

การศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วแทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดบางส่วน

A STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH AND CHLORIDE PERMEABILITY OF HIGH STRENGTH CONCRETE USING PROCESSED BOTTOM ASH PARTLY SUBSTITUTE IN CEMENT AND FINE AGGREGATE

ชัชฤทธิ์ คำพา^{1*}, เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล¹, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

² รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

³ ศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

*Corresponding author address: chatcharit.k@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน แต่อย่างไรก็ตามเถ้าก้นเตายังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมากนัก โดยเฉพาะในงานคอนกรีตกำลังสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตกำลังสูงด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างถาด (PAN) และนำมาบดละเอียดให้มีขนาดเล็กโดยมีอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าเท่ากับ 17.5 ± 2.5 เซนติเมตร ทดสอบกำลังอัด ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตด้วยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่า เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างถาด (PAN) และนำไปบดละเอียด สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA50) มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 80.9 และ 84.5 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ มีการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยที่สุด และมีค่าน้ำหนักที่สูญเสียของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นที่อายุเดียวกัน นอกจากนี้การใช้เถ้าก้นเตาที่ค้างตะแกรงเบอร์ 50 แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 60 โดยปริมาตร (GBA50-SBA60) ส่งผลด้านลบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตไม่มากนัก

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, คอนกรีตกำลังสูง, การซึมผ่านคลอไรด์, ความทนทานของคอนกรีต

Abstract

Bottom ash is a by-product from coal power plant like fly ash. However, the utilization of bottom ash in concrete is not well-known. Therefore, this study focuses on development of bottom ash as a partial replacement of cement and fine aggregate in high strength concrete. Bottom ash received directly from a power plant was processed by sieving through a sieve No. 50 and retained on a pan, and then being ground until the retained particles on a sieve No. 325 was less than 1.0% by weight. The processed bottom ash was used to substitute ordinary Portland cement at 35%, 50% and 65% by weight of binder. Water to binder ratio was set at 0.25 and superplasticizer was required to maintain the slump of fresh concrete between 17.5 ± 2.5 cm. Compressive strength, rapid chloride permeability and electrical accelerated steel corrosion were investigated. The results indicated that the improved bottom ash by sieving and then grinding can be used as a cement replacement in high strength concrete. The concrete containing the improved bottom ash at 50% by weight of binder had the highest compressive strength, which were 80.9 and 84.5 MPa at 28 and 90 days respectively, the lowest chloride permeability and the lowest weight loss due to steel corrosion as compared to other mix proportions at the same testing age. Additionally, the use of the retained bottom ash (passing a sieve No. 4 and retaining on a sieve No. 50) at 60% by volume to replace fine aggregate had a slightly negative effect on properties of high strength concrete.

Keywords: Bottom ash, High strength concrete, Chloride permeability, Durability

1. บทนำ

ในปี 2563 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงถึงวันละ 500 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง โดยใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้าเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 24 ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดของประเทศไทย โดยมีการเผาถ่านหินลิกไนต์ประมาณ 40,000 ตันต่อวัน [1] ซึ่งก่อให้เกิดวัตถุพลอยได้จากการเผาเป็นปริมาณมาก ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) และเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash)

ปัจจุบันเถ้าถ่านหิน (Fly ash) นำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีงานวิจัยสนับสนุนว่าเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี ช่วยเพิ่มสมบัติทางกลและความทนทานให้กับคอนกรีต แต่ในทางตรงกันข้ามเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน แต่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายนัก เถ้าก้นเตาจึงถูกนำไปทิ้งจนเกิดวัสดุเหลือทิ้งมากกว่า 1.4 ล้านตัน [2] ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งด้านการจัดหาพื้นที่จัดเก็บและการเกิดมลภาวะทางอากาศอีกด้วย

