

## ความก้าวหน้าของการประเมินคุณภาพปอชโซลานด้วยเทคนิคการวัดค่าความนำไฟฟ้า จากอดีตสู่ปัจจุบัน

ทัตพิชา แสงสว่าง<sup>1\*</sup> และ ศุภชัย สีนถาวร<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมโยธา คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

\* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: thatpicha.saengsawang@gs.wvu.ac.th

Received: June 15, 2026 Revised: August 7, 2026 Accepted: August 13, 2026

### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิวัฒนาการและความก้าวหน้าของการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity - EC) สำหรับการประเมินคุณภาพและความต่อเนื่องในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานิก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของวิธีการทดสอบดั้งเดิม เช่น วิธีดัชนีการรับกำลังอัด (SAI) ที่ต้องใช้เวลานานและมักมีความคลาดเคลื่อนจากผลกระทบทางกายภาพ (Packing effect) เทคนิค EC ถือเป็นวิธีทดสอบทางอ้อมแบบรวดเร็ว (Rapid indirect method) ที่ติดตามการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ภายใต้อุณหภูมิควบคุมที่ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถจำแนกแนวโน้มการทำปฏิกิริยาของวัสดุเบื้องต้นได้ภายในเวลาเพียง 24-28 ชั่วโมง จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องจนถึงปัจจุบัน พบว่าเทคนิคนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้วิเคราะห์ศักยภาพของวัสดุทดแทนทางเลือกใหม่ที่มีความซับซ้อน เช่น แก้วค้ำสติกที่ถูกกระตุ้น แก้วชีวมวลทางการเกษตร และวัสดุผสมร่วม โดยข้อมูลเชิงสถิติยืนยันว่าการลดลงของค่าความนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับวิธีทดสอบมาตรฐานดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดที่ต้องระมัดระวังเมื่อประเมินกับวัสดุที่มีเกลือละลายน้ำ ปริมาณแคลเซียมสูง หรือมีแร่แคลไซต์แฝงอยู่ ท้ายที่สุด บทสรุปของการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เทคนิค EC ถือเป็นเครื่องมือคัดกรองเบื้องต้นที่ทรงประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี จะช่วยเร่งระยะเวลาในการวิจัยวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (SCMs) ชนิดใหม่ ๆ

**คำสำคัญ:** การวัดค่าความนำไฟฟ้า ปฏิกิริยาปอชโซลานิก วัสดุปอชโซลาน ดัชนีการรับกำลังอัด วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

## Advancement of pozzolanic activity assessment by electrical conductivity measurement techniques: From past to present

Thatpicha Saengsawang<sup>1\*</sup> and Supachai Sinthaworn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Civil Engineering, Graduate School, Srinakharinwirot University

<sup>2</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

\* Corresponding author.

Email address: thatpicha.saengsawang@g.swu.ac.th

*Received: June 15, 2026 Revised: August 7, 2026 Accepted: August 13, 2026*

### Abstract

This article aims to present the evolution and advancement of applying Electrical Conductivity (EC) measurement techniques for evaluating the quality and pozzolanic reactivity of materials, which was developed to overcome the limitations of traditional test methods, such as the Strength Activity Index (SAI), which are time-consuming and often subject to inaccuracies caused by physical impacts (packing effect). The EC technique is a rapid indirect method that monitors the reduction of calcium ions in a Portland cement solution under a controlled temperature of 80 °C, which can classify preliminary material reactivity trends within merely 24–28 hours. Based on relevant studies to date, this technique is widely accepted for analyzing the potential of complex novel alternative materials, such as activated stockpile ashes, agricultural biomass ashes, and binary blends. Statistical data confirm that the reduction in electrical conductivity exhibits a significant correlation with traditional standard test methods. However, this technique still has limitations that require precaution when assessing materials with soluble salts, high calcium content, or hidden calcite. Ultimately, the conclusion of the study indicates that the EC technique is a highly efficient preliminary screening tool, which, when considered in conjunction with chemical composition analysis, will help shorten the research time for new Supplementary Cementitious Materials (SCMs).

**Keywords:** Electrical conductivity, Pozzolanic reaction, Pozzolanic materials, Strength activity index, Supplementary cementitious materials

## 1. บทนำ

การประเมินคุณภาพของวัสดุปอซโซลานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์มีความสำคัญต่อคุณภาพของคอนกรีตและสิ่งแวดล้อม การทดสอบศักยภาพแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ วิธีทางตรง (Direct methods) และวิธีทางอ้อม (Indirect methods) เน้นวัดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น วิธี Frattini test, วิธี Chapelle test (หรือ Saturated lime test), การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis – TGA) [1, 2, 3] แม้วิธีเหล่านี้จะแม่นยำ แต่มีข้อจำกัดด้านเวลาและขั้นตอนที่ซับซ้อน เช่น วิธี Frattini test ตามมาตรฐาน EN 196-5 ที่ต้องบ่มตัวอย่างนานถึง 8 วัน ก่อนนำมาไทเทรตหาความเข้มข้นของไอออน [4]

ขณะเดียวกัน วิธีทางอ้อมที่เป็นมาตรฐานระดับสากล ได้แก่ มาตรฐาน ASTM C 618 [5] อาศัยการประเมินค่าดัชนีการรับกำลังอัด (Strength Activity Index - SAI) [6] วิธี SAI มีข้อจำกัดสำคัญ 2 ประการ คือ 1) ใช้เวลาในการบ่มนาน 7 ถึง 28 วัน ทำให้ทราบผลล่าช้า [7] และ 2) ผลลัพธ์อาจคลาดเคลื่อนจากผลกระทบของการอัดแน่น (Packing effect หรือ Filler effect) เนื่องจากค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลรวมระหว่างปฏิกิริยาเคมีและการอัดแน่นของอนุภาคขนาดเล็ก อาจทำให้เข้าใจผิดว่าวัสดุที่เป็นสารเฉื่อย (Inert material) มีคุณสมบัติความเป็นปอซโซลานได้ [8, 9]

