ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน

Effect of Fly Ash on Compressive Strength and Corrosion Resistance of Mortar Immersed in Municipal Wastewater

วิรุจ พัฒนาศรีรัตน์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และ เอนก ศิริพานิชกร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ถนนประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140
โทร. 0-2470-9137 โทรสาร 0-2427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาผลกระทบของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาดและที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยการศึกษาได้ทำการบ่มมอร์ต้าร์ทั้งหมดในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงแบ่งมอร์ต้าร์ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกนำไปแช่ในน้ำประปา และอีกกลุ่มนำไปแช่ในน้ำเสียชุมชนในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน เก็บตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งสองกลุ่มเพื่อทดสอบกำลังอัดและการกัดกร่อนในรูปการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 120, 240, 365 และ 540 วัน (18 เดือน) ผลการศึกษาในด้านกำลังอัด พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่ต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ และกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดมากขึ้น ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 สามารถทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นมีแนวโน้มว่าสามารถแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงสุด สำหรับมอร์ต้าร์ของกลุ่มที่แช่ในน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปจะมีกำลังอัดเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกลุ่มที่แช่ในน้ำประปาตลอดอายุการทดสอบ และมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของมอร์ต้าร์เล็กน้อยแม้ว่าจะแช่ในน้ำเสียชุมชนเป็นระยะเวลาถึง 540 วัน

Abstract

The objectives of this research were to investigate the effect of fineness and cement replacement by fly ash on compressive strength and corrosion resistance of fly ash-cement mortar immersed in municipal wastewater. The original and classified fly ashes from Mae Moh power plant were used to replace Portland cement type I at a percentages of 15, 25, 35 and 50 by weight and compared with standard mortars of Portland cement type I and V. All the mortars were cured in water for 28 days, after that, the specimens were separated into 2 groups. The first group was cured in water and the other was immersed in municipal wastewater in wet and dry conditions. Both groups were tested for compressive strength and also corrosion in term of weight losses of mortar at ages of 120, 240, 365 and 540 days (18 months). The results showed that the compressive strengths of mortars with original fly ash as replacement of Portland cement type I were lower than that of standard mortar at all ages. The compressive strengths decreased as the percent replacement of original fly ash increased. However, the compressive strengths of mortars with classified fly ash which replaced Portland cement type I less than 35 percent, gave the same strength or higher than the standard mortars at all ages. As water to cementitious material ratios increased, the higher content of classified fly ash could be used to obtain the maximum compressive strength of mortar. The results of weight loss of mortars immersed in wastewater were the same as those of mortars immersed in water until the age of 540 days. In addition, slightly erosion at the surfaces of mortar was observed.

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงนอกเหนือจากกำลังอัด ความสามารถในการเทได้ การเกิดความร้อนในขณะคอนกรีตก่อตัว ฯลฯ ความทนทานของคอนกรีตที่สัมผัสน้ำเสียซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมหนึ่งที่มีสภาพการกัดกร่อนสูงก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งนี้การกัดกร่อนจะทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลง และรุนแรงยิ่งขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน ในต่างประเทศได้เคยมีเหตุการณ์ที่

RECEIVED 21 MAY, 2002
ACCEPTED 23 JULY, 2002

ท่อระบายน้ำใต้ดินเกิดการผุกร่อนอย่างมากจนไม่สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่อยู่ด้านบน ทำให้พังทลายและยุบตัวของดินหรือถนนที่อยู่ด้านบนก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน [1][2] ความเสียหายเนื่องจากน้ำเสียเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น น้ำเสียประเภทสารอินทรีย์จะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียแบบแอนแอโรบิค (Anaerobic Bacteria) ทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ แม้ว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไม่ทำอันตรายต่อคอนกรีต [3][4] แต่เมื่อน้ำเสียเกิดความปั่นป่วนในระดับสูง ทำให้มีการถ่ายเทไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกสู่ผิวน้ำและอยู่ภายในบรรยากาศของท่อระบายน้ำ แบคทีเรียซัลเฟอร์ที่เกาะตามผนังของท่อเหนือระดับน้ำเสียจะทำการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกขั้นหนึ่งจะนำไปสู่การเกิดกรดซัลฟูริคในที่สุด ส่วนน้ำเสียประเภทสารอนินทรีย์มักมีค่า pH ในระดับต่ำ ซึ่งค่า pH ดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกัดกร่อนคอนกรีต มีรายงานว่าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) มีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 300 ppm. ภายใต้สภาวะการไหลปกติ ทำให้คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนโดยมีความลึกมากกว่า 2 นิ้ว ในระยะเวลา 7 ปี [5] นอกจากนี้สารละลายซัลเฟตในน้ำเสียจะส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้ลดลงเมื่อคอนกรีตสัมผัสน้ำเสียเป็นระยะเวลานาน หรือน้ำเสียมีสารละลายคลอไรด์ปะปนอยู่ซึ่งสามารถซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีตและทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมในที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และใช้เถ้าถ่านหินจากไซโลโดยตรงซึ่งไม่ผ่านการแยกขนาดและเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I บางส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณและความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติในด้านกำลังอัดและการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชนในสภาพเปียกและแห้งสลับกันเพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปา

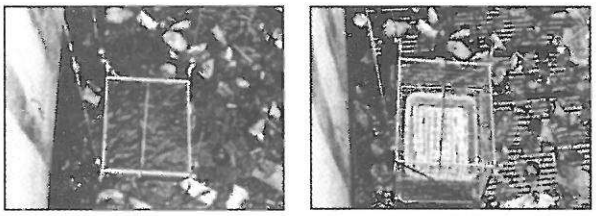
2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V, ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, เถ้าถ่านหินลิกไนต์จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง โดยแบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ลักษณะ คือ เถ้าถ่านหินจากไซโลโดยตรงซึ่งไม่ผ่านการแยกขนาด และเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดให้มีความละเอียดสูงด้วยเครื่อง Air Classifier ซึ่งใช้หลักการของลมหมุนวนในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็ก-ใหญ่ออกจากกัน

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้ใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์มาตรฐานรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. ซึ่งเตรียมตัวอย่างตาม ASTM C 109 และมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1:2.75 เพื่อหล่อมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และหล่อมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดและเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, W/(C+F), เท่ากับ 0.500, 0.575, และ 0.650 ทำการบ่มมอร์ต้าร์ทั้งหมดในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงทดสอบกำลังอัด จากนั้นแบ่งมอร์ต้าร์ที่เหลือออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกนำไปแช่ในน้ำประปา และกลุ่มที่สองนำไปแช่ในน้ำเสียชุมชนในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน (ดูรูปที่ 1) บริเวณโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำสี่พระยา กรุงเทพฯ และ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งสองกลุ่มเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบกำลังอัดและการกัดกร่อนที่อายุ 120, 240, 365 และ 540 วัน (18 เดือน)



(ก) มอร์ต้าร์ในสภาพเปียก (ข) มอร์ต้าร์ในสภาพแห้ง

รูปที่ 1 มอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน

2.3 การทดสอบ

การทดสอบวัสดุทดลองประกอบด้วยการถ่ายภาพขยายกำลังสูง และ องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชน การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชน ส่วนการทดสอบการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ของกลุ่มที่แช่ในน้ำเสียชุมชนจะพิจารณาในรูปการสูญเสียน้ำหนัก

2.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้ คือ STD1 และ STD5 ซึ่งหมายถึง มอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V, ตัวเลข 15, 25, 35 และ 50 หมายถึง อัตราส่วนร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน, ตัวอักษร OF และ CF หมายถึง เถ้าถ่านหินจากไซโลโดยตรงที่ไม่ผ่านการแยกขนาด และ เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียด ตามลำดับ ส่วนตัวอักษร A, B และ C หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในส่วนผสมของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ 0.500, 0.575 และ 0.650 ตามลำดับ สำหรับมอร์ต้าร์ที่มีสัญลักษณ์ [w] หมายถึง กลุ่มมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน ยกตัวอย่างเช่นมอร์ต้าร์ STD1A หมายถึง มอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.500 ส่วนมอร์ต้าร์ 25OF1B หมายถึง มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ผสม

เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.575 ซึ่งเป็นกลุ่มที่แช่ในน้ำประปา ขณะที่ 25OF1B[w] เป็นมอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนผสมเดียวกันแต่เป็นกลุ่มที่แช่ในน้ำเสียชุมชน

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 รูปร่างและขนาดอนุภาคของวัสดุ

รูปที่ 2 เป็นภาพถ่ายอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 1500 เท่า และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุได้แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 21.3 และ13.8 ไมครอน ตามลำดับ เห็นได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I สำหรับเถ้าถ่านหิน OF และ CF มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 23.8 และ 5.5 ไมครอน ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเถ้าถ่านหิน CF ซึ่งผ่านกระบวนการแยกขนาดแล้วยังคงมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลมเช่นเดิม ซึ่งอนุภาคที่เป็นทรงกลมของเถ้าถ่านหินจะช่วยให้มอร์ต้าร์มีความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้นและอนุภาคส่วนที่ละเอียดจะแทรกอุดช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ ส่งผลทำให้เนื้อของเพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้น

3.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 3.13 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน ส่วนเถ้าถ่านหิน OF มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของเรืองรุชดิ์ และ ชัย [6] ที่มีค่าเท่ากับ 2.19 ขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน CF มีค่าเท่ากับ 2.53 สังเกตได้ว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าสูงกว่าเถ้าถ่านหิน ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุเหล็ก อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งเป็นธาตุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเถ้าถ่านหิน [7]

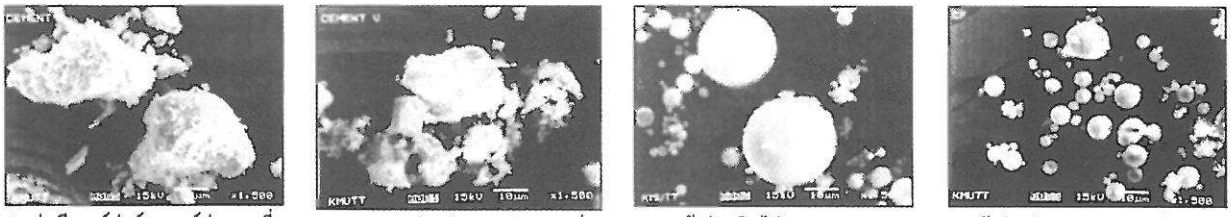
เมื่อพิจารณาในด้านความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหิน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V, เถ้าถ่านหิน OF และ CF มีพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลน เท่ากับ 3489 ซม.^{2}/ก. และ 4366 ซม.^{2}/ก., 3412 ซม.^{2}/ก. และ 5130 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติตามเกณฑ์ของ ASTM C 150 คือต้องมีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 2800 ซม.^{2}/ก. นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Jaturapitakkul และคณะ [8] ทั้งนี้เป็นเพราะเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจะมีรูพรุนน้อยกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า สำหรับความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีปริมาณค้างเท่ากับร้อยละ 15.8 และ 3.2 ตามลำดับ ส่วนเถ้าถ่านหิน OF มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.9 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดตาม ASTM C 618 ที่ยอมให้ไม่เกินร้อยละ 34 และเถ้าถ่านหิน CF ที่มีความละเอียดสูงจะไม่มีเถ้าถ่านหินค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

Physical Properties and Chemical Composition	Cement I	Cement V	OF	CF
Specific Gravity	3.15	3.13	2.21	2.53
Blaine Fineness (cm^2/g)	3489	4366	3412	5130
Retained on Sieve No. 325 (%)	15.8	3.2	34.9	0
Mean Particle Size (micron)	21.3	13.8	23.8	5.5
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	20.80	21.52	45.76	44.69
Aluminum Oxide, Al_2O_3 (%)	5.50	3.56	25.41	24.17
Ferrous Oxide, Fe_2O_3 (%)	3.16	4.51	13.59	11.82
Calcium Oxide, CaO (%)	64.97	66.70	9.37	11.17
Magnesium Oxide, MgO (%)	1.06	1.20	3.09	2.75
Sodium Oxide, Na_2O (%)	0.08	0.10	0.07	0.09
Potassium Oxide, K_2O (%)	0.55	0.24	2.69	2.90
Sulfur Trioxide, SO_3 (%)	2.96	2.11	1.15	0.92
Loss On Ignition, LOI (%)	2.89	1.74	0.54	1.41
Tricalcium Aluminate, C_3A (%)	9.22	1.81	-	-

3.3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ร้อยละ 9.22 และ 1.81 ตามลำดับ แสดงว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีปริมาณ C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และอยู่ในเกณฑ์กำหนดตาม ASTM C 150 ที่กำหนดให้มีค่า C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 64.97 และ 66.70 ตามลำดับ ส่วน CaO ของเถ้าถ่านหิน OF และ CF มีปริมาณร้อยละ 9.37 และ 11.17 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณ CaO สูงกว่าเถ้าถ่านหินมาก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่าเถ้าถ่านหิน OF และ CF มีองค์ประกอบทางเคมีไม่ต่างกันมาก



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I (ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V (ค) เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด (OF) (ง) เถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียด (CF)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหิน

สำหรับผลรวม $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ ของเถ้าถ่านหิน OF และ CF มีค่าเท่ากับร้อยละ 84.76 และ 80.68 ตามลำดับ ส่วนปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ของเถ้าถ่านหินมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.15 และ 0.92 ตามลำดับ จาก ASTM C 618 สามารถจัดเถ้าถ่านหินทั้งสองขนาดเป็น Class F เพราะมีค่าผลรวมของออกไซด์ดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 75 และ มี SO_3 และ LOI ไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดเช่นกัน

3.4 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชน

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียชุมชนซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนได้ดำเนินการพร้อมกับการเก็บตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุ 240 และ 540 วัน พบว่าตัวอย่างน้ำเสียชุมชนมีความขุ่นสูงและเป็นตะกอนสีดำ โดยมีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.8 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยปกติของน้ำเสียชุมชนในเขตกรุงเทพมหานคร คือมีค่าอยู่ในช่วง 6.2 ถึง 7.3 [9] ส่วนความสกปรกของน้ำเสียที่วัดอยู่ในรูปของ BOD (Biochemical Oxygen Demand) และ COD (Chemical Oxygen Demand) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.6 และ 105.9 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างน้ำเสียที่วิเคราะห์มีค่า BOD สูงกว่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก [10] ที่กำหนดไว้สูงสุด 20 มก./ล. สำหรับปริมาณของซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ คลอไรด์ (Cl^-) ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 32.6 และ 23.4 มก./ล. ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำเสียชุมชน

Parameter	Municipal Wastewater			Specification
	September, 2000	November, 2001	Average	
BOD (mg/L)	53.7	29.4	41.6	20 [10]
COD (mg/L)	129.7	82.0	105.9	-
pH	6.4	7.1	6.8	6.2-7.3 [9]
H_2S (mg/L)	ND	ND	ND	-
SO_4^{2-} (mg/L)	33.8	31.4	32.6	0-150 [11]
Cl^- (mg/L)	21.0	25.7	23.4	-

หมายเหตุ ND : Non – Detectable (Hydrogen Sulphide < 0.1 mg/L)

จาก ACI 318 [11] ที่กล่าวไว้ว่าเมื่อคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตที่มีปริมาณน้อยกว่า 150 มก./ล. จะถือว่าสภาวะดังกล่าวทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยมาก นอกจากนี้การวิเคราะห์ยังไม่พบไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำเสียอยู่ในบ่อพักซึ่งเป็นระบบเปิด เมื่อสารประกอบอินทรีย์ถูกพวกจุลินทรีย์ย่อยสลายในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอก็จะแปรสภาพต่อไปเป็นสารซัลเฟต จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่เกิด H_2S

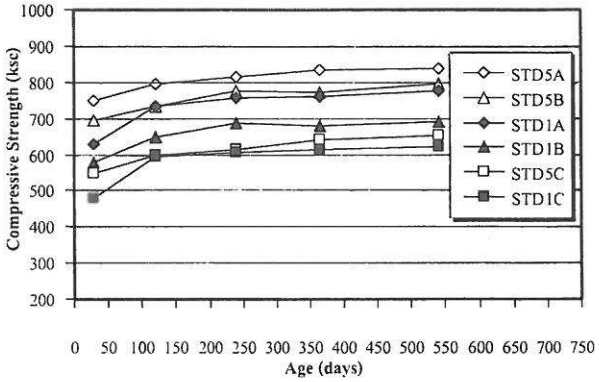
3.5 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปา

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V พบว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน STD1A, STD1B และ STD1C มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 630, 580 และ 478 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เมื่ออายุการทดสอบมากขึ้นเป็น 120 และ 540 วัน มอร์ต้าร์สามารถให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 734, 648, 593 กก./ซม.^{2} และ 775, 691, 621 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่อายุ 540 วันของมอร์ต้าร์มาตรฐานดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นเป็น 1.3, 1.2 และ 1.3 เท่าของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

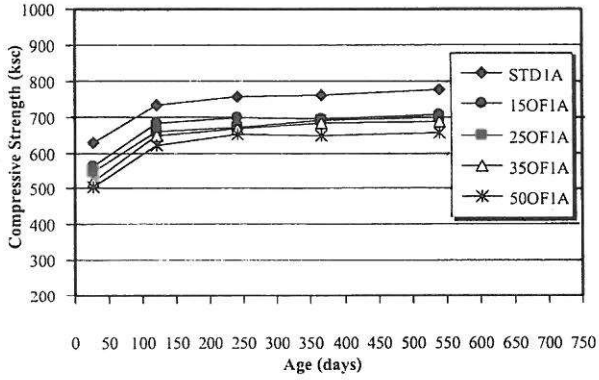
ส่วนมอร์ต้าร์มาตรฐาน STD5A, STD5B และ STD5C มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 750, 693 และ 547 กก./ซม.^{2} และ ที่อายุ 120 และ 540 วันมอร์ต้าร์สามารถพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นเป็น 796, 735, 597 กก./ซม.^{2} และ 838, 795, 652 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I อย่างชัดเจนตั้งแต่อายุ 28 วัน เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ประกาศ [12] ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I อีกด้วย นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยกำลังอัดที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามกฎของ Abrams [13]

เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าถ่านหิน OF แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.500, 0.575 และ 0.650 (ดูรูปที่ 4 ถึง 6) พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF ทุกส่วนผสมให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ทุกอายุการทดสอบ และกำลังอัดจะยิ่งมีค่าลดต่ำลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหิน OF เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังอัดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่สูญเสียไปเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง อย่างไรก็ตามมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF สามารถให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันมากกว่าร้อยละ 75 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์มาตรฐานของแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ยกเว้นมอร์ต้าร์ 50OF1C ที่ให้กำลังอัดเพียงร้อยละ 71 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเถ้าถ่านหิน OF เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณสมบัติตาม ASTM C 618 และสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้

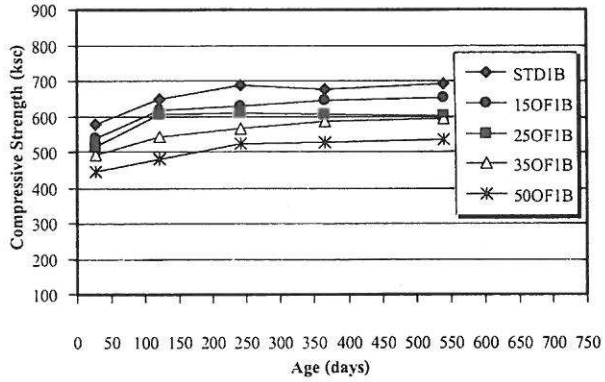
รูปที่ 7 ถึง 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.500, 0.575 และ 0.650 พบว่าการใช้เถ้าถ่านหิน CF แทนที่ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 สามารถทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ โดยมอร์ต้าร์ 25CF1A, 35CF1B และ 35CF1C เป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 540 วัน คือมีค่าเท่ากับ 797, 767 และ 652 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 111 และ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน STD1A, STD1B และ STD1C ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ 50CF1A, 50CF1B, 50CF1C เป็นส่วนผสมกลุ่มเดียวที่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานตลอดอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงถึงร้อยละ 50 อย่างไรก็ตามมอร์ต้าร์ดังกล่าวสามารถให้กำลังอัดที่อายุ 540 วัน สูงถึงร้อยละ 95, 94 และ 77 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน STD1A, STD1B และ STD1C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าถ่านหิน CF ที่มีความละเอียดสูงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างรวดเร็ว อีกทั้งขนาดอนุภาคที่เล็กยังสามารถช่วยอุดช่องว่างในเพสต์ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นมีแนวโน้มว่าสามารถแทนที่เถ้าถ่านหิน CF ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงสุดในแต่ละกลุ่ม แต่ทั้งนี้อัตราส่วนการแทนที่ต้องไม่เกินร้อยละ 35



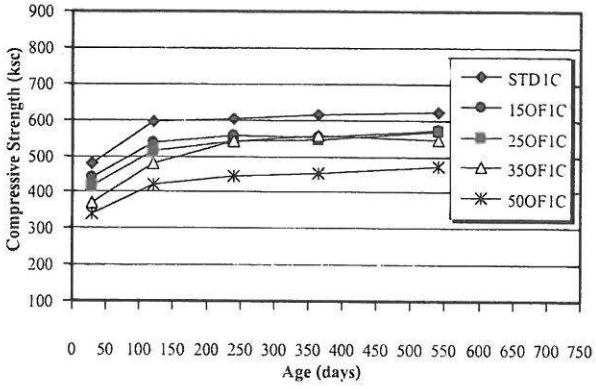
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V



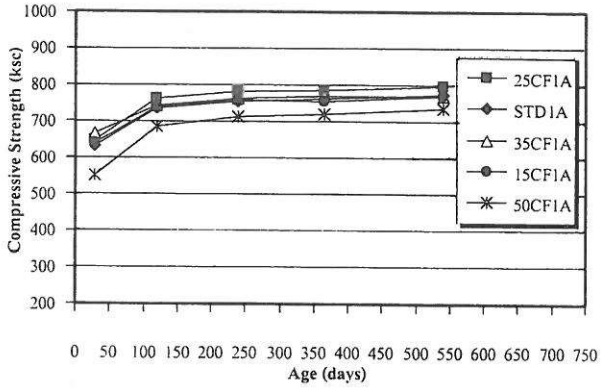
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.500



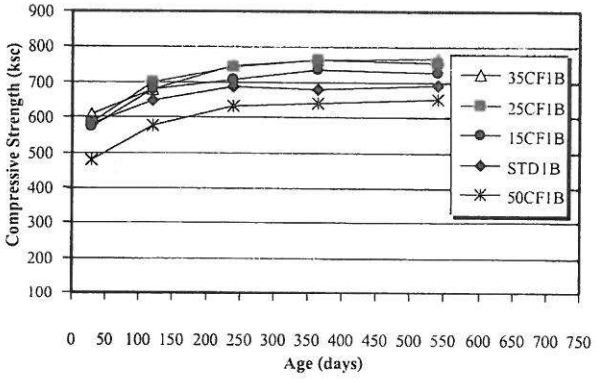
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.575



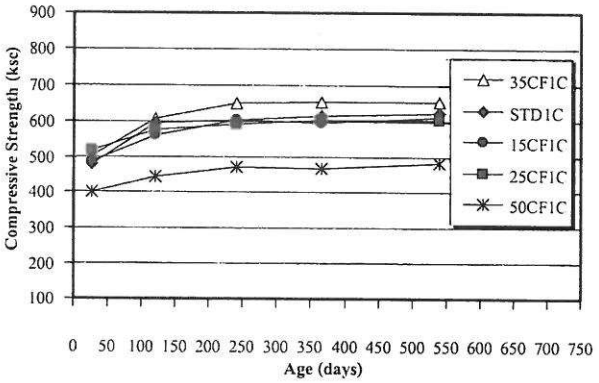
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.650



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.500



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.575

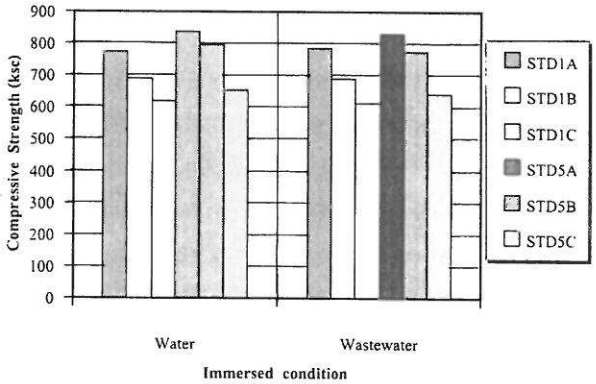


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF โดยมี W/(C+F) เท่ากับ 0.650

3.6 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน

มอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชนมีการพัฒนากำลังอัดในลักษณะเดียวกับมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปาทุกส่วนผสม กล่าวคือในช่วงอายุ 28 ถึง 120 วัน มอร์ต้าร์มาตรฐานและมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF และ CF มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นที่ช่วงอายุ 120 ถึง 540 วัน การพัฒนากำลังอัดเกือบคงที่หรือเพิ่มสูงขึ้นอีกเล็กน้อยเท่านั้น

การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF และ CF ของกลุ่มที่แช่ในน้ำเสียชุมชน พบว่ามอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดไม่ต่างกับมอร์ต้าร์กลุ่มที่แช่ในน้ำประปามากนัก โดยแต่ละอายุการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะมีค่าสูงหรือต่ำสลับไปมา และยังไม่พบการเสื่อมกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชนอย่างชัดเจน แสดงว่าน้ำเสียชุมชนยังไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะมอร์ต้าร์ที่ใช้ศึกษามีกำลังค่อนข้างสูง และสารประกอบที่เป็นอันตรายต่อมอร์ต้าร์ในน้ำเสียชุมชนมีปริมาณน้อย

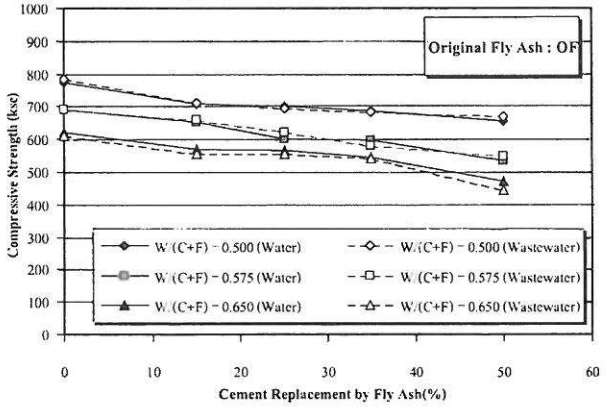


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชน ที่อายุ 540 วัน

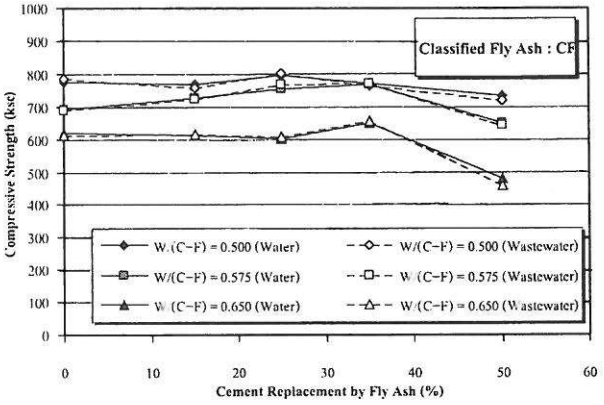
รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่อายุ 540 วัน พบว่าที่ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่างกำลังอัดระหว่างกลุ่มที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชนไม่ต่างกันมากนัก คือมีค่าอยู่ในช่วง -11 ถึง 9 กก./ซม.^{2} และ -22 ถึง 19 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF มีผลต่างกำลังอัดระหว่างกลุ่มที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชนที่อายุ 540 วัน (ดูรูปที่ 11) อยู่ในช่วง -14 ถึง 7 กก./ซม.^{2}, -18 ถึง 16 กก./ซม.^{2} และ 3 ถึง 26 กก./ซม.^{2} ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, W/(C+F) เท่ากับ 0.500, 0.575 และ 0.650 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลต่างกำลังอัดที่อายุ 540 วัน ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF (ดูรูปที่ 12) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, W/(C+F) เท่ากับ 0.500, 0.575 และ 0.650 มีค่าอยู่ในช่วง -7 ถึง 13 กก./ซม.^{2}, -12 ถึง 8 กก./ซม.^{2} และ -8 ถึง 22 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

3.7 การกัดกร่อนของมอร์ต้าร์

มอร์ต้าร์มาตรฐานและมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF และ CF ที่แช่ในน้ำเสียชุมชนในการศึกษาครั้งนี้จะมีสภาพการกัดกร่อนบริเวณผิวหน้าตัวอย่างของมอร์ต้าร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสังเกตเห็นที่ผิวหน้าที่มีลักษณะขรุขระและเม็ดทรายของมอร์ต้าร์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ต้าร์ 50OF1C[w] ตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปในแต่ละอายุการทดสอบของมอร์ต้าร์จะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน OF ที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชนที่อายุ 540 วัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน CF ที่แช่ในน้ำประปาและน้ำเสียชุมชนที่อายุ 540 วัน

ตารางที่ 3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน

Type of Mortars	W/(C+F)	Weight Loss After Immersing in Municipal Wastewater (%)				Type of Mortars	W/(C+F)	Weight Loss After Immersing in Municipal Wastewater (%)			
		120-day	240-day	365-day	540-day			120-day	240-day	365-day	540-day
STD1A[w]	**0.500**	**0.9**	**0.7**	**0.6**	**0.9**	**STD5A[w]**	**0.500**	**0.7**	**0.5**	**0.6**	**0.6**
STD1B[w]	**0.575**	**0.9**	**0.7**	**0.7**	**0.9**	**STD5B[w]**	**0.575**	**0.5**	**0.4**	**0.4**	**0.6**
STD1C[w]	**0.650**	**0.9**	**1.0**	**0.9**	**0.9**	**STD5C[w]**	**0.650**	**0.5**	**0.6**	**0.8**	**0.8**
15OF1A[w]	0.500	0.5	0.6	0.5	0.4	15CF1A[w]	0.500	0.4	0.2	0.4	0.2
25OF1A[w]	0.500	0.4	0.2	0.4	0.2	25CF1A[w]	0.500	0.5	0.5	0.3	0.4
35OF1A[w]	0.500	0.5	0.4	0.3	0.3	35CF1A[w]	0.500	0.5	0.3	0.3	0.3
50OF1A[w]	0.500	1.1	0.7	0.6	0.6	50CF1A[w]	0.500	0.5	0.6	0.4	0.4
15OF1B[w]	0.575	0.4	0.3	0.4	0.4	15CF1B[w]	0.575	0.5	0.3	0.3	0.4
25OF1B[w]	0.575	0.2	0.2	0.4	0.2	25CF1B[w]	0.575	0.5	0.4	0.4	0.4
35OF1B[w]	0.575	0.4	0.2	0.3	0.3	35CF1B[w]	0.575	0.5	0.5	0.3	0.4
50OF1B[w]	0.575	0.9	0.8	0.7	0.8	50CF1B[w]	0.575	0.6	0.5	0.5	0.5
15OF1C[w]	0.650	0.2	0.5	0.3	0.3	15CF1C[w]	0.650	0.4	0.4	0.5	0.3
25OF1C[w]	0.650	0.3	0.4	0.4	0.5	25CF1C[w]	0.650	0.4	0.4	0.5	0.5
35OF1C[w]	0.650	0.5	0.4	0.4	0.5	35CF1C[w]	0.650	0.5	0.7	0.5	0.6
50OF1C[w]	0.650	1.1	0.8	1.1	1.0	50CF1C[w]	0.650	0.6	0.5	0.4	0.6

โดยมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 50 ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มว่าจะมีการกัดกร่อนมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 0.6 ถึง 1.0 และ 0.6 ถึง 1.1 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะการแทนที่เถ้าถ่านหิน OF ในอัตราร้อยละ 50 ทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์อื่นๆจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ

1. มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF ทุกอัตราส่วนการแทนที่จะมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานตลอดอายุการทดสอบ และกำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหิน OF มากขึ้น

2. มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน CF ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 สามารถทำให้กำลังอัดได้ใกล้เคียงหรือสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ และ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นจะมีแนวโน้มว่าเถ้าถ่านหิน CF สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้มอร์ต้าร์ที่มีกำลังอัดสูงสุด

3. ผลกระทบเนื่องจากน้ำเสียชุมชนต่อมอร์ต้าร์มาตรฐานและมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมในด้านกำลังอัดยังไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนจนถึงอายุการทดสอบ 540 วัน โดยมอร์ต้าร์มีการพัฒนากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ของกลุ่มที่แช่ในน้ำประปาตลอดอายุการทดสอบ

4. มอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน OF ในอัตราส่วนร้อยละ 50 ที่แช่ในน้ำเสียชุมชนจนมีอายุ 540 วัน มีแนวโน้มการกัดกร่อนมากกว่ามอร์ต้าร์ส่วนผสมอื่นๆ อย่างไรก็ตามมอร์ต้าร์โดยทั่วไปมีการกัดกร่อนที่บริเวณผิวหน้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำสี่พระยา กรุงเทพฯ ที่อนุเคราะห์สถานที่แช่ตัวอย่าง และ บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจำกัด ที่อนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V

เอกสารอ้างอิง

[1] National Clay Pipe Institute, 1968, Clay Pipe Engineering Manual, Washington D.C., pp. 31-33.

[2] Pomeroy, R., 1982, Hydrogen Sulfide: The Real Killer, Deeds and Data, pp. 10-11.

[3] Comit Euro-Internation Du Beton, 1987, Durable Concrete Structure: Design Guide, 2nd ed., Thomas Telford, p. 26.

[4] Wenger, E.C., 1958, "Concrete for Sewage Work," **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 29, No. 9, pp. 733-738.

[5] Lea, F.M., 1970, The Chemistry of Cement and Concrete, Grasgow, Edward Arnold Publishers, p. 667.

[6] เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, "การพัฒนาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน," **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 10-21.

[7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และ ธีระพงษ์ แก้วดง, 2541, "คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด," **วารสารวิจัย มข.**, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 7-18.

[8] Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Songpiriyakij, S., 1999, "A Study of Strength Activity Index of Ground Coarse Fly Ash with Portland Cement," **ScienceAsia**, Vol. 25, No. 4, pp. 223-229.

[9] ปรีชา พลอยภัทรภิญโญ และ จิราวรรณ เชษฐดมเดชา, 2536 "การบำบัดน้ำเสียชุมชน," **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 9-18.

[10] "ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด," ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 111, ตอนพิเศษ 9 ง, ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2537, หน้า 1-5.

[11] American Concrete Institute, 2000, "ACI 318-99/318R-99 : Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary," ACI Manual of Concrete Practice Part 3, p. 37.

[12] ประกาศ ทองประไพ, 2541, ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดและการขยายตัวของวัสดุซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, หน้า 24-101.

[13] Abrams, D.A., 1918, "Experimental Studies of Concrete: Design of Concrete Mixture," in Bullentin No. 1 Structural Material Research Laboratory, Chicago, Lewis Institute, pp. 1-20.