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง [2]-[4] ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตของโรงไฟฟ้าถ่านหิน มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ มีรูพรุนสูง ขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน เนื่องจากมีน้ำหนักรวมไม่สามารรถลอยได้เหมือนกับเถ้าถ่านหิน จึงตกลงมาอยู่ที่ก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพหรือการบดละเอียดทำให้คอนกรีตมีปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน ดังนั้นงานวิจัยส่วนมากจึงใช้เถ้าก้นเตาเพื่อแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียด แต่อย่างไรก็ตาม Jaturapitakkul และ Cheerarat [3] พบว่าเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับเถ้าถ่านหินที่มาจากแหล่งเดียวกัน หากปรับปรุงเถ้าก้นเตาให้มีความละเอียดมากขึ้น ก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากขึ้น

นอกจากนี้ ชลตรงค์ เจริญไวยเจตน์ [4] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ก่อนนำไปบดให้มีความละเอียดที่เท่ากัน (น้ำหนักค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5±1 โดยน้ำหนัก) จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการศึกษาพบว่าหากนำเถ้าก้นเตาไปร้อนผ่านตะแกรงขนาดเล็ก แล้วนำไปบดละเอียดทำให้มอร์ตาร์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยเถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน ซึ่งการวิจัยนี้ให้ผลศึกษาไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Kim [5] และ บุขรา [6] ที่พบว่าการคัดแยกเถ้าก้นเตาก่อนใหญ่ออกโดยวิธีการร้อนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพ

ของเถ้าก้นเตาโดยการร้อนผ่านตะแกรงขนาดเล็กและการบดละเอียดช่วยทำให้เถ้าก้นเตากลายเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้อย่างไรก็ตามการศึกษาและการพัฒนาทั้งด้านสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าก้นเตายังมีน้อย เมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินหรือวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ประกอบกับยังไม่มีการใช้งานเถ้าก้นเตาอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคอนกรีตกำลังสูง โดยคอนกรีตกำลังสูงต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 55 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐาน ACI 363 [7] งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบด้านการรับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านกระบวนการร้อนผ่านตะแกรงและการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน และใช้เถ้าก้นเตาส่วนที่เหลือเพื่อแทนที่มวลรวมละเอียดเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาด้วยการร้อนผ่านตะแกรงและนำไปบดละเอียด เถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อหล่อคอนกรีต จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า และทดสอบการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเถ้าก้นเตาที่ผ่านการร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 50 มวลรวมหยาบใช้หินปูนร้อนผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว และค้ำเบอร์ 4

เถ้าก้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้ามีความชื้นสูง ก่อนนำมาใช้จึงต้องนำไปอบแห้งก่อนนำมาร้อนเพื่อป้องกันเถ้าก้นเตาติดตะแกรง เถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้ำเบอร์ 50 จะนำไปใช้แทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติ (SBA) ในปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร ส่วนเถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้ำบนถาด (PAN) จะนำไปบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดวัสดุ ให้มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องของตะแกรงเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ต่ำกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนนี้จะนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน (GBA) เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2.2. สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน OPC และ GBA แสดงในตารางที่ 1 โดยที่ปูนซีเมนต์ OPC มีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์

325 เท่ากับร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนักและมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 ส่วนเล็กน้อย GBA มีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักและมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.87 เล็กกว่าที่นำมาแทนที่มวลรวมละเอียด (SBA) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.09

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเล็กันเตา

Materials	Retained on a sieve No. 325 (%)	Specific gravity
OPC	11.35	3.14
GBA	0.75	2.87
SBA	N/A	2.09

2.3. สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน OPC และ GBA แสดงในตารางที่ 2 โดยที่องค์ประกอบหลักทางเคมีของ OPC ได้แก่ CaO, SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มีค่าเท่ากับร้อยละ 63.3, 20.9, 4.8 และ 3.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบหลักทางเคมีของ GBA ได้แก่ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.3, 12.8, 22.0 และ 28.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.1 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ปริมาณของ SO₃ และ LOI ของเล็กันเตามีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งสามารถจำแนก GBA ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] ได้โดยจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class C นอกจากนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเล็กันเตา GBA และเล็กันเตา FA [9] ที่มาจากแหล่งเดียวกันพบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีคล้ายกัน

