

การลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ภาชนะเซรามิกด้วยแนวคิดแบบลีน

Waste Reduction and Efficiency Enhancement in Ceramic Containers Production Process Using Lean Concepts

ธงชัย โพธิ์ขาว^{1*} อนุชาติ ศรีศิริวัฒน์¹ ปราโมทย์ ศรีน้อย² และ สิริญา เครืออิ¹
Thongchai Pokaw^{1*}, Anuchart Srisirawat¹, Pramot Srinoi²
and Siriya Kruethi¹

Received: 27 August 2024

Revised: 10 April 2025

Accepted: 17 April 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาในสถานประกอบการโดยใช้หลักความสูญเปล่า 7 ประการ และค้นหาสภาพปัญหาพร้อมทั้งเสนอแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิกด้วยการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน โดยมีเป้าหมายเพื่อการลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิก ด้วยวิธีเพิ่มความหนาบริเวณจุดเสี่ยงการแตกร้าวและออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ โดยหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ มีค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการผลิต Cpk 2.02 และ Ppk 3.89 อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากกว่าค่ามาตรฐาน 1.33 และ 1.67 จากผลการทดลองที่สำคัญพบว่าของเสียลดลงจาก 43.11% เหลือ 13.21% และประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 56.89% เป็น 86.79% โดยการใช้วิธีทากูชิและไฟไนต์เอลิเมนต์ในการพัฒนาแนวทางการลดของเสียงานวิจัยนี้อยู่ในเงื่อนไขขอบเขตและการยืนยันผล

คำสำคัญ: การลดของเสีย เพิ่มประสิทธิภาพ แนวคิดแบบลีน วิเคราะห์ปัญหา วิธีทากูชิ

¹ หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

¹ Advanced Manufacturing Technology Program, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand 10330

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต กรุงเทพมหานคร 10250

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand 10250

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: thongchai789156@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of this research is to study and analyze problems in the workplace. The project uses the 7 principles of waste and finds problems and proposes solutions to improve the ceramic container production process by applying the lean concept with the goal of reducing waste and optimizing the ceramic container production process. By increasing the thickness of the fracture risk area and designing the experiment using the Taguchi method. Find the best parameters to increase process efficiency, with a Cpk of 2.02 and a Ppk of 3.89 are very good. The results showed that the waste was reduced from 43.11% to 13.21% and the efficiency of the production process increased from 56.89% to 86.79%.

Keywords: Waste Reduction; Efficiency; Lean Concept; Problem Analysis; Taguchi Method

บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกเพื่อการส่งออกและจำหน่ายในประเทศไทยคาดว่าจะเติบโตจาก 130.19 พันล้านดอลลาร์ในปี 2564 เป็น 219.12 พันล้านดอลลาร์ในปี 2571 ที่อัตราการเติบโตแบบทบต้นต่อปี (Compound annual growth rate :CAGR) 7.7% ในช่วงคาดการณ์ปี 2564-2571 ข้อมูลของตลาดเซรามิกทั่วโลก (Asia Pacific Ceramics Market Size,2017-2028 (USD Billion)) จากการวิเคราะห์ปัญหากระบวนการผลิตภาชนะเซรามิกในสถานประกอบการ ข้อมูลแผนภูมิพาเรโตแยกตามกระบวนการขึ้นรูป (ภาพที่ 1) พบว่ากระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยแรงดันสูงมีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเฉลี่ย 57.50% ผลผลิตที่ไม่ได้ตามเป้าหมาย

ในกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิก เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบหลักส่งเข้ากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก จากนั้นส่งเข้ากระบวนการการอบแห้ง เคลือบสี อบหลังเคลือบ ถึงกระบวนการสุดท้ายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเพื่อส่งมอบให้ลูกค้า จากการวิจัยพบว่าในกระบวนการตรวจสอบผลผลิตหลังอบแห้งพบปัญหาแตกร้าวบริเวณหุยกภาชนะเซรามิกเป็นปัญหาอันดับหนึ่ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตไม่ได้ตามเป้าหมาย ด้วยแนวคิดแบบลีนความสูญเสียเปล่า 7 ประการกล่าวไว้ดังนี้ 1.ความสูญเสียเปล่าในการผลิตของเสีย 2.ความสูญเสียเปล่าจากการผลิตมากเกินไป 3.ความสูญเสียเปล่าจากการเก็บวัสดุคงคลัง 4.ความสูญเสียเปล่าจากการขนส่ง 5.ความสูญเสียเปล่าจากการเคลื่อนไหว 6.ความสูญเสียเปล่าจากกระบวนการผลิต 7.ความสูญเสียเปล่าจากการรอคอย จากแนวคิดแบบลีนผู้วิจัยพบความสูญเสียเปล่าเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจากการผลิตของเสียมากเกินไป ส่งผลกระทบต่อการดำเนินธุรกิจและต้นทุนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ด้วยการผลิตแบบทันเวลาเพื่อให้เพียงพอกับการส่งมอบผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้า การดำเนินการพัฒนาและการจัดการต้นทุนที่ท้าทายรวมถึงห่วงโซ่อุปทานมีความสำคัญ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์จุดที่พบปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิก

จากงานวิจัยเชิงประจักษ์ที่ผ่านมา จะเห็นว่าจากความสำเร็จอุตสาหกรรมการผลิตทั่วโลกด้วยแนวคิดแบบลีนโดยมี Taiichi Ohno เป็นผู้พัฒนาระบบการผลิตของ Toyota Production System (TPS) มีทฤษฎีความสูญเสียเปล่าและการผลิตที่ไร้ศักยภาพ โดยสหรัฐอเมริกาใช้ชื่อว่า Lean Manufacturing System [1]

