Journal of Thailand Concrete Association
วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

COMPRESSIVE STRENGTH, WATER PERMEABILITY, AND CHLORIDE ION PENETRATION OF HIGH-VOLUME GROUND BAGASSE ASH CONCRETE

กำลังอัดประลัย อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณสูง

อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์[1] นัฐภพ ถานะวุฒพงศ์[2] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[3] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[4]

[1]นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received:August Feb 2, 2018
Received Revised Form:
June 8, 2018
Accepted: June 11, 2018

ABSTRACT:

This research aims to study the properties of concrete with high-volume ground bagasse ash (GBA) to replace Portland cement in concrete. The median particle size (d_{50}) of ground bagasse ash was 4.37 micron. GBA was used to replace Portland cement at 35, 50, 65 and 80% by weight of binder in concrete. The water to binder (W/B) ratio was controlled at 0.45 and slumps of fresh concretes were maintained between 15 to 20 cm by using superplasticizer. The properties of concrete including ultimate compressive strength, water permeability, and rapid chloride ion penetration were investigated. The results showed that the concretes using GBA at 35 and 50% by weight of binder to replace Portland cement had the higher ultimate compressive strength than control concrete while the water permeability resistance and rapid chloride ion penetration resistance were better than control concrete. Moreover, the concrete using 65% of GBA to replace Portland cement had the ultimate compressive strength and the water permeability similar to that of control concrete.

KEYWORDS: bagasse ash, Portland cement replacement, high-volume, ultimate compressive strength, water permeability, chloride ion penetration resistance

**Corresponding Author,*
Email address: weerachart.tan@kmutt.ac.th

©2018 J. of TCA All rights reserved

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GBA) แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมของคอนกรีต โดยใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 4.37 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.45 ในทุกส่วนผสม ใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ช่วยในการปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 ซม. ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัดประลัย การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ยังมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างชัดเจน และยังพบว่าสามารถใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยที่คอนกรีตยังคงมีสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ:เถ้าชานอ้อย, การแทนที่ปูนซีเมนต์, ปริมาณสูง, กำลังอัดประลัย, อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต, ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากเพื่อเผาหินปูน ($CaCO_3$) และวัตถุดิบอื่นๆ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นเม็ดปูน (clinker) โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม ต้องปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่บรรยากาศประมาณ 900 ถึง 1,100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบ [1] ในปัจจุบันทั่วโลกมีการผลิตปูนซีเมนต์ประมาณ 3,500 ล้านตันต่อปี และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีส่วนอย่างมากที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งนำไปสู่ปัญหาสภาวะโลกร้อน (global warming) ดังนั้นการใช้วัสดุอื่นทดแทนปูนซีเมนต์ หรือการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยลงช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ และช่วยลดปัญหาที่เกิดจากปรากฏการณ์เรือนกระจกได้

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล เมื่ออ้อยผ่านกระบวนการหีบแล้วเหลือเป็นชานอ้อย จากนั้นนำชานอ้อยไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อเผาแล้วเหลือเป็นเถ้าชานอ้อย ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีวิธีการกำจัดหรือนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม โดยเถ้าชานอ้อยเกือบทั้งหมดถูกกองทิ้งไว้ภายในบริเวณโรงงานน้ำตาล ทำให้เกิดปัญหาเรื่องพื้นที่กองทิ้ง และฝุ่นละอองฟุ้งกระจาย จากข้อมูลพบว่าประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลมากเป็นอันดับที่ 4 ของโลก (อันดับ 1 บราซิล อันดับ 2 อินเดีย และอันดับ 3 จีน) โดยในปีล่าสุด (ปีการผลิต พ.ศ. 2559/2560) พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยประมาณ 93 ล้านตัน [2] โดยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อยกลายเป็นเถ้าชานอ้อย [3] คือมีเถ้าชานอ้อยเกิดขึ้นประมาณ 576,600 ตัน/ปี

