

การเสริมแรงฟันชุดบุงกีหมุ่นด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง

สรายุทธ มาลัยพันธุ์¹ พงศกร สุรินทร์² มนินทรา ใจคำปัน³ ธันวา วิวุฒิ⁴ ชีรณย์ หวานแหลม⁵
ธนาวัฒน์ นันธิสม⁶ ฤทัยภัทร ศุกระศรี^{7*}

^{1,2,3,4,5,6,7*}สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง, ลำปาง, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: rsukrasorn@gmail.com

รับต้นฉบับ: 14 กรกฎาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 2 เมษายน 2569; ตอบรับบทความ: 10 เมษายน 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

การเสริมแรงวัสดุสำหรับฟันชุดบุงกีหมุ่นด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาสาเหตุของการสึกหรอฟันชุดบุงกีหมุ่น ค้นหาปัจจัยของวัสดุเสริมแรงที่มีผลต่อการสึกหรอ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฟันชุดที่เสริมแรงภายใต้ขอบเขตวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ SS400, S50C, SCM440 ชนิดละ 48 ซี่ (1 วงล้อหมุ่น) ขนาด 38×38×250 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักฟันต้นแบบเสริมแรงซึ่งละไม่เกิน 50 กิโลกรัม

ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการวิเคราะห์พบว่า ชนิดของวัสดุส่งผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value = 0.016) และมีขนาดของผลกระทบสูงมาก ($\eta^2 \approx$ ร้อยละ 93.63 และ Cohen's d ที่สูงในทุกคู่เปรียบเทียบ) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัสดุ SCM440 มีความแข็งแรงสูงสุด และแตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญทั้งทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างชัดเจน ในขณะที่ S50C ก็แข็งแรงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญเชิงปฏิบัติเช่นกัน ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบภายหลัง (post-hoc tests) เช่น Bonferroni อาจไม่พบความแตกต่างทางสถิติสำหรับบางคู่ แต่ขนาดของผลกระทบที่สูง (effect size) ยังคงบ่งชี้ถึงความแตกต่างที่สำคัญในเชิงปฏิบัติ ดังนั้น การเลือกใช้ SCM440 จึงเหมาะสมที่สุดหากต้องการความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งคุณสมบัติด้านความแข็งแรงนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงความทนทานต่อการสึกหรอ โดยพิจารณาจากอัตราการทำงานเฉลี่ยต่อชั่วโมงภายใต้ สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนแตกต่างกัน โดยวัสดุ SCM440 ที่มีความแข็งแรงสูงสุดสามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีทรายปนร้อยละ 100 (สภาวะกัดกร่อนสูงที่สุด) ซึ่งผลลัพธ์นี้สนับสนุนข้อสรุปว่า SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C และ SS400 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

คำสำคัญ: ฟันชุดบุงกีหมุ่น การออกแบบการทดลอง เหมืองถ่านหินลิคไนต์ วัสดุเสริมแรง การวิเคราะห์ปัญหา

Bucket Wheel Excavator Teeth Reinforcement via Design of Experiments

Sarayut Malaipurn¹ Pongsakorn Surin² Maninthara Chaikhampan³ Thanwa Wiwut⁴
Teeradon Wanleam⁵ Thanawat Nantisom⁶ Rutaiphat Sukrasorn^{7*}

^{1,2,3,4,5,6,7*} *Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna Lampang, Lampang, Thailand*

*Corresponding author e-mail: rsukrasorn@gmail.com

Received: 14 July 2025; Revised: 2 April 2026; Accepted: 10 April 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

The reinforcement of materials for Bucket Wheel Excavator (BWE) teeth was investigated using the Design of Experiment (DOE) technique. The primary objectives were to identify the causes of wear, determine the material factors affecting wear, and compare the Performance of reinforced teeth across three material types: SS400, S50C, and SCM440. Forty-eight teeth of each type were used on one rotating wheel, sized 38×38×250 mm, with the reinforced teeth weighing no more than 50 kg each.

The DOE analysis revealed that material type significantly impacts hardness (p -value = 0.016) with a very large effect size ($\eta^2 \approx 93.63\%$ and high Cohen's d for all Pairs). Specifically, SCM440 achieved the highest hardness and significantly differed from SS400 both statistically and practically. S50C was also practically harder than SS400. While post-hoc tests (e.g., Bonferroni) did not detect statistical differences for all Pairs (e.g., SCM440 vs. S50C), the consistently high Effect Size confirms the Practical significance of these differences. Therefore, selecting SCM440 is the most suitable choice for maximum hardness. This superior mechanical property is consistent with the field experiment's wear Performance, even under varying abrasive conditions. The field test showed that the high-hardness SCM440 was able to operate in the most severely abrasive environment (100% sand content), which strongly supports the conclusion that SCM440 offers better wear resistance than S50C and SS400, especially in highly corrosive environments.

Keywords: Bucket wheel excavator teeth, Design of experiments, Lignite mine, Reinforcement, Why-why analysis

บทนำ

จากการจดสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 2502003542 และอนุสิทธิบัตรเลขที่ 2503002579 ชื่อการประดิษฐ์ ฟันชุดบั้งกีหมุนเสริมแรง อุตสาหกรรมเหมืองแร่เน้นการขุดแร่ใต้ดินด้วยเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ต้องทำงานหนักและต่อเนื่องเพื่อนำแร่มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะเครื่องจักรที่เรียกว่า รถขุดบั้งกีหมุน (bucket wheel excavator) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการขุดแร่ได้ปริมาณมากถึง 2,000 ตันต่อชั่วโมงและมีน้ำหนักมากถึง 990 ตัน เครื่องจักรเหล่านี้ต้องเผชิญกับการกระแทกและเสียดสีตลอดเวลา [1] ดังรูปที่ 1 หากรถขุดบั้งกีหมุนมีการหยุดระบบการขุดดินบ่อยครั้งเพื่อซ่อมเครื่องจักรในส่วนของการเปลี่ยนฟันชุดก็จะส่งผลกระทบต่อแผนการผลิตที่กำหนดไว้

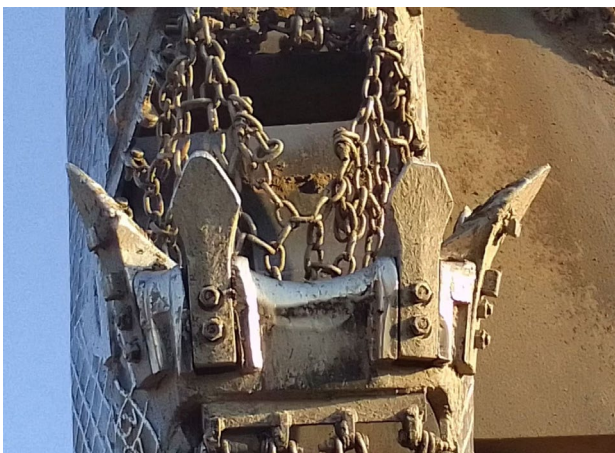


แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปเมนต์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 1: ลักษณะการทำงานของฟันชุดบั้งกีหมุน

ฟันชุดบั้งกีของรถขุดบั้งกีหมุนที่บริษัทใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 16–18 ชั่วโมง หรือประมาณ 16,200 ตัน บริษัทได้ทำการยืดอายุการใช้งานโดยทำการเสริมแรงด้วยวัสดุเหล็กเพลลา เข้าไปจับยึดกับตัวฟันชุดเดิมซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานได้เพิ่มขึ้นเป็น 19–20 ชั่วโมง หรือประมาณ 18,000 ตัน สาเหตุหลักของการสึกหรอของฟันชุดบั้งกีในรถขุดบั้งกีหมุนนั้นมาจากสภาพหน้างานเหมืองถ่านหินลึกในดัดที่มีชั้นหินและชั้นดินที่ต่างกันก่อให้เกิดการสึกหรอ นอกจากนี้แล้วยังส่งผลให้บริษัทต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเสริมแรงตัวฟันชุดรถขุดบั้งกีหมุนไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนฟันใหม่หรือการเสริมฟันด้วยวัสดุ SS400 และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม L-55 (มาตรฐานสากล AWS A5.1: E7016) ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนดังกล่าวเป็นจำนวนที่มากถึงปีละ 1 ล้านบาท โดยประมาณ



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปเมนต์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 2: ฟันชุดบั้งกีหมุนและการเสริมแรงด้วยวัสดุเหล็กเพลลา SS400 ในปัจจุบัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของฟันชุดบุงก์ในรถชุดบุงก์ที่หมุน วิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอฟันชุดบุงก์ที่หมุนด้วยเทคนิค Why-Why Analysis ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยคัดเลือกวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S50C และ SCM440 ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดในการทดลองแสดงผลโดยสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบคุณสมบัติและเหตุผลความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

