

คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าขาน้อยบดละเอียดปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

High Strength Concrete Containing High Volume Ground Bagasse Ash Blended with Calcium Carbonate Powder

ทวิช กล้าแท้* Trinh Nhat Ho Tran Sambath Men วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Tawich Klathae*, Trinh Nhat Ho Tran, Sambath Men, Weerachart Tangchirapat

and Chai Jaturapitakkul

Received: 21 July 2021, Revised: 13 October 2021, Accepted: 27 October 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความต้องการสารลดน้ำพิเศษ ความพรุน กำลังอัด และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าขาน้อยบดละเอียด (GB) ในปริมาณสูงโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ร่วมกับการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) ร้อยละ 15, 10, 5 และ 0 คงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC และ 80GB) ทุกอัตราส่วนผสม ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตกำลังสูงผสม GB ในปริมาณสูง มีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากกว่าคอนกรีตควบคุม (CON) ในขณะที่ CC สามารถช่วยลดความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตกำลังสูงได้ร้อยละ 25 ถึง 50 ความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของ GB ที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC สามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 56.8, 58.2, 65.2 และ 55.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูง (มากกว่า 55 MPa) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ด้วย GB ร่วมกับ CC มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 60 ถึง 61 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CON จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า GB เป็นวัสดุพอชโซลานที่สามารถใช้ร่วมกับ CC เพื่อแทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้

คำสำคัญ: เถ้าขาน้อยปริมาณสูง, คอนกรีตกำลังสูง, แคลเซียมคาร์บอเนต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขที่ 126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Road, Bang Mot, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Tawich.civil@mail.kmutt.ac.th Tel: 08 4149 7426

ABSTRACT

This research aimed to investigate the superplasticizer (SP) requirement, porosity, compressive strength and environmental impact of high strength concrete (HS-C) containing high volume ground bagasse ash (GB) at 65, 70, 75 and 80 wt% of binder blended with calcium carbonate powder (CC) at 15, 10, 5 and 0 wt% of binder while containing Portland cement type I (OPC) at 20 wt% of binder (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC and 80GB, respectively). The results indicated that the HS-C containing high volume GB required SP more than HS-C made with OPC 100 wt% of binder (CON). However, the use of CC could reduce SP requirement about 25-50 % as compared with 80GB concrete. With the rise in GB content, the porosity of HS-C increased. The compressive strengths at 28 days and the 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC and 65GB15CC concretes had the compressive strengths of 56.8, 58.2, 65.2 and 55.5 MPa, respectively which were higher than 55 MPa and could be classified as HS-C. For environmental impacts, GB blended with CC concretes showed a reduction in carbon dioxide emission of 60-61% as compared with CON concrete. It is suggested that GB was a good pozzolanic material and incorporating of CC could replace OPC up to 80 wt% of binder for producing green HS-C.

Key words: high volume bagasse ash, calcium carbonate, high strength concrete

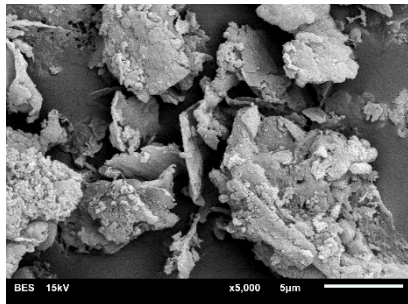
บทนำ

คอนกรีตที่ใช้ปอซโซลานปริมาณสูง (High Volume Pozzolan Concretes, HVPC) เริ่มมีการศึกษาในปีทศวรรษ 1980 โดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ซึ่งออกแบบโดยใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ร้อยละ 55 ถึง 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างอาคารในประเทศแคนาดา (Malhotra, 1986; Bilodeau and Malhotra, 2000; Malhotra, 2002) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่และเป็นการลดปริมาณการผลิต OPC ซึ่งใช้พลังงานความร้อนสูงถึง 1,500 °C ในการผลิตปูนเม็ด โดยในปี 2016 พบว่าทั่วโลกมีการผลิต OPC มากกว่า 4.65 พันล้านตัน (The European Cement Association (CEMBUREAU), 2018) ซึ่งทุกๆ 1 ตันของ OPC ที่

