

การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงอายุต้นและ ความสัมพันธ์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

Electrical Resistivity Development of Concrete at Early Ages and Its Correlation with Compressive Strength

มงคล นามลักษณ์¹ Rithy Lo²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹mongkhon.nar@kmutt.ac.th

²tldpboy1@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่กำลังแข็งตัวในช่วง 3 วันแรก โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้น ตัวแปรการทดลองประกอบด้วย 1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2) การเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ และ 3) การแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟุม เถ้าลอย และซิลิกาฟุมผสมเถ้าลอย สมบัติของคอนกรีตที่ศึกษา ได้แก่ การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของเวลา และค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ผลการศึกษาพบว่าโดยภาพรวมเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้า และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่างสองช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง เมื่อพิจารณาที่อายุ 3 วัน พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุม ในขณะที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ผสมเพิ่ม โดยภาพรวมกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วันแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำนายกำลังรับแรงอัดด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

คำสำคัญ: ความต้านทานไฟฟ้า, กำลังรับแรงอัด, เถ้าลอย, ซิลิกาฟุม

ABSTRACT

The main purpose of this research was to study the electrical resistivity development of concrete in the first three days, by using a measurement tool developed in this work. Test variables included the water to binder ratio, the addition of superplasticizer, and the replacement of Portland cement by silica fume or fly ash, or both. Concrete properties measured included electrical resistivity as a function of time and 3-day compressive strength. Test results showed that the development curve of the electrical resistivity of concrete can be divided into two periods: 1) the setting period with slow change of resistivity and 2) the hardening period with a sharp increase of resistivity. Boundary between the two periods located at the point of resistivity drop. At the age of 3 day, it was found that the electrical

resistivity of concrete strongly decreased with an increase in water to binder ratio, slightly decreased in the presence of fly ash and silica fume, and markedly increased with the use of superplasticizer. In general view, the 3-day compressive strength was found to have a linear correlation with the resistivity, indicating that there is a high possibility to predict the compressive strength of concrete by measuring its electrical resistivity.

Keywords: Electrical resistivity, Compressive strength, Fly ash, Silica fume

1) บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างได้รับความนิยอย่างกว้างขวางในการก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา ส่วนประกอบหลักในการผลิตคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ปฏิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการก่อตัวและการพัฒนาสมบัติทางกลของคอนกรีต

กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเริ่มแรกเป็นสมบัติทางกลที่ใช้ประเมินความแข็งแรงของคอนกรีต เพื่อวางแผนการก่อสร้าง การหาค่ากำลังรับแรงอัด ณ เวลาใดๆ ทำได้โดยการทดสอบกดอัดแบบทำลายตามมาตรฐาน ASTM C39 [1] หรือ BS EN 12390-3:2009 [2] อย่างไรก็ตาม การทดสอบข้างต้นเป็นงานที่ต้องทำในห้องปฏิบัติการและมีกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ต้องใช้เวลาและงบประมาณค่อนข้างมาก นอกจากนี้ความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับความพิถีพิถันในการเตรียมตัวอย่างและความชำนาญของผู้ทดสอบ [3] ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาจึงพยายามพัฒนาวิธีการทดสอบที่เป็นทางเลือกอื่นๆ เพื่อใช้ประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้างาน

การวัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการตรวจวัดความก้าวหน้าของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพภายในวัสดุ [4] นอกจากนี้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ายังเป็นเทคนิคที่ทำการ

ทดลองได้ง่าย ประหยัดเวลา สามารถวัดค่าได้แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง และสามารถทำได้ในสถานที่ก่อสร้าง

