 ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพของความแปรปรวน จึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ ปัจจัยรูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต (A) ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา (B) และความถี่อินเวอร์เตอร์ (C) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน และมีอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่ รูปแบบการปล่อยน้ำเข้าเครื่องลำเลียงฟริต (A) กับ ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา (B) และความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา (B) กับ ความถี่อินเวอร์เตอร์ (C) ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 7

General Linear Model: สัดส่วนของฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน versus A, B, C

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	6	X1, X2, Y1, Y2, Y3, Y4
B	fixed	2	4, 6
C	fixed	2	34, 37

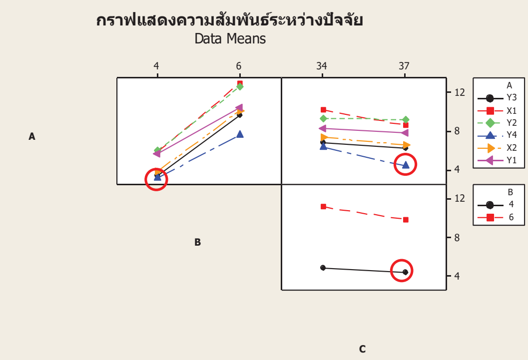
Analysis of Variance for เปอร์เซ็นต์ของเสีย, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	5	101.875	101.875	20.375	46.57	0.000
B	1	416.011	416.011	416.011	950.86	0.000
C	1	10.038	10.038	10.038	22.94	0.000
A*B	5	10.770	10.770	2.154	4.92	0.003
A*C	5	4.804	4.804	0.961	2.20	0.088
B*C	1	1.892	1.892	1.892	4.32	0.048
A*B*C	5	3.504	3.504	0.701	1.60	0.198
Error	24	10.500	10.500	0.438		
Total	47	559.393				

S = 0.661446   R-Sq = 98.12%   R-Sq(adj) = 96.32%

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน

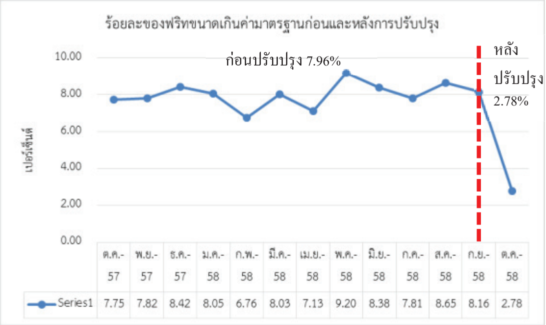
เมื่อพิจารณาผลอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ระดับปัจจัยที่ทำให้สัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานน้อยที่สุด คือ การปล่อยน้ำจากท่อบนท่อข้างและท่อเล็ก (Y4) ความกว้างร่องอิฐหน้าเตา 4 เซนติเมตร และความถี่อินเวอร์เตอร์ 37 เฮิรตซ์



รูปที่ 8 ผลของปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อสัดส่วนของฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน

3.5 ระยะการควบคุมกระบวนการ

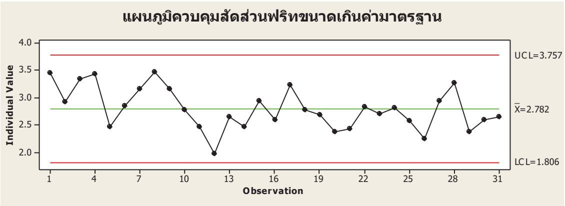
ในระยะสุดท้ายได้ทดสอบยืนยันผลการทดลอง โดยนำผลที่ได้จากระยะปรับปรุงกระบวนการมาปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการผลิตฟริต เป็นเวลา 1 เดือน พบว่า สัดส่วนของฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานก่อนการปรับปรุงในเดือนตุลาคม 2557–กันยายน 2558 เท่ากับ 7.96% และหลังการปรับปรุงในเดือนตุลาคม 2558 เท่ากับ 2.78% แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ร้อยละของฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานก่อนและหลังการปรับปรุง

โดยการผลิตในระยะควบคุมได้จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานและจัดอบรมพนักงานให้เข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญในการผลิตด้วยเครื่องลำเลียงฟริต และควบคุมการผลิตโดยการจัดทำบันทึกข้อมูลเวลาในการป้อนวัตถุดิบ รายงานการตรวจสอบระดับของปัจจัย และนำข้อมูลสัดส่วนฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานจากการผลิตในแต่ละวันมาสร้างแผนภูมิควบคุม (control chart)

[14] แสดงดังรูปที่ 10 เพื่อให้สามารถจัดการกับปัญหาที่เกิดในการผลิตได้ทันท่วงที



รูปที่ 10 แผนภูมิควบคุมการทดลองยืนยันผล

จากผลการทดสอบยืนยันผล พบว่า สัดส่วนของเสียของการผลิตทุกวันอยู่ในช่วงการควบคุม แสดงว่ามาตรการที่นำมาใช้ในการผลิตฟริตมีผลเป็นที่น่าพอใจ