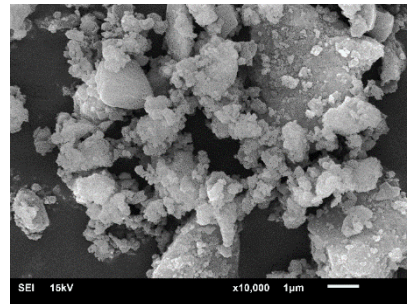
ผลิตได้ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศราวๆ 1 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ถึง 7 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ต่อมาเริ่มมีการศึกษาวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ เพื่อนำมาใช้ในการแทนที่ OPC ในปริมาณสูง (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Awal and Abubakar, 2011; Johari *et al.*, 2012) นอกจากนี้ Kakhuntodd *et al.* (2012) ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน (FFA) และเถ้าปาล์มน้ำมัน (GPA) ในปริมาณสูงแทนที่ OPC ร้อยละ 0, 20, 40, 55 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีต FFA20, FFA40 และ FFA55 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีต GPA40, GPA55 และ GPA70 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 และ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีต FFA20, FFA40, FFA55, FFA70, GPA20 และ GPA40

ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และความพรุนลดลงตามอายุของคอนกรีต ต่อมาในปี 2017 Rerkpiboon *et al.* (2017) ศึกษาผลกระทบของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GBA) ที่มีต่อความต้องการสารลดน้ำพิเศษ กำลังอัด โดยใช้ GBA แทนที่ OPC ร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า

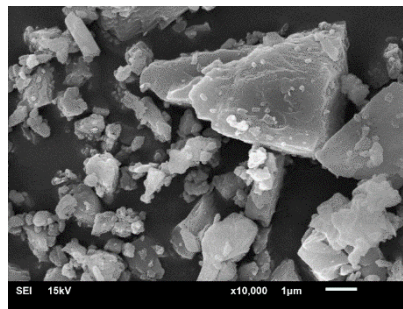
ปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ GBA แทนที่ OPC ในปริมาณที่มากขึ้น การใช้ GBA แทนที่ OPC อัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 90 วัน



(a) เถ้าขานอ้อยจากโรงงาน (BA) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(b) เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(c) ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) กำลังขยาย 10,000 เท่า

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค

เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุปอชโซลานชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีค่าอยู่ช่วงร้อยละ 65 ถึง 75 ที่อยู่ในภาพที่ไม่เป็นผลึกในปริมาณสูง (Singh *et al.*, 2000) ซึ่งมีศักยภาพสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ เมื่อทำการบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น หรือทำให้มีขนาดอนุภาคและความพรุนลดลง อีกทั้งประเทศไทยมีปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เพียงพอต่อการพัฒนา เพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยของการใช้เถ้าขานอ้อยทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ออกมาอย่างต่อเนื่อง แต่งานวิจัยเหล่านั้นเป็นเพียง

งานวิจัยที่พิจารณาถึงสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Chusilp *et al.*, 2009; Cordeiro *et al.*, 2009; Rajasekar *et al.*, 2018) ในขณะที่งานวิจัยที่พัฒนาการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงยังมีน้อยมาก อีกทั้งยังไม่พบการใช้เถ้าขานอ้อยปริมาณสูง ในงานคอนกรีตกำลังสูงในปัจจุบัน (Rerkpiboon *et al.*, 2017; Chindaprasirt *et al.*, 2020; Klathae *et al.*, 2020)

จากการรวบรวมข้อมูลการศึกษาต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังช่วงต้นค่อนข้างต่ำ และมีความ

ต้องการน้ำหรือความต้องการสารลดน้ำพิเศษที่สูงมาก เพื่อยังคงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด ดังนั้นจึงควรมีการเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย โดยใช้วัสดุทางเลือกใหม่ที่ผลิตได้ในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรกเข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์และวัสดุป่อชโซลานได้ดี เช่น ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหิน ด้วยสาเหตุที่แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert material) (Liu and Yan, 2010) มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดเล็กมาก สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดี ทำให้กำลังอัดในช่วงต้นสามารถ

