



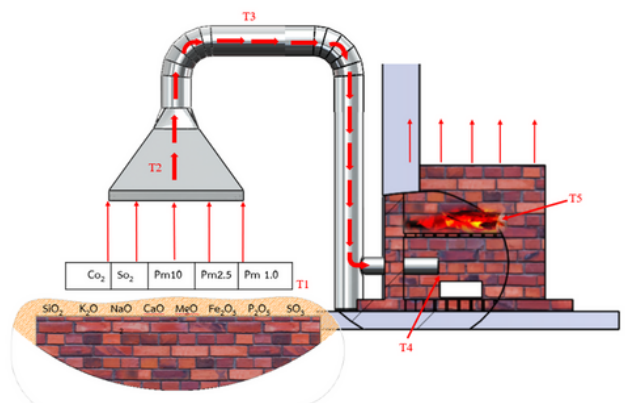
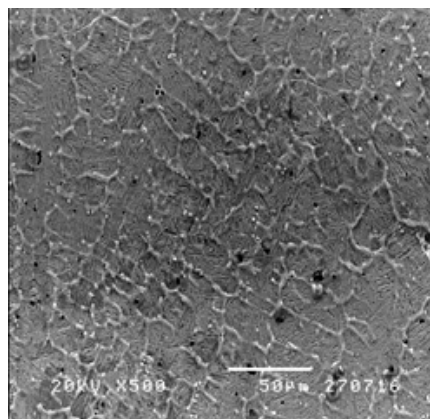
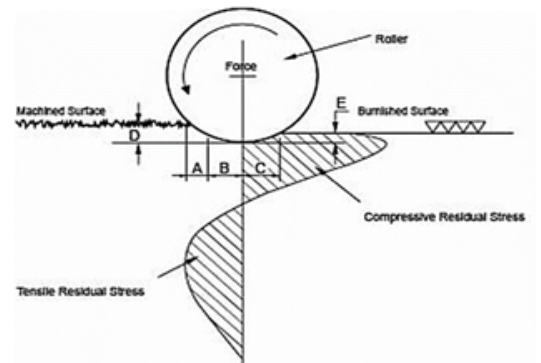
JETA

N  
P  
U



*Journal of*  
**Engineering  
Technology Access**

VOL.3 NO.2 JULY-DECEMBER 2023



**Faculty of  
Industrial Technology  
Nakhon Phanom University**

**ISSN 2774-0889 (Online)**





วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 : กรกฎาคม – ธันวาคม 2566

Journal Engineering Technology Access (JETA)

Vol. 3 No. 2 July – December 2023

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อรวบรวมและเผยแพร่ผลงานวิจัยของนักวิชาการชาวไทยและต่างชาติ โดยเฉพาะผลงานวิจัยของบุคลากรและนักศึกษาภายในคณะและมหาวิทยาลัยให้เป็นที่รู้จักในระดับชาติหรือนานาชาติ
2. เพื่อสร้างเครือข่ายนักวิชาการทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ
3. เพื่อเผยแพร่ชื่อเสียงของคณะและของมหาวิทยาลัย
4. เพื่อสนับสนุนการนำผลงานวิชาการและวิจัยไปใช้ประโยชน์

#### หน่วยงาน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

214 หมู่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

โทร. 0 4250 3777

#### บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง

#### ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นายเจษฎา หงษ์ณี

#### ทีมบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมณีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญนันท์ นิลกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรมาส เลหาวิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง	มหาวิทยาลัยนครพนม

#### ฝ่ายจัดการวารสาร

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุริยา ประสมทอง | รองคณบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา |
| 3. นางสาวณอมวรรณ ศรีวงษา             | เจ้าหน้าที่                              |
| 4. นางรุ่งรัตน์ จรคำ                 | เจ้าหน้าที่                              |

## บทบรรณาธิการ

Journal Engineering Technology Access (JETA) วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ฉบับนี้เป็นปีที่ 3 ฉบับที่ 2 : กรกฎาคม – ธันวาคม 2566 มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวม เผยแพร่ผลงานวิจัยของบุคลากร นักศึกษาทั้งภายในคณะ บุคคลภายนอกมหาวิทยาลัยให้เป็นที่ยอมรับในระดับชาติหรือนานาชาติ และเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ ข้อคิดเห็นทางวิชาการและวิจัยแก่นักวิชาการ อาจารย์ นักศึกษา ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรม และนวัตกรรม เพื่อสร้างเครือข่ายนักวิชาการและเสริมสร้างประสิทธิภาพด้านการพัฒนางานวิจัย วารสารฉบับนี้ประกอบด้วยบทความวิจัยจำนวน 4 บทความ ซึ่งบทความทั้งหมดเป็นบทความที่น่าสนใจ และสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับศาสตร์ที่เกี่ยวข้องได้ ทั้งนี้ผู้ที่สนใจสามารถติดตามอ่านบทความวารสารฉบับออนไลน์ได้

วารสารฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ประกอบด้วย บรรณาธิการบริหาร กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายในและภายนอก ที่กรุณาพิจารณาแก้ไขปรับปรุงบทความให้มีความสมบูรณ์ และมีคุณภาพ อีกทั้งขอขอบพระคุณเจ้าของบทความทุกท่านที่ให้ความสนใจ และส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ กองบรรณาธิการขอเชิญผู้สนใจทุกท่านร่วมส่ง บทความวิจัย และบทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรม และนวัตกรรม เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และหากท่านมีข้อเสนอแนะหรือต้องการทราบข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวารสารฯ สามารถติดต่อได้ที่ [jeta@npu.ac.th](mailto:jeta@npu.ac.th) กองบรรณาธิการยินดีรับฟังข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงวารสารฯ ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง  
บรรณาธิการ

## สารบัญ

## หน้า

### บทบรรณาธิการ

สมชาติ โสณะแสง

ก

สารบัญ

ข

### บทความวิจัย

อิทธิพลของวงรอบเปียกและแห้งต่อการรับแรงอัดและโมดูลัสดินซีเมนต์ลูกรัง

ผสมน้ำยาโพลีเมอร์

ประดิษฐ์ แสงเขียวและดร.ก้องรัฐ นกแก้ว

1

The Influence Of Welding Processes On The Microstructure And Mechanical Properties Of Hardfacing

Kiangkrai Intapo and Methee Pareesroi

18

Optimization of the AA6061-T6 aluminum alloy Burnishing Process  
by response surface method

Panuwat Thosa and Anantachin Khamsupa

25

Study of factors in reducing dust in the process of burning clay bricks using the  
repeated firing technique with an open kiln system

Apisit kaewchaloon and Sittichai charonerat

36

อิทธิพลของวงจรเปียกและแห้งต่อกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสดินซีเมนต์ลูกรังผสมน้ำยาโพลิเมอร์  
**Influence of wet and dry cycle on compressive strength and modulus of elasticity  
of lateritic soil cement modified with polymer**

ประดิษฐ์ แสงเขียว<sup>1</sup>

ดร.ก้องรัฐ นกแก้ว<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนครพนม

<sup>2</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนครพนม

### Abstract

The pavement structure is one of the main structures affecting the power and durability of the road. This research studies the performance of lateritic soil-cement mixed with polymer to improve the long-term properties for use as base course. The influence of wet and dry cycle on compressive strength and elastic modulus was mainly investigated. The study showed that Polymer solution reduces water absorption at dry cycle for soil cement. Adding polymer solution could improve strength and elastic modulus, providing longer life-service for pavement.

**Keywords:** soil cement, polymer, compressive strength, wet and dry cycle, stress and strain

### บทคัดย่อ

โครงสร้างชั้นพื้นทางถือเป็นหนึ่งในโครงสร้างหลักที่ส่งผลต่อกำลังและความคงทนของถนน งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะของลูกรังผสมดินซีเมนต์และปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ในระยะยาวเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยศึกษาอิทธิพลของวงจรเปียกและแห้ง (Wet and dry cycle) ต่อค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดและปริมาณการสูญเสียมวลของดิน จากการศึกษาพบว่าน้ำยาโพลิเมอร์ช่วยลดการสูญเสียของดินที่ผ่านการทดสอบวงจรแห้งและเปียก ช่วยลดการสูญเสียกำลังรับแรงอัดและเพิ่มค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ตัวอย่าง โดยน้ำยาโพลิเมอร์จะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ช่วยปรับกำลังและความคงทนของดินลูกรังซีเมนต์ชั้นพื้นทาง ส่งผลให้อายุของถนนที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** ดินซีเมนต์, น้ำยาโพลิเมอร์, กำลังรับแรงอัด, วัฏจักรเปียกสลับแห้ง, ความเค้นและความเครียด

### 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ใช้ถนนเป็นคมนาคมหลักซึ่งในปัจจุบันมีปริมาณผู้ใช้ถนนเพิ่มมากขึ้นจึงมีการก่อสร้างและปรับปรุงซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างถนนมีหลายชนิด เช่น ดินลูกรัง หินคลุก เป็นต้น และต้องผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง [1] ในปัจจุบันดินลูกรังที่ผ่านมาตรฐานนั้นมีจำนวนน้อยลงและหาได้ยากในบางครั้ง แหล่งวัสดุที่นำมาก่อสร้างนั้นมีอยู่อย่างจำกัดและมีราคาสูงต้องไปหาแหล่งที่อื่นทำให้การก่อสร้างบางโครงการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการ

ขนส่งวัสดุที่สูงและเกินความจำเป็นจึงนำไปสู่ความล่าช้าในเรื่องเวลา ดังนั้นจำเป็นต้องมีวัสดุมาทดแทนหรือเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยประเทศไทยนิยมใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งนำมาผสมกับดินซึ่งจะเรียกว่า "ดินซีเมนต์" เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อให้คุณสมบัติของวัสดุเช่นกำลังรับแรง การต้านทานการยุบตัวและความสามารถในการต้านทานการซึมน้ำดีขึ้น [1,2,3] อย่างไรก็ตามดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงแต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดยังทนต่อสภาพแวดล้อม เช่นความชื้นและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงเช่นบริเวณที่มีน้ำใต้ดินหรือน้ำท่วมสูงในฤดูฝนและแห้งแล้งในฤดูแล้งได้ไม่ดีพอ เพื่อเป็นการพัฒนาการนำซีเมนต์มาปรับปรุงถนนให้ดียิ่งขึ้นจึงมีการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพของดินซึ่งวัสดุทางเลือกที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคือน้ำยาโพลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารเชื่อมประสานที่จะช่วยลดข้อด้อยของดินซีเมนต์ในเรื่องป้องกันการซึมผ่านน้ำใต้ดินเพิ่มความยืดหยุ่นของถนน [1]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์ เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพโดยพิจารณาถึงอิทธิพลของวงรอบเปียกสลับแห้งโดยรวมอิทธิพลของความชื้นและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D559 [4] โดยผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านวิศวกรรมประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์จากการใช้น้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์เป็นสารผสมเพิ่ม และเป็นข้อพิจารณาในการนำน้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์มาเป็นตัวช่วยผสมดินลูกรังกับซีเมนต์ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใช้น้ำยาโพลิเมอร์สังเคราะห์ในงานก่อสร้าง

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยาโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

[1] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์และโพลิเมอร์ โดยพิจารณาการพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังการรับแรงดัด และความสามารถในการดูดซึมน้ำของดินลูกรังด้วยมาตรฐานที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 และโพลิเมอร์ ในการทำเป็นตัวเชื่อมประสานของดินลูกรัง โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยโพลิเมอร์ที่ 0, 5, 10, 15, 20% และที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยโพลิเมอร์ 10% มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวดีที่สุดและมีการพัฒนาการรับแรงดัดร่วมกับการซึมได้ของน้ำที่ต่ำ ดังนั้นด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้จะสามารถนำไปใช้ในการรักษาเสถียรภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานสำหรับการใช้งานบนถนน

[5] ศึกษาเรื่องการพัฒนาถนนดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง ได้ผลการทดลองเป็นค่าดังนี้คือ ค่าขีดเหลว (LL) 24.89%, ค่าขีดพลาสติก (PL) 14.82% ค่าดัชนีความเหนียว (PI) 10.07% ค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบได้ 34.1% ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา 21.49 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทกำหนดให้ค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบไม่เกิน 60% ค่าขีดเหลว (LL) ไม่เกิน 35% และค่าดัชนีความเหลว (PI) ไม่เกิน 11% ค่ากำลังอัดของดินชั้น Base มากกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

[6] ได้ศึกษาอิทธิพลเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ในกรณีปริมาณซีเมนต์สูง โดยผสมซีเมนต์ 4, 9 และ 13% จากนั้นนำไปทดสอบรอบเปียกสลับแห้งที่ 1, 3, 6 และ 12 รอบ ที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ทุกอายุบ่มมีค่าลดลงตามจำนวนรอบเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 4% ไม่สามารถทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งได้ในขณะที่ตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 9 และ 13% มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงและสามารถทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งได้ มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานดินซีเมนต์จนถึง 12 รอบ

[7] ได้ศึกษาวัฏจักรเปิกสลับแห้งต่อกำลังของชั้นพื้นทางดินลูกรังปรับปรุงด้วยซีเมนต์ พบว่าการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ส่งผลต่อการต้านทานการวิบัติของดินพื้นทางเนื่องจากวัฏจักรเปิกสลับแห้ง นอกจากนั้นกำลังรับแรงอัดยังเพิ่มขึ้นตามรอบเปิกสลับแห้งถึง 6 รอบเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่หมดในช่วง 7 วันจากนั้นกำลังมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มจำนวนรอบเปิกสลับแห้ง

[8] ได้ศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์โพลิเมอร์สำหรับงานทาง โดยใช้มวลรวมคือหินคลุกและวัสดุผิวทางเก่า นำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์โพลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิก (SA) และโพลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (IDT) และการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดินและการทดสอบความทนทาน (Durability Test) โดยวิธีเปิกสลับแห้ง ผลทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์โพลิเมอร์ทั้งสองประเภทของหินคลุกมีค่าสูงกว่าวัสดุผิวทางเก่า ตรงกันข้ามผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์โพลิเมอร์ทั้งสองประเภทของวัสดุผิวทางเก่ามีค่าสูงหินคลุก อีกทั้งผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในมวลดิน และการทดสอบความทนทานของทั้งสองวัสดุ พบว่าการปรับปรุงมวลรวมด้วยซีเมนต์โพลิเมอร์ชนิดโพลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) ส่งผลดีในด้านการทนทานมากขึ้น

[9] ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวและความคงทนของวัสดุชั้นพื้นทางปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และโพลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้หินคลุกผสมซีเมนต์ (PMC) หินคลุกผสมซีเมนต์โพลิเมอร์สไตรีนอะคริลิก (PMCSA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์โพลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอิน (PMCSBR) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อโพลิเมอร์ 50:50 จากนั้นบ่มตัวอย่าง 7 วัน นำไปทดสอบเปิกสลับแห้งและทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยผลการทดสอบแบบทำลายตัวอย่างพบว่าทั้ง 3 วัสดุเมื่อผ่านการทดสอบเปิกสลับแห้งวัสดุจะมีการพัฒนากำลังในช่วง 0-6 cycles และหลังจากนั้นวัสดุจะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงโดย PMC ลดลง 20% PMCSA ลดลง 38% และ PMCSBR ลดลง 14%

[10] ศึกษาผลกระทบของสภาพเปิกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 5, 7, 9 และ 11% โดยมวล และปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 10, 20 และ 30% โดยมวล ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์ อายุบ่ม 2, 7 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้องกำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มและปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสม และผลการทดสอบด้วยวิธีเปิกสลับแห้ง พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านสภาพเปิกสลับแห้ง เนื่องจากเกิดความพรุนจากสภาพเปิกสลับแห้งและมีการสูญเสียมวลเท่ากับ 11.06% ค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านสภาพเปิกสลับแห้ง

### 3. วัสดุและวิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ โดยกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ 5% ของน้ำหนักดินและผสมน้ำยาโพลิเมอร์ที่ 0, 5 และ 10% ของน้ำหนักน้ำที่ใช้ผสมตัวอย่างดินซีเมนต์ ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการบดอัดดินซีเมนต์แบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐานการทดสอบ มทข. (ท) 501.1-2545 [11] โดยผสมน้ำยาโพลิเมอร์ผสมรวมกับน้ำให้ได้เท่ากับปริมาณน้ำที่ความแน่นแห้งสูงสุด (OMC) ที่ 10% ของน้ำหนักมวลรวม ผู้วิจัยได้เตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์บดอัด 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากนั้นห่อตัวอย่างในถุงพลาสติกและบ่มเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลทดสอบที่ได้จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างวัฏจักรเปิกสลับแห้งต่อความเค้นและความเครียด, วัฏจักรเปิกสลับแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง, วัฏจักรเปิกสลับแห้งต่อกำลังรับแรงอัด เพื่อ

เปรียบเทียบกับผลทดสอบของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ และศึกษาอิทธิพลของการเติมน้ำยาโพลิเมอร์ต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

### 3.1 วัสดุ

#### 3.1.1. ดินลูกรัง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วัสดุดินลูกรังจากแหล่งดิน ต.หนองญาติ อ.เมือง จ.นครพนม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ ( $C_u$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง ( $C_c$ ) ได้เท่ากับ 13.33 และ 3.33 ตามลำดับ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอมีค่ามากกว่า 4 และค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งมีค่ามากกว่า 3 จัดอยู่ใน Group Symbols GP Poorly Graded Gravels แสดงว่าดินมีขนาดคละก้นไม่ดี และค่า Liquid Limit (LL) มีค่า 38.95% Plastic Limit (PL) มีค่า 30.04% และ Plasticity Index (PI) มีค่า 8.91% ตามลำดับ

