บทความวิจัย

ความสามารถเทได้ สมบัติทางกล และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมวัสดุสามประสาน

ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์ เอนก เนรมิตรครบุรี* และ วันโชค เครือหงษ์
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2252 7029 อีเมล: Anek_na@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.008
รับเมื่อ 19 มีนาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 25 มิถุนายน 2563 ตอบรับเมื่อ 3 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 16 มีนาคม 2564
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถเทได้ สมบัติทางกล และการต้านทานสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยผสมวัสดุสามประสาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยปริมาณสูงร้อยละ 50 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้ ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และใช้สารลดน้ำพิเศษที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการทดสอบ หน่วยน้ำหนัก การไหลแผ่และการสูญเสียค่าการไหลแผ่ ความต้านทานการแยกตัว การก่อตัว ความพรุน การดูดซึมน้ำ กำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักต่อสารละลายซัลเฟต ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณเถ้าลอยในการแทนที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ คอนกรีตแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่า การไหลแผ่และการสูญเสียค่าการไหลแผ่ และความต้านทานการแยกตัวดีที่สุด ส่วนความพรุน และการดูดซึมน้ำ เมื่อมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 60 ผสมร่วมกับซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่า มีค่ามากที่สุด ส่วนการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีการก่อตัวระยะต้นเร็วที่สุด ในขณะที่ค่ากำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักต่อสารละลายซัลเฟต ที่อายุ 180 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 396.21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้นการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณสูงในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการต้านทานสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

คำสำคัญ: ความสามารถเทได้ สมบัติทางกล การต้านทานสารละลายซัลเฟต คอนกรีตชนิดไหลตัวได้

การอ้างอิงบทความ: ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์, เอนก เนรมิตรครบุรี, และ วันโชค เครือหงษ์, "ความสามารถเทได้ สมบัติทางกล และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ผสมวัสดุสามประสาน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 4, หน้า 685–699, ต.ค.–ธ.ค. 2564.

Research Article

Workability, Mechanical Properties and Sulfate Resistance of Self Compacting Concrete with Ternary Blended Cementitious Materials

Sattawat Haruehansapong, Anek Neramitkornburee* and Wunchock Kroehong
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2252 7029, E–mail: Anek_na@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.008
Received 19 March 2020; Revised 25 June 2020; Accepted 3 July 2020; Published online: 16 March 2021
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to study the workability, mechanical properties, and sulfate resistance of self-compacting concrete (SCC) ternary blended cementitious materials. Portland cement type I was replaced by high volume fly ash at 50%, 60%, and 70% by weight of binder. Silica fume was used to partially replace cement at the rate of 10% by weight of binder. The water to binder ratio of 0.4 was used and superplasticizer was used at 2% by weight of binder. The unit weight, slump flow, and slump flow loss, segregation resistance, setting time, porosity, water absorption, compressive strength, and weight loss of sulfate were investigated. The results showed that the replacement content of fly ash affected directly on the workability of SCC. The concrete containing 70% of fly ash had the best flowing ability, flow loss, and segregation resistance. The porosity and water absorption when using fly ash replacement content of 60% with silica fume replacement content of 10% by weight of binder had the highest value. The replacement fly ash content of 50% by weight of binder had the fastest initial setting time while the compressive strength and weight loss in sulfate at the age of 180 days had the highest compressive strength at 396.21 kilogram square centimeter and the ratio of weight loss was lower than for control concrete. Therefore, with a high volume of fly ash replacement up to 50% by weight of binder was optimum replacement content for sulfate resistance of SCC.

Keywords: Workability, Mechanical Properties, Sulfate Resistance, Self Compacting Concrete

Please cite this article as: S. Haruehansapong, A. Neramitkornburee, and W. Kroehong, "Workability, mechanical properties and sulfate resistance of self compacting concrete with ternary blended cementitious materials," *The Journal of KMUTNB,* vol. 31, no. 4, pp. 685–699, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนับเป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และในงานก่อสร้างมักจะควบคู่ไปกับงานสถาปัตยกรรมสมัยใหม่โดยมีการออกแบบโครงสร้างและรูปทรงอาคารที่ต้องการส่วนโค้ง หรือส่วนเว้า เหลี่ยมมุม ทำให้การออกแบบโครงสร้างต้องอาศัยเหล็กเสริมเป็นตัวช่วยในความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยการออกแบบโครงสร้างอาจก่อให้เกิดปัญหากับงานคอนกรีตได้ กล่าวคือเนื้อคอนกรีตอาจไม่สามารถไหลเข้าแบบตามซอกมุมหรือผ่านช่องเหล็กเสริมได้โดยง่าย ถึงแม้จะมีการจี้และเขย่าแล้วก็ตาม สำหรับงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น การทำคอนกรีตให้แน่นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับน้ำหนัก และมีความทนทาน แต่สำหรับงานก่อสร้างหลายประเภทการทำคอนกรีตให้แน่นด้วยวิธีการปกติ หรือใช้คอนกรีตปกติไม่สามารถทำได้ เช่น งานโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมซับซ้อนและหนาแน่นมากเป็นพิเศษ หรือโครงสร้างที่มีการจี้เขย่าทำได้ยากหรือทำไม่ได้เลย รวมทั้งทั้งโครงสร้างเสาหรือกำแพงสูงที่ไม่สามารถเทคอนกรีตได้เพียงครั้งเดียวล้วนก่อให้เกิดปัญหาที่หนักใจแก่วิศวกรผู้ออกแบบ ผู้รับเหมาและผู้ควบคุมงาน ว่าจะทำอย่างไรให้คอนกรีตไหลผ่านเหล็กเสริมที่หนาแน่นมากๆ เข้าเต็มแบบได้โดยไม่เกิดการแยกตัว รวมทั้งเมื่อถอดไม้แบบออกคอนกรีตมีเนื้อแน่นไม่เป็นรูโพรงสามารถรองรับน้ำหนักโครงสร้างตามที่ออกแบบไว้ได้ หรืองานที่มีวิธีการเทคอนกรีตที่ไม่สามารถทำด้วยวิธีปกติ เช่น วิธีการเทด้วยท่อส่งคอนกรีตที่ต้องการคอนกรีตที่มีคุณสมบัติไหลตัวเป็นพิเศษ หรือแม้กระทั่งงานซ่อมโครงสร้างที่คอนกรีตต้องมีคุณสมบัติทดแทนวัสดุเก่าได้โดยมีวิธีการทำให้คอนกรีตแน่นได้ง่ายที่สุด ซึ่งในปัจจุบันอาคารสูงเริ่มมีบทบาทในภาคธุรกิจและที่อยู่อาศัยมากขึ้น ซึ่งมาจากปัจจัยหลักคือ ราคาที่ดินที่สูงขึ้น ดังนั้นการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องใช้คอนกรีตกำลังสูงเพื่อลดขนาดขององค์อาคารลง และคอนกรีตต้องมีความสามารถในการทำงานได้สูง และสามารถเทเข้าแบบได้ง่ายตามที่ได้รับออกแบบจากงานทางด้านสถาปัตยกรรม เพราะฉะนั้นคอนกรีตกำลังสูงที่ไหลเข้าแบบด้วยตัวเองได้ (High Strength Self Compacting Concrete) จึงได้เป็นตัวเลือกการใช้งานในทางด้านงานสถาปัตยกรรมดังกล่าว กอปรกับคุณสมบัติคอนกรีตที่ดีต้องมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งานโดยยังสามารถคงรูปร่าง คุณสมบัติ และคุณภาพในการใช้งานได้ดี โครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปนั้นที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟตจากแหล่งที่มาต่างๆ เช่น ในดิน น้ำใต้ดิน หรือน้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท ส่งผลให้คอนกรีตเกิดปัญหาการผุสึกกร่อน พองตัว และเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรง ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ออกแบบไว้ได้ในที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้คอนกรีตที่สามารถทนทานต่อความเสียหายจากสารละลายซัลเฟตได้จึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องนำมาพิจารณา [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม หรือเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สามารถที่จะต้านทานสารละลายซัลเฟตได้เป็นอย่างดี [2] สำหรับเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่งที่นำมาเป็นส่วนผสมให้กับคอนกรีตกำลังสูงได้ [3] เพื่อให้ได้การไหลและการเกาะตัวกันดี ซึ่งในปัจจุบันเถ้าลอยก็เป็นส่วนผสมหนึ่งในการทำให้คอนกรีตไหลเข้าแบบด้วยตัวเองได้ง่าย ดังนั้นสำหรับคอนกรีตกำลังสูงและไหลตัวได้ดีอาจต้องมีการใช้ซิลิกาฟูมผสมร่วมกับเถ้าลอย เพื่อให้สารปอซโซลานทั้งสองช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตในทั้งทางด้านกำลัง ความคงทนต่อสารละลายซัลเฟต และความสามารถของคอนกรีตในการไหลเข้าแบบด้วยตัวเองได้ (Self Compacting Concrete; SCC)

จากงานวิจัยของ Dinaker และคณะ [4] ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 85 โดยน้ำหนักวัสดุประสานพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการซึมผ่านมากขึ้นตามไปด้วย และมีแนวโน้มต้านทานสารละลายกรดได้ดีเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากขึ้น เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีต ในการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดลงได้ สำเริง และปริญญา [5] ได้ใช้เถ้าลอย

หลากหลายขนาดด้วยมีการบดละเอียดที่ขนาดแต่งต่างกันทั้งเถ้าลอยขนาดหยาบ ขนาดละเอียดปานกลาง และเถ้าลอยขนาดละเอียดมาก แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่า เถ้าลอยที่ละเอียดมากสามารถต้านทานสารละลายคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยขนาดอื่นๆ เนื่องจากผลความละเอียดของเถ้าลอยที่สามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงของมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่น และองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาต่อจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตของปูนซีเมนต์ กล่าวคือวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปูนซีเมนต์กับน้ำโดยที่สารประกอบ SiO_2 ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต และได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแทรกตัวในโพรงคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้นสามารถรับกำลังได้ดีสำเริง และปริญญา [6] ได้ศึกษาคุณสมบัติของ SCC โดยผสมวัสดุประสานร่วมสามชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และฝุ่นหินปูน พบว่า การใช้วัสดุประสานร่วมกันทั้งสามชนิดสามารถปรับปรุงสมบัติของ SCC ได้ให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ SCC ควบคุมที่ไม่ได้ใช้วัสดุประสานผสมร่วมกัน และจากงานวิจัยของ ปริญญา และสำเริง [7] ได้ศึกษาการต้านทานสารละลายซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมวัสดุปอซโซลาน เถ้าลอยและเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ และค่า pH ของสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย และยังพบว่า การแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานทั้ง 2 ชนิดที่ร้อยละ 40 ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้เป็นอย่างดี เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีในวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งขนาดอนุภาคของเถ้าลอยสามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงของซีเมนต์มอร์ตาร์ ผลผลิตดังกล่าวนี้จึงเพิ่มความทึบแน่นให้แก่ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์และลดการซึมผ่านของสารละลายซัลเฟตลงได้ ในการผลิต SCC เนื่องจากต้องการแก้ปัญหาการเทคอนกรีตในที่ซึ่งมีข้อจำกัดในการทำคอนกรีตให้แน่นด้วยการกระทุ้งหรือการจี้ ความสามารถทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตโดยทั่วไปอาจใช้สารผสมเพิ่มหรือสารลดน้ำพิเศษ จากงานวิจัยของ Khatib [8] กำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาเมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.6 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าที่ลดลง และยังพบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าที่น้อยลงเมื่อมีการใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการบ่ม SCC ด้วยอุณหภูมิสูงส่งผลกระทบต่อขนาดการกระจายตัวของโพรงขนาดใหญ่ แต่จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาตรของโพรงทั้งหมดของคอนกรีต [9]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสามารถการเทได้ของคอนกรีตไหลโดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูง และซิลิกาฟูม แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และสารลดน้ำพิเศษคงที่ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมาผสมในงานคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ โดยมุ่งประเด็นของความสามารถทำงานได้ การไหลแผ่ การก่อตัว ความพรุน การดูดซึมน้ำ กำลังอัด และความต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณที่สูง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 ส่วนซิลิกาฟูมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณของ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 85 และเป็นซิลิกาฟูม ประเภท Densified

สารเคมีที่ใช้ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ชนิดเกรดอุตสาหกรรม ความเข้มข้น 5 โมลาร์ สารลดการแยกตัวคอนกรีต และสารลดน้ำพิเศษทำมาจากสารประกอบ

พอลิเมอร์ชนิดลดน้ำอย่างมากตามมาตรฐาน ASTM C494 [10] สมบัติทางการภาพและทางเคมีของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพ และเคมีของวัสดุประสาน

Physical and Chemical Properties	Cement Type 1	Fly Ash	Silica Fume
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.80	33.40	88.30
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	5.50	17.80	1.17
Iron Oxide (Fe_2O_3)	3.20	11.90	4.76
Calcium Oxide (CaO)	65.00	17.00	0.48
Magnesium Oxide (MgO)	1.10	2.05	2.14
Sulfer Trioxide (SO_3)	3.00	3.57	1.05
Loss On Ignition (LOI)	2.90	2.00	2.10
Specific gravity	3.03	2.33	2.20
Median particle size (μm)	15.70	44.30	0.15

2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

นำเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และมีการแทนที่ซิลิกาฟูม โดยทำการแทนที่ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานคงที่เท่ากับ 0.4 และใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ไหลเข้าแบบด้วยตัวเองดังแสดงในตารางที่ 2

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (Unit Weight) ทดสอบตามมาตรฐาน ACTM C138 [11]

2.3.2 การทดสอบค่าการไหลแผ่ และการสูญเสียค่าการไหลแผ่

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 [12] โดยวัดค่าการไหลแผ่ และเวลาการไหลแผ่โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ในขณะการกรอกคอนกรีตต้องไม่มีการสั่นสะเทือนหรือการกระทุ้งใดๆ ทั้งสิ้น เมื่อเต็มแล้วให้ยกกรวยขึ้นในแนวดิ่ง ปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่อย่างอิสระด้วยน้ำหนักตัวเอง เริ่มจับเวลาตั้งแต่ยกกรวยขึ้นจนคอนกรีตไหลแผ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร เมื่อคอนกรีตหยุดไหลวัดขนาดของการไหลแผ่ทั้ง 2 ด้าน และนำมาเฉลี่ยหาค่าการไหลแผ่ ส่วนในการทดสอบการ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีตที่ไหลเข้าแบบด้วยตัวเอง (SCC)

Sample	Cement (g)	Sand (g)	Stone (g)	Fly Ash (g)	Silica Fume (g)	Water (ml)	SP (ml)
CT	500	950	800	-	-	200	10
FA50	250	950	800	250	-	200	10
FA60	200	950	800	300	-	200	10
FA70	150	950	800	350	-	200	10
FA50SF10	200	950	800	250	50	200	10
FA60SF10	150	950	800	300	50	200	10

หมายเหตุ :

CT หมายถึง คอนกรีตควบคุม

FA {50, 60, 70} หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

FA50SF10 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

FA60SF10 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

สูญเสียค่าไหลแผ่ หลังจากคอนกรีตไหลแผ่อย่างอิสระด้วยน้ำหนักตัวเองแล้ว ให้ทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไหลแผ่ในแกนแนวนอนและแนวตั้ง นำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย ทำการทดสอบทุกๆ ช่วงเวลา 60 นาที จนเวลาครบ 4 ชั่วโมง

2.3.3 การทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน

ทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ที่ประกอบขึ้นเป็นรูปวงแหวน (J-Ring) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และซี่ของเหล็กกีดขวางการไหลสูง 10 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1621 [13] โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่ยกกรวยขึ้นจนถึงคอนกรีตหยุดไหล วัดขนาดของการไหลแผ่ 2 ด้าน เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการไหลแผ่สูงสุดของคอนกรีต

2.3.4 การทดสอบความต้านทานการแยกตัว

ทดสอบการไหลในแนวดิ่งด้วยกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funel) ตามมาตรฐาน EFNARC [14] โดยทำการปิดช่องด้านล่างจากนั้นเติมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการอัดแน่น จากนั้นจึงทำการเปิดช่องด้านล่างเพื่อปล่อยคอนกรีตให้ไหลออกอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกพร้อมกับการจับเวลาการไหลตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น จนคอนกรีตไหลออกจากกล่องรูปทรงวีจนหมดโดยให้อยู่ในช่วงระยะเวลา 6 ถึง 24 วินาที

2.3.5 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 [15] เทคอนกรีตลงในแบบหล่อขนาด 150x150x150 มิลลิเมตร ใช้ค้อนยางเคาะด้านข้างเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากส่วนผสม ปาดผิวหน้าให้เรียบโดยให้ผิวของคอนกรีตให้ต่ำกว่าขอบบนของแบบหล่อ 1 เซนติเมตร โดยในการทดสอบครั้งแรกเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ทำการทดสอบการจมของหัวกดทุกๆ 1 ชั่วโมง จนให้ได้ค่าการก่อตัวตอนปลายที่มากกว่า 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้หัวกดจากขนาดใหญ่ไปหาเล็ก และในการกดต้องให้จุดที่ทำการทดสอบห่างจากจุดเดิมและห่างจากขอบแบบหล่อไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร

2.3.6 การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

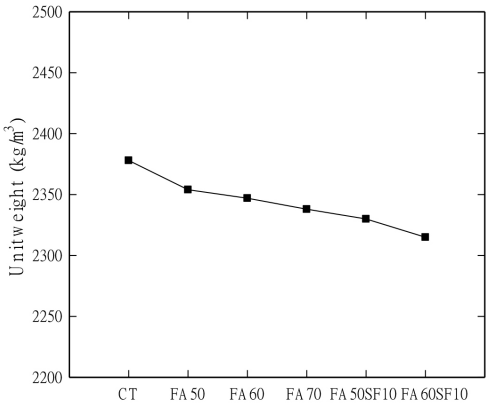
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 [16] เมื่อทำการแช่ก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 มิลลิเมตร บ่มในน้ำจนครบอายุที่ 28 วัน แล้วนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาซับด้วยผ้าแห้งมาเช็ดตัวอย่างให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า นำก้อนตัวอย่างไปต้มที่น้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปิดไฟตั้งทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 14 ชั่วโมง จนตัวอย่างเย็นลงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาซับด้วยผ้าแห้งชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักในน้ำ บันทึกค่า และนำก้อนตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างออกจากตู้อบมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า

2.3.7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตต่อการต้านทานสารละลายซัลเฟต

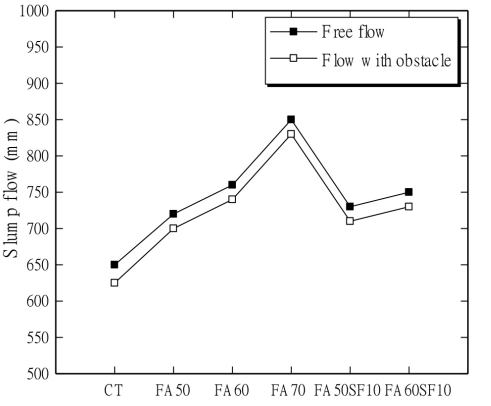
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C109 [17] โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 100 × 100 × 100 มิลลิเมตร หลังจากบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน ในน้ำประปาจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แช่ในน้ำประปาและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำการทดสอบเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน แต่ละกลุ่มอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

2.3.8 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 100 × 100 × 100 มิลลิเมตร หลังจากบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน ในน้ำประปาจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แล้วหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตโดยทำการชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่ตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 60, 90 และ 180 วัน ก่อนชั่งน้ำหนักทำการขัดก้อนตัวอย่างด้วยแปรงขนอ่อนก่อนจึงนำขึ้นผึ่งในอากาศนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งหาค่าการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอายุ แล้วบันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนักเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักก่อนแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตหลังจากบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน ในน้ำประปา และคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก โดยทดสอบการสูญเสียน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C694 [18]



รูปที่ 1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต



รูปที่ 2 ระยะการไหลแผ่อิสระ กับการไหลแผ่ผ่านสิ่งกีดขวางของ SCC

3. ผลการทดลอง

3.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

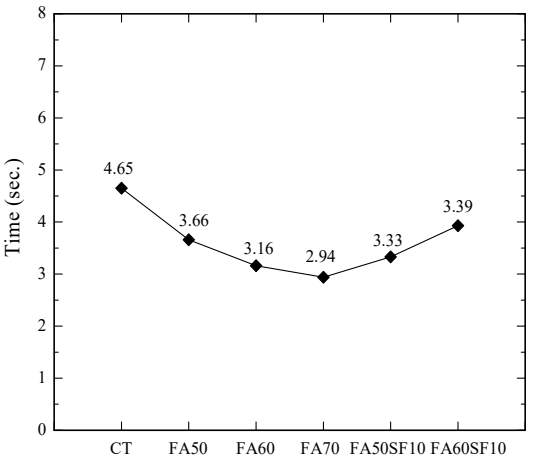
การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ดังแสดงรูปที่ 1 พบว่า หน่วยน้ำหนักคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและซิลิกาฟูมจะมีหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 2,315 ถึง 2,378 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้ เนื่องจากเถ้าลอยและซิลิกาฟูมมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ คือ 2.33, 2.20 และ 3.03 ตามลำดับ [3] เมื่อมีการแทนที่ด้วยวัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นจึงทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

3.2 ระยะการไหลแผ่ของคอนกรีต

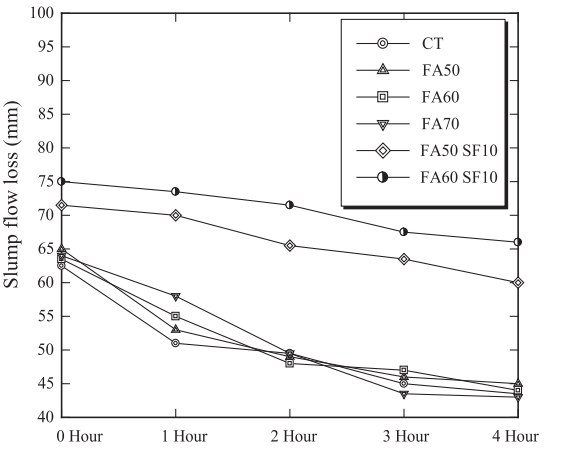
การทดสอบระยะการไหลแผ่ เนื่องจากผลต่างของระยะการไหลแผ่อิสระ (Free Flow) กับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Flow with Obstacle) ถูกนำมาคำนวณเพื่อประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ตามมาตรฐาน ASTM C1621 [13] โดยจะกำหนดผลต่างของการไหลแผ่ทั้ง 2 แบบอยู่ในช่วง 0 ถึง 25 มิลลิเมตร ถือได้ว่าไม่เกิดกีดขวางของการไหล แสดงดังในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ทุกอัตราส่วนผสม มีผลต่างของการไหลทั้งสองอยู่ในช่วง 20 ถึง 25 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดถือว่าคอนกรีตไม่มีการกีดขวางจากการไหล หรืออีกนัยหนึ่งคือสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีโดยไม่เกิดการติดขัด โดยตัวอย่างคอนกรีตมีระยะการไหลแผ่อยู่ในช่วง 650 ถึง 750 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [14] ที่มีค่าอยู่ในช่วง 650 ถึง 800 มิลลิเมตร แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้อยู่ในระดับที่ดี โดยคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 70 ของปูนซีเมนต์ (FA70) พบว่า มีการไหลแผ่ที่ดีที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ทำการผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงจึงทำให้ความสามารถในการไหลแผ่ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีการแทนที่โดยเถ้าลอย เนื่องจากคุณสมบัติปูนซีเมนต์มีความหนืดกว่าเถ้าลอยและคุณสมบัติของเถ้าลอยมีลักษณะทางกายภาพที่กลมตัน และดูดซึมน้ำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ [3] จึงทำให้ความสามารถในการไหลแผ่ดีกว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูมและคอนกรีตควบคุม เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยที่มากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการไหลแผ่ที่มากขึ้น [7]

รูปที่ 3 แสดงเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร พบว่า คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ใช้ระยะเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร อยู่ในช่วงเวลา 2.94 ถึง 4.65 วินาที เมื่อ



รูปที่ 3 เวลาในการไหลแผ่จนถึงระยะ 50 เซนติเมตร SCC



รูปที่ 4 การสูญเสียค่าการไหลแผ่ SCC ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

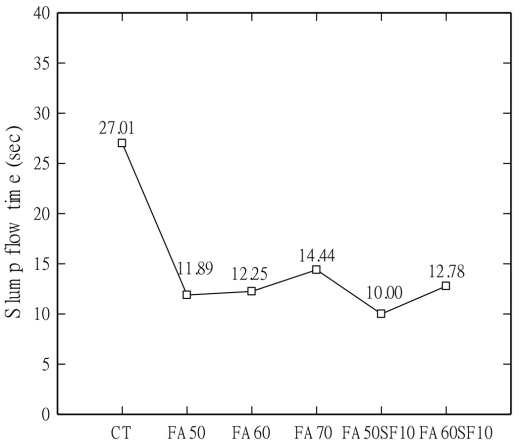
เปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARE [14] กำหนดอยู่ในช่วง 3 ถึง 7 วินาที แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่ มีความสามารถไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร ได้เร็วกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ที่มีซิลิกาฟูมผสมเถ้าลอยอยู่ด้วย เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะทางกายภาพที่ดีคือกลมตัน ส่วนปูนซีเมนต์จะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ค่อนข้างขรุขระเป็นเหลี่ยม ส่วนซิลิกาฟูมนั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าลอย [3] ทำให้มีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเถ้าลอย ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนืดทำให้ไหลแผ่ได้ช้ากว่าเถ้าลอย

3.3 การสูญเสียค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต

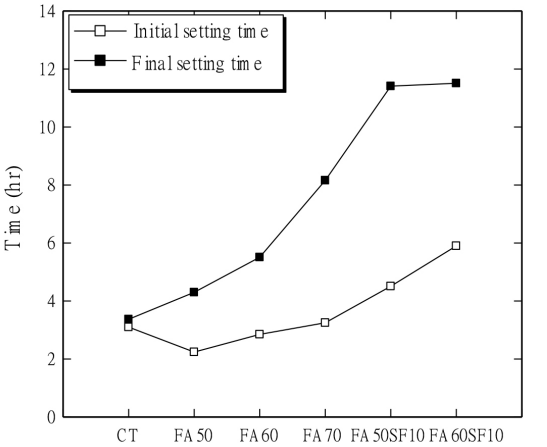
จากการทดสอบการสูญเสียค่าการไหลแผ่ (Slump Flow Loss) ของคอนกรีตชนิดไหลเข้าแบบด้วยตัวเอง โดยทำการทดสอบการสูญเสียค่าไหลแผ่เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและซิลิกาฟูมผสมอยู่ สามารถไหลแผ่ได้เกินกว่า 50 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของ EFNARE [14] ซึ่งกำหนดให้คอนกรีตชนิดไหลตัวได้ต้องมีความสามารถในการไหลแผ่เกินกว่า 50 เซนติเมตร จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการสูญเสียค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมกับตัวอย่างคอนกรีตที่มีเถ้าลอยผสมเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถไหลแผ่ได้เกินกว่า 50 เซนติเมตร ซึ่งการสูญเสียค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสืบเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของการดูดซึมน้ำของมวลรวม และจากการระเหยของน้ำหลังจากทำปฏิกิริยา โดยซิลิกาฟูมสามารถที่จะช่วยลดการดูดซึมและการระเหยของน้ำได้ [19] ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมซิลิกาฟูมร่วมด้วยจึงมีการสูญเสียค่าการไหลแผ่ที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

3.4 การต้านทานความแยกตัว

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแยกตัว (Segregation Resistance) ด้วยกล่องแบนรูปทรงวี พบว่าคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีอยู่ในช่วง 11.58 ถึง 14.40 วินาที ยกเว้นคอนกรีตควบคุมที่เกินกว่าเกณฑ์กำหนดเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมให้ของ EFNARE [14] ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงระยะเวลา 6 ถึง 15 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ระยะเวลาการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น และแสดงถึงความเครียดภายในที่สูงขึ้น [8] โดยตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผ่านเกณฑ์มีสาเหตุมาจากปูนซีเมนต์ที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าเถ้าลอย และซิลิกาฟูม รวมทั้ง



รูปที่ 5 การต้านทานการแยกตัว ของ SCC โดยกล่องแบน



รูปที่ 6 การก่อตัวระยะต้น และการก่อตัวระยะปลายของคอนกรีต

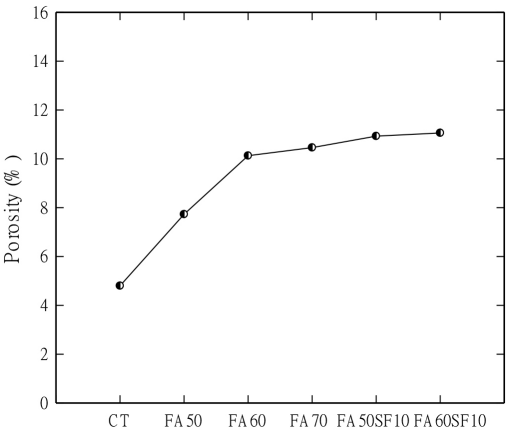
ปริมาณปูนที่มากส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมที่มากขึ้น ในขณะที่การออกแบบส่วนผสมกำหนดปริมาณน้ำและสารลดน้ำคงที่ ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมาก โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูง ซึ่งคุณลักษณะอนุภาคเถ้าลอยมีความกลมตันและขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้ไม่ดูดซึมน้ำมากจึงทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีความหนืดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์มากกว่า

3.5 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

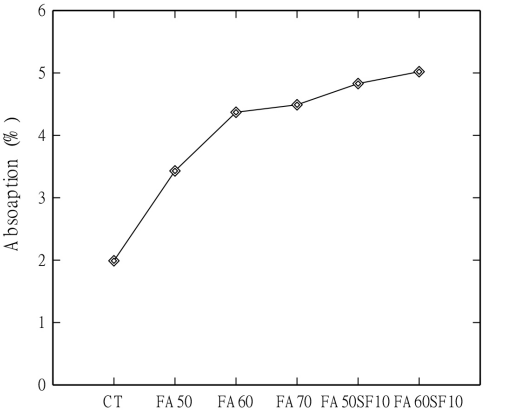
จากการทดสอบระยะเวลาก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูมจะมีการก่อตัวทั้งระยะต้น (Initial Setting Time) และระยะปลาย (Final Setting Time) ที่ช้ากว่าอัตราส่วนผสมที่ไม่มีซิลิกาฟูม ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (FA50) จะมีการก่อตัวระยะต้นที่เร็วที่สุด แต่คอนกรีตควบคุมจะมีการก่อตัวระยะปลายที่เร็วกว่าตัวอย่างทั้งหมด เนื่องจากการแทนที่วัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของเถ้าลอย และซิลิกาฟูมมีผลต่อระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดระยะการก่อตัวที่ช้าขึ้น [3] ตัวอย่าง FA50SF10 และ FA60SF10 มีระยะเวลาการก่อตัวระยะปลายที่ใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการใส่วัสดุซิลิกาฟูมเพิ่มเข้าไป ซึ่งซิลิกาฟูมนั้นมีอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าลอย มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงทำให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความข้นหนืดส่งผลให้เกิดการก่อตัวที่ช้ากว่าวัสดุเถ้าลอย เมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และสารลดน้ำพิเศษคงที่ ซึ่งผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Lateef และคณะ [20] พบว่าเมื่อมีการใช้ซิลิกาฟูมผสมร่วมส่งผลให้ตัวอย่างมีการก่อตัวระยะปลายที่ใกล้เคียงกัน

3.6 ความพรุนของคอนกรีต

ผลการทดสอบหาร้อยละความพรุน (Porosity) ของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงที่คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงรูปที่ 7 พบว่าร้อยละความพรุนของตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดอยู่ในช่วง 4.80 ถึง 11.06 เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จึงทำให้ร้อยละความพรุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยมีความเป็นรูพรุนสูง และมีขนาดที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดความพรุนตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย [21] จากการทดสอบวัสดุปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และซิลิกาฟูมในงานวิจัยของ Chi และคณะ



รูปที่ 7 ร้อยละความพรุนของคอนกรีต



รูปที่ 8 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

[22] พบว่า วัสดุเถ้าลอยมีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 (FA50) มีความพรุนน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่แทนด้วนวัสดุประสานทั้งหมดรองลงมาจากคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตจึงทำให้เกิดรูพรุนและช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้น คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ สำเริง และปริญญา [6] ซึ่งพบว่า การเพิ่มค่าร้อยละของความพรุนเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของวัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย และเถ้าแกลบ) จึงต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงก็ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากเม็ดปูนซีเมนต์เกิดขึ้นน้อยลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้แม้ว่าความพรุนเพิ่มขึ้น แต่มีผลทางที่ดีในการจัดเรียงตัวและปรับปรุงขนาดของโพรงของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุปอซโซลาน เนื่องจากการเพิ่มของปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยวัสดุประสาน การเพิ่มอายุการบ่มส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง ซึ่งจากงานวิจัยของ Silva และคณะ [23] พบว่า SCC ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ที่อายุ 28, 91 และ 182 วัน โพรงของคาปิลลารี่ใน SCC ที่อายุ 182 วัน ปริมาตรและขนาดโพรงคาปิลลารี่เล็กลง ความพรุนของ SCC ลดลงเมื่อเทียบกับอายุ 28 และ 91 วัน ของ SCC

3.7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption) ชนิดไหลตัวได้ที่อายุ 28 วัน ดังแสดงรูปที่ 8 พบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.99 ขณะที่การดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FA50, FA60, FA70, FA50SF10 และ FA60SF10 มีค่าเท่ากับ 3.43, 4.37, 4.49, 4.83 และ 5.02 ตามลำดับ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับส่วนของผลการทดลองหาร้อยละความพรุนของคอนกรีต เมื่อมีการใช้วัสดุประสานในการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพราะเถ้าลอยเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลงส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงในคอนกรีตจึงเป็นผลทำให้เกิดช่องว่าง และรูพรุน ทำให้คอนกรีตมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปริญญา และสำเริง [7] พบว่า เมื่อใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบ แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความพรุนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ อันเนื่องมาจากความเป็นรูพรุนในตัวของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

3.8 กำลังอัดของคอนกรีต

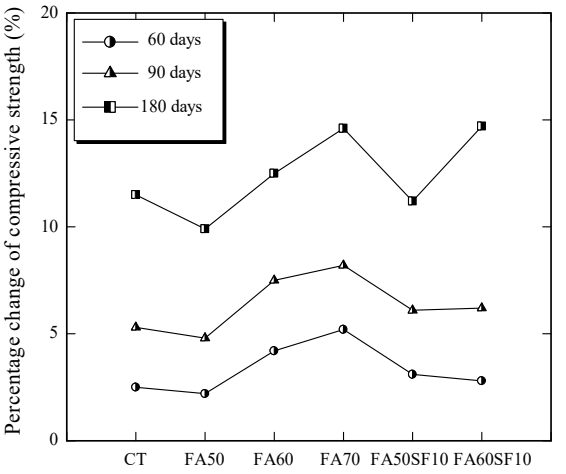
ตารางที่ 3 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้

ตารางที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต

Sample	Compressive Strength at Water (ksc)			Compressive Strength at Sulfate (ksc)		
	60 days	90 days	180 days	60 days	90 days	180 days
CT	353.11	389.00	419.27	344.31	368.38	371.05
FA50	230.34	350.00	440.23	223.2	328.65	396.21
FA60	198.52	309.00	354.00	190.18	285.83	309.75
FA70	186.83	236.14	324.76	177.11	216.78	277.35
FA50SF10	235.82	324.32	355.00	230.63	308.75	318.79
FA60SF10	187.77	281.74	310.00	182.51	264.27	274.43

ที่แช่ในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุการบ่ม 60, 90 และ 180 วัน จากผลการทดสอบ ทั้งที่แช่ในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่า ค่ากำลังอัดที่ 60 วัน มีค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ที่ 186 ถึง 353 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 177 ถึง 344 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังอัดที่ 90 วัน มีค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ที่ 236 ถึง 389 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 216 ถึง 368 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนค่ากำลังอัดที่อายุ 180 วัน มีค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ที่ 310 ถึง 419 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 274 ถึง 396 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำประปาและสารละลายซัลเฟตมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้น ในช่วงอายุ 60 วัน ค่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุมที่แช่ในน้ำประปาและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีกำลังอัดที่มากที่สุดที่ 353.11 และ 344.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงพบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในปริมาณสูงค่ากำลังอัดในช่วงเวลาที่ 60 วัน ค่อนข้างต่ำกว่ากำลังอัดที่ 90 วัน อยู่มากทั้งที่แช่ในน้ำประปา และแมกนีเซียมซัลเฟต เพราะว่าเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมินาไตรออกไซด์ ซึ่งอยู่ในเถ้าลอยทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกรตไฮเดรตจึงทำให้กำลังอัดในระยะยาวเพิ่มมากขึ้น และมีความคงทนเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน [2] เมื่ออายุการบ่มเป็น 180 วัน ทั้งที่แช่ในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเถ้าลอยร้อยละ 50 (FA50) ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 440.23 และ 396.21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าตัวอย่าง FA50 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการต้านทานสารละลายซัลเฟต เนื่องจากเมื่อมีการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากขึ้น ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยานั้นก็จะเกิดขึ้นได้น้อยลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ เพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ [4] และนอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดคอนกรีต คือ ค่าความพรุนของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่มีค่าความพรุนน้อยจะส่งผลทำให้กำลังคอนกรีตสูงขึ้นกว่าคอนกรีตที่มีค่าความพรุนที่มาก [8] โดยจะสอดคล้องกับผลการทดสอบร้อยละความพรุนของคอนกรีต

ร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของ SCC ระหว่างแช่ในน้ำประปากับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน ดังแสดงรูปที่ 9 พบว่า ร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CT FA50, FA60, FA70, FA50SF10 และ FA60SF10 ที่อายุ 60 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.5, 2.2, 4.2, 5.2, 3.1 และ 2.8 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.3, 4.8, 7.5, 8.2, 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ ส่วนที่อายุ 180 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.5, 9.9, 12.5, 14.6, 11.2 และ 14.7 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อตัวอย่างคอนกรีต

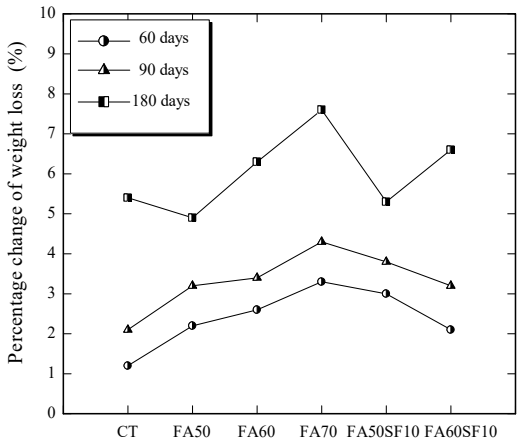


รูปที่ 9 การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตระหว่างการแช่ในน้ำประปา และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน

มีอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ผลของร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มทั้งที่แช่ในน้ำประปา และแมกนีเซียมซัลเฟต ตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 60 วัน เห็นได้ว่ากำลังอัดที่ลดลงนี้ยังไม่เห็นผลที่ชัดเจนไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งมีร้อยละการสูญเสียกำลังอัดที่น้อยมากอยู่ที่ร้อยละ 2 ถึง 5 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 90 และ 180 จะเห็นผลที่ชัดเจนกว่า และเมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัดที่ลดลงพบว่าเถ้าลอยการแทนที่ร้อยละ 50 (FA50) ที่ทุกช่วงอายุการทดสอบมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดที่น้อยกว่าตัวอย่าง CT FA60, FA70, FA50SF10 และ FA60SF10 แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุประสานเป็นส่วนผสมในคอนกรีตในคอนกรีตในอัตราที่สูง (ร้อยละ 60 และ 70) อาจไม่ช่วยให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตดีขึ้นได้ที่อายุ 180 วัน แม้ว่าสามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่าการแทนที่ต่ำกว่าก็ตาม ทั้งนี้เพราะว่าการแทนที่ในปริมาณที่สูงแม้ว่าปริมาณ $Ca(OH)_2$ มีค่าลดลงมากและเกิด C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น แต่ C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ลดลงมากตามการแทนที่ที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Wee และคณะ [24] กล่าวไว้ว่า C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีโครงสร้างแข็งแรงน้อยกว่าและมีความไวในการทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงเกิดการกัดกร่อนมากตาม จึงสรุปได้ว่าค่าผลต่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียกำลังอัดมีค่าแปรผันตรงกับอัตราการแทนที่ในปูนซีเมนต์

3.9 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน ดังแสดงรูปที่ 10 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต CT FA50, FA60, FA70, FA50SF10 และ FA60SF10 ที่อายุ 60 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.2, 2.2, 2.6, 3.3 3 และ 2.1 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.1, 3.2, 3.4, 4.3, 3.8 และ 3.2 ตามลำดับ ส่วนที่อายุ 180 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.4, 4.9, 6.3, 7.6, 5.3 และ 6.6 ตามลำดับ สังเกตว่าที่ช่วงอายุ 60 และ 90 วัน ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าร้อยละที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องมาจากการแทรกซึมของสารละลายซัลเฟตแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างคอนกรีตได้ทั้งหมดนั้นต้องใช้ระยะเวลาที่นานในการที่สารละลายซัลเฟตจะแทรกซึมเข้าไปในก้อนตัวอย่างได้ทั้งหมด [24] ทำให้ผลที่อายุ 60 และ 90 วัน มีแนวโน้มที่ต่างจากผลที่อายุ 180 วัน ซึ่งเมื่อมาดูผลของตัวอย่างที่อายุ 180 วัน จะเห็นผลได้ชัดเจนกว่า กล่าวคือการใช้วัสดุประสานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 และ 70 จะมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (เถ้าลอย และซิลิกาฟูม) ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตน้อยลงซึ่งลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ส่งผลให้ C-S-H แปรเปลี่ยนเป็น M-S-H ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยเฉพาะเมื่อแทนที่วัสดุประสานที่สูงขึ้น [1] รวมทั้งเถ้าลอยมีสภาพเป็นรูพรุนส่งผลให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นซึ่งเมื่อมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 50 มีค่า



รูปที่ 10 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของ SCC แช่ในสารแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการต้านทานสารละลายซัลเฟตโดยผลที่ได้มีความสอดคล้องในเรื่องร้อยละความพรุน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุประสานส่งผลให้ร้อยละความพรุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต [25] และทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความพรุนในตัวของเถ้าลอย เมื่อมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 50 มีร้อยละความพรุนน้อยกว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 60 และ 70 ส่งผลให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักแปรผันตรงกับร้อยละความพรุน

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ปริมาณเถ้าลอยในการแทนที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีต โดยเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปริมาณสูงถึงร้อยละ 70 มีระยะและเวลาการไหลแผ่ดีที่สุด ส่วนการสูญเสียค่าการไหลแผ่นั้นเมื่อมีการใช้ซิลิกาฟูมผสมร่วมกับเถ้าลอยแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ ความสามารถการสูญเสียค่าการไหลแผ่สามารถไหลแผ่ได้เกินกว่า 50 เซนติเมตร เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน EFNARE

2. การก่อตัวของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงนั้น คอนกรีต FA50 มีการก่อตัวระยะต้นที่เร็วสุด ส่วนการก่อตัวระยะปลายที่เร็วสุด คือ คอนกรีตควบคุม

3. การดูดซึมน้ำและความพรุนของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงจะมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้วัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยคอนกรีต FA60SF10 มีค่าการดูดซึมน้ำที่มากที่สุดซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของปริมาณรูพรุนในคอนกรีตที่เกิดขึ้น

4. คอนกรีตชนิดไหลตัวได้เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (FA50) ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างส่วนผสมอื่นๆ ทั้งที่แช่ในน้ำประปา และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยกำลังอัดที่ได้จะมีความสอดคล้องกับร้อยละความพรุนคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีความพรุนปริมาณมากส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง

5. คอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 50 (FA50) ที่ทุกช่วงอายุการทดสอบมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดที่น้อยกว่าตัวอย่างการแทนที่เถ้าลอยที่ร้อยละ 60 และ 70 นั่นคือการใช้วัสดุประสานเป็นส่วนผสมในคอนกรีตในอัตราที่สูงนั้นไม่ช่วยให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตดีขึ้น

6. การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตจากการแช่แมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 180 วัน คอนกรีต FA60 และ FA70 อัตราการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีต FA50 ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่า อัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) เลขที่สัญญารับทุน น013/2562 โดยได้นำงบประมาณส่วนหนึ่งจากโครงการมาใช้ในส่วนดำเนินงานวิจัยด้านงานทดสอบ และขอบคุณ นายพัฒธนพงษ์ บัวใหญ่ นายภูมิทรัพย์ ถิ่นรัตน์ และนางสาวธมลวรรณ คงวุฒิ ที่มีส่วนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ดี

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Pitisan and T. Somnuk, "Expansion strength reduction and weight loss of fly ash concrete in sulfate solution," *ASEAN Journal on Science & Technology for Development,* vol. 21, no. 4, pp. 373–390, 2004.

[2] S. Ittiporn, B. Lalita, S.Warangka, K. Pitisan, and T. Somnuk, "Sodium and magnesium sulfate resistance of mortars with interground limestone and limestone powder replacing cements," *Journal of Advanced Concrete Technology,* vol. 12, no. 10, pp. 403–412, 2014.

[3] P. Chindaprasirt, *Fly Ash in Concrete.* Revised edition, Bangkok: Thailand Concrete Association, 2005 (in Thai).

[4] P. Dinakar, K. Babu, and M. Santhanam, "Durability properties of high volume fly ash self compacting concrete," *Cement and Concrete Composites,* vol. 30, no. 10, pp. 880–886, 2008.

[5] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness," *Journal of Material in Civil Engineering,* vol. 22, no. 3, pp. 253–259, 2010.

[6] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength of ternary blended cement mortar containing portland cement rice husk ash and fly ash," *Journal of Engineering Institute of Thailand,* vol. 17, no. 2, pp. 33–38, 2006 (in Thai).

[7] P. Chindaprasirt and S. Rukzon, "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended portland cement, rice husk ash and fly ash mortar," *Construction and Building Materials,* vol. 22, no. 8, pp. 1601–1606, 2008.

[8] J. M. Khatib, "Performance of self compacting concrete containing fly ash," *Construction and Building Materials,* vol. 22, pp. 1963–1971, 2008.

[9] H. Reianhardt and M. Stegmaier, "Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self compacting concrete (SCC)," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 5, pp. 879–885, 2006.

[10] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C494, 2012.

[11] *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C138, 2012.

[12] *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C1611, 2012.

[13] *Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C1621, 2012.

[14] *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete,* European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC), 2002.

[15] *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C403, 2012.

[16] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C642, 2012.

[17] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,* Annual

Book of ASTM Standards 04. 02, C109, 2018.

[18] *Standard Test Method for Weigh Loss (Mass Loss) of Sheet Steel During Immersion in Sulfuric Acid Solution,* Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C694, 2016.

[19] P. Paisitsrisawat and U. Rattanasak, "Effect of silica fume on the properties of fluidized bed combustion (FBC) fly ash geopolymer," *The Journal of Industrial Technology,* vol. 9, pp. 40-48, 2013 (in Thai).

[20] L.N. Assi, E. Deaver, and P. Ziehl, "Using sucrose for improvement of initial and final setting times of silica fume-based activating solution of fly ash geopolymer concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 191, pp. 47–55, 2018.

[21] K. Kuennokkhum, W Koraviyothin, and W. Chalee, "The effect of Na(OH) concentration on the water flow rate and compressive strength of fly ash-based geopolymer porous concrete," *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 1, pp. 56–65, 2014 (in Thai).

[22] C. S. Poon, L. Lam, and Y. L. Wong, "Effect of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 11, no. 3, pp. 197–205, 1999.

[23] P. R. Silva and J. Brito, "Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler," *Construction and Building Materials,* vol. 86, no. 1, pp. 101–112, 2015.

[24] T. H. Wee, K. Arvind, K. Survavanshi, S. F. Wong, and A. Rahman, "Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures," *ACI Materials Journal*, vol. 97, no. 5, pp. 536–549, 2000.

[25] S. Santhanam, M. D. Cohen, and J. Olek, "Mechanism of sulfate attack: A fresh look part 2. proposed mechanisms," *Cement and Concrete Research,* vol. 33, no. 3, pp. 341–346, 2003.