นักวิชาการ ผู้เชี่ยวชาญ ทำการศึกษามีส่วนสนับสนุนประมาณ 45 % ของบทความทั้งหมดโดยให้ความสำคัญกับการวิจัยเชิงประจักษ์มากขึ้น โดยผู้เขียนส่วนใหญ่ของประเทศที่พัฒนาแล้วใช้แนวคิดแบบลีนในการผลิต [2] ในปี 1988-2012 มีผลงานโดยนักวิจัยต่างประเทศจำนวน 209 วรรณกรรม มีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีนมีแนวโน้มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสหรัฐอเมริกามีจำนวน 52 วรรณกรรม สหราชอาณาจักรมีจำนวน 46 วรรณกรรม และอีกหลายประเทศทั่วโลก [3] จากการทบทวนข้อมูลผลการวิจัย 447 วรรณกรรม การวิเคราะห์งานวิจัยที่เพิ่มขึ้นในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา ก่อนปี 2001, ระหว่างปี 2001-2010, หลังปี 2010 ความยั่งยืนและแนวทางปฏิบัติให้มีความสำคัญกับความต้องการของลูกค้าเป็นอันดับแรก และประสิทธิภาพการส่งมอบ ไปสู่การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [4] ผู้วิจัยเลือกรูปแบบพื้นฐานการผลิตที่ดีที่สุด การกำจัดของเสียอย่างเป็นระบบ นำไปสู่กระบวนการทางอุตสาหกรรม กิจกรรมที่ไม่มีมูลค่าเพิ่มดังกล่าวสามารถคิดเป็นมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของกิจกรรมโรงงานทั่วประเทศ [5] การลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เลือกและการควบคุมตัวแปรอุตสาหกรรมเซรามิก การกำจัดของเสียอย่างเป็นระบบ พบว่ามี 79.17 เปอร์เซ็นต์ของผลการวิจัย 76 บริษัทมีการกำหนดมาตรฐานการผลิตและการควบคุมคุณภาพในประเทศอังกฤษ อิตาลี และสเปน [6] การนำระบบการผลิตแบบลีนไปใช้เพื่อลดข้อบกพร่องของเสียเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลาง ซึ่งส่งผลให้ลดข้อบกพร่องโดยเฉลี่ย 40.51% ประหยัดต้นทุนได้ 0.61 ล้านเหรียญสหรัฐในหนึ่งปีงบประมาณของอุตสาหกรรมเซรามิก [7] โดย FEM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับวิศวกรและนักคณิตศาสตร์ประยุกต์ในการวิเคราะห์ความเครียด วิเคราะห์ความร้อนหรือวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การแจกแจงของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดสถานะการไหลที่ไม่ชัดเจนบนโครงสร้างของแข็ง วิเคราะห์ความร้อนเพื่อให้ได้มาผลอุณหภูมิที่กลายเป็นข้อมูล แนวคิดการวิเคราะห์ FEM ผ่าน SolidWorks [8] การทบทวน Lean Six Sigma ถือเป็นแนวทางที่โดดเด่น ด้วยแนวทางที่ผสมผสานหลักการลดการสิ้นเปลืองของ Lean กับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ ทำให้ Six Sigma เป็นเครื่องมือที่มีคุณค่าในการปรับปรุงกระบวนการคุณภาพผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ลดต้นทุนและปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้า [9] อย่างไรก็ตามงานวิจัยและการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาข้างต้นยังไม่สามารถอธิบายการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดของเสียด้านนี้ต่อไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยแนวคิดการผลิตแบบลีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานกระบวนการแข่งขันที่มีประสิทธิภาพ การตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างต่อเนื่อง ต้นทุนที่ต่ำทลายและของเสียทั่วทั้งห่วงโซ่อุปทาน การควบคุมคุณภาพสามารถปรับปรุงลดข้อบกพร่องและความสิ้นเปลืองทางกายภาพที่ไม่จำเป็นเพื่อป้องกันการผลิตของเสีย

ดังนั้นด้วยเหตุผลที่แสดงถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาและนำไปสู่การวิจัยเรื่องการลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิกด้วยแนวคิดแบบลีน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความสูญเสียเปล่าจากการผลิตของเสีย (Defect) จะเห็นว่าผลลัพธ์จากการวิจัยที่ผ่านมาพบการนำมาตรฐานมาใช้ในการดำเนินงานและนำไปใช้ประโยชน์หรือนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้างและช่วยสนับสนุนให้สำเร็จตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ การเพิ่มผลผลิตที่มีคุณภาพและลดข้อบกพร่องในอุตสาหกรรมเซรามิกสามารถตอบสนองได้ตามความต้องการของลูกค้า [10]

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิเคราะห์ข้อมูลการบูรณาการกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกปี 2022

ผู้วิจัยเริ่มทำการวิเคราะห์การบูรณาการกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิกดังแสดงในภาพที่ 1 จะเห็นว่าในกระบวนการผลิตเซรามิก ความต้องการของลูกค้า ทำการประเมินและออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ จากนั้นทำการทดสอบและประเมินผลิตภัณฑ์ ความสามารถในการกระบวนการผลิตและทำการเตรียมวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปทำการตรวจสอบและขัดตกแต่งชิ้นงาน เพื่อส่งเข้ากระบวนการเผาก่อนเคลือบ ชิ้นงานที่ได้เรียกว่าบิสกิต (Biskuit) ทำการตรวจสอบชิ้นงานก่อนส่งเข้ากระบวนการเคลือบผิว โดยชิ้นงานที่เคลือบแล้วส่งเข้าสู่กระบวนการเผาหลังเคลือบ ก่อนเป็นผลิตภัณฑ์ส่งมอบลูกค้า การบริหารจัดการดำเนินการผลิตแบบเต็มแต่งที่ครบถ้วนด้วยการนำแนวคิดแบบลีนไปใช้ในภาคเซรามิก [11]



Figure 1 Activity: Integrating the Ceramic Production Process

จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลแผนภูมิพาเรโตประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิก (ข้อมูลของโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิกปี 2022) ดังแสดงในภาพที่ 2 เพื่อหาจุดที่ต้องการแก้ไขและพัฒนา ผู้วิจัยพบว่ากระบวนการหล่อขึ้นรูป (Forming) ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยแรงดันสูงพบปัญหาการแตกร้าวเป็นปัญหาที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเฉลี่ย 57.50% การลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตเซรามิก การผลิตแบบลีนเพื่อลดผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่อง วิเคราะห์การผลิตบนข้อมูลและมุมมองที่จะนำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหามีคุณภาพ การลดของเสียและข้อบกพร่องผลิตภัณฑ์ การบริหารห่วงโซ่อุปทาน [12]

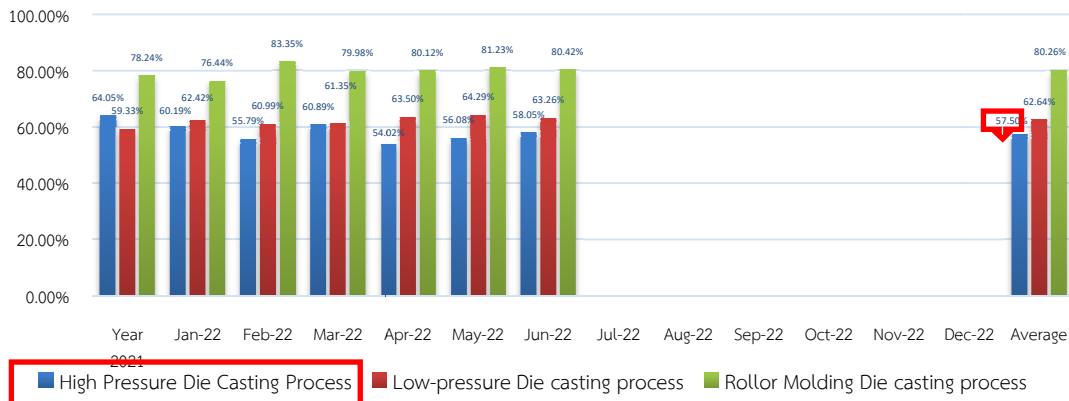


Figure 2 Ceramic container forming process efficiency separated by forming method

