

การทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากไฮบริดซีเมนต์ด้วยสมการถดถอยเชิง
เส้นพหุคูณ สำหรับประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างยั่งยืน

**Predicting Compressive Strength of Hybrid Cement Concrete Using Multiple
Linear Regression Sustainable Construction Application**

พรรัตน์ ชำรงวุฒิ^{1*} จิตติพงศ์ จำรัส² กฤษณารช นิตสิริ² ชูลีพร วงศ์ลือชา³ และ จักษดา ชำรงวุฒิ⁴

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

³คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

⁴สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: pawnat.th@rmuti.ac.th*

Pawnrat Thumrongvut^{1*} Thitipong Jamrus² Krisanarach Nitisiri² Chuleeporn Wongloucha³
and Jaksada Thumrongvut⁴

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of
Technology Isan, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima, 30000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District,
Khon Kaen, 40002

³Faculty of Economics, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen, 40002

⁴Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of
Technology Isan, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima, 30000

E-mail: pawnat.th@rmuti.ac.th*

Received 22 Apr 2025; Revised 21 May 2025

Accepted 16 Aug 2025; Available online 30 Dec 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งมีข้อดีคือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณต่ำ โดยพิจารณาส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และไฮบริดซีเมนต์ภายใต้ระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาสมการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไฮบริดซีเมนต์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ การ

ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมทางสถิติพบว่า สมการพยากรณ์สามารถทำนายกำลังรับแรงอัดได้อย่างแม่นยำถึง 92.00% โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือระยะเวลาการบ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สุดท้ายงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่ยั่งยืนและประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐาน

คำหลัก: กำลังรับแรงอัด ไฮบริดซีเมนต์ การลดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This study investigates the compressive strength of concrete using hybrid cement as a binding material, which offers the advantages of lower energy consumption and reduced carbon dioxide emissions during production. The study examines concrete mixtures using Portland and hybrid cement under varying curing times. The primary objective is to develop a predictive model for concrete compressive strength using multiple linear regression analysis and to identify factors influencing compressive strength by comparing the predicted results with laboratory test data. The findings reveal that concrete using hybrid cement shows compressive strength trends similar to Portland cement concrete. Hybrid cement concrete exhibits higher compressive strength with increased curing time than Portland cement concrete. Furthermore, statistical analysis indicates that the predictive model can accurately forecast compressive strength with 92.00% accuracy, with curing duration and water-to-cement ratio identified as the most significant factors. This study provides a valuable reference for developing sustainable concrete and has applications in building construction and infrastructure development.

Keywords: Compressive strength, Hybrid cement, Multiple Linear Regression, Eco-friendly

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ ไม่ว่าจะเป็นอาคารที่พักอาศัย สะพาน ถนน หรือโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเมือง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานจะช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม แต่กระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นต่ออุตสาหกรรมนี้กลับเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญ โดยเฉพาะการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานหลักของคอนกรีต การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณสูงถึง 800-900 kg CO₂/ton cement [1] จากกระบวนการเผาไหม้ปูนเม็ด (Clinker) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความทนทาน และสามารถปรับแต่งส่วนผสมเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย องค์ประกอบพื้นฐานของคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน และน้ำ ซึ่งปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความต้องการคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทำให้การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้นด้วยเช่นกัน จึงส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นตามมา [2] การนำไฮบริดซีเมนต์มาใช้ในการกระบวนการผลิตคอนกรีตจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยอัตราการปลดปล่อย CO₂ ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุทดแทนในไฮบริดซีเมนต์ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) และหินปูนบด (Limestone powder) ซึ่งช่วยลดการปลดปล่อย CO₂ ลงเหลือประมาณ 500-700 kg CO₂/ton cement [2]

ปัจจุบันแนวทางการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตวัสดุก่อสร้างได้กลายเป็นเป้าหมายสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลก โดยหนึ่งในวิธีที่ได้รับการสนใจคือการนำวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การนำไฮบริดซีเมนต์มาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีต ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่มีจุดเด่นด้านลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต เนื่องจากใช้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) ต่ำ เช่น เถ้าลอย และหินปูน ผสมกับปูนเม็ดในสัดส่วนที่น้อยลง ทำให้เป็นวัสดุที่ส่งเสริมความยั่งยืนในกระบวนการผลิตและการใช้งาน [3]

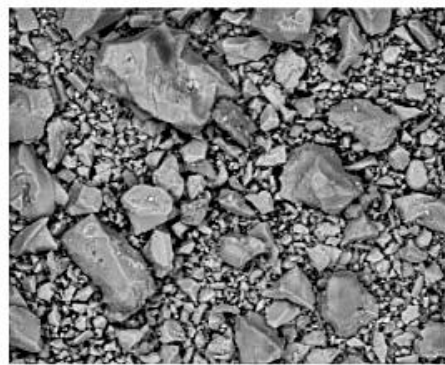
การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยพิจารณาส่วนผสมของปูนซีเมนต์ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบปกติและไฮบริดซีเมนต์ หยาบ หิน และน้ำ ภายใต้ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 7, 28, 60 และ 90 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของตัวแปรในส่วนผสมด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression: MLR) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่ช่วยในการทำนายกำลังรับแรงอัดและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] ผลลัพธ์จากสมการทำนายจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของสมการ ความสำคัญของการวิจัยนี้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังช่วยส่งเสริมการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคต นอกจากนี้ผลการวิจัยยังมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ ทั้งในด้านการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมและการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

ในการศึกษานี้ประกอบด้วยหัวข้อถัดไปคือทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในส่วนหัวข้อที่ 3 กล่าวถึงวัสดุและวิธีการทดสอบ หัวข้อที่ 4 คือวิธีการดำเนินงานวิจัย สำหรับผลการทดลองและสรุปผลการศึกษา จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮบริดซีเมนต์ (Hybrid cement)

ไฮบริดซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ไฮบริดเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่ก่อตัวและแข็งตัว เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือมีความสามารถทำนองเดียวกันนี้เมื่ออยู่ในน้ำ จุดเด่นของไฮบริดซีเมนต์คือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากนี้การประยุกต์ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานก่อให้เกิดข้อดี คือ 1) ช่วยลดความพรุนของเนื้อคอนกรีต (รูปที่ 1) ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น 2) ทนต่อการขูดขีด ลดโอกาสเกิดปัญหาฝุ่นและผิวหลุดร่อน 3) ลดโอกาสที่พื้นผิวคอนกรีตแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของปูนซีเมนต์ และ 4) มีการใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1 การเรียงตัวของอนุภาคคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์ที่กำลังขยาย 500 เท่า

2.2 สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression)

สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (Independent variable) หลายตัวและตัวแปรตาม (Dependent variable) หนึ่งตัว โดยสมมติฐานพื้นฐานของ MLR คือ

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้รูปแบบดังสมการที่ (1) เพื่อทำนายค่า Y หรือวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต้นแต่ละตัวที่มีต่อตัวแปรตาม [4]

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i; \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, k$$

โดยที่

Y_i คือค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรตาม

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ คือพารามิเตอร์ (สัมประสิทธิ์การถดถอย)

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ คือค่าสังเกตที่ i ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