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4-9] พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีความละเอียดใกล้เคียงหรือมากกว่าปูนซีเมนต์ สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตได้ดี โดยทำให้คอนกรีตมีสมบัติหลายอย่างดีขึ้น เช่น มีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น มีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลง และมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น ในปี ค.ศ. 2007 Ganesan และคณะ [4] ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 5.4 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่าสามารถใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของ

©2018 J. of TCA All rights reserved

วัสดุประสาน โดยคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยไม่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม มีความทึบน้ำดีขึ้น และมีความต้านทานต่อคลอไรด์ดีขึ้น

ปี ค.ศ. 2009 Chusilp และคณะ [5] ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.0 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตควบคุม มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และมีปริมาณความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ต่อมาปี ค.ศ. 2013 Rukzon และ Chindaprasirt [6] ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 16.4 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ผลการวิจัยพบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และยังช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงขึ้น โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้เกือบทั้งหมดใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน [4-6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง โดยใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้หลักการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง (high-volume fly ash concrete) ซึ่งพัฒนาโดย CANMET ประเทศแคนนาดา ในปี ค.ศ.1986 [10] ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัย ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต เปรียบเทียบกันคอนกรีตควบคุมซึ่งไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสม

2. วิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุ

2.1.1 ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

2.1.2 เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GBA)

เถ้าชานอ้อยที่ใช้ในการวิจัยนี้นำมาจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดลพบุรี ทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ (ball mill) ด้วยลูกเหล็กคละขนาดจนมีความละเอียด ซึ่งวัดโดยการร่อนเปียกผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยมีปริมาณเหลือค้างบนตะแกรงเท่ากับร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก ซึ่งตารางที่ 1 และ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (μm)
ปูนซีเมนต์ (OPC)	3.13	14.6
เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GBA)	2.27	4.37

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ (OPC)	เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GBA)
Silicon dioxide, SiO_2	20.80	63.88
Aluminum oxide, Al_2O_3	5.50	8.02
Iron oxide, Fe_2O_3	3.16	4.85
Calcium oxide, CaO	64.97	8.04
Magnesium oxide, MgO	1.06	1.37
Sodium oxide, Na_2O	0.08	0.24
Potassium oxide, K_2O	0.55	1.74
Sulfur trioxide, SO_3	2.96	0.13
Loss on ignition, LOI	2.89	10.08
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	76.75

©2018 J. of TCA All rights reserved

2.1.3 มวลรวม

ใช้หินปูนย่อยซึ่งมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.45 เป็นมวลรวมหยาบ ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.07 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.87 เป็นมวลรวมละเอียด

2.1.4 สารลดน้ำพิเศษ

ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดโพลีคาร์บ็อกซิเลตอีเทอร์โพลิเมอร์ (Polycarboxylate ether polymers) ซึ่งมีสมบัติสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C494 [11] ชนิด A และ F

2.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

ใช้ปริมาณวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้าชานอ้อยบดละเอียด) คงที่เท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้สารลดน้ำพิเศษในการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ให้คงที่เท่ากับ 0.45 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (Slump) ให้อยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 ซม. ในทุกอัตราส่วนผสม โดยส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 กำลังอัดประลัย

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ในการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [12]

2.3.2 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ทำการทดสอบโดยใช้น้ำที่มีแรงดันคงที่ 5 บาร์ ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. หนา 4 ซม. แล้วทำการวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านคอนกรีตเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที ตามวิธีการทดสอบและคำนวณของ Chindaprasirt และคณะ [13]

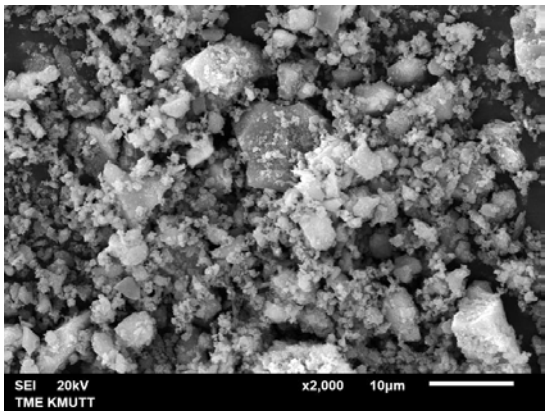
2.3.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. หนา 5 ซม. ในการทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต โดยการวัดปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [14] ที่อายุ 28 และ 90 วัน