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical compositions (%)	OPC	GBA	FA [9]
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.9	25.3	27.9
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.8	12.8	14.4
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	22.0	15.6
Calcium oxide (CaO)	63.3	28.3	27.9
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	4.2	7.1
Magnesium oxide (MgO)	1.3	1.4	2.2
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.3	0.6	1.9
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	2.8	2.8
Loss of ignition (LOI)	2.9	3.3	0.2

2.4. ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 โดยที่คอนกรีตทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.25 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการยุบตัวให้เท่ากับ 17.5±2.5 เซนติเมตร คอนกรีตควบคุม (Control) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณ 560 กก/ม³ ส่วนคอนกรีต GBA35, GBA50 แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนัก และ GBA65 ใช้เล็กันเตาที่ปรับปรุงคุณภาพ (GBA) นอกจากนี้ยังใช้เล็กันเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 50 (SBA) เพื่อนำมาแทนมวลรวมละเอียดธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร โดยแทนที่ในคอนกรีตที่ใช้เล็กันเตา GBA แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ให้กำลังอัดมากที่สุด

2.5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การวิจัยนี้ใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เมื่อหล่อแล้วทิ้งไว้ในแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากแกะคอนกรีตจากแบบแล้วนำไปบ่มน้ำ ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [10] ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

2.6. การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

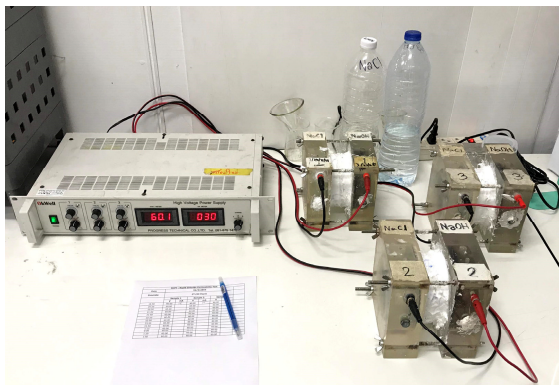
การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 [11] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการนำคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 90 วัน มาตัดตามขวางให้คอนกรีตมีความสูง 5 เซนติเมตร จากนั้นนำมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ ป้อนแรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ไหลผ่านก่อนคอนกรีต จดบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้าทุก 30 นาที เป็นระยะเวลาติดต่อกัน 6 ชั่วโมง จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาค่าความต้านทานซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตตามสมการที่ (1) โดยที่ Q คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ และ I คือค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต

Concrete	Mix Proportion (kg/m ³)						SP*	W/B	Slump (cm)
	Cement	GBA	SBA	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water			
Control	560	-	-	750	990	140	5.04	0.25	15.0
GBA35	364	196	-	745	985	140	5.60	0.25	17.0
GBA50	280	280	-	740	980	140	6.16	0.25	16.0
GBA65	196	364	-	735	975	140	6.72	0.25	18.0
GBA50-SBA60	280	280	362	302	980	140	6.72	0.25	17.0

* SP = Superplasticizer Type F



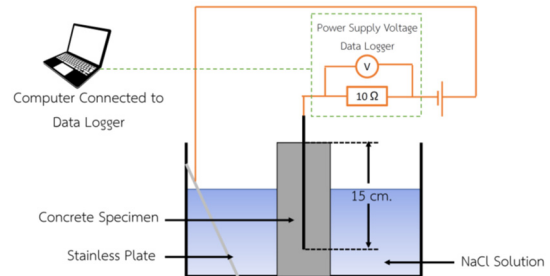
รูปที่ 1 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า



(ก) อุปกรณ์การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

2.7. การทดสอบการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

การทดสอบการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า ประยุกต์มาจากการทดสอบมาตรฐาน NT Build 356 [12] โดยทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่มีความยาว 20 เซนติเมตร ลงไปในคอนกรีตลึก 15 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยนำก้อนตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยระดับของสารละลายอยู่ต่ำกว่าผิวคอนกรีต 5 เซนติเมตร จากนั้นใช้ไฟกระแสตรง 12 โวลต์ ขั้วบวกต่อเข้ากับตัวต้านทาน 10 โอห์มแล้วต่อไปยังเหล็กเสริมของคอนกรีต ส่วนขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นสแตนเลสที่จุ่มในสารละลาย ตามที่แสดงในรูปที่ 2 จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรทุก 6 ชั่วโมง เป็นเวลาติดต่อกัน 7 วัน จากนั้นนำคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมไปหาน้ำหนักที่สูญเสียที่เกิดจากสนิมเหล็กตามมาตรฐาน ASTM G1 [13]



(ข) รูปแบบวงจรของการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

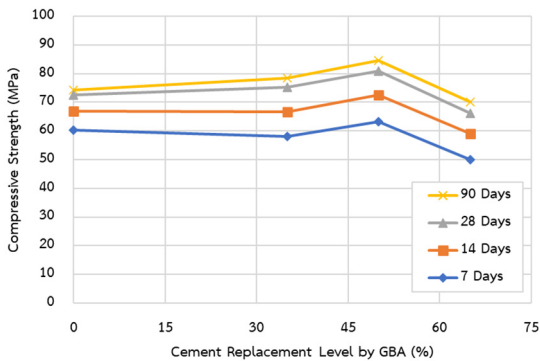
รูปที่ 2 การทดสอบการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

3. ผลการทดสอบ

3.1. กำลังอัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าคอนกรีตที่นำมาทดสอบทั้งหมดเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363 [7] เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (Control) และกำลังอัด

ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (GBA35 GBA50 และ GBA65) มีกำลังอัดสูงกว่า 55 เมกะปาสคาล



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา

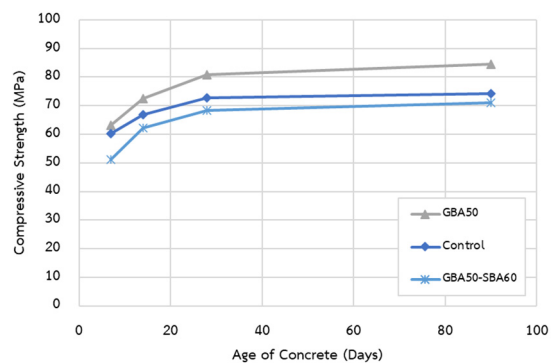
คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA35) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 58.0, 66.7, 75.3 และ 78.4 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (Control) ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 60.3, 66.8, 72.7 และ 74.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตควบคุม (Control) สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีต GBA35 ในช่วงแรกๆของอายุคอนกรีต แต่ในช่วงปลายอายุคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าเนื่องจากคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปอซโซลานมีการพัฒนากำลังอัดได้ช้ากว่าในช่วงแรก แต่มีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง

คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA50) พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 63.2, 72.5, 80.9 และ 84.5 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่ามีกำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นที่อายุเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมคือร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้เถ้าก้นเตาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากจึงสามารถเข้าไปเติมในช่องว่างขนาดเล็ก (Micro Voids) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น

คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GBA65) พบว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับ 50.1, 59.2, 66.2 และ 70.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่ามีกำลังอัดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นที่อายุเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมน้อยเกินไป ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

น้อยลง แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลานจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามอีกด้วย

จากรูปที่ 4 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 50 เพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร (GBA50-SBA60) มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต GBA50 ที่มีการใช้ทรายธรรมชาติในทุกอายุ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแต่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้การใช้เถ้าก้นเตาส่วนที่เหลือเพื่อเป็นมวลรวมละเอียดสูงถึงร้อยละ 60 โดยปริมาตร ถือเป็นการใช้เถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้อย่างคุ้มค่า นอกจากนี้ยังสามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363 [7] ได้เมื่อถึงอายุ 14 วันโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 62.3 เมกะปาสคาล

