



กำลังอัดและการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุมและเถ้าลอย

Compressive Strength and Electrical Resistivity Development of Cement Mortars Containing

Silica Fume and Fly Ash

ธนศ ทายะบวร, มงคล นามลักษณ์*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

E-mail: mongkhon.nar@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและสมบัติทางไฟฟ้าของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสามชนิด คือ ปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุม และเถ้าลอย ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุมและเถ้าลอยมีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุม (10SF) มีค่าสูงที่สุดทุกอายุการทดสอบและการใช้ซิลิกาฟุมร่วมกับเถ้าลอยส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำลงใน 24 ชั่วโมงแรกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้เถ้าลอย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่อายุการทดสอบเพิ่มขึ้น พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยทั้ง 3 ระดับจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วง 3 วันแรก

คำหลัก : มอร์ตาร์; เถ้าลอย; ซิลิกาฟุม; กำลังอัด; ความต้านทานไฟฟ้า

Abstract

The main aim of this research was to study the development of engineering properties and electrical resistivity of ternary blended cement mortars containing Portland cement, silica fume, and fly ash. Test results showed that the replacement of Portland cement with silica fume and fly ash resulted in a small increase in setting times, as compared to the control mortar (OPC). In general, compressive strength of cement mortar containing cement and silica fume (10SF) was the highest at all tested ages. The use of 10% silica fume combined with various amounts of fly ash led to a systematic decrease in compressive strength at 24 hours, as compared to the mixes without fly ash. However, after the age of 24 hours, compressive strengths of all fly ash containing mortars were higher than that of the control sample. For the electrical resistivity test, it was found that the rate of strength gain was linearly correlated with the rate of electrical resistivity increase during the first three days.

Keywords : Mortar; Fly Ash; Silica Fume; Compressive Strength; Electrical Resistivity



1. ที่มาและความสำคัญ

การผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้วัสดุปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกับปูนซีเมนต์ เช่น การใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การใช้วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary composite binder) ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตมีความซับซ้อนมากขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยในปริมาณมาก อาจทำให้การก่อตัวและการแข็งตัว ตลอดจนการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นของคอนกรีตช้าลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อสร้าง เช่น การแต่งผิวหน้า การถอดแบบ และการตั้งลวดอัดแรง ต้องขยายออกไปด้วย ดังนั้นหากสามารถคาดคะเนระยะเวลาก่อตัวและค่ากำลังอัดในสามวันแรกของคอนกรีตได้ล่วงหน้า จะทำให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถวางแผนการทำงานด้านเวลาและกำลังคนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวและค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403 และ ASTM C39 เป็นงานที่ต้องใช้เวลา ต้นทุน และกำลังคนมาก นอกจากนี้ความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับทักษะความชำนาญของผู้ทดสอบแต่ละคน ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากจึงพยายามพัฒนาวิธีการที่รวดเร็วเพื่อประมาณระยะเวลาก่อตัวและค่ากำลังอัดของวัสดุซีเมนต์และคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง

ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด เป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จึงสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ การวัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดความก้าวหน้าของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ตามเวลา มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพภายในวัสดุได้ นอกจากนี้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ทำการทดลองได้ง่าย ประหยัดเวลา สามารถวัดค่าได้แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง และไม่ทำลายตัวอย่างทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ชนิดและปริมาณของแร่ธาตุผสมเพิ่ม เช่น ซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีเพียงการประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าในระบบซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียวหรือในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับวัสดุปอซโซลานเพียง 1 ประเภท (Binary binder) งานวิจัยนี้มุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้ากับพฤติกรรมก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary binder) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตเพื่อการวางแผนควบคุมงานก่อสร้างต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 ศึกษาระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด และการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน
- 2.2 ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้ากับพฤติกรรมก่อตัวและการพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