4. สรุป

การนำหลักการซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการผลิตสารเคลือบเซรามิกชนิดฟริต ทำให้ลดปัญหาฟริตที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยดำเนินการตามขั้นตอน DMAIC ประกอบด้วย 1) การนิยามปัญหา ได้เก็บข้อมูลการผลิต ทำให้ทราบว่าบริษัทกรณีศึกษามีปัญหาสำคัญ คือ ฟริตสูตร 2 มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน 7.96% ทำให้ต้องใช้น้ำมันเตาในการนำฟริตกลับไปหลอมใหม่ถึง 224,511 ลิตรต่อปี จึงตั้งเป้าหมายเพื่อลดสัดส่วนฟริตสูตร 2 ที่มีขนาดเกินค่ามาตรฐาน จาก 7.96% เหลือ 3.98% คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงได้ 50% นอกจากนี้การศึกษากระบวนการผลิตแบบเดิมพบว่า ยังเกิดปัญหาฟริตละเอียดตกค้างในบ่อรับน้ำ จึงปรับปรุงวิธีการผลิตโดยนำเครื่องลำเลียงฟริตมาใช้ในการวิจัย 2) การศึกษาระบบการวัดและหาสาเหตุของปัญหา ทำให้มีความเชื่อมั่นในระบบการวัดผลตอบสนองและทราบปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ 3) การวิเคราะห์ปัญหา ได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k ผลการทดลองการได้นำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ ทำให้สามารถคัดกรองปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐาน 4) การปรับปรุงกระบวนการได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีการเพิ่มระดับของปัจจัย ทำให้ทราบระดับของปัจจัยที่ทำให้ฟริตมีขนาดเกินค่ามาตรฐานน้อยที่สุด คือ การปล่อยน้ำจากท่อบนท่อข้าง และท่อเล็ก (รูปแบบ Y4) ความกว้างของร่องอิฐหน้าเตา 4 เซนติเมตร และความถี่อินเวอร์เตอร์ 37 เฮิรตซ์ 5) ในระยะสุดท้ายได้ทดสอบยืนยันผลภายใต้แนวทางการควบคุมเพื่อลดความแปรปรวนให้การผลิตเป็นไปอย่างมีมาตรฐาน พบว่า สัดส่วนของฟริตขนาดเกินค่ามาตรฐานลดลงจาก 7.96% เป็น 2.78% คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงได้ 65.08% นอกจากนี้การนำเครื่องลำเลียงฟริตมาใช้แทนการผลิตแบบดั้งเดิม พบว่าสามารถนำมาใช้ในการผลิตได้จริง จึงสามารถนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตให้กับผู้ผลิตฟริตได้ อย่างไรก็ตามการนำปัจจัยที่ใช้สำหรับเครื่องลำเลียงฟริตดังกล่าวไปใช้งาน ต้องคำนึงถึงปัจจัยรบกวนอื่นๆ ในสภาวะการผลิตที่ต่างกันด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอำนวยความสะดวกในทำการวิจัย ขอขอบพระคุณ รศ.จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Parmelee, C. and Harman, C. Ceramic Glazes. Third Edition, CBLS, Ohio, 1973.
[2] Singer, F. and Singer, S.S. Industrial Ceramics. University of Michigan: Chemical Publishing. 1963.
[3] Casasola, R., Rincón, J.M. and Romero, M. Glass–ceramic glazes for ceramic tiles: a review. *Journal of Materials Science*, 2011; 47(2): 553-582.

[4] Thakore , R., Dave, R., Parsana, T., Solanki, A. A Review: Six Sigma Implementation Practice in Manufacturing Industries. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2014; 4(11-4): 63-69.
[5] Linderman, K., Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, 2003; 21(2): 193-203.
[6] Taneja, M. and A. Manchanda. Six Sigma an Approach to Improve Productivity in Manufacturing Industry. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2013; 5: 281-286.
[7] ยศวิน ศรีศักดิ์สรชาติ. การลดของเสียประเภทจุดสีในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
[8] ปาริชาติ บุญเกลี้ยง. การลดความผันแปรของขนาดหน้ากว้างของเทปโฟมอะคริลิคในกระบวนการตัด โดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
[9] ธีรยุทธิ์ ยกซิ้ว. การปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตกระเบื้องบิสกิตโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
[10] วราภรณ์ ขำสนิท. การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการฉีดพลาสติกกรณีที่มีข้อบกพร่องหลายชนิด. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
[11] อุรคินทร์ พลนิกร. การลดของเสียจากกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นในอุตสาหกรรมท่อสเตนเลส เกรด 304. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
[12] AIAG, A. Measurement systems analysis. Reference Manual, Fourth Edition, The Automotive Industry Action Group, 2010.
[13] Montgomery. D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & son Singapore Pte. Ltd, 2009.
[14] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. หลักการควบคุมคุณภาพ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550; 760.