#### 3.1.2. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก.15 ประเภท 1

#### 3.1.3. น้ำยาโพลิเมอร์

Renolith เป็นน้ำยาเคมีที่มีสารโพลิเมอร์ลาเท็กซ์และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักสารโพลิเมอร์ในส่วนผสม Renolith ที่มีสมบัติเป็นกาวยาเหนียวที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะของปูนซีเมนต์กับดินหรือวัสดุอื่นๆ เช่น หิน กรวด ทราย ช่วยให้เกิดการเชื่อมประสานของปูนซีเมนต์กับดินเมื่อผ่านการบดอัดทำให้ดินมีความแข็งแรงคล้ายคอนกรีต มีสมบัติพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของดินลูกรังต่อปูนซีเมนต์ (1 ตัวอย่าง)

ปูนซีเมนต์ (%)	ปูนซีเมนต์ (kg)	ดินลูกรัง (kg)	น้ำ (kg)
0	0	4	0.4
5	0.2	4	0.4

หมายเหตุ ตัวอย่างดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ 5% (C5)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์กับปริมาณน้ำ (1 ตัวอย่าง)

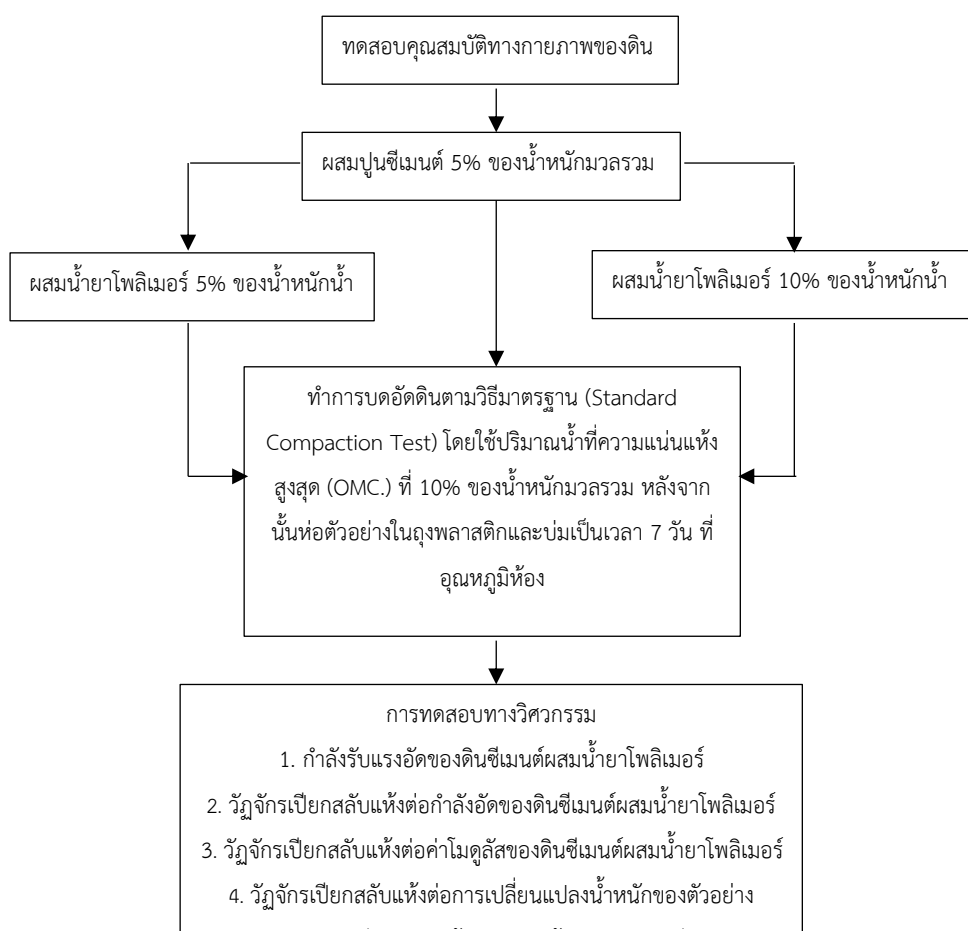
น้ำยาโพลิเมอร์ (%)	ปริมาณน้ำที่ใช้ (kg)	ปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ที่ใช้ (kg)
0	0.4	0
5	0.38	0.02
10	0.36	0.04

หมายเหตุ ตัวอย่างดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ 5% ผสมโพลิเมอร์ 0% (C5P0), ตัวอย่างดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ 5% ผสมโพลิเมอร์ 5% (C5P5),  
ตัวอย่างดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ 5% ผสมโพลิเมอร์ 10% (C5P10)



ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของน้ำยาโพลิเมอร์

คุณสมบัติของน้ำยาโพลิเมอร์ (POLYMER INGREDIENT)	
ปริมาณ Acrylic resin	< 5%
ปริมาณ Calcium Salt	<8%
ปริมาณ Mineral oil	<1
ปริมาณ cellulose	< 2%
การละลายน้ำ	กระจายน้ำในตัว
จุดเดือด	100 C°
ความถ่วงจำเพาะที่ 25 C°	1.00-1.02
ค่า PH ที่ 25 C°	11.0 - 12.5
ค่าความหนืด ที่ 25 C°	1,200 - 2,000 CPS



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบดินซีเมนต์

### 3.2. การเตรียมตัวอย่าง

#### 3.2.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการเตรียมดินลูกรัง น้ำ นํ้ายาโพลิเมอร์ และปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนตามที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการผสมดินลูกรังกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน แล้วจึงทำการเติมนํ้าและนํ้ายาโพลิเมอร์ลงไป จากนั้นผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ทำการเตรียมโมลด์สำหรับตัวอย่างกำลังรับแรงอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.14 เซนติเมตร และสูง 11.80 เซนติเมตร จากนั้น นำส่วนผสมทั้งหมดที่ผสมเข้ากันแล้วใส่ลงไปในโมลด์แล้วทำการบดอัดตามวิธีมาตรฐาน (Standard Compaction Test) หลังจากทำการบดอัดเป็นที่เรียบร้อยแล้วนำตัวอย่างออกจากโมลด์โดยใช้แม่แรงดันก่อนตัวอย่างออกและทำการห่อก้อนตัวอย่างด้วยถุงพลาสติกหรือไวนิล ป้องกันความชื้น แล้วนำก้อนตัวอย่างที่ห่อแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน โดยก่อนการทดสอบต้องมีการแช่นํ้าก่อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล-ม.206/2532 [12]

#### 3.2.2. การเตรียมตัวอย่างทดสอบวงรอบเปียกสลับแห้งของดินซีเมนต์ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์

หลังจากผ่านการเตรียมตัวอย่างดินในข้อ 3.2.1. ในช่วงสุดท้ายของการจัดเก็บในห้องความชื้น นำตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุน้ำที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 5 ชั่วโมง จากนั้นบันทึกมวลของตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2 นำตัวอย่างที่ครบ 7 วัน มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด 1 ชุด เพื่อหาค่าความแตกต่างที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ผ่านรอบเปียกสลับแห้ง 3, 6, 9 และ 15 รอบ เพื่อให้ทราบผลในแต่ละรอบและนำไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างของแต่ละรอบ การทดสอบแต่ละรอบทำได้โดยการวางดินตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างลงในเตาที่อุณหภูมิ 160 °F (70 °C) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำออกมาจากเตาวัดและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D559 ดังรูปที่ 3.3



### 3.2 การแช่ตัวอย่างในน้ำ 5 ชั่วโมงก่อนหาปริมาณน้ำ

#### รูปที่ 3.3 การอบก้อนตัวอย่างเพื่อหาปริมาณน้ำที่วงรอบแห้งที่วงรอบเปียก

จากนั้นออกแรงกดเบา ๆ บนตัวอย่างด้วยแปรงขัดโดยถือแปรงขัดขนานกับแนวยาวของดินตัวอย่างหรือขนานกับปลายก้อนดินเพื่อให้เกิดรอยทั่วดินตัวอย่างออกแรงทั้งตามความกว้างและความสูงของดินตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดรอยแปรง 18 ถึง 20 รอยเพื่อให้ครอบคลุมทั้งสองด้านของดินตัวอย่างและรอยแปรงสักรอบบนปลายก้อนดินแต่ละก้อนดังรูปที่ 3.4 กระบวนการที่ทำให้เปียกและทำให้แห้ง 1 รอบ (48 ชั่วโมง) ต่อการแช่ตัวอย่างในน้ำ 5 ชั่วโมง และทำตามกระบวนการจำนวน 15 รอบ หลังจาก

ทดสอบครบ 15 รอบ อบดินตัวอย่างให้แห้งเพื่อให้น้ำหนักมีค่าคงที่ด้วยอุณหภูมิ 230 °F (110 °C) วัดและบันทึกน้ำหนักของดินตัวอย่าง ข้อมูลที่รวบรวมไว้จะใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและส่วนประกอบที่เป็นน้ำของดินตัวอย่าง และการสูญเสียมวลของดินหลังจากการทดสอบจำนวน 15 รอบ



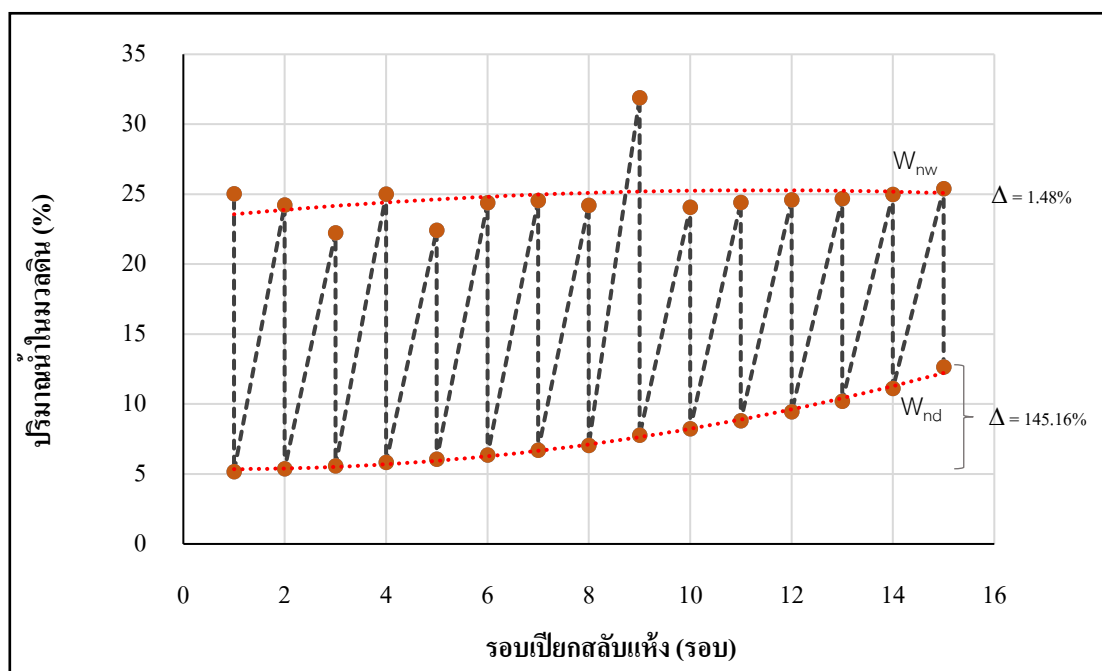
รูปที่ 3.4 การทำรอยบนตัวอย่างด้วยแปรงขัด

#### 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

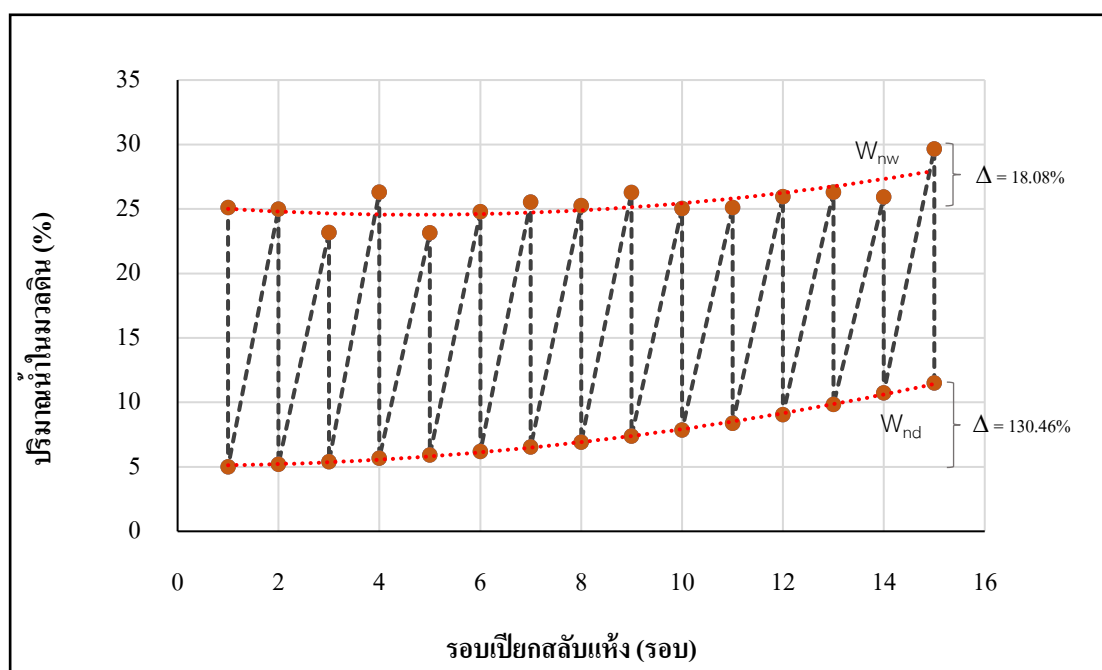
##### 4.1. ผลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน

คือกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำถูกเพิ่มเข้าสู่ดิน (เปียก) และเมื่อน้ำถูกกลดออกจากดิน (แห้ง) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำในดินเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละรอบของวัฏจักรนี้ เป็นกระบวนการที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินซีเมนต์ ดังนั้นวัฏจักรเปียกสลับแห้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรมและสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะเมื่อดินซีเมนต์ผสมกับน้ำยาโพลิเมอร์หรือสารอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับการเก็บความชื้นในดินด้วย

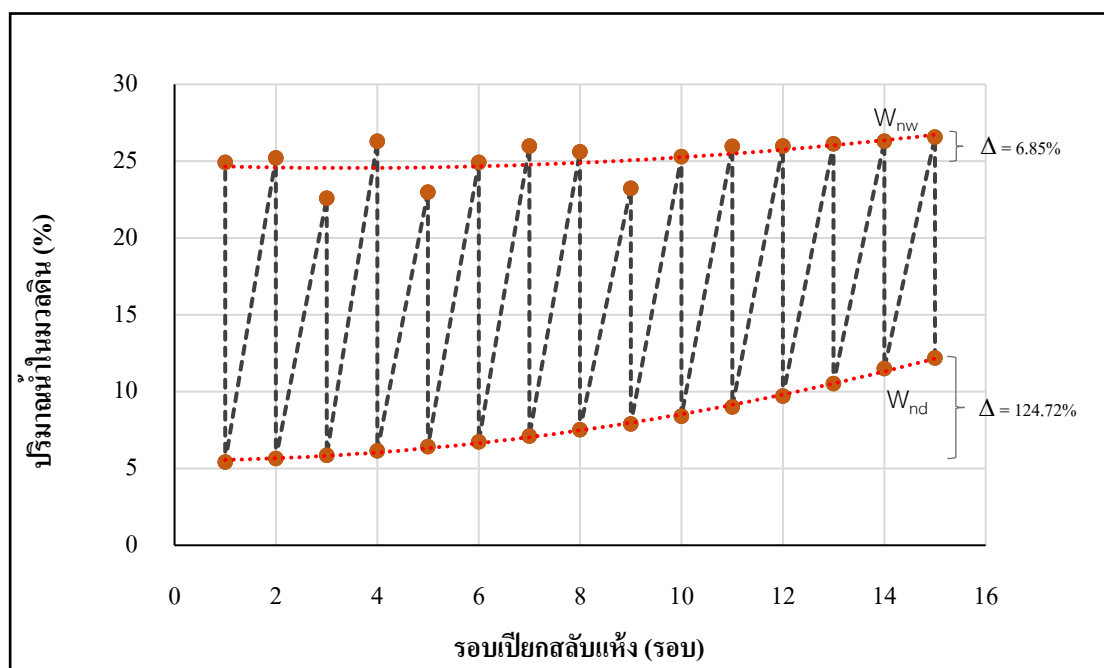
จากรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณร้อยละของความชื้นตัวอย่างในแต่ละรอบเปียกสลับแห้ง 2 กรณีคือ ที่ความชื้นขณะแห้ง (Water content at dry cycle,  $W_{nd}$ ) วัดได้หลังจากนำตัวอย่างขึ้นจากแช่น้ำและอบตัวอย่างที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และที่ขณะเปียก (Water content at wet, cycle  $W_{nw}$ ) วัดทันทีหลังจากนำตัวอย่างขึ้นจากแช่น้ำ 5 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าค่าปริมาณน้ำหรือความชื้นขณะแห้ง ( $W_{nd}$ ) ของตัวอย่างที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์และที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5 และ 10% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบตั้งแต่รอบที่ 1 ถึงรอบที่ 15 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากขณะที่ตัวอย่างผ่านวัฏจักรเปียกสลับแห้งจะเกิดการสูญเสียมวลของดินที่เป็นของแข็งทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงในดินมากขึ้นทำให้น้ำซึมเข้าไปแทนที่ช่องว่างในก้อนตัวอย่างจึงส่งผลให้ค่าความชื้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น [7] และความชื้นในขณะเปียก ( $W_{nw}$ ) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งเพิ่มขึ้นไม่มากนักเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่ดูดซึมในสภาพเปียกจึงทำให้อ่อนตัวอย่างมีความที่บน้ำมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [7]