จากข้อจำกัด จึงได้เกิดการพัฒนาสู่เทคนิคการวัดค่าไฟฟ้า (Electrical Conductivity – EC) เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของวิธีดั้งเดิม เทคนิคนี้มุ่งเน้นไปที่การติดตามปฏิกิริยาเคมีที่แท้จริง (Chemical reaction focus) โดยพิจารณาจากการลดลงของแคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในสารละลาย ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการอัดแน่นของอนุภาคทิ้งไป [7] ทำให้สามารถประเมินและเจาะจงศักยภาพของวัสดุในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ภายในระยะเวลาเพียง 24 ชั่วโมง [10]

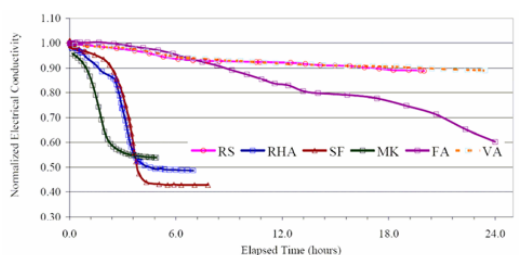
ดังนั้น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการพัฒนาและความก้าวหน้าของการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดค่าความนำไฟฟ้าในการประเมินคุณภาพปอซโซลาน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคนี้ในการเป็นเครื่องมือคัดกรอง

เบื้องต้น (Rapid evaluation) สำหรับวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ทางเลือกใหม่ ๆ ซึ่งจะเป็นฟันเฟืองสำคัญในการสนับสนุนอุตสาหกรรมก่อสร้างสีเขียว (Green construction) ได้อย่างยั่งยืนต่อไป

## 2. จุดเริ่มต้นและวิวัฒนาการของระเบียบวิธีวัดค่าไฟฟ้า

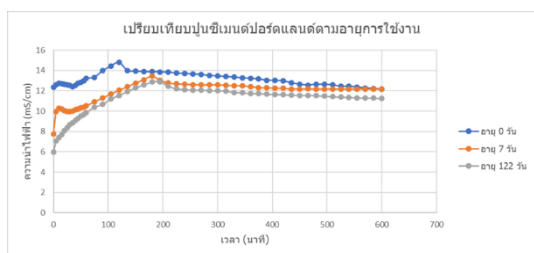
แนวคิดการใช้เทคนิคการวัดค่าไฟฟ้า (Electrical Conductivity – EC) เพื่อประเมินความว่องไวของวัสดุปอซโซลานนั้น ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1975 โดย Raask และ Bhaskar [11] ในยุคเริ่มต้นนั้น เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ประเมินถั่วลันเตา โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อหาปริมาณซิลิกาที่ละลายน้ำได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1989 ถือเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของการพัฒนาเทคนิคนี้ เมื่อ Luxán และคณะ [12] ได้นำเสนอการวัดค่าความนำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัว (Saturated lime solution) วิธีการของ Luxán มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การลดลงของค่าความนำไฟฟ้าในสารละลายแขวนลอย ซึ่งเกิดจากการที่แคลเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาอสัณฐานในวัสดุปอซโซลาน วิธีการนี้ได้กลายเป็นรากฐานสำคัญที่ได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาวิธีทดสอบอย่างแพร่หลายในเวลาต่อมา อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงมีข้อจำกัดในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะความยุ่งยากในการเตรียมสารละลาย ซึ่งต้องใช้เวลานานสารละลายนานถึง 24 ชั่วโมงเพื่อให้เข้าสู่จุดสมดุลอิ่มตัว ด้วยเหตุนี้ จึงเกิดความพยายามในการพัฒนาระเบียบวิธีให้รวดเร็วและสอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น โดยในช่วงปี ค.ศ. 2009 ศุภชัย สีนถาวร และพิชัย นิमितยงสกุล ได้นำเสนอเทคนิคการวัดค่าไฟฟ้าเพื่อใช้ประเมินคุณภาพวัสดุปอซโซลาน โดยเตรียมสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC solution) ปรับค่าความนำไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ในระดับ 10-11 mS/cm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อใส่ตัวอย่างวัสดุลงในสารละลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียสเพื่อเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 1 สามารถจำแนกพฤติกรรมการทำปฏิกิริยาของวัสดุได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) สารเฉื่อย (Inert materials) สังเกตได้จากเส้นกราฟของทรายแม่น้ำและถั่วลันเตา ซึ่งค่าไฟฟ้าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง 2) สารที่ทำให้ปฏิกิริยา

อย่างรวดเร็ว (Fast-reaction pozzolans) สังเกตจากเส้นกราฟของซิลิกาฟูม ดินขาวสุก และเถ้าแกลบ ซึ่งลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่จุดคงที่ภายใน 4 ถึง 6 ชั่วโมง และ 3) สารที่ทำให้ปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ (Slow-reaction pozzolans) เส้นกราฟของเถ้าลอย ซึ่งในช่วงแรกมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการละลายของเกลือและต่าง ก่อนจะค่อย ๆ ใ้คงลดลงและเข้าสู่จุดคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 28 ชั่วโมง [7, 10]