พัฒนาได้ดียิ่งขึ้น (Yahia *et al.*, 2005; Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตกำลังสูงที่มีสมบัติที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าขานอ้อยหรือผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC), เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (BA), เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC),

Oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)
OPC	20.5	4.7	3.3	64.2	1.3	2.6	0.3	0.2	2.8	—	3.15	12.5
BA	59.6	9.3	5.3	8.5	1.8	0.2	0.9	3.3	11.1	74.2	2.06	37.0
GB	63.4	8.1	6	8.8	1.7	2.8	0.2	1.5	7.5	77.5	2.17	4.67
CC	<0.1	<0.1	<0.1	54.8	0.6	—	—	—	43.8	—	2.70	2.64

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน มอก 15-2555 (Thai Industrial Standard, 2012) มีลักษณะ เป็นฝุ่นผง เนื้อละเอียด มีสีเทาเข้ม มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 64.2 และ LOI เท่ากับ 2.8 เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (BA) ลักษณะทั่วไปของเถ้าขานอ้อยก่อนบด มีสีดำนเทาเล็กน้อย เนื้อเถ้าหยาบมองเห็นเป็นเม็ดมีเหลี่ยมมุมไม่มีรูปทรงชัดเจน มีความพรุนภาพที่ 1 (a) องค์ประกอบหลักทางเคมี คือ SiO₂ มีค่าเท่ากับ 59.6 และมี LOI เท่ากับร้อยละ 11.1 ของน้ำหนัก เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) โดยนำ BA อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 h. จากนั้นนำมา

บดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกรกระทบ (Los Angeles abrasion machine) ใช้ปริมาณเถ้าขานอ้อยครั้งละ 10 kg ต่อจำนวนลูกเหล็กขนาดน้ำหนัก 50 kg. หลังจากบดเป็นเวลา 4 h. นำเถ้าขานอ้อยประมาณ 100 g. มาใช้ในการหาความละเอียด ด้วยวิธีการร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 hr. จะได้ขนาดอนุภาคของเถ้าขานอ้อยข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งลักษณะทั่วไป มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด ภาพที่ 1 (b) มีองค์ประกอบหลัก คือ SiO₂, อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์

(Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 63.4, 8.1 และ 6.0 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบหลัก เท่ากับ 77.5 เมื่อจัดประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2015) ตรงตามประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งต้องมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 นอกจากนี้ยังพบว่า GB มี CaO, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และแมกเนเซียมออกไซด์ (MgO) เท่ากับ 8.8 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

(Loss on Ignition, LOI) เท่ากับ 7.5 โดยน้ำหนัก ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) จากบริษัทผู้ผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต ในประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงละเอียดแสดงในภาพที่ 1 (c) สีครีมอ่อนใกล้เคียงขาว มีลักษณะคล้ายแป้ง CC มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ CaO มีค่าเท่ากับ 54.8 และมี LOI ที่สูงเท่ากับร้อยละ 43.8 ของน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของ CaCO₃ โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน ได้แก่ OPC, BA, GB และ CC แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	Fineness modulus	Specific gravity	Water absorption (%)
River Sand	2.84	2.66	1.04
Crushed Granite	5.52	2.63	0.68

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุจากธรรมชาติ คือหินแกรนิตและทรายแม่น้ำ ตามลำดับ โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความละเอียด แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมวล

รวมละเอียดมีขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.84 และมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่อยู่เท่ากับ 10 mm. มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.52

2. วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตกำลังสูง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

Mix	Mix proportion (kg/m ³)						SP* (wt% of binder)	W/B	Slump (mm)
	OPC	CC	GB	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water			
CON	560	-	-	760	955	157	1.0	0.28	190
80GB	112	-	448	685	860	157	4.0	0.28	180
75GB5CC	112	28	420	690	860	157	3.0	0.28	170
70GB10CC	112	56	392	690	865	157	2.5	0.28	175
65GB15CC	112	84	364	695	870	157	2.0	0.28	185