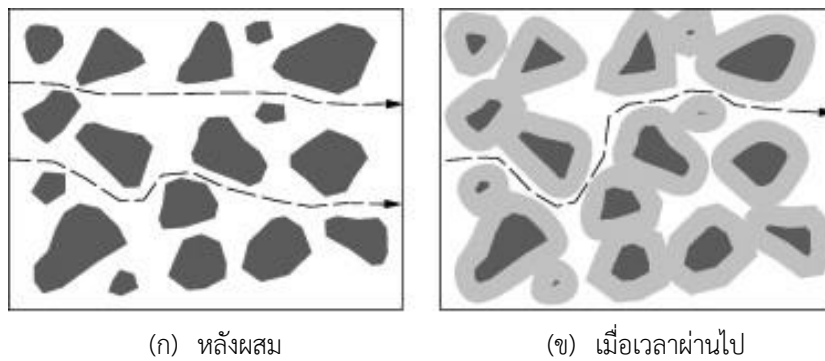
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับค่ากำลังอัดสามารถอธิบายได้จากแบบจำลองโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 1 รูปที่ 1(ก) แสดงให้เห็นว่าขณะซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพของเหลว (หลังจากการผสมแล้วเสร็จ) ช่องโพรงระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ซึ่งเต็มไปด้วยน้ำและยังมีความต่อเนื่องกัน อนุภาคปูนซีเมนต์ยังกระจายตัวแยกกันอย่างอิสระ กระแสไฟฟ้าจึงเดินทางผ่านได้โดยง่าย เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำมากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เป็นตัวยึดประสาน (hydration products) เพิ่มขึ้น อนุภาคปูนซีเมนต์เริ่มเกิดการเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาค ทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัว แข็งตัว และพัฒนากำลังรับแรง

ภายนอก เมื่อพิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์จะเห็นว่าปริมาตรช่องโพรงและน้ำส่วนที่เหลืออยู่ในช่องโพรงเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า เมื่อเวลาผ่านไป ผลผลิตกัณฑ์ไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดและปริมาตรช่องโพรงและปริมาณน้ำในระบบจะลดลง ในบางส่วนผลผลิตกัณฑ์ไฮเดรชันกีดขวางเส้นทางการนำไฟฟ้า ทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้ามีความคดเคี้ยวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 1(ข) ด้วยเหตุนี้ความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์จึงเพิ่มขึ้น [1]

ในทางทฤษฎี ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่วัดได้ ณ เวลาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลายในช่องโพรงและคุณสมบัติต่างๆ ของช่องโพรงดังนี้ [2]

$$\rho_{\text{sample}} = \frac{\rho_{\text{solution}}}{\phi \cdot \beta} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_{sample} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ρ_{solution} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารละลาย (ของเหลว) ในซีเมนต์เพสต์ ϕ คือ ปริมาตรช่องโพรงที่เต็มไปด้วยสารละลาย β คือ ตัวประกอบความต่อเนื่องของช่องโพรง (มีค่าระหว่าง 0-1)



รูปที่ 1 : แบบจำลองแสดงเส้นทางการนำไฟฟ้าในซีเมนต์เพสต์ที่กำลังแข็งตัว [1]

จากการศึกษาวิจัยในอดีตพบว่า Wei และ Li [3] ได้การศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ผลการศึกษาพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยมีรูปแบบเส้นกราฟรูปตัว S และเส้นกราฟความต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่มี w/c ต่ำ จะอยู่เหนือเส้นกราฟของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่า w/c สูงเสมอ นอกจากนี้ยังกล่าวไว้ว่า ในช่วงที่ซีเมนต์เพสต์ยังไม่แข็งตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของไอออน สำหรับช่วงที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัวแล้วค่าความต้านทานไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยปริมาณช่องโพรงที่ลดลง กลุ่มไอออนในสารละลายที่มีผลมากที่สุดต่อการนำไฟฟ้า ได้แก่ K^+ Na^+ Ca^{2+} OH^- และ SO_4^{2-} OH^- Wei และคณะ [4] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัดช่วงต้นของซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดและความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (dilution effect) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ในช่วง 48 ชั่วโมงแรก นอกจากนี้มีรายงานว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น เถ้าลอย หรือ ซิลิกาฟูม หรือ ตะกรันเตาหลอมเหล็ก ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์ต่ำลง ในทางตรงข้ามทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ปกติ [5-7]