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่านำไฟฟ้าตามเวลา [10]

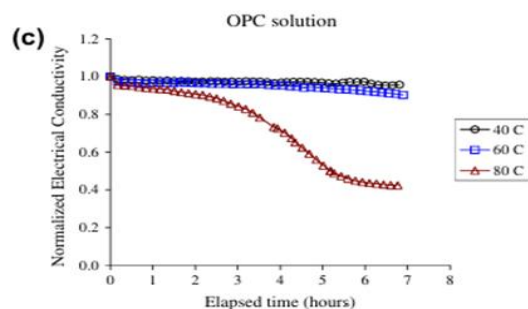
นอกจากการประเมินศักยภาพของวัสดุปอซโซลานแล้ว ในปี ค.ศ. 2010 วรวิทย์ อุดทน และธีรทัต นาคทัต ได้ประยุกต์ใช้วิธีนี้ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากรูปที่ 2 พบว่า ปูนซีเมนต์ที่ถูกเปิดทิ้งไว้จนเสื่อมสภาพจากความชื้นและความชื้น (อายุ 122 วัน) มีค่านำไฟฟ้าลดลงน้อยกว่าปูนซีเมนต์เปิดใหม่ (อายุ 0 วัน) อย่างชัดเจนในช่วง 1 ชั่วโมงแรก ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ลดลง [13]



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่านำไฟฟ้าตามอายุการเปิดใช้งาน [13]

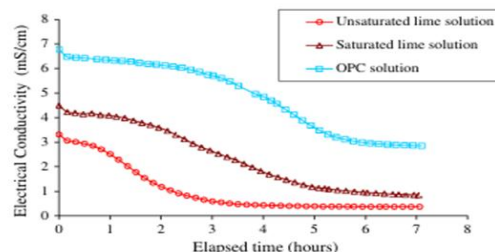
ต่อมาในปี ค.ศ. 2011 ได้มีการศึกษาเชิงลึกเพื่อหาสภาวะการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อยกระดับให้วิธีนี้เป็นมาตรฐานทางเลือกที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ในรูปที่ 3 ซึ่งเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิเส้นกราฟชี้ให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาจะถูกเร่งให้เกิดเร็วที่สุด ส่งผลให้เส้นกราฟความนำไฟฟ้างดลงอย่างชัดเจนและเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ อย่างสมบูรณ์ภายในเวลาไม่เกิน 7 ชั่วโมง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดสารละลายจาก



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการนำไฟฟ้าแบบนอร์มัลไลซ์ [14]

รูปที่ 4 พบว่าเส้นกราฟของการใช้สารละลาย OPC ทำให้เกิดการลดลงของค่านำไฟฟ้าในสัดส่วนที่เด่นชัดที่สุด การทดสอบยืนยันยืนยันว่าการใช้ปริมาณวัสดุตัวอย่าง 1 กรัม ต่อน้ำสารละลาย OPC 200 มิลลิลิตร เป็นสัดส่วนที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและใช้อ่านค่าพฤติกรรมจากกราฟได้ชัดเจนที่สุด [14]



รูปที่ 4 ค่านำไฟฟ้าของซิลิกาฟูมในสารละลายอัลคาไลแอคติเวตชนิดต่าง ๆ ที่ 80 °C [14]

### 3. พารามิเตอร์หลัก และเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับปฏิกิริยาปอซโซลานิก

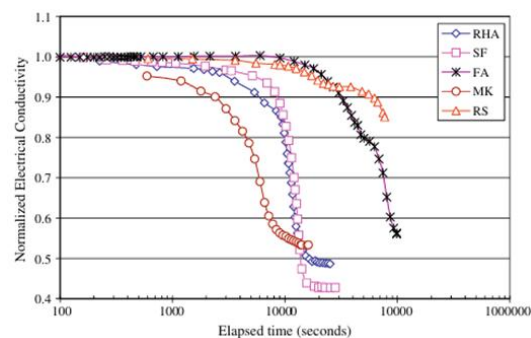
ในการติดตามผลด้วยเทคนิคการวัดค่านำไฟฟ้า (Electrical Conductivity - EC) นอกจากการพิจารณาค่านำไฟฟ้าโดยรวมแล้ว ศุภชัย สนิถาวร และพิชัย นิमितยงสกุล ยังได้กำหนดพารามิเตอร์บ่งชี้ (Indicative parameters) เพื่อตีความพฤติกรรมและศักยภาพของวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดได้อย่างละเอียด ซึ่งประกอบด้วยเกณฑ์การพิจารณา 5 ประการดังนี้ [10]

3.1 ค่านำไฟฟ้าที่คงที่ (Stabilized electrical conductivity) พิจารณาจากขนาดการลดลงของค่านำไฟฟ้า ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดเสถียร วัสดุที่มีความเป็นปอซโซลานสูงจะมีการลดลงของค่านำไฟฟ้ามาก เนื่องจากไอออนถูกดึงไปใช้ทำปฏิกิริยาเคมี ผลทดสอบพบว่า ซิลิกาฟูม (SF) มีค่านำไฟฟ้าลดลงมากที่สุด รองลงมาคือดินขาวสุก (MK) และเถ้าแกลบ (RHA) ในขณะที่ทรายแม่น้ำ (RS) ซึ่งเป็นสารเฉื่อยแทบจะไม่มี การลดลงเลย [7]