ε_i คือค่าคลาดเคลื่อนของค่าสังเกตที่ i

n คือจำนวนค่าสังเกตทั้งหมด

k คือจำนวนตัวแปรอิสระ

ความสามารถของสมการถดถอยนี้ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลากหลายสาขา เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายค่าของตัวแปรตามจากค่าของตัวแปรอิสระ เช่น วิศวกรรมศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ การแพทย์ และการวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก่อสร้าง MLR ถูกนำมาใช้เพื่อทำนายค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุก่อสร้าง เช่น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งมีตัวแปรหลายปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ สัดส่วนส่วนผสม ระยะเวลาบ่ม และสภาพแวดล้อม [2] นอกจากนี้งานวิจัยของ [6] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณวัสดุก่อสร้าง เช่น ปริมาณเหล็กเสริมคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อ พื้นที่ของประตูและหน้าต่าง เป็นต้น โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง MLR และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) สอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ที่มีการใช้ MLR ทำนายต้นทุนโครงการก่อสร้างเพื่อประมาณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนต่าง ๆ และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อต้นทุนรวมทั้งหมด ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้แสดงถึง ประโยชน์ของ MLR ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในงานก่อสร้างได้อย่างดี การศึกษาของ [8] ได้ใช้ MLR เพื่อทำนายความต้องการพลังงานในอาคาร โดยพิจารณาตัวแปรอิสระ เช่น ขนาดอาคาร วัสดุก่อสร้าง และสภาพภูมิอากาศ

ผลการวิจัยพบว่า MLR สามารถทำนายความต้องการพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ในแง่ของเกษตรกรรม [9] ได้ประยุกต์ใช้ MLR ในการทำนายผลผลิตทางการเกษตรโดยใช้ตัวแปรอิสระเช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณปุ๋ย และชนิดของดิน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า MLR เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการทำนายผลผลิตและวางแผนการเกษตรได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการทำนายความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศโดยพิจารณาจากปริมาณการจราจร อุณหภูมิ และความชื้นซึ่งได้ถูกศึกษาในปี 2022 โดย [10] ในด้านการแพทย์ การศึกษาของ [11] ได้ใช้ MLR เพื่อทำนายความเสี่ยงของโรคหัวใจโดยพิจารณาตัวแปรอิสระเช่น อายุ ดัชนีมวลกาย และระดับคอเลสเตอรอล ผลการวิจัยระบุว่า MLR สามารถช่วยในการประเมินความเสี่ยงของผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า MLR เป็นเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และทำนายผลลัพธ์ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ในการประยุกต์ใช้ MLR ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งส่งเสริมเป้าหมายของการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และยังช่วยเปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนากระบวนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและการประยุกต์ใช้วัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้ [12]

3. วัสดุและวิธีการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ปูนซีเมนต์ไฮบริด (Hybrid cement) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 และ ASTM C1157

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 1-2555 และ ASTM C150 Type I

3) มวลรวมละเอียด (Fine aggregate: FA) ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ล้างน้ำสะอาดและตากให้แห้งก่อนนำไปผสมคอนกรีต

4) มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate: CA)

สำหรับผสมคอนกรีตเป็นหินปูน มีขนาดโตสุดเท่ากับ 3/4 นิ้ว (20 มม.)

5) น้ำประปาสะอาด (Water)

3.2 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย (f'_c) (Ultimate compressive strength) ได้แก่ 18, 25, 32 และ 40 เมกะปาสกาล (MPa) (ประมาณ 180, 250, 320 และ 400 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (kg/cm²) ตามลำดับ) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีความแปรผันเนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนั้นในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมจึงจำเป็นต้องกำหนดส่วนผสมบางส่วนให้คงที่ ได้แก่ น้ำประปาสะอาด 200 กิโลกรัมและมวลรวมหยาบ 1,008 กิโลกรัม ในตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทจะแตกต่างกันตามกำลังรับแรงอัด [5] โดยพิจารณาตามกำลังรับแรงอัดที่ต้องการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 2) จะถูกเตรียมเพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 จำนวน 5 ตัวอย่างต่ออายุบ่มในแต่ละช่วง ได้แก่ 7, 28, 60 และ 90 วัน กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์จะนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ยกตัวอย่าง HC18 คือการใช้ไฮบริดซีเมนต์เป็นส่วนผสมด้วยน้ำหนัก 303 kg, FA 864 kg, CA 1,008 kg และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water-to-cement ratio: WC) เท่ากับ 0.66 ตัวอย่างทดสอบนี้จะถูกเตรียมเพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละอายุบ่ม (7, 28, 60 และ 90 วัน) ด้วยจำนวน 5 ตัวอย่าง ดังนั้น HC18 จึงมีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ในขณะที่ PC18 มีจำนวน 20 ตัวอย่างเช่นเดียวกัน แตกต่างที่ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อครบกำหนดในแต่ละช่วงอายุตัวอย่างทดสอบเหล่านี้จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตในหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างทดสอบ (MPa)	Hybrid cement (kg)	Portland cement (kg)	FA (kg)	CA (kg)	WC
HC18	303	-	864	1,008	0.66
HC25	349	-	824	1,008	0.57
HC32	420	-	763	1,008	0.48
HC40	529	-	673	1,008	0.38
PC18	-	303	864	1,008	0.66
PC25	-	349	824	1,008	0.57
PC32	-	420	763	1,008	0.48
PC40	-	529	673	1,008	0.38

ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดโดยใช้สัญลักษณ์ PCxx และ HCxx ตามหลักการดังต่อไปนี้ PCxx หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเท่ากับ 18 MPa 25 MPa 32 MPa และ 40 MPa ในทำนองเดียวกันกับสัญลักษณ์ HCxx คือการใช้ไฮบริดซีเมนต์ทดสอบ โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 ตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมทดสอบกำลังรับแรงอัด

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

เมื่อทำการจัดเตรียมวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาแล้ว วัสดุเหล่านี้จะถูกนำมาผสมเพื่อเตรียมทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล

(Mechanical properties) ของคอนกรีต ได้แก่ กำลังรับแรงอัดประลัย และรูปแบบการวิบัติ (Modes of failure) ซึ่งคอนกรีตเหล่านี้ได้รับการบ่มที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน

เมื่อครบอายุบ่มที่กำหนดในแต่ละช่วง นำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบที่เครื่องทดสอบ Compression machines รุ่น Control PILOT3 ที่มีค่ากำลังทดสอบสูงสุด 5,000 กิโลนิวตัน

4.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบและออกแบบสมการทำนายกำลังรับแรงอัด

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นตัวแปรตาม (y) และพิจารณาส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตเป็นตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (x_n) ได้แก่ ประเภทของปูนซีเมนต์ (HC หรือ PC) มวลรวมละเอียด (FA) มวลรวมหยาบ (CA) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (WC) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมคอนกรีตและกำลังรับแรงอัดโดยอาศัยหลักการทางสถิติ จากนั้นสร้างตัวแบบสมการของการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดที่แม่นยำและเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของคอนกรีตมากที่สุดด้วยเทคนิคการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression: MLR) โดยใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอส (SPSS) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination) ถูกนำมาเป็นเกณฑ์พิจารณาที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของสมการพยากรณ์กำลังรับแรงอัด

5. ผลการทดสอบ

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากการทดสอบแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 โดยค่าของกำลังรับแรงอัดประลัย (f'_c) เป็นค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างตามอายุบ่ม ได้แก่ 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า

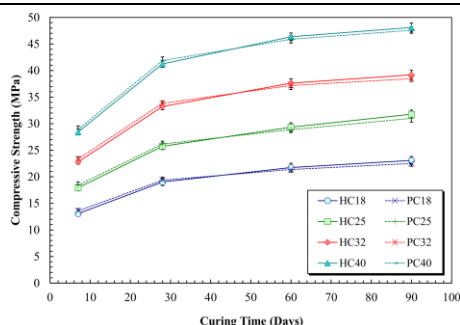
คอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ยใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยประมาณ 1-2% เนื่องจากไฮบริดซีเมนต์มีส่วนผสมของวัสดุทดแทนปูนเม็ด เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยในช่วงเริ่มต้นจนถึงอายุบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