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

3.1 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ

จากตารางที่ 3 แสดงส่วนผสมคอนกรีต พบว่าปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น กล่าวคือคอนกรีตซึ่งใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 35, 50, 65 และ 80 ในส่วนผสม ใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 4, 8, 10, 12 และ 14 กก./ม^3. ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจากลักษณะอนุภาคของเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมและมีผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 1 และความละเอียดของ GBA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 ไมโครเมตร ซึ่งละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 ไมโครเมตร ดังนั้น GBA มีพื้นที่ผิวมากกว่าปูนซีเมนต์เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน ทำให้มีความต้องการน้ำและสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน [15-17] นอกจากนี้ผลจากค่าความถ่วงจำเพาะของ GBA ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ เมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้มีปริมาตรของวัสดุประสานเพิ่มขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำและสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 1 เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GBA) กำลังขยาย 2,000 เท่า

©2018 J. of TCA All rights reserved

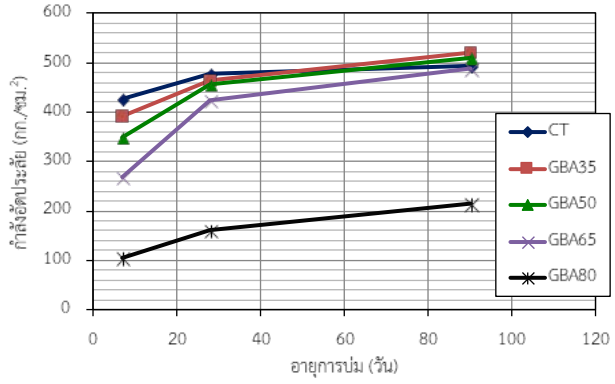
ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีต	ส่วนผสม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)							ค่ายุบตัว
	ปูนซีเมนต์	GBA	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	น้ำ	W/B	SP	(ซม.)
CT	400	0	880	915	180	0.45	4.0	17.0
GBA35	260	140	855	890	180	0.45	8.0	18.0
GBA50	200	200	845	880	180	0.45	10.0	19.0
GBA65	140	260	835	870	180	0.45	12.0	18.5
GBA80	80	320	820	860	180	0.45	14.0	19.0

3.2 กำลังอัดประลัย

พิจารณารูปที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต เห็นได้อย่างชัดเจนว่าคอนกรีต GBA80 ซึ่งใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่าคอนกรีตอื่นๆอย่างมาก กล่าวคือ มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 105, 160 และ 214 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานโครงสร้างอาคาร โดยคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างอาคารในปัจจุบันควรมีกำลังอัดประลัยไม่น้อยกว่า 240 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของคอนกรีตทุกส่วนผสมที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีตควบคุม (CT) มีกำลังอัดประลัยมากที่สุดเท่ากับ 426 กก./ซม.^{2} รองลงมาคือคอนกรีต GBA35, GBA50, GBA65 และ GBA80 ซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 393, 349, 269 และ 105 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่อายุ 7 วัน การใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงเป็นลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุการบ่มของคอนกรีต

เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต GBA35, GBA50 และ GBA65 ซึ่งใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับคอนกรีต CT โดยคอนกรีต GBA35, GBA50 และ GBA65 มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 465, 456 และ 425 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 97, 95 และ 89 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT โดยทุกส่วนผสมมีกำลังอัดประลัยสูงกว่า 240 กก./ซม.^{2} ยกเว้นคอนกรีต GBA80

ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต GBA35 และ GBA50 มีการพัฒนากำลังอัดประลัยอย่างต่อเนื่องจนสามารถมีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีต CT โดยมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 520 และ 509 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 105 และ 103 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT ตามลำดับ นอกจากนั้นคอนกรีต GBA65 ซึ่งใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 65 หรือใช้ปูนซีเมนต์เพียง 140 กก./ม.^{3} ในส่วนผสมของคอนกรีต สามารถมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 489 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 99 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT แสดงให้เห็นว่า GBA เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี โดยสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีต CT ได้เมื่อใช้แทนที่ OPC ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ GBA เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพคือ องค์ประกอบทางเคมีของ GBA ซึ่งมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 63.88 และมีความละเอียดสูง โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 ไมโครเมตร ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ได้ดี เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคที่เล็กของ GBA ยังสามารถช่วยอุดช่องว่าง

©2018 J. of TCA All rights reserved

ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น [18]

3.3 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

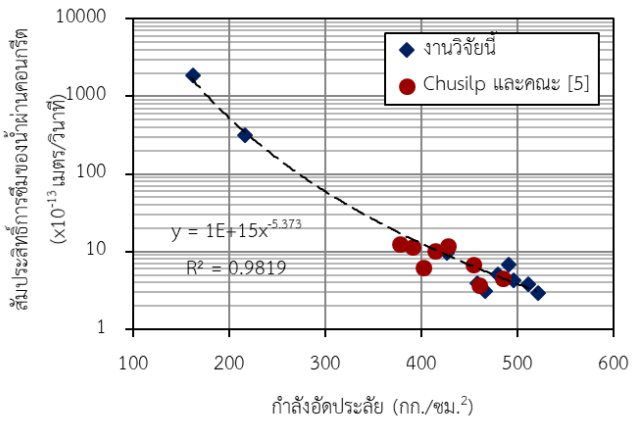
ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต CT มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ $5.39x10^{-13}$ เมตร/วินาที เมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35 สามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเป็น $2.27x10^{-13}$ เมตร/วินาที ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีต CT โดยคิดเป็น 0.61 เท่าของคอนกรีต CT ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ก็ให้ผลคล้ายกัน คือสามารถทำให้คอนกรีต GBA50 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีต CT คือมีค่าเท่ากับ $4.14x10^{-13}$ เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.77 เท่าของคอนกรีต CT แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 65 ทำให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น $10.19x10^{-13}$ เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 1.89 เท่าเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT ในส่วนของคอนกรีต GBA80 พบว่าการใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 80 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากคือมีค่าเป็น $1,955.31x10^{-13}$ เมตร/วินาที หรือมีค่ามากกว่าคอนกรีต CT ถึง 363 เท่า

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

คอนกรีต	สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต, K (เมตร/วินาที)			
	28 วัน		90 วัน	
	$x10^{-13}$	(K/K_{CT})	$x10^{-13}$	(K/K_{CT})
CT	5.39	1.00	4.47	1.00
GBA35	2.27	0.61	3.12	0.70
GBA50	4.14	0.77	4.02	0.90
GBA65	10.19	1.89	7.25	1.62
GBA80	1955.31	362.77	334.54	74.84

ที่อายุ 90 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมสามารถพัฒนาให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงกว่าที่อายุ 28 วัน เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่อเนื่อง โดยคอนกรีต CT, GBA35, GBA50, GBA65 และ GBA80 มีค่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ $4.47x10^{-13}$, $3.12x10^{-13}$, $4.02x10^{-13}$, $7.25x10^{-13}$ และ $334.54x10^{-13}$ เมตร/วินาที ตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าปริมาณการใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต คือเมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35 และ 50 สามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำกว่าคอนกรีต CT ได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่เป็นร้อยละ 65 ทำให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมากกว่าคอนกรีต CT เป็น 1.89 และ 1.62 เท่า ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 80 กล่าวคือมีค่ามากกว่าคอนกรีต CT ถึง 363 และ 75 เท่า ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

นอกจากนี้รูปที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัยสูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chusilp และคณะ [5] และสอดคล้องกับการใช้วัสดุปอซโซลานอื่นๆในคอนกรีต เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบเปลือกไม้ โดยเป็นผลจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดช่องว่างในคอนกรีต [13,19]