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (%) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% ที่วิ่งรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (%) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% น้ำยาโพลิเมอร์ 5% ที่วิ่งรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (%) ของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% น้ำยาโพลิเมอร์ 10% ที่วิ่งรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของค่า  $W_{nd}$  และ  $W_{nw}$  ของดินซีเมนต์ผสมโพลิเมอร์ที่ผ่านวงรอบเปียกสลับแห้ง 15 รอบ

รอบเปียกสลับแห้ง (รอบ)	ปริมาณโพลิเมอร์ (%)					
	0		5		10	
	$\Delta W_{nd}$ (%)	$\Delta W_{nw}$ (%)	$\Delta W_{nd}$ (%)	$\Delta W_{nw}$ (%)	$\Delta W_{nd}$ (%)	$\Delta W_{nw}$ (%)
1-15	145.16	1.48	130.46	18.08	124.72	6.85

หมายเหตุ ค่าความแตกต่างของปริมาณน้ำหรือความชื้นของตัวอย่างรอบที่ 1 กับรอบที่ 15 แทนด้วยค่าเดลตา ( $\Delta$ )

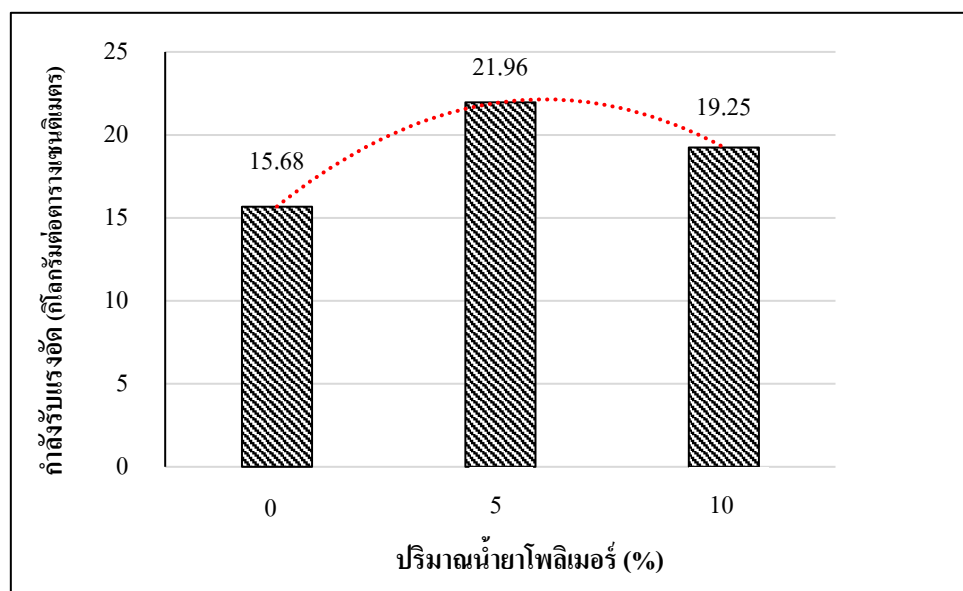
อิทธิพลของน้ำยาโพลิเมอร์ต่อการดูดซับน้ำของดินซีเมนต์เกี่ยวข้องกับความสามารถของน้ำยาโพลิเมอร์ในการเก็บและรักษาไว้ในดิน น้ำยาโพลิเมอร์มีโครงสร้างที่สามารถเก็บน้ำได้ ดังนั้นเมื่อน้ำยาโพลิเมอร์ถูกผสมเข้ากับดินซีเมนต์อิทธิพลที่เกิดขึ้นจะมีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำที่ดินซีเมนต์สามารถเก็บและรักษาไว้ได้ ดังตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่า  $W_{nd}$  และ  $W_{nw}$  ของดินซีเมนต์ผสมโพลิเมอร์ที่ผ่านวงรอบเปียกสลับแห้ง 1 ถึง 15 รอบ พบว่าค่าความชื้นขณะแห้งของตัวอย่าง  $\Delta W_{nd}$  มีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณการผสมน้ำยาโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นที่ 5 และ 10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์ในดินซีเมนต์อาจทำให้เกิดความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวดินที่สามารถดูดซับน้ำได้ลดลง [1] การที่ดินมีความหนาแน่นมากขึ้น อาจจะทำให้ช่องว่างที่สามารถเก็บรักษาน้ำลดน้อยลง และในส่วนของความชื้นขณะเปียกของตัวอย่าง  $\Delta W_{nw}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะฉะนั้นเมื่อผสมน้ำยาโพลิเมอร์ในปริมาณที่มากขึ้นการดูดซับน้ำของดินซีเมนต์อาจลดลงดังค่า  $\Delta W_{nd}$  เนื่องจากสมบัติของน้ำยาโพลิเมอร์ที่สร้างประสิทธิภาพในการเก็บรักษาน้ำในดินและน้ำยาโพลิเมอร์มีความเหนียวหนืดจึงไปช่วยลดช่องว่างที่สูญเสียมวลดินจากการทดสอบรอบเปียกสลับแห้ง [1] อย่างไรก็ตาม

การที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสมยังช่วยทำให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นลดการสูญเสียมวลดินจากวงจรรอบแห้งเปื่อย เป็นผลดีต่อดินซีเมนต์ในระยะยาว

#### 4.2. กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์

คือความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์เกี่ยวข้องกับปริมาณและลักษณะของน้ำยาโพลิเมอร์ที่ถูกใช้ในการผสมกับดินและสภาวะทางธรรมชาติของดินซีเมนต์เอง ความสัมพันธ์นี้มีผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของดินเมื่อเผชิญกับแรงอัดหรือการกดทับ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์สามารถใช้ประเมินความแข็งแรงและความทนทานของดินเมื่อเผชิญกับแรงกระทำ เช่น ในโครงการก่อสร้างทางหลวง สะพาน อาคาร และโครงสร้างอื่นๆ ที่ต้องรับแรงอัดหรือแรงบีบเป็นประจำ ค่านี้นช่วยในการออกแบบและคำนวณความเหมาะสมของดินในการใช้งานตามเงื่อนไขและสภาวะที่ต่างกันไป

จากรูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 0, 5 และ 10% ที่อายุบ่ม 7 วัน จากการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ เมื่อผสมน้ำยาโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นที่ 10% จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม แม้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ที่ 10% จะลดลง แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์แล้วยังคงให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสม ซึ่งในส่วนกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณน้ำยาโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นในช่วง 10-15% เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำยาโพลิเมอร์มีความเหนียวหนืดส่งผลให้ดินจับตัวกันเป็นก้อนทำให้ดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [1] อาจส่งผลด้านกำลังของตัวอย่างดินซีเมนต์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.ม.204/2533 [13] ซึ่งกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าตัวอย่างที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5 และ 10% ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 2 ตัวอย่าง

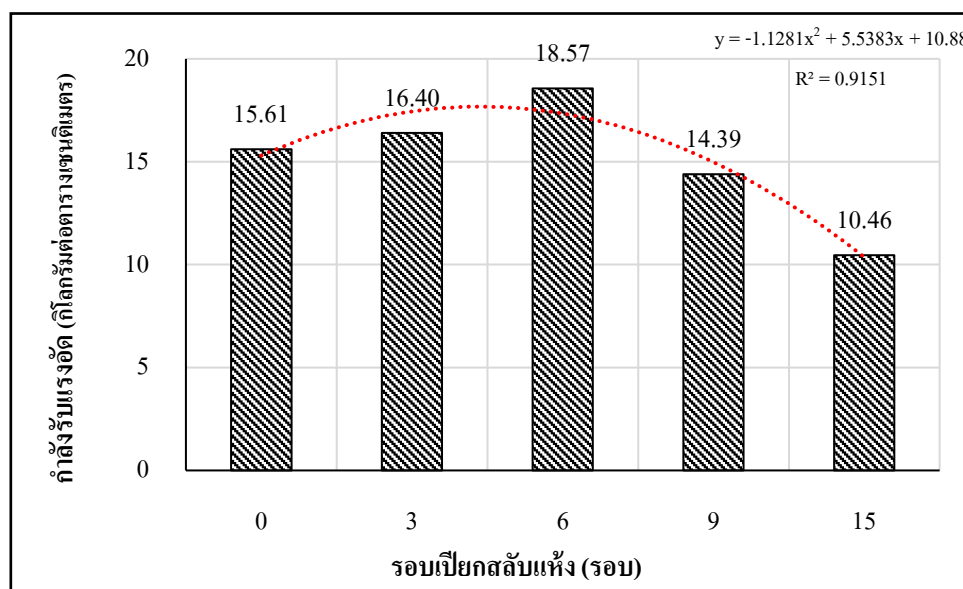


รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน

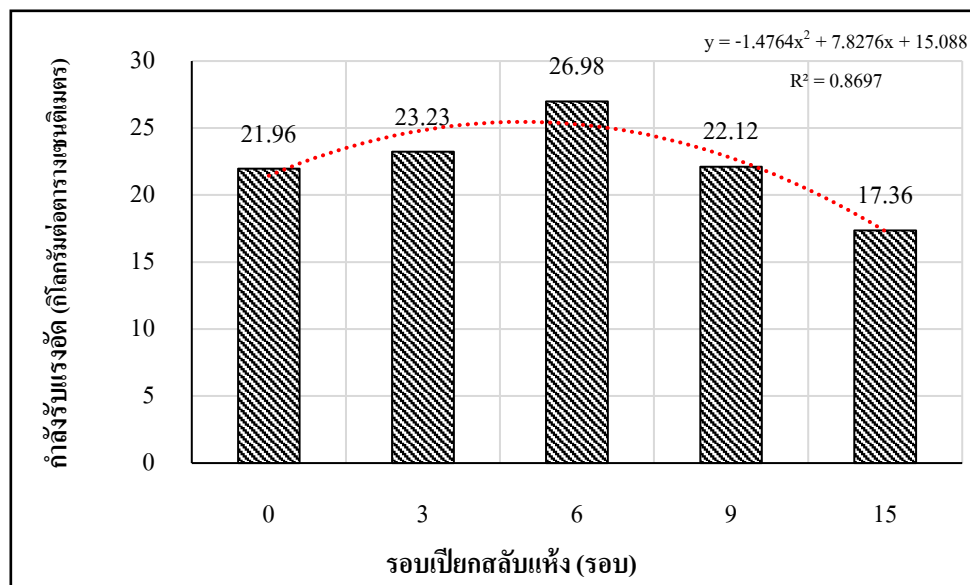
#### 4.3. ผลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์

อิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์เกี่ยวข้องกับความเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักและความชื้นของดินในแต่ละรอบ การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถส่งผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์เมื่อเผชิญกับแรงอัดหรือการกดทับในระหว่างการก่อสร้างหรือขณะใช้งาน

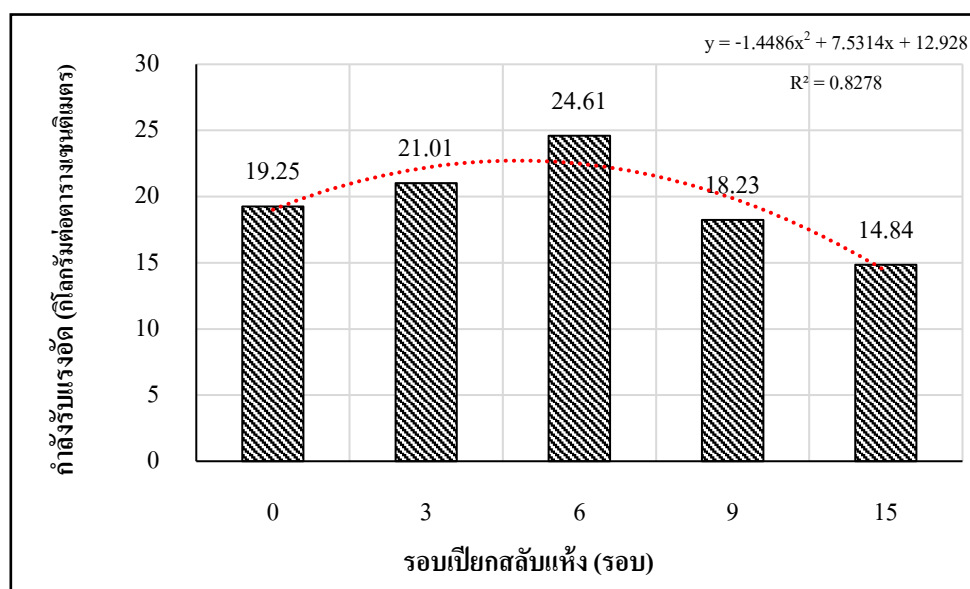
จากรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินลูกรังที่ผสมซีเมนต์ 5% ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 0, 5 และ 10% ที่อายุบ่ม 7 วัน ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมหลังจากผ่านรอบเปียกสลับแห้ง ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบที่ 3 ถึงรอบที่ 6 และในรอบที่ 6 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 6 รอบ ซึ่งทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วง 3 ถึง 6 รอบนั้น เนื่องจากซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในช่วง 7 วันยังไม่หมด เมื่อผ่านรอบอบแห้งน้ำในตัวอย่างถูกไล่ออกด้วยความร้อนและเมื่อผ่านรอบเปียก น้ำที่ซึมเข้าตัวอย่างเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ที่เหลือทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น [7] ดังนั้นกระบวนการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์เข้าร่วมไปถึงความดันที่เป็นลบจาก Suction force ส่งผลให้ตัวอย่างที่ผ่านรอบเปียกสลับแห้งมีกำลังอัดที่สูงขึ้น [14] อย่างไรก็ตามเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้นที่ 6 ถึง 15 รอบพันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินเริ่มถูกทำลายส่งผลให้ความพรุนเพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำซึมเข้าตัวอย่างได้มากขึ้นแรงดึงดูดจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลดลง [7] ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงของแต่ละตัวอย่าง สามารถแสดงได้จากสมการพาราโบลากำลังสองดังนี้คือ ตัวอย่างที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์  $y = -1.1281x^2 + 5.5383x + 10.88$ ,  $R^2 = 0.9151$  ส่วนตัวอย่างที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5% ได้เท่ากับ  $y = -1.4764x^2 + 7.8276x + 15.088$ ,  $R^2 = 0.8697$  และตัวอย่างที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 10% ได้เท่ากับ  $y = -1.4486x^2 + 7.5314x + 12.928$ ,  $R^2 = 0.8278$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% และน้ำยาโพลิเมอร์ 5% ที่จำนวนรอบเป็ยกสลับแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 5% และน้ำยาโพลิเมอร์ 10% ที่จำนวนรอบเป็ยกสลับแห้งต่างๆ

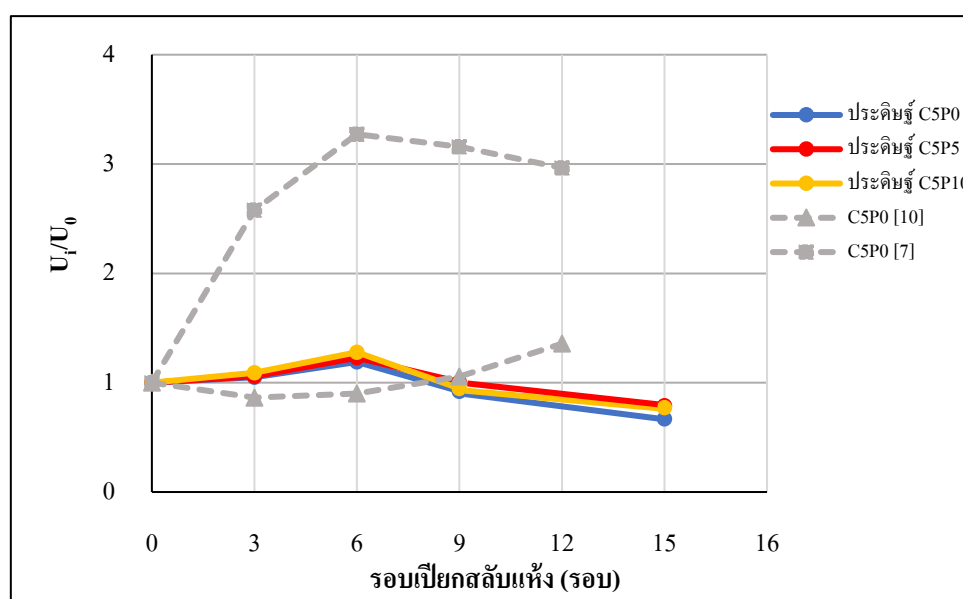
ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ 5% ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5 และ 10% ผ่านรอบเป็ยกสลับแห้ง

ตัวอย่าง	รอบเป็ยกสลับแห้ง (รอบ)				
	0	3	6	9	15
ดินซีเมนต์ 5%	15.61 (ksc.)	16.40 (ksc.)	18.57 (ksc.)	14.39 (ksc.)	10.46 (ksc.)
ดินซีเมนต์ 5% น้ำยาโพลิเมอร์ 5%	21.96 (ksc.)	23.23 (ksc.)	26.98 (ksc.)	22.12 (ksc.)	17.36 (ksc.)