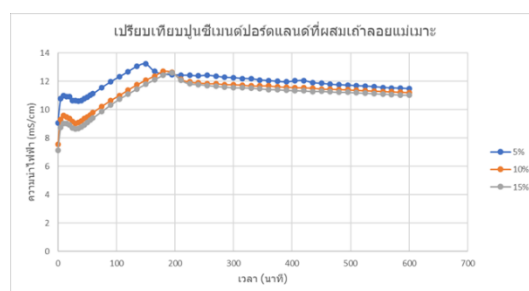
3.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่านำไฟฟ้า (Rate of change of electrical conductivity) บ่งชี้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจากความชัน (Slope) ของกราฟ ระหว่างค่านำไฟฟ้าและเวลา ยิ่งความชันสูง วัสดุยิ่งมีความว่องไวมาก โดยซิลิกาฟูม ดินขาวสุก และเถ้าแกลบ มีค่านำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ขณะที่ทรายแม่น้ำมีความชันน้อยที่สุด [7]

3.3 เวลาที่ใช้จนค่านำไฟฟ้าคงที่ (Time required for the stabilization) คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนค่านำไฟฟ้าคงที่ วัสดุที่มีความว่องไวสูง จะเข้าสู่จุดเสถียรในเวลาสั้น เช่น ดินขาวสุกใช้เวลา 4 ชั่วโมง ซิลิกาฟูมและเถ้าแกลบ 4 ถึง 6 ชั่วโมง วัสดุที่ทำปฏิกิริยาช้าอย่างเถ้าลอย (FA) ต้องใช้เวลานานถึง 28 ชั่วโมงจึงจะเข้าสู่จุดเสถียร [7]

3.4 ปรากฏการณ์การละลายของสารประกอบต่างและเกลือ (The saline dissolved material effect) การประเมินเถ้าลอย (FA) พบว่าในช่วงแรก (ก่อน 10,000 วินาที หรือประมาณ 3 ชั่วโมง) ค่านำไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าเริ่มต้นและสูงกว่าทรายแม่น้ำ รูปที่ 5 เนื่องจากเถ้าลอยมีการปล่อยสารประกอบจำพวกเกลือและต่าง (Saline dissolved material) ละลายออกมาในสารละลาย ไอออนเหล่านี้ไปหักล้างกับการลดลงของไอออนที่ใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก [7] พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ วรวิทย์ อดทน และธีรทัต นาคทัต รูปที่ 6 ซึ่งศึกษา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 5, 10 และ 15 พบว่าในช่วง 150 ถึง 200 นาทีแรก ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นก่อนแล้วจึงค่อย ๆ ลดลงนอกจากนี้ สัดส่วนของเถ้าลอยมีผลโดยตรงต่อระดับความนำไฟฟ้าโดยยิ่งเพิ่มสัดส่วนเถ้าลอย ค่านำไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง 1 ชั่วโมงแรกจะยิ่งมีค่าลดลง (เช่น เส้นกราฟที่อัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่าต่ำสุด) [13]



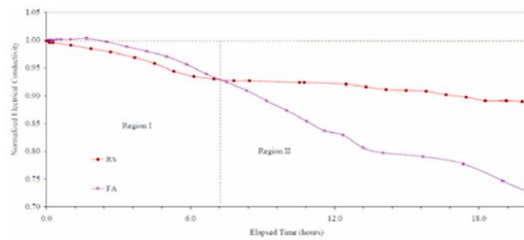
รูปที่ 5 ค่านำไฟฟ้าแบบนอร์มัลไลซ์ของวัสดุปอซโซลาน และทรายแม่น้ำเทียบกับลอการิทึมของเวลา [7]



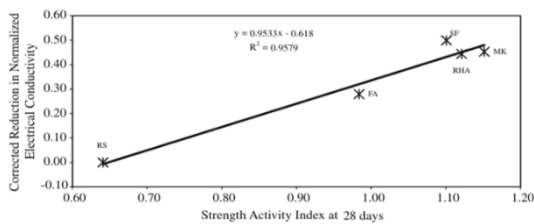
รูปที่ 6 ค่านำไฟฟ้าของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะตามเวลา [13]

ดังนั้น จากรูปที่ 7 สรุปได้ว่าสารปอซโซลานที่ทำปฏิกิริยาช้า ในช่วงแรกค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการละลายของต่าง ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกเริ่มกลายเป็นกลไกหลักในการดึงไอออนออกจากสารละลาย [10]

3.5 ค่าการลดลงของความนำไฟฟ้าปรับแก้ (Corrected reduction in normalized electrical conductivity) เนื่องจากสารเฉื่อยอย่างทรายแม่น้ำ ก็ยังมีการลดลงของค่านำไฟฟ้าเล็กน้อย เพื่อความแม่นยำจึงใช้ค่าปรับแก้ โดยหักลบค่านำไฟฟ้าของตัวอย่างด้วยค่านำไฟฟ้าของทรายแม่น้ำ เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้กับดัชนีกำลังอัด (SAI) ที่ 28 วัน (รูปที่ 8) พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่สอดคล้องกันดีมาก ( $R^2 = 0.9579$ ) ยืนยันว่าเทคนิคนี้สามารถใช้คัดกรองศักยภาพปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7]



รูปที่ 7 รูปแบบค่านำไฟฟ้าของสารปอซโซลานให้ปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ [10]