SS400	S50C	SCM440
เป็นวัสดุพื้นฐานที่บริษัทใช้อยู่แล้ว (baseline) มีความเหนียวดี เชื่อมง่าย และต้นทุนต่ำ จึงเป็นตัวเลือกเปรียบเทียบเชิงปฏิบัติ (benchmark) เพื่อวัดประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ “คุ้มค่า” ในภาคสนาม	เหล็กคาร์บอนระดับกลางที่สามารถให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า SS400 ในขณะที่เดียวกันยังคงมีคุณสมบัติการเชื่อมและการชุบที่เหมาะสม จึงเป็นตัวเลือกที่สมดุลระหว่างประสิทธิภาพและต้นทุน	เหล็กกล้าอัลลอย chromoly (chromium-molybdenum steel) ที่เมื่อผ่านการอบชุบหรือการผลิตที่เหมาะสมจะให้ความแข็งแรงสูงและทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุดในกลุ่มที่ทดลอง แต่ยังคงมีความเหนียวเพียงพอหากควบคุมกระบวนการผลิต/เชื่อมอย่างเหมาะสม จึงเป็นตัวเลือกเชิงวิศวกรรมที่คาดว่าจะยืดอายุการใช้งานมากที่สุด

วัสดุเสริมแรงที่บริษัทเลือกใช้ในปัจจุบันเมื่อนำมาเทียบกับวัสดุ SCM440 และ S50C ที่มีขนาดเท่ากันคือ 38x38x250 มิลลิเมตร และทำการทดลองใช้งานในสภาพหน้าดินที่มีความเหมือนหรือใกล้เคียงกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค้นหาวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมสำหรับเสริมแรงฟันชุด การออกแบบวัสดุเสริมแรง ดังรูปที่ 2 ในการทดลองและทดสอบวัสดุเสริมแรงนี้จะทำการเสริมแรงด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม YAWATA L-55 (มาตรฐานสากล AWS A5.1: E7016) ที่มีคุณสมบัติทนต่อการแตกร้าวและสึกหรอได้ดี โดยทำการเชื่อมที่อุณหภูมิเหมาะสมคือ 140–190 องศาเซลเซียส (°C) ทำการทดลองใช้งานจริงและเก็บข้อมูลชั่วโมงการใช้งานหลังทำการทดสอบวัสดุเสริมแรงดังกล่าว นำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และวิเคราะห์ผลการทดลองทำการสรุปผลและจัดทำต้นแบบฟันชุดบุงก์ที่หมุนที่มีประสิทธิภาพเพื่อขยายผลในอนาคต

1. ขอบข่ายงานวิจัย

1.1 อิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมที่หลากหลาย: งานวิจัยนี้ได้พิจารณาสภาพหน้าดินที่มีทรายปนในสัดส่วนที่จำกัด ร้อยละ 100 และ 50 ในความเป็นจริง หน้าดินในสภาพการทำงานจริงอาจมีความหลากหลายมากกว่านี้ เช่น ปริมาณความชื้น ขนาดและรูปร่างของอนุภาคดิน หรือการปนเปื้อนของวัสดุอื่น ๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอที่แตกต่างกัน

1.2 การทดสอบภาคสนามดำเนินการในพื้นที่เหมืองถ่านหินแห่งเดียว: ซึ่งมีสภาพธรณีวิทยาและองค์ประกอบของดินเฉพาะตัว การเปรียบเทียบผลในสภาพดินหรือเหมืองอื่นที่มีระดับความชื้น ความแข็งแรงของชั้นหิน หรือองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน อาจให้ผลลัพธ์ที่หลากหลายมากขึ้นและเพิ่มความครอบคลุมของข้อมูล

1.3 ลักษณะชั้นดินที่เปลี่ยนแปลงตามแนวลาดของการขุด: โดยในบริเวณด้านบนมีดินเหนียวปนทราย (ร้อยละ 50 โดยประมาณ) และบริเวณด้านล่างเป็นทรายหยาบล้วน (ร้อยละ 100 โดยประมาณ) การปรับเปลี่ยนให้ใช้ดินชนิดเดียวกันจึงเป็นไปได้ยากในภาคสนามจริง

1.4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ: นอกเหนือจากการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกันแล้ว ยังมีเทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ ที่อาจมีศักยภาพ เช่น การเคลือบผิวแข็ง (surface hardening) หรือการเชื่อมพอกผิวแข็ง (hard facing) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุที่เลือกใช้กับเทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ อาจเป็นประโยชน์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

2.1 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน: การใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่า จะช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนฟันชุด ทำให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดเวลาหยุดทำงาน (downtime) และเพิ่มผลผลิตโดยรวม

2.2 การพัฒนาองค์ความรู้: งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทำงานจริง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมวัสดุและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อวิเคราะห์และระบุสาเหตุหลักของการสึกหรอของฟันชุดบุงกีหมุนที่ใช้งานจริงในสภาพหน้างานเหมืองถ่านหินลึกในดั้น
- 2) เพื่อค้นหาและประเมินปัจจัยของวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S50C และ SCM440 ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอของฟันชุดบุงกีหมุน โดยใช้เทคนิค DOE และ one-way ANOVA
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยึดอายุการใช้งานของฟันชุดบุงกีหมุนที่ได้รับการเสริมแรงด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานจริง เพื่อค้นหาวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุด

ทบทวนวรรณกรรม

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงภายนอกและการสึกหรอระหว่างการทำงาน โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่ฟันชุดต้องรับทั้งแรงกระแทกและแรงเสียดสีอย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของฟันชุด ได้แก่ ความแข็ง (hardness) และ ความเหนียว (toughness) ซึ่งทั้งสองคุณสมบัตินี้มีความสัมพันธ์กันในเชิงสมดุล กล่าวคือ วัสดุที่มีความแข็งสูงมักมีแนวโน้มที่จะเปราะมากขึ้น และวัสดุที่เหนียวมากมักมีความแข็งลดลง [2], [3]

ความแข็ง หมายถึง ความต้านทานของวัสดุต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวร เช่น การขีดข่วน การกด หรือการสึกหรอ วัสดุที่มีความแข็งสูงจะทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของฟันชุดที่สัมผัสดิน หิน และทรายโดยตรง [4] เหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ มีความแข็งแตกต่างกันตามองค์ประกอบทางเคมีและกระบวนการทางความร้อน เช่น SS400 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีความแข็งต่ำ (ประมาณ 130 HB) แต่มีความเหนียวสูง เหมาะกับงานทั่วไปที่ไม่ต้องรับแรงสึกหรอมาก S50C เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ความแข็งสูงขึ้น (ประมาณ 180–220 HB) และสามารถชุบแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว SCM440 (AISI 4140) เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งสูง (ประมาณ 250 HB) หรือสูงกว่าเมื่อผ่านการอบชุบ และมีโครงสร้างจุลภาคที่ให้ความต้านทานต่อการสึกหรอและแรงกระแทกได้ดี [5], [6] ในทำนองเดียวกัน Ranjan [7] รายงานว่าเหล็ก SCM440 เมื่อผ่านกระบวนการ Gas Metal Arc Welding (GMAW) ให้ค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุคาร์บอนทั่วไปกว่าร้อยละ 80

ความเหนียว เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนแตกหัก วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะสามารถต้านแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้โดยไม่แตกหัก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในฟันชุดที่ต้องรับแรงกระแทกจากหินหรือดินแข็ง [2] แม้ว่าวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น SCM440 จะทนต่อการสึกหรอได้ดี แต่หากขาดความเหนียว อาจเกิดการแตกบิ่นในบริเวณขอบฟันได้ง่าย ดังนั้นการเลือกวัสดุสำหรับฟันชุดจึงต้องคำนึงถึงสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว [3], [6] จากผลการทดลองในงานวิจัยปัจจุบัน พบว่า SCM440 มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด (ประมาณ 249.5 HB) และทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุดในสภาพดินที่มีทรายปนร้อยละ 100 ซึ่งเป็นสภาวะกัดกร่อนรุนแรงที่สุด ขณะที่ S50C ให้ผลลัพธ์ที่ดีในระดับปานกลาง และ SS400 มีความแข็งต่ำสุดและสึกหรอเร็วที่สุด [4] ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับทฤษฎีคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า กล่าวคือ ความแข็งที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอโดยตรง โดยเฉพาะเมื่อฟันชุดทำงานในสภาพที่มีการเสียดสีสูง [7], [8] อย่างไรก็ตาม ความเหนียวของวัสดุยังคงมีบทบาทสำคัญ โดยวัสดุที่แข็งมากเกินไปอาจเปราะ ซึ่งต้องพิจารณาการอบชุบหรือเคลือบผิวเพื่อปรับสมดุล เช่น กระบวนการการชุบ (tempering) หรือ case hardening เพื่อให้ SCM440 มีทั้งความแข็งและความเหนียวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อเนื่องในเหมืองเปิด [9]