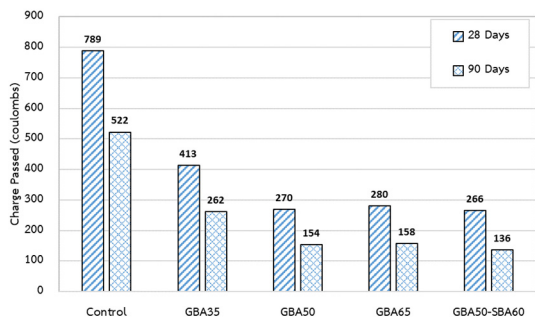


รูปที่ 4 กำลังอัดคอนกรีต (แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาที่ค้างตะแกรงเบอร์ 50)

3.2. การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Permeability Test) แสดงในรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตควบคุม (Control) มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 789 และ 522 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ คอนกรีต GBA35 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 413 และ 262 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีต GBA50 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 270 และ 154 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีต GBA65 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 280 และ 158 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีต GBA50-SBA60 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 266 และ 136 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยคอนกรีตทุกส่วนผสมจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำมาก (Very Low)

ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [11]



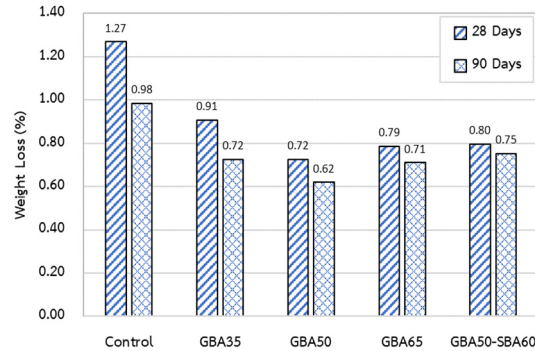
รูปที่ 5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ของคอนกรีตควบคุม (Control) คอนกรีต GBA35 และ คอนกรีต GBA50 พบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasit และคณะ [15] และงานวิจัยของ Ganesan และคณะ [16] ที่พบว่าการใช้วัสดุปอซโซลาน ช่วยให้ออร์ตาสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้ปริมาณ Ca(OH)_2 ลดลงและความชื้นน้ำเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้ากั้นเตาที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากั้นเตาเป็นร้อยละ 65 กลับพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมากขึ้นเล็กน้อย

อย่างไรก็ตามคอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลงตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตควบคุม (Control) มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะมีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมด้วย โดยเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถสร้างผลิตภัณฑ์มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นและมีช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ลดน้อยลง

3.3. การทดสอบการกักตัวของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 6 แสดงน้ำหนักของเหล็กที่สูญเสียจากการเกิดสนิมพบว่าคอนกรีตควบคุม (Control) มีน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.27 และ 0.98 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีต GBA35 มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก พบว่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 0.91 และ 0.72 ที่อายุ 28 และ 90 วัน

ตามลำดับ ซึ่งค่าน้ำหนักสูญเสียน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม (Control) ที่มีกำลังอัดใกล้เคียงกันที่อายุ 28 วัน จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตได้



รูปที่ 6 น้ำหนักของเหล็กที่สูญเสียเนื่องจากการเกิดสนิม

คอนกรีต GBA50 มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพร้อยละ 50 พบว่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.72 และ 0.62 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงและบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่ดีที่สุดในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตด้วยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT) ของคอนกรีต GBA50 ที่มีผลการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ดีที่สุด และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุดเช่นเดียวกัน คอนกรีต GBA65 ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมากถึงร้อยละ 65 พบว่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.79 และ 0.71 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับคอนกรีต GBA50 พบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้ากั้นเตาจากร้อยละ 50 เป็น 65 ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

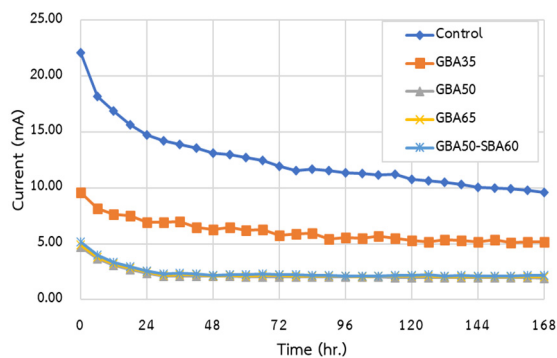
สำหรับคอนกรีต GBA50-SBA60 ที่ใช้เถ้ากั้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้ากั้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 50 เพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร พบว่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.80 และ 0.75 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับคอนกรีต GBA50 พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาทำให้ค่าน้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาน้ำหนักของเหล็กที่สูญเสียเนื่องจากการเกิดสนิม