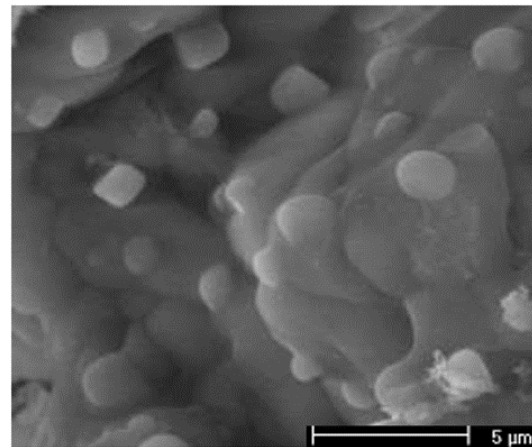
รูปที่ 8 ดัชนีกำลังอัด 28 วัน กับค่าการลดลงของค่านำไฟฟ้าปรับแก้ [7]

#### 4. การประยุกต์ใช้กับวัสดุทางเลือกใหม่และการเปรียบเทียบข้ามวิธี (ค.ศ. 2020 - ปัจจุบัน)

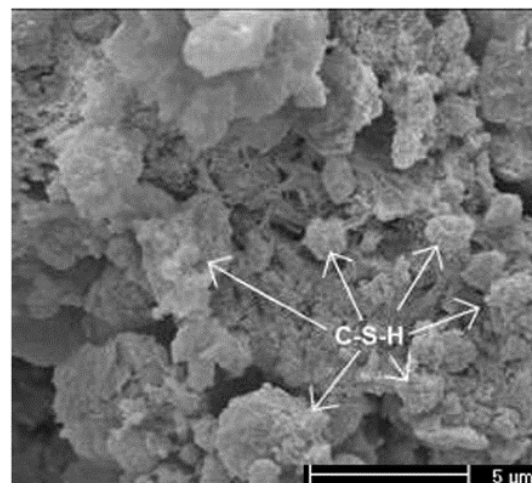
ปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างมุ่งลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การหาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (SCMs) จึงสำคัญอย่างยิ่ง เทคนิคการวัดค่านำไฟฟ้า (EC) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบทางอ้อมที่รวดเร็ว เป็นเครื่องมือสำคัญที่นักวิจัยทั่วโลกใช้คัดกรองวัสดุเหล่านี้

4.1 การประยุกต์ใช้เทคนิค EC กับวัสดุทางเลือกที่มีความซับซ้อนและวัสดุผสมร่วม (Application to Complex Alternative Materials and Binary Blends) ในปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างมุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สอดคล้องกันในการนำเทคนิค EC ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางเลือกที่มีความซับซ้อนมากขึ้น (Complex alternative materials) พบว่า เทคนิค EC สามารถบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็น แก้วซีเมนต์ทาง การเกษตรอย่างแก้วฟางข้าวบาร์เลย์ ที่มีการยึดยานการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หุ้มอนุภาคแก้ว สอดคล้องกับการลดลงของค่านำไฟฟ้า ดังภาพถ่าย SEM ใน รูปที่ 9 และ 10 [15] เมื่อวิเคราะห์จากกราฟ การลดลงของค่านำไฟฟ้าในหลายงานวิจัยร่วมกันพบ จุดเชื่อมโยงที่สำคัญคือ เทคนิค EC สามารถแยกแยะ ผลของการกระตุ้นวัสดุ (Material activation) และ ผลของการผสมร่วม ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่าง เช่น

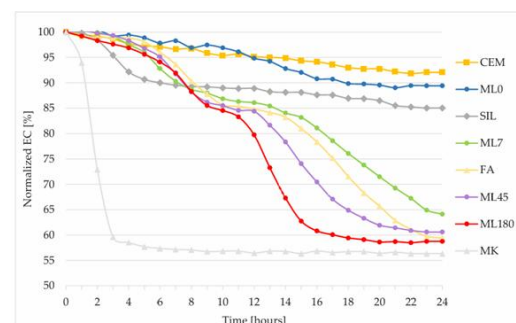
ในกรณีของแก้วค่างสโตกที่เสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 11 [3]



รูปที่ 9 SEM micrograph of BSA (ภาพแก้วฟางข้าวบาร์เลย์ก่อนทำปฏิกิริยา) [15]

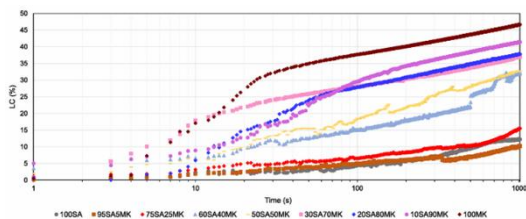


รูปที่ 10 SEM micrograph of BSA+CH+Sand after 28 days (ภาพที่เกิดเจลหลังทำปฏิกิริยา 28 วัน) [15]



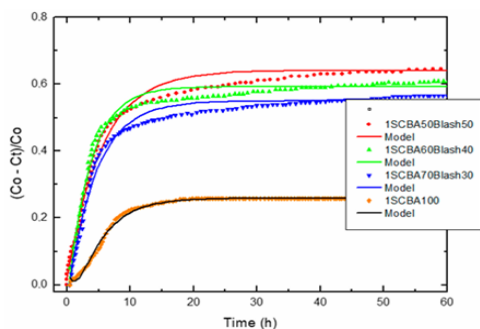
รูปที่ 11 ค่าความนำไฟฟ้า (EC) แบบนอร์มัลไรซ์ของวัสดุที่ทดสอบ [3]