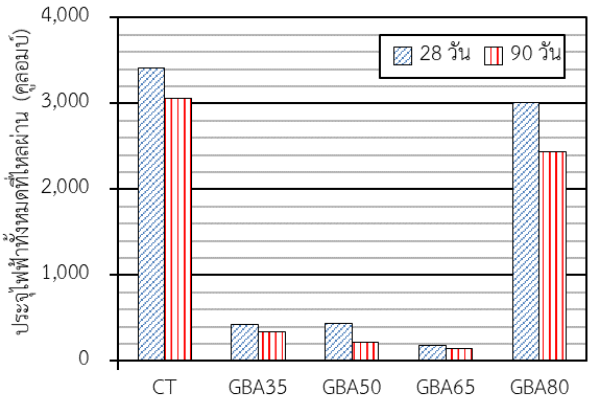
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ซึ่งทดสอบโดยการวัดปริมาณประจุไฟฟ้า

©2018 J. of TCA All rights reserved

ทั้งหมดที่ไหลผ่าน (total charge passed) ก้อนตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 [14] พบว่าคอนกรีต CT มีค่าเท่ากับ 3,412 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 วัน และลดลงเป็น 3,055 คูลอมบ์ เมื่อมีอายุ 90 วัน เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5 ซึ่งแสดงระดับการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 [14] พบว่าจัดอยู่ในระดับปานกลาง (2,000 ถึง 4,000 คูลอมบ์) แต่เมื่อใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีตพบว่าคอนกรีต GBA35 มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านลดลงอย่างมาก คือมีค่าเป็น 429 และ 335 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับต่ำมาก (100 ถึง 1,000 คูลอมบ์)



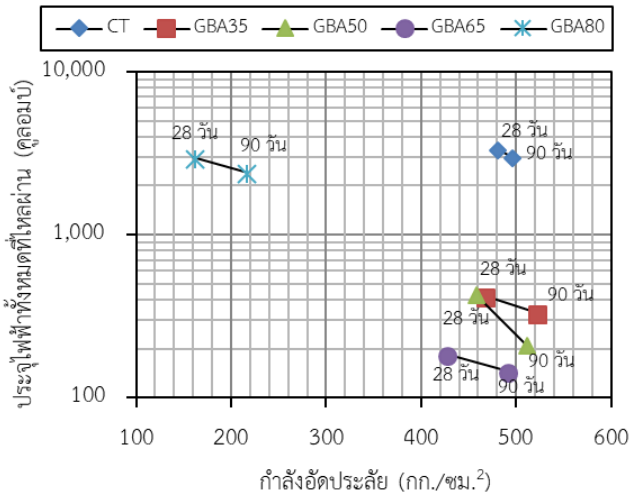
รูปที่ 4 ค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ตารางที่ 5 ระดับการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต [14]

ประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต
>4,000	สูง
2,000-4,000	ปานกลาง
1,000-2,000	ต่ำ
100-1,000	ต่ำมาก
<100	แทบไม่มี

เช่นเดียวกันกับคอนกรีต GBA50 และ GBA65 โดยคอนกรีต GBA50 มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านเท่ากับ 440 และ 215 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และคอนกรีต GBA65 มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านต่ำที่สุดเท่ากับ 186 และ 147 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ GBA เป็นร้อยละ 80 ในคอนกรีต GBA80 ทำให้มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 3,015 และ 2,436 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT และจัดอยู่ในระดับปานกลาง (2,000 ถึง 4,000 คูลอมบ์) เช่นเดียวกันกับคอนกรีต CT โดยจากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 35 ถึง 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต พบว่าสามารถแยกคอนกรีตออกได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกคือคอนกรีต GBA80 ซึ่งมีกำลังอัดประลัยต่ำและมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านสูง (มากกว่า 1,000 คูลอมบ์) กลุ่มที่ 2 คือคอนกรีต CT ที่มีกำลังอัดประลัยสูงและมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านสูง (มากกว่า 1,000 คูลอมบ์) และกลุ่มที่ 3 คือกลุ่มคอนกรีต GBA35, GBA50 และ GBA65 ที่มีค่ากำลังอัดประลัยสูงและมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านต่ำ (ต่ำกว่า 1,000 คูลอมบ์) โดยคอนกรีตกลุ่มที่ 3 เป็นคอนกรีตที่มีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้ดีเนื่องจากมีกำลังอัดประลัยสูง และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