ดินซีเมนต์ 5% นํ้ายาโพลิเมอร์ 10%	19.25 (ksc.)	21.01 (ksc.)	24.61 (ksc.)	18.23 (ksc.)	14.84 (ksc.)
-----------------------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

วัฏจักรเปียกสลับแห้งจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์โดยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับสภาวะความชื้นของดินในแต่ละรอบ ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ 5% ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์ 0, 5 และ 10% ที่รอบเปียกสลับแห้ง 1 ถึง 15 รอบ ซึ่งจะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์ที่ 5% ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในทุกสภาวะ และเมื่อเพิ่มปริมาณนํ้ายาโพลิเมอร์เป็น 10% ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์ 10% ที่ลดลงนั้น ยังคงมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมนํ้ายาโพลิเมอร์ในสภาวะเดียวกัน ดังนั้นการผสมนํ้ายาโพลิเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสมเข้ากับดินซีเมนต์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของดินให้ดีขึ้นรวมถึงค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



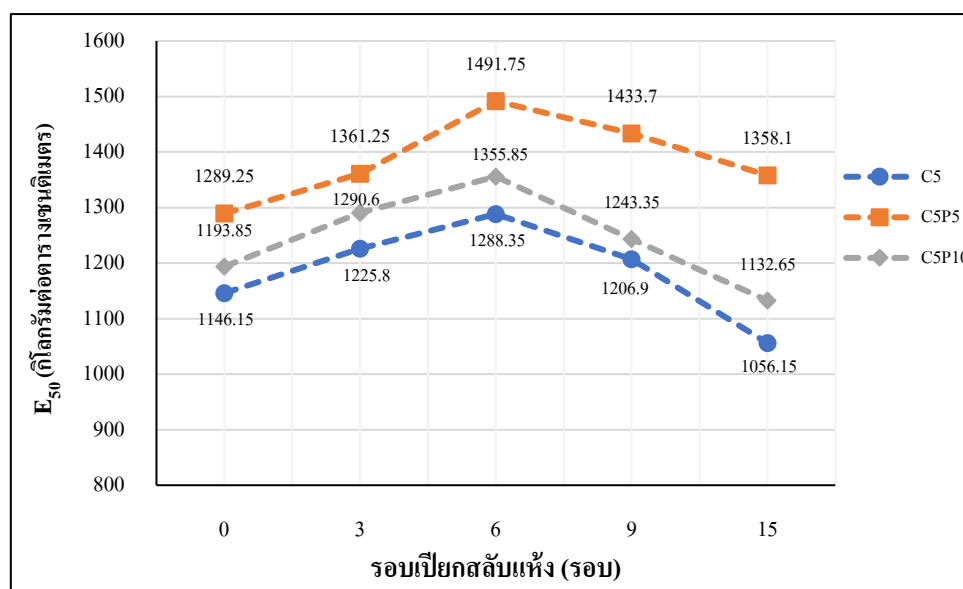
รูปที่ 4.8 อัตราส่วนค่ากำลังอัดของการทดสอบเปียกสลับแห้งที่วงรอบต่างๆ ต่อกำลังรับแรงอัดที่ไม่ผ่านวงรอบแห้งสลับเปียก ( $U/U_0$ ) ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 %

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแต่ละวงรอบต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทดสอบวงรอบแห้งสลับเปียก ( $U/U_0$ ) ของดินซีเมนต์ที่ผ่านรอบเปียกสลับแห้ง 1 ถึง 15 รอบ ที่อายุบ่ม 7 วัน ของ 5 ชุดข้อมูล พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของชุดข้อมูล ประดิษฐ์ C5P0, C5P5 และ C5P10 มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในช่วง 3 ถึง 6 รอบแรก และจะลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จะมีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 1.00 – 1.50 หาได้จากการนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านรอบเปียกสลับแห้งใด ๆ ( $U_i$ ) หารด้วยค่ากำลังรับแรงอัดที่ไม่ผ่านรอบเปียกสลับแห้ง ( $U_0$ ) ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดจะสอดคล้องกับชุดข้อมูล C5P0 [7] ที่มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 3 ถึง 6 รอบแรกและจะลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งมีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 1.00 – 3.00 คิดเป็น 2 เท่าของชุดข้อมูลประดิษฐ์ และเมื่อนำชุดข้อมูลประดิษฐ์ C5P0, C5P5 และ C5P10 มาเปรียบเทียบกับชุดข้อมูล C5P0 [10] พบว่ามีค่าอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันมีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 1.00 - 1.50

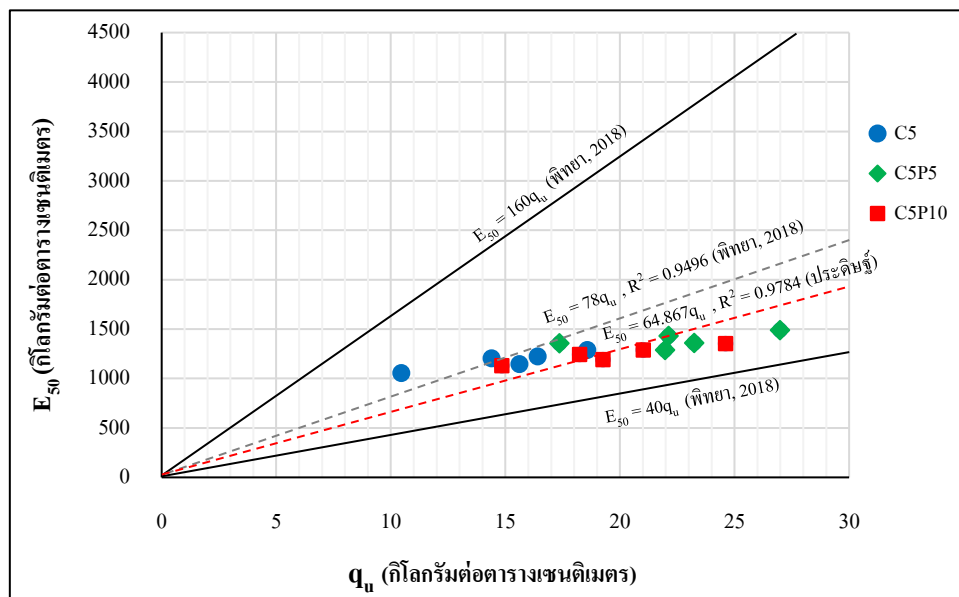
#### 4.4. ผลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ผสมน้ำยาโพลิเมอร์

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของดินซีเมนต์นั้นคือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยหาได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ซึ่งเป็นวิธีที่ยอมรับได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในสนาม 4 หรือ 5 เท่า อย่างไรก็ตามมีผู้รายงานว่าค่าโมดูลัสความเค้นมีความเหมาะสมสำหรับใช้ประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงของการรับน้ำหนักในสนาม [15] จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ประมาณค่า  $E_{50}$  (โมดูลัสความเค้น) ตามขั้นตอนที่ [16] แนะนำไว้โดย  $E_{50}$  คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิดไปยังความเค้นที่หาไว้ก่อน ณ จุดซึ่งมีค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 50 (จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด) **รูปที่ 4.9** พบว่าค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5 และ 10% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อนำมาเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมโพลิเมอร์ และจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์และที่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ 5 และ 10% ทั้ง 3 อัตราส่วนผสม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงรอบที่ 3 ถึงรอบที่ 6 เนื่องจากซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในช่วง 7 วันยังไม่หมด น้ำที่ซึมเข้าตัวอย่างเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ที่เหลือทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น จากนั้นค่าโมดูลัสจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้นพันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินจะเริ่มถูกทำลายส่งผลให้ความพรุนเพิ่มมากขึ้น น้ำซึมเข้าตัวอย่างได้มากขึ้น แรงดันมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าโมดูลัสลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผ่านรอบเปียกสลับแห้ง

จาก**รูปที่ 4.10** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด ( $q_u$ ) กับค่าโมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ ที่นำมาเปรียบเทียบกับ พิตยา (2018) พบว่าค่า  $q_u$  และค่า  $E_{50}$  ที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงที่ พิตยา (2018) แนะนำไว้ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างขอบล่างและขอบบน (Lower- Upper Boundary) และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $E_{50} = 64.867q_u$ ,  $R^2 = 0.9784$  ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของ พิตยา (2018) เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่า  $q_u$  กับค่า  $E_{50}$  ของ พิตยา (2018) ได้จากการทดสอบของดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมน้ำยาโพลิเมอร์ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่า  $E_{50}$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า  $q_u$  ที่เพิ่มขึ้นในทุกกรณี [17,18]



**รูปที่ 4.9** ค่าโมดูลัส ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ 5% และน้ำยาโพลิเมอร์ 5% และ 10% ที่วัฏรอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ( $q_u$ ) และโมดูลัสของดินซีเมนต์ ( $E_{50}$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับพิทยา 2018

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่า

1. ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ผสมโพลิเมอร์ 5 และ 10% มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมโพลิเมอร์ โดยการผสมโพลิเมอร์ที่ 5% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 21.96 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. โพลิเมอร์ช่วยให้ดินลดการสูญเสียมวลอันเนื่องมาจากอิทธิพลความเปื่อยสลายแห้ง ตลอดจนลดการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง โดยเฉพาะค่าความชื้นในขณะแห้ง การผสมโพลิเมอร์ที่ 10% จะช่วยลดการสูญเสียความชื้นได้ดีที่สุด
3. กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผสมโพลิเมอร์ 0, 5 และ 10% ที่ผ่านรอบเปื่อยสลายแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 6 อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา cementation โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 18.57 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจะลดลงเมื่อจำนวนรอบมากกว่า 6 รอบอันเนื่องมาจากอิทธิพลของค่าวงรอบเปื่อยสลายแห้งที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มเกิดการสูญเสียมวล
4. ค่าโมดูลัสของดินซีเมนต์ ( $E_{50}$ ) ที่ผสมโพลิเมอร์ 0, 5 และ 10% ที่ผ่านรอบเปื่อยสลายแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบที่ 3 ถึงรอบที่ 6 จากนั้นค่าโมดูลัสจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นโดยสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัด

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sawaliwong, K. & Jitsangiam, P. & Nusit, K. (2020). *Improvement of sub-standard lateritic soil with cement-polymer mixtures*. The 25<sup>th</sup> National convention on civil engineering.
- [2] Ngenprom, N. (2010). *Study on Properties of Laterite Soil Portland Cement and Slag Mix as a Pavement Materials*. RMUTP Research Journal, 4(1), 25-31.
- [3] Horpibulsuk, S. (2005). *Factors influencing strength development of cement stabilized soils for road construction*. Civil Engineering Department, School of Engineering, Suranaree University of Technology
- [4] ASTM (2015). *Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures*. ASTM D559 / D559M-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2015
- [5] Pinwiset, K. (2017). *The development of para soil cement road*. Engineering Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University.
- [6] Kumpala, A. & Chinklang, S. & Banjongkit, P. & Jitchaiyaphum, K. (2016). *Influence of wet-dry cycled on compressive strength of soil cement; case height cement content*. 21<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering 28-30 June.
- [7] Suebsuk, J. & Siriphan, A. (2017). *Effects of wetting and drying cycles on strength of cement stabilized lateritic soil as base course material*. Faculty of Engineering Chiang Mai University.
- [8] Had Kaew, I. & Nusit, K. & Jitsangiam, P. & Pra-ai, S. & Khumkud, N. & Ponpitakchai, T. (2021). *The study of the properties of the cement polymer-stabilized road materials*. The 26<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering 23-25 June.
- [9] Khumkud, N. (2022). *Laboratory assessment for long-term performance and durability of cement-polymer stabilized road base*. M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University.
- [10] Srichat, C. & Hormdee, D. (2022). *Effect of wet-dry condition on compressive strength of soil improvement with cement and fly ash-based geopolymers*. Engineering Journal of Research and Development, 33(1), 23-34.
- [11] Bureau of testing research and development. (2002). *Standard No. DH-S 501.1/2545*
- [12] Bureau of testing research and development. (1989). *Standard No. DH-S 206/2532*
- [13] Bureau of testing research and development. (1990). *Standard No. DH-S 204/2533*
- [14] Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006). *Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse-grained soils laboratory and field study*. Soils and Foundations, 46(3): 351-366.
- [15] Akram, T. & Memon, S, A. & Obaid, H. (2009). *Production of low-cost self-compacting concrete using bagasse ash*. Construction and Building Materials, 23(2), 703-712.
- [16] Holtz, W.G. & Gibbs, H.J. (1956). *Engineering properties of expansive clays*. Transaction of the American Society of Civil Engineering, 121, 641-663.

**(Research article)****Journal of Engineering Technology Access**

[17] Horpibulsuk, S. & Suddeepong, A. & Chinkulkijniwat, A. & Liu, M.D. (2012). *Applied clay Science Strength and compressibility of lightweight cemented clays*. Applied clay Science, 69, 11-21.

[18] Pitthaya Jamsawang. (2018). *Applications of soil cement in civil engineering works*. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

# The Influence Of Welding Processes On The Microstructure And Mechanical Properties Of Hardfacing

K.Intapo<sup>1</sup>, M.Pareesroi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Loengnoktha Technical College 1

<sup>2</sup>Nakhon Phanom Technical College 2.

metheeball0166@gmail.com

## Abstract

This investigation delves into the efficacy of three distinct welding methodologies, specifically Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Shielded Metal Arc Welding (SMAW), and Flux Cored Arc Welding (FCAW), within the framework of hardfacing applications. The primary objective of the study is to assess their influence on the mechanical properties and microstructure of the resultant welded materials.

Empirical analyses were undertaken to appraise the hardness and wear rate ensuing from each welding process. The results unveiled the superior efficacy of the GTAW welding process, manifesting in the attainment of the highest levels of hardness and wear resistance. Subsequent microstructural examinations elucidated the pivotal role of carbide formation, with a particular emphasis on the amalgamation of molybdenum and tungsten, contributing to heightened hardness in scenarios characterized by substantial welding volume.

This research not only furnishes valuable insights into the relative efficacy of welding hardfacing methodologies but also underscores the significance of microstructural considerations in attaining optimal mechanical properties. The ramifications of this study contribute to the progression of welding technology, furnishing guidance for the judicious selection of processes contingent upon the desired material attributes in hardfacing applications.

**Keywords:** Microstructure, Mechanical properties, Welding hardfacing

## I. INTRODUCTION

Hardfacing is a technique used to improve the surface properties of metal components such as those found in agricultural machinery sugarcane milling equipment and mining soil preparation equipment. It involves depositing a layer of hard metal on a softer base metal typically a low-carbon steel. This is commonly done using welding processes. Hardfacing increases the hardness and wear resistance of the surface layer without sacrificing its ductility or tensile strength. This is achieved by developing a martensitic microstructure within the austenitic parent material, which is a common approach to improving wear resistance. The hardness of the weld bead depends on a number of factors, including the geometry and distribution of hard phases, as well as the density, size of particles, and strain hardening behavior. Weld bead properties are also influenced by the welding process.

The general process commonly used for solid-state welding includes various Oxyacetylene gas welding (OAW), gas metal arc welding (GMAW), and shielded metal arc welding (SMAW) are all different techniques used in welding. and flux-cored arc welding (FCAW). These different welding processes impact the efficiency of welding, weld penetration, mechanical properties, chemical properties, and the cost of solid-state welding [6-11,12]. John J. Coronado et al. [13] studied the influence of the welding process on the durability of solid-state welds and compared flux-cored arc welding with shielded metal arc welding. using chromium-molybdenum filler wire.

They found that the crack susceptibility of welds made using flux-cored arc welding was lower than that of shielded metal arc welding. G.R.C. PRADEEP et al. [14] compared gas welding to gas metal arc welding and its influence on the workpiece's toughness using a nickel-based filler wire. They found that the gas welding process resulted in lower crack susceptibility compared to gas metal arc welding.

As previously mentioned, high-quality welding wires are predominantly used in the connection process. Therefore, as an alternative for application and cost reduction in the maintenance of worn components, this research study has examined the comparative welding processes using carbon steel wire on medium carbon steel. This serves as an option for decision-making for industry groups and individuals interested in exploring. This experiment utilized the gas tungsten arc welding process, electric arc welding, and flux-cored arc welding processes, which affected the hardness value, welding penetration rate, chemical composition of the weld, and the microstructure of the welded joint.

## II. Methodology

The research process involves comparing The extent to which metal hardness as a result of welding, weld penetration rate, chemical composition of the weld, and the microstructure of the welded joint surface. The research method is as follows:

### 2.1 Materials and Processes.

In the experimental process of welding hard surfaces, GTAW and FCAW processes are employed. The welding is performed on medium carbon steel composite material, as indicated in Table 1. The welding for this experiment is conducted in a single-pass manner, as shown in Figure 1. For the experiment, three types of carbon steel group welding wires are used, and the ingredients of the welding wires are listed in Table 2. This experiment utilizes a heat input of 2.08 Joules per millimeter square.

### 2.2 Microstructure

The changes in the microstructure of solidified surface-welded joints, as shown in Figure 1, were examined in accordance with ASTM E470 [15] standards. The microstructure of the joint area was studied to compare the microstructures and chemical compositions of the welds. The examination of the specimens in the weld area was Carried out with the use of a scanning electron microscope (SEM). to observe the different effects of welding processes. The mechanical properties, including hardness and toughness, were tested in the welds. The hardness of the welds was determined following the ASTM E384 [16] standard, using the Rockwell Test (HRC) testing machine, and the obtained values were then averaged. As for the toughness testing of the welds in a notched square-shaped specimen with dimensions of 76x25 millimeters, the test specimens were prepared as shown in Figure 1 and polished with abrasive paper. The testing duration was 5 minutes with a load of 50 newtons. The characteristics of the toughness testing are depicted in Figure 2

## III.RESULT

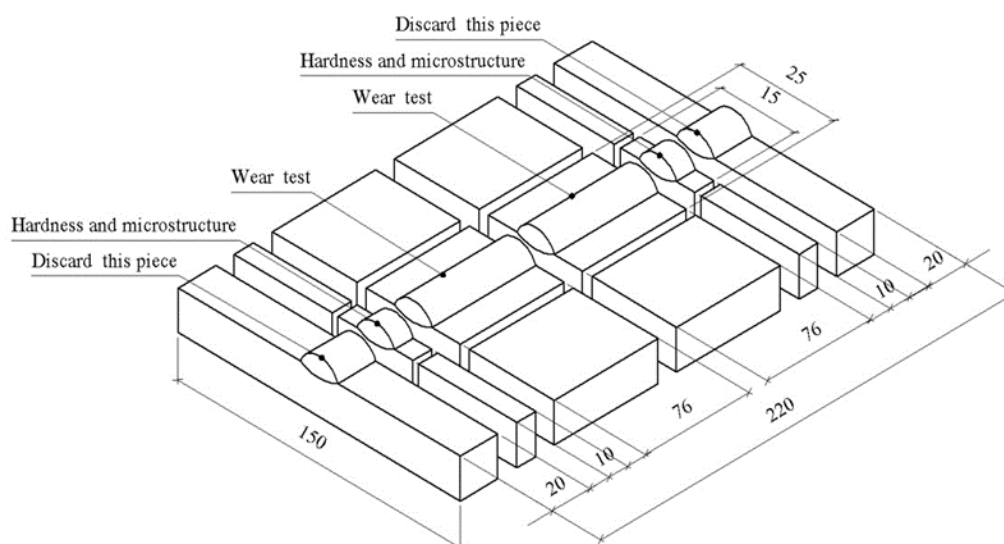
### 3.1 Hardness and Wear of Weld

This research project involves a comparison of the weld processes, Compare electric arc welding, tungsten inert gas welding, and flux cored arc welding on medium carbon steel in detail. The study investigates the heat input of 2.08 joules per square millimeter. Subsequently, the

workpieces are examined for mechanical properties. The experiments revealed that the welding process impacts the workpiece's strength and ductility.