* สารลดน้ำพิเศษมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

คอนกรีตกำลังสูงใช้ GB แทนที่ OPC ในอัตราส่วนร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ร่วมกับ CC ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 10, 5 และ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยคงที่อัตราส่วนของ OPC ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC และ 80GB) ทุกส่วนผสมตามลำดับ ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate-based) ชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C494 (American Society for Testing and Materials, 2016) เพื่อควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้คงที่เท่ากับ 0.28 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 150 ถึง 200 mm. โดยกำหนดปริมาณวัสดุประสาน (OPC+GB+CC) เท่ากับ 560 kg/m^3 โดยส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์ แสดงในตารางที่ 3

3. การทดสอบสมบัติของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพของ CC, GB และ OPC ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 (American Society for Testing and Materials, 2014a) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size; d_{50}) ทดสอบสมบัติทางเคมีโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) และถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของ GB และ CC โดยใช้เครื่องถ่ายภาพ Scanning Electron Microscope (SEM)

4. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 1, 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. และ สูง 200 mm. หลังจากการหล่อคอนกรีต 24 h. จึงทำการถอดแบบหล่อคอนกรีต และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 วัน ส่วนที่เหลือนำไปบ่มน้ำประปา โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 (American Society for Testing and Materials, 2014b) โดยทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

5. การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของซีเมนต์เพสต์โดยวิธี Thermogravimetric analysis (TGA)

ทำการศึกษาซีเมนต์เพสต์สองชนิด ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC และ 80GB โดยวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบ โดยการกำหนดสภาวะความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน และมีอัตราการไหล 120 ml/min โดยให้อัตราของความร้อนถูกรักษาให้ต่อเนื่องจาก $10^\circ\text{C}/\text{ค่าสูงสุด}$ และความร้อนสูงสุดถึง $1,000^\circ\text{C}$ โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ เพื่อวิเคราะห์การลดลงของปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์

6. การทดสอบความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง

ทดสอบหาความพรุนของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C642 (American Society for Testing and Materials, 2013) โดยนำตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 200 mm. มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งหัวและท้ายของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 100 mm. หลังจากนั้นตัดก้อนตัวอย่างอีกครั้งที่กึ่งกลางความยาวเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 50 mm. เพื่อหลีกเลี่ยงการเยิ้มของคอนกรีตส่วนบนซึ่งเป็นส่วนที่มีกำลังต่ำและมีความพรุนสูง โดยนำก้อนตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 h. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอบแห้ง (Mass_d , g.) จากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 h. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ (Mass_s , g.) นำก้อนตัวอย่างไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 h. หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเป็นระยะเวลา 14 h. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก (Mass_c , g.) และสุดท้ายนำก้อนตัวอย่างชั่งน้ำหนักในน้ำ (Mass_w , g.)

ตามลำดับ ความหนาแน่น และความพรุน และการดูด

ซึมน้ำของคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\text{Porosity (\%)} = \left(\frac{\text{Mass}_c - \text{Mass}_a}{\text{Mass}_c - \text{Mass}_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