จากปัญหาการแตกร้าวบริเวณหุยกภาชนะเซรามิกของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จากการทบทวนวรรณกรรมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ (NPD) ในการวิเคราะห์บทความวิชาการที่ปรับใช้ฟังก์ชันคุณภาพและการสร้างแบบจำลองกระบวนการ เครื่องมือ และเทคนิค [13] การใช้เทคโนโลยีเป็นเครื่องมือช่วยการวิเคราะห์กระบวนการผลิต (Additive Manufacturing) ความสามารถในการสร้างโมเดลต้นแบบจำลองและใช้วิเคราะห์การสร้างแบบจำลองมากที่สุดในระบบการผลิตเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง [14] จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ การเปรียบเทียบผลของประเทศกำลังพัฒนาและประเทศที่พัฒนาแล้ว การลดของเสียมีนัยสำคัญด้วยการกำจัดสาเหตุของปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการทางสถิติ (SPC) และการวิเคราะห์ (FMEA) [15] โดยการลดความแปรปรวนของตัวแปรเอาต์พุตทำได้ด้วยค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ในกระบวนการผลิต การลดต้นทุน การลดความแปรปรวนของผลผลิต และการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า การออกแบบการทดลองถูกสร้างขึ้นโดยนักวิจัย Taguchi ครั้งแรกในทศวรรษที่ 1920 [16] ผู้วิจัยทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ Design of experiment Taguchi design (DOE) ดังแสดงในภาพที่ 3

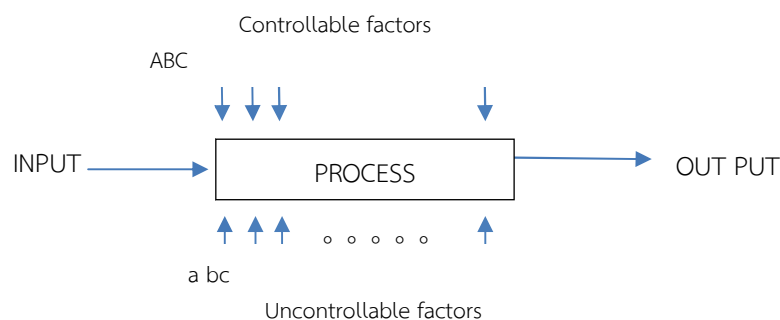


Figure 3 DOE: Design of experiment Taguchi design

ในปัจจุบันปัญหาด้านคุณภาพของแต่ละโรงงานมีผลกระทบอย่างมากต่อต้นทุนการผลิตและการส่งมอบ ดังนั้นเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในระบบการผลิตภาชนะเซรามิก (Input, Process, Output) การควบคุมคุณภาพ ปัจจัยหลักของกระบวนการผลิตเซรามิกที่จำเป็นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัย กำหนด อุณหภูมิ เวลา และความชื้น

2.วัสดุและอุปกรณ์

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองภาชนะเซรามิกมีขนาดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 50 มม.ยาว 150 มม. โดยจำลองคุณสมบัติวัสดุเซรามิกพอร์ซเลนจาก Program Solid works Professional 2022 SP4.0 (ดัง ตารางที่ 1)

Table 1 Simulation of the properties of porcelain ceramic materials in Solid works

Qualification	Price	Unit
elastic modulus;	220590	Newtons per squaremillimeter
Poisson ratio	0.22	
Shear modulus	90407	Newtons per square millimeter
Mass density	2300	kilograms per cubic meter.
Tensile Strength	172.34	Newtons per square millimeter
Compressive Strength	.49	Newtons per square millimeter
Yield Strength	-	Newtons per square millimeter
Coefficient of thermal expansion	0.0000108	Kelvin
Thermal conductivity	1.4949	Watts per meter-Kelvin
Specific heat	877.96	Milliper kilogram-Kelvin

3.ขั้นตอนการทดสอบ

วิเคราะห์แผนภาพของรอยแตกภาชนะเซรามิกดังแสดงในภาพที่ 4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบูรณาการ กระบวนการผลิตและการออกแบบกระบวนการ เพื่อปรับปรุงการแตกของภาชนะเซรามิก การวิเคราะห์เชิง ทดลองของการควบคุมขั้นตอนการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

3.1 ออกแบบการทดลองในการวิเคราะห์การแตกและกำหนดตัวแปรการทดลองวิเคราะห์ เพื่อหาค่าความ แข็งแรงที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ประกอบด้วยค่าความแข็งแรงความต้านทานการแตกของเซรามิก การวิเคราะห์ ความล้าจากความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง



Figure 4 Diagram of the crack

3.2 วิเคราะห์โครงสร้างและความสัมพันธ์ของความหนาบริเวณหุยกาเซเซรามิก การทบทวนการประยุกต์ใช้วัสดุเซรามิกขั้นสูง ในการวิจัยที่ผ่านมาวัสดุเซรามิกในสองทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างเซรามิกทั่วไปส่วนใหญ่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว [17] ค่าโมดูลัสการแตกหักของชิ้นงานหลังเผา การเตรียมวัตถุดิบ มีแนวทางพิจารณาความสามารถการขึ้นรูป ความสามารถการอบแห้ง ความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อแห้ง ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา การช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงาน ความแข็งแรงของเนื้อดิน และการปรับปรุงสมบัติต่างๆของเนื้อดินสโตนแวร์ [18] การอบแห้งเป็นหนึ่งในขั้นตอนในกระบวนการผลิตวัสดุเซรามิกเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่จำเป็น สำหรับขั้นตอนการเผาลดโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง ในขั้นตอนการอบแห้งเกิดขึ้นทันทีหลังจากถอดชิ้นส่วนออกจากแม่พิมพ์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำตั้งแต่ 30 °C ถึง 40 °C (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการลดลงของความชื้นสัมพัทธ์กระตุ้นให้เกิดอัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้น และพบความสัมพันธ์ระหว่างการหดกลับเชิงเส้นและความชื้น ยิ่งการสูญเสียความชื้นมากเท่าใด การหดตัวของตัวอย่างก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น [19] การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบตามคำอธิบายทางกายภาพของความล้มเหลวภายใต้สภาวะความล้าจากความร้อน ความเครียดจากความร้อนจากการเปลี่ยนแปลง $S - \log N$ Curve อายุการใช้งานจากความเหนียวล้าที่สำคัญ อายุการใช้งานจากความเค้นและความเครียด ความเหนียวล้าวิธีการกลศาสตร์การแตกหัก ทำนายรอยร้าวเกี่ยวกับความรุนแรงของความเครียด [20] สถิติความแข็งแรงของเซรามิก ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบในระเบียบวิธี FEA ข้อมูลการกระจายโครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ขนาด ขนาดเกรนและอัตราส่วนภาพของรูพรุน การจำลองความเค้นแตกหักสามารถใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นการแตกหักของเซรามิก [21] การหดตัวจากการเผาและการดูดซึมน้ำถูกกำหนดรวมกันของวัตถุดิบและใช้เป็นพารามิเตอร์ การควบคุมคุณภาพเทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อจำลองคุณสมบัติของเนื้อเซรามิกการหดตัวจากการเผาเชิงเส้นและการดูดซึมน้ำ [22]