**Table. 1** chemical properties of Material (Wt%)

C	Si	S	P	Cr	Mn	Fe
0.48	0.23	0.009	0.007	0.32	0.64	Balance

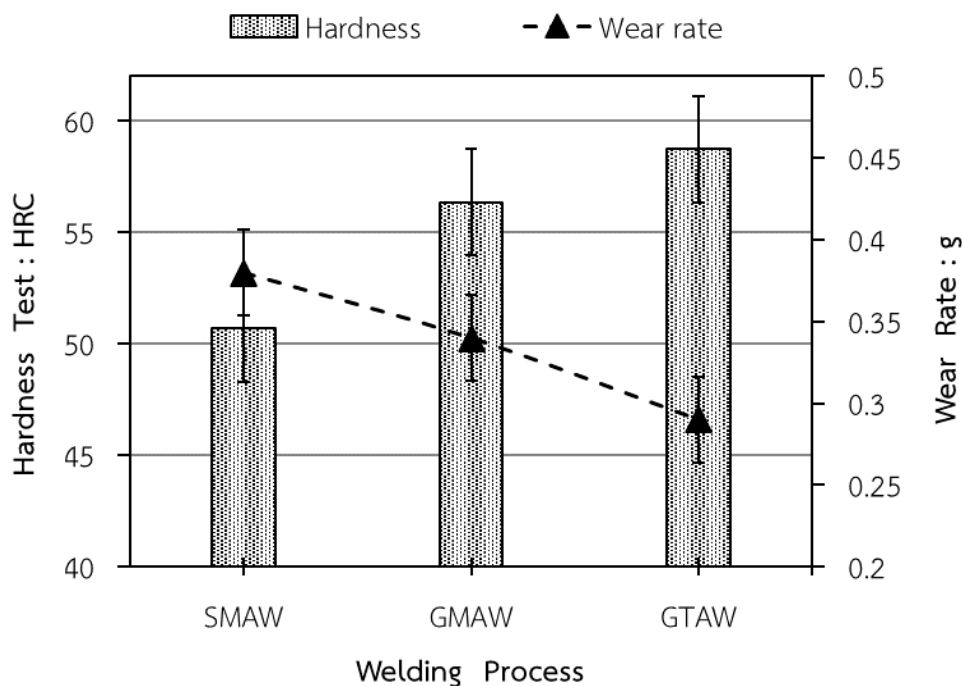


**Fig.1** Dimensions and Cutting Specimen

**Table. 1** chemical properties of Wire (Wt%)

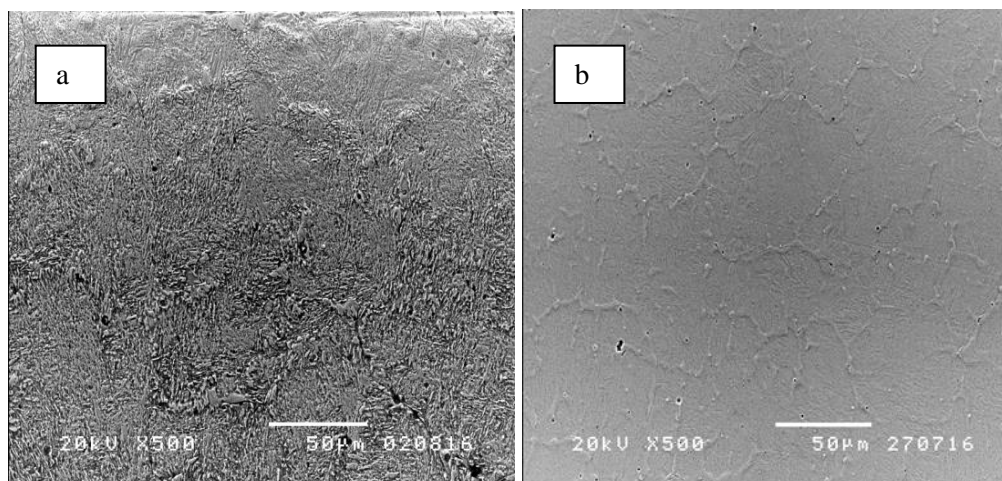
Welding Process	Chemical composition						
	C	Si	Cr	Mn	Mo	W	Fe
FCAW	2.00	1.00	5.00	8.00	-	-	Bl.
GTAW	5.00	1.50	6.40	3.00	0.94	0.98	Bl.
SMAW	4.00	1.50	8.50	2.00	-	-	Bl.

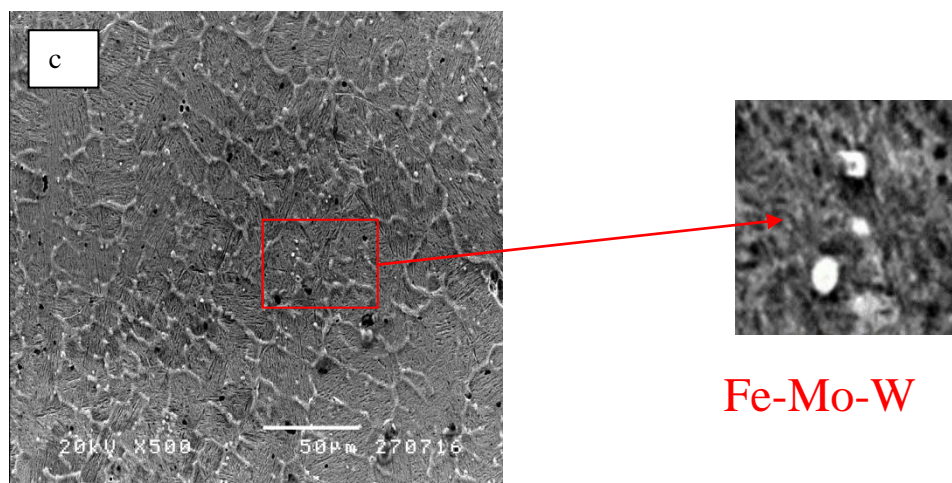




**Fig.2** The relationship between hardness and the strength of welds on a solid surface.

The welding procedure qualification, the maximum hardness value for GTAW welding is 58.72 HRC with a dilution rate of 0.29 grams. As for FCAW welding, the average hardness value of the weld joint is 56.35 HRC, and the dilution rate is 0.34 grams. Lastly, for SMAW welding, the minimum hardness value of the weld joint is 50.68 HRC, and the dilution rate is 0.38 grams, as shown in Figure 2.

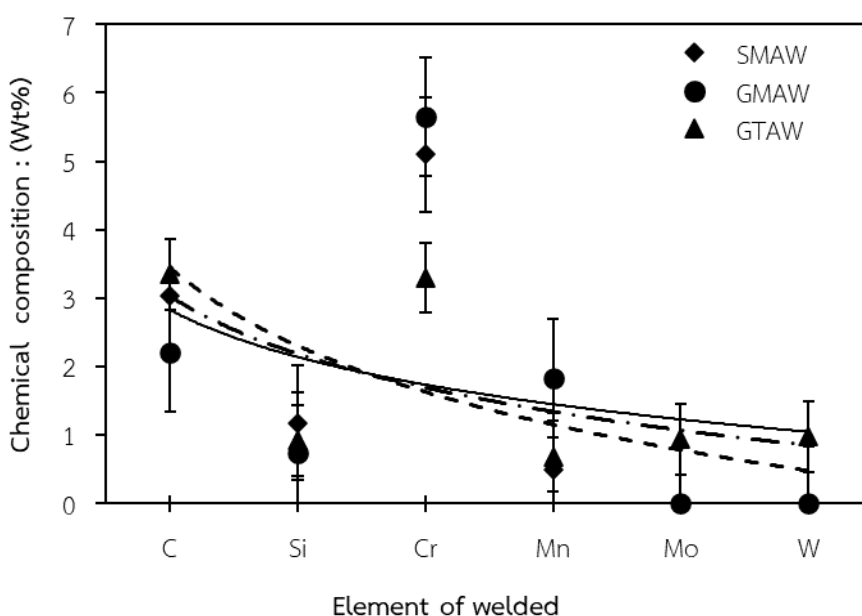




**Fig.3** Microstructure of Weld (a) SMAW, (b) FCAW, (c) GTAW.

### 3.2 Microstructure of Weld

The microstructure of welds in various welding processes. It was found that the microstructure of the weld joint produced by The SMAW process bears resemblance to the ferrite-pearlite structure. As shown in Figure 3 (a), this resulted in the lowest hardness value and the highest toughness rate. However, when the welding process was changed to Flux-Cored Arc Welding (FCAW) with the same heat, The microstructure of the weld will also change. It has a structure similar to martensite at the weld seam. As a result, the maximum value increases. The hardness values are shown in Fig. 3 (b). On the other hand, The GTAW process offers the lowest strength to hardness ratio. from inspection It was found that carbides occur in high volume fractions within the weld zone. The carbides are Fe-Mo-W, resulting in the highest hardness values compared to other welding processes. As shown in Figure 3(c), and the hardness test results as shown in Figure 2.



**Fig.4** Chemical of Weld (a) SMAW,(b) FCAW, (c) GTAW.

### 3.3 Chemical Properties of Weld

chemical composition of the weld joint in different welding processes, as shown in Figure 4, reveals that the GTAW welding process consists of C-Si-Mn-Mo-W, which has a higher composition compared to other welding processes, as indicated in Table 2. The maximum hardness value is greatly influenced by the chemical composition of the weld. Research has shown that the presence of Mo and W in the metal affects an increase in hardness and promotes the formation of intermetallic compounds in the metal's hardening mechanism, as shown in Figure 3 (c). High levels of carbides in the weld joint result in lower weld dilution rates. On the other hand, in other welding processes, the presence of elements such as C-Si-Mn-Cr has no effect on carbide formation but aids in phase transformation in the metal, resulting in a relatively lower hardness of the weld joint.

## VI. DISCUSSION AND CONCLUSION

experimental results comparing the joining processes of metallic properties, microstructure, and chemical composition can be summarized as follows:

4.1 Comparative analysis of the weld joint hardness and toughness reveals that the GTAW welding process provides the highest hardness and the lowest toughness when compared to the FCAW and SMAW welding processes for this experiment.

4.2 The microstructure of the weld joint indicates that welds produced using the GTAW process exhibit carbide precipitation in the high weld zone, resulting in the highest hardness and lowest toughness.

4.3 The chemical composition of the GTAW welding process includes alloying elements that promote carbide formation, leading to increased weld hardness.

## ACKNOWLEDGMENT

This research work has been successfully completed thanks to the support of various parties, particularly the Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suphanburi Campus, which provided equipment and tools.

## References.

- [1] Crook, P., & Farmer, H. N. (1992). Friction and wear of hardfacing alloys. ASM International, ASM Handbook, 18, 758-765.
- [2] Eyre, T. S., & Farrell, R. M. (1967). Friction and wear of engineering materials. Engineering Materials and Design, 10(9), 1323.
- [3] Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology: friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann.
- [4] Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., Leon, L. M., & Toro, A. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. wear, 259(1-6), 52-61.
- [5] Vazquez, C. R. (2000). Comportamiento frente al desgaste abrasivo de las aleaciones con tendencia a la formación de carburos aplicadas por soldadura. Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios, (134), 5-12.
- [6] Chatterjee, S., & Pal, T. K. (2003). Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron. Wear, 255(1-6), 417-425.
- [7] Pintaude, G., Tschiptschin, A. P., Tanaka, D. K., & Sinatora, A. (2001). The particle size effect on abrasive wear of high-chromium white cast iron mill balls. Wear, 250(1-12), 66-70.
- [8] Sin, H., Saka, N., & Suh, N. P. (1979). Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. Wear, 55(1), 163-190.

- [9] Gåhlin, R., & Jacobson, S. (1999). The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces. *Wear*, 224(1), 118-125.
- [10] Mann, P. S., & Brar, N. K. (2015). Tribological aspects of agricultural equipments: a review. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 2, 1704-1708.
- [11] Wu, W., & Wu, L. T. (1996). The wear behavior between hardfacing materials. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27, 3639-3648.
- [12] Coronado, J. J., Caicedo, H. F., & Gómez, A. L. (2009). The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, 42(5), 745-749.
- [13] PRADEEP, G., RAMESH, A., & PRASAD, B. D. Comparative Study of Hardfacing of AISI 1020 Steel by Gas Welding and Tig Welding Processes. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 18-22.
- [14] Anameric, B., & Kawatra, S. K. (2006). Laboratory study related to the production and properties of pig iron nuggets. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 23, 52-56.
- [15] Wang, X., Han, F., Liu, X., Qu, S., & Zou, Z. (2008). Microstructure and wear properties of the Fe–Ti–V–Mo–C hardfacing alloy. *Wear*, 265(5-6), 583-589.
- [16] Kashani, H., Amadeh, A., & Farhani, M. (2007). Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing Part 1–Effect of microstructure and hardness. *Materials science and technology*, 23(2), 165-170.

# Optimization of the AA6061-T6 aluminum alloy Burnishing Process by response surface method

Panuwat Thosa<sup>1\*</sup>, Anantachin Khamsupa<sup>2</sup>

*Division of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University*

*panuwat@npu.ac.th*

## Abstract

The influence of operational constraints, the burnishing procedure was conceived and formulated with the aim of enhancing the finalization of the workpiece, thereby mitigating production time. This investigation aimed to scrutinize the optimization potential of the burnishing process applied to AA6061-T6 aluminum alloy through CNC lathe operations, with a specific focus on its impact on tensile strength. The experimentation sought to identify the optimal parameters for the burnishing process, establishing a rotational speed of 200 revolutions per minute, a feed rate of 0.2571 meters per minute, and a feed depth of 0.09 millimeters. The resultant outcome exhibited a peak tensile strength of 370 megapascals. Subsequent microstructure analysis of the workpiece revealed that diverse factors exerted negligible influence on the structural integrity, particularly on the injection structure.

**Keywords:** Burnishing process, Aluminum alloy, Response Surface Method

## I. INTRODUCTION

Aluminum, a versatile material extensively employed in diverse industrial sectors such as aerospace, automotive, and shipbuilding, possesses exceptional attributes, including lightness, high tensile strength, and resistance to corrosion. These properties render it highly suitable for a broad spectrum of applications. Presently, aluminum is classified into nine distinct types, spanning from grade 1xxx to 9xxx, with each variant being applied in distinct industrial contexts based on its unique characteristics. In the manufacturing of aluminum components for the automotive industry, a variety of processes are deployed, predominantly encompassing cutting methodologies like shearing, peeling, reducing, and drilling for assembly. These manufacturing procedures exert a substantial influence on the ultimate product quality, encompassing considerations such as surface smoothness and component dimensions. For instance, a predominant proportion of aluminum components within the automotive sector undergo shaping through cutting techniques such as shearing, peeling, reducing, and drilling for assembly. These processes invariably impact the surface finish quality during the shaping phase, with critical factors including surface smoothness, component dimensions, and the inherent constraints of the shaping methodology. Furthermore, the ornamentation of composite aluminum poses challenges owing to the material's hardness or the impracticability of modifying the surface through conventional grinding approaches. Achieving the final surface finish necessitates recourse to a burnishing process, wherein variables such as rotational speed, compaction force, and feed rate assume paramount importance. These variables exert a considerable influence on both the surface smoothness and the mechanical properties of composite aluminum alloys, exemplified by Al 7175-T6, as expounded by Ozer, Melika, et al. in their 2023 discourse [1].

Response Surface Methodology (RSM) is a statistical technique that applies mathematics to analyze and solve problems, focusing on the creation of mathematical models to find optimal or

minimal values of independent variables that lead to the highest or lowest response. The use of response surface methodology helps explore the impact of various variables on the selected response systematically, providing structured guidelines driven by data to make the process more efficient. It aids in predicting the effects of changes in suitable independent variables, reducing the need for extensive experimentation. In September 2022 [2], Saffar, Saber, and Hamid Eslami applied statistical techniques and employed the Taguchi method to analyze the surface pressing process of aluminum alloy 5052. The study aimed to identify the optimal parameters of the machine in the manufacturing process. The findings revealed that the suitable condition for smooth surface pressing is a rotation speed of 200 revolutions per minute, a feed rate of 0.5 meters per minute, and a pressing force of 200 Newtons. The average minimum surface roughness obtained was 0.47 micrometers. Additionally, in April 2021 [3], Suriya Prasomthong and Suriya Namkaew. reported that the surface pressing process not only improves the characteristics and quality of the workpiece surface but also enhances its resistance to corrosion in the outer surface, contributing to [4-5].

the research study mentioned above, it was found that the burnishing process can effectively enhance the quality of the surface of workpieces. Therefore, the researchers aim to investigate the appropriate factors in the burnishing process of aluminum alloy grade AA6061-T6 using ceramic balls. The study examines controllable factors such as rotation speed, feed rate, and force applied during the burnishing process to analyze the results and identify optimal conditions for efficient surface burnishing. The researchers hope that this study will be beneficial for both academic research and future industrial applications.