การสึกหรอ (wear) ของฟันชุดบุงกีหมุนเกิดจากการทำงานภายใต้แรงเสียดทานและแรงกระแทกซ้ำ ๆ ระหว่างพื้นผิวโลหะกับอนุภาคดิน ทราย และหินในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง กลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดจึงแตกต่างกันไปตาม องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) และโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของวัสดุ [10], [11], [12] ซึ่งสามารถสรุปกลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: กลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	โครงสร้างจุลภาคหลัก	กลไกการสึกหรอเด่น	ลักษณะการสึกหรอที่สังเกตได้
SS400	Ferrite + Pearlite	Abrasive + Adhesive	ผิวเกิดร่องลึกและการลอกผิว
S50C	Ferrite + Pearlite (หนาแน่นกว่า)	Mild Abrasive + Surface Fatigue	ผิวเป็นรอยขีดและหลุดเป็นแผ่นบาง
SCM440	Tempered Martensite	Oxidative + Micro-cutting	ผิวเรียบกว่า มีร่องตื้นและฟิล์มออกไซด์บาง ๆ

การศึกษาถึงการออกแบบวัสดุสำหรับฟันชุดบุงกีหมุนถือเป็นหัวข้อที่สำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมก่อสร้างและเหมืองแร่ โดยฟันชุดเป็นส่วนสำคัญที่ต้องเผชิญกับการสึกหรอในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย ซึ่งการวิเคราะห์และพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมในการเสริมแรงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา [13] ในระยะหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุและวิธีการเสริมแรงที่มีผลต่อการสึกหรอของฟันชุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เทคนิค DOE ที่ช่วยให้สามารถวางแผนการทดลองได้อย่างเป็นระบบ ลดจำนวนครั้งในการทดสอบที่ไม่จำเป็น แต่ยังคงไว้ซึ่งความแม่นยำในการทำนายผลลัพธ์ ทำให้สามารถพัฒนาวัสดุคอมโพสิตหรือสูตรการชุบแข็งฟันชุดได้รวดเร็วและประหยัดงบประมาณมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาที่สำคัญเกี่ยวกับวัสดุเสริมแรงหลายชนิด แต่ก็ยังมีช่องว่างในการทำความเข้าใจลักษณะเฉพาะของการสึกหรอภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงการวิเคราะห์เชิงสถิติ เช่น one-way ANOVA ที่สามารถใช้เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ [14], [15] นอกจากนี้ ยังมีการวิจัยที่เน้นย้ำว่าการใช้วิธีการที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลองสามารถช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเรื่องการเลือกวัสดุ [16], [17] การบูรณาการความรู้จากการศึกษาเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวัสดุและกระบวนการในการทำฟันชุดที่เหมาะสม แต่ยังมีการศึกษาที่น้อยครั้งเกี่ยวกับปัจจัยเฉพาะที่สามารถส่งผลต่อการสึกหรออย่างชัดเจนในแต่ละชนิดของวัสดุ การทดสอบประสิทธิภาพที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขทางกลต่าง ๆ [18], [19]

ในการศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อเติมเต็มช่องว่างนี้ โดยการสำรวจรูปแบบการสึกหรอและการทดลองวัสดุเสริมแรงในฟันชุดบุงกีหมุนทั้งสามชนิด พร้อมใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้อย่างสมบูรณ์ [20], [21] ความหมายและความสำคัญของการศึกษานี้ไม่เพียงแต่จะช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุในฟันชุด แต่ยังส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมโดยรวมที่ใช้เครื่องจักรเหล่านี้ ทำให้เกิดการประหยัดต้นทุนและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการดำเนินงาน [22], [23] การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุทั้งสามชนิดในบริบทนี้จึงถือว่าสำคัญและมีคุณค่าต่อการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต [24]

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ค้นหาสาเหตุของปัญหา

จากการสัมภาษณ์วิศวกรเครื่องกล และหัวหน้าผู้ควบคุมงาน ซึ่งสรุปประเด็นที่นำมาพิจารณาได้ 3 สาเหตุหลักคือ 1) ตำแหน่งของฟันชุดบุงกีหมุนเกิดการสึกหรอ 2) ฟันเดิมที่ติดกับตัวรถชุดบุงกีหมุน 3) การเสริมแบบเดิมในปัจจุบัน ซึ่งสรุปได้ว่าผู้วิจัยทำการเสริมแรงด้วยวัสดุ 3 ชนิด ประกอบด้วย SS400 S50C และ SCM440 เพื่อเปรียบเทียบชั่วโมงในการทำงานของเหล็กทั้ง 3 ชนิด ดังตารางที่ 3

จากการวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis สรุปได้ว่า ปัญหาที่ทางบริษัทพบเจอบ่อยครั้งคือการเปลี่ยนฟันชุดของรถชุดบุงกีหมุน (tooth bucket wheel) บ่อย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดหัวข้อสำรวจขึ้นมาดังนี้

1.1 การสึกหรอของตำแหน่งฟันชุด: พบว่าตำแหน่งของฟันชุดที่มีความเสียหายน้อยที่สุดคือ ฟันซ้ายในและขวาใน มีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 10 ของความเสียหายพิจารณาเป็น OK และฟันซ้ายนอก มีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 50 ของความเสียหาย ฟันขวานอกมีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 30 ของความเสียหายพิจารณาเป็น NG เนื่องจากฟันซ้ายนอกและขวานอกเป็นตำแหน่งที่ชุดดักหน้าดินก่อนโดยวิธีการแก้ไขปัญหาคือเปลี่ยนฟันซี่ใหม่และเสริมแรงฟันชุด

1.2 ฟันชุดเดิมที่ติดกับตัวรถชุดบุงกีหมุน: เกิดการแตกหักและสึกหรอพิจารณาเป็น NG สาเหตุเกิดจากวัสดุเกรดต่ำและส่วนผสมของโลหะไม่ได้มาตรฐานที่ใช้สำหรับงานชุดวิธีการแก้ไขปัญหาคือทำการหล่อโลหะโลหะผสมที่ได้มาตรฐาน

1.3 การเสริมแรงด้วยวัสดุแบบเดิม: ทำให้วัสดุเสริมแรงหลุด แตกหัก และสึกหรอ สาเหตุเกิดจากการเชื่อมไม่ได้มาตรฐานและเหล็กเพลามีความแข็งแรงเกินไป วิธีการแก้ไขปัญหาคือใช้ลวดเชื่อมทนต่อการแตกร้าวยี่ห้อ YAWATA L-55 ขนาด 4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิในการหลอมละลายของลวดเชื่อม 140-190 °C (pre-heating) และเพิ่มความเหนียวในเนื้อเหล็ก

1.4 การเสริมแรงด้วยวัสดุต้นแบบที่วิจัย: พิจารณาเป็น OK วิธีการแก้ไขปัญหาคือทำการเปรียบเทียบวัสดุเสริมแรงทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการออกแบบการทดลองโดยนำเหล็กเพลาลูก SC440 ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร เหล็กเพลาลูก SS400 ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร เหล็กเพลาลูก S50C ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร

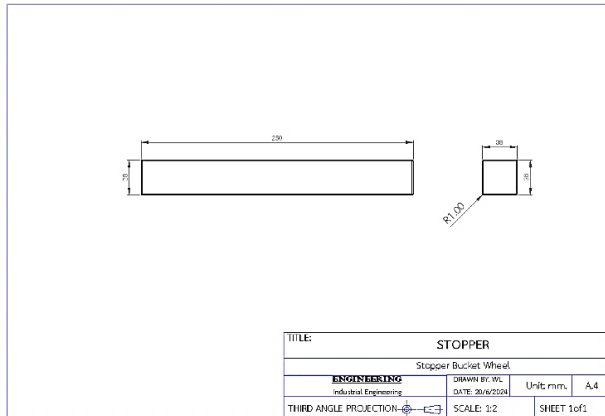
ตารางที่ 3: การวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why Analysis

