

นวัตกรรมวัสดุประสานด้วยการใช้ลู่ถ้วยไฟฟ้าและซิลิกาฟุ้ง

Innovation of Cementitious Material Using Ceramic Electrical Insulator and Silica Fume

อติวัฒน์ เวียงสาม (Atiwat Viengsam)* ดร.สำเริง รักษ์ซ้อน (Dr.Sumrerng Rukzon)^{1**}

(Received: June 6, 2024; Revised: August 7, 2024; Accepted: August 26, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดของซิลิกาฟุ้ง (SF) และลู่ถ้วยไฟฟ้า (CE) มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมใช้ SF ปริมาณคงที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จากนั้น ใช้ CE ผสมรวมกับ SF ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.50 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) เพื่อควบคุมการทำงานได้และการไหลแผ่ ผลการทดสอบพบว่า การใช้ CE ในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ผสมรวมกับ SF แทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (CT) และมอร์ตาร์ที่ใช้ SF เพียงอย่างเดียว การใช้ลู่ถ้วยไฟฟ้าสามารถใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับผลิตมอร์ตาร์ได้ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือการลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง ลดภาระในการกำจัดทิ้ง และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

This research presents a study of the compressive strength of mortar in ternary blend materials system of silica fume (SF) and ground ceramic electrical insulator (CE). The mortar mix proportions with constant 10% of SF as a partial cement replacement was used. Then, the use of CE in amounts of 5, 10, 15, and 20% mixed with SF as a partial replacement of cement by weight of the cementitious material. Water to binder ratio (W/B) with constant of 0.50 was used. Superplasticizer (SP) was used to improve the workability of mortar. Test results found that the use of CE in amounts of 5, 10, 15, and 20% mixed with SF as a partial replacement of cement by weight of the cementitious material resulted in higher compressive strength when compared to control mortar (CT), as well as mortar mixed with SF in amounts of 10% by weight of the cementitious material. The ground ceramic electrical insulator can be used as a cementitious material. The results of this research are a reduction in the amount of waste materials, reduce the burden of disposal and reduce environmental problems.

คำสำคัญ: วัสดุประสาน ลู่ถ้วยไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง

Keywords: Cementitious material, Ceramic electrical insulator, Silica fume

¹Corresponding author: sumrerng.ruk@rmutr.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Students, Master of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Associate Professor, Department of civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

บทนำ

ในการผลิตไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น ด้านอุตสาหกรรม อาคารสาธารณะ บ้านพักอาศัย เป็นต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อใช้กับอุปกรณ์ เครื่องจักรไฟฟ้า และระบบการส่องสว่างต่างๆ หรืออุปกรณ์อื่น วัสดุที่สำคัญในการกระบวนการจ่ายไฟฟ้าคือลู่กักไฟฟ้า ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าอาจมีลู่กักไฟฟ้าบางส่วนเกิดความเสียหายจากการผลิตและบางส่วนหมดอายุการใช้งานส่งผลให้มีลู่กักไฟฟ้าเป็นวัสดุเหลือทิ้งและไม่ได้ใช้ประโยชน์และกองทิ้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียง และสิ้นเปลืองพื้นที่กองทิ้ง

มอร์ตาร์ ประกอบด้วยส่วนผสมคือ ปูนซีเมนต์ หินทราย และน้ำ มอร์ตาร์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมหรือใช้งานอื่นๆ ตามความเหมาะสมของวัตถุประสงค์การใช้งาน ปัจจุบันนักวิจัยพยายามศึกษาเพื่อนำวัสดุมาทดแทนส่วนผสมของมอร์ตาร์ เช่น การใช้วัสดุพอลิโพรไพลีนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน วัสดุพอลิโพรไพลีนที่นิยมศึกษาได้แก่ แก้วฉนวนหิน และ ซิลิกาฟุ้ง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีวัสดุพอลิโพรไพลีนอีกจำนวนมากที่ควรศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการใช้ประโยชน์ทางด้านวัสดุวิศวกรรม

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) สามารถนำไปแทนที่บางส่วน of ปูนซีเมนต์เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ขนาดอนุภาคที่เล็กของซิลิกาฟุ้งจึงสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการการแทรกซึมสารเคมีภายในเนื้อคอนกรีตได้ดี [1-2] นอกจากนี้ ซิลิกาฟุ้งมีปริมาณของซิลิกาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาพอลิโพรไพลีนเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาพอลิโพรไพลีนส่งผลให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้ดี [3-5]