4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีขายทั่วไป ไมโครซิลิกาฟุ่มสำหรับงานก่อสร้างจากบริษัทเอลเคม (Elkem) ที่มีขายในประเทศไทย และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสามที่ได้จากการวิเคราะห์ XRF ดังแสดงในตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการวิจัยเป็นทรายแม่น้ำสะอาด ที่มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.53 และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 1.50

4.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ในการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มมีสัญลักษณ์เรียกชื่อดังแสดงในตารางที่ 2 เช่น OPC หมายถึง มอร์ตาร์ควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ 10SF หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย และ 10SF30FA หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย ร้อยละ 10 และร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ใช้เครื่องผสมด้วยพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเริ่มจากการผสมวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด ในสภาพแห้งด้วยความเร็วต่ำเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงเติมน้ำที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำ (superplasticizer) และผสมด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ซิลิกาฟุ่มกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงเติมมวลรวมละเอียดทั้งหมดและผสมต่อด้วยความเร็วปานกลางเป็นเวลา 2 นาที

ตารางที่ 1 : องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเถ้าลอย

Materials	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	M ₂ O	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Cement	70.4	15.9	3.79	3.71	0.75	4.22	0.43	0.18	2.00
Silica Fume	0.38	83.6	0.14	0.03	0.38	0.63	-	-	2.30
Fly Ash	23.4	33.1	18.3	13.7	1.77	4.62	2.84	1.04	2.10

ตารางที่ 2 : อัตราส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ (โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อัตราส่วนวัสดุประสาน			สารลดน้ำ (%)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	มวลรวมละเอียดต่อวัสดุประสาน (S/B)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟุ่ม	เถ้าลอย			
OPC	100	-	-	1.1	0.35	1.5
10SF	90	10	-	1.5	0.35	1.5
10SF10FA	80	10	10	1.4	0.35	1.5
10SF20FA	70	10	20	1.2	0.35	1.5
10SF30FA	60	10	30	1.1	0.35	1.5

หมายเหตุ: ร้อยละของ superplasticizer คิดเทียบกับน้ำหนักของวัสดุประสานรวม

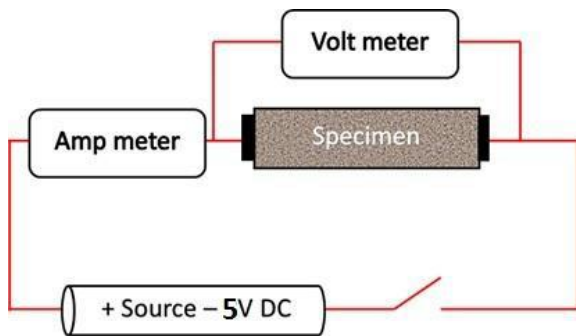
4.3 วิธีทดลอง

การวัดระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ใช้วิธีการวัดแรงต้านทานการกดทะลวงของหัวกด ตามมาตรฐาน ASTM C403 ซึ่งจุดก่อตัวต้น (initial setting) และจุดก่อตัวสุดท้าย (final setting) คือ จุดที่มอร์ตาร์มีความต้านทาน 500 ปอนด์ต่อ