นอกจากนั้นยังเห็นได้ชัดเจนว่าค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่ใช่ตัวแปรหลักที่จะทำให้คอนกรีตมีสมบัติความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้น กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีต CT กับคอนกรีต GBA80 พบว่าคอนกรีต CT

©2018 J. of TCA All rights reserved

มีกำลังอัดประลัยที่มากกว่าคอนกรีต GBA80 อย่างมาก แต่กลับมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านที่ใกล้เคียงกัน อีกกรณีคือเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีต CT กับกลุ่มของคอนกรีต GBA35, GBA50 และ GBA65 เห็นว่าทั้งหมดมีกำลังอัดประลัยที่อายุ 90 วัน ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านที่ต่างกันในทุกส่วนผสม

นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดประลัยส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลงเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสม ตัวอย่างเช่นคอนกรีต GBA50 ที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 456 กก./ซม.^{2} และมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านเท่ากับ 440 คูลอมบ์ แต่เมื่อมีอายุ 90 วัน มีกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นเป็น 509 กก./ซม.^{2} มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านลดลงเหลือ 215 คูลอมบ์

4. สรุป

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

4.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ในส่วนผสมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

4.2 การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 90 วัน โดยคอนกรีต GBA35 และ GBA50 มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 520 และ 509 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 105 และ 103 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน

4.3 คอนกรีต GBA65 ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เพียง 140 กก./ม.^{3} ในส่วนผสม สามารถมีกำลังอัดประลัยที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม คือมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 425 และ 489 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 89 และ 99 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีต

4.4 การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ช่วยให้คอนกรีตมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน

4.5 ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 35 ถึง 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างมาก

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6114)

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Environmental Protection Agency, AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Washington, DC, 2005.

[2] Office of Cane and Sugar Board, “Report on total cane crushing and sugar production 2016/2017.”, Ministry of Industry, Thailand, 127 p. (in Thai)

[3] G.C., Cordeiro, R.D.T, Filjp, E.M.R., Fairbairn, M.M.T., Luis, and C.H., Oliver. “Influence of mechanical grinding on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash.” Proceedings of an International Conference on use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, pp.1-9, 2004.

[4] K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 6, pp. 515–524, Jul. 2007.

[5] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 11, pp. 3352–3358, Nov. 2009.

[6] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, “Utilization of bagasse ash in high-strength concrete,” *Materials & Design*, vol. 34, pp. 45–50, Feb. 2012.

[7] K. Montakarntiwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, “Strength and heat

 ©2018 J. of TCA All rights reserved

evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry," *Materials & Design*, vol. 49, pp. 414–420, Aug. 2013.

[8] Rattapon Somna and Chai Jaturapitakkul, "Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 34, No. 4, October – December, pp. 369-381, 2011. (In Thai)

[9] P. Rattanachu, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, "Mechanical Properties of High Strength Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate with Ground Bagasse Ash," Journal of Thailand Concrete Association, Vol.4, No.2 July-December, pp. 36-48, 2016. (In Thai)

[10] A. Bilodeau and V.M. Malhotra, "High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development," ACI Materials Journal, January/February, pp. 41-48, 2000.

[11] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM Standard C494, 2010.

[12] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM Standard C39/C39M, 2010.

[13] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1492–1499, Jul. 2007.

[14] *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM Standard C1202, 2010.

[15] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2646, Jul. 2009.

[16] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1492–1499, Jul. 2007.

[17] P. Toolkasikorn, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, "Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash" *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 2, No.1, January-June, pp. 8-16, 2014. (In Thai)

[18] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Chutubtim, "A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials," *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, no. 4–5, pp. 335–343, Aug. 2001.

[19] W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 10, pp. 767–774, Nov. 2010.

©2018 J. of TCA All rights reserved