

ผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์และเป็นวัสดุบ่มภายใน

ต่อสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตสมรรถนะสูง

Effects of Bottom Ash as a Cement Replacement and Internal Curing
on Mechanical and Durability Properties of High Performance Concreteเจตนิพัทธ์ วงศ์อภัย^{1,*} กฤติธิ์ พุทธิรักษ์² ณัฏพล จันทรังค์² ธนวัฒน์ สายรัมย์² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร์³ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร²นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: jednipad.won@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงและเป็นวัสดุบ่มภายในต่อสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยนำเถ้าก้นเตามาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 และทำการบดจนมีอนุภาคขนาดเล็ก (GBA) จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (70GBA) นอกจากนี้เถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 (SBA) นำไปแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 25 50 และ 75 โดยปริมาตรมวลรวมละเอียดสำหรับใช้เป็นวัสดุบ่มภายในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ การบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศ ทำการทดสอบการยุบตัวแบบแผ่และระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม (T_{50}) กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น การเปลี่ยนแปลงความร้อนและการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตสมรรถนะสูง จากการศึกษาพบว่า การยุบตัวแบบแผ่มีค่าลดลงและระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย SBA และคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBA ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย SBA ร้อยละ 50 โดยปริมาตรมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วย SBA ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และความลึกในการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย SBA ทั้งนี้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วย SBA โดยการแทนที่ SBA ร้อยละ 50 และ 75 ช่วยลดความร้อนภายในคอนกรีตลงร้อยละ 5 และ 15 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ: การบ่มภายใน, การแทรกซึมของคลอไรด์, คอนกรีตสมรรถนะสูง, เถ้าก้นเตาบดละเอียด, เถ้าก้นเตาที่ไม่ได้บด

Abstract

This article presents the effects of bottom ash as pozzolanic material to replace Portland cement at high level and as an internal curing material on mechanical and durability properties of high performance concrete. Bottom ash was sieved through a sieve No. 50 and ground to have high fineness (GBA). Then, it was used to replace OPC at a rate of 70% by weight of binder (70GBA). In addition, bottom ash passing a sieve No. 4 and retaining on a sieve No. 50 (SBA) was used as a fine aggregate replacement at rates of 25, 50 and 75% by volume of the fine aggregate in order to use as internal curing material in concrete under the different curing conditions i.e., curing in water and air. Slump flow, slump flow time at 50 cm (T_{50}), compressive strength, modulus of elasticity, heat evolution, and chloride diffusion of high performance concrete were investigated. The results showed that the slump flow of concrete was decreased and T_{50} was increased with the increased of SBA. High performance concrete containing 70% of GBA and 50% of SBA had the compressive strength similar to that of the control concrete at all testing ages. The elastic modulus was decreased with the increased of SBA, while the chloride diffusion coefficient and chloride penetration of concrete were increased with the increased of SBA. The use of SBA at 50% and 75 % of the SBA could reduced the heat evolution of high performance concrete by 5% and 15%, respectively that compared to the control concrete.

Keywords: chloride diffusion, ground bottom ash, high performance concrete, internal curing, unground bottom ash

1. คำนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารสูงได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ก่อสร้างที่น้อย ประกอบกับราคาที่ดินปัจจุบันมีราคาที่สูงขึ้น และเพื่อให้มีพื้นที่ใช้สอยภายในเพิ่มขึ้นจึงต้องออกแบบเหล็กเสริมโครงสร้างในปริมาณที่มากขึ้นและใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้โครงสร้างมีขนาดเล็กลงและยังรองรับน้ำหนักได้เช่นเดิม ดังนั้นการใช้งานคอนกรีตในปัจจุบันไม่เพียงแต่มีกำลังอัดที่สูง แต่ต้องมีความสามารถในการเทได้ดี เพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว จึงเกิดการพัฒนาคอนกรีตรูปแบบใหม่ที่เรียกว่าคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance Concrete) ซึ่งเน้นสมบัติทางด้านกำลังอัด สามารถเทเข้าแบบได้ง่ายโดยปราศจากการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีต มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลอื่น ๆ แต่ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป [1] เพื่อลดต้นทุนในการผลิตจึงต้องมีการใช้วัสดุปอซโซลานที่เหลือใช้ในกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรมมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เช่น เถ้าถ่านหิน เป็นต้น

คอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance Concrete, HPC) เป็นคอนกรีตที่มีสมบัติที่ดีทั้งในสภาวะคอนกรีตสด และในสภาวะคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว [2] กล่าวคือ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นคอนกรีตสดสามารถทำงานได้ง่าย มีการไหลลื่นดีโดยไม่เกิดการแยกตัวของมวลรวม สามารถเทแบบหล่อที่ซับซ้อนได้โดยง่ายแม้จะมีเหล็กเสริมจัดเรียงอย่างหนาแน่น และในสภาวะที่คอนกรีตแข็งตัวจะมีการหดตัวน้อยปราศจากรอยแตกร้าวที่ผิว มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม โดยมีการกำหนดให้กำลังอัดในช่วงต้นไม่น้อยกว่า 28 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3 วัน และกำลังอัดในช่วงปลายไม่น้อยกว่า 70 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน [3]