อย่างไรก็ตามเมื่อช่วงอายุบ่มมีค่ามากกว่า 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลาน ส่งผลให้สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้อย่างต่อเนื่องภายในช่วงระยะเวลาการบ่ม 90 วัน ในส่วนของส่วนผสมของคอนกรีตอื่น ๆ ได้แก่ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และน้ำประปาสะอาด แต่ละตัวอย่างทดสอบเป็นไปตามการถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete จะเห็นได้ว่าค่าของมวลรวมหยาบจะเป็นค่าคงที่ ค่าของมวลรวมละเอียดขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดที่ต้องการทดสอบ และสุดท้ายคือน้ำประปาสะอาดที่ถูกกำหนดให้มีน้ำหนักคงที่คือ 200 กิโลกรัมนั้น แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งหมายถึงค่าดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ต้องการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งสองประเภทพบว่าเมื่อค่าเพิ่มขึ้นหรือแปรผันตามอายุบ่มกล่าวคือเมื่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีตมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและอายุบ่ม

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบ	อายุบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย	
		(หน่วย: MPa)	(หน่วย: kg/cm ²)
HC18	7	13.1	133.2
	28	19.0	193.9
	60	21.7	221.7
	90	23.1	235.4
HC25	7	17.9	182.9
	28	25.7	262.5
	60	29.3	299.2
	90	31.8	324.1
HC32	7	22.8	232.5
	28	33.2	339.0
	60	37.6	383.6
	90	39.2	399.5
HC40	7	28.4	290.0
	28	41.2	420.5
	60	46.4	472.7
	90	48.1	490.5
PC18	7	13.6	138.5
	28	19.4	197.4
	60	21.4	218.0
	90	22.5	229.4
PC25	7	18.4	187.8
	28	26.2	266.8
	60	28.9	294.5
	90	31.0	316.1
PC32	7	23.4	238.2
	28	33.8	345.1
	60	37.2	379.1
	90	38.5	392.2
PC40	7	28.9	295.1
	28	41.9	426.9
	60	45.9	467.8
	90	47.6	485.2



รูปที่ 3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

5.2 สมการทำนายกำลังรับแรงอัดและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

โปรแกรมทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและสร้างสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของงานวิจัยนี้คือ โปรแกรมเอสพีเอสเอส (SPSS) เวอร์ชัน 28 (IBM SPSS Statistics Version 28) บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อพิจารณาปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปูนซีเมนต์มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ อายุการบ่ม และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่มีผลต่อสมการทำนายกำลังรับแรงอัด ผลการทดลองทางสถิติพบว่า ปัจจัยในเรื่องของอายุการบ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลต่อสมการทำนาย เมื่อนำไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis: MLRA) ด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise regression) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการพิจารณาเลือกตัวแปรพยากรณ์ที่ดีที่สุดและได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากตัวแปรอิสระทุกตัวจะถูกทดสอบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันเอง เพื่อป้องกันปัญหาความสัมพันธ์ภายในของตัวแปรตาม (Multicollinearity) จึงสามารถนำมาใช้เพื่อคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มค่าความแม่นยำในการพยากรณ์ นอกจากนี้ ยังช่วยให้สามารถพิจารณาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและนำไปใช้งานจริงได้ดีขึ้น

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ดังรูปที่ 4 แสดงถึงแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์มี