3.3 การควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิต ผู้วิจัยทำการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีไซนินและทากูจิ [28] เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการบวนการผลิตภาชนะเซรามิก (Input, Process, Output) ทำการกำหนดตัวแปรหลักในการผลิตภาชนะเซรามิกเป็น ความชื้น อุณหภูมิ เวลา การควบคุมความชื้นของภาชนะเซรามิก ก่อนเข้ากระบวนการ อบแห้ง การวิเคราะห์เชิงทดลองของการควบคุมขั้นตอนการผลิตทางเลือกที่หลากหลายในอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขัน ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของต้นทุนการผลิตขึ้นอยู่กับความต้องการ ทางเลือกเชิงปริมาณสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับความแตกต่างการผลิต การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความต้องการ [23] การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง ต้นทุนที่แข่งขันได้และการจัดส่งที่รวดเร็วขึ้นจำเป็นต้องใช้แนวคิดและวิธีการที่ครอบคลุมในการจัดการ ข้อกำหนดนี้การนำ Lean Six sigma ใช้ในอุตสาหกรรม การใช้สถิติเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความสำเร็จของ Lean Six-Sigma [24] ผู้วิจัยเลือกดัชนีวัดความสามารถของ

กระบวนการผลิต (Process Capability) เครื่องมือหลัก (Core tool) ค่าเบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานเทียบกับผลผลิตและของเสีย สำหรับแบบทดลองและการผลิตแบบระยะยาว ค่า Cpk และ Ppk เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพและแผนภูมิควบคุมคุณภาพ $\bar{X}$ -Chart, R-Chart แสดงความสามารถของกระบวนการเชิงสถิติ การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตด้วยวิธี Six Sigma เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด

ในการศึกษานี้การคำนวณค่ามาตรฐานและค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน แผนภูมิควบคุมคุณภาพ $\bar{X}$ -Chart, R-Chart ค่าความชื้นของภาชนะเซรามิก ดังแสดงในสมการที่ 1

$$S.D. = \sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 / (N - 1)} \quad (1)$$

ผลการวิจัย

1. จากการทดลองความแตกต่างของแรงดันในการขึ้นรูป พิสูจน์ปัญหาการแตกของภาชนะเซรามิก พบปัญหาแตกร้าวบริเวณหุยกภาชนะเซรามิกมีผลจากการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์พบของเสีย 14.43 - 34.29 % ตามตารางที่ 2

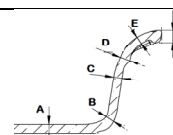
Table 2 Experiment on Differential Pressure in Forming Proving the problem of cracking

Sequence of experiments Soil Feature (A)	Controlling Variables in Experiments			Results		
	Number of Trials (pcs)	Forming Pressure (Psi.)	Time taken to form (seconds)	Temperature used for baking (°c)	Number of Waste (pcs)	Waste (%)
1	35	25	300	990	12	34.29
2	35	30	300	990	9	25.71
3	35	35	300	990	9	25.71
4	35	40	300	990	4	14.43

1.1 การวิจัยเพิ่มความหนาของภาชนะเซรามิกบริเวณจุด B, C, D (ดังตารางที่ 4 จุดความหนา) มีผลกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ดีขึ้น เพื่อพิสูจน์จุดวิกฤติของโครงสร้างภาชนะเซรามิกดังตารางที่ 3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านคุณภาพ (Quality function deployment) ใช้หลักการ Axiomatics design วางแผนผลิตภัณฑ์ การแปลงการออกแบบ วางแผนกระบวนการ วางแผนการผลิต และความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพกับพารามิเตอร์ โดยออกแบบพารามิเตอร์ (Design Parameter) แนวคิดการออกแบบ (Conceptual design) ออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product design) และออกแบบกระบวนการ (Process design) โดยสร้างแบบจำลอง CAD ที่ปรับขนาดได้โดยรวมปัจจัยการหดตัวที่คำนวณได้ [25]

Table 3 Analysis of the structure of the product Proven strength of ceramic

Stress, critical points ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$)	Deformation value (mm^{-3})	Weight (g)	Point Thickness (mm.)					
			A	B	C	D	E	F
1.603	3.578	2261	8.0	7.0	6.5	7.5	6.5	10.0

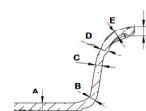


จากข้อมูลตารางที่ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าความเครียด ทำให้เกิดการเสียรูปของเซรามิก [26] บริเวณศูนย์กลางของเซรามิกพิจารณาความเครียดจุดวิกฤตมีค่า $1.603 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และค่าการเสียรูป 3.578 mm^{-3} ของผลิตภัณฑ์ ด้วยจุดแข็งการใช้ Finite Element Method (FEM) กำหนดวิธีแก้ไขปัญหาคือเฉพาะเจาะจง มีความสามารถแยกปัญหาที่ซับซ้อนและวิเคราะห์ที่ละเอียดได้ โดยไม่คำนึงถึงรูปทรงเรขาคณิตของปัญหา ด้วยการปรับแต่งตาข่ายสำหรับการวิเคราะห์อย่างเหมาะสม FEM จึงให้วิธีแก้ปัญหามากมาย ดังนั้น FEM จึงเป็นวิธีที่ดี มีเทคนิคแก้ไขปัญหสำหรับแต่ละองค์ประกอบได้อย่างเป็นระบบ [26]

1.2 ทำการปรับเพิ่มความหนาของภาชนะเซรามิกบริเวณจุด B, C, D ทำการทดลอง 3 ครั้งดังตารางที่ 4 (จุดความหนา) ผลการทดลองเพิ่มความหนาของภาชนะเซรามิกบริเวณจุด B, C, D (จุดความหนา) มีผลกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ดีขึ้นค่าความเครียดจุดวิกฤตจาก $1.603 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ ลดลงเหลือ $0.855 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และค่าการเสียรูปจาก 3.578 mm^{-3} ลดลงเหลือ 2.100 mm^{-3} ส่งผลต่อค่าความเครียดจุดวิกฤตค่าผลต่าง $0.748 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และค่าผลต่างการเสียรูป 1.478 mm^{-3} ดังตารางที่ 4

Table 4 Analysis of structural strength and thickness relationship in the ceramic

Sequence of experiments	Stress, critical points ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$)	Deformation value (mm^{-3})	Weight (g)	Point Thickness (mm.)					
				A	B	C	D	E	F
No.1	1.603	3.578	2261	8.0	7.0	6.5	7.5	6.5	10.0
No.2	1.063	2.929	2272	8.0	7.0	6.5	8.9	6.5	10.0
No.3	0.855	2.100	2426	8.0	7.8	7.4	8.9	6.5	10.0
Maximum	1.603	3.578	2426	8.0	7.8	7.4	8.9	6.5	10.0
Average	1.174	2.869	2320	8.0	7.3	6.8	8.4	6.5	10.0
Minimum	0.855	2.100	2261	8.0	7.0	6.5	7.5	6.5	10.0
Difference	0.748	1.478	+165	0.0	0.8	0.9	1.4	0.0	0.0