กราฟค่านำไฟฟ้าชี้ให้เห็นว่าเถ้าที่ไม่ผ่านการบด (ML0) จะแสดงพฤติกรรมคล้ายสารเฉื่อย แต่เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยการบดละเอียด (ML180) อัตราการลดลงของค่านำไฟฟ้าจะตอบสนองและดิ่งลงอย่างรวดเร็ว แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมการทำงานร่วมกันในวัฏศุผสม (Synergistic effect) ดังที่เห็นได้จาก รูปที่ 12 ซึ่งเป็นการประเมินวัฏศุผสมระหว่างเถ้าขานอ้อยและดินขาวสุก [16] ที่แสดงให้เห็นว่าการผสมวัสดุในสัดส่วนที่เหมาะสมส่งผลให้ค่านำไฟฟ้าลดลงในอัตราที่เร็วกว่าการใช้วัฏศุชนิดเดียว



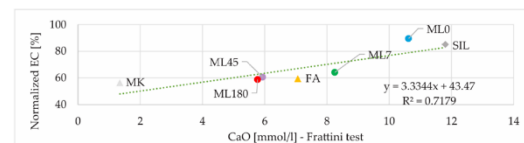
**รูปที่ 12** การสูญเสียค่านำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัฏศุผสมรวมเถ้าขานอ้อยและดินขาวสุก [16]

นอกจากนี้ รูปประกอบจากการศึกษาต่าง ๆ ยังสามารถนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction kinetics) ในภาพรวมได้เป็นอย่างดี โดย Villar-Cociña และคณะ [17] ได้ต่อยอดประเด็นนี้โดยการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Kinetic-diffusive model) เข้ามาวิเคราะห์ความชันของกราฟ EC ดังแสดงเปรียบเทียบใน รูปที่ 13 ซึ่งผลจากการสร้างแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองจริง การพล็อตข้อมูลร่วมกันลักษณะนี้ช่วยยืนยันเชิงตัวเลขได้ว่า การใช้เทคนิค EC ไม่เพียงแต่ช่วยบอกความว่องไวเบื้องต้น แต่ยังสามารถนำเส้นกราฟไปคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate constant) ของวัฏศุผสมชนิดใหม่ ๆ ได้



**รูปที่ 13** การลดลงของความเข้มข้นปูนขาวสัมพัทธ์ของวัฏศุผสมรวม [17]

4.2 การพิสูจน์ความน่าเชื่อถือด้วยการเปรียบเทียบข้ามวิธี (Cross-method Correlation) เพื่อให้เทคนิคการวัดค่านำไฟฟ้า (EC) ได้รับการยอมรับและใช้งานร่วมกับมาตรฐานสากล ทิศทางงานวิจัยจึงมุ่งเน้นการหาความสัมพันธ์ทางสถิติ (Correlation) ข้ามวิธีระหว่างเทคนิค EC กับวิธีการทดสอบมาตรฐานดั้งเดิม ทั้งวิธีทางเคมี (เช่น Frattini test และ Chapelle test) และวิธีทางกายภาพ (Strength Activity Index - SAI) จากข้อมูลพบว่า การลดลงของค่านำไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบทางเคมีอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Šídlová และคณะ [3] ที่ศึกษาเถ้าค่างสโตก พบว่าการลดลงของค่านำไฟฟ้าที่ใช้เวลาทดสอบเพียง 24 ชั่วโมง มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับปริมาณการลดลงของแคลเซียมในวิธี Frattini test (ซึ่งต้องใช้เวลานานถึง 8 วัน) ในระดับที่ตีความได้มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) สูงถึง 0.7179 ดังแสดงการกระจายตัวของข้อมูลใน รูปที่ 14 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขชี้ให้เห็นว่า เทคนิค EC สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อคัดกรองความว่องไวเบื้องต้นได้อย่างรวดเร็วและประหยัดเวลา

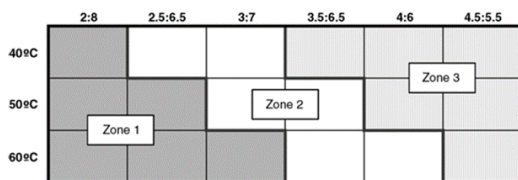


**รูปที่ 14** ความสัมพันธ์ของค่านำไฟฟ้า (EC) กับวิธีทดสอบ Frattini [3]

แนวโน้มดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Tironi และคณะ [18] ในวัฏศุดินเผา (Calcined clays) ที่ยืนยันว่าเทคนิค EC เหมาะสมสำหรับการประเมินความสามารถในการทำปฏิกิริยาระยะสั้นและสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะของวัฏศุ ในขณะที่วิธี SAI เหมาะกับการประเมินการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว การใช้งานทั้งสองวิธีร่วมกันจึงให้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ ความน่าเชื่อถือของสภาวะการทดสอบยังได้รับการยืนยันโดย Velázquez และคณะ [19] ซึ่งระบุว่าการใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาให้สังเกตผลได้ชัดเจนที่สุด และล่าสุด Xu และคณะ [20] ได้ให้การรับรองการใช้สารละลายปูนซีเมนต์ (OPC solution) ว่าเป็นหนึ่งในสภาวะมาตรฐานสำหรับการประเมินปฏิกิริยาแข่งขัน (Competitive reaction) ของวัฏศุผสมรวม การบูรณา

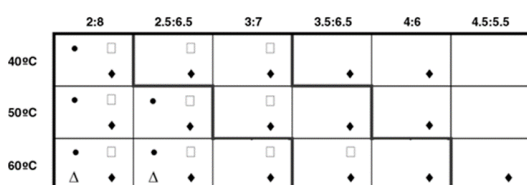
การข้อมูลจากหลายแหล่งนี้จึงเป็นการยืนยันเชิงประจักษ์ว่า เทคนิค EC มีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถใช้งานควบคู่กับวิธีมาตรฐานได้อย่างเป็นรูปธรรม