ทั้งหมด 2 แบบจำลอง โดยพิจารณาค่าระดับความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของการมีอิทธิพลหรือระดับการทำนายของกลุ่มตัวแปรอิสระและตัวแปรตัดสินใจ (R square), ค่าของ R square ที่มีการปรับให้เหมาะสมกับข้อมูล (Adjusted R square) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ตัวแปรตามหรือกำลังรับแรงอัด (Std. error of the estimate) โดย WC หมายถึงอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ และ Day หมายถึงอายุการบ่ม สำหรับตัวแปรอิสระอื่น ๆ ได้แก่ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โปรแกรมได้วิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า มีความสัมพันธ์กันเองจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาร่วมในแบบจำลองใด ๆ ในแบบจำลองที่ 2 ค่า R บ่งชี้ถึงระดับความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรอิสระกับตัวแปรตัดสินใจเท่ากับ 0.96 ซึ่งหมายความว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์และอายุการบ่มสามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้มีผลถึง 92.00% โดยพิจารณาที่ค่า Adjusted R square ซึ่งหมายถึงค่า R square ที่มีการปรับแก้ให้เหมาะสมกับข้อมูล เนื่องจากจำนวนของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลกับจำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมดนั้นมีสัดส่วนที่น้อยมาก จึงจำเป็นต้องพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ตัวแปรตามหรือกำลังรับแรงอัด (Std. error of the estimate) เท่ากับ 2.87 เมื่อพิจารณาทุกค่าของการวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นว่าแบบจำลองที่ 2 มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลองที่ 1

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.804 ^a	.646	.642	6.07298
2	.960 ^b	.922	.920	2.86753

a. Predictors: (Constant), WC

b. Predictors: (Constant), WC, Day

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยสรุปของแบบจำลอง

รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละแบบจำลอง โดยพิจารณาค่า Sig. หรือ ค่า p-value หากน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นระดับนัยสำคัญที่กำหนดแสดงว่าแบบจำลองของงานวิจัยนี้ต้องการหาสมการทำนายกำลังรับแรงอัดสามารถเชื่อถือและนำไปใช้

พยากรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลดังกล่าวนี้แสดงถึงแบบจำลองทั้ง 2 แบบ มีนัยสำคัญทางสถิติ รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ เมื่อถูกเพิ่มเข้าสู่สมการในแต่ละครั้งของแบบจำลอง ในแบบจำลองที่ 1 ค่าของอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์จะถูกนำมาวิเคราะห์ สำหรับแบบจำลองที่ 2 อายุการบ่มจะถูกเพิ่มเข้ามาในการวิเคราะห์ร่วมกับอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ 2 เหมาะสำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ทำนายกำลังรับแรงอัดต่อไป นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Sig. ตัวแปร WC และ Day พบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ

สมการทำนายกำลังรับแรงอัดแสดงดังสมการที่ (2) โดยที่ WC หมายถึงค่าของ x_1 เท่ากับ -77.897 และ x_2 คือ ค่าของ Day เท่ากับ 0.168 โดยค่าคงที่ (Constant) มีค่าเท่ากับ 62.851 ซึ่งแต่ละค่าในสมการที่ (2) ได้ผลลัพธ์จากแบบจำลองทั้งสอง ในรูปที่ 6 คอลัมน์ Unstandardized B เมื่อพิจารณาค่า p-value ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติของการมีอิทธิพลต่อการพยากรณ์

$$y = 62.851 - 77.897x_1 + 0.168x_2 \quad (2)$$

โดยที่ y คือค่ากำลังรับแรงอัด (MPa) x_1 คืออัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ และ x_2 คืออายุการบ่ม (วัน)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5251.749	1	5251.749	142.397	<.001 ^b
	Residual	2876.726	78	36.881		
	Total	8128.476	79			
2	Regression	7495.326	2	3747.663	455.769	<.001 ^c
	Residual	633.150	77	8.223		
	Total	8128.476	79			

a. Dependent Variable: CS

b. Predictors: (Constant), WC

c. Predictors: (Constant), WC, Day

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง

Coefficients ^a						
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
Model		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	70.618	3.478		20.306	<.001
	WC	-77.897	6.528	-.804	-11.933	<.001
2	(Constant)	62.851	1.708		36.795	<.001
	WC	-77.897	3.082	-.804	-25.272	<.001
	Day	.168	.010	.525	16.518	<.001

a. Dependent Variable: CS

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

จากสมการที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าคงที่เท่ากับ 62.851 ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการทำนายคือน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีการกำหนดน้ำหนักของน้ำประปาให้มีค่าคงที่ในทุกตัวอย่างการทดสอบคอนกรีต และส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอิทธิพลรองลงมาคืออายุการบ่มตามช่วงเวลาต่าง ๆ