1.3 ค่าความเครียดจุดวิกฤตมีผลลัพธ์ที่ดีขึ้นจาก $1.603(\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ เหลือ $0.855(\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และการเสียรูปจาก 3.578 mm^{-3} ลดลงเหลือ 2.100 mm^{-3} ส่งผลต่อค่าความเครียดจุดวิกฤตมีค่าผลต่าง $0.748 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และค่าผลต่างการเสียรูป 1.478 mm^{-3} ดังตารางที่ 4 และจากผลการทดลองตารางที่ 5 การควบคุมความชื้นของภาชนะเซรามิกเพิ่มความสมดุลทางกายภาพ (Homogeneous) ปัญหาการแตกร้าวลดลง การเผาที่มีการควบคุมอุณหภูมิและเวลา ชิ้นส่วนเซรามิกจึงหดตัวและทำให้ความพรุนของชิ้นงานเพิ่มขึ้นและน้ำหนักลดลงและลดความแข็งแรงเชิงกล การทดสอบเชิงกลตามคำแนะนำใน ISO-527-1 ลักษณะเชิงกลของชิ้นส่วนเซรามิกประกอบด้วยการทดสอบแรงดึงและแรงอัด ตลอดจนการตรวจสอบรูพรุน ผลการทดสอบแรงดึงโดยขนาดของชิ้นงานเผาเผาชิ้นสุดท้ายนั้นใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมาก [27]

Table 5 Experiments proving the difference in baking temperature Ceramic container breakage breakage problems In the molding process, the average humidity control is 16.28%

Sequence of experiments Soil Feature (A)	Controlling Variables in Experiments			Experimental Results of Molding Pressure Differences		
	Number of Trials(pcs)	Forming Pressure Psi.	Time taken to form (seconds)	Temperature used for baking ($^{\circ}\text{C}$)	Number of Waste (pcs)	Waste (%)
1	30	40	300	990	5	14.29
2	30	40	300	1000	2	5.71
3	30	40	300	1100	2	5.71
4	30	40	300	1200	1	2.86

1.4 การทดลองตารางที่ 6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ความหนาและความชื้นในกระบวนการผลิตของภาชนะเซรามิกโดยนำผลการทดลองที่ 4 ลำดับที่ 3 ของลำดับการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่าความเครียดจุดวิกฤต $0.855 (\times 10^6 \text{ N/m}^2)$ และค่าการเสียรูป 2.100 mm^{-3} ผลต่างมีค่ามากที่สุด 1.4 มม. ที่จุด D จึงนำค่าของจุด D ของการเพิ่มความหนา 8.9 มม. มากำหนดเป็นค่ามาตรฐานในการทดลองตารางที่ 6 นำผลการทดลองจากตารางที่ 5 ลำดับการทดลองที่ 4 อุณหภูมิที่ใช้ออบ $1,200^{\circ}\text{C}$ พบของเสีย 2.86% น้อยสุด จึงนำค่าที่ดีที่สุดของการทดลองมากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการอบแห้งตามตารางการทดลองที่ 6 กำหนดอุณหภูมิ ที่ $1,200^{\circ}\text{C}$ การหดตัวและการแตกร้าวเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งผลิตภัณฑ์เซรามิก การสร้างแบบจำลองและการจำลองที่แม่นยำของปรากฏการณ์การหดตัว และความเค้นที่เกิดจากการอบแห้งอาจใช้เพื่อคาดการณ์การเกิดข้อบกพร่อง เช่น การเสียรูปและการแตกร้าว และวิเคราะห์กระบวนการโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ ค่าการเสียรูป [28]

Table 6 Results of Thickness and Moisture Relationship Experiments in the Production Process of Ceramic Containers

Sequence of experiments Soil Feature (A)	In the experiment variable control is carried out by taking ceramic containers with increased dot thickness D (8.9mm.) baking temperature 1200°C.				Results	
	Number of Trials (pcs.)	Forming Pressure (Psi.)	Time taken to form (seconds)	Baking Humidity Difference (%)	Number of Waste (pcs.)	Waste (%)
1	30	40	300	≤ 1	0	0
2	30	40	300	≤ 4	1	2.86
3	30	40	300	≤ 6	5	14.29
4	30	40	300	> 8	20	57.14

ผลการวิจัยสามารถลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิกด้วยแนวคิดแบบลีน การทดลองความสัมพันธ์ความหนาและความชื้นในกระบวนการผลิตของภาชนะเซรามิกดังตารางที่ 6 สามารถลดของเสียได้ตามวัตถุประสงค์

2. ออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการบวนการผลิตภาชนะเซรามิก (Input, Process, Output) การควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิต ค่าความหนาของผลิตภัณฑ์มีผลต่อความชื้นของภาชนะเซรามิก ผู้วิจัยกำหนดความชื้น อุณหภูมิ เวลา เป็นตัวแปรหลัก ส่งผลต่ออัตราส่วนการหดตัวที่สมดุล ค่าควบคุมความชื้นเฉลี่ย 16.28 % จากเทคนิคการออกแบบการทดลอง เป็นการทดสอบแบบครั้งเดียวหรือแบบต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ โดยใช้หลักการค้นหาตัวแปรและวิธีคัดกรองปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ของกระบวนการ เป็นเครื่องมือในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (DOE) การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุดทุกค่าการเบี่ยงเบนของกระบวนการที่ออกห่างจากค่ามาตรฐานส่งผลกระทบโดยตรงกับความสูญเสีย [29] จากภาพที่ 3 ทำให้การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สมดุลในการผลิตภาชนะเซรามิก ส่งผลให้ปัญหาการแตกร้าวบริเวณหุยกภาชนะเซรามิกลดลง ดังภาพที่ 3 (X-Chart) และภาพที่ 4 (R-Chart) แผนภูมิควบคุมคุณภาพ X-Chart, R-Chart แสดงการควบคุมเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย 16.28 % และค่า Cpk 2.02 มากกว่าค่าที่กำหนด 1.33 และค่า Ppk 3.89 มากกว่าค่าที่กำหนด 1.67 สรุปผลการทดลอง ค่าCpk และPpk อยู่ระหว่าง 1.33 – 2.00 สรุปผลการทดลองกระบวนการมีความสามารถอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