ซิลิกาและอะลูมินา (SiO_2 และ Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุพอลิโพรไพลีน [1-8] เมื่อพิจารณาองค์ประกอบหลักทางเคมีดังกล่าวนี้ จึงได้นำลู่กักไฟฟ้าเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรไพลีนสำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ดังนั้นในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ลู่กักไฟฟ้าที่เหลือทิ้งมาบดละเอียดใช้ผสมรวมกับซิลิกาฟุ้งสำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในระบบวัสดุประสานสามชนิด ส่งผลให้ลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง ลดพื้นที่กำจัดทิ้ง สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้ง และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลัังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ลู่กักไฟฟ้าบดละเอียดรวมกับซิลิกาฟุ้งสำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 บางส่วนในระบบวัสดุประสานสามชนิด

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้วัสดุประสานเป็น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (CT) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 ใช้ซิลิกาฟุ้งสำหรับงานผสมคอนกรีต (SF) มีปริมาณสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 [9] เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้ลู่กักไฟฟ้าเหลือทิ้งจากสถานีไฟฟ้าแรงสูง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี ของประเทศไทย โดยบดลู่กักไฟฟ้า (CE) ให้มีความละเอียดให้มีปริมาณสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 [9] เท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความละเอียดปานกลาง

งานวิจัยนี้ใช้ทรายเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด โดยเป็นทรายแม่น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58 มีขนาดมอดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.85 และมีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM [10-11] การศึกษานี้ควบคุม

ความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์ [12] ปรับค่าการไหลผ่าน โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) ในภาพที่ 1 และ 2 แสดงลูกถ้วยไฟฟ้าที่ชำรุดและบดละเอียด ซึ่งเมื่อบดลูกถ้วยไฟฟ้าพบว่ามีรูปร่างลักษณะเป็นผงคล้ายกับปูนซีเมนต์



ภาพที่ 1 ลูกถ้วยไฟฟ้าที่ชำรุด



ภาพที่ 2 ลูกถ้วยไฟฟ้าบด

2. ส่วนผสมของมอร์ตาร์และการบ่ม

วัสดุประสานงานวิจัยนี้ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) ซิลิกาฟูม (SF) และลูกถ้วยไฟฟ้าบดละเอียด (CE) ส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 ใช้ซิลิกาฟูม (SF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การศึกษานี้ใช้ซิลิกาฟูม (SF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 คงที่ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เนื่องจากต้องการพิจารณาหาปริมาณที่เหมาะสมจึงเปลี่ยนแปลงปริมาณของลูกถ้วยไฟฟ้าที่แตกต่างกันเพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษา นอกจากนั้นการศึกษานี้ใช้ SF ผสมรวมกับ CE เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยพิจารณาเป็นระบบวัสดุประสานสามชนิด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้ค่าคงที่เท่ากับ 0.50 การทดสอบครั้งนี้ใช้ CE ปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่าการไหลผ่านและความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมมอร์ตาร์ให้มีค่าการไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 105-115 ตามมาตรฐาน ASTM C230 [12]

นำส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่หล่อไว้ในแบบหล่อ ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องได้โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 3 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบและบ่มจนครบอายุการทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัด ที่อายุ 7 และ 28 วัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุประสานในระบบวัสดุประสานสามชนิด ส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิด

Mix	Mix Proportions (% by Weight)						
	W/B	Cement	Sand	CE	SF	SP	Flow (%)
CT	0.50	100	275	-	-	0.26	112
10%SF	0.50	90	275	-	10	0.43	108
10%SF5%CE	0.50	85	275	5	10	0.40	108
10%SF10%CE	0.50	80	275	10	10	0.43	113
10%SF15%CE	0.50	75	275	15	10	0.44	108
10%SF20%CE	0.50	70	275	20	10	0.44	109
10%SF30%CE	0.50	60	275	30	10	0.45	110

สัญลักษณ์: CT คือ มอร์ตาร์ควบคุม, Cement คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1, SF คือ ซิลิกาฟูม, CE คือ ลูกถ้วยไฟฟ้าบดละเอียด และ SP คือ สารลดน้ำพิเศษ, xx%SF+xx%CE โดยที่ xx คือ ร้อยละปริมาณการแทนที่ด้วย SF และ CE

3. การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] กล่าวคือ ใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร เมื่อหล่อส่วนผสมของมอร์ตาร์ในแบบหล่อให้ถึงไว้ที่ห้องอุณหภูมิปกติที่ 25 ± 3 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นแกะแบบและบ่มตัวอย่างในน้ำสะอาด เมื่อครบอายุที่ 7 และ 28 วัน นำไปทดสอบกำลังอัดโดยใช้ก้อนตัวอย่างการทดสอบมอร์ตาร์จำนวน 6 ก้อน เพื่าคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังอัด ในภาพที่ 3 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ 3 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ CT CE และ SF ให้ไว้ตารางที่ 2 พบว่า เมื่อบดลูกถ้วยไฟฟ้าให้มีความละเอียดมีปริมาณสัดส่วนค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีค่าความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 2.91 และ 20,000 ซม.²/กรัม [14] ตามลำดับ ส่วนซิลิกาฟูมขนาดเดิมมีความละเอียดมีปริมาณสัดส่วนค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.22 ขณะที่ปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 3.14 และ 3,400 ซม.²/กรัม การพัฒนาลูกถ้วยเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานหรือวัสดุปูโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ต้องพิจารณาถึงผลของความละเอียดเป็นสำคัญ เนื่องจาก

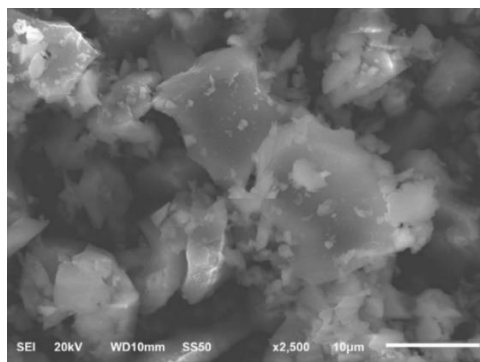
ความละเอียดของวัสดุพอลิโซลันส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิโซลัน งานวิจัยนี้พบว่าเมื่อปลดปล่อยให้ความละเอียดความถี่เฉพาะและพื้นที่ผิวเฉพาะมีค่าสูงขึ้น คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [4, 15] ในตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย SEM-EDS พบว่า ซิลิกาฟุ้ง มี SiO_2 เท่ากับร้อยละ 56.0 และมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.6 ส่วนลูกถ้วยไฟฟ้า CE มีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 70.2 และมีค่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 80.3 ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพิจารณาการใช้งานขององค์ประกอบหลักดังกล่าวเพื่อพัฒนาปฏิกิริยาพอลิโซลันเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเมื่อใช้ SF และ CE แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อพัฒนาต้านการกัดสำหรับการใช้งานมอร์ตาร์ ภาพที่ 4 แสดงภาพขยายกำลังสูง (SEM photograph) ของลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อย ซึ่งพบว่า ลูกถ้วยไฟฟ้าที่ผ่านการปลดปล่อยและมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ภาพที่ 5 แสดง SEM ของ CT ส่วนใน ภาพที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อยด้วย XRD pattern (X-ray diffraction) พบว่าองค์ประกอบหลักของลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อยเป็นซิลิกา (SiO_2)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 CE และ SF

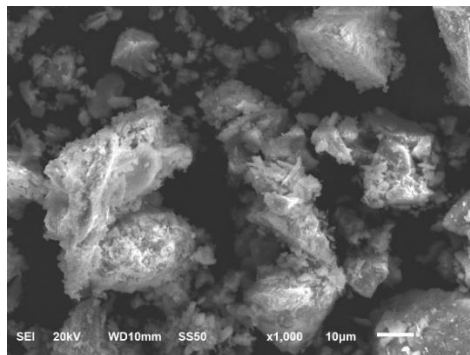
สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	ลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อย	ซิลิกาฟุ้ง
		CE	SF
ค่าตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 (%)	N/A	15	5-10
ความถี่เฉพาะ (S.G.)	3.14	2.91	2.22
พื้นที่ผิวเฉพาะโดย Blaine Fineness (cm^2/gram)	3,400	20,000	-

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 CE และ SF

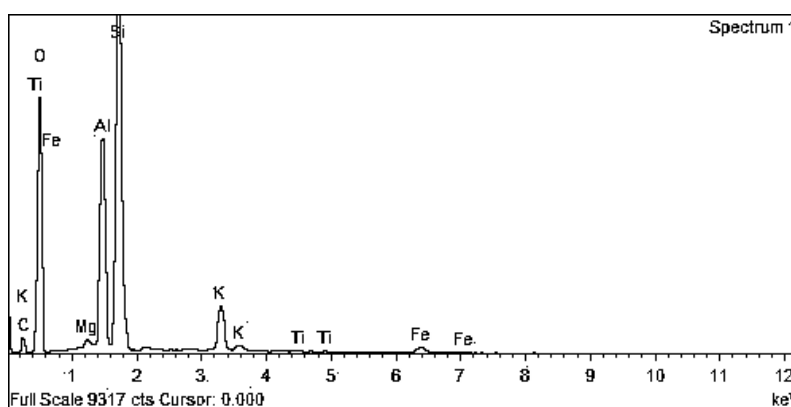
Oxides	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	ลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อย	ซิลิกาฟุ้ง
		CE	SF
SiO_2	7	70.2	93.0
Al_2O_3	15	8.8	0.4
Fe_2O_3	17	1.3	1.5
CaO	54	11.5	0.8
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	80.3	94.9



ภาพที่ 4 SEM photograph ของลูกถ้วยไฟฟ้าปลดปล่อย (CE)



ภาพที่ 5 SEM photograph ของ CT



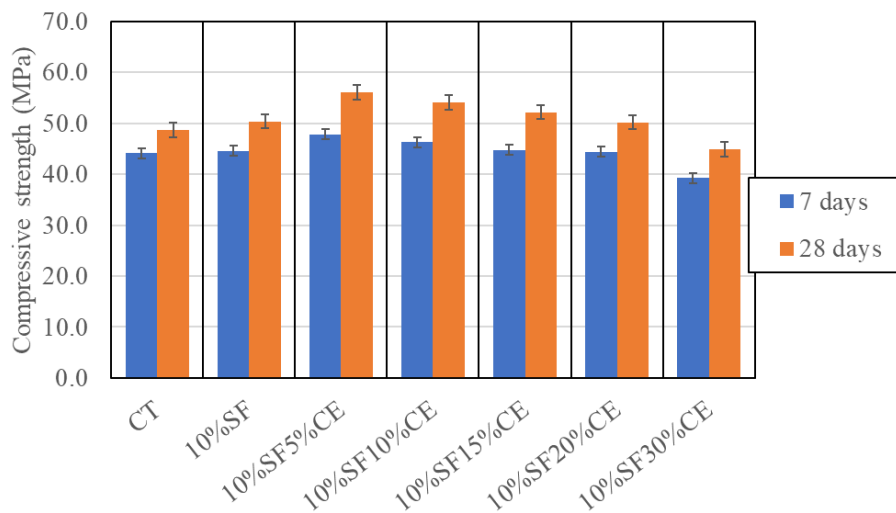
ภาพที่ 6 XRD patterns of CE

2. ผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์

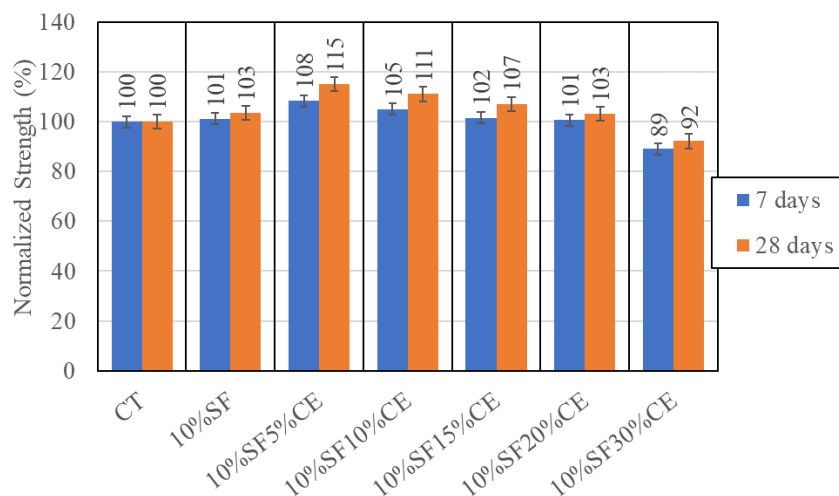
ในตารางที่ 3 พบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ ส่งผลให้มอร์ตาร์ต้องการน้ำมากขึ้นในการเคลือบผิวหน้า [8, 16] เมื่อใช้ลูกถ้วยไฟฟ้าบดละเอียดผสมรวมกับซิลิกาฟุ่มส่งผลให้ความต้องการสารลดน้ำพิเศษเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และมอร์ตาร์มีแนวโน้มต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ของลูกถ้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมากของซิลิกาฟุ่มและลูกถ้วยไฟฟ้าบดละเอียดตามสมบัติทางกายภาพที่แสดงไว้ในตารางที่ 2

กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงไว้ในภาพที่ 7-10 ผลการทดสอบ พบว่า มอร์ตาร์มีการพัฒนา กำลังอัดขึ้นตามอายุการทดสอบ กล่าวคือ ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุการทดสอบที่ 7 วัน เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3-4, 8, 14, 16] ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเล็กน้อย โดยมีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 101-103 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ขนาดอนุภาคที่เล็กมากและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมากของซิลิกาฟุ่มจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมากและขนาดอนุภาคสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น [3-4, 8, 14, 16] มอร์ตาร์ที่อายุการทดสอบที่ 7 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยซิลิกาฟุ่มสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่า ที่อายุต้นกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีค่ากำลังอัดสูงเนื่องจากการใช้ซิลิกาฟุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซ

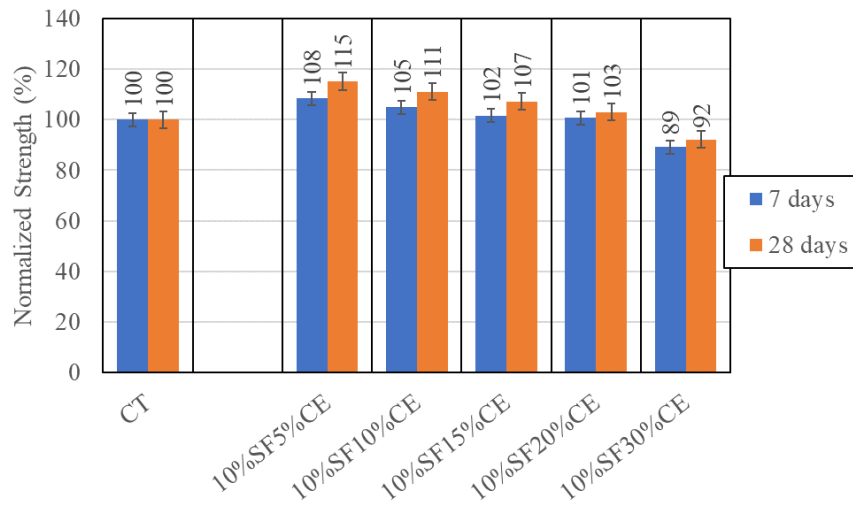
ลานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [15] เมื่อพิจารณาการใช้ระบบวัสดุประสานสามชนิด พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ร้อยละ 10 ผสมรวมกับลูกถ้วยไฟฟ้าบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว การใช้ลูกถ้วยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 101-115 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากผลของการเกาะหนึ่กันของวัสดุทั้งสามชนิด [17-20] ที่อายุ 7 และ 28 วัน มอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดมีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 89-115 ของ CT และที่อายุ 7 และ 28 วัน มอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดมีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 88-111 ของ 10%SF อย่างไรก็ตาม การใช้ CE ในปริมาณร้อยละ 5 มีความเหมาะสมที่ขนาดอนุภาคสามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงได้ดี ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณของ CE มากขึ้น กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอาจเกิดการขัดตัวกันของขนาดอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม จึงส่งผลให้ความพรุนเกิดขึ้นได้



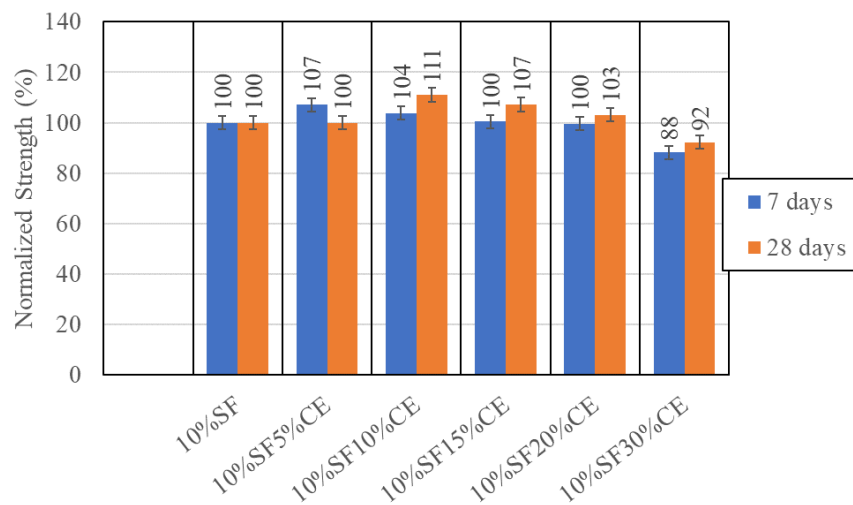
ภาพที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน



ภาพที่ 8 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ทุกส่วนผสมเทียบกับ CT



ภาพที่ 9 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วันของมอร์ตาร์ระบบวัสดุสามชนิดเทียบกับ CT



ภาพที่ 10 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วันของมอร์ตาร์ระบบวัสดุสามชนิดเทียบกับ 10%SF

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนานวัตกรรมจากของเหลือทิ้งเพื่อใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้ พบว่า เมื่อบดลูกถ้วยไฟฟ้าให้มีความละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุประสานหรือวัสดุปอซโซลานผสมรวมกับซีเมนต์และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ เนื่องจากมอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์หรือซีเมนต์เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว กล่าวคือ พบว่าที่อายุ 7 และ 28 วัน กำลังอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 39.3-56.1 MPa ซึ่งสามารถใช้กับงานก่อสร้างทั่วไปได้ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าที่อายุ 7 และ 28 วัน มอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดมีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 89-115 ของ CT ดังนั้น การสร้างนวัตกรรมในระบบวัสดุประสานสามชนิดสามารถใช้ประโยชน์ได้จริงในด้านการพัฒนากำลังอัดส่งผลให้เกิด

การแข่งขันในด้านอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ ลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม อาจมีการศึกษาเพิ่มถึงสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม งานวิจัยนี้สามารถสร้างรายได้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างให้กับชุมชนได้เนื่องจากลูกถ้วยไฟฟ้าที่เกิดการชำรุดไม่ได้ใช้ประโยชน์และมีอยู่ในประเทศ การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์เป็นสร้างมูลค่าของเหลือทิ้ง เพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้ เป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ให้กับอุตสาหกรรมของประเทศได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแผนปฏิบัติการด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน. 66 FRB6612/2566) ที่สนับสนุนทุนวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการ ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Ahmad S, Omar S, Al-Amoudi B, Khan MS, Maslehuddin M. Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. Case Studies in Construction Materials 2022;17:e01255.
2. Mardani-Aghabaglou A, Inan Sezer G, Ramyar K. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. Construction and Building Materials 2014;70(15):17–25.
3. Posi P, Kasemsiri P, Lertnimoolchai P, Chindaprasirt P. Effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strengths of high strength-high volume fly ash jointing mortar. International Journal of GEOMATE 2019;16(54):36–41.
4. Rukzon S, Chindaprasirt P, Mahachai R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 2009;16(2):242–7.
5. Chindaprasirt P, Sujumnongtokul P, Posi P. Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash. Materials Today: Proceedings 2019;17:1612–6.
6. Li L, Yin Q, Cao M, Li W. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. Journal of Cleaner Production 2020;259:120853.
7. Pereira VM, Gomes RH, Barbosa R, Camarini G. Porcelain waste from electrical insulators in self-leveling mortar: Materials characterization and properties. Journal of Building Engineering 2022;in press.
8. Narkpradit S, Rukzon S. Durability of mortar containing original fly ash and ground ceramic electrical insulator in ternary blend cementitious system. KKU Research Journal (Graduate Studies) 2023;23(4):109–19.
9. ASTM C430. Standard Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45 μm (No. 325) Sieve. ASTM Standard 2005;04.01:242–4.

10. ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards 2005;04.02:10–20.
11. ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standards 2005;04.02:88–92.
12. ASTM C230. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards 2005;04.01:206–11.
13. ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards 2005;04.01:76–81.
14. ASTM C204. Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards 2005;04.01:186–93.
15. Rukzon S, Chindapasirt P. Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2010;22(3):253–9.
16. Hassan KE, Cabrera JG, Maliehe RS. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites* 2000;22:267–71.
17. Rukzon S, Chindapasirt P. Strength, chloride penetration and corrosion resistance of ternary blends of portland cement self-compacting concrete containing bagasse ash and rice husk-bark ash. *Chiang Mai Journal of Science* 2018;5(4):1863–74.
18. Chindapasirt P, Rukzon S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Construction and Building Materials* 2008;22(8):1601–6.
19. Rukzon S, Chindapasirt P. Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar. *Computers and Concrete* 2008;5(1):75–88.
20. Rukzon S, Chindapasirt P. Use of ternary blend of Portland cement and two pozzolans to improve durability of high-strength concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2014;18(6):1745–52.