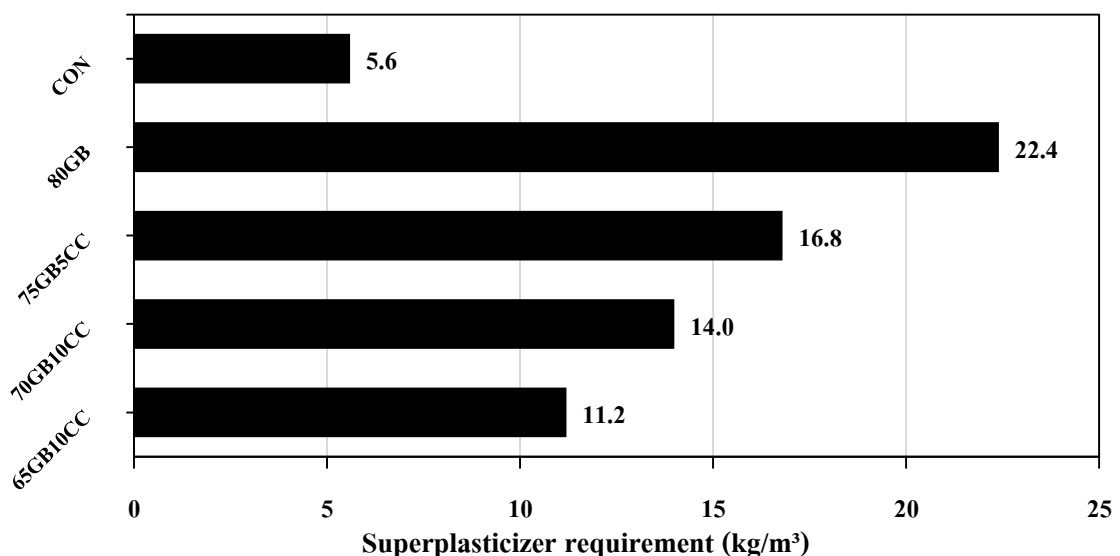
เมื่อ Mass_a หมายถึง น้ำหนักหลังอบแห้ง, Mass_c หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ, Mass_d หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ, และ Mass_d หมายถึง น้ำหนักขณะชั่งในน้ำ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ GB แทนที่ OPC ในปริมาณที่มากขึ้น กล่าวคือคอนกรีตซึ่งใช้ GB แทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในส่วนผสมใช้ปริมาณ SP ร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

หรือเท่ากับ 22.4 kg/m^3 (ภาพที่ 2) ซึ่งสูงกว่าคอนกรีต CON หรือคอนกรีตที่ใช้ OPC เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.6 kg/m^3 หรือคิดเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สาเหตุเนื่องจากลักษณะอนุภาคของ GB ที่ผ่านการบดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม และมีผิวขรุขระ และมีความพรุนสูง ดังแสดงในภาพที่ 1 (a) และความละเอียดของ GB ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $4.67 \mu\text{m}$ ซึ่งเล็กกว่า OPC ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $12.50 \mu\text{m}$ ดังนั้น GB จึงมีพื้นที่ผิวมากกว่า OPC เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน ทำให้มีความต้องการน้ำและ SP เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับวัสดุปอชโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน (Chindaprasit *et al.*, 2007; Tangchirapat *et al.*, 2009)



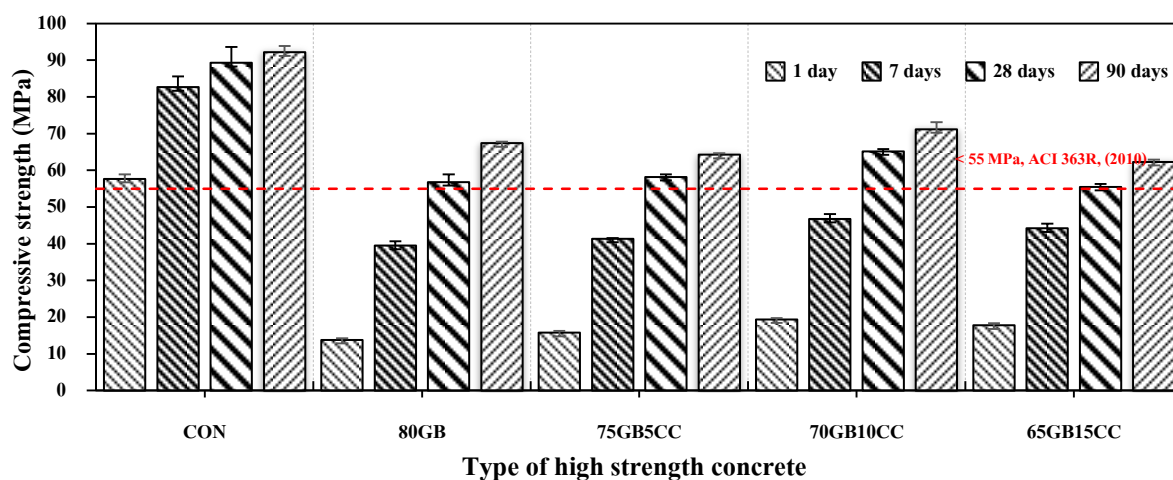
ภาพที่ 2 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตกำลังสูง

ในขณะที่การใช้ CC ร่วมกับ GB พบว่า ปริมาณความต้องการ SP ที่ใช้มีค่าลดลงตามปริมาณ การแทนที่ของ CC ใน GB ที่เพิ่มขึ้น โดยผลของการ แทนที่ในคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีปริมาณความต้องการใช้ SP ร้อยละ 3.0, 2.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หรือ เท่ากับ 16.8, 14.0 และ 11.2 kg/m³ ตามลำดับ (ภาพที่ 2) เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 150 ถึง 200 mm. ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของ CC ที่เล็กกว่า GB และ OPC จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่าง GB และ OPC ส่งผลให้การกระจายตัวดีขึ้น และการเพิ่ม CC เป็นการลดปริมาณ GB อีกทั้ง CC มีความความ พูนน้อยกว่า GB (จากภาพที่ 1) จึงส่งผลให้ปริมาณ ความต้องการ SP ลดลงเมื่อใช้ CC ในปริมาณมากขึ้น (Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013)

2. กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ภาพที่ 3 แสดงผลทดสอบการพัฒนากำลัง อัดของคอนกรีตกำลังสูง โดยคอนกรีต CON มี ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 90 วัน มีค่า เท่ากับ 57.7 82.7 89.3 และ 92.2 MPa ตามลำดับ เมื่อ ทำการแทนที่ OPC ด้วย GB ร่วมกับ CC ที่อายุ 1 วัน

คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.8, 15.8, 19.4 และ 17.8 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 24, 27, 34 และ 31 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ ต่อมาที่อายุ 7 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลัง อัดเท่ากับ 39.5, 41.1, 46.8 และ 44.2 MPa หรือคิด เป็นร้อยละ 48, 52, 57 และ 54 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ OPC ด้วย GB ปริมาณ สูง ทำให้ปริมาณ OPC ลดลงจำนวนมาก ส่งผลให้ Ca(OH)₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อย จึงทำให้ ปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงแรกเกิดขึ้นได้ช้า ส่งผล ให้การพัฒนากำลังอัดในระยะแรกมีค่าน้อยกว่า คอนกรีตที่มี OPC เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (Rerkpiboon *et al.*, 2015; Chindaprasirt *et al.*, 2020; Klathae *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตามการใช้ CC ร่วมกับ GB ในคอนกรีตกำลังสูง สามารถช่วยพัฒนากำลังอัด ในช่วงต้นให้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CC มีความละเอียดสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น จากผล ของการเติมเต็มช่องว่าง (Filler material) ของคอนกรีต (Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013)