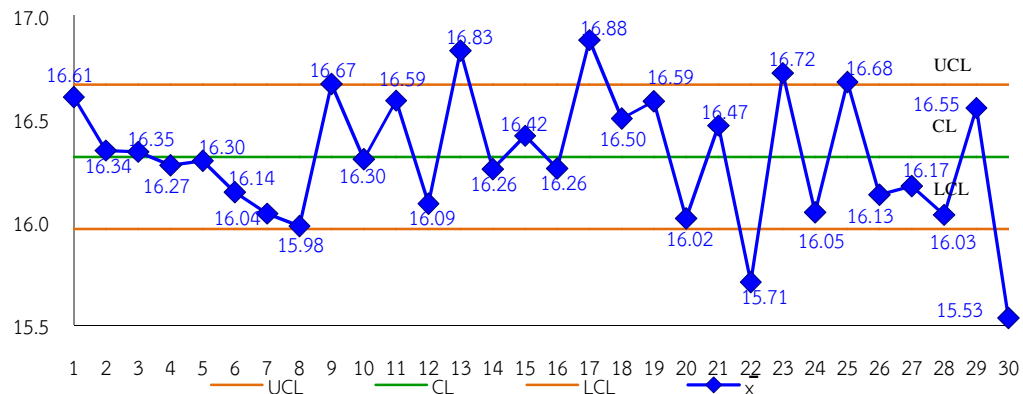


Figure 5 Control chart $\bar{X}$ -chart displays the humidity percentage control of ceramic

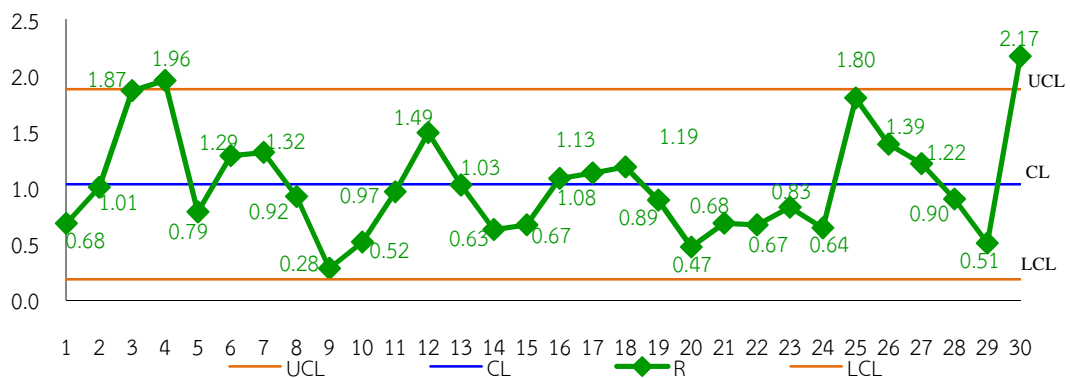


Figure 6 Control chart R-chart displays the humidity percentage control of ceramic

การปรับความหนาบริเวณจุดวิกฤติทำให้ค่าความชื้นของภาชนะเซรามิกมีความสมดุล (Homogeneous) ทำการควบคุมผลิตภัณฑ์ก่อนเข้ากระบวนการอบแห้ง โดยการออกแบบการจำลองการออกแบบระบบการประมวลผลของการศึกษาในปัจจุบัน ดำเนินการโดยมีจำนวนการจำลอง 30 ครั้งเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่คาดหวังของข้อเสนอแบบจำลองปัจจุบันและการกำหนดเวลาจัดเก็บผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูป (Age Control) และกำหนดตัวชี้วัดเป็นค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการจัดเก็บก่อนเข้าอบแห้ง เพื่อปรับความสมดุลของภาชนะเซรามิกให้มีค่าความชื้นและคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3 ($\bar{X}$ -Chart) และภาพที่ 4 (R-Chart) แสดงแนวโน้มการควบคุมความชื้นของภาชนะเซรามิก

3. จากตารางที่ 7 ที่เปรียบเทียบก่อนและหลังดำเนินการวิจัย การลดของเสียมีผลต่อแสดงการเปรียบเทียบ 7 ประสิทธิภาพ ในกระบวนการผลิต ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงการลดของเสียจาก 43.11% เหลือ 13.21% และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตขึ้นจาก 56.89% เป็น 86.79% ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญ

Table 7 Results before conducting research and after conducting the research of waste and production efficiency change in the production process of ceramic containers

	Average waste (Scrap BISK. /%)	Average production efficiency (Yield BISK./ %)
searchBefore conducting re	43.11%	56.89%
After conducting the research	13.21%	86.79%

โดยสรุปผลงานวิจัยได้จากตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยผลการวิจัยในกระบวนการผลิตของภาชนะเซรามิก ผลการดำเนินงานพบว่า การลดของเสียมีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตภาชนะเซรามิก ตามการแสดงภาพที่ 6 แผนภูมิประสิทธิภาพการผลิต (Yield BISK) และของเสีย (Scrap BISK) ของภาชนะเซรามิก

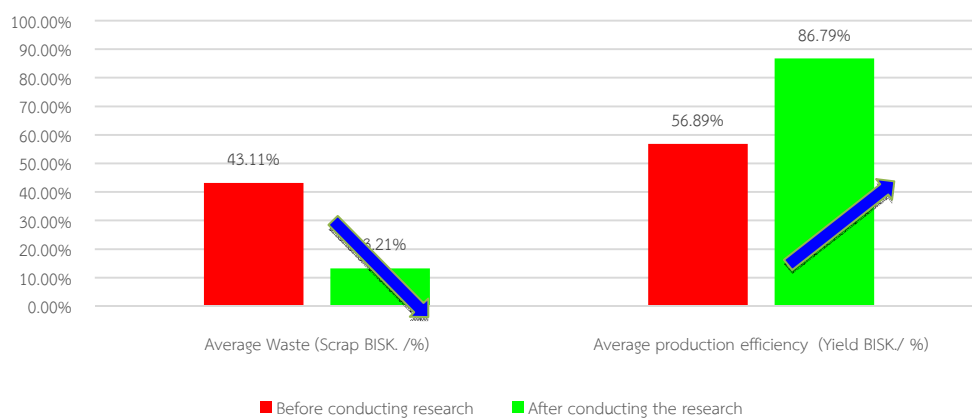


Figure 7 Waste and production efficiency change chart

การควบคุมขั้นตอนการอบแห้งส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวัดพารามิเตอร์การอบแห้ง อุณหภูมิ ปริมาณ ความชื้น และการเปลี่ยนแปลงมิติ โดยใช้วิธีอบที่ดี วัสดุทางเทคโนโลยีสำคัญ และส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก อะลูมินาและดินเหนียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการนำความร้อน กับปริมาณความชื้นขณะที่อบแห้ง มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไปตามปริมาณความชื้น [30]

Table 7 Research results effect of waste reduction on efficiency in the production process of ceramic containers

Processing time	Result Year. 2022 2023	Production information of ceramic containers with pressure slip			Results	
		Forming Quantity (pcs)	The number of good things (pcs)	Number of Waste (pcs)	Yield BISK (%)	Scrap BISK (%)
Before conducting research	Jan-22	126,792	76,316	50,475	60.19	39.81
	Feb-22	126,943	90,905	72,037	55.79	44.21
	Mar-22	115,473	70,311	45,161	60.89	39.11
	Apr-22	115,657	62,477	53,179	54.02	45.98
	May-22	139,545	64,860	50,796	56.08	43.92
	Jun-22	150,304	81,005	58,539	58.05	41.95
	Jul-22	171,208	77,391	72,912	51.49	48.51
	Aug-22	179,642	80,912	90,295	47.26	52.74
	Sep-22	167,357	99,683	79,958	55.49	44.51
	Oct-22	196,542	116,530	50,826	69.63	30.37
After conducting the research	Nov-22	185,228	164,530	31,696	83.87	16.13
	Dec-22	149,068	161,531	23,696	87.21	12.79
	Jan-23	139,878	130,066	19,001	87.25	12.75
	Feb-23	174,055	126,834	13,043	90.68	9.32
	Mar-23	104,745	154,757	19,297	88.91	11.09
	Apr-23	160,733	89,811	14,933	85.74	14.26
	May-23	160,469	134,249	26,220	83.66	16.34
	Jun-23	167,733	145,907	21,826	86.99	13.01

Table 8 Based on the data from Table 7 shows the average research results in the production process of ceramic containers.