Wei และคณะ [4] ได้ศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าในช่วง 48 ชั่วโมงแรก ของซีเมนต์เพสต์ และพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ ณ อายุใดๆ สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วง 48 ชั่วโมง Xiao และ Wei [5] รายงานว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดและความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ของเวลา Wei และคณะ [6] ได้นำเสนอวิธีการทำนายกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) คงที่เท่ากับ 0.4 ด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ธเนศ ทายะบรร และ มงคล นามลักษณ์ [7] ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอย และพบว่าการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงก่อกัว (Setting period) ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้า และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจุดก่อกัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่วัดตาม ASTM C409 เกิดขึ้นในช่วงก่อกัว นอกจากนี้พบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในช่วง 1-3 วันแรก มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้า แต่ยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวในคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ 1) ศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่กำลังแข็งตัวในช่วง 3 วันแรก 2) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) การเติมสารลดน้ำ (superplasticizer) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย ที่มีต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และ 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

2) วิธีดำเนินการวิจัย

2.1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2555 ซิลิกาฟุ่มจากบริษัทเอลเคม (Elkem) และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสามได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ได้ใช้มวลรวมละเอียดซึ่งเป็นทรายแม่น้ำสะอาด มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.53 และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.97 หินปูนย่อยขนาดโตสุด 19.05 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.63 สารลดน้ำ (ซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์) ประเภทโพลีคาร์บอเนต มีความหนาแน่น 1.06 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้น้ำประปาสะอาดในการผสมคอนกรีต

2.2) ส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดลองมี 7 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2 แยกพิจารณาเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 มี 3 ส่วนผสม คือ 40PC, 45PC และ 50PC ซึ่งใช้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและแปรผัน w/b เท่ากับ 0.4, 0.45 และ 0.5 ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 มี 4 ส่วนผสม คือ 45PC, 45PC-SF5, 45PC-FA20 และ 45PC-SF5-FA20 ใช้ในการศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลาน (ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย) ทั้งในลักษณะสองประสานและสามประสาน โดยการควบคุม w/b ให้คงที่เท่ากับ 0.45 กลุ่มที่ 3 มี 2 ส่วนผสม คือ 40PC และ 40PC-SP0.5 ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ โดยการควบคุม w/b ให้คงที่เท่ากับ 0.40

ตารางที่ 1: องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน (% by mass)

ธาตุ/สมบัติ	ปูนซีเมนต์ (PC)	ซิลิกาฟุ่ม (SF)	เถ้าลอย (FA)
CaO	70.4	0.38	23.4
SiO ₂	15.9	83.6	33.1
Al ₂ O ₃	3.79	0.14	18.3
Fe ₂ O ₃	3.71	0.03	13.7
M ₂ O	0.75	0.38	1.77
SO ₃	4.22	0.63	4.62
K ₂ O	0.43	-	2.84
Na ₂ O	0.18	-	1.04
LOI	2.00	2.30	2.10

ตารางที่ 2: อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m³)

วัสดุ	สัญลักษณ์ของส่วนผสมคอนกรีต						
	40PC	40PC-SP0.5	45PC	45PC-SF5	45PC-FA20	45PC-SF5-FA20	50PC
w/b	0.4	0.4	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5
PC	494	494	494	469	395	370	494
SF	-	-	-	25	-	25	-
FA	-	-	-	-	99	99	-
W	198	198	222	222	222	222	247
SP	-	0.5%	-	-	-	-	-
S	988	988	988	988	988	988	988
G	988	988	988	988	988	988	988

หมายเหตุ: w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (โดยน้ำหนัก) PC คือ ปูนซีเมนต์ SF คือ ซิลิกาฟุ่ม FA คือ เถ้าลอย W คือ น้ำ SP คือ สารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ S คือ ทราย และ G คือ หิน

การผสมคอนกรีต เริ่มจากการผสมมวลรวมทั้งหมดให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที โดยใช้เครื่องผสม (โมลู่ข้าง) จากนั้นเติมปูนซีเมนต์ รวมถึงเถ้าลอยและซิลิกาฟูม (ถ้ามี) ลงในเครื่องผสม และผสมต่อเนื่องไปอีก 1 นาที แล้วจึงค่อยๆ เติมน้ำทั้งหมด รวมถึงสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์ (ถ้ามี) และเดินเครื่องผสมต่อเนื่องไปอีก 2 นาที เป็นอันแล้วเสร็จ จากนั้นแบ่งตัวอย่างคอนกรีตสดส่วนหนึ่งไปหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด อีกส่วนหนึ่งนำไปหล่อแท่งตัวอย่างสำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จและเริ่มวัดค่าภายในเวลา 25 นาที

2.3) การวัดความต้านทานไฟฟ้า

การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตได้ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง (29 ± 1 องศาเซลเซียส) โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าและรูปภาพของชุดทดลองดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

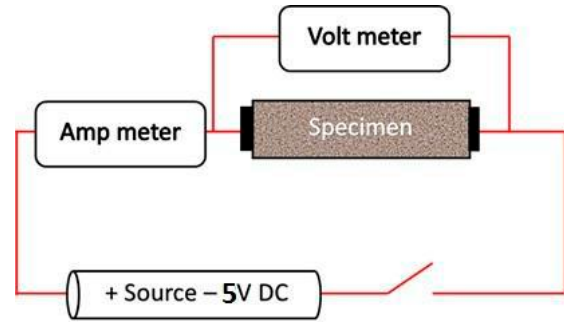
หลักการพื้นฐานของการทดลอง คือ การปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ผ่านตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 75 \times 285$ มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในแบบหล่อพลาสติก PVC โดยมีแผ่นอิเล็กโทรดทองแดงขนาด 75×75 มิลลิเมตร ติดอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง งานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ที่แปลงมาจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดยมีชุดอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าที่ออกแบบเฉพาะ จึงสามารถควบคุมความดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ตลอดช่วงการทดลอง การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านคอนกรีตเริ่มขึ้น ณ เวลา 25 นาทีหลังการผสมคอนกรีต และการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต จะกระทำอย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 นาที ตลอดช่วงเวลา 3 วัน (4320 นาที) ค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยรวมของแท่งคอนกรีต (Bulk electrical resistivity, ρ) ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Volts) I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Amps) A คือ พื้นที่หน้าตัดแท่งตัวอย่าง (cm^2) L คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

2.4) การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ได้การทดสอบกำลังรับแรงอัด ได้ทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12390-3:2009 [2] เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 3 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนสำหรับแต่ละอายุการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 1: วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



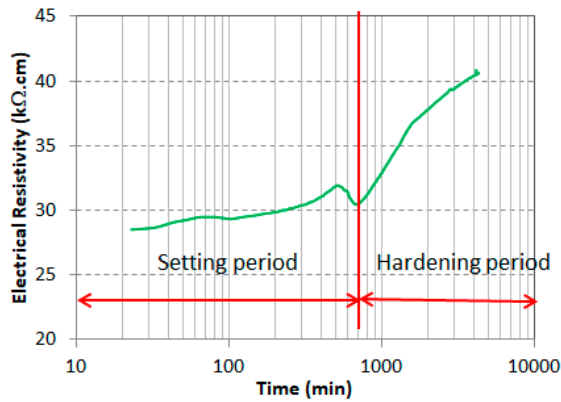
รูปที่ 2: ชุดเครื่องมือทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1) พฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต จะเห็นว่าการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่าง 2 ช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [7] ที่พบปรากฏการณ์ดังกล่าวในการศึกษาการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์

Wei และ Li [8] กล่าวว่าในช่วงก่อตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ (ρ_{paste}) จะถูกควบคุมโดยความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในช่องโพรงขนาดเล็ก (ρ_{solution}) กล่าวคือ เมื่อไอออนของ K^+ Na^+ Ca^{2+} OH^- และ SO_4^{2-} OH^- จากอนุภาคปูนซีเมนต์และวัสดุป่อขโซลาน แพร่เข้าสู่น้ำอย่างช้าๆ ทำให้ระดับความเข้มข้นรวมของไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายถึงจุดอิ่มตัว ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีค่าสูงสุด ในทางตรงข้าม ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตจะมีค่าลดลงถึงจุดต่ำสุด สำหรับช่วงแข็งตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Acceleration period) ของปูนซีเมนต์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณน้ำและปริมาณช่องโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน



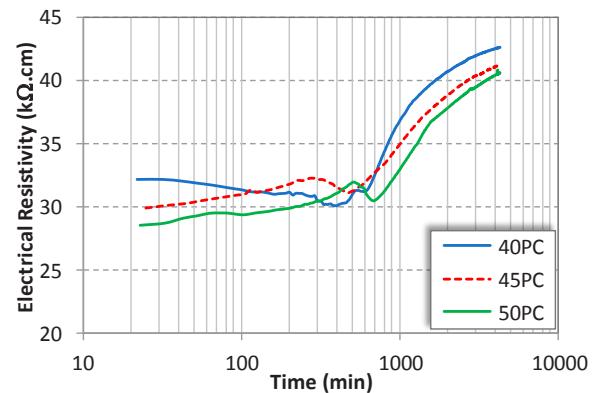
รูปที่ 3: ลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงผลของ w/b ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต จากรูปจะเห็นว่าคอนกรีต 40PC ซึ่งใช้ w/b เท่ากับ 0.40 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงก่อตัวและช่วงแข็งตัว สำหรับคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้น (45PC และ 50PC) จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ณ เวลาใดๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีในคอนกรีต (Conductive phase) การมีน้ำอยู่มากจึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Topcu และคณะ [9] ที่รายงานว่าการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงๆ จะทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูงตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง

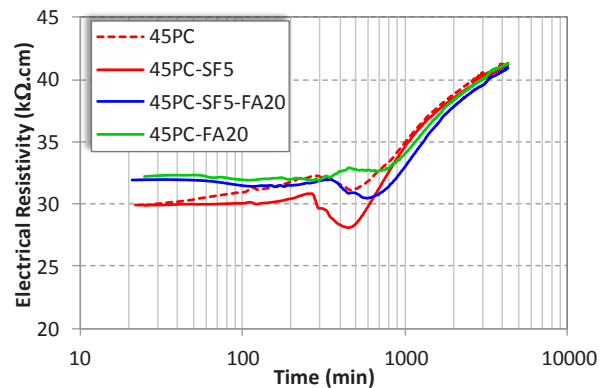
รูปที่ 5 แสดงผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คือ 0.45 จะเห็นว่าในช่วงก่อตัว ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในทิศทางที่แตกต่างกัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 5 (45PC-SF5) จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ (45PC) เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากสารเคมีในซิลิกาฟุ่ม ที่ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในคอนกรีตต่ำลง สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ร้อยละ 20 (45PC-FA20) พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าคอนกรีตปกติ (45PC) เล็กน้อย สอดคล้องกับรายงานของ Topcu และคณะ [9] ส่วนกรณีที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟุ่ม (45PC-SF5-FA20) พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกับคอนกรีต 45PC-FA20 เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่า สำหรับช่วงแข็งตัว จะเห็นว่าคอนกรีตทุกกลุ่มมีการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน ประมาณ 41 kΩ.cm แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทั้งในลักษณะสองประสานและสามประสาน ไม่มีผลกระทบต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงแข็งตัวมากนัก นอกจากนี้ยังอาจสรุปได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) มีอิทธิพลควบคุมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าในช่วงแข็งตัว มากกว่าวัสดุประสาน

รูปที่ 6 แสดงผลของการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คือ 0.40 จะเห็นว่าในช่วงก่อตัว คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ร้อยละ 0.5 (40PC-SP0.5) มีการ

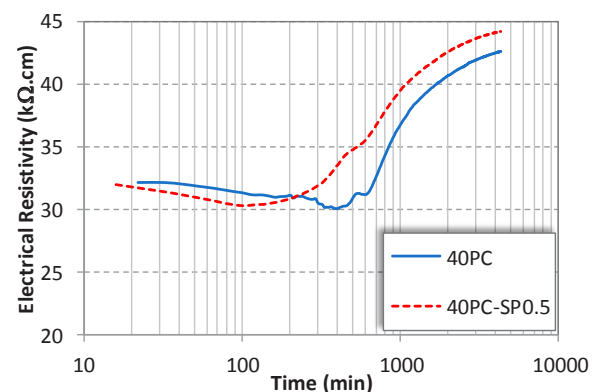
พัฒนาความต้านทานไฟฟ้าคล้ายคลึงกับคอนกรีตปกติ (40PC) แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ในช่วงแข็งตัว คอนกรีต 40PC-SP0.5 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าอย่างชัดเจน จากรายงานวิจัยของ Liu และคณะ [10] ระบุว่าการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์สม่ำเสมอและเรียงตัวแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ช่องโพรงคาพิลลารีมีขนาดเล็ก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านสารละลายในช่องโพรงได้ยากขึ้น นอกจากนี้สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ก็ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในคอนกรีต แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่มีข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ จึงไม่สามารถอภิปรายได้ในประเด็นนี้ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต



รูปที่ 4: ผลของ w/b ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต



รูปที่ 5: ผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต



รูปที่ 6: ผลของการใช้สาร ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าโดยภาพรวมค่าความต้านทานไฟฟ้า ในช่วง ก่อตัว ของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ แปรผันอยู่ในช่วง 30-35 k Ω -cm แต่เมื่อ คอนกรีตเริ่มแข็งตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และ ที่อายุ 3 วัน พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ แปรผันอยู่ในช่วง 40-44 k Ω -cm งานวิจัยในอดีตโดย Rajabipour และ Weiss [11] รายงานว่าในช่วงอายุเริ่มแรกค่าความต้านทานไฟฟ้าของ ซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำกว่า 10 k Ω -cm ซึ่งแม้ว่ามีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ แต่ถือว่ามีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองในคอนกรีตซึ่งมีมวลรวมเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จึง ทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์

3.2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน

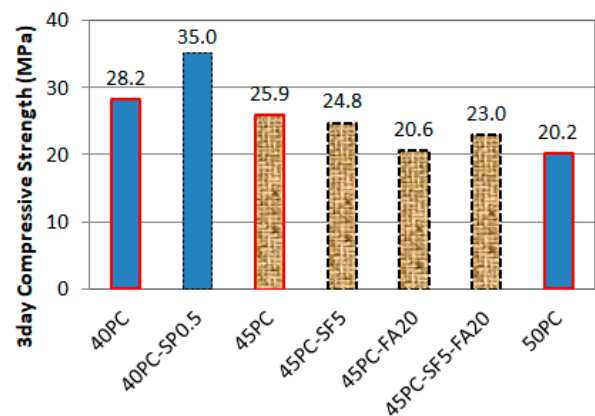
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกลุ่มต่างๆ ที่อายุ 3 วัน แรก ได้แสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงขึ้น จะ ทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันต่อปริมาตร ช่องโพรง (gel/space ratio) ต่ำลง จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงขึ้น และกำลังรับแรงอัดต่ำลง [12]

เมื่อพิจารณาผลของการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်ร้อยละ 0.5 (40PC-SP0.5) มีค่าเท่ากับ 35.0 MPa ซึ่งมากกว่ากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตซึ่งไม่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် (40PC) ซึ่งมีค่า เท่ากับ 28.2 MPa จะเห็นได้ว่าการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร် เพียงร้อยละ 0.5 ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นถึง 1.24 เท่า ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยของ Liu และคณะ [10] ที่รายงานว้ค่าความอัดแน่น (packing density) ของซีเมนต์เพสต์เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารซูเปอร์ พลาสติกไฮเซอร်ที่ใช้ และ Mangane และคณะ [13] รายงานว่าการใช้ สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်ประเภทโพลีคาร์บอเนตซีเลตดั่งที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ เพสต์ที่ไม่ใช้สารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်