4.3 การยกระดับการทดสอบด้วยการใช้ค่านำไฟฟ้าร่วมกับค่า pH (Combined EC and pH Measurements) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมิน Tashima และคณะ [21] เสนอการทดสอบโดยวัดค่านำไฟฟ้าควบคู่ไปกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยในรูปที่ 15 ได้นำเสนอเกณฑ์มาตรฐานสำหรับจำแนกความว่องไวเป็น 3 โซน (โซน 1: ต่ำ, โซน 2: ปานกลาง, โซน 3: สูง) พร้อมกำหนดเกณฑ์เชิงตัวเลขว่า ปอซโซลานที่มีประสิทธิภาพดี (โซน 3) จะต้องแสดงผลค่านำไฟฟ้าที่ลดลงมากกว่าร้อยละ 30 และมีค่า pH ลดลงมากกว่า 0.15 หน่วย



รูปที่ 15 เกณฑ์จำแนกประเภทปฏิกิริยาปอซโซลาน[21]

เมื่อนำผลทดสอบของวัสดุตัวอย่างมาพล็อตลงในเกณฑ์ดังกล่าว รูปที่ 16 พบว่าจุดข้อมูลถูกจัดกลุ่มเข้าสู่โซนต่าง ๆ ตามคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาอย่างชัดเจน ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่า การพิจารณาตัวแปรทั้งสองค่านี้ร่วมกัน ช่วยให้การจำแนกและจัดระดับความว่องไวของวัสดุปอซโซลานมีความสมบูรณ์ เป็นรูปธรรม และลดความคลาดเคลื่อนในการแปลผลได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 16 ผลการจำแนกประเภทปฏิกิริยาปอซโซลาน

ซิลิกาฟุ่ม (● - DSF-H, □ - DSF-L)

เถ้ากลบ (Δ - RHA-C, ◆ - RHA-A.) [21]

4.4 ข้อจำกัดและข้อควรระวังของเทคนิคการวัดค่านำไฟฟ้า แม้เทคนิคการวัดค่านำไฟฟ้า (EC) จะมีจุดเด่นด้านความรวดเร็วและสามารถบอกแนวโน้ม

การเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดี แต่เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องคำนึงถึงเพื่อป้องกันการแปลผลที่คลาดเคลื่อน ดังนี้

1. ผลกระทบจากเกลือที่ละลายน้ำได้ (Soluble salts effect) วัสดุปอซโซลานบางชนิด เช่น เถ้าลอย (FA) หรือเถ้ากลบ (RHA) อาจมีเกลือที่ละลายน้ำได้ผสมอยู่มาก (เช่น ซัลเฟต หรืออัลคาไลไฮดรอกไซด์) ซึ่งเมื่อสัมผัสกับน้ำจะแตกตัวและทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในช่วงแรกพุ่งสูงขึ้น [19] ปรากฏการณ์นี้จะไปบดบังหรือชะลอการสังเกตเห็นการลดลงของค่านำไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ต้องขยายระยะเวลาการทดสอบออกไปนานขึ้น ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเถ้าลอย อาจต้องใช้ระยะเวลาทดสอบนานถึง 28 ชั่วโมง ค่านำไฟฟ้าจึงจะเริ่มแสดงผลการลดลงที่เสถียรและสะท้อนปฏิกิริยาที่แท้จริงได้ [7, 10]

2. ข้อจำกัดในวัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เทคนิค EC อาศัยหลักการวัดปริมาณแคลเซียมไอออนที่ลดลงจากการทำปฏิกิริยา แต่สำหรับวัสดุที่มีปูนขาวหรือแคลเซียมในตัวเองสูงอยู่แล้ว ตัววัสดุจะปล่อยแคลเซียมและด่างออกมาในสารละลายมากเกินไปจนเกิดสถานะแคลเซียมส่วนเกิน ผลที่ตามมาคือ การคำนวณหาอัตราการลดลงของค่านำไฟฟ้าจะเกิดความคลาดเคลื่อน และไม่สามารถนำมาใช้ประเมินความว่องไวได้อย่างสมเหตุสมผลในวัสดุกลุ่มนี้ [19]

3. ความซับซ้อนของวัสดุทางเลือกยุคใหม่ ในการประเมินวัสดุทางเลือกใหม่ ๆ ที่มีความซับซ้อน เช่น ดินคุณภาพต่ำที่ผ่านการเผากระตุ้นด้วยความร้อน (Thermally Activated Lower-Grade Clays - TACs) พบว่าวัสดุเหล่านี้อาจมีแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบ หรือเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ได้ตั้งแต่ในสถานะที่ยังไม่ผ่านการเผา ปัจจัยแฝงเหล่านี้สามารถรบกวนการวัดปริมาณแคลเซียมในสารละลาย ทำให้ผลการทดสอบผิดเพี้ยน หรือทำให้เข้าใจผิดว่าดินดิบมีความว่องไวเทียบเท่ากับดินที่ผ่านการเผาแล้ว ดังนั้น การพึ่งพาเทคนิค EC หรือวิธีทดสอบใดเพียงวิธีเดียวจึงไม่เพียงพอสำหรับการประเมินวัสดุที่มีความซับซ้อนสูง และจำเป็นต้องนำไปใช้ร่วมกับวิธีอื่น เช่น การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายควบคู่กันไป [21] หรือการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างแร่ด้วยเทคนิค XRF และ XRD [2] เพื่อตรวจสอบธาตุและแร่แฝงที่อาจรบกวนปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยยืนยันผลลัพธ์เบื้องต้นได้