กิจกรรม		การบำรุงรักษา		แบบฟอร์ม Why Why Analysis					หมายเลขที่	
		การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง	✓	ปรับปรุง Machine Failure การหยุดเล็กน้อยๆ ✓ Delect&Rework อุบัติเหตุ การเพิ่มประสิทธิภาพ					วันที่จัดทำ	
แผนก			Lineการผลิต/เครื่องจักรหมายเลข		สิ่งที่ต้องการดำเนินการ		เนื้อหาสาระ	ผู้รับผิดชอบ	กำหนดเสร็จ	
สภาพที่เกิดขึ้น	ปรากฏการณ์	เปลี่ยนTooth Bucket Wheel บ่อย	ตำแหน่งที่เกิด	ฟันชุดบุงกีของรถขุดบุงกีทั้งหมด	เขียน One Point Lesson					
					ทบทวนมาตรฐานเดิม		✓	กำหนดมาตรฐานใน	Process En	
					ทำCorrective Maintenance			Tool Characteristics	Process En	
					ขยายผลการปรับปรุง		✓	แผนการขยายผล	Process En	
สภาพที่เกิด		หัวข้อสำรวจ	พิจารณา	ทำไม 1.	ทำไม 2.	ทำไม 3.	พิจารณา	การแก้ไขและมาตรการป้องกัน		
 มีการเปลี่ยน Tooth Bucket Wheelบ่อย	1.การสึกหรอของตำแหน่งฟันชุด	OK	ซ้ายใน	ร้อยละ 10 ของความเสียหาย	เป็นตำแหน่งที่น้ำชุดตกหน้าดินก่อน	NG	เปลี่ยนฟันชุดซี่ใหม่ เสริมแรงฟันชุด			
		NG	ซ้ายนอก	ร้อยละ 50 ของความเสียหาย						
		OK	ขวาใน	ร้อยละ 10 ของความเสียหาย						
		NG	ขวานอก	ร้อยละ 30 ของความเสียหาย						
	2. ฟันชุดเดิมที่ติดกับตัวรถขุดบุงกีทั้งหมด	NG	ฟันแตกหักและสึกหรอ		วัสดุเกรดต่ำ	ส่วนผสมโลหะไม่ได้มาตรฐานที่ใช้สำหรับงานชุด	NG	หล่อใหม่ด้วยโลหะผสมที่ได้มาตรฐาน		
		3. วัสดุเสริมแรง (แบบเดิมในปัจจุบัน)	NG	วัสดุเสริมแรง หลุด	เชื่อมไม่ได้มาตรฐาน	เปลี่ยนลวดเชื่อม	NG	ใช้ลวดเชื่อมชนิดทนทาน ทนการแตกร้าว YAWATA L-55 ขนาด 4 มม. เชื่อมที่อุณหภูมิ 100-140°C		
	NG		วัสดุเสริมแรง แตก หัก และสึกหรอ	เหล็กเพลามีความแข็งแรงเกินไปไปเกิดการเปราะ แตกหัก	สภาพหน้าดินแข็ง	NG	เพิ่มความเหนียวในเนื้อเหล็ก			
	4. วัสดุเสริมแรงต้นแบบที่ได้มาตรฐาน	OK					OK	เปรียบเทียบวัสดุเสริมแรงทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง		
								เหล็กเพลาลูก SCM440 ขนาด 38x38x250 มม. เหล็กเพลาลูก SS400 ขนาด 38x38x250 มม. เหล็กเพลาลูก S50C ขนาด 38x38x250 มม.		

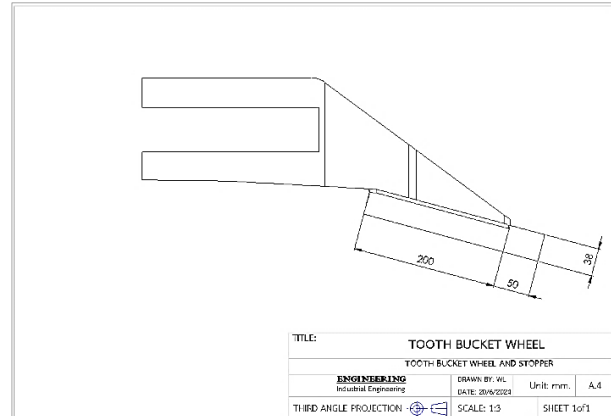
2. การออกแบบและสร้างฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดเสริมแรง

2.1 การกำหนดวัสดุเสริมแรง : การออกแบบและการกำหนดวัสดุเสริมแรงฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ติดตั้งเข้ากับฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดโดยการเชื่อม

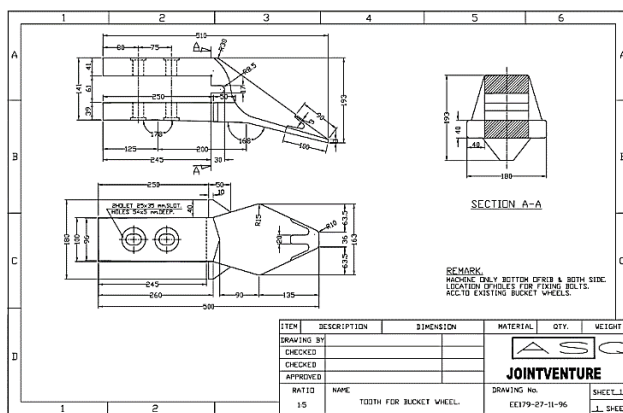
2.2 การออกแบบวัสดุเสริมแรง : หาวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด และได้ทำการกำหนดความยาวของวัสดุเสริมแรงให้เหมาะสมกับฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดโดยใช้เหล็ก SS400 SC440 และ S50C ชนิดละ 48 อัน ขนาดเท่ากันคือ 38x38x250 มิลลิเมตร เพราะเหล็กเพลาลูกขนาด 38x38 มิลลิเมตร เหมาะที่สุดในการเลือกมาเป็นวัสดุในครั้งนี้ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3: แบบเหล็กกล้าเสริมแรง 2D

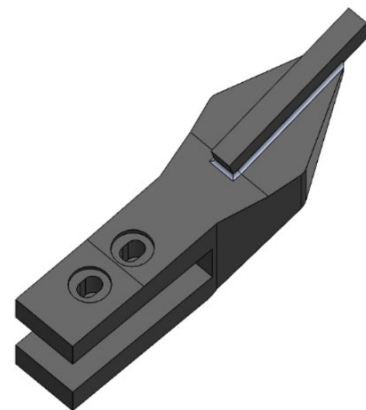


รูปที่ 4: แบบฟันชุดบั้งก็้หมุนติดตั้งวัสดุเสริมแรง 2D



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปแมนท์ จำกัด (มหาชน)

รูปที่ 5: แบบขนาดฟันชุดบั้งก็้หมุน 2D



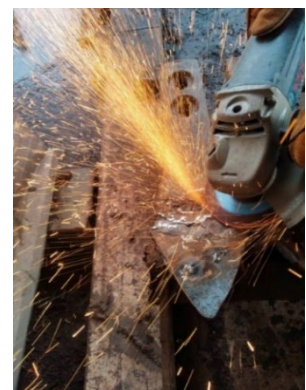
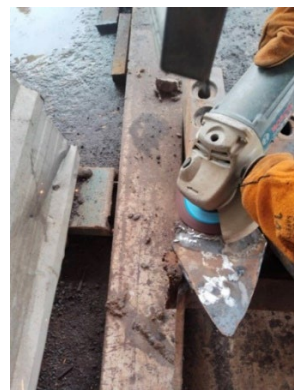
รูปที่ 6: แบบฟันชุดบั้งก็้หมุนติดตั้งวัสดุเสริมแรง 3D

3. ขั้นตอนการติดตั้งวัสดุเสริมแรง

3.1 ขั้นตอนที่ 1: นำฟันชุดบั้งก็้หมุนมาตัดเหล็กเสริมแรงอันเก่าที่เหลืออกโดยใช้หัวตัดแก๊สเลาะออกจนไม่ให้เหลือเศษเหล็กเดิมหมดเพื่อที่จะนำไปเจียรผิวดังรูปที่ 7



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปแมนท์ จำกัด (มหาชน)