## II. METHOD

### 2.1 Burnishing process

The burnishing procedure constitutes a methodology employed for the amelioration of the surface condition of a given workpiece, thereby effectuating enhanced smoothness and augmenting its mechanical strength attributes. This technique is universally applicable across diverse material types. Its execution involves the utilization of a burnishing tool, typically configured as a roller, exerted upon the workpiece surface with a precision-centric mechanism. The burnishing process imparts surface refinement by modifying the elevation of the workpiece surface, engendering a sleeker and more lustrous appearance without material removal. This outcome is realized through the utilization of a mobile tool, frequently accompanied by a ball or roller endowed with unrestricted rotational movement upon the surface. Consequently, the burnishing process induces plastic deformation within the surface stratum of the material, as elucidated in Figure 1.

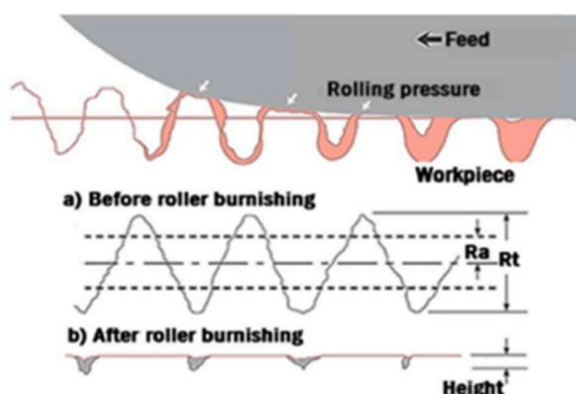
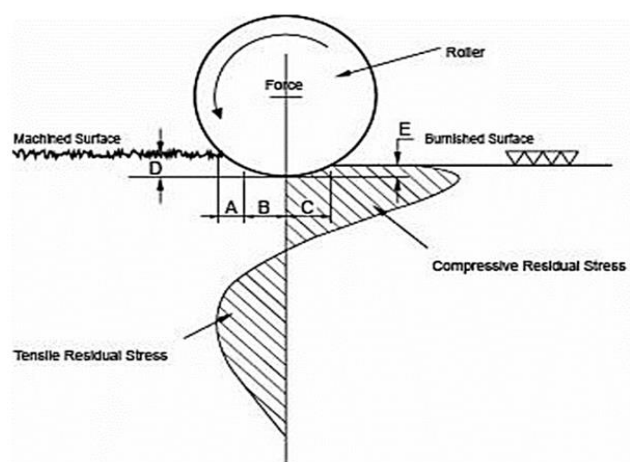


Figure 1. Surface changes by polishing process. [6]

the workpiece is pressed against the rotating surface at a controlled rotational speed and moves forward according to the rate of motion specified by the machine, surface compression is applied to adjust the size and refine the surface of the rapidly moving workpiece. This reduces the time required for the production of machine parts, as the workpiece does not need to be removed from the machine. The entire process can be completed within a single machine, saving time and labor in the manufacturing process. In the automotive industry, the process of surface compression is increasingly being incorporated to enhance production efficiency. This is due to its advantages in accurately controlling the size and quality of the surface, resulting in efficient production of workpiece products. The process simplifies and reduces the cost of production, with minimal deviation, less than 0.0005 inches. The benefits of the surface compression process include.

- Achieve improved surface finish between 1 to 10 microinches Ra.
- Increase workpiece hardness by up to 5 to 10 percent.
- Reduce production cycle time.
- Attain cleaner workpiece surfaces compared to other polishing methods.
- Potential cost savings in the manufacturing process, such as eliminating the need for regrinding or surface burnishing.

the burnishing ball is pressed onto the prepared surface of the workpiece, which has been previously prepared but still exhibits a surface roughness below 80 or retains the original surface (D: Machine Surface), the original surface features a low surface height. When the burnishing ball contacts the surface with an appropriate and constant force during its uniform movement, pressing on the surface results in the flow of material from the wave peaks to the lowest points of the waves on the material's surface. This leads to a uniform and increased surface smoothness, as depicted in point (E: Burnishing Surface). Meanwhile, the force applied by the burnishing ball causes permanent deformation (Plastic Deformation) in the material's flow area, creating a compressive residual stress in the surface region that comes into contact. Similarly, the internal surface of the material influenced by the external pressure from the burnishing ball undergoes tensile residual stress, resulting in increased material strength due to the accumulation of external stress. Furthermore, the permanent deformation areas often experience a significant increase in dislocation density, contributing to a higher value of dislocation. Consequently, the dislocation interactions between adjacent surfaces lead to increased surface hardness and strength, with an increase of 5-10 percent or more, as compared to the mechanism of the surface burnishing process, as illustrated in Figure 2.



**Figure 2.** the surface burnishing process.

## 2.2 Surface burnishing Experiment

the study of factors affecting the performance of machinery in production, experiments on surface burnishing are conducted, including the variables of rotational speed, feed rate, and surface burnishing pressure. All three factors often impact the surface quality of the workpiece [1]. The experiments utilize a CNC lathe machine capable of controlling rotational speed and tool movement with a ceramic ball, maintaining a constant pressure, and a pressing depth of 0.25 millimeters. The pressing is performed in a single operation, and the pressing tool is designed to measure the force applied using a spring as a reference for distance. The adjustable screw mechanism is employed to set the screw pitch, with a force gauge measuring the pressure in surface burnishing. The experimental process is illustrated in Figure 2. Subsequently, the workpiece is measured for surface roughness using a mobile contact measuring tool. The average surface roughness value is then analyzed to assess the efficiency of the experimental process.

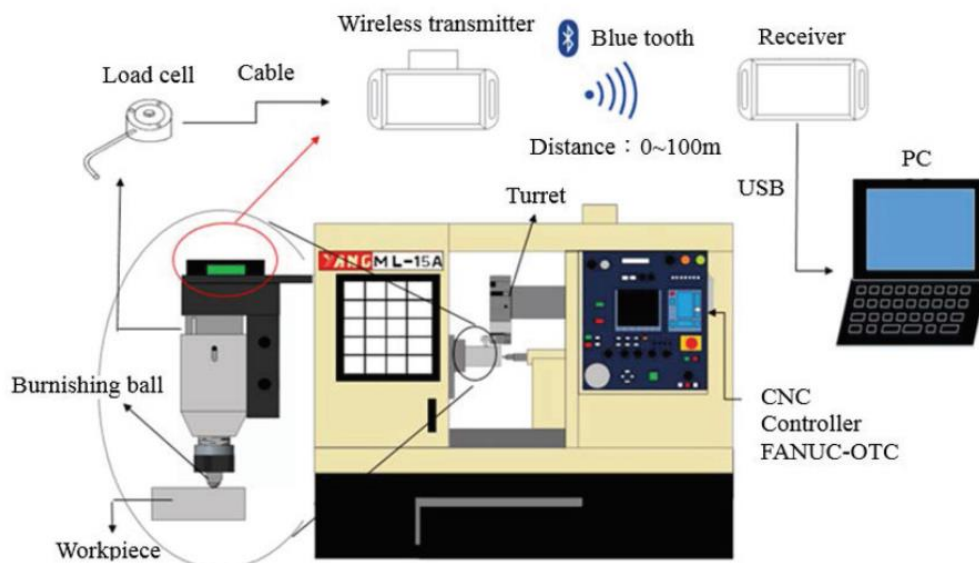


Figure 3. the process of polishing surface of AA6061-T6 aluminum alloy.

## 2.3 Experimental Design

Response Surface Methodology (RSM) is a technique that integrates mathematical and statistical techniques to model and analyze problems where the response variable is influenced by multiple factors or independent variables. The method is used to construct models and analyze problems related to the response variable, establishing relationships with various factors or independent variables to determine optimal response levels. This experimental design is referred to as Response Surface Design. However, in practical applications, the true nature of the relationship between the response variable and the independent variables is often unknown. Therefore, an approximation of this relationship is necessary, and it is commonly found that a second-order model is preferred. This is because it is less complex and simpler compared to other models while still capable of representing the second-order model as follows.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Where: y = Response Variable  
xi = Factor i ; i  
k = Total number of factors



$\beta_0$  = y intercept

## 2.4 Experimental Materials

The experimental materials utilized in the study included AA6061-T6 alloy aluminum with a central diameter of 22 millimeters and a length of 190 millimeters. The chemical composition and mechanical properties of the AA6061-T6 alloy aluminum are presented in Table 1. The handle of the ceramic ball probe was constructed using SKD 11 steel with a head central diameter of 35x35 millimeters and a handle central diameter of 25x25 millimeters. The tooling material used for pressing was a ceramic ball with a central diameter of 8 millimeters, as detailed in Table 2.

**Table 1.** Chemical Properties of 6061-T6.

Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Fe
Base	0.4- 0.80	0.15- 0.40	0.15 Max	0.80- 1.20	0.04- 0.35	0.25 Max	0.15 Max	0.70 Max

**Table 2.** Mechanical Properties of Ceramic.

Young's modulus (GPa )	Strength (MPa)	Vicker's hardness number
230	700	300

## III. BURNISHING EXPERIMENT

aluminum alloy AA6061-T6 workpieces according to specified dimensions, with a central diameter of 22 millimeters and a length of 190 millimeters, as shown in Figure A. Subsequently, take the prepared AA6061-T6 alloy spool and perform shaping using a turning and peeling method. Utilize a D-shaped cutting blade with a cutting speed of 250 meters per minute and a feed rate of 0.3 millimeters per revolution. Turn and peel the surface to achieve a central diameter of 21 millimeters. The turning and peeling process should result in a length of 70 millimeters, as depicted in Figure B. Introduce the prepared workpiece, shaped according to the specified dimensions, into the surface finishing process using a CNC lathe machine (UL-15 Flat Bed). The designated parameters for this process are rotational speeds of 200, 400, and 600 revolutions per minute and movement speeds of 0.15, 0.25, and 0.35 meters per second, as illustrated in Figure 3.



**Figure 4.** Ball ceramic Burnishing process.

### 3.1 Mechanical Properties Testing

the mechanical properties testing process, the strength properties of materials are evaluated, typically through destructive testing. The experiments in this test will involve hardness testing and tensile strength testing.

### 1. Tensile Strength

This is a test of the material's resistance to tensile forces. A sample of the material to be tested is slowly pulled, and the pulling speed can be calculated using Equation 1 with force and constant rate according to the ASTM E8-04 testing standard. The sizes are indicated in the figure 4 point c. The graph shows the relationship between the material's deformation from the initial point of deformation to the point of fracture, as shown in Figure 4 c. The results are recorded to calculate the average value and to plot a graph using the Minitab program.



**Figure 5.** ASTM E8-04

### 3.2 Optimization Process

Experimental Design Using Surface Response Analysis and Box-Behnken Design (BBD) with 3 Factors: Spindle Speeds ( $X_1$ ), Feed Rate ( $X_2$ ), and Depth of Burnishing ( $X_3$ ), consisting of a total of 17 experiments, is presented in Figure 5. The factor levels were determined based on relevant research and experimental tool specifications, with three levels: low (-1), medium (0), and high (1), as shown in Table 3. The experimental sequence is provided in Table 4. The analysis of experimental results was conducted using statistical software, including model accuracy verification, decision-making efficiency (R-Square), and variance analysis.

The prediction equation for the tensile force was derived from the regression equation of the tensile force of the workpiece after burnishing, as shown in Equation (1), where Y represents the response value (tensile force). The analysis involved comparing experimental factors such as spindle speed, feed rate, and depth of tool penetration onto the workpiece. The goal was to identify the most suitable factors and use the composite desirability to measure the satisfaction level of the response. The composite desirability value ranges from 0 to 1, with a value of 1 indicating complete satisfaction with the response [6].

**Table 3.** Parameter of Burnishing process.

Factor	Level		
	-1	0	1
Spindle speeds ( $X_1$ )(RPM)	200	400	600
Feed rate ( $X_2$ ) (mm/min)	0.15	0.25	0.35
Depth of cut ( $X_3$ )	0.03	0.06	0.09

**Table 4.** Experiment of Burnishing.

Std	Run	Factor of Experimental			Tensile strength (MPa)
		Spindle speeds (RPM)	Feed rate (mm/min)	Depth of Burnishing (mm)	
14	1	400(0)	0.25	0.06	364.0
8	2	600(1)	0.25	0.09	366.5
17	3	400(0)	0.25	0.06	362.5
13	4	400(0)	0.25	0.06	362.5
7	5	200(-1)	0.25	0.09	370.0
10	6	400(0)	0.35	0.03	359.0
16	7	400(0)	0.25	0.06	364.0
5	8	200(-1)	0.25	0.03	364.5
1	9	200(-1)	0.15	0.06	363.5
12	10	400(0)	0.35	0.09	361.5
4	11	600(1)	0.35	0.06	362.5
15	12	400(0)	0.25	0.06	369.5
3	13	200(-1)	0.35	0.06	361.5
2	14	600(1)	0.15	0.06	362.5
6	15	600(1)	0.25	0.03	367.0
11	16	400(0)	0.15	0.09	363.0
9	17	400(0)	0.15	0.03	359.5

Table 4 shows the results of the tensile strength test, indicating that the tensile strength falls within the range of 359.0 – 370.0 MPa. The analysis of the relationship between response factors utilized a significant level regression model. The quadratic model was found to be appropriate based on the p-value ( $p < 0.05$ ), lack of fit ( $p \geq 0.05$ ), and the coefficient of determination (R-Sq), which was high.

**Table 5.** Response surface regression analysis.

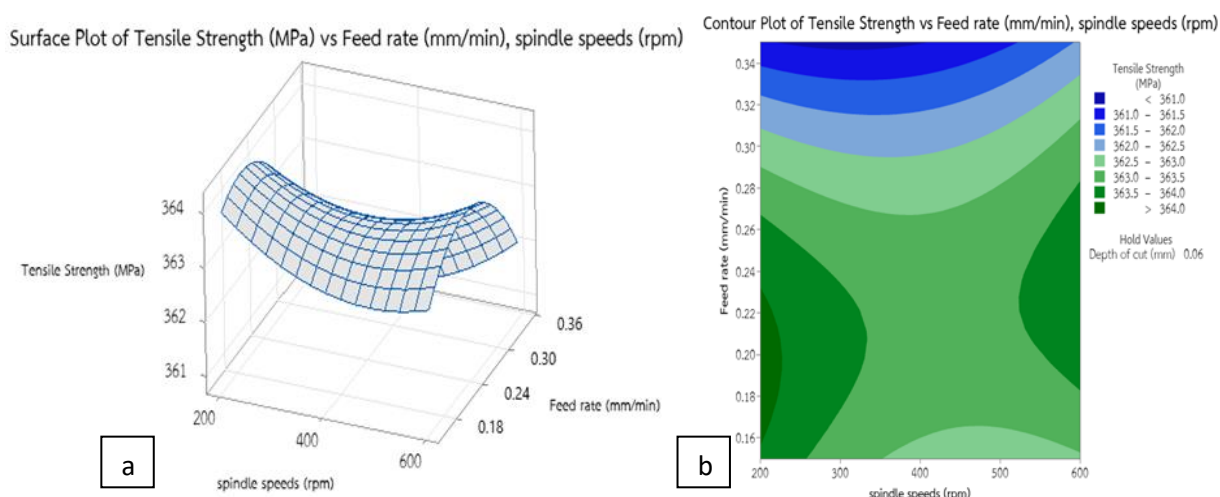
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	363.200	0.466	778.78	0.000	
Spindle speeds (rpm)	0.000	0.369	0.00	1.000	1.00
Feed rate (mm/min)	-0.938	0.369	-2.54	0.039	1.00
Depth of Burnishing (mm)	2.188	0.369	5.93	0.001	1.00
Spindle speeds (rpm)*spindle Speeds (rpm)	0.587	0.508	1.16	0.286	1.01
Feed rate (mm/min)*Feed rate (mm/min)	-1.288	0.508	-2.53	0.039	1.01
Depth of Burnishing (mm)*Depth of Burnishing (mm)	3.462	0.508	6.81	0.000	1.01

S = 1.04283 R-sq = 94.08% R-sq (adj) = 86.46% R-sq (pred) = 31.06%

**Table 6.** Analysis of the Maximum Tensile Strength Variation of the Workpiece.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	120.887	13.4319	12.35	0.002
Linear	3	45.312	15.1042	13.89	0.002
spindle speeds (rpm)	1	0.000	0.0000	0.00	1.000
Feed rate (mm/min)	1	7.031	7.0312	6.47	0.039
Depth of cut (mm)	1	38.281	38.2813	35.20	0.001
Square	3	57.762	19.2542	17.70	0.001
spindle speeds (rpm)*spindle speeds (rpm)	1	1.453	1.4533	1.34	0.286
Feed rate (mm/min)*Feed rate (mm/min)	1	6.980	6.9796	6.42	0.039
Depth of cut (mm)*Depth of cut (mm)	1	50.480	50.4796	46.42	0.000
Interaction	3	17.813	5.9375	5.46	0.030
Error	7	7.613	1.0875		
Lack-of-Fit	3	5.313	1.7708	3.08	0.153
Pure Error	4	2.300	0.5750		
Total	16	128.500			

The results of the analysis of the variance of tensile force at a significance level of 0.05 revealed that the p-value for the interaction term was found to be 0.030, and the squared term had a p-value of 0.001. These values are lower than the specified statistical significance level, indicating that there is a curvature on the surface of the response. It can be inferred that a quadratic model can be used to predict the tensile force from the tensile test. The equation predicting the maximum tensile force of the specimen, based on the coefficients obtained from the analysis of the regression equation shown in Table 3, is represented as Equation 2. When considering the adequacy of the model (Lack-of-Fit) as shown in Table 4, the p-value for Lack-of-Fit was found to be 0.153, which is greater than 0.05. Therefore, the null hypothesis cannot be rejected. It can be stated that the regression model obtained is appropriate, and it can be used to predict the maximum tensile force.