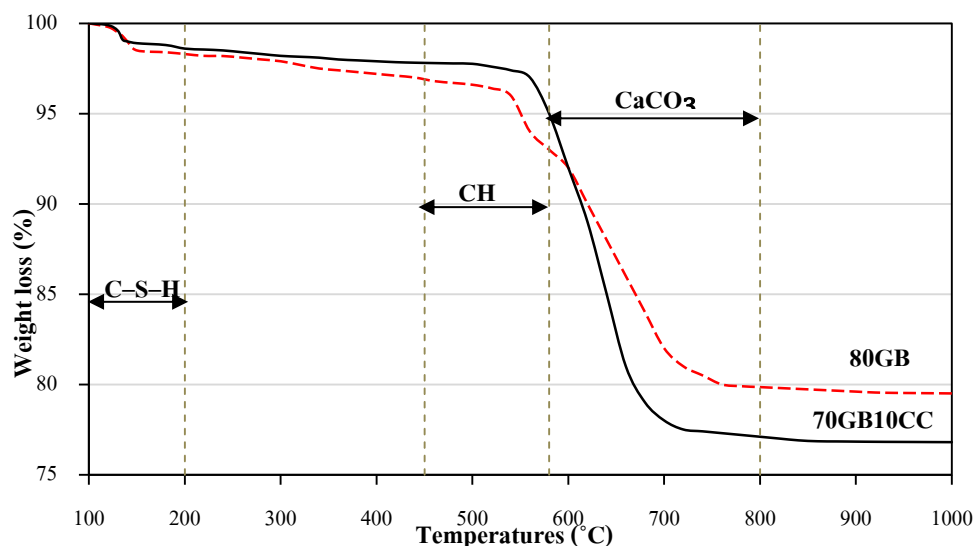
ภาพที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 55.5 ถึง 71.2 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 62 ถึง 77 ของคอนกรีต CON ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แทนที่ OPC ด้วย GB ปริมาณสูงร่วมกับ CC และมี OPC เพียง 112 kg/m³ สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตได้มากกว่า 55 MPa ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363R (American Concrete Institute, 2010) ทั้งนี้เนื่องจาก GB มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า OPC ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงพอที่จะไปชดเชยกับกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูญเสียไปจากการแทนที่ OPC นอกจากนี้ อนุภาคที่มีขนาดเล็กของ GB ยังสามารถแทรกตัวในอนุภาคของ OPC ทำให้เนื้อคอนกรีตมีการอัดแน่นมากขึ้น และมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ GB แทนที่ OPC ในปริมาณสูง ร่วมกับ CC ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก CC มีส่วนช่วยในการกระจายขนาดคละระหว่าง GB และ OPC ส่งผลให้ Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และ SiO_2 ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้เกิดเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในคอนกรีต

มากขึ้น (Felekoglu, 2007; Sua-Iam and Makul, 2013; Shaikh and Supit, 2014)

3. ผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของซีเมนต์เพสต์

ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ของซีเมนต์เพสต์ที่มี GB ร้อยละ 80 (80GB) และซีเมนต์เพสต์ที่มี GB ร้อยละ 70 ร่วมกับ CC ร้อยละ 10 (70GB10CC) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 60 วัน ผลการทดสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างรวดเร็วในช่วงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 450 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากการสูญเสียของน้ำหรือความชื้นในโครงสร้าง และการสลายตัวของ Ettringite รวมถึง C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง OPC กับน้ำ (Bai *et al.*, 2003; Kroehong and Sinsiri, 2012) ต่อมาที่อุณหภูมิ 450 ถึง 580 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวปริมาณ Ca(OH)_2 จะเกิดการสลายตัวในรูปของ CaO และน้ำบางส่วนเมื่อได้รับความร้อน ส่วนการวิเคราะห์การสลายตัวของซีเมนต์เพสต์เมื่อได้รับความร้อนช่วงอุณหภูมิ 580 ถึง 800 °C พบว่ากระบวนการดังกล่าวได้เปลี่ยนโครงสร้างของ CaCO_3 (El-Jazairi and Illston, 1977; Chindaprasirt *et al.*, 2007; Kroehong and Sinsiri, 2012)



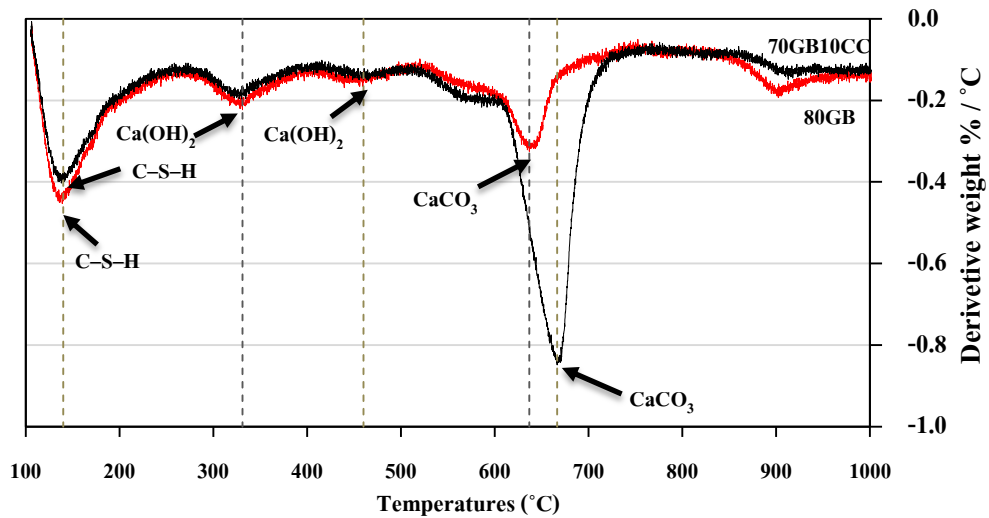
ภาพที่ 4 ผลต่างของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