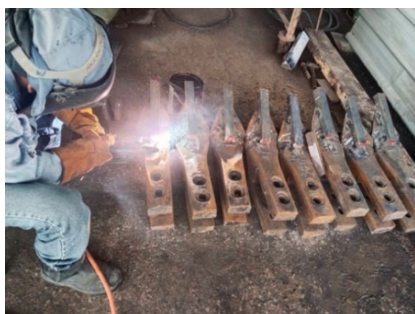


รูปที่ 7: การตัดหรือเลาะวัสดุเสริมแรงเดิมที่เหลืออก

รูปที่ 8: การเจียรผิวฟันชุดบั้งก็้หมุน

3.2 ขั้นตอนที่ 2: ทำการกำจัดสแลกออกจากแนวเชื่อมจนหมดแล้วจากนั้นนำไปเจียรผิวพื้นชุดบั้งก็หมุนให้และสะอาดที่สุด เพื่อที่จะติดตั้งเหล็กเสริมแรง และในงานเชื่อมที่ดีต้องทำชิ้นงานให้สะอาดที่สุดดังรูปที่ 8

3.3 ขั้นตอนที่ 3: นำพื้นชุดบั้งก็หมุนมาเชื่อมติดตั้งเหล็ก โดยใช้ลวดเชื่อม YAWATA L-55 ในการเชื่อมนั้นก็จะมีเชื่อมทับซ้อนแนวอย่างน้อย 3 แนว เนื่องจากความหนาของชิ้นงานและมาตรฐานการเชื่อม (WPS) ดังรูปที่ 9



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอควิเบนท์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 10: พื้นชุดบั้งก็หมุนที่ติดตั้งวัสดุเสริมแรงเสร็จสิ้น

ขั้นตอนการติดตั้งเสริมวัสดุเสริมแรงของพื้นชุดบั้งก็หมุนนั้นก็จะไม่แตกต่างกันของทั้ง 3 วัสดุ และจำกั้น้ำหนักต่อพื้นชุดในการติดตั้งเสริมวัสดุเสริมแรงจะไม่เกิน 50 กิโลกรัม ต่อ 1 พื้นชุด หากเกินจะส่งผลทำให้เครื่องจักรส่วนอื่นพังและส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการทำงานรวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

4. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

4.1 ขั้นตอนที่ 1 การทำความเข้าใจปัญหาและตั้งวัตถุประสงค์ (Understanding the Problem and Setting Objectives)

4.1.1 ปัญหา: ตารางแสดงค่าความแข็งของวัสดุ 3 ชนิด (SS400 SCM440 และ S50C) โดยมีระดับความแข็ง “ต่ำ” และ “สูง” ของแต่ละวัสดุ

4.1.2 วัตถุประสงค์: 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุต่อความแข็งของวัสดุ 2) เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างวัสดุแต่ละชนิดที่ระดับความแข็งต่างกัน (ต่ำและสูง) 3) เพื่อระบุวัสดุที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดหรือต่ำสุดตามต้องการในบริบทของการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

4.2 ขั้นตอนที่ 2 การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Selecting Factors, Levels, and Ranges)

4.2.1 ปัจจัย: สิ่งที่ต้องการศึกษาว่ามีผลต่อผลลัพธ์อย่างไร กำหนดให้ปัจจัยหลักคือ “ชนิดของวัสดุ”

4.2.2 ระดับ: ค่าหรือลักษณะเฉพาะของแต่ละปัจจัยที่สนใจ “ชนิดของวัสดุ” มี 3 ระดับ ได้แก่ SS400 SCM440 และ S50C

4.2.3 ขอบเขต: ระบุ “ระดับต่ำ” และ “ระดับสูง” ของความแข็งสำหรับแต่ละวัสดุด้วยวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยเครื่องวัดความแข็ง (hardness tester) รุ่น MH600 MITECH ผลการวัดค่าความแข็งของวัสดุแต่ละชนิดและการระบุระดับได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4: การควบคุมปัจจัย

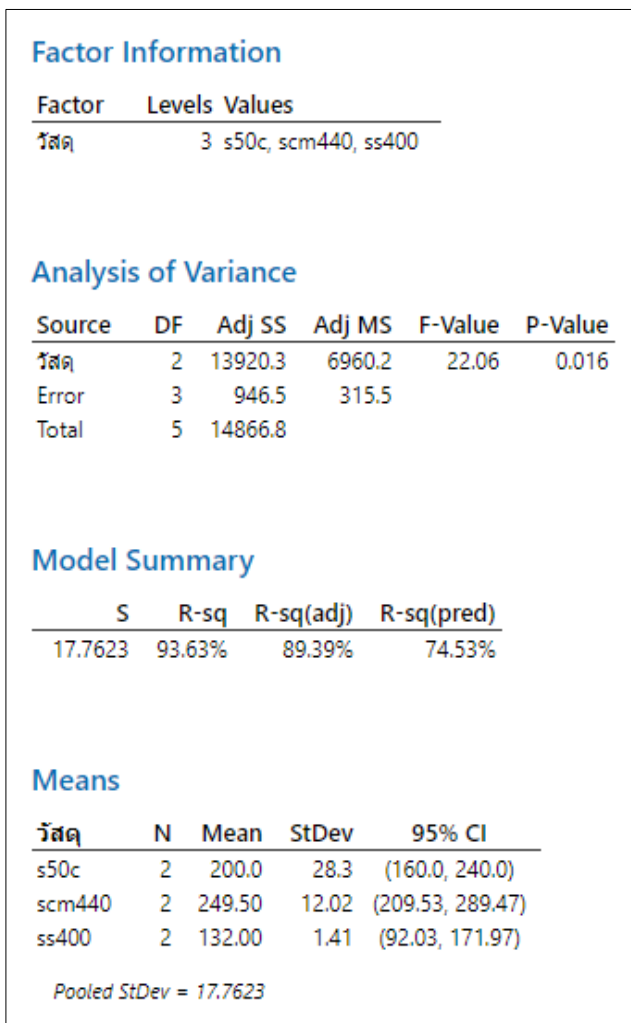
ปัจจัย		ระดับ		หน่วย
		ระดับต่ำ	ระดับสูง	
ความแข็งวัสดุ SS400	A	131	133	HB
ความแข็งวัสดุ SCM440	B	241	258	HB
ความแข็งวัสดุ S50C	C	180	220	HB

4.3 ขั้นตอนที่ 3 การเลือกตัวแปรผลลัพธ์ (Selecting Response Variables): ตัวแปรคือ “ความแข็ง” โดยใช้มาตรฐานการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ Brinell (HB) ตามลักษณะวัสดุ

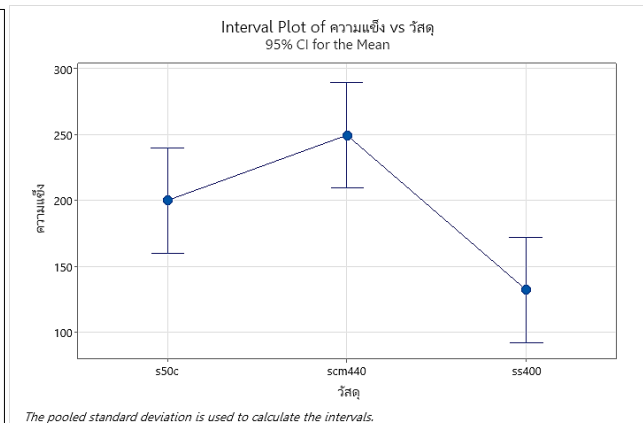
4.4 ขั้นตอนที่ 4 การเลือกรูปแบบการทดลอง (Selecting the Experimental Design): ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และจำนวนปัจจัย/ระดับ จากข้อมูลในตาราง (ปัจจัยเดียว 3 ระดับ) รูปแบบการทดลองที่เหมาะสมอาจเป็นการทดลองแบบปัจจัยเดียว (one-way ANOVA or single factor design) 1) เนื่องจากมีปัจจัยเดียวคือ “ชนิดของวัสดุ” ที่มี 3 ระดับ (SS400 SCM440 และ S50C) สามารถใช้การทดลองแบบปัจจัยเดียวเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งระหว่างวัสดุทั้งสามชนิดได้ 2) การเก็บข้อมูลความแข็งสำหรับวัสดุแต่ละชนิดโดยอาจจะมีการทำซ้ำ (replications) สำหรับแต่ละชนิด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์และสามารถทำการวิเคราะห์ทางสถิติได้ เช่น ANOVA