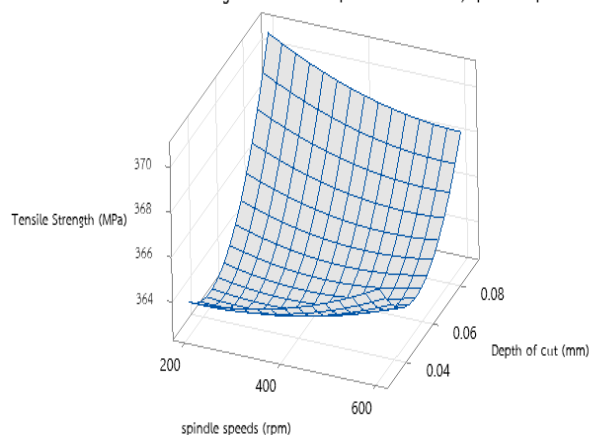
**Figure 6.** the maximum tensile force of the workpiece (a), surface response (b), and the framework graph between spindle speeds and feed rate.

The response surface for predicting the maximum tensile force value was performed using

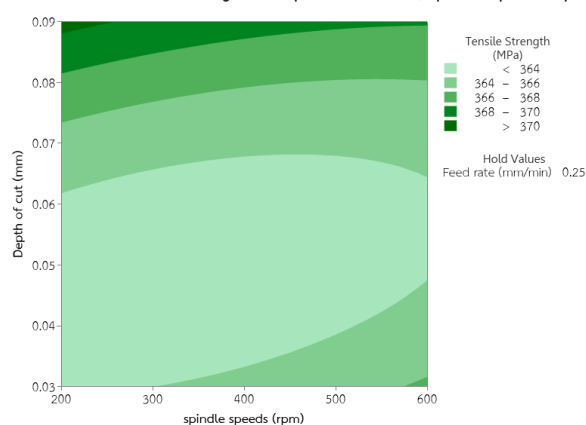
the equation obtained for predicting the tensile force value. This surface was then used to generate a response surface graph, as shown in Figure 1, depicting the surface response for the maximum tensile force of the workpiece. In Figure 6(a), the graph illustrates the levels of spindle speeds versus the levels of feed rate. It was observed that when the levels of spindle speeds and feed rate were at intermediate levels, the maximum tensile force value increased and decreased. Subsequently, when the graph showing the combined influence surface between spindle speeds and feed rate, as depicted in Figure 6(a), was presented in the form of a contour plot, the relationship between spindle speeds and feed rate for the amount of tensile force reception was revealed. This relationship exhibited a nonlinear effect, as shown in Figure 6(b). The curved lines in the dark green area indicate significantly higher tensile force reception of the workpiece, exceeding 364.0 MPa. The following curved lines depict the decreasing rates of tensile force reception for the workpiece as 363.5, 363.0, 362.5, and 362.0 MPa, respectively.

the relationship between spindle speed and depth of burnishing, as illustrated in Figure 7. The findings reveal that at moderate levels of spindle speeds, increasing the depth of burnishing results in a decrease in the tensile force of the workpiece, as depicted in Figure 7 (a). Subsequently, the combined influence of spindle speeds and depth of burnishing is presented in a graphical representation. It is evident that the relationship between spindle speeds and depth of burnishing has a non-linear effect on the tensile force, as shown in Figure 7 (b). The bold dark green curve in the central region indicates the maximum tensile force at 370 MPa, while the subsequent curves descending represent reduced tensile forces of 368, 366, and 364 MPa, respectively.

Surface Plot of Tensile Strength (MPa) vs Depth of cut (mm), spindle speeds (rpm)



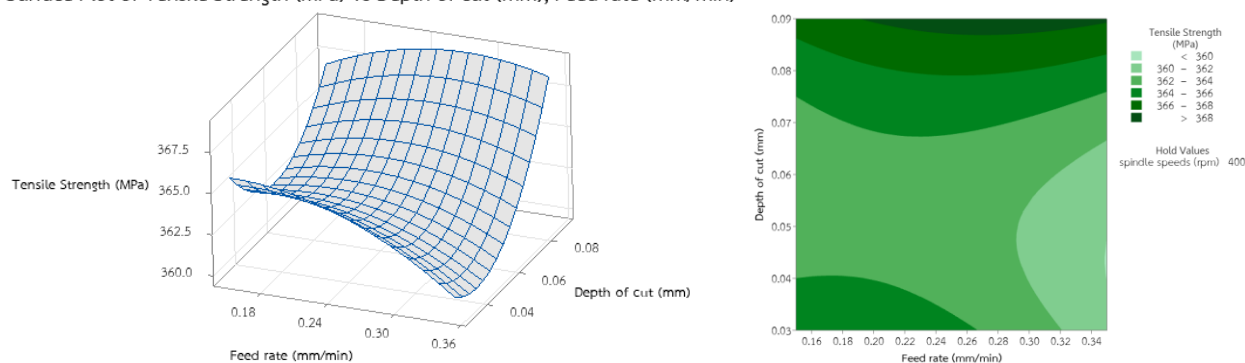
Contour Plot of Tensile Strength vs Depth of cut (mm), spindle speeds (rpm)



**Figure 7.** Tensile Strength of the workpiece (a) Surface response (b) Framework graph between Spindle speeds and Depth of Burnishing.

The relationship between the feed rate and the depth of cut affecting the workpiece tensile force was compared. According to Figure 8, it was observed that the tensile force increased when the depth of cut was increased. However, when the depth of cut was decreased, the tensile force was found to decrease, as shown in Figure 8 (a). Subsequently, the influence response surface graph between the feed rate and the depth of cut was presented in a schematic diagram, as shown in Figure 8 (b). It was found that the feed rate and depth of cut did not exhibit a linear relationship. The curved lines in the middle of the graph indicated higher compressive force values exceeding 368 MPa. The subsequent curved lines showed decreasing tensile force values of 366, 364, 362, and 360 MPa.

Surface Plot of Tensile Strength (MPa) vs Depth of cut (mm), Feed rate (mm/min) Contour Plot of Tensile Strength vs Depth of cut (mm), Feed rate (mm/min)



**Figure 8.** Tensile Strength of the workpiece (a) Surface response (b) Framework graph between Spindle speeds and Depth of Burnishing.

### 3.3 Experiment Result

The outcomes of the tensile force examination revealed that the tensile force fell within the range of 359.0 – 370.0 MPa. The investigation into the correlation between the response factors employed a regression model at a significance level of  $\alpha = 0.05$ . The quadratic simulation was deemed appropriate based on the p-value ( $p < 0.05$ ), lack of fit ( $p \geq 0.05$ ), and a high coefficient of determination (R-Sq). The R-Sq values analyzed in Table 5 illustrate the regression analysis. Notably, the R-Sq value attains a percentage of 94.08%, signifying that the independent variables (Spindle speeds, Feed rate, and Depth of cut) can elucidate the variation or alteration in the variables. This underscores the model's capacity to formulate a pertinent prediction equation for the response value.

## VI. CONCLUSION

This research aims to find suitable parameters in the Burnishing Process on ceramic surfaces with a central hole diameter of 8 millimeters. The specified parameters include cutting speed, feed rate, and depth of feed, with the intention of applying them in the production of various machine components. Test pieces were used to measure hardness, tensile strength, and analyze the microstructure. The study summarized the appropriate parameters and experimental results as follows:

1. Analysis of the factors influencing the tensile strength in the Burnishing Process revealed that the tensile strength ranged from 359.0 to 370.0 MPa. The optimal parameters were found to be a cutting speed of 200 revolutions per minute, a feed rate of 0.2571 meters per minute, and a feed depth of 0.09 millimeters.

2. Analysis of the factors influencing the hardness of the workpiece showed that it ranged from 111.000 to 121.774 Hv. The suitable parameters were determined to be a cutting speed of 393 revolutions per minute, a feed rate of 0.3258 meters per minute, and a feed depth of 0.090 millimeters.

## References

- [1] Ozer, M., Dalli, K., & Ozer, A. (2023). Effect of ball-burnishing on surface integrity and fatigue behaviour of 7175-T6 AA. *Materials Science and Technology*, 39(2), 248-257.
- [2] Saffar, S., & Eslami, H. (2022). Increasing the fatigue life and surface improvement of AL7075 alloy T6 by using ultrasonic ball burnishing process. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 16(3), 181-206.
- [3] Suriya Prasomthong, & Suriya Namkaew, (April, 2021). Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization of Production Machining Parameters.
- [4] H. Yilmaz and R. Sadeler, Effect of ball burnishing treatment on the fatigue behavior of 316L stainless steel operating under anodic and cathodic polarization potentials. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(11), 5393-5401..
- [5] A. Sova, C. Courbon, F. Valiorgue, J., Rech, and Ph. Bertrand, Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(8), 1922-1934.
- [6] Raza, A., & Kumar, S. (2022). A critical review of tool design in burnishing process. *Tribology International*, 174, 107717.
- [7] Diekmann, James E., & Nelson, Mark C. (1985). Construction Claims: Frequency and Severity. *Journal of Management in Engineering*, 111(1), 74-81.
- [8] Ekakul, T. (2000). *Research Methods in Behavioral Science and Social Science*. (8th edition). Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- [9] K. Hinkelmann and O. Kempthorne, *Design and analysis of experiments*, Volume 1: Introduction to experimental design 1st ED., John Wiley and Sons, Inc., NY, USA, 1994
- [10] Prasomthong, S., & Charoenrat, S. (2022). The optimization of welding hardfacing on wear resistance of FC-25 grey cast iron steel substrate by response surface methodology (RSM). *SNRU Journal of Science and Technology*, 14(2), 245154-245154.
- [11] Charoenrat, S., Pookamnerd, Y., & Prasomthong, S. (2021). การพิจารณาภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวต่อการต้านทานการสึกหรอด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนเลสอาร์คแบบสวดร้อนโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. *The Journal of Industrial Technology*, 17(2), 87-102.
- [12] K.Hinkelmann and O. Kempthorne, *Design and analysis of experiments*, Volume 1: Introduction to experimental design 1st ED., John Wiley and Sons, Inc., NY, USA, 1994



# Study of factors in reducing dust in the process of burning clay bricks using the repeated firing technique with an open kiln system

Apisit kaewchaloorn<sup>1</sup> and Sittichai charonerat<sup>2\*</sup>

Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University, 214 Moo 12, Nong Yat Sub-district, Mueang District, Nakhon Phanom, 48000 Thailand

**Corresponding Author:** Akecharone@gmail.com

## Abstract

This study focuses on reducing PM<sub>2.5</sub> dust pollution in clay brick burning by using the technique of extracting smoke by installing a scrubber, studying the appropriate factors in adjusting the settings, including wind power and scrubber distance that affect the amount of PM<sub>2.5</sub> dust, as well as checking the amount of gas after re-incineration. From the experiment, it was found that data were collected from incineration that did not use the smoke extraction technique with a scrubber for 24 hours. The data collection results from dust measurement with a sensor that measured PM<sub>2.5</sub> dust values where the average amount reached 694.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours, which is 13.87 times higher than the standard. When the Scrubber was installed and burned again, it was found that the amount of PM<sub>2.5</sub> dust particles decreased to a minimum of 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  from the analysis. P-Value found that both factors, Wind power and Scrubber distance, did not significantly affect the amount of PM<sub>2.5</sub> dust. With a statistical confidence level R-Sq = 81.87 %

**Keyword :** bricks, repeated firing technique, open kiln system

## 1. Introduction

Reducing pollution in the combustion process is necessary for many reasons. It focuses on protecting human health, the environment, and sustainable development. Combustion, which involves burning fuel to produce energy [1], is a major source of various pollutants that can hurt the environment. Important reasons for reducing pollution in the combustion process are (1) for air quality and human health; This is because the combustion process releases pollutants such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), particulate matter (PM), volatile organic compounds (VOC<sub>s</sub>), and carbon monoxide (CO) into the air. These pollutants can lead to gastrointestinal diseases. Breathe Heart and blood vessel problems and other human health problems, especially in communities with high levels of pollution [2] (2); to reduce climate change, the combustion of fossil fuels such as coal, oil, and natural gas releases carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) [3], which is an important greenhouse gas that contributes to climate change [4] (3). Reduce impact on the environment. Air pollution from combustion can cause acid rain. They are harmful to aquatic ecosystems, soil quality, and plants. These pollutants can also cause smog. Cause damage to the environment [5].

Currently, pollution from the combustion process in Thailand is a serious environmental and public health problem. This is especially true of burning fossil fuels such as coal, oil, and natural gas. In various industries, this process releases pollutants into the atmosphere. This leads to dust (PM<sub>2.5</sub>), causing various health problems, including respiratory diseases (such as asthma



**(Research article)****Journal of Engineering Technology Access**

and chronic lung disease) [6-8], cardiovascular problems, and even premature death. Vulnerable populations such as children, the elderly, and people with pre-existing health conditions are especially at risk. In the community, pollution from burning often comes from daily activities such as burning rice cobs, burning weeds, or even burning various types of biomasses, which are burned in the open. Household businesses are one of the factors that cause dust pollution, such as the production of red clay bricks, especially in the northeastern region of Thailand. In the areas of Roi Et, Kalasin, Maha Sarakham, Sakon Nakhon, Ubon Ratchathani, etc., it is estimated that more than 300 factories use rice husk as fuel for burning the rice husk system to burn bricks, approximately 30 tons/brick, 1.1-1.2 hundred thousand bricks/month. It is resulting in a lot of dust pollution.

Therefore, solving the pollution problem by developing reduction or elimination technologies is imperative. Smoke and dust from the long-term production process of clay bricks or red bricks. There are many reports about dust capture techniques, such as developing a dust capture system. Dust-trapping cyclones (Cyclone), Gravity Settler, and water droplet trapping in the commonly used Spray Tower Scrubber and Packed Bed Scrubber types cannot trap PM 2.5 dust. As for trapping water droplets, Tray or Plate Scrubbers and Venturi Scrubbers have moderate dust-trapping efficiency. It can trap dust with sizes starting at 1 micron. The bag filter and electrostatic dust collection systems (Electrostatic Precipitators: ESP) can trap PM 2.5 [9]. Study the dust removal efficiency with a wet air treatment system for a community rice mill." The results of the research concluded that the wet scrubber equipment is effective. Captures 91 percent of dust particles at a water pressure level of 0.30 bar. Dust collection efficiency will likely increase if the water pressure level increases. Therefore, the wet air treatment system helps the rice mill business co-exist sustainably with the community. [10] Study of a dust collection system that combines a cyclone with a static electricity dust collection system. (Electrostatic Precipitators: ESP to be able to capture both large dust particles with cyclones and dust traps) and small ones with an electrostatic dust collection system. From measuring the amount of dust, it is seen that dust collectors using cyclones and electrostatics can help reduce dust problems. The droplets can be removed, but the electrostatic dust capture system is complicated. Moreover, it must use electric current in the system [9]. Combining the advantages of the two systems will allow dust capture from burning both large particles, and smaller is even better. From the study developing a cyclone scrubber for a small solid waste incinerator, it was found that the particle removal efficiency of the cyclone scrubber is higher than that of a normal cyclone, which is 72 % [7-8]

From the research report mentioned above, the author has proposed using scrubber dust collection technology to suck up smoke and pollutants that have passed through incomplete combustion. By taking the smoke and pollution from the Scrubber to re-incinerate it before releasing it into the atmosphere. This study examined factors in setting up scrubbers to capture dust and smoke, including the amount of suction air force (M/s) and the height of the Scrubber (Cm) that affect the amount of dust (PM 2.5) while burning Inmon with rice husks the researcher expects that this research will be beneficial to education and industrial communities for further use in real life in the future.

## 2. Method of study

### 2.1 Equipment and materials for experiments

Investigation into the mitigation of dust emissions from the combustion of red clay bricks, employing rice husks, was conducted. The compositional analysis of rice husks is presented in Table 1, while Table 2 illustrates the composition of rice husk ash following combustion (expressed in weight percentages). The rice husks underwent incineration at a controlled temperature of 500 degrees Celsius within a furnace, equipped to maintain a constant temperature. In the process, three samples of rice husks sourced from distinct geographical regions were subjected to chemical analysis. A scrubber, capable of exerting suction forces ranging from 0 to 30 M/s, was employed to extract smoke and dust during the initial burning, prior to subsequent re-burning. The schematic representation of this process is illustrated in Figure 1. The vertical mobility of the scrubber, adaptable to desired distances, constitutes a significant variable in this study. For the quantification of smoke flow rate during re-burning, a wind measuring device (anemometer) was utilized. Dust levels during combustion were measured using Plantower's PMS7003 sensor. Additionally, the composition of smoke resulting from incineration was analyzed using the Gas Analyzer DP-28-BIO. This analyzer is proficient in measuring eight gases, namely CH<sub>4</sub> (methane), CO<sub>2</sub> (carbon dioxide), O<sub>2</sub> (oxygen), H<sub>2</sub>S (hydrogen sulfide), NH<sub>3</sub> (ammonia), CO (carbon monoxide), H<sub>2</sub> (hydrogen), and N<sub>2</sub>O (nitrous oxide). The measurement ranges for each gas are specified, and measurements were taken at 30-minute intervals. The results of the smoke component analysis from the burning of rice husks are summarized in Table 3.