6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการใช้ไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบปกติเพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้อายุบ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ 7, 28, 60 และ 90 วัน ส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำประสานธาตุ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ถูกกำหนดในอัตราส่วนที่เท่ากันขึ้นอยู่กับการออกแบบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จากนั้นได้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและพัฒนาสมการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression: MLR) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเมื่ออายุบ่มมากกว่า 46 วัน คอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อายุบ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมการพยากรณ์ โดยสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ถึง 92.00% และผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของแบบจำลองยืนยันว่ามีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้ในการพยากรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้การทดลองในห้องปฏิบัติการและใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสนับสนุนการตัดสินใจเกี่ยวกับการผลิตคอนกรีตที่ใช้ไฮบริดซีเมนต์เพื่อการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) และสนับสนุนแนวทางการก่อสร้างที่ยั่งยืนสำหรับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม การนำไฮบริดซีเมนต์มาใช้งานโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เช่น คานคอนกรีตเสริมเหล็กหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่มากนัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบและสนับสนุนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือนำไปสู่การใช้งานได้จริง หากพิจารณาในด้านต้นทุนของปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท ไฮบริดซีเมนต์ก็ยังคงความได้เปรียบ เนื่องจากการเป็นกรนำของเสียจากกระบวนการอื่นมาใช้ซ้ำหรือนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดโดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือเชิงคำนวณอื่น ๆ เช่น วิธีอีวริสติกส์และวิธีเมตะอีวริสติกส์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต อีกทั้งควรพิจารณาปัจจัยด้านผลตอบแทน ต้นทุนของทรัพยากร และวัสดุทดแทนอื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้ร่วมกัน เพื่อพัฒนาส่วนผสมคอนกรีตที่มีสมรรถนะสูงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ FET004/2568

เอกสารอ้างอิง

- [1] Scrivener KL, John VM, Gartner EM. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research. 2018; 114: 2-26.

- [2] Habert G, Miller SA, John VM, Provis JL, Favier A, Horváth A, Scrivener KL. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020; 1(11): 559-573.
- [3] Gartner E, Hirao H. A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015; 78: 126-142.
- [4] Montgomery DC, Peck EA, Vining GG. *Introduction to Linear Regression Analysis*, 6th ed. John Wiley & Sons; 2021.
- [5] ชามุขชัย เจาะปก จักษดา ชำรงวุฒิ นำชัย จ้อยสูงเนิน เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, สิทธิชัย แสงอาทิตย์. การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับเสาหล่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตกำลังสูง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2567; 32(3): 96-112.
- [6] วรณะ ประภาพรณ. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณวัสดุก่อสร้างสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างวิธีแบบจำลองการถดถอยเชิงซ้อนและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร*. 2562; 14(1): 84-102.
- [7] Ameen JRM, Neale RH, Abrahamson M. An application of regression analysis to quantify a claim for increased costs. *Construction Management & Economics*. 2003; 21(2): 159-165.
- [8] Boukarta S. Predicting energy demand of residential buildings: A linear regression-based approach for a small sample size. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*. 2021; 16(2): 67-85.
- [9] Shastry A, Sanjay HA, Bhanusree E. Prediction of crop yield using regression techniques. *International Journal of Soft Computing*. 2017; 12(2): 96-102.
- [10] Qiu M, Zigler C, Selin NE. Statistical and machine learning methods for evaluating trends in air quality under changing meteorological conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022; 22(16): 10551-10566.
- [11] Shaker AH, Ibrahim IA, Gharghan SK. Cardiovascular diseases prediction using machine learning algorithms: A comparative study. In *AIP Conference Proceedings*. 2024; 3232(1): 04004.
- [12] Roh S, Shin Y, Yang S. Optimization of green concrete mixture design using hybrid machine learning techniques. *Construction and Building Materials*. 2021; 299: 124275.