ตารางนี้ และ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ซึ่งใช้ตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอายุทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัด ส่วนการตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ใช้เครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าและรูปภาพของชุดทดลองดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ โดยการปล่อยไฟฟ้าโดยตรงขนาด 5 โวลต์ ผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 40x40x80 มิลลิเมตร อย่างต่อเนื่อง โดยมีแผ่นอิเล็กโทรดทองแดงติดอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง ตั้งแต่ อายุ 0.5 ชั่วโมง ถึงอายุ 72 ชั่วโมง (3 วัน) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity, ρ) ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (2)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Volts) I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Amps) A คือ พื้นที่หน้าตัดแห่งตัวอย่าง (mm^2) L คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (mm)



รูปที่ 2 : วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3 : ชุดเครื่องมือทดลองความต้านทานไฟฟ้า

5. ผลและวิจารณ์

5.1 ระยะเวลาก่อตัว

ตารางที่ 3 แสดงระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของมอร์ตาร์ จากข้อมูลจะเห็นว่าระยะเวลาก่อตัวต้นของมอร์ตาร์ควบคุม (OPC) คือ 210 นาที เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 (10SF) ระยะเวลาก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 224 นาที และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 (10SF10FA 10SF20FA และ 10SF30FA) พบว่าระยะเวลาก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้น เป็น 236 237 และ 245 นาที ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของมอร์ตาร์ OPC คือ 312 นาที สำหรับมอร์ตาร์ 10SF พบว่าระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม คือ 305 นาที และเมื่อมีการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่าระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายจะเพิ่มขึ้น เป็น 307 313 และ 330 นาที ตามลำดับ โดยภาพรวมพอสรุปได้ว่าการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอยมีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม



ตารางที่ 3 : ระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอย

Specimens	Initial setting time (min)	Final setting time (min)
OPC	210	312
10SF	224	305
10SF10FA	236	307
10SF20FA	237	313
10SF30FA	245	330

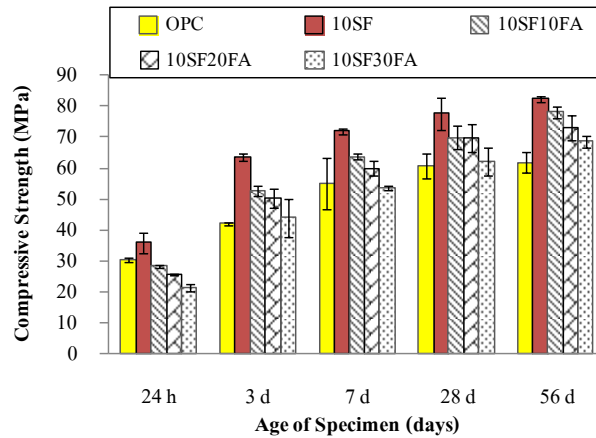
5.2 กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาที่อายุ 24 ชั่วโมง จะเห็นว่ามอร์ตาร์ 10SF ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (35.82 MPa) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 118.1 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม (OPC) เนื่องจากซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูง จึงสามารถแทรกปิดช่องโพรงได้ดีและทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว จึงทำให้มอร์ตาร์ 10SF มีความพรุนน้อยกว่ามอร์ตาร์ OPC ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า สำหรับมอร์ตาร์ 10SF10FA 10SF20FA และ 10SF30FA พบว่าให้ค่ากำลังอัดต่ำลงตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 93.1 84.0 และ 70.1 ของตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการปริมาณเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักในระบบลดลง และเถ้าลอยยังไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ภายใน 24 ชั่วโมงแรก ดังนั้นจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อายุทดสอบเพิ่มขึ้น เช่น ที่อายุ 56 วัน พบว่ามอร์ตาร์ 10SF ยังคงให้ค่ากำลังสูงสุด และมอร์ตาร์ 10SF10FA 10SF20FA และ 10SF30FA มีกำลังอัดเท่ากับ 78.1 73.1 และ 68.6 MPa คิดเป็นร้อยละ 126.4 118.2 และ 111 ของตัวอย่างควบคุม (OPC) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอย

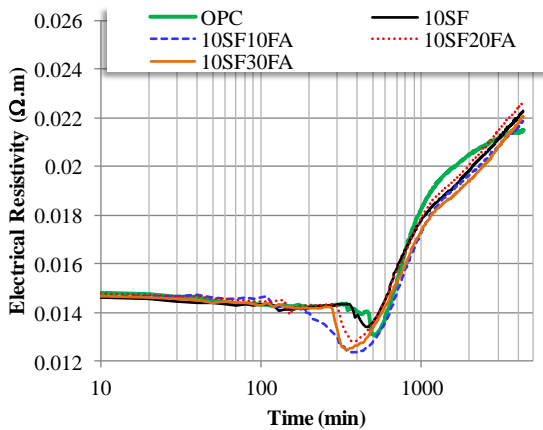
5.3 การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงเส้นกราฟการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ตาร์ทั้ง 5 กลุ่มตัวอย่าง จะเห็นว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ทุกกลุ่มมีการพัฒนาตามเวลา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดแบ่งระหว่าง 2 ช่วงนี้ คือจุดที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด (minimum point) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6

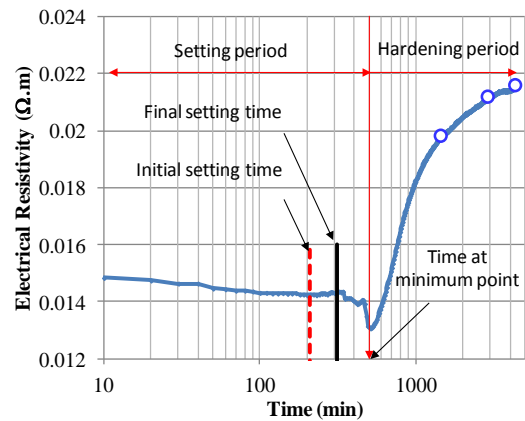
ช่วงก่อตัว (Setting period) ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างคงที่ ความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ (ρ_{sample}) จะถูกควบคุมโดยความต้านทานไฟฟ้าของสารละลาย ($\rho_{solution}$) ในช่องโพรงขนาดเล็ก กล่าวคือ เมื่อไอออนของ K^+ Na^+ Ca^{2+} OH^- และ SO_4^{2-} OH^- จากอนุภาคปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน แพร่เข้าสู่น้ำอย่างช้าๆ ทำให้ระดับความเข้มข้นรวมของไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น [3] แต่คาดว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นช้ามากในช่วงแรก ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายค่อนข้างคงที่ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้ารวมของซีเมนต์มอร์ตาร์จึงเปลี่ยนแปลงน้อยมาก นอกจากนี้พบว่าจุดก่อตัวต้นและจุดก่อตัวสุดท้ายของมอร์ตาร์ที่วัดตามมาตรฐาน ASTM C403 เกิดขึ้นในช่วงนี้ เมื่อระดับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายถึงจุดอิ่มตัว ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีค่าสูงสุด และความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์จะมีค่าลดลงถึงจุดต่ำสุด (Minimum point) เป็นที่น่าสังเกตว่ามอร์ตาร์แต่ละกลุ่มจะถึงจุดความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ณ เวลาแตกต่างกัน มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มใช้เวลาในการเกิดจุดต่ำสุดเร็วขึ้น สำหรับช่วงแข็งตัว (Hardening period) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่าสอดคล้องกับช่วงเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Acceleration period) ของปูนซีเมนต์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณน้ำและปริมาณช่องโพรงภายในมอร์ตาร์ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน นอกจากนี้พบว่าในช่วงนี้มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 4 : ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุต่างๆ



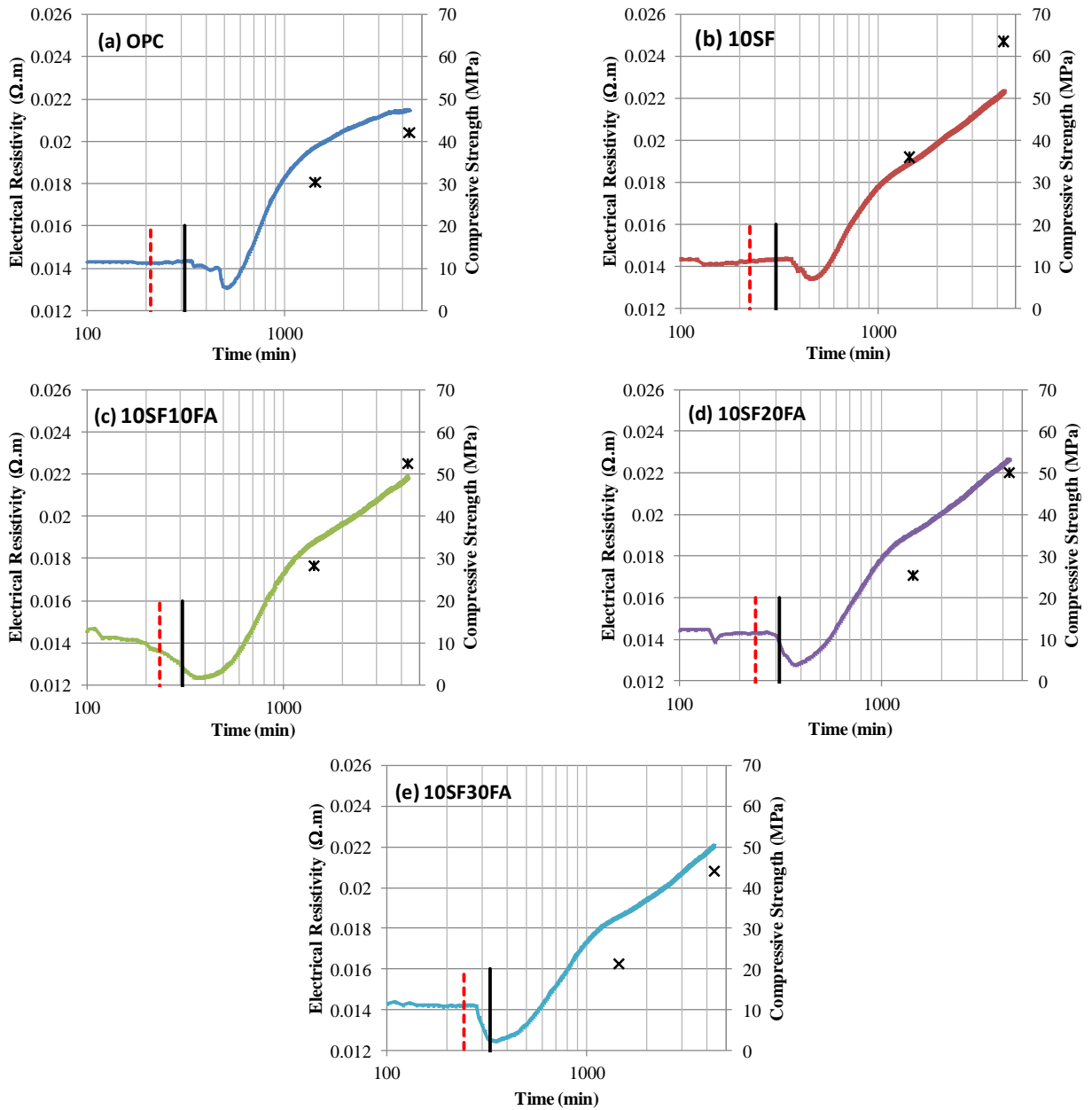
รูปที่ 5 : เปรียบเทียบการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์กลุ่มต่างๆ