**Table 1** Chemical composition of rice husks

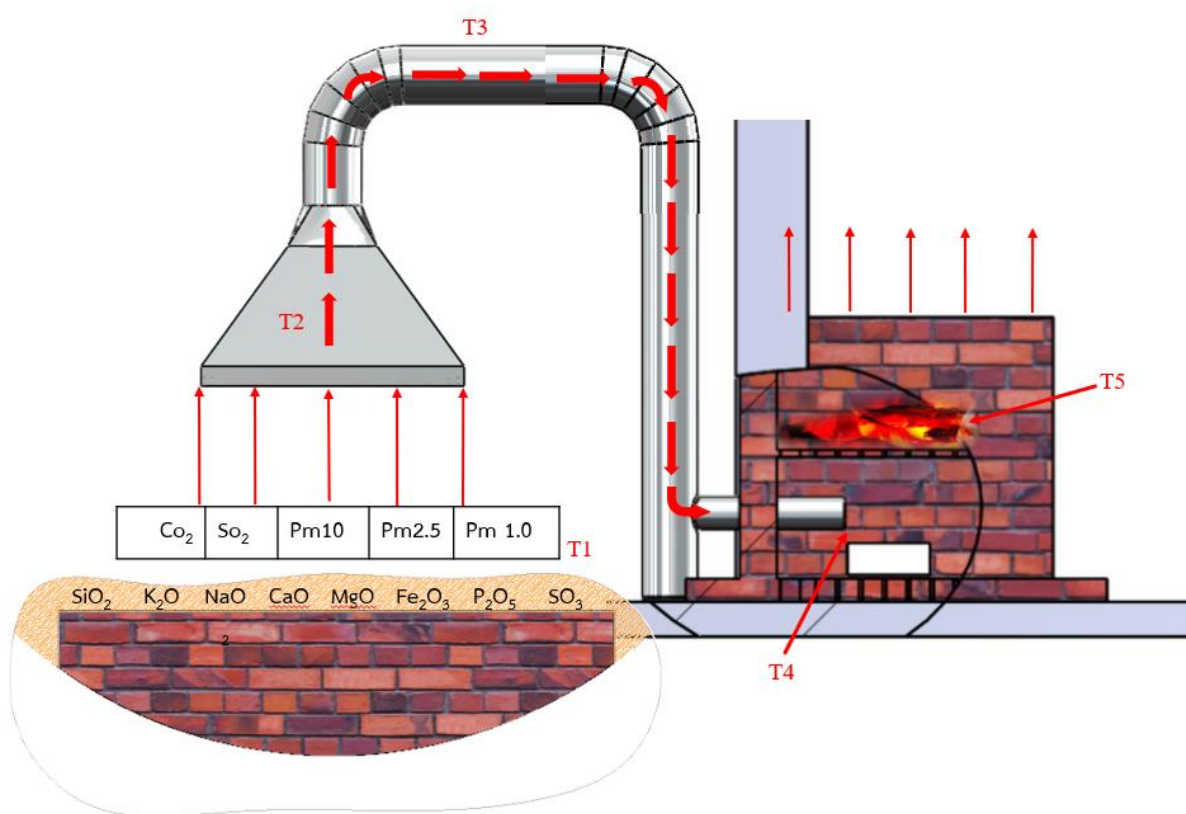
Composition	% Wt		
	Sample 1	Sample 2	Sample 3
SiO <sub>2</sub>	72.44	74.06	71.06
MnO <sub>2</sub>	0.29	0.25	0.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.35	1.24	1.14
CaO	1.22	1.12	1.32
MgO	0.29	0.21	0.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	1.1	1.34
Organic matter and moisture	23.17	22.02	24.72

**Table 2** Chemical Composition of rice husk after burning (Wt %)

Sample	Composition (% Wt)							
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	NaO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
1	96.5	1.00	0.4	0.25	0.25	-	0.30	1.0
2	93.96	-	-	0.88	0.76	-	2.85	-
3	94.50	1.21	0.42	0.75	0.32	0.12	1.75	-

**Table 3** Chemical Composition of smoke from rice husk burning

Sample	Composition					
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>
1	12.51	3.98	2.88	8.37	17.62	54.64
2	13.67	4.83	3.22	6.73	15.43	56.12
3	11.54	5.20	2.60	7.05	18.20	55.41



**Figure 1** shows a diagram of the experimental combustion process.

## 2.2 Experimental design

The factors considered in the experiment are delineated in Table 4. The experimental design methodology was employed for this investigation. Employing the Taguchi L9 method, the identification of statistically significant factors was conducted through the Analysis of Variance (ANOVA) test, utilizing the Minitab-19 program for experimental sequencing. The objective was to discern optimal factors by assessing the Signal-to-Noise (S/N) ratio associated with PM2.5

**(Research article)****Journal of Engineering Technology Access**

smoke emissions subjected to the heat extraction and removal process within a system engineered to minimize output. The pertinent value within the process was ascertained in accordance with Equation 1 [9].

**Table 4.** Factors used in the experiment.

Experimental factor	Experimental level			Responses
	(-1)	(0)	(+1)	
Wind power (m/s)	10	20	30	Amount of dust Pm 2.5
Scrubber distance (cm)	60	70	80	

$$S / N_s = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

### 3. Experimental results

#### 3.1 Results of statistical data analysis using Taguchi method

Study of dust reduction from burning clay bricks plant rice husks using an open system using a scrubber to absorb smoke. Before taking the smoke from incomplete combustion back and re-burning it to achieve complete combustion before releasing it into the atmosphere. The objective is to reduce air pollution and reduce toxic dust from burning. By collecting data from incineration that did not use the scrubber extraction technique for 24 hours, the data collected from measuring dust with a sensor that measured PM2.5 dust had an average amount of 694.3.  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours is 13.87 times higher than the standard. Then, install a scrubber to absorb the smoke, re-incinerate it with heat, and measure the PM2.5 dust value by checking the parameters in Adjusting the scrubber settings, including wind power and scrubber distance that affect the reduction of PM2.5 dust. The design of the adjustment uses a design technique experimented with Taguchi L9. The experiments and inspection results are shown in Table 5, an analysis of appropriate factors or parameters for the PM2.5 dust reduction process in the red clay brick firing process. Use the average of the reduction in PM2.5 dust values as the response value. The results of the analysis of the main effects of the factors on the signal ratio of the PM2.5 dust amount are shown in Figure 2. In contrast, the results of the response to the signal ratio of the PM2.5 dust amount are shown in Table 6 and Analysis of variance (ANOVA) to find statistically significant factors regarding process parameters that affect the signal-to-noise ratio response of PM2.5 dust levels by setting the statistical significance level at Confidence level 0.05. Results of analysis of variance on signal-to-noise ratio values are shown in Table 7.

**Table 5** Experimental of orthogonal array-L9, S/N ratio of PM 2.5 quantity  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 

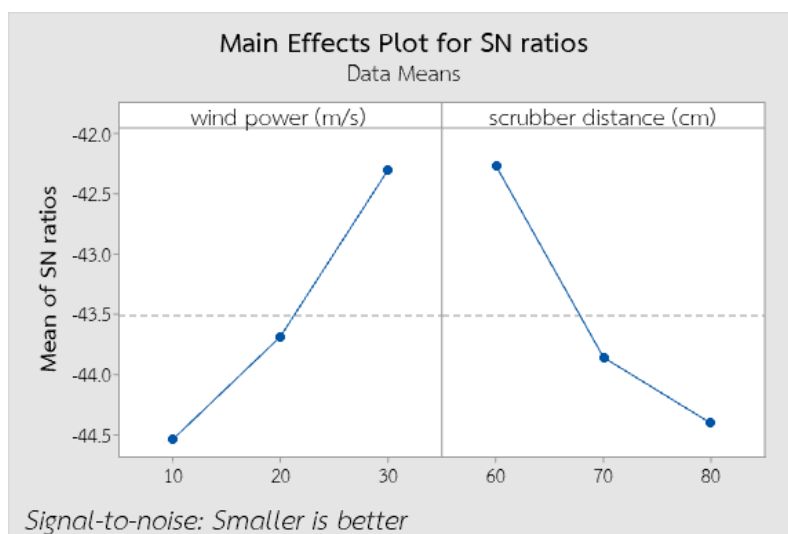
No.	Wind power (m/s)	Scrubber distance (cm)	PM2.5	SN-Ratio	MEAN
1	10	60	132	-42.4115	132
2	10	70	198	-45.9333	198
3	10	80	184	-45.2964	184
4	20	60	138	-42.7976	138

(Research article)

Journal of Engineering Technology Access

5	20	70	157	-43.918	157
6	20	80	165	-44.3497	165
<b>7</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>-41.5836</b>	<b>120</b>
8	30	70	122	-41.7272	122
9	30	80	151	-43.5795	151

Figure 2 shows the analysis of the main factors affecting the signal-to-noise ratio of PM2.5 dust levels. The lowest level of each factor was obtained as follows: The level of suction wind force at level 3 is 30 m/s. The height of the Scrubber is 60 cm.



**Figure 2** Effects of two factors on S/N-ratios of PM 2.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Table 6 shows the response values of the signal-to-noise ratio of the PM2.5 dust amount of each factor level. The analysis found that the suction air force's highest level 3 response is -42.30. The 1st level response of the scrubber height is -42.26.

**Table 6** Analysis of Variance for SN Ratios

Level	wind power (m/s)	Scrubber distance (cm)
1	-44.55	-42.26
2	-43.69	-43.86
3	-42.30	-44.41
Delta	2.25	2.14
Rank	1	2

Table 7 shows the analysis of variance (ANOVA) of the signal-to-noise ratio of the PM2.5 dust amount. The P-Value analysis found that there was no factor with a P-Value less than 0.05. Both the two factors, Wind power, and Scrubber distance, have a P-Value of 0.092 and 0.097, respectively, meaning that both factors do not affect the amount of PM2.5 dust with statistical significance at the 0.05 level, with a level of confidence in the Statistics R-Sq = 81.87 %

**Table 7** Analysis of Variance for SN Ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Wind power (m/s)	2	7.738	7.738	3.8688	4.6	0.092
Scrubber distance (cm)	2	7.444	7.444	3.7222	4.43	0.097
Residual Error	4	3.362	3.362	0.8404		
Total	8	18.543				

S = 0.9167, R-Sq = 81.87 % , R-Sq(adj) = 63.74 %

From the analysis of appropriate factors for reducing PM2.5 dust, it was found that Wind power at 30 m/s and Scrubber distance at 60 Cm had the lowest amount of PM2.5 dust at 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Results of regression equation analysis for Predicting the amount of PM2.5 dust as shown in Equation 2 and substitute the appropriate parameters in Equation (2) to predict the amount of PM2.5 dust. From the prediction using the regression equation, the value is equal to 113.37.  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which has a value close to the actual experiment. Moreover, from the Taguchi method prediction, the amount of PM2.5 dust is equal to 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$$\text{PM2.5} = 63.9 - 2.017 (\text{wind power}) + 1.833 (\text{scrubber distance}) \quad (2)$$

substitute value

$$\text{PM2.5} = 63.9 - 2.017 (30) + 1.833 (60) = 113.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

**Table 8** Composition of smoke from repeated burning

Sample	Composition					
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>
1	50.51	6.01	1.22	4.32	3.42	34.52
2	43.53	7.75	0.76	3.35	2.13	42.48
3	50.95	8.42	1.12	3.05	1.24	35.22
average	48.33	7.39	1.03	3.57	2.26	37.41

### 3.2 Measuring the amount of gas after re-combustion

Measure the amount of gas after repeated burning by measuring from the mouth of the furnace with a Gas Analyzer according to section 2.1. The results of measuring the amount of gas after repeated burning, repeating the measurement 3 times, found that the amount of CH<sub>4</sub> and CO were reduced to 1.03 and 2.26, respectively. As for the amount of CO<sub>2</sub>, the average value increased to 48.33, as shown in Table 8—data for measuring the amount of gas after re-combustion.

## 4. Discussion of experimental results

This study focuses on reducing PM2.5 dust pollution at the household industry level, such as producing red clay bricks. The researcher's field visit found that burning red clay bricks causes pollution in the burning process, especially the diffusion of smoke and small dust particles. Therefore, it is the origin of the study of reducing pollution and dust by using smoke extraction techniques by installing a scrubber to suck smoke and dust. Then, the smoke obtained from the

**(Research article)****Journal of Engineering Technology Access**

suction is re-incinerated to reduce pollution before being released into the atmosphere. The investigation studied factors in extracting smoke with a scrubber, along with measuring the smoke composition from rice husk burning both before and after repeated burning. The work results found that from examining the composition of rice husks and rice husk vines, they mainly contained  $\text{SiO}_2$ , organic substances, and moisture, which were consistent with the research report of Armesto et al. [10] and the composition of smoke from rice husks burning. The investigation also found high levels of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$ , which are not beneficial when released into the atmosphere because  $\text{CH}_4$  is a gas that can trap heat in the Earth's atmosphere. When released into the atmosphere,  $\text{CH}_4$  absorbs infrared radiation and prevents some of the heat from escaping into space, causing global temperatures to increase to the point of global warming [11].

Similarly,  $\text{CO}$  gas does not have an effect. To directly causes global warming but also causes harm to the atmosphere due to its role in causing air pollution and direct health effects on humans [12]. Therefore, this experiment has used smoke from Burning comes to be burned again. From the experiment, when the smoke from burning red clay bricks with rice husks was used, it was found that the amount of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$  decreased, as shown in Table 8.

Next, to analyze the appropriate factors of the exhaust extraction technique with Scrubber, for adjusting the factors using the Taguchi L9 technique to analyze the level of factors for exhausting smoke and dust, which includes Wind power at 10 - 30. m/s and Scrubber distance at 60 - 80 Cm. Results of the experiment are shown in Figure 5 from checking to find appropriate factors. It was found that the seventh experimental level, namely the factor level of Wind power at 30 m/s and Scrubber distance at 60 Cm, had the lowest amount of  $\text{PM}_{2.5}$  dust at  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 8 times lower than before. Install a scrubber or from an amount of  $694.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours, reduced to  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours, but still exceeding the standard set by the Pollution Control Department of Thailand, which specifies that the amount of  $\text{PM}_{2.5}$  should not exceed 50 micrograms per cubic meter, in 24 hours [13]. However, this research only presents a preliminary  $\text{PM}_{2.5}$  dust removal technique, which is expected to be a guideline for further study and application in industry.

## 5. Summary

The study's results reduced the amount of  $\text{PM}_{2.5}$  dust for burning red clay bricks at the household level using the Scrubber technique by studying appropriate factors in adjusting the settings and checking the amount of gas after repeated burning. The results of operations can be summarized as follows.

1. Collecting data from incineration that did not use the scrubber extraction technique for 24 hours. The results of collecting data from measuring dust with a sensor that can measure  $\text{PM}_{2.5}$  dust has an average amount of  $694.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours, which is 13.87 times higher than the standard.

2. The P-Value analysis found that there was no factor with a P-Value less than 0.05. The two factors between Wind power and Scrubber distance had a P-Value equal to 0.092 and 0.097, respectively, meaning that both factors Do not affect the amount of  $\text{PM}_{2.5}$  dust with statistical significance at the 0.05 level, with a statistical confidence level of  $R\text{-Sq} = 81.87 \%$ .

3. The analysis of appropriate factors for reducing  $\text{PM}_{2.5}$  dust found that Wind power at 30 m/s and Scrubber distance at 60 Cm had the lowest amount of  $\text{PM}_{2.5}$  dust at  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### Reference

- [1] Omer, A. M. (2008). Energy, environment, and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2265-2300.
- [2] Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.
- [3] Baes, C. F., Goeller, H. E., Olson, J. S., & Rotty, R. M. (1977). Carbon Dioxide and Climate: The Uncontrolled Experiment: Possibly severe consequences of growing CO<sub>2</sub> release from fossil fuels require a much better understanding of the carbon cycle, climate change, and the resulting impacts on the atmosphere. *American Scientist*, 65(3), 310-320.
- [4] Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T., & Penanhoat, O. (2019). The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental research letters*, 14(8), 084019.
- [5] Gheorghe, I. F., & Ion, B. (2011). The effects of air pollutants on vegetation and the role of vegetation in reducing atmospheric pollution. *The impact of air pollution on health, economy, environment and agricultural sources*, 29, 241-80.
- [6] Chantara, S., Sillapapiromsuk, S., & Wiriya, W. (2012). Atmospheric pollutants in Chiang Mai (Thailand) over a five-year period (2005–2009), their possible sources and relation to air mass movement. *Atmospheric Environment*, 60, 88-98.
- [7] Saeng-On, P., Thaitae, N., & Sonasang, S. (2023, March). Development of monitoring PM2.5 based on IoT and Google Data Studio. In *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)* (pp. 64-67). IEEE.
- [8] Sonasang, S., Saeng-on, P., Thaitae, N., & Phoyan, M. (2022). การ ออกแบบ และ สร้าง สถานี วัด PM2.5 สำหรับ โรงเรียน คั่นแบบ ด้วย ระบบ IoT แสดง ผล บน Google Data Studio. *Journal of Engineering Technology Access (JETA)(Online)*, 2(02), 1-15.
- [9] Visut Asanavijit, Panich Intra, Anukul Pansa. (2019). Development and Efficiency Evaluation of an Electrostatic Collector for Smoke Removal from the In-House Cooking Process *Thai Science and Technology Journal*, 566-587.
- [10] Weera Punin. (2018). A study on the efficiency of dust removal using a wet air scrubber treatment system on a local community rice mill. *Industry Technology Lampang Rajabhat University*, 11(1), 61-73.
- [11] Namkaew, S., & Prasomthong, S. (2021). Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization of Production. *The Journal of Industrial Technology*, 17(1), 82-94.
- [12] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., & Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy*, 23(3), 171-179.
- [13] Pavlov, A. A., Kasting, J. F., Brown, L. L., Rages, K. A., & Freedman, R. (2000). Greenhouse warming by CH<sub>4</sub> in the atmosphere of early Earth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E5), 11981-11990.
- [14] Giunta, M. (2020). Assessment of the impact of Co, NO<sub>x</sub> and PM10 on air quality during road construction and operation phases. *Sustainability*, 12(24), 10549.
- [15] Department of Pollution Control Report on the pollution situation in Thailand 2000-2015.