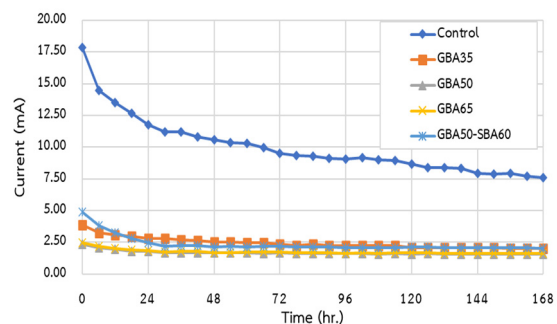
พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียของเหล็กลดน้อยลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาให้สูงขึ้นพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า ที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตบ่งบอกถึงการซึมผ่านของไอออนคลอไรด์ (Cl⁻) คอนกรีตที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อย จึงเป็นคอนกรีตที่ต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าสุดท้ายจากการทดสอบตามมาตรฐาน NT Build 356 [12] และปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [11] พบว่าผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยคอนกรีตที่มีค่ากระแสไฟฟ้าสุดท้ายต่ำ ปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตก็จะมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน ของคอนกรีตอายุ 28 วัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน ของคอนกรีตอายุ 90 วัน

4. สรุป

เถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างลาด (PAN) และนำไปบดละเอียดจนมีขนาด

เล็กโดยมีอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คอนกรีตมีกำลังอัด 80.9 และ 84.5 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นกำลังอัดที่สูงที่สุด ส่งผลให้การต้านทานคลอไรด์และการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตดีที่สุดเช่นกัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้การต้านทานคลอไรด์และการต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตสูงขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลงถึงร้อยละ 70 และทำให้น้ำหนักสูญเสียของเหล็กเสริมลดลงร้อยละ 37 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน

การใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 50 แทนที่มีมวลรวมละเอียดร้อยละ 60 โดยปริมาตร ส่งผลด้านลบต่อสมบัติการต้านทานคลอไรด์ และการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตของไม่มากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (แม่เมาะ) ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าก้นเตา และบริษัท ชีฟ้า จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารลดน้ำพิเศษเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

6. การอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, “สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2564,” [Online]. Available: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116. [Accessed: 10 เมษายน 2564].
- [2] Abdulmatin A., Tangchirapat W., and Jaturapitakkul C. (2015). Effect of types of superplasticizer on properties of paste and mortar made with a binder of bottom ash and calcium carbide residue. *Journal of Thailand Concrete Association* 3(1), 31-41. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000167
- [3] Jaturapitakkul C. and Cheerarot R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanic material. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(1), 48-53. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(48)
- [4] ชลตรงค์ เจริญไวยเจตน์ (2560). การพัฒนาคุณภาพเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในการงานคอนกรีตกำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญา

- วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] Kim, H.K. (2015). Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability. *Construction and Building Materials* 91, 57-64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.017
- [6] บุชรา มินยุทธ์ (2562). การพัฒนาเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] American Concrete Institute (2010). Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute: Farmington Hills, Michigan, pp. 65.
- [8] ASTM C618 (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
- [9] ฐิติพงศ์ ต่วนทอง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. การปรับปรุงผิวหน้าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินโดยการทาเคลือบผิวด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] ASTM C39 (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
- [11] ASTM C1202 (2019). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
- [12] NT Build 356. Concrete, repairing materials and protective coating: embedded steel method, chloride permeability. Nordtest Method, Espoo, PA, Finland.
- [13] ASTM G1 (2017). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
- [14] American Concrete Institute (2010). Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute: Farmington Hills, Michigan, pp. 65.
- [15] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials* 22(5), 932-938. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.001
- [16] Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials* 22(8), 1675-1683. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011