## 5. บทสรุป

ข้อมูลการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดค่า นำไฟฟ้า (EC) เพื่อประเมินความว่องไวของปฏิกิริยา ปอซโซลานิก สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

เทคนิค EC เป็นเครื่องมือคัดกรองเบื้องต้น ที่รวดเร็ว (สามารถสังเกตผลแนวโน้มได้ภายใน 24-28 ชั่วโมง) ช่วยลดข้อจำกัดด้านระยะเวลาของวิธี ดัชนีกำลังอัด (SAI)

ทิศทางการวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่า เทคนิคนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง และสามารถ นำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางเลือกที่มีความซับซ้อนได้ อย่างหลากหลาย เช่น แก้วค้ำสติกที่ถูกกระตุ้นด้วย การบด แก้วซีมวลทางการเกษตร และวัสดุผสมร่วม โดยสามารถต่อยอดใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ได้

ข้อมูลเชิงสถิติยืนยันว่า การลดลงของค่า นำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับวิธีทดสอบ มาตรฐานดั้งเดิม (เช่น Frattini test และ SAI) อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือใน การจำแนกความว่องไวได้เมื่อประเมินร่วมกับอัตราการ ลดลงของค่า pH

อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดที่ต้อง ระวัง ได้แก่ โดยเฉพาะเมื่อทดสอบกับวัสดุที่มีเกลือ ละลายน้ำผสมอยู่มาก วัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมสูง หรือวัสดุทางเลือกที่มีแร่แคลไซต์แฝงอยู่ การใช้เทคนิค EC เพียงวิธีเดียวจึงอาจไม่เพียงพอในกรณีที่วัสดุมีความ ซับซ้อนสูง และควรพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์ ทางเคมี (XRD) หรือวิธีทางกายภาพระยะยาว เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nedunuri SSSA, Sertse SG, Muhammad S. Microstructural study of Portland cement partially replaced with fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume as determined by pozzolanic activity. *Construction and Building Materials*. 2020;238:117561.
- [2] Šádková K, Pommer V, Keppert M, Vejmelková E, Koňáková D. Difficulties in determining the pozzolanic activity of thermally activated lower-grade clays. *Materials*. 2024;17(20):5093.
- [3] Šídlová M, Šulc R, Škvára F, Pulcová K, Formáček P, Snop R. Pozzolanic activity of stockpile ash: Comparison of test methods. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02396.
- [4] European Committee for Standardization. EN 196-5 Methods of testing cement - Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cements. Brussels: CEN; 2011.
- [5] ASTM International. ASTM C618-17 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [6] ASTM International. ASTM C311/C311M-17 Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [7] Sinthaworn S, Nimityongskul P. Quick monitoring of pozzolanic reactivity of waste ashes. *Waste Management*. 2009;29(5):1526-31.
- [8] Goldman A, Bentur A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. *Cement and Concrete Research*. 1993;23(4):962-72.
- [9] Tangpagasit J, Cheerarot R, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(6):1145-51.
- [10] Sinthaworn S, Nimityongskul P. One-day qualitative evaluation of pozzolanicity of pozzolans. *Proceedings of the 5th Annual Concrete Conference*; 2009. p. 1-6. (in Thai)
- [11] Raask E, Bhaskar MC. Pozzolanic activity of pulverized fuel ash. *Cement and Concrete Research*. 1975;5(4):363-75.
- [12] Luxán MP, Madruga F, Saavedra J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*. 1989;19(1):63-8.

- [13] Odtorn W, Nakethat T. The evaluation of hydraulic cement by measuring the conductivity of cement solution [bachelor's project]. Nakhon Nayok: Srinakharinwirot University; 2010. (in Thai)
- [14] Sinthaworn S, Nimityongskul P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2011;33(5):622-7.
- [15] Cobreros C, Reyes-Araiza JL, Manzano-Ramírez A, Nava R, Rodríguez M, Mondragón-Figueroa M, Apátiga LM, Rivera-Muñoz EM. Barley straw ash: Pozzolanic activity and comparison with other natural and artificial pozzolans from Mexico. *BioResources*. 2015;10(2):3757-74.
- [16] Araújo ML, Lima K, Cartaxo M, Araújo E, Araújo F, Medeiros M, Melo Neto A. Synergistic effect of binary metakaolin–sugarcane bagasse ash blends as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2026;518:145776.
- [17] Villar-Cociña E, Frías M, Savastano H, Rodier L, Sánchez de Rojas MI, Sáez del Bosque IF, Medina C. Quantitative comparison of binary mix of agro-industrial pozzolanic additions for elaborating ternary cements: Kinetic parameters. *Materials*. 2021;14(11):2944.
- [18] Tironi A, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*. 2013;37:319-27.
- [19] Velázquez S, Monzó JM, Borrachero MV, Payá J. Assessment of pozzolanic activity using methods based on the measurement of electrical conductivity of suspensions of Portland cement and pozzolan. *Materials*. 2014;7(11):7533-47.
- [20] Xu D, Yu C, Gao C, Wang H, Tang J, Chen S, Xie Y, Li K, Han F, Liu J. Reactivity assessment of silica fume and its competitive reaction in binary blended SCMs paste. *Construction and Building Materials*. 2025;467:140442.
- [21] Tashima MM, Soriano L, Monzó J, Borrachero MV, Akasaki JL, Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime: pozzolan suspensions. *Materiales de Construcción*. 2014;64(316):e032.