Performance research	Average Yield (Yield BISK/ %)	Average waste (Scrap BISK/%)	Target
Beforeconducting	56.89%	43.11%	65.00%
After conducting	86.79%	13.21%	65.00%
Goodresults	29.90%	30.64%	65.00%

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในอุตสาหกรรมการผลิตมีเครื่องมือที่นำไปสู่การควบคุมและการจัดการการผลิต โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีแบบทากูชิเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด จากการทดลองแบบวิธีทากูชิได้พัฒนาความสามารถของกระบวนการเชิงสถิติดังภาพที่ 3 (X-Chart) และภาพที่ 4 (R-Chart) แผนภูมิควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ ค่า Cpk 2.02 มากกว่าค่าที่กำหนด 1.33 และค่า Ppk 3.89 มากกว่าค่าที่กำหนด 1.67 สรุปผลการทดลองค่า Cpk และ Ppk กระบวนการมีความสามารถอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการประสิทธิภาพของกระบวนการมาตรการและตัวชี้วัด ซึ่งข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับระดับของเสียในสายการผลิตได้ระบุความสูญเสียจากการผลิตของเสียในบริษัทด้วยแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษาการประเมินความสามารถทฤษฎีการปรับปรุงเป็นการลดความแปรปรวนและการสูญเสียในกระบวนการผลิต เป็นดัชนีความสามารถของกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ได้แก่ Cpk, Ppk, การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับตรวจสอบและรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า [31]

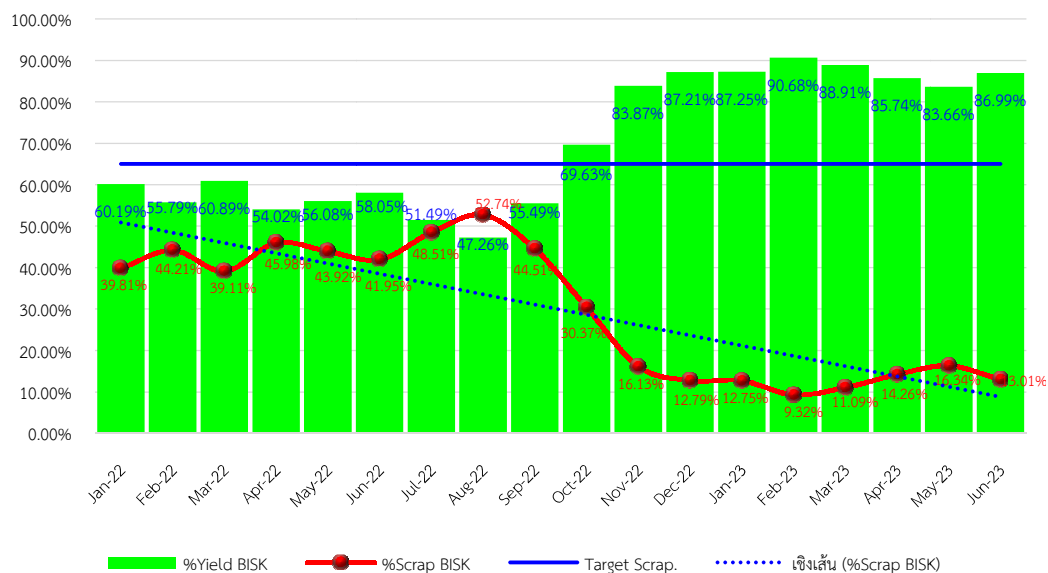


Figure 8 Yield BISK chart and Scrap BISK of ceramic containers

จากกระบวนการดังกล่าวเมื่อผลผลิตออกจากเตาเผาได้ข้อสรุปความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนเริ่มทำการวิจัยมีเปอร์เซ็นต์ของเสีย 43.11% ของมูลค่ารวมของการผลิตโรงงาน ดังนั้นจึงดำเนินการหาสาเหตุเพื่อลดปัญหาหลัก ในกรณีของงานวิจัยนี้การใช้เครื่องมือเพื่อมุ่งเน้นลดข้อบกพร่องในการผลิตได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างแบบจำลองการทดลอง และทดสอบแบบวิธีทากูชิ ซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต จากภาพแผนภูมิควบคุมคุณภาพและการลดความสูญเสียจากการผลิตของเสีย ดังแสดงในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ตัวชี้วัดที่สำคัญของอุตสาหกรรมการผลิตแบบสากล เช่น ประสิทธิภาพ คุณภาพ การลดความสูญเสียจากการผลิตของเสีย ความพร้อมใช้งานและการตั้งค่า ในกรณีศึกษานี้ตามรายงานการทดลองตารางที่ 8 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงการลดของเสียจาก 43.11% เหลือ

13.21% และเพิ่มประสิทธิภาพจาก 56.89% เป็น 86.79% ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญ มูลค่าที่คาดหวังมากกว่าเป้าหมาย 21.76% ในกระบวนการผลิตของภาชนะเซรามิกทำให้บริษัทอยู่ในมูลค่าระดับโลกภายใต้สถานการณ์เดียวกัน จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลของงานวิจัยนี้อยู่ในเงื่อนไขขอบเขตและการยืนยันผลดังภาพที่ 7 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการผลิต (Yield BISK) และของเสีย (Scrap BISK) ของภาชนะเซรามิกทำให้ความสามารถของกระบวนการมีความสามารถเพิ่มมากขึ้นจากการลดความสูญเสียเนื่องจากการผลิตของเสียด้วยแนวคิดแบบลีน จากผลการวิจัยเกี่ยวกับระดับการนำเครื่องมือ Lean ไปใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกโดยการวิจัยดังกล่าวดำเนินการในโรงงานเซรามิกในโปแลนด์และเยอรมนี เครื่องมือลีนได้รับการกำหนดใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก [32] งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตของงานเซรามิก และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสถานประกอบการในการลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตของผู้ประกอบการรายย่อย SME และผู้ประกอบการอื่นๆ ในภาคอุตสาหกรรม โดยควบคุมตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์ การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการผลิต รวมถึงการออกแบบกระบวนการผลิต ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิกในกลุ่มที่มีกระบวนการของเตาเผาแบบเปิด และการเผางานเซรามิกที่มีความหลากหลายทางกายภาพโดยทำการเผาพร้อมกัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตของกระบวนการอบชิ้นงานและในวงกว้างในกลุ่มอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน ควรทำการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบการประยุกต์ใช้ Lean Six Sigma (LSS.) การใช้เป็นแนวทางในการศึกษาการลดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกและสามารถพัฒนาเพิ่มเติมโดยการนำตัวอย่างงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้อ้างอิงในการวิจัยกับหัวข้อที่เกี่ยวข้องกัน จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาการผลิตแบบลีนเพิ่มมูลค่าด้วยการลดของเสียในขณะที่ซิกซ์ซิกมาช่วยจัดความแปรปรวน การใช้แนวคิด Lean Six Sigma การเพิ่มมูลค่าด้วยการกำจัดของเสีย Six sigma (SS) ริเริ่มขึ้นในปี 1980 เพื่อเพิ่มคุณภาพการผลิตในอุตสาหกรรมจาก 3 σ เป็น 6 σ การปรับปรุงกระบวนการลดความแปรปรวนที่สร้างข้อบกพร่อง [33]

