



กำลังอัด ความพรุนและความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้า

Compressive Strength, Porosity and Water Absorption of Mortar Containing Ceramic Electrical Insulator Powder

สุวรรณณี เหล่าปัญญา¹, และวีระ หอสกุลไพ¹ *

Suwannee Laopanya¹ and Veera Horsakulthai¹ *

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Correspondent author: veehor@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ลูกถ้วยไฟฟ้าเหลือทิ้ง เป็นฉนวนไฟฟ้าเซรามิกที่ชำรุดจากขั้นตอนการผลิต และการขนส่ง หรือหมดอายุการใช้งานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งมีปริมาณมากเป็นปัญหาในการกำจัดและหาพื้นที่ในการจัดเก็บ จึงได้นำมาศึกษาความเป็นไปได้ในการนำลูกถ้วยไฟฟ้าบดให้เป็นผงละเอียดเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีต ในการศึกษาได้วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี ความละเอียดของผงลูกถ้วยไฟฟ้า และทดสอบความต้องการน้ำ กำลังอัด ดัชนีกำลัง ความพรุน และสัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้า โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน ควบคุมค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ร้อยละ 105 ถึง 115 จากผลการทดสอบพบว่าผงลูกถ้วยไฟฟ้าสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ในอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 30 ความพรุนของมอร์ตาร์ผสมผงถ้วยไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่สัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงลูกถ้วยไฟฟ้าในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

Abstract

Ceramic electrical insulator waste from cracking in manufacture and transport or expiration in undertaking of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) is a problem to dispose and to find the storage area. This waste is piling up every year therefore to study the feasibility of utilization of finely ground ceramic electrical insulator as a pozzolan in concrete mixture. In this study, chemical composition and fineness of ceramic electrical insulator powder, water requirement, compressive strength, strength activity index, porosity and coefficient of absorption were investigated. The mortar containing 10, 20, 30 and 40% ceramic electrical insulator powder by partial cement replacement was used to compare with plain mortar controlling similar flow of 110 ± 5 %. The results indicated that the ceramic electrical insulator powder could be used as a pozzolan by replacing cement up

to 30% by weight of binder. The incorporation of ceramic electrical insulator powder had increased the porosity of mortar whereas the coefficient of water absorption decreased with the increased ceramic electrical insulator powder replacement.

คำสำคัญ: ลูกถ้วยไฟฟ้า ปอซโซลาน กำลังอัด ความพรุน ความดูดซึมน้ำ

Keywords: ceramic electrical insulator, pozzolan, compressive strength, porosity, water absorption

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งเป็นส่วนของเครื่องใช้และอุปกรณ์ที่รองรับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เช่น วัสดุทนไฟ กระเบื้อง เครื่องสุขภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์ตกแต่งบ้านและสวน อุปกรณ์ไฟฟ้าแม้กระทั่งใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าอีโกลายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเรียกว่า ลูกถ้วยไฟฟ้า สำหรับมูลค่าการส่งออกเซรามิกของไทยมีมูลค่าราว 40,000 ล้านบาทต่อปี ส่วนลูกถ้วยไฟฟ้าส่งออกมีมูลค่าราว 1,200 ล้านบาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 3 ของมูลค่าการส่งออกเซรามิกทั้งหมด (1) อุตสาหกรรมลูกถ้วยไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยก็เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อใช้ในกิจการสาธารณูปโภคด้านไฟฟ้าและพลังงานเป็นหลัก ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 90 ของกำลังการผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือร้อยละ 10 ส่งออกต่างประเทศ รวมกำลังการผลิตลูกถ้วยไฟฟ้าทั้งหมดราว 12,000 ตัน/ปี (1,2)

เนื่องจากการผลิตลูกถ้วยไฟฟ้าต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงที่มีความเข้มข้น เพื่อให้ได้ลูกถ้วยไฟฟ้าที่มีความแข็งแรง มีความทึบสูง ทนทานต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สีที่เคลือบมีความทนทานสูง และมีรูปลักษณะที่สวยงาม จึงมักก่อให้เกิดความชำรุดเสียหายในขั้นตอนการผลิต อันเนื่องมาจากสีของผลิตภัณฑ์ที่ผิดเพี้ยน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการเผาและการขนส่ง มีสิ่งแปลกปลอมเจือปนทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งความเสียหายดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 30 ของปริมาณการผลิต (3) ซึ่งความชำรุดเสียหายมีปริมาณสูงถึง 5,000 ตัน/ปี ประกอบกับการขยายธุรกิจอุตสาหกรรมในประเทศมีความรุดหน้ามากขึ้น จึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมตามไปด้วย ทางกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

(กฟผ.) จึงต้องมีการขยายแหล่งพลังงานเพื่อรองรับในภาคอุตสาหกรรมดังกล่าว จึงต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า ปรับเปลี่ยนเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงและเพิ่มแหล่งการส่งจ่าย จึงทำให้ต้องใช้ลูกถ้วยไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในการติดตั้งใหม่และปรับเปลี่ยนของเดิม ลูกถ้วยไฟฟ้าที่เลิกใช้จึงมีจำนวนมาก สร้างปัญหาในการจัดเก็บและทำลาย เนื่องจากลูกถ้วยไฟฟ้ามีความแข็ง และต้องใช้พื้นที่มาก และมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี ในเบื้องต้นทาง กฟผ. นำไปทิ้งทะเลเพื่อทำปะการังเทียม

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตลูกถ้วยไฟฟ้าประกอบด้วย ดินขาว (kaolin or china clay) ที่มีซิลิกาและอะลูมินา (SiO_2 and Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก หินฟันม้า (feldspar) ที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในปริมาณค่อนข้างมากและมีโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์ (Na_2O and K_2O) ในปริมาณที่รองลงมา และหินควอร์ต (quartz) ที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก บดหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,250–1,280 องศาเซลเซียส (4,5) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบหลักทางเคมีของลูกถ้วยไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เป็นหลัก นับว่าเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (6)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งลูกถ้วยไฟฟ้ามาละเอียดเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนผสมในคอนกรีต โดยการศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมี ดัชนีกำลัง (strength activity index) กำลังอัด ความพรุน และความดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งลูกถ้วยไฟฟ้านำมารีไซเคิล (recycle) ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 ลูกถ้วยไฟฟ้า

ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นฉนวนไฟฟ้าใช้ยึดโยงสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เลิกใช้เหลือทิ้งจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 1 ก นำมาถอดเหล็กสลักดังแสดงในรูปที่ 1 ข จากนั้นนำไปย่อยเบื้องต้นโดยทุบด้วยฆ้อนให้มีขนาดประมาณ 40 มม. และนำไปย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องทดสอบการสีกกร่อนลอสเองเจลีส

(Los Angeles machine) ดังแสดงในรูปที่ 1 ค และ 1 ง ตามลำดับ ท้ายสุดนำลูกถ้วยไฟฟ้าย่อยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 (ช่องเปิด 1.18 มม.) แล้วนำไปบดในหม้อบดแบบบอล (ball mill) จนกระทั่งได้ขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 ไมครอน) น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังแสดงในรูปที่ 2

ผงลูกถ้วยไฟฟ้า นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence) ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



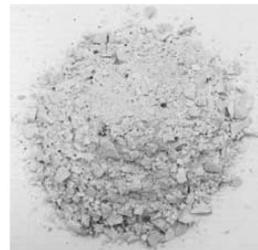
(ก) ลูกถ้วยไฟฟ้าดั้งเดิม



(ข) ถอดเหล็กสลัก



(ค) ย่อยให้มีขนาดประมาณ 40 มม.



(ง) บดให้มีขนาดเท่าเม็ดทราย

รูปที่ 1. ลำดับการย่อยลูกถ้วยไฟฟ้า



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

(ข) ผงลูกถ้วยไฟฟ้า

รูปที่ 2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงลูกถ้วยไฟฟ้า

2.1.2 ทฤษฎี

ทฤษฎีแม่เนื้อธรรมชาติ จากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.57 ค่าโมดูลัสความละเอียด 2.90 และความสามารถดูดซึมน้ำร้อยละ 0.70

2.1.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 (7) มีความถ่วงจำเพาะ 3.15

2.2 ปฏิภาคส่วนผสมของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + ผงลูกถ้วยไฟฟ้า) ต่อทรายเป็น 1:2.75 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงลูกถ้วยไฟฟ้าในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ควบคุมการไหลแผลร้อยละ 105 – 115 โดยปรับปริมาณน้ำแต่ปริมาณวัสดุประสานยังคงเดิม มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ล้วนเป็นมอร์ตาร์ควบคุม แทนสัญลักษณ์ด้วย PC ส่วนมอร์ตาร์ที่มีผงลูกถ้วยไฟฟ้ายร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 แทนสัญลักษณ์ด้วย 10CP, 20CP, 30CP และ 40CP ตามลำดับ

2.3 การหล่อและการบ่มมอร์ตาร์

หล่อมอร์ตาร์ในแบบหล่อขนาด 50 x 50 x 50 มม. ทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนกระทั่งถึงเวลาทดสอบ การหล่อและการบ่มมอร์ตาร์ทำตามมาตรฐาน ASTM C109 (8)

2.4 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัด ใช้มอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ที่เตรียมไว้ทำการทดสอบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้นต่ออายุการทดสอบ ในการรายงานผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C109

2.5 การทดสอบความพรุน

ทดสอบความพรุนใช้วิธีความพรุนอิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพสุญญากาศ (saturated vacuum porosity) โดยใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ที่เตรียมไว้ทำการทดสอบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน โดยนำชิ้นตัวอย่างใส่ในหม้อสุญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนกระทั่งท่วมชิ้นตัวอย่างแล้วทำการอัด

ความดันในสภาพสุญญากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงปลดปล่อยความดันในสภาพสุญญากาศออกและทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (W_s) จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำ (W_u) และนำชิ้นตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำออกมาจากเตาอบทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักในอากาศ จากนั้นนำเข้าเตาอบอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงนำชิ้นตัวอย่างออกจากเตาอบทิ้งไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้จะต้องต่างจากที่ชั่งก่อนหน้าไม่เกินร้อยละ 0.5 (W_d) ถ้าน้ำหนักเกินให้ทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักที่ชั่งได้ไม่เกินร้อยละ 0.5 ความพรุนอิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพสุญญากาศ (ρ) คำนวณหาได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = \left(\frac{W_s - W_d}{W_s - W_w} \right) \times 100 \tag{1}$$

เมื่อ ρ = ความพรุนอิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพสุญญากาศ (ร้อยละ)

W_s = น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (กรัม)

W_w = น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในน้ำ (กรัม)

W_d = น้ำหนักอบแห้งชั่งในอากาศ (กรัม)

2.6 การทดสอบความดูดซึมน้ำ

มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ที่เตรียมไว้ทำการทดสอบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน นำชิ้นตัวอย่างไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (3,600 วินาที) แล้วนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดผิวให้แห้งชั่งน้ำหนัก และวัดขนาด นำข้อมูลที่ได้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำตามสมการที่ (2) (9,10)

$$K_a = \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \times \frac{1}{t} \tag{2}$$

เมื่อ K_a = สัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำ (ซม²/วินาที)

Q = ปริมาณน้ำที่ซึมตัวอย่างแห้งดูดซึมในเวลา 3,600 วินาที (ซม³)

$$A = \text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของชิ้นตัวอย่าง (ซม}^2\text{)}$$

$$t = \text{เวลาทดสอบ 3,600 วินาที}$$

3. ผลการทดสอบและอภิปราย

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงลูกถ้วยไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (OPC) และผงลูกถ้วยไฟฟ้า (CP) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าผงลูกถ้วยไฟฟ้ามีออกไซด์หลักประกอบด้วย SiO₂ ร้อยละ 68.54, Al₂O₃ ร้อยละ 24.29 และ Fe₂O₃ ร้อยละ 2.32 ซึ่งคิดเป็นปริมาณผลรวมของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ได้ร้อยละ 95.15 ปริมาณออกไซด์ของธาตุซัลเฟอร์ (SO₃) ร้อยละ 0.02 และการสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 0.07 ความละเอียดของผงลูกถ้วยไฟฟ้า เมื่อร่อนเปียกมีขนาด

อนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 ไมครอน) ร้อยละ 2.60 เมื่อพิจารณาว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตลูกถ้วยไฟฟ้าประกอบด้วยดินขาว (kaolin) หินฟันม้า (feldspar) และหินควอทซ์ (Quartz) ซึ่งเป็นดินเหนียวและหินจากธรรมชาติที่บดรวมและผ่านการเผา ประกอบกับผลรวมของปริมาณ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณออกไซด์ของธาตุซัลเฟอร์ (SO₃) น้อยกว่าร้อยละ 4 การสูญเสียเนื่องจากการเผา น้อยกว่าร้อยละ 10 และขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 เมื่อนำคุณสมบัติดังกล่าวของผงลูกถ้วยไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-12 (6) พบว่าผงลูกถ้วยไฟฟ้าจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุปอซโซลาน Class N แต่ทั้งนี้ปริมาณที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ต้องพิจารณาค่าดัชนีการพัฒนาดำรงและความต้องการน้ำก่อนที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

ตารางที่ 1. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ (PC) และผงลูกถ้วยไฟฟ้า (CP)

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	PC	CP
SiO ₂	19.50	68.54
Al ₂ O ₃	5.06	24.29
Fe ₂ O ₃	3.18	2.32
CaO	66.29	0.51
MgO	0.77	0.22
Na ₂ O	0	1.03
K ₂ O	0.30	2.42
P ₂ O ₅	0.07	0.02
SO ₃	2.31	0.02
อื่นๆ	0.24	0.56
LOI	2.28	0.07
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.57
ความละเอียด		
ร่อนเปียกข้างตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 ไมครอน) ร้อยละ	ไม่ได้ทดสอบ	2.6

3.2 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

การไหลแผ่และความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อควบคุมการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1437 (11) มอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้ามี่มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสม 10CP, 20CP, 30CP และ 40CP มีความต้องการน้ำร้อยละ 102, 106, 107 และ 109 ทำให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.55, 0.57, 0.58 และ 0.59 ตามลำดับ ทุกส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้ามี่มีความต้องการน้ำ น้อยกว่าร้อยละ 115 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดของวัสดุปอชโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618-12 (6)

3.3 กำลังอัดและดัชนีการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์

กำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (PC) แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยที่กำลังอัดของ PC มีค่า 41.1, 51.8 และ 59.1 MPa ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงการพัฒนากำลังของ 10CP, 20CP, 30CP และ 40CP มีค่าร้อยละ 94, 81, 67 และ 54 ที่อายุ 7 วัน และร้อยละ 96, 82, 75 และ 64 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่ามอร์ตาร์ 10CP และ 20CP ที่อายุ 28 วัน มีค่าร้อยละกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากอายุ 7 วัน ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากที่อายุ 7 วัน อาจเกิดจากผลกระทบของการเติม

เต็ม (microfiller effect) ของผงลูกถ้วยไฟฟ้าแทรกตัวในปูนซีเมนต์ทำให้ขนาดคละของอนุภาคของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+ผงลูกถ้วยไฟฟ้า) มีการเรียงตัวถี่มากขึ้น ขณะที่มอร์ตาร์ 30CP และ 40CP ที่อายุ 28 วัน มีค่าร้อยละกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากอายุ 7 วัน อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงมีการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอชโซลานเพิ่มเติมในช่วง 7 ถึง 28 วัน ส่วนที่อายุ 7 วัน อาจจะไม่เห็นผลกระทบของการเติมเต็มของผงลูกถ้วยไฟฟ้ามากนัก ประกอบกับความต้องการน้ำที่มากขึ้น และที่อายุ 90 วัน การพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอชโซลานยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากมอร์ตาร์ 30CP และ 40CP โดยค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (12)

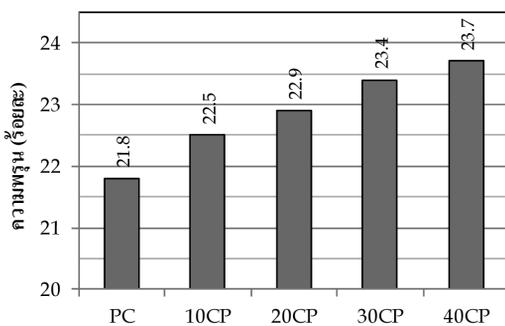
เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618-12 เกณฑ์กำหนดดัชนีกำลังของวัสดุปอชโซลานที่ใช้ในปูนซีเมนต์ ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ซึ่งมอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้าในอัตราร้อยละ 20 ให้ค่าดัชนีกำลังสูงกว่าร้อยละ 75 ขณะที่มอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้าในอัตราร้อยละ 30 มีค่ากำลังสูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 28 วัน แต่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 วัน ถ้านำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในระดับนี้ต้องให้ความระมัดระวังต่อกำลังระยะต้น หรือใช้กับงานที่ไม่ได้คำนึงถึงการรับกำลังในระยะต้น

ตารางที่ 2. การไหลแผ่ ความต้องการน้ำ กำลังอัดและดัชนีการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์

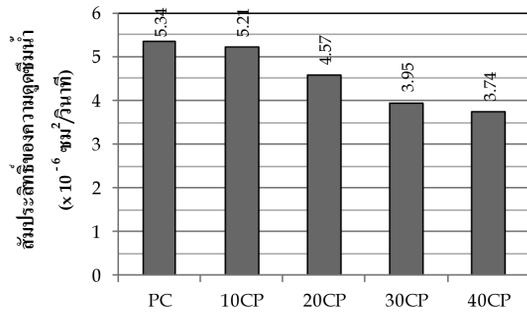
ส่วนผสม	w/b	ร้อยละการไหลแผ่	ร้อยละความต้องการน้ำ	กำลังอัด (MPa) – ดัชนีการพัฒนากำลัง (ร้อยละของ PC)		
				7 วัน	28 วัน	90 วัน
PC	0.54	110	100	41.1 – 100	51.8 – 100	59.1 – 100
10CP	0.55	111	102	38.6 – 94	49.8 – 96	56.6 – 96
20CP	0.57	111	106	33.1 – 81	42.3 – 82	49.0 – 83
30CP	0.58	113	107	27.4 – 67	39.0 – 75	50.0 – 85
40CP	0.59	113	109	21.2 – 52	33.1 – 64	43.5 – 74

3.4 ความพรุนและความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ความพรุนของมอร์ตาร์ทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยวิธีอิมมิดีด้วยน้ำในสภาพสูญญากาศ ผลการทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำ ทดสอบที่อายุ 28 วัน แสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งทั้งสองเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ชิ้นตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม เมื่อพิจารณา ผลการทดสอบทั้งสองพบว่า ความพรุนของมอร์ตาร์ผสม ผงลูกถ้วยไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยที่มอร์ตาร์ PC, 10CP, 20CP, 30CP และ 40CP มีค่าความพรุนร้อยละ 21.8, 22.5, 22.9, 23.4 และ 23.7 ตามลำดับ ขณะที่สัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ (coefficient of water absorption of mortars) มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ผงลูกถ้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยที่มอร์ตาร์ PC, 10CP, 20CP, 30CP และ 40CP มีค่าสัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำ เป็น 5.34×10^{-6} , 5.21×10^{-6} , 4.57×10^{-6} , 3.95×10^{-6} และ 3.74×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ตาร์ผสมผงลูกถ้วยไฟฟ้าในปริมาณที่ เพิ่มขึ้นมีความต้องการน้ำที่มากขึ้นทำให้ปริมาณช่องว่าง จากน้ำอิสระมากขึ้น แต่ด้วยผลของความละเอียดของ ผงลูกถ้วยไฟฟ้าที่ส่งผลให้การกระจายขนาดคละของ อนุภาคของวัสดุประสานมีการเรียงตัวกันดีขึ้นทำให้ โพรงมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะโพรงคาปิลลารี (capillary pore) ทำให้ขนาดโพรงเฉลี่ยเล็กลง (13-15) ทำให้การดูด ซึมน้ำเป็นไปได้น้อยลงส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำลดลง (15,16) โดยรวมได้มอร์ตาร์ที่มีความทึบน้ำมากขึ้น



รูปที่ 3. ความพรุนของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4. สัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ อายุ 28 วัน

4. สรุป

จากผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้ในการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ลูกถ้วยไฟฟ้าเหลือทิ้ง เมื่อนำมาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2.6 สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+ผงลูกถ้วยไฟฟ้า) แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 30 ต้องระมัดระวังในการใช้ เนื่องจากกำลังอัดระยะต้นที่อายุ 7 วัน ค่าดัชนีพัฒนากำลังต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618
- 2) ความพรุนของมอร์ตาร์ผสม ผงลูกถ้วยไฟฟ้า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่การดูดซึมน้ำในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของความดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง กฟผ.-มช. ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และรองศาสตราจารย์อำนาจ สุขศรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ลูกถ้วยไฟฟ้า ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ ท้ายสุดต้องขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ประสานงานความร่วมมือในเงินทุนวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Ceramic industries development center, Department of industrial promotion. The ceramic industry situation of Thailand [Internet]. 2011 Nov 10 [update 2012; cited 2012 May 10]. Available from: <http://ceramiccenter.dip.go.th/LinkClick.aspx?fileticket=CoPYh6B%2bn0c%3d&tabid=36>. Thai.
- (2) The Krungthep Turakij Post. The ceramic industry: Facing difficulties both domestic and international markets [Internet]. 2007 Nov 18 [update 2012; cited 2012 May 12]. Available from: http://www.bangkokbiznews.com/2007/06/18/WW02_0209_news.php?newsid=79540. Thai.
- (3) Senthamarai RM, P. Devadas Manoharan. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cem Concr Compos.* 2005;25(8): 910-913.
- (4) Ceramic industries development center, Department of industrial promotion. The derivation of basic ceramic production [Internet]. 2011 [update 2012; cited 2012 May 10]. Available from: <http://ceramiccenter.dip.go.th/LinkClick.aspx?fileticket=CoPYh6B%2bn0c%3d&tabid=36>. Thai.
- (5) Saiintawong K. Manufacture of electrical insulators [Internet]. 2008 [update 2012; cited 2012 Apr 18]. Available from: http://www.thaiceramicsociety.com/documents/540117_electrical_insulator.pdf. Thai.
- (6) ASTM C618-12. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete [Internet]. 2012 [update 2012; cited 2012 Jun 23]. Available from: http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGES/C618.htm
- (7) ASTM C150-12. Standard specification for Portland cement [Internet]. 2012 [updated 2012; cited 2012 Jun 23]. Available from: http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGES/C150C150M.htm
- (8) ASTM C109-11b. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube specimens) [Internet]. 2012 [update 2012; cited 2012 Jun 23]. Available from: http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGES/C109C109M.htm
- (9) Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cem Concr Compos.* 2007;29(6): 515–524
- (10) Wattanasuksa W, Seesang N, Udomsrap S, Laopanya S, Horsakulthai V. Compressive strength, modulus of elasticity and coefficient of absorption of concrete containing bagasse-rice husk-wood ash. *Proceedings of the 20th National Graduate Research Conference*; 2011 Feb 2-3; Salaya, Nakorn Prathom: Mahidol University Salaya; 2011. Thai.
- (11) ASTM C1437-07. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar [Internet]. 2012 [updated 2012; cited 2012 May 10]. Available from: <http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUB>

- SCRIPTION/REDLINE_PAGES/C1437.htm (15) Toledo Filho RD, Gonçalves JP, Americano BB, Fairbairn EMR. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cem Concr Res.* 2007;37(9): 1357-1365.
- (12) Pereira-de-Oliveira LA, Castro-Gomes JP, Santos PMS. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Constr Build Mater.* 2012;31: 197-203.
- (13) Frías M, Cabrara J. Pore size distribution and degree of hydration of metakalin-cement pastes. *Cem Concr res.* 2000;30(4): 561-569.
- (14) Gonçalves JP, Tavares LM, Toledo Filho RD, Fairbairn EMR. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Constr Build Mater.* 2009;23(5):1971–1979.
- (16) Shekarchi M, Bonakdar A, Bakhshi M, Mirdamadi A, Mobasher B. Transport properties in metakaolin blended concrete. *Constr Build Mater.* 2010;24(11): 2217-2223.