เถ้าถ่าน (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินในกรณีที่มีความร้อนสูงจนเถ้าถ่านหินหลอมเหลวจนจับตัวกันเป็นก้อนและตกลงสู่ถ่านเผา มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีรูพรุนสูง จากการทดสอบสมบัติของเถ้าถ่านพบว่า โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) อยู่ในช่วง 1.97-3.55 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทราย [4] โดยที่ผ่านมาได้มีการนำเถ้าถ่านมาแทนที่มวลรวมละเอียดเพื่อใช้เป็นวัสดุปถมภายใน พบว่าเถ้าถ่านสามารถใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้เพียงบางส่วนเนื่องจากส่งผลให้การยุบตัวแบบแผ่มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าถ่านและกำลังอัดในช่วงต้นน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แต่จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุคอนกรีต [5] แต่ในด้านความทนทานของคอนกรีต การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าถ่านบางส่วนจะช่วยจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ [6] และลดการหดตัวแบบแห้งได้ [7] ต่อมาได้มีการศึกษาการนำเถ้าถ่านมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยงานวิจัยของ เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล [8] ได้สรุปว่า เถ้าถ่านที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหินหากปรับปรุงคุณภาพโดยการบด

เถ้าถ่านเตาจนมีขนาดเล็กลงมา นอกจากนี้ ชลตรงค์ และคณะ [9] ได้นำเถ้าถ่านเตาที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 30 และ 50 นำไปบดให้มีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5±1 แล้วนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าเถ้าถ่านเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุดและสูงกว่ามวลรวมละเอียดที่อายุ 28 วันขึ้นไป ทั้งนี้ นครินทร์ และคณะ [10] ได้ศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านซึ่งทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ก่อนนำไปบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าถ่านเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และข้างตะแกรงเบอร์ 50 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 100 โดยปริมาตร พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านเตาละเอียดทุกอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมในช่วงอายุต้น แต่สามารถพัฒนากำลังอัดได้เป็นอย่างดีที่อายุ 28 วัน โดยการแทนที่เถ้าถ่านเตาละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดสูงถึง 86.2 เมกะปาสคาล แต่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าถ่านเตาส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

งานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่การศึกษาการใช้เถ้าถ่านเตาที่อิมตัวด้วยน้ำแทนที่มวลรวมละเอียด หรือการนำเถ้าถ่านเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงไปบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่งานวิจัยที่ใช้เถ้าถ่านเตาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับใช้เถ้าถ่านเตาที่ไม่ได้บดซึ่งมีขนาดใหญ่แทนที่มวลรวมละเอียดยังมีข้อมูลจำนวนน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 แล้วนำไปบดละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงร่วมกับการใช้เถ้าถ่านเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เถ้าถ่านเตาที่ไม่ได้บดเพื่อเป็นวัสดุปถมภายในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยศึกษาค่าการยุบตัวแบบแผ่ระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น การแทรกซึมของคลอไรด์และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งบ่มตัวอย่างด้วยน้ำเปรียบเทียบการบ่มตัวอย่างด้วยอากาศโดยการห่อหุ้มปิดด้วยพลาสติก

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้าถ่านเตาละเอียด (GBA) จากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 แล้วบดจนมีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีช่องเปิดขนาดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) น้อยกว่าร้อยละ 1±0.5 โดยน้ำหนัก สำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

2.1.2 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นหินประเภทแกรนิตซึ่งมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 9.5 มม. (ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.70

2.1.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยมวลรวมละเอียดธรรมชาติซึ่งใช้ทรายแม่น้ำ โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.96 และเถ้าถ่านค้ำตะแกรง (SBA) ซึ่งนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.70 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.40

2.2 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานซึ่งแสดงค่าความละเอียดของอนุภาคและค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ซึ่งพบว่า OPC และ GBA มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 2.65 ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 11.35 และ 0.44 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ OPC และ GBA ซึ่งพบว่า GBA มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 94.9 โดยน้ำหนัก โดยจัดอยู่ในวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพ F สอดคล้องกับ ASTM C618 [19] ซึ่งได้กำหนดชนิดของปอซโซลานชั้นคุณภาพ F มีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของออกไซด์ทั้งหมด ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ไม่เกินร้อยละ 5 ของออกไซด์ทั้งหมด แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 18 ของออกไซด์ทั้งหมด และมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Materials	OPC	GBA
Retained on a No. 325 sieve (% by weight)	11.35	0.45
Specific Gravity	3.15	2.65