จากผลการทดสอบปริมาณคงเหลือของ Ca(OH)_2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์จากการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 580 °C (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Feng *et al.*, 2019) โดยเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ 80GB และซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC ที่อายุการบ่ม 60 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC มีปริมาณ Ca(OH)_2 คงเหลือร้อยละ 6.86 โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ 80GB ซึ่งมีปริมาณ Ca(OH)_2 คงเหลือร้อยละ 7.93 โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ แม้ว่าจะมีปริมาณ OPC ที่เท่ากันเนื่องจาก CC ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความสามารถในการกระจายขนาดคละของวัสดุผง ทำให้ปริมาณช่องว่างลดลง ส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับ SiO_2 ได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ทำให้ปริมาณ Ca(OH)_2 ลดลงระหว่างการทำปฏิกิริยา (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Sua-Iam and Makul, 2013) และนำไปสู่การพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นของซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC

ภาพที่ 5 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Derivative thermogravimetric analysis, DTG) พบว่าการสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์เริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 260 °C อัตราการสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์ลดลง การสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราการให้ความร้อนต่างกันส่งผลให้มีลักษณะต่างกันไป โดยซีเมนต์เพสต์เกิดการสลายตัวสูงสุด 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิ 140 และ 670 °C ตามลำดับ กล่าวได้ว่าช่วงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพีคของ DTG ของแต่ละอัตราการให้ความร้อนจะมี 2 ช่วง คือ ที่ 140 ถึง 330 และ 630 ถึง 670 °C ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิของ C-S-H, Ca(OH)_2 และ CaCO_3 และเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Feng *et al.*, 2019; Saladi and Ashraf, 2020) ซึ่งพบว่าขนาดของอนุภาค รวมถึงชนิดของวัสดุประสานมีสมบัติการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนที่แตกต่างกัน และช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วง 50 ถึง 200 °C สำหรับ C-S-H ต่อมาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 สำหรับ Ca(OH)_2

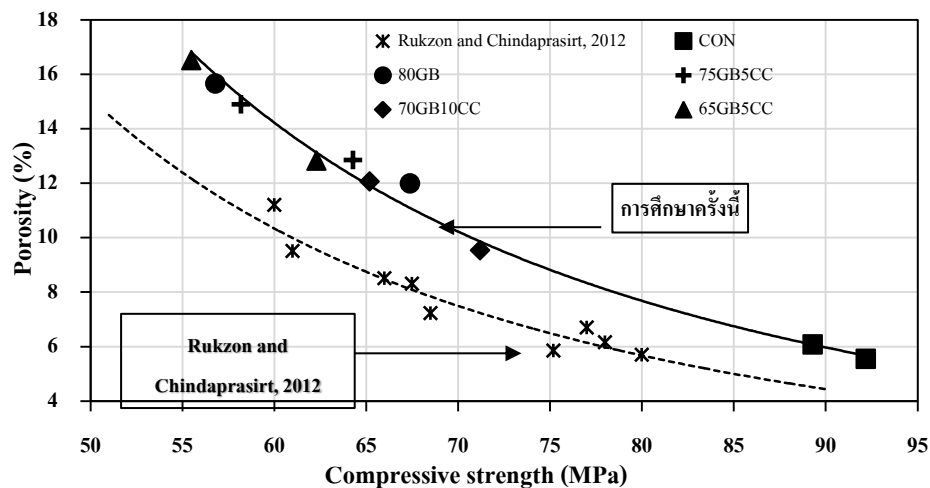
และในช่วงที่สามอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 °C ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของ CaