

ผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำต่อการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

Effect of Low-Calcium Fly Ash Content on Drying Shrinkage of Cement Paste under Different Relative Humidities

สเปน มาลัยทอง¹ ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ^{2,*} และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์³

¹ นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: piyapong.su@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่ของเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำต่อการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหล่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาด 3×13×300 มม. แล้วบ่มตัวอย่างในสภาวะปิดผนึก ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 °C เป็นเวลา 252 วัน จากนั้นตัดตัวอย่างให้มีความยาว 100 มม. แล้วตากแห้งภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11, 23, 40, 55, 79 และ 95 เป็นเวลา 56 วัน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินสามารถลดการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ โดยการหดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าถ่านหินมีปริมาณเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าร้อยละ 40 ในขณะที่การแทนที่เถ้าถ่านหินไม่ส่งผลต่อการหดตัวแห้งอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าร้อยละ 79 นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้การหดตัวแห้งลดลง แต่การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: การหดตัวแห้ง, เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ, ซีเมนต์เพสต์, ความชื้นสัมพัทธ์

Abstract

This study aims to investigate the effect of the replacement level of low-calcium fly ash on the drying shrinkage of cement paste under different relative humidity conditions. The materials used in this study include Portland cement type I and low-calcium fly ash, with a water-to-binder ratio (w/b) of 0.55 and fly ash replacement level of 0%, 20%, 35% and 50% by weight of the binder. Cement paste specimens with dimension 3×13×300 mm were cast and cured under sealed conditions at a temperature of 20 ± 1 °C for 252 days. Subsequently, the specimens were cut to a length of 100 mm and subjected to drying at relative humidity levels of 11%, 23%, 40%, 55%, 79%, and 95% for 56 days. The results indicate that replacing Portland cement with fly ash can reduce the drying shrinkage of cement

past, with a decreasing tendency for the fly ash content to increase under relative humidity below 40%, while the replacement of fly ash did not significantly affect the drying shrinkage under relative humidity above 79%. In addition, increasing the amount of fly ash in cement pastes resulted in a decrease in the drying shrinkage but an increase in the weight loss.

Keywords: Drying shrinkage, Low-calcium fly ash, Cement paste, Relative humidity.

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากภาวะโลกร้อนเป็นหนึ่งในปัญหาที่ท้าทายที่สุดของโลกในปัจจุบัน สาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ดังนั้น การลดการใช้ปูนซีเมนต์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน เถ้าถ่านหินได้รับความสนใจในฐานะวัสดุทดแทนซีเมนต์ที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อย่างไรก็ตาม การผสมเถ้าถ่านหินในซีเมนต์เพสต์ยังคงมีประเด็นที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของผลกระทบต่อการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ เมื่อซีเมนต์เพสต์แห้งตัว การระเหยของน้ำจากโครงสร้างจุลภาคทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยร้าวและลดความคงทนของโครงสร้าง โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีความแตกต่างจากซีเมนต์เพสต์ทั่วไป [1] ย่อมส่งผลให้การหดตัวแห้งมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป

งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นศึกษาการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานทดแทนซีเมนต์ เช่น เถ้าถ่านหิน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เท่านั้น [2-8] ตามมาตรฐาน ASTM C157 และ C490 [9,10] สภาพภูมิอากาศที่แปรปรวนในปัจจุบัน มีโอกาสที่คอนกรีตจะสูญเสียความชื้นได้ง่ายในสภาพอากาศที่ร้อนมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัว อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่หลากหลาย เช่น พื้นที่ภาคเหนือ ในฤดูร้อนมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 62 ฤดูฝนมี

ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 81 และฤดูหนาวมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 73 [11] ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อาจไม่ครอบคลุมพฤติกรรม การหดตัวที่เกิดขึ้นจริงได้

การศึกษาค้นคว้านี้มุ่งศึกษาการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์เป็นหลัก เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นจุดเริ่มต้นของการหดตัวในคอนกรีต และมีปริมาณ การหดตัวที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับหินและทราย นอกจากนี้ ผลกระทบของ ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำต่อการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการศึกษา ซึ่ง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ เนื่องจากต้องการศึกษา ผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก โดยเถ้าถ่านหินที่ใช้มีปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพียงร้อยละ 2.08 ช่วยลดความซับซ้อนของ ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ สามารถเข้าใจผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อพฤติกรรมการหดตัว แห้งได้ชัดเจนมากขึ้นโดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อีกทั้งการเลือกใช้ความชื้น สัมพัทธ์ร้อยละ 11, 23, 40, 55, 79 และ 95 เพื่อให้สามารถตรวจสอบ พฤติกรรมการหดตัวได้ครอบคลุมทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ กำหนดให้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ในการศึกษานี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 และ ASTM C150 [12] เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุและองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และน้ำปราศจากไอออน (deionized water)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

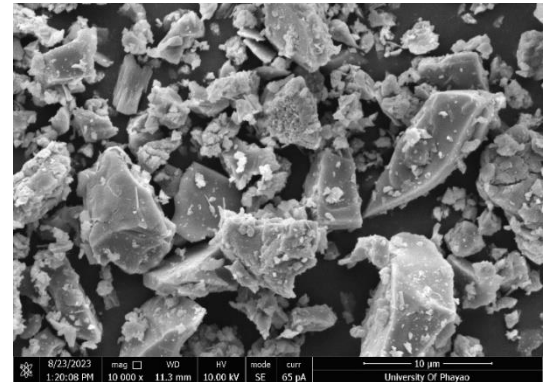
Materials	Cement Portland type I	Fly Ash
Specific Gravity	3.11	2.16
Retained on a no. 325 sieve (% by weight)	N/A	26.86

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี

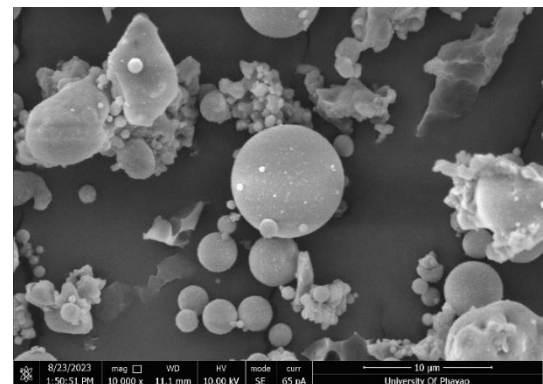
Chemical Compositions (% Mass)	Cement Portland type I	Fly Ash
Silicon Dioxide (SiO ₂)	23.72	72.89
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	5.10	19.74
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.61	3.15
Calcium Oxide (CaO)	59.07	2.08
Sulfur Trioxide (SO ₃)	5.42	0.00
Magnesium Oxide (MgO)	1.98	0.00
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.24	1.11
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.33	0.81
Other	0.55	0.23
LOI	0.44	0.39

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectrometry พบว่า ปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 59.07 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการทำปฏิกิริยากับ น้ำ ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และเถ้าถ่านหินแคลเซียม

ต่ำ เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ใช้เถ้าถ่านหินประเภทบิทูมินัสในกระบวนการเผา มีปริมาณซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันเท่ากับร้อยละ 95.78 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 จึงจัดว่าเป็นเถ้าถ่านหิน ชนิด F และมี ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 2.08 จึงจัดเป็นเถ้าถ่านหิน แคลเซียมต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13]



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

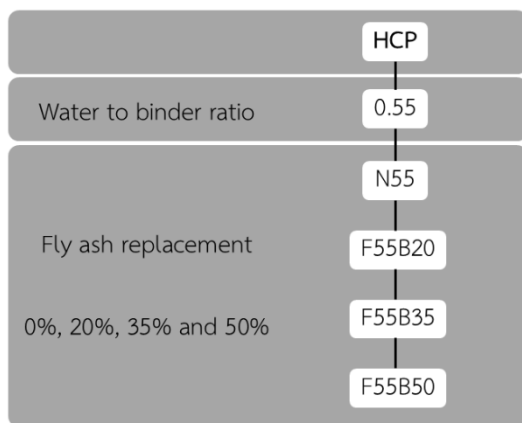
ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 พบว่า ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวขรุขระ และเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีทั้งลักษณะกลมตัน และรูปร่างไม่แน่นอน

2.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำเท่านั้น ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของ วัสดุประสาน ซึ่งมีแผนผังส่วนผสมดังรูปที่ 2

วัตถุดิบที่ใช้ผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ต้องเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนวันผสม เพื่อให้วัตถุดิบมี อุณหภูมิคงที่ในขณะทำปฏิกิริยา ทำการผสมวัสดุผงทั้งสองชนิดให้เข้ากัน แล้วใช้เครื่องผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ชนิดหมุนโคจร (planetary mixer) ขนาด 5 ลิตร ผสมน้ำให้เข้ากับวัสดุผงด้วยใบกวนที่หมุนด้วยอัตราซ้ำ (140 ± 5

รอบ/นาท) เป็นเวลา 3 นาที ถัดมาใช้ไม้พายพลาสติก (plastic spatula) ปาดส่วนผสมที่ติดด้านข้างและก้นหม้อให้หลุดออก แล้วผสมด้วยอัตราเร็ว $(285 \pm 10$ รอบ/นาท) เป็นเวลา 3 นาที เทส่วนผสมใส่ชามสแตนเลส แล้วปิดด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน (polyethylene) จากนั้นย้ายซีเมนต์เพสต์ใส่ถังหึ่งควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 °C แล้วผสมซ้ำด้วยมือโดยใช้ไม้พายกวนให้ส่วนผสมเข้ากันทุก ๆ 30 นาที จนกระทั่งซีเมนต์เพสต์มีลักษณะเป็นเนื้อครีม และไม่มีการเยิ้ม น้ำ จึงเทส่วนผสมลงแบบหล่อตัวอย่างขนาด $3 \times 13 \times 300$ มม. ที่วางอยู่บนโต๊ะสั่น เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในเนื้อซีเมนต์เพสต์ แล้วหล่อแบบหล่อด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride) ทำการถอดแบบหล่อหลังจากวันผสม 3 วัน และบ่มตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในสภาวะปิดผนึก (sealed condition) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 °C [14-16] เป็นเวลา 252 วัน



รูปที่ 2 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ของส่วนผสมในการศึกษา ซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ NX และ FXBY โดยที่ N หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว F หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน B หมายถึง เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ X หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.55 (โดยที่ X คือ 55) และ Y หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (โดยที่ Y มีค่าเท่ากับ 20, 35 และ 50 ตามลำดับ)

2.3 การตากแห้งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 252 วัน นำมาตัดให้มีขนาดยาว 100 มม. ดังรูปที่ 3 จากนั้นวัดความยาวและชั่งน้ำหนักซีเมนต์เพสต์เริ่มต้นก่อนกระบวนการตากแห้ง แล้วเก็บซีเมนต์เพสต์ไว้ในกล่องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ปิดสนิท โดยวางไว้บนตะแกรงเหนือถาดใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว (saturated salt solution) เพื่อรักษาสมาดุลของความชื้น ตัวอย่างซีเมนต์ถูกเก็บอยู่ในกล่องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11, 23, 40, 55, 79 และ 95 ซึ่งใช้สารละลายเกลือควบคุมความชื้น ดังรูปที่ 4 [17] และทำการวัดค่าการหดตัวและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน [15]

การวัดความยาวของซีเมนต์เพสต์ใช้อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งแบบสัมผัส (contact displacement transducer) ที่มีความละเอียด 0.0005 มม. ดังรูปที่ 5 ในขณะที่ทำการทดสอบ อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งจะสัมผัสกับตำแหน่งเดิมของตัวอย่างด้วยแรง 2 นิวตัน ความยาวของตัวอย่าง

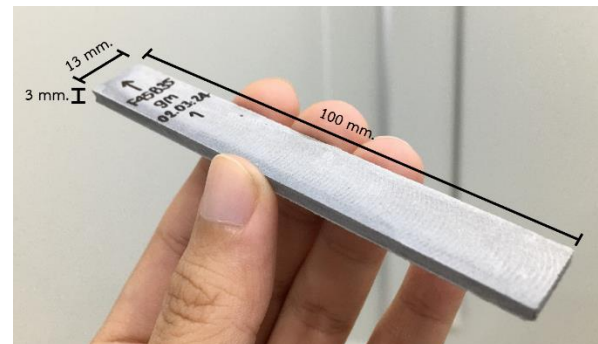
หาได้จากความแตกต่างของการวัดโดยใช้ gauge block ประเภทเซรามิกแบบ K ที่มีความยาว 100 มม. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ เป็นตัวอย่างอ้างอิง ทำการวัดความยาวของซีเมนต์เพสต์ไม่น้อยกว่า 5 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละชุดตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ ใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีความละเอียด 0.1 มก. การคำนวณค่าการหดตัวและค่าการสูญเสียน้ำหนัก เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [18]

$$\varepsilon = \frac{L_{dry} - L_0}{L_0} \quad (1)$$

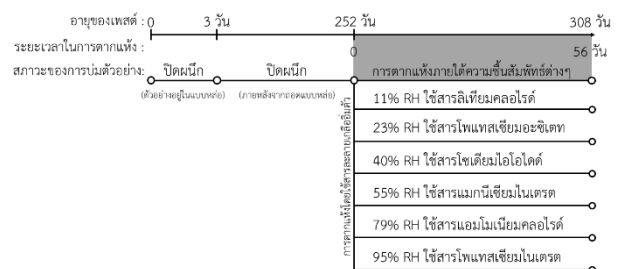
โดยที่ ε คือ ค่าการหดตัว (-), L_{dry} คือ ความยาวหลังจากนำตัวอย่างไปตากแห้ง (มม.) และ L_0 คือ ความยาวก่อนนำตัวอย่างไปตากแห้ง (มม.)

$$Mass\ reduction = \frac{M_{dry} - M_0}{M_0} \quad (2)$$

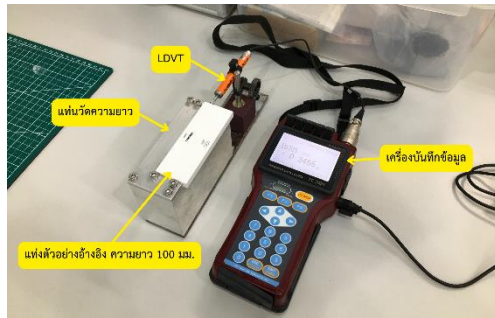
โดยที่ $Mass\ reduction$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (-), M_{dry} คือน้ำหนักหลังจากนำตัวอย่างไปตากแห้ง (กรัม) และ M_0 คือน้ำหนักก่อนนำตัวอย่างไปตากแห้ง (กรัม)



รูปที่ 3 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาด $3 \times 13 \times 100$ มม.



รูปที่ 4 ระยะเวลาในการบ่มและตากแห้งตัวอย่าง



รูปที่ 5 อุปกรณ์การวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแบบสัมผัส

2.4 ความสามารถในการกักเก็บน้ำของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water capacity) ของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำอีกครั้ง (re-saturation) เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปได้จนเต็ม ทดสอบโดยการแช่ตัวอย่างที่มีขนาดประมาณ 3×3×3 มม. ในน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างในอากาศ (M_{air}) จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วพักตัวอย่างไว้ในกล่องที่ปิดสนิทมีซิลิกาเจลเป็นเวลา 15 นาที และทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบ ($M_{dry,105}$) [14] จากนั้นคำนวณหาความสามารถในการกักเก็บน้ำของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ด้วยสมการที่ (3) ทำการทดสอบตัวอย่างที่ผ่านการตากแห้งเป็นเวลา 56 วัน อย่างน้อย 5 ตัวอย่าง

$$W_{cap} = \frac{M_{air} - M_{dry,105}}{M_{dry,105}} \quad (3)$$

โดยที่ W_{cap} คือ ความสามารถในการกักเก็บน้ำของตัวอย่าง (g/g-dried hcp) M_{air} คือ มวลของตัวอย่างในสภาวะอิ่มตัวแห้งที่ชั่งในอากาศ (กรัม) และ $M_{dry,105}$ คือ มวลของตัวอย่างหลังจากการอบแห้งที่ 105 °C (กรัม)

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

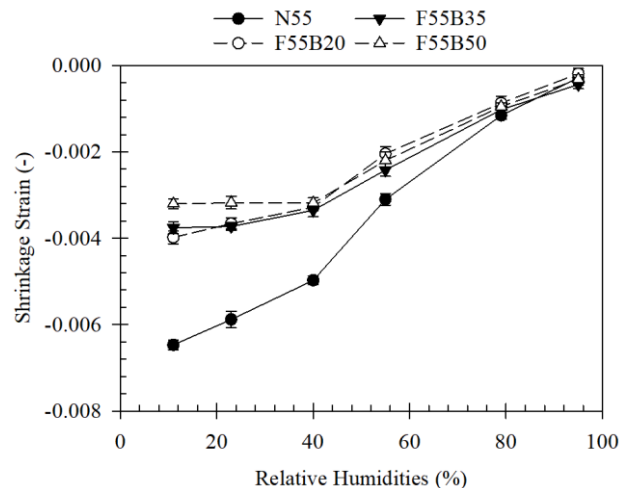
3.1 การหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ตากแห้งภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 6 แสดงการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน และแถบค่าคลาดเคลื่อน (error bar) หมายความว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างชนิดเดียวกันและอยู่ในสภาพการตากแห้งที่เหมือนกัน ไม่น้อยกว่า 5 ตัวอย่าง ซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดหดตัวเพิ่มมากขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง [15,19,20] การตากแห้งที่ระยะเวลา 7 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าการหดตัวสูงสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11 เมื่อพิจารณาทุกอายุการตากแห้ง ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินหดตัวมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมอย่างชัดเจน นอกจากนี้ การตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าร้อยละ 55 ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 แสดงค่าการหดตัวต่ำที่สุด ขณะที่แนวโน้มการตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 40 การหดตัวลดลงตามสัดส่วนการผสมเถ้าถ่านหินที่เพิ่มมากขึ้น

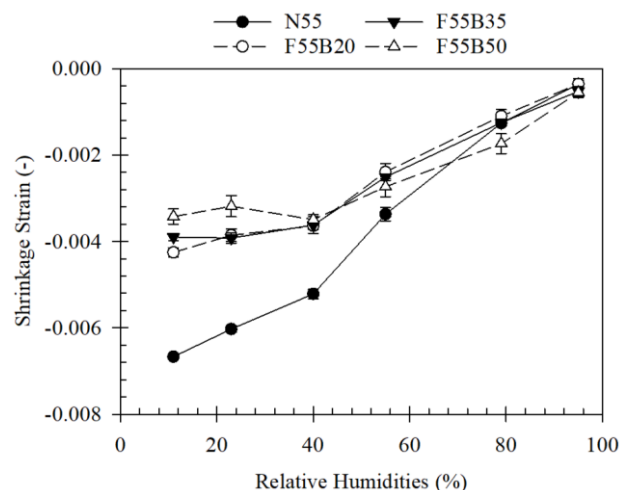
เมื่อพิจารณาการตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมแสดงค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน ยิ่งไป

กว่านั้น ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 (F55B50) ภายใต้การตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ที่อายุการตากแห้งมากกว่า 14 วัน พบว่าการหดตัวมีค่ามากกว่าการตากแห้งที่ร้อยละ 11 และ 23

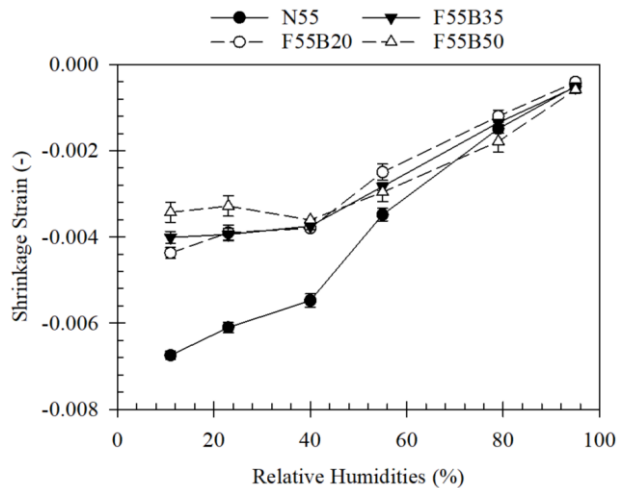
เมื่อพิจารณาซีเมนต์เพสต์ F55B50 ที่อายุการตากแห้งมากกว่า 14 วัน มีแนวโน้มการหดตัวสูงที่สุดภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง (มากกว่าร้อยละ 79) และมีการหดตัวต่ำกว่า N55 แต่ยังคงหดตัวมากกว่า F55B20 และ F55B35 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าร้อยละ 40 แสดงการหดตัวที่ต่ำที่สุด



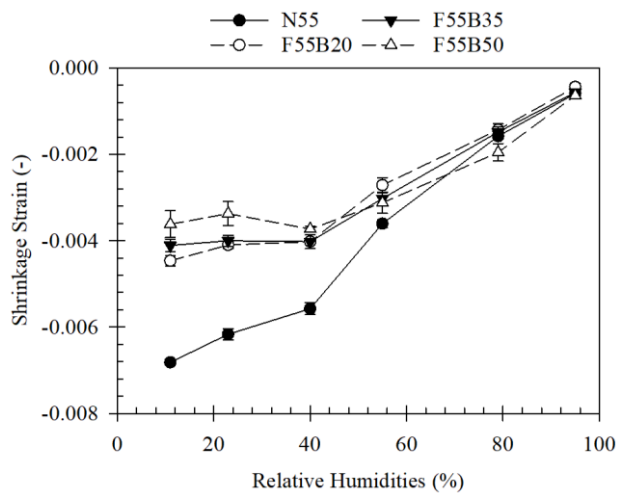
(ก) 7 วัน



(ข) 14 วัน



(ค) 28 วัน



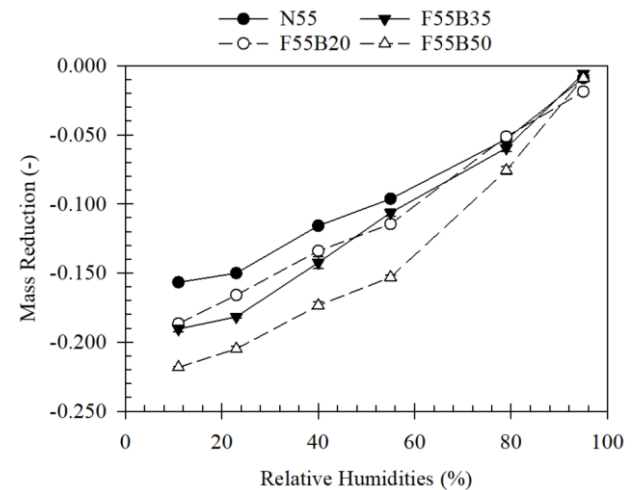
(ง) 56 วัน

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์และความชื้นสัมพัทธ์

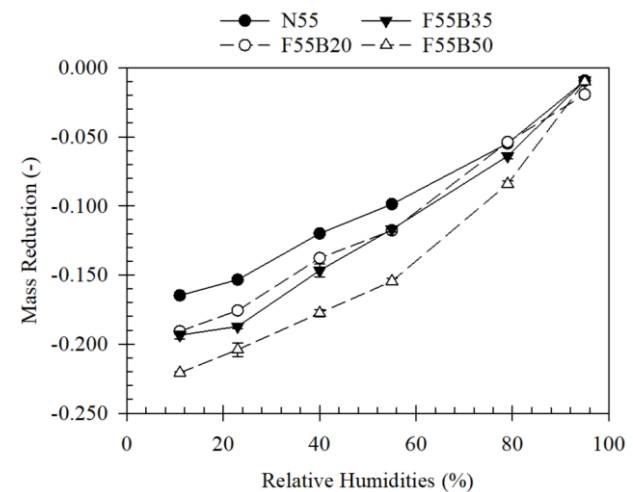
ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิด และระดับความชื้นสัมพัทธ์ ตามระยะเวลาการตากแห้ง แสดงดังรูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการตากแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลงทุกอายุการตากแห้ง โดยซีเมนต์เพสต์ซึ่งตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด นอกจากนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดในหมู่ซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม เมื่อพิจารณาการตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11, 40 และ 55 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ F55B20 และ F55B35 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุการตากแห้งมากกว่า 28 วัน

โดยทั่วไป ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินจะหดตัวมากขึ้นตามปริมาณน้ำที่สูญเสียไป [15] แต่การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไป กล่าวคือ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการ

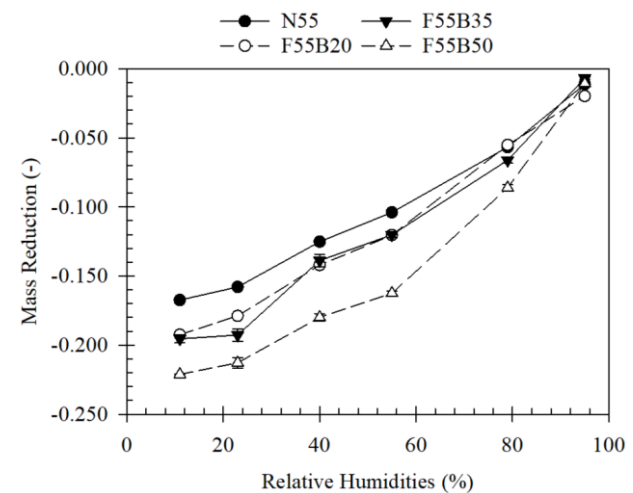
สูญเสียน้ำหนักที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน แต่การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการหดตัวที่น้อยลงอย่างชัดเจน



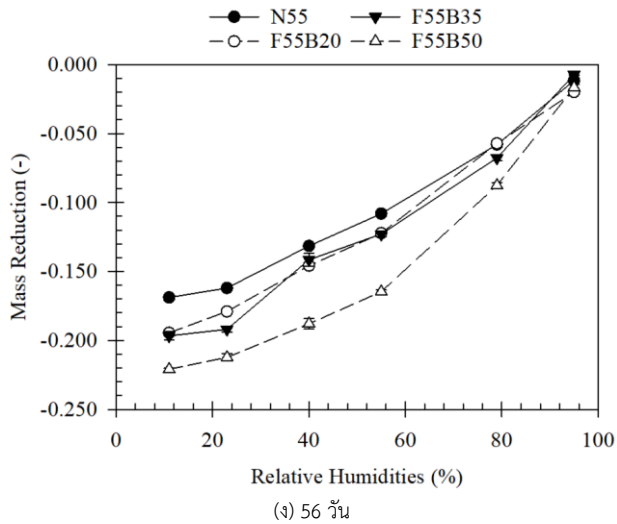
(ก) 7 วัน



(ข) 14 วัน



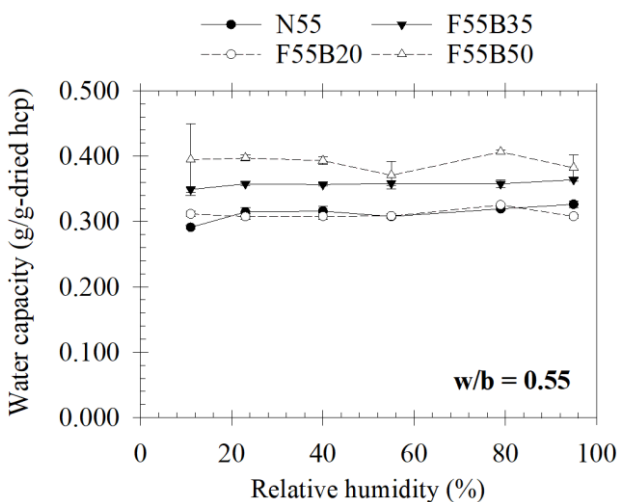
(ค) 28 วัน



รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งแตกต่างกัน

3.2 ความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 8 แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยน้ำอีกครั้ง การตากแห้งซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการตากแห้ง ทั้งนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินและที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำที่สุดในบรรดาซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 และ 50 มีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมเถ้าถ่านหินทำให้โพรงที่อยู่ในซีเมนต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น [1] ความสามารถในการกักเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นสื่อได้ถึงปริมาณโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้มีปริมาณโพรงที่มากขึ้น



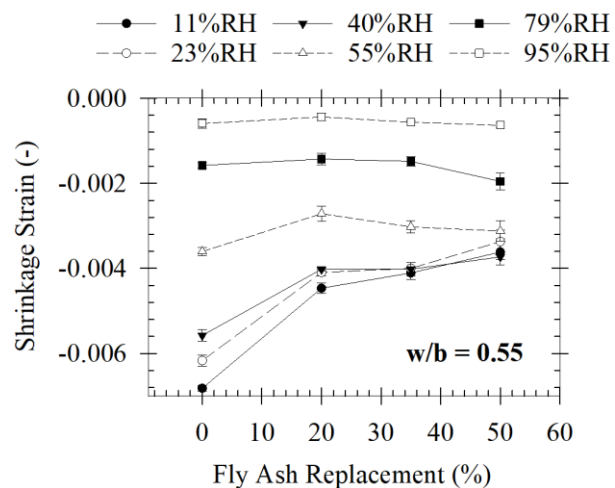
รูปที่ 8 ความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์

3.3 ผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการหดตัวแห้ง

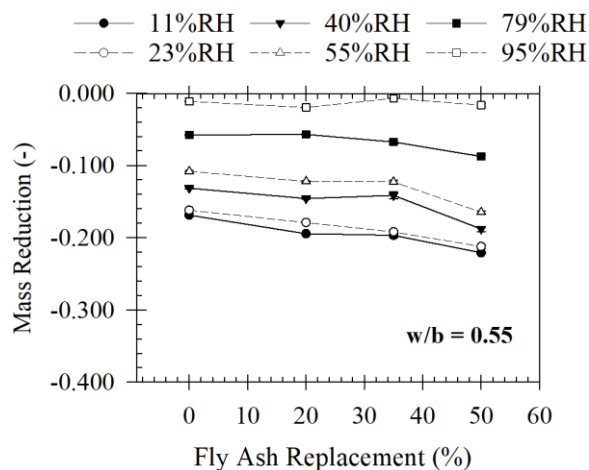
รูปที่ 9 และ 10 แสดงการหดตัวและการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการตากแห้ง 56 วัน เปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าถ่านหินที่ผสมในซีเมนต์เพสต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 ปริมาณเถ้าถ่านหินไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ รวมไปถึงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 79 แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [21] อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 79 มีทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนัก โดยการผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 เกิดการหดตัวและสูญเสียน้ำหนักที่สูงที่สุด เนื่องจากการผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ส่งผลให้เกิดโพรงและซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง จึงเกิดการสูญเสียน้ำและการหดตัวไปพร้อมกัน

อิทธิพลของปริมาณเถ้าถ่านหินเริ่มส่งผลต่อการหดตัวแห้งอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าร้อยละ 55 ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีการหดตัวมากที่สุด ขณะที่การผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีการหดตัวต่ำที่สุด นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในซีเมนต์เพสต์ส่งผลให้การหดตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 79

การตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 40 ซึ่งเป็นสภาพการตากแห้งที่มีความรุนแรง พบว่า การหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักมีทิศทางที่ตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม การหดตัวมีค่าลดลง แต่การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินมีผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้มากขึ้น (ปริมาณโพรงมากขึ้น) ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงมีการสูญเสียน้ำที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมหรือผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณน้อย ส่วนสาเหตุของการหดตัวที่ลดลงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงอาจเกิดจากการยึดยั้ง (restraint) ของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (unreacted fly ash) ป้องกันไม่ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-S-H) เกิดการหดตัว ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงจะมีระดับการเกิดปฏิกิริยา (degree of reaction) ที่ต่ำ ทำให้เหลือปริมาณเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่สูงในซีเมนต์เพสต์ [21]



รูปที่ 9 ผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการตากแห้ง 56 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าถ่านหินและการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการตากแห้ง 56 วัน

4. บทสรุป

งานวิจัยเรื่องผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำต่อการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้ว่าการผสมเถ้าถ่านหินในซีเมนต์เพสต์มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการหดตัว การสูญเสียน้ำหนัก และความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ การผสมเถ้าถ่านหินสามารถลดการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณมากและอยู่ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม การผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการกักเก็บน้ำที่มากขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณเถ้าถ่านหิน ด้วยเหตุนี้ การศึกษาผลกระทบของการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินยังเป็นหัวข้อที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา เลขที่สัญญา FF66-RIM034 และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม รวมไปถึงทุนอุดหนุนการทวิทายาธิพนธ์ มหาวิทยาลัยพะเยา ปีการศึกษา 2566 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน) และบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chindaprasirt, P., Jaturapitakul, C. and Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp.425-428.
- [2] Ye, H., Radlinska, A., and Neves, J. (2017). Drying and carbonation shrinkage of cement paste containing alkalis. *Materials and structures*. 50(2),
- [3] Hu, X., Shi, Z., Shi, C., Wu, Z., Tong, B., Ou, Z., and de Schutter, G. (2017). Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Construction and Building Materials*, 149, pp.406-415.
- [4] Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), pp.25-31.
- [5] Tao, Y., Sun, K., Yang, J., Shen, B., Zhang, Y., and Hui, D. (2024). Influence of calcium oxide and sodium silicate on the setting, hardening and shrinkage properties of alkali-activated slag/fly ash mortars. *Construction and Building Materials*, 453.
- [6] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), pp.1087-1092.
- [7] Vimonsatit, V., Chindaprasirt, P., Ruangsiriyakul, S., and Sata, V. (2015). Influence of fly ash fineness on water requirement and shrinkage of blended cement mortars. *KKU Engineering Journal*, 42, pp.311-316.
- [8] Chindaprasirt, P., and Rattanasak, U. (2011). Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. *Materials & Design*, 32(2), pp.723-727.
- [9] International, A. (2009). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. In *ASTM C 157/C 157M - 08* (pp. 1-7). Laurentian University.
- [10] International, A. (2009). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. In *ASTM C 490/C 490M - 08* (pp. 1-5). Laurentian University.
- [11] กองบริการดิจิทัลอุตุณยมหาวิทยาลัย. กรมอุตุณยมหาวิทยาลัย. ความชื้นสัมพัทธ์. เข้าถึงได้จาก : <https://url.in.th/jsVgy>
- [12] International, A. (2021). Standard Specification for Portland Cement. In *ASTM C150/C150M - 21* (pp. 1-5).
- [13] Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., and Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcoming, and Solutions. *ACI Materials Journal*, 118(147), pp.147-159.
- [14] Maruyama, I., Nishioka, Y., Igarashi, G., and Matsui, K. (2014). Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process. *Cement and Concrete Research*, 58, pp.20-34.
- [15] Maruyama, I. (2010). Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8, pp.187-200.
- [16] Haji, T., Kotera, S., Kurihara, R., and Maruyama, I. Impact of demolding age and mineral composition of cement on drying shrinkage of cement paste.
- [17] Greenspan, L. (1977). Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, 81A, pp.89-96.

- [18] Maruyama, I., Kishi, N., and Aili, A. (2021). The Relative Humidity Range for the Development of Irreversible Shrinkage in Hardened Cement Paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(6), pp.585-592.
- [19] Nagamatsu, S., Sato, Y., and Ohtsune, Y. (1992). Relationship between degree of drying and drying shrinkage strain of hardened cement paste. *Journal of Struct. Constr.*, pp.13-21.
- [20] Feldman, R. F., & Sereda, P. J. (1969). A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption length change and mechanical properties. *Materials and Structures*, 1, pp.509-520.
- [21] Segawa, M., Kurihara, R., Aili, A., Igarashi, G., and Maruyama, I. (2024). Shrinkage reduction mechanism of low Ca/Si ratio C-A-S-H in cement pastes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 186