2.3 การทดสอบที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านค้ำโดยการหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188 [11] ทดสอบความละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C430 [12] และทดสอบทางองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

2.3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบ โดยการหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127 [13]

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและเถ้าถ่านค้ำส่วนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 โดยการหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C128 [14]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical Compositions (%)	OPC	GBA
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	63.2
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	4.8	24.4
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	7.3
Calcium oxide (CaO)	63.3	2.3
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	0.1
Magnesium oxide (MgO)	1.3	0.8
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.3	0.4
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	1.3
Loss on ignition (LOI)	2.9	0.2

2.3.3 ความสามารถในการทำงานของคอนกรีต

ทดสอบค่าการยุบตัวแบบแผ่ (Slump Flow) โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลแผ่และระยะเวลาการไหลตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงที่ระยะ 50 ซม. (T₅₀) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [15]

2.3.4 กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน และทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM C649 [17] ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. โดยทดสอบอายุละ 3 ตัวอย่าง

2.3.5 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

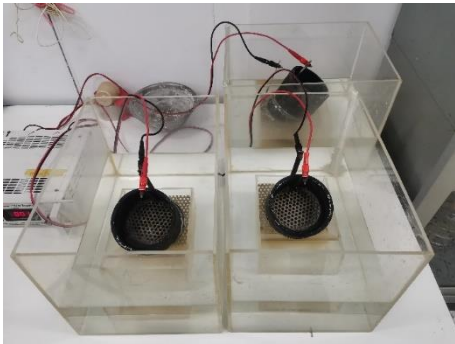
ทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน NT Build 492 [18] โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. ที่อายุ 28 วัน นำมาตัดให้ได้ความหนา 5±0.3 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างใส่ในบล็อกหุ้มยางและทำการอุดรอยต่อระหว่างตัวอย่างกับบล็อกหุ้มยางเพื่อป้องกันการรั่วไหล จากนั้นนำไปวางบนแท่นพลาสติกซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำซึ่งมีสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 10% โดยมวล และทำการใส่สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.3 โมลาร์ จากนั้นให้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ตามระยะเวลาที่ระบุไว้ในมาตรฐานโดยแสดงตัวอย่างการทดสอบดังรูปที่ 1 จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปผ่าซีกเป็นสองส่วนและฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำการวัดความลึก

ของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตและนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตสมรรถนะสูงจากสมการที่ 1

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

เมื่อ D_{nssm} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์แบบเร่ง, $\times 10^{-12}$ ตารางเมตรต่อวินาที

- U คือ ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดสอบ, โวลต์
- T คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายในสารละลายซัลเฟต, องศาเซลเซียส
- L คือ ค่าความหนาของตัวอย่างทดสอบ, มิลลิเมตร
- x_d คือ ค่าความลึกเฉลี่ยของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต, มิลลิเมตร
- t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ, ชั่วโมง



รูปที่ 1 การทดสอบความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

2.3.6 การทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต

การทดสอบเพื่อหาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำการทดสอบโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตขนาด 45x45x45 ซม. ภายในทำการกรุผนังด้วยโฟมที่มีความหนา 5 ซม. โดยฝังสาย Thermocouple ไว้บริเวณจุดกึ่งกลางของแบบหล่อ ภายหลังจากการผสมคอนกรีตจึงนำมาเทลงจนกระทั่งเต็มแบบหล่อ จึงเริ่มวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเทคอนกรีตลงแบบหล่อจนกระทั่งครบเวลา 168 ชั่วโมง

2.4 สัดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

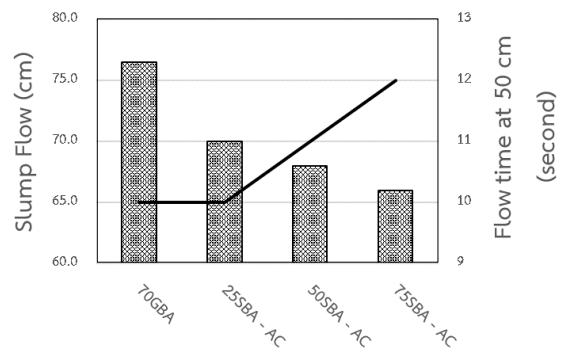
ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาละเอียดร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (70GBA) ร่วมกับแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาส่วนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 ร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยปริมาตรมวลรวมละเอียด (25SBA, 50SBA และ 75SBA ตามลำดับ) กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เท่ากับ 0.27 และควบคุมให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวแบบแผ่ 65 – 75 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) ซึ่งภายหลังจากการผสมคอนกรีตและเทคอนกรีตลงแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบหล่อแล้วนำตัวอย่างบางส่วนไปบ่มในน้ำ (WC) และอีกส่วนหนึ่งบ่มในอากาศโดยการห่อหุ้มปิดด้วยพลาสติก (AC)

3. ผลการทดสอบ

3.1 การยุบตัวแบบแผ่และระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม.

รูปที่ 2 แสดงค่าการยุบตัวแบบแผ่และระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. ของคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า 70GBA มีค่าการยุบตัวแบบแผ่เท่ากับ 76.5 ซม. แต่เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาส่วนค้ำตะแกรงร้อยละ 25, 50 และ 75 พบว่าค่าการยุบตัวมีค่าลดลงเป็น 70.0, 68.0 และ 66.0 ซม. ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh และ Siddique [20] ซึ่งเห็นว่าค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาส่วนค้ำตะแกรง สำหรับระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. พบว่า 70GBA มีค่าเท่ากับ 10 วินาที เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาส่วนค้ำตะแกรงร้อยละ 25 พบว่าระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. เท่ากับ 10 วินาทีเช่นเดียวกัน แต่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 50 และ 75 พบว่าระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11 และ 12 วินาที โดยเห็นวาระยะเวลา



รูปที่ 2 ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสมรรถนะสูง

การไหลที่ 50 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเช่นเดียวกัน เนื่องจากทรายแม่น้ำโดยธรรมชาติมีลักษณะทางกายภาพเป็นเหลี่ยมมุมและดันรวมไปถึงพื้นผิวของทรายมีความเรียบ ในขณะที่เถ้าก้นเตามีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนและพื้นผิวขรุขระ รวมไปถึงมีรูโพรงภายในเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเป็นการเพิ่มจำนวนพื้นที่ผิวที่ขรุขระและรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของอนุภาค นอกจากนี้ความพรุนหรือรูโพรงภายในของเถ้าก้นเตามากกว่าทรายแม่น้ำจึงสามารถดูดหรือดึงน้ำภายในส่วนผสมมาเก็บไว้ภายในได้มากกว่าทรายแม่น้ำ ทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลงจากปริมาณที่ออกแบบไว้ คอนกรีตจึงมีความสามารถในการไหลหรือค่าการยุบตัวแบบแผ่ลดลง

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง

Mix	Mix Proportions (kg/m ³)						SP (% of binder)	Slump Flow (cm)	T ₅₀ (second)
	Cement	GBA	SBA	Fine agg.	Coarse agg.	Water			
70GBA	180	420	0	905	720	162	1.0	76.5	10
70GBA25SBA - AC	180	420	110	735	720	162	1.1	70.0	10
70GBA50SBA - AC	180	420	220	565	720	162	1.3	68.0	11
70GBA75SBA - AC	180	420	325	395	720	162	1.6	66.0	12

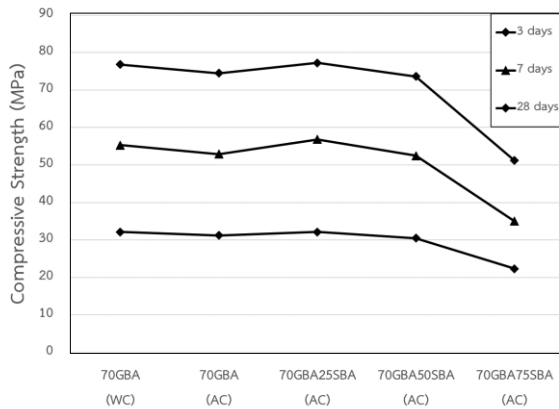
3.2 กำลังอัด

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยคอนกรีต 70GBA - WC ซึ่งทำการบ่มในน้ำมีกำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วันเท่ากับ 32.1, 55.3 และ 76.8 เมกะปาสคาลตามลำดับ แต่เมื่อทำการบ่มด้วยอากาศพบว่าคอนกรีต 70GBA - AC มีกำลังอัดลดลงเล็กน้อยเป็น 31.2, 52.9 และ 74.5 เมกะปาสคาลตามลำดับ โดยจะเห็นว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในน้ำจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศโดยการห่อหุ้มปิดด้วยพลาสติก สอดคล้องกับงานวิจัยของ ซีริติ และคณะ [21] เนื่องจากคอนกรีตเมื่อทำการบ่มในน้ำสามารถดูดน้ำจากภายนอกเข้าสู่ภายในตัวเองเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่คอนกรีตที่ทำการบ่มในอากาศนอกจากจะไม่สามารถดูดน้ำจากภายนอกได้แล้ว ยังมีการสูญเสียน้ำภายในจากการระเหยของน้ำบางส่วนออกสู่ภายนอกตามธรรมชาติตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอ ทำให้ปริมาณ C-S-H หรือ C-A-H ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยามีค่าลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มภายในอากาศจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการบ่มในน้ำ

สำหรับคอนกรีต 70GBA25SBA - AC พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 32.1, 56.8 และ 77.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีต 70GBA - AC และสูงกว่าคอนกรีต 70GBA - WC เล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ [22] และ Simran และคณะ [23] ซึ่งกล่าวว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาไม่เกินร้อยละ 30 - 40 ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมเนื่องจากเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ SiO₂ และ Al₂O₃ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหนึ่งในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตาส่วนข้างตะแกรงมีอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าเมื่อ

เทียบกับอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ยังเห็นว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาแม้มีความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำสูง แต่หากทำให้เถ้าก้นเตามีตัวก่อนนำมาผสมจะสามารถใช้เป็นวัสดุบ่มภายในได้ โดยใช้เถ้าก้นเตาเถ้าที่กักเก็บไว้และสามารถชดเชยกับน้ำที่ระเหยไปตามอายุของคอนกรีตได้ ซึ่งน้ำที่กักเก็บไว้ทำให้คอนกรีตมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้นแม้ไม่ได้รับการบ่มจากภายนอก

เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 50 พบว่าคอนกรีต 70GBA50SBA - AC มีกำลังอัดลดลงเป็น 30.5, 52.5 และ 73.6 เมกะปาสคาล และเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาสูงถึงร้อยละ 75 พบว่าคอนกรีต 70GBA75SBA - AC มีกำลังอัดลดลงอย่างมากเหลือเพียง 22.3, 35.0 และ 51.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Loveley และ Thandavamoorthy [24] เนื่องจากเถ้าก้นเตามีโพรงจำนวนมากและความเปราะเมื่อเทียบกับทรายธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงและความเปราะเพิ่มสูงขึ้นทำให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้น้อยลง โดยคอนกรีต 70GBA50SBA - AC มีกำลังอัดใกล้เคียงเมื่อเทียบกับคอนกรีต 70GBA - WC ทุกช่วงอายุ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการบ่มภายในของเถ้าก้นเตาซึ่งอัดด้วยน้ำ ทั้งนี้หากเปรียบเทียบกับคอนกรีต 70GBA - AC พบว่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน แต่จากงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ [25] ได้กล่าวว่าแม้การใช้เถ้าก้นเตาลดความแข็งแรงของคอนกรีตลง แต่อย่างไรก็ตามสามารถแก้ไขได้โดยระยะเวลาบ่มที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตาช่วยเพิ่มความแข็งแรงในภายหลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Singh และคณะ [26] โดยเชื่อว่าการใช้เถ้าก้นเตาลดความเป็นด่าง (alkalinity) ในคอนกรีตลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ช้าลงและเป็นสาเหตุทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตามีกำลังอัดต่ำในช่วงอายุต้นแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

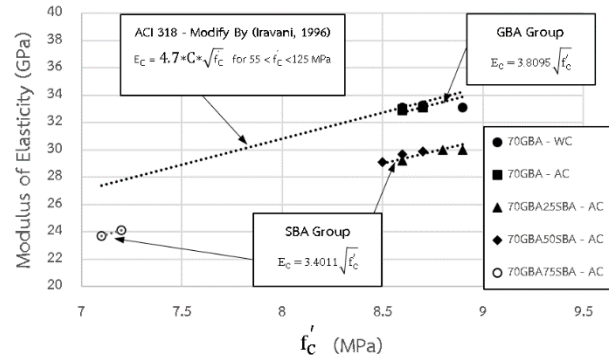


รูปที่ 3 กำลังอัดและอายุของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่าคอนกรีต 70GBA – WC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 33.2 จิกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต 70GBA – AC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 33 จิกะปาสคาล ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีต 70GBA – WC เล็กน้อย เนื่องจากการบ่มคอนกรีตด้วยอากาศมีการสูญเสียบางส่วนไป ทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับการบ่มด้วยน้ำ ดังนั้นคอนกรีตที่บ่มด้วยอากาศจะมีกำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำซึ่งหมายถึงความสามารถในการรับแรงที่น้อยลงและการเสียรูปที่เพิ่มขึ้น สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยละ 25, 50 และ 75 พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 29.7, 29.6 และ 24.6 จิกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีต 70GBA – WC และคอนกรีต 70GBA – AC และเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอย เป็นไปตามงานวิจัยของ Singh และ Siddique [27] เนื่องจากเถ้าลอยมีความเปราะและมีความเป็นรูโพรงจำนวนมาก ทำให้เถ้าลอยมีความสามารถในการรับแรงหรือมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับทรายธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยบางส่วนมีความเปราะและการเสียรูปที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย โดยส่งผลอย่างชัดเจนเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยสูงกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร และหากพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งใช้ชนิดของมวลรวมที่แตกต่างออกไป Iravani [28] ได้แนะนำให้คำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งดัดแปลงจากสมการ ACI 318M-08 [29] เนื่องจากการใช้มวลรวมหยาบประเภทหินแกรนิตจะทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aitcin และ Mehta [30] ซึ่งระบุว่าการใช้หินปูนในการผลิตคอนกรีตมีความแข็งแรงและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าการใช้หินแกรนิตและกรวดแม่น้ำ และจากงานวิจัยพบว่าคอนกรีต 70GBA – WC และคอนกรีต 70GBA – AC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับสมการดังกล่าว ในขณะที่เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีค่าน้อยกว่าสมการดังกล่าว ทั้งนี้เมื่อพิจารณา

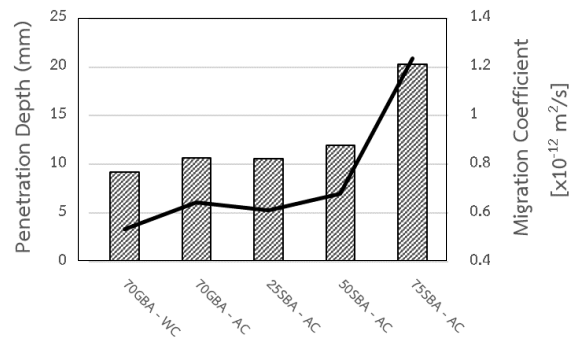
ข้อแนะนำของ Design and Control of Concrete Mixtures [31] ซึ่งกำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่ามากกว่า 40 จิกะปาสคาล พบว่าผลการทดสอบของคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่า 40 จิกะปาสคาล ทุกสัดส่วนผสม



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

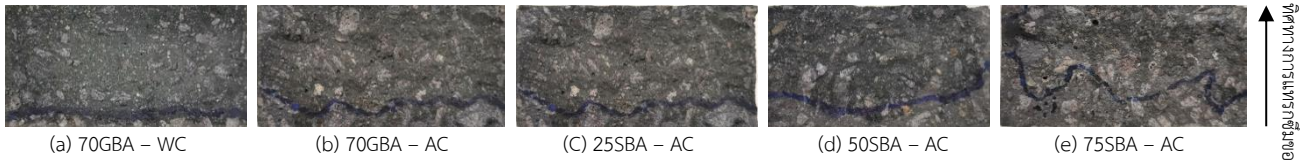
3.4 การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสมรรถนะสูง

รูปที่ 5 แสดงความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสมรรถนะสูงและอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยตามลำดับ ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 พบว่าคอนกรีต 70GBA – WC และคอนกรีต 70GBA – AC มีความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์เท่ากับ 9.2 และ 10.7 มม. ตามลำดับ และสำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยละ 25, 50 และ 75 พบว่าความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.6, 12.0 และ 20.3 มม. ตามลำดับ แสดงตัวอย่างคอนกรีตดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุ 28 วันและอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอย

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่าคอนกรีต 70GBA – WC และคอนกรีต 70GBA – AC มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เท่ากับ 0.5×10^{-12} และ 0.6×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยละ 25, 50 และ 75 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ



รูปที่ 6 ความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตซึ่งแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตา

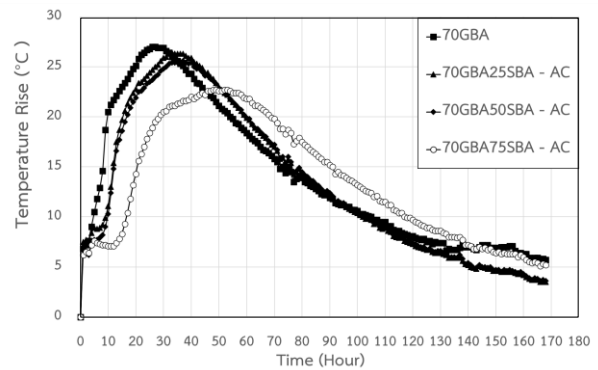
คลอไรด์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.6×10^{-12} , 0.7×10^{-12} และ 1.2×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยพบว่าคอนกรีต 70GBA - AC มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีต 70GBA - WC เล็กน้อย เนื่องจากการบ่มคอนกรีตด้วยอากาศมีการสูญเสียบางส่วนไป ทำให้การทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับการบ่มด้วยน้ำ ดังนั้นคอนกรีตที่บ่มด้วยอากาศจึงอาจมีช่องว่างภายในที่มากกว่าหรือมีความชื้นน้ำต่ำกว่าการบ่มด้วยน้ำ ส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตสมรรถนะสูงได้ง่ายขึ้น แสดงว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาทำให้คอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมและความลึกของคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้มวลรวมละเอียดธรรมดาเพียงอย่างเดียว และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตา สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ [31] เนื่องจากเถ้ากันเตามีความพรุนสูงและมีจำนวนโพรงขนาดใหญ่มากกว่าเมื่อเทียบกับทรายธรรมชาติ ทำให้คอนกรีตซึ่งแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตามีความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าได้ง่ายขึ้น

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ลดลงหมายถึงคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ยากขึ้น ทั้งนี้มาตรฐาน NT Build 492 ได้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าน้อยกว่า 2×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที ดังนั้นคอนกรีตทุกส่วนผสมมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จัดอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

3.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิภายในคอนกรีตสมรรถนะสูงเทียบกับภายนอกและระยะเวลาที่ทดสอบ พบว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาร้อยละ 25, 50 และ 75 ทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตสมรรถนะสูงแตกต่างภายนอกสูงสุดเท่ากับ 26.4, 25.6 และ 22.8 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 33, 37 และ 49 ชั่วโมงตามลำดับ และเมื่อนำงานวิจัยของ นัธววัฒน์ และคณะ [32] มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่าคอนกรีต 70GBA มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของคอนกรีตสมรรถนะสูงเทียบกับภายนอกสูงสุดเท่ากับ 26.8 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 29 ชั่วโมง โดยสังเกตว่าคอนกรีตซึ่งแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตามีอุณหภูมิโดยรวมลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการใช้เถ้ากันเตาแม้จะมี

ความพรุนและมีค่าการดูดซับน้ำสูงแต่หากนำไปดูที่งานอิมมิตัวก่อนการผสมทำให้เถ้ากันเตามีความเย็นตัวลงอย่างมาก โดยมีกระบวนการคล้ายกับการทำให้มวลรวมเย็นตัวลงก่อนการนำไปผสมคอนกรีต แต่เถ้ากันเตาซึ่งมีความพรุนสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมชาติทำให้เถ้ากันเตาสามารถดูดซับน้ำเก็บไว้ภายในได้ในปริมาณมากและค่อย ๆ ปล่อยน้ำดังกล่าวให้กับคอนกรีต ซึ่งสรุปว่าคอนกรีต 70GBA50SBA - AC และคอนกรีต 70GBA75SBA - AC ช่วยลดความร้อนภายในคอนกรีตได้ร้อยละ 5 และ 15 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิภายในคอนกรีตเทียบกับภายนอกและระยะเวลาที่ทดสอบ

4. บทสรุป

4.1 ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากันเตาบดละเอียดร้อยละ 70 มีค่าการยุบตัวแบบแผ่อยู่ในช่วง 65 - 75 ซม. และเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาสวนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 ส่งผลให้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ลดลงและระยะเวลาการไหลที่ 50 ซม. เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้ากันเตาสวนค้ำตะแกรงเบอร์ 50

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต 70GBA25SBA - AC ให้กำลังอัดสูงสุดในขณะที่คอนกรีต 70GBA50SBA - AC มีกำลังอัด 73.6 เมกะปาสกาลที่อายุ 28 วันและมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต 70GBA - AC และคอนกรีต 70GBA - WC ทุกช่วงอายุ แต่จะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาสูงถึงร้อยละ 75 โดยปริมาตร สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาสวนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50

4.3 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาสวนค้ำตะแกรง

มาตรฐานเบอร์ 50 โดยคอนกรีต 70GBA50SBA – AC มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต 70GBA – AC และคอนกรีต 70GBA – WC แต่มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาสู่ถึงร้อยละ 75 โดยปริมาตร ทั้งนี้คอนกรีตทุกส่วนผสมมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ดีมาก

4.4 การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาซึ่งทำให้อัดตัวด้วยน้ำก่อนการผสมช่วยลดความร้อนหรืออุณหภูมิภายในคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาร้อยละ 50 และ 75 โดยปริมาตรช่วยลดความร้อนภายในคอนกรีตร้อยละ 5 และ 15 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

4.5 เถ้ากันเตาส่วนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 สามารถใช้เป็นวัสดุบ่มภายในร่วมกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณสูงได้ โดยสามารถแทนที่มวลรวมละเอียดได้สูงถึงร้อยละ 50 โดยปริมาตร

4.6 คอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งใช้เถ้ากันเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงร่วมกับการใช้เถ้ากันเตาที่ไม่ได้บดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนนั้นเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุส่วนผสมในงานโครงสร้างที่ต้องการความสามารถทนแบบหล่อที่เหล็กเสริมจัดเรียงอย่างหนาแน่น มีค่าการหดตัวน้อย มีค่าความร้อนต่ำ มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น เสาคอมม่อสะพาน โครงสร้างเสาในงานอาคารสูง และงานฐานรากขนาดใหญ่ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อเถ้ากันเตาเพื่อใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณสำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการ ทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund 2565 : โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ha Thanh Le, Matthias Muller, Karsten Siewert and Horst-Michael Ludwig (2015). The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. *Materials and Design*, Vol. 72, pp 51-62.
- [2] เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ (2555). คอนกรีตสมรรถนะสูง. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 323 หน้า.
- [3] Design and Control of Concrete Mixtures (2003). Portland Concrete Association, Inc., 358 pages.
- [4] Khairunisa Muthusamy, Mohamad Hafizuddin Rasid, Gul Ahmed Jokhioc, Ahmed Mokhtar Albshir Budiead, Mohd Warid Hussin and Jahangir Mirza (2020). Coal bottom ash

as sand replacement in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 236, No. 117507.

- [5] Mahdi Rafieizonooz, Jahangir Mirza, Mohd Razman Salim, Mohd Warid Hussin and Elnaz Khankhaje (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 116, pp. 15-24.
- [6] Malkit Singh and Rafat Siddique (2014). Compressive Strength, Drying Shrinkage and Chemical Resistance of Concrete Incorporation Coal Bottom Ash as Partial or Total Replacement of Sand. *Construction and Building Materials*, Vol. 68, pp. 39-48.
- [7] Roberto Rodriguez-Alvaro , B. Gonzalez-Fonteboia S. Seara-Paz and Khandaker M.A. Hossainb (2020). Internally cured high performance concrete with magnesium based expansive agent using coal bottom ash particles as water reservoirs. *Construction and Building Materials*, Vol. 251, No. 118977.
- [8] เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546). การใช้เถ้ากันเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 1-8.
- [9] ชลตรงค์ เจริญไวยเจตน์ (2560). การพัฒนาคุณภาพเถ้ากันเตาเพื่อใช้ในการคอนกรีตกำลังสูง. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 110 หน้า
- [10] นครินทร์ นัคราโรจน์ (2563). ผลกระทบของเถ้ากันเตาปริมาณสูงต่อกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15, ระยอง*, 25-27 มีนาคม 2563, 8 หน้า.
- [11] ASTM (2016). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM C188. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [12] ASTM (2015). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-um (No. 325) Sieve. ASTM C430. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [13] ASTM (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM C127. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] ASTM (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM C128. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- [15] ASTM (2015). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] ASTM (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [17] ASTM (2015). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM C469. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [18] NT Build (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. NT BUILD 492. NORDTEST.
- [19] ASTM (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20] Malkit Singh and Rafat Siddique (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 72, pp. 20-32.
- [21] อีริตตี ศรีจันท์, Kinaanath Hussain, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และบุรณัฐ ฉัตรวีระ (2553). การศึกษาอิทธิพลของสารปมต่อกำลังอัดของคอนกรีต และการหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานต่างกันและเข้ากันเดาเป็นวัสดุบ่มภายใน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15, ระยอง, 30 พฤศจิกายน 2562.
- [22] Dilip Kumar, Ashish Gupta and Sri Ram (2014). Uses of Bottom ash in the Replacement of fine aggregate for Making Concrete. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, No. 6.
- [23] Satgurdev Simran, A R Dar, Ravi Kumar, MAdil Dar and JRaju (2019). Improved performance of coal bottom ash co-mixed concrete. Materials Science and Engineering, Vol. 561, No. 012033.
- [24] S. Loveley Kumari and T.S. Thandavamoorthy (2017). Development of high performance concrete using bottom ash as fine aggregate. International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 8, page 354-361.
- [25] Mohd Haziman Wan Ibrahim, Norul Ernida Zainal Abidin, Norwati Jamaluddi, Kartini Kamaruddin and Ahmad Farhan Hamzah (2016). Bottom ash – potential use in self-compacting concrete as fine aggregate. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, No. 4.
- [26] Malkit Singh, Rafat Siddique, Karim Ait-Mokhtar and Rafik Belarbi (2015). Durability Properties of Concrete Made with High Volumes of Low-Calcium Coal Bottom Ash As a Replacement of Two Types of Sand. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28, No. 4.
- [27] Singh, M. and Siddique, R. (2015). Properties of Concrete Containing High Volumes of Coal bottom ash as fine aggregate. Journal of Cleaner Production, Vol. 91, pp. 269-278.
- [28] Iravani, S. (1996). Mechanical properties of high-performance concrete. ACI Materials Journal, Vol. 93, pp. 416-426.
- [29] ACI (2010). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI 318M-08. American Concrete Institute.
- [30] PC Aitcin และ PK Mehta (1990). Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, Vol. 87, page 103-107.
- [31] H.K. Kim, J.G. Jang, Y.C. Choi and H.K. Lee (2014). Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing. Construction and Building Materials, Vol. 71, page 334-343.
- [32] นัธวัฒน์ กุลทวีพิสิทธิ์, อนุวัฒน์ อรรถโชติคุณ, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2565). การศึกษาสมบัติเชิงกลและความร้อนของคอนกรีตผสมรณะสูงที่ใช้เถ้าถ่านเตาตะเย็ดในปริมาณมากร่วมกับเถ้าถ่านหินและนาโนซิลิกา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 17, นครราชสีมา, 30-31 มีนาคม – 1 เมษายน 2565, 8 หน้า