References

- [1] Htun, A., et al. (2019). Lean manufacturing, just in time and kanban of Toyota Production System (TPS). *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 8, 469-474.
- [2] Vamsi, N., et al. (2015). Lean Production: Literature Review and Trends. *International Journal of Production Research*, 53(3), 867-885.
- [3] Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean Manufacturing: Literature Review and Research Issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(7), 876-940.
- [4] Sinha, N., & Matharu, M. (2019). A Comprehensive Insight into Lean Management: Literature Review and Trends. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(2), 302-317.
- [5] Kumar, S. (2014). Lean Manufacturing and Its Implementation. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(2), 231-238.
- [6] Bonavia, T., & Marin, J. A. (2006). An Empirical Study of Lean Production in the Ceramic Tile Industry in Spain. *International Journal of Operations & Production Management*,

- 26(5), 505-531.
- [7] Bhamu, J., et al. (2020). Lean Manufacturing Implementation in Ceramic Industry: A Case Study. In: Sangwan, K. & Herrmann, C. (Ed.). *Enhancing Future Skills and Entrepreneurship. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management* (p. 21-30). Cham: Springer.
- [8] Akin, J. E. (2010). *Finite element analysis concepts: Via SolidWorks*. Singapore: World Scientific.
- [9] Oladipupo, O., Adeyinka, A. M., & Durodola, O. (2023). Exploring Lean Six Sigma: A Comprehensive Review of Methodology and its Role in Business Improvement. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 4(6), 939-947.
- [10] Thirugnanam, A., & Sivam, S. P. S. (2016). Lean Process Management Implementation in Ceramic Industry. *International Journal of Chemical Sciences*, 14(1), 415-430.
- [11] Kleszcz, D., et al. (2019). Lean Manufacturing in the Ceramic Industry. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2(1), 457-466.
- [12] Ulewicz, R., & Kleszcz, D. (2021). Implementation of Lean Instruments in Ceramic Industries. *Management Systems in Production Engineering*, 29(3), 203-207.
- [13] Iqbal, M., & Suzianti, A. (2021). New Product Development Process Design for Small and Medium Enterprises: A Systematic Literature Review from the Perspective of Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(2), 153.
- [14] Macchiaroli, R., et al. (2019). The Additive Manufacturing Operations Management Maturity: A Closed or an Open Issue? *Procedia Manufacturing*, 41, 98-105.
- [15] Maware, C., et al. (2022). A Systematic Literature Review of Lean Manufacturing Implementation in Manufacturing-Based Sectors of the Developing and Developed Countries. *International Journal of Lean Six Sigma*, 13(3), 521-556.
- [16] Aksu, B., & Baynal, K. (2010). Shainin and Taguchi Methods and their Comparison on an Application. In *1st International Symposium on Computing in Science & Engineering* (p. 801-809). 3-5 June, 2010, İzmir, Turkey.
- [17] Suthee, W. (1998). *Advanced Ceramics*. Pathum Thani: Thailand National Metal and Materials Technology Center. (in Thai)
- [18] Thiansem, S., et al. (2012). Development of Strength on Ceramic Body by Ceramic Fiber. *Journal of Community Development Research*, 5(1), 40-51. (in Thai)
- [19] Gomez, R. S., et al. (2023). Investigating the Drying Process of Ceramic Sanitary Ware at Low Temperature. *Energies*, 16(10), 4242.
- [20] Mehta, N. C., et al. (2013). Thermal Fatigue Analysis of Induction Melting Furnace Wall for Alumina Ramming Mass. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 2(10), 22-26.

- [21] Aoki, Y., et al. (2019). Finite Element Analysis of the Size Effect on Ceramic Strength. *Materials*, 12(18), 2885.
- [22] Correia, S. L., et al. (2004). Simultaneous Optimization of Linear Firing Shrinkage and Water Absorption of Triaxial Ceramic Bodies Using Experiments Design. *Ceramics International*, 30(6), 917–922.
- [23] Arteaga, A. G., & Calvo, R. (2019). Experimental Analysis of Alternative Production Flow Controls for High Variety Product Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 41, 82-89.
- [24] Rahayu, P. C., & Darvin, V. (2018). Quality Improvement on Ceramic Tiles Production Process with Six Sigma Method (DMAIC) at PT Arwana Citramulia. *Journal Industrial Manufacturing*, 3(2), 101-110.
- [25] Sirichai, Y. (2015). Product Design and Development Process. *Journal of Engineering and Innovation*, 8(1), 131-142. (in Thai)
- [26] Arora, P., et al. (2023). Shrinkage Compensation and Effect of Building Orientation on Mechanical Properties of Ceramic Stereolithography Parts. *Polymers*, 15(19), 3877.
- [27] Ikponmwosa, U. B. (2017). Review on Finite Element Method. *Journal of Applied Science and Environment Management*, 21(5), 999-1002.
- [28] Khalili, K., et al. (2013). Numerical Simulation of Drying Ceramic Using Finite Element and Machine Vision. In *The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering* (p. 388-393). 10-11 October, 2013, Targu Mures, Romania.
- [29] Thanakan, W., & Tatsapol, K. (2016). *Experimental design with Shainin and Taguchi methods: A Case Study of Aluminum Riveting Process* (Research report). Phitsanulok: Naresuan University. (in Thai)
- [30] Wooluru, Y. (2014). The Process Capability Analysis - A Tool for Process Performance Measures and Metrics - A Case Study. *International Journal for Quality Research*, 8(3), 399-416.
- [31] Oummadi, S. (2019). *Drying Behavior of Ceramic Green Bodies: Experimental Characterization and Numerical Modeling* (Doctoral dissertation, Université de Limoges).
- [32] Ulewicz, R., & Kleszcz, D. (2021). Implementation of Lean Instruments in Ceramic Industries. *Management Systems in Production Engineering*, 29(3), 203-207.
- [33] Bento da Silva, I., et al. (2019). A new lean six sigma framework for improving competitiveness. *Acta Scientiarum. Technology*, 41, e37327.