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ANOVA

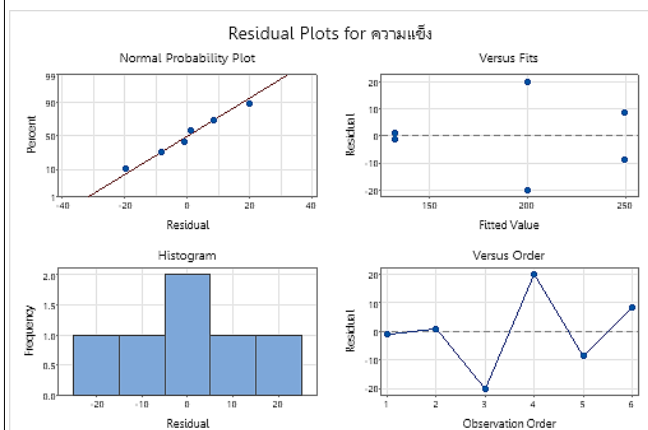
การพัฒนาวัสดุเสริมแรงของฟันชุดบุงก็หมุน เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนากระบวนการผลิต และรูปแบบ one-way ANOVA เป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของวัสดุเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ แสดงขั้นตอนการทำงานและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบการทดลอง และเมื่อพิจารณาตัวแปรสำหรับวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ดังรูปที่ 11 และสามารถคำนวณได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11: การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ANOVA
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0



รูปที่ 12: การวิเคราะห์ผล interval plots ความแข็งกับวัสดุ
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0



รูปที่ 13: การวิเคราะห์ผล residual plots สำหรับความแข็ง
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0

ผลการวิเคราะห์ค่า $p\text{-value} = 0.016$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของวัสดุ (ที่ระดับนัยสำคัญทั่วไป) สามารถสรุปได้ว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ชนิดของวัสดุเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ใช่เกิดจากความบังเอิญ อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว การรู้นัยสำคัญทางสถิติยังไม่เพียงพอ จำเป็นต้องพิจารณาขนาดของผลกระทบเพื่อทำความเข้าใจถึงความสำคัญในเชิงปฏิบัติของความแตกต่างนี้

Partial Eta-squared (η_p^2) หรือ Eta-squared (η^2) ในบริบทของ ANOVA, η^2 บอกสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตาม (ความแข็งแรง) ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ (วัสดุ) สามารถคำนวณ η^2 ได้จากตาราง ANOVA รายละเอียดดังสมการที่ (1)

$$\eta^2 = \frac{\text{Adj SS for Factor}}{\text{Total SS}} = \frac{13,920.3}{14,866.8} \approx 0.9363 \text{ หรือ } 93.63\% \quad (1)$$

การตีความ ค่า $\eta^2 = 0.9363$ หรือร้อยละ 93.63 เป็นค่าที่สูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า R-sq ใน model summary หมายความว่า ประมาณร้อยละ 93.63 ของความแปรปรวนทั้งหมดในค่าความแข็งแรงสามารถอธิบายได้ด้วยชนิดของวัสดุ แสดงให้เห็นว่าชนิดของวัสดุมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรง และเป็นปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนความแตกต่างของความแข็งแรงที่สังเกตเห็น

จากแนวทางการตีความของ Cohen 1) $\eta^2 = 0.01$: ผลกระทบเล็ก 2) $\eta^2 = 0.06$: ผลกระทบปานกลาง 3) $\eta^2 = 0.14$: ผลกระทบใหญ่ ค่า 0.9363 นั้นสูงกว่าเกณฑ์ ผลกระทบใหญ่มาก แสดงให้เห็นถึง ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก (very large effect) ของชนิดวัสดุต่อความแข็งแรง

6. Cohen's d สำหรับการเปรียบเทียบแต่ละคู่ (จากการเปรียบเทียบภายหลัง; Post-hoc Tests)

ถึงแม้จะไม่ได้ผลลัพธ์ของ post-hoc tests โดยตรง แต่สามารถคำนวณ Cohen's d โดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม (Pooled St.Dev = 17.7623) เพื่อประเมินขนาดของความแตกต่างระหว่างคู่ของวัสดุ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Cohen's d

คู่ที่ 1 : SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2 : SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3 : S50C vs. SS400
Mean (SCM440) = 249.50 Mean (SS400) = 132.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{249.50-132.00}{17.7623}$ ≈ 6.61	Mean (SCM440) = 249.50 Mean (S50C) = 200.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{249.50-200.00}{17.7623}$ ≈ 2.79	Mean (S50C) = 200.00 Mean (SS400) = 132.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{200.00-132.00}{17.7623}$ ≈ 3.83
ค่า d = 6.61 เป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก แสดงว่าความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่าง SCM440 และ SS400 ค่าความแข็งแรงของ SCM440 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ SS400	ค่า d = 2.79 ยังคงเป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก แสดงว่า SCM440 ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่า S50C อย่างมีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ	ค่า d = 3.83 ก็เป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มากเช่นกัน แสดงว่า S50C ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ

การรายงานผลขนาดของผลกระทบ (effect size reporting in psychology) ได้กำหนดเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการตีความค่าขนาดของผลกระทบในงานวิจัยเชิงสถิติไว้ดังนี้

$\eta^2 = 0.01$ หมายถึง ผลกระทบขนาดเล็ก (small effect)

$\eta^2 = 0.06$ หมายถึง ผลกระทบขนาดปานกลาง (medium effect)

$\eta^2 = 0.14$ หมายถึง ผลกระทบขนาดใหญ่ (large effect)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ($\eta^2 \approx 0.9363$) พบว่าอยู่ในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์ผลกระทบขนาดใหญ่หลายเท่า ซึ่งจัดเป็น ผลกระทบขนาดใหญ่มาก และสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติที่ระบุว่าค่าที่เกินกว่า 0.14 สามารถจัดอยู่ในระดับ “มีอิทธิพลอย่างมากในทางปฏิบัติ” ได้ [25], [26], [27] นอกจากนี้ ในส่วนของการคำนวณค่า Cohen’s d สำหรับการเปรียบเทียบแต่ละคู่ของวัสดุ (ตารางที่ 5–7) ก็ใช้เกณฑ์มาตรฐานเดียวกัน โดยอ้างอิงจาก ซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

$d = 0.2 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดเล็ก

$d = 0.5 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดปานกลาง

$d = 0.8 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดใหญ่

โดยค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ (เช่น $d = 6.61$ สำหรับคู่ SCM440 vs. SS400) แสดงถึงผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มากในเชิงปฏิบัติ ซึ่งสนับสนุนข้อสรุปเกี่ยวกับความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทั้งเชิงสถิติและการใช้งานจริง

7. การทดสอบ Tukey's Honest Significant Difference (Tukey's HSD)

ใช้ค่า q (studentized range statistic) ในการคำนวณ โดยมีสูตรสำหรับการคำนวณค่า HSD ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \text{HSD} &= q_{\alpha, df_{\text{error}}, k} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \\ \text{HSD} &= 4.60 \times \frac{17.7623}{\sqrt{2}} \approx 57.776 \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ $q_{\alpha, df_{\text{error}}, k}$ คือ ค่า studentized range statistic ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$; df_{error} ; $df = 3$; จำนวนกลุ่ม $k = 3$ ได้ค่า $q \approx 4.60$ (ค่าอาจแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับตารางที่ใช้)

S คือ pooled standard deviation (17.7623)

n คือ จำนวนตัวอย่างต่อกลุ่ม (ซึ่งในที่นี้คือ 2)

การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกับ HSD จะเปรียบเทียบความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยแต่ละคู่กับค่า HSD ที่คำนวณได้ หาก $|\text{Mean}_i - \text{Mean}_j| > \text{HSD}$ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Tukey's HSD

คู่ที่ 1: SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2: SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3: S50C vs. SS400
$= \text{Mean (SCM440)} - \text{Mean (SS400)} $ $= 249.50 - 132.00 = 117.50$ เปรียบเทียบ: $117.50 > 57.776$	$= \text{Mean (SCM440)} - \text{Mean (S50C)} $ $= 249.50 - 200.00 = 49.50$ เปรียบเทียบ: $49.50 < 57.776$	$= \text{Mean (S50C)} - \text{Mean (SS400)} $ $= 200.00 - 132.00 = 68.00$ เปรียบเทียบ: $68.00 > 57.776$
SCM440 และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ	SCM440 และ S50C ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$	S50C และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

8. การทดสอบ Bonferroni Correction

จะปรับระดับนัยสำคัญ (α) สำหรับแต่ละการเปรียบเทียบ เพื่อควบคุม Family-wise Error Rate จำนวนการเปรียบเทียบที่เป็นไปได้ (m) ดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} m &= \frac{k(k-1)}{2} \\ &= \frac{3(3-1)}{2} \\ &= 3 \text{ คู่} \end{aligned} \quad (3)$$

ระดับนัยสำคัญที่ปรับแล้ว ($\alpha_{\text{Bon ferroni}}$) ดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} (\alpha_{\text{Bon ferroni}}) &= \frac{\alpha}{m} \\ &= \frac{0.05}{3} \\ &\approx 0.0167 \end{aligned} \quad (4)$$

ทำการทดสอบ t-test สำหรับแต่ละคู่และเปรียบเทียบ p-value ที่ได้กับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$ ดังสมการที่ (5)

$$t\text{-statistic: } t = \frac{\text{Mean}_1 - \text{Mean}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (5)$$

degrees of freedom (df) สำหรับ t-test ในแต่ละคู่ คือ $df_{\text{error}} = 3$ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Bonferroni correction

คู่ที่ 1: SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2: SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3: S50C vs. SS400
$t = \frac{249.50 - 132.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 6.61	$t = \frac{249.50 - 200.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 2.79	$t = \frac{200.00 - 132.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 3.83
ที่ $df = 3$, ค่า $t = 6.61$ มี p-value (สองทาง) ที่ต่ำกว่า 0.0167 มาก (เนื่องจาก $t_{0.0167/2,3}$ จะมีค่าต่ำกว่า 6.61 มาก)	ที่ $df = 3$, ค่า $t = 2.79$ มี p-value (สองทาง) อยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.10 (ประมาณ 0.06-0.07 จากตาราง t-distribution) ซึ่งสูงกว่า 0.0167	ที่ $df = 3$, ค่า $t = 3.83$ มี p-value (สองทาง) อยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.05 (ประมาณ 0.03-0.04 จากตาราง t-distribution) ซึ่งสูงกว่า 0.0167
SCM440 และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ	SCM440 และ S50C ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$)	S50C และ SS400 ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. อภิปรายผลทางสถิติ

1.1 ผล post-hoc tests: จากทั้ง Tukey's HSD และ Bonferroni correction ได้ข้อสรุปที่คล้ายกันแต่ก็มีความแตกต่างกันในบางประเด็นเนื่องจากความเข้มงวดของวิธีการ

1.1.1 SCM440 vs. SS400: 1) Tukey's HSD: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($117.50 > 57.776$) 2) Bonferroni: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0167$) โดยทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน คือ วัสดุ SCM440 มีความแข็งแรงสูงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างชัดเจน ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (117.50) มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความผันผวนของข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับการตีความขนาดของผลกระทบ (Cohen's $d = 6.61$) ที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ บ่งชี้ว่าการเลือกใช้วัสดุสองชนิดนี้จะส่งผลต่อความแข็งแรงในเชิงปฏิบัติอย่างมาก

1.1.2 SCM440 vs. S50C: 1) Tukey's HSD: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($49.50 < 57.776$) 2) Bonferroni: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.0167$) โดยทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันว่า แม้ SCM440 จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงกว่า S50C แต่ความแตกต่าง 49.50 หน่วยนั้นยังไม่ถือว่ามีความสำคัญทางสถิติเมื่อควบคุมอัตราความผิดพลาดสำหรับการเปรียบเทียบแล้ว อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดของผลกระทบ (Cohen's $d = 2.79$) ที่เป็นขนาดใหญ่มาก ความแตกต่างนี้อาจยังมีความสำคัญในเชิงปฏิบัติหากมีความต้องการความแข็งแรงที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่อการใช้งาน

1.1.3 S50C vs. SS400: 1) Tukey's HSD: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($68.00 > 57.776$) 2) Bonferroni: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.0167$) โดยผลลัพธ์สำหรับคู่นี้มีความแตกต่างกันระหว่างสองวิธี Bonferroni เป็นวิธีที่อนุรักษ์นิยมกว่า (เข้มงวดกว่า) และพบว่าไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ Tukey's HSD พบว่ามีนัยสำคัญ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคือ 68.00 หน่วย ซึ่งจากการวิเคราะห์ Cohen's d (3.83) ถือเป็นผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติอาจกล่าวได้ว่า S50C มีความแข็งแรงสูงกว่า SS400 อย่างชัดเจน แต่ในทางสถิติด้วยการควบคุมที่เข้มงวดของ Bonferroni ก็อาจจะไม่พบความแตกต่าง ซึ่งอาจเกิดจากขนาดตัวอย่างที่เล็ก

1.2 สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างวัสดุ: SCM ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุด (249.5) ผลนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุ SCM มีแนวโน้มที่จะให้ค่าของตัวแปรที่วัดสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ อย่างชัดเจน ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การที่ค่า F มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) สนับสนุนข้อสังเกตว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างวัสดุนั้นไม่ใช่เรื่องบังเอิญ ช่วงความเชื่อมั่น (ร้อยละ 95 CI) ไม่ซ้อนทับกันมาก เนื่องจากช่วงความเชื่อมั่นที่ไม่ซ้อนทับกัน หรือซ้อนทับกันน้อยมาก เป็นหลักฐานที่สนับสนุนว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มวัสดุมีความแตกต่างกันอย่างแท้จริงในประชากร การซ้อนทับกันของช่วงความเชื่อมั่นน้อยบ่งชี้ว่าความแตกต่างที่สังเกตได้นั้นมีความเสถียรและไม่น่าจะเกิดจากความผันแปรของการสุ่มตัวอย่างดังรูปที่ 12 และจากรูปที่ 12 แผนภูมิช่วง (interval plot) ที่แสดงช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของวัสดุทั้ง 3 ชนิด สามารถวิเคราะห์ผลจากกราฟได้ดังนี้

1.2.1 SCM440: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 250 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองวัสดุ ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แท่งบอกความคลาดเคลื่อน (error bar) สำหรับ SCM440 อยู่ในช่วงประมาณ 210 ถึง 290 ช่วงนี้ค่อนข้างกว้าง แสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลในกลุ่มนี้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ช่วงความเชื่อมั่นนี้ไม่ทับซ้อนกับช่วงความเชื่อมั่นของ SS400 อย่างชัดเจน

1.2.2 S50C: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 200 ซึ่งอยู่ระหว่างค่าเฉลี่ยของ SCM440 และ SS400 ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับ S50C อยู่ในช่วงประมาณ 160 ถึง 240 ช่วงนี้ค่อนข้างกว้างที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งสาม แสดงว่าข้อมูลความแข็งแรงสำหรับ S50C มีความแปรปรวนมากที่สุด

1.2.3 SS400: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 130 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับ SS400 อยู่ในช่วงประมาณ 90 ถึง 170 ช่วงนี้มีความกว้างปานกลาง และไม่ทับซ้อนกับช่วงความเชื่อมั่นของ SCM440 อย่างชัดเจน

1.3 การวิเคราะห์พล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plots) สำหรับความแข็งแรง: จากรูปที่ 13 สามารถสรุปได้ดังนี้

1.3.1 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot): จุดของข้อมูลพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน เรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นตรงในแนวทแยงมุม ซึ่งบ่งชี้ว่า พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ (normally distributed) สมมติฐานเรื่องความเป็นปกติของข้อมูลในการวิเคราะห์ ANOVA ได้รับการยืนยัน ทำให้การสรุปผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ

1.3.2 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่ทำนายได้ (Versus Fits): จุดข้อมูลกระจายตัวแบบสุ่มรอบ ๆ เส้นศูนย์ (แกนนอน) และไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน (เช่น รูปทรงกรวย โค้งงอ หรือกลุ่มก้อน) แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนข้อมูลคงที่ (constant variance) หรือเป็นภาวะความแปรปรวนเท่ากัน (homoscedasticity) ซึ่งเป็นไปตามข้อสมมติฐานที่สำคัญของการวิเคราะห์ ANOVA

1.3.3 กราฟฮิสโทแกรม (Histogram): กราฟเส้นโค้งรูประฆัง (bell-shaped curve) และอยู่กึ่งกลางที่ค่าศูนย์ (0) เป็นการยืนยันอีกครั้งว่า พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากพล็อตความน่าจะเป็นปกติ

1.3.4 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับลำดับการสังเกต (Versus Order): จุดข้อมูลกระจายตัวอย่างสุ่มตลอดแนวแกน x และไม่มีรูปแบบที่เป็นระบบ เช่น แนวโน้มขาขึ้นหรือขาลง บ่งบอกว่า ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูล หรือไม่มีอิทธิพลจากตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมซึ่งเกิดขึ้นตามเวลา

2. อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังตารางการประเมินการสึกหรอหรือการซ่อมบำรุงฟันชุดของรถชุดบั้งก็๋หมุ่น ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8: การประเมินการสึกหรอหรือการซ่อมบำรุงฟันชุดของรถชุดบั้งก็๋หมุ่น

ชุดที่	วัสดุ	วัน/เดือน/ปี ติดตั้ง-สิ้นสุด (x)	สถานะ หน้าดิน	การปนของ ทราย (%)	Service Meter Units (SMU)	ชั่วโมงการทำงาน ทั้งหมด (hr)	ค่าเฉลี่ยชั่วโมงการ ทำงานต่อวัน ($\bar{x}$)
1	S50C	28/08/2024–05/09/2024	ดินปนทราย	50	38631–38517	114	12.6
2	SCM440	05/09/2024–10/09/2024	ดินปนทราย	100	38677–38631	46	7.6
3	SS400	12/09/2024–14/09/2024	ดินปนทราย	50	38730–38696	34	11.3

หมายเหตุ: ช่วงเวลาติดตั้ง-สิ้นสุดการทำงานนับเป็นวัน 24 ชั่วโมงต่อวันแทนค่า x และชั่วโมงการทำงานทั้งหมดแทนด้วย hr โดยที่ค่าเฉลี่ยชั่วโมงการทำงาน

ต่อวันหาได้จาก $\bar{x} = \frac{hr}{x}$ ชั่วโมงต่อวัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าวัสดุ SCM440 มีการทำงานในสภาพหน้าดินที่มีทรายปนอยู่ร้อยละ 100 และมีชั่วโมงการทำงานน้อยกว่า S50C อย่างมาก (46 ชั่วโมง เทียบกับ 114 ชั่วโมง) และวัสดุ SS400 ทำงานในสภาพหน้าดินเดียวกับ S50C ดินที่มีทรายปนอยู่ร้อยละ 50 มีชั่วโมงการทำงานน้อยกว่า (34 ชั่วโมง เทียบกับ 114 ชั่วโมง) บ่งชี้ว่าวัสดุ SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง หากพิจารณาจากอัตราการสึกหรอต่อชั่วโมงการทำงาน สภาพหน้าดินที่มีทรายปนอยู่มากมีผลต่ออัตราการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ และวัสดุ SCM440 อาจมีความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีกว่าภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

สรุปผล

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าชนิดของวัสดุเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยมีความสำคัญทางสถิติสูง (p -value = 0.016) และมีขนาดของผลกระทบที่ใหญ่มาก ($\eta^2 \approx 93.63\%$) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ วัสดุ SCM440 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และแตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญทั้งทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างชัดเจน ในขณะที่ S50C แข็งกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญเชิงปฏิบัติเช่นกัน ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบระหว่าง SCM440 กับ S50C และ S50C กับ SS400 จะมีข้อขัดแย้งในผล post-hoc tests บางค่า แต่ขนาดของผลกระทบที่สูงยังคงยืนยันถึงความแตกต่างที่มีความหมายต่อการใช้งานจริง ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การเพิ่มความแข็งแรงการเลือกใช้ SCM440 แทน SS400 จึงเป็นการตัดสินใจที่มีเหตุผลทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างยิ่ง

ความแข็งแรงที่สูงของ SCM440 สอดคล้องกับคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอแบบกัดกร่อนที่สูงกว่า ซึ่งอ้างอิงได้จากผลการทดลอง แม้ว่าเงื่อนไขการทำงานจะแตกต่างกันโดย SCM440 ที่มีความแข็งแรงสูงสุดต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมการกัดกร่อนที่รุนแรงที่สุด (ทรายปนร้อยละ 100) ในขณะที่ S50C และ SS400 ทำงานในสภาวะที่มีทรายปนร้อยละ 50 การที่ SCM440 ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีภายใต้สภาวะกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าอย่างชัดเจน บ่งชี้ถึงความทนทานต่อการสึกหรอที่มากกว่า เมื่อพิจารณาว่าอัตราการสึกหรอจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในสภาพดินทรายร้อยละ 100 ผลการทดลองนี้จึงยืนยันว่า SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C และ SS400 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางสถิติและเชิงปฏิบัติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สหกลีควิเบนท์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุญาตให้ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรสำหรับงานชุดขนหน้าดินรถชุดบั้งก็๋หมุ่น คุณไตรมาส ปิดกันภัย ตำแหน่ง วิศวกรควบคุมงาน และคุณสุธี นารอด ตำแหน่ง หัวหน้าควบคุมงาน ที่ให้ความสนับสนุนการทดลองและข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้

REFERENCES

- [1] Admins. "Bucket wheel excavator: Welding trial & comparison VAUTID hard facing," VARAKANA.com, 2024. Accessed: Mar. 9, 2026. [Online]. Available: <https://varakana.com/vautid/bucket-wheel-excavator/>
- [2] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [3] J. R. Davis, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Materials Park, OH, USA: ASM Int., 2001.
- [4] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [5] *Handbook of Comparative World Steel Standards*, 5th ed. West Conshohocken, PA, USA: ASTM Int., 2016.
- [6] M. Tantrabandit, *Engineering Materials*, 5th ed. Bangkok, Thailand: TPA Publishing (in Thai), 1997.
- [7] R. Ranjan, "An overview on enhancing materials' tribological and mechanical characteristics by using gas metal arc weld hardfacing," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 8–16, 2024, doi: 10.25103/jestr.171.08.
- [8] B. A. M. Mohan, M. U. Rahaman, P. G. R. Madhu, and M. B. Khot, "Finite element analysis & topology optimization of excavator bucket teeth for optimal performance," *Mining Technol.*, vol. 133, no. 3, pp. 214–225, 2024.
- [9] G. H. Lee, J. K. Park, and K. W. Nam, "Improvement of safety and reliability of SCM440 steel with induction hardening," *Key Eng. Mater.*, vol. 972, pp. 31–42, 2023, doi: 10.4028/p-ol5yEy.
- [10] K. Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2009.
- [11] G. P. Tilly, "Erosion caused by impact of solid particles," in *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 13. New York, NY, USA: Academic Press, 1979, pp. 287–319.
- [12] I. Hutchings and P. Shipway, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [13] N. E. Berdimuratov, Y. Y. Kambarov, M. Maulet, S. D. Bolatov, Z. B. Saadoldina, and D. R. Baizhan, "Electro friction treatment of Plow shares," *Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser.*, vol. 29, no. 1, pp. 66–72, 2024.
- [14] M. Younas, A. Khan, S. H. I. Jaffery, Z. Khan, and N. Khan, "Investigation of tool wear and energy consumption in machining Ti6Al4V alloy with uncoated tools," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 132, pp. 3785–3799, 2024.
- [15] G. S. Ghule et al., "Investigation of conventional and ultrasonic vibration-assisted turning of hardened steel using a coated carbide tool," *Front. Mech. Eng.*, vol. 10, 2024, Art no. 1391315.
- [16] G. B. Sathishkumar, B. Asaithambi, and V. Srinivasan, "Surface modification of AZ61 magnesium alloy with stelcar alloy powder using laser cladding technique," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 14, pp. 1485–1496, 2024.
- [17] P. Reiss et al., "Editorial: Technologies for prospecting, extraction, and utilization of space resources," *Front. Space Technol.*, vol. 5, 2024. Art. no. 1493494.
- [18] A. Christou et al., "Sustainable wastewater reuse for agriculture," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 5, no. 7, pp. 504–521, 2024.
- [19] Z. Zhang et al., "Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa," *Sci. Total Environ.*, vol. 930, 2024, Art. no. 172794.
- [20] X. Zhang, H. Zhu, X. Jiang, and W. Broere, "Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 16, no. 9, pp. 3841–3863, 2024.
- [21] T. Chen et al., "Aero-engine blade cryogenic cooling milling deformation simulation and process parameter optimization," *Materials*, vol. 16, no. 11, 2023, Art. no. 4072.
- [22] R. Brighenti, A. Carpinteri, and F. Artoni, "Crack Paths in soft thin sheets," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 13, no. 48, pp. 1–9, 2019.
- [23] R. Kraiklang et al., "Influence of factors on wear resistance property in aluminum surface composite by friction stir processing," *J. Manuf. Manage. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2022.



- [24] H. N. Altalhi, "Dig limits optimization using binary integer linear programming method in open pit mines," M.S. thesis, Mining Explosives Eng. Dept., Missouri Univ. Sci. Technol., Rolla, MO, USA, 2023.
- [25] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. New York, NY, USA: Routledge, 1988.
- [26] D. Lakens, "Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs," *Front. Psychol.*, vol. 4, 2013, Art. no. 863.
- [27] A. Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, 6th ed. London, U.K.: SAGE Publications, 2024.