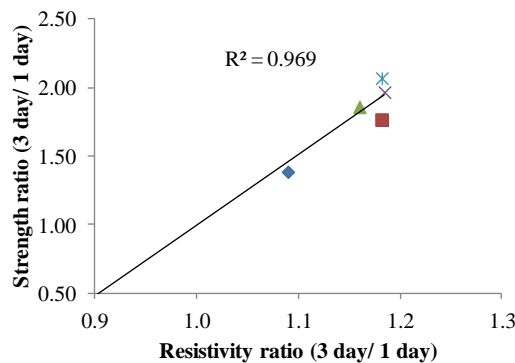
รูปที่ 6 : รูปแบบการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 7 เปรียบเทียบให้เห็นความสัมพันธ์ของการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้า การก่อตัว และการพัฒนากำลังรับแรงอัด ในช่วง 3 วันแรก จากรูปจะเห็นว่าโดยภาพรวมการก่อตัวของมอร์ตาร์ทุกกลุ่มเกิดขึ้นก่อนที่ความต้านทานไฟฟ้าจะถึงจุดต่ำสุด นอกจากนี้พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดระหว่าง 1 วัน ถึง 3 วัน (แสดงด้วยเครื่องหมาย *) มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าว รูปที่ 8 เป็นการนำอัตราส่วนความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน/1 วัน มาพล็อตกับอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน/ 1 วัน ของมอร์ตาร์แต่ละส่วนผสม ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน



รูปที่ 7 : เปรียบเทียบการพัฒนาความต้านทานไฟฟ้ากับจุดก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 1 วัน และ 3 วัน ของมอร์ตาร์



รูปที่ 8 : ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความต้านทานไฟฟ้าที่อายุ 3 วัน/1 วัน กับอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน/ 1 วัน



6. สรุปผล

- 1) การใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอยทำให้ได้มอร์ตาร์ที่มีระยะเวลาก่อตัวช้าลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม
- 2) การใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับซิลิกาฟูมเพียงอย่างเดียว (Binary binder) จะได้มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุดที่อายุทดสอบ แต่กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับซิลิกาฟูมและเถ้าลอย (Ternary binder) จะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมในช่วง 1 วันแรก แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กลุ่มนี้สามารถพัฒนาได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เมื่ออายุ 3 วัน เป็นต้นไป การนำวัสดุปอซโซลานทั้งสองมาใช้ร่วมกันจึงเป็นประโยชน์ต่อกำลังรับแรงอัดในระยะยาวและช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้อย่างมาก
- 3) การพัฒนาความต้านทานไฟฟ้าของมอร์ตาร์ทั้งหมดที่ศึกษา สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงก่อตัว (Setting period) ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าคงที่ และช่วงแข็งตัว (Hardening period) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดก่อตัวของมอร์ตาร์ที่วัดตาม ASTM C409 เกิดขึ้นในช่วงความต้านทานไฟฟ้าคงที่
- 4) การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในช่วง 1-3 วันแรก มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นตัวทำนายกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wei X., Xiao L., and Li Z., 2012, "Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement", Construction and Building Materials, 31, 341-346.
- [2] Bentz D. P., Snyder K. A., and Ahmed A., 2015, "Anticipating the Setting Time of High-Volume Fly Ash Concretes Using Electrical Measurements: Feasibility Studies Using Pastes", J. Mater. Civ. Eng., 27, 04014129-(1-6).
- [3] Wei X. and Li Z., 2006, "Early Hydration Process of Portland Cement Paste by Electrical Measurement", J. Mater. Civ. Eng., 18, 99-105.
- [4] Wei X., Xiao L., and Liao Y., 2010, "Early Age Properties of Cementitious Materials by Electrical Resistivity Measurement", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 25, 641-644.
- [5] El Enein, 1995, "Electrical conductivity of concrete containing silica fume", Cement and Concrete Research, 25, 1615-1620.
- [6] Topçu I. B., Uygunoglu T., Hocaoglu I., 2012, "Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures", Construction and Building Materials, 28, 414-420.
- [7] Wei X. and Li Z., 2005, "Study on hydration of Portland cement with fly ash using electrical measurement", Materials and Structures, 38, 411-417.