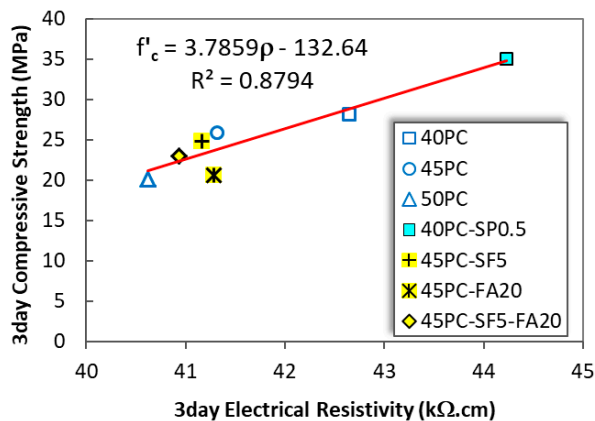
เมื่อพิจารณาผลของการใช้วัสดุปอชโซลาน พบว่ากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมและเถ้าลอย 45PC-SF5, 45PC-FA20 และ 45PC-SF5-FA20 มีค่าเท่ากับ 24.8, 20.6 และ 23.0 MPa ตามลำดับ หรือคิดเป็นดัชนีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 0.96 0.80 และ 0.89 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุปอชโซ ลาน 45PC (25.9 MPa) แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า ลอยร้อยละ 20 เพียงอย่างเดียวทำให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ลดลง ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dilution effect) และเถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซลานที่เกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ปูนซีเมนต์ [12] ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับซิลิ กาฟูมร้อยละ 5 ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อ เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซลานเพียงอย่างเดียว (45PC-FA20) ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอชโซลานที่ เกิดปฏิกิริยาเร็วและมีขนาดเม็ดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์จึงสามารถแทรก ตัวทำให้ช่องโพรงแน่นขึ้น (Filler effect) [12]

3.3) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่อายุ 3 วัน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วันและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน จากรูปจะเห็นว่าสำหรับกลุ่ม คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและมีการ แปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (40PC, 45PC, และ 50PC) พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความ ต้านทานไฟฟ้า (เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง) สำหรับกลุ่ม คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาน (ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย) และ กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ (45PC-SF5, 45PC-FA20, 45PC-SF5-FA20) พบว่ามีกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้า ไกลเคียงกับคอนกรีต 45PC ส่วนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์ พลาสติกไฮเซอร် (40PC-SP0.5) พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าและ ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และสูงกว่าคอนกรีต 40PC ก่อนข้างมากแม้ว่า จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าในกรณี คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร်นั้น ค่าความ ต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สามารถบ่งชี้ถึงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ได้ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 8 โดย ภาพรวมโดยไม่คำนึงถึงส่วนผสมของคอนกรีต จะเห็นว่ากำลังรับ แรงอัดแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต สามารถ แสดงด้วยสมการเชิงเส้น ($f_c = 3.796\rho - 132.64$) และมีค่า $R^2 = 0.879$ ผล การทดลองข้างต้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei และคณะ [6] ที่ได้รายงานว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของซีเมนต์เพสต์ ที่ ทดสอบโดยวิธีมาตรฐาน ISO679:1989 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า ความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $f_{28} = 8.76\rho_{24} - 20.4$) และมีค่า $R^2 = 0.96$



รูปที่ 7: ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน ของคอนกรีต



รูปที่ 8: ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน

3.4) แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยในงานจริง

จากผลการวิจัยข้างต้นจะเห็นว่า เทคนิคการวัดความต้านทานไฟฟ้าจะมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้างที่ต้องการทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มแรก เพื่อประกอบการตัดสินใจในการดำเนินงานขั้นต่อไป เช่น การประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในงานซ่อมบำรุงถนนหรือสะพานคอนกรีตก่อนการเปิดใช้งานในเวลาจำกัด หรืองานก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตชนิดอัดแรงที่หลัง ซึ่งต้องการทราบค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นพื้นคอนกรีตก่อนการตัดสินใจดึงลวดอัดแรง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตที่เก็บจากสถานที่ก่อสร้างหน้างาน เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ อายุที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การแปลผลค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้หน้างาน ต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของคอนกรีตนั้นๆ

4) บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถเขียนข้อสรุปได้ดังนี้

1. การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ มีลักษณะคล้ายคลึงกับการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่รายงานไว้ในรายงานวิจัยในอดีต กล่าวคือ เส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อย และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่าง 2 ช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าตกต่ำลง
2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตทั้งในช่วงก่อตัวและช่วงแข็งตัว การใช้วัสดุปอซโซลาน (ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าอย่างชัดเจนในช่วงก่อตัว แต่ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตในช่วงแข็งตัว ส่วนการใช้สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ มีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าในช่วงแข็งตัว สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ
3. สำหรับกลุ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน) และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานแปรผันอยู่ในช่วง 0.40 – 0.50 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน จะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นวิธีการประเมินค่ากำลังรับแรงอัด โดยเฉพาะกรณีคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์

4. การวิจัยในอนาคต ควรทำการทดลองเพิ่มเติมให้ครอบคลุมส่วนผสมของคอนกรีตที่หลากหลาย และควรศึกษาอิทธิพลของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์เพิ่มเติม โดยแปรผันปริมาณเป็นหลายระดับ และศึกษาผลของชนิดหรือประเภทของสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อยืนยันผลการวิจัยให้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อายุอื่นๆ เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM C39 / C39M - 17b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *ASTM International*: West Conshohocken, PA, 2017.
- [2] "Testing Hardened Concrete Compressive Strength of Test Specimens," BS EN 12390-3, 31-May-2009.
- [3] B. Dong, J. Zhang, Y. Wang, G. Fang, Y. Liu, and F. Xing, "Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method," *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 16–20, Aug. 2016.
- [4] X. Wei, L. Xiao, and Y. Liao, "Early Age Properties of Cementitious Materials by Electrical Resistivity Measurement," *Journal of Wuhan University of Technology-materials Science Edition*, vol. 25, pp. 641–644, Aug. 2010.
- [5] L. Xiao and X. Wei, "Early age compressive strength of pastes by electrical resistivity method and maturity method," *Journal of Wuhan University of Technology-materials Science Edition*, vol. 26, no. 5, pp. 983–989, Oct. 2011.
- [6] X. Wei, L. Xiao, and Z. Li, "Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement," *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 341–346, 2012.
- [7] ธนศ ทายะบุตร และ มงคล นามลักษณ์, "กำลังอัดและการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมและเถ้าลอย," ใน *เรื่องนวัตกรรมอาคาร, โรงแรม ไม่ดำ ทาวเวอร์ กรีน นครปฐม*, 2559, หน้า 116–124.
- [8] Wei Xiaosheng and Li Zongjin, "Early Hydration Process of Portland Cement Paste by Electrical Measurement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 99–105, Feb. 2006.
- [9] i. B. Topçu, T. Uygunoglu, and i. Hocaoglu, "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 414–420, Mar. 2012.
- [10] J. Liu, K. Wang, Q. Zhang, F. Han, J. Sha, and J. Liu, "Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 359–366, Sep. 2017.

- [11] F. Rajabipour and J. Weiss, "Electrical conductivity of drying cement paste," *Materials and Structures*, vol. 40, no. 10, pp. 1143–1160, Dec. 2007.
- [12] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, A. Ngamjarujana, and A. Chaipanich, "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume," *Materials & Design*, vol. 64, pp. 261–269, Dec. 2014.
- [13] M. B. C. Mangane, R. Argane, R. Trauchessec, A. Lecomte, and M. Benzaazoua, "Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill," *Minerals Engineering*, vol. 116, pp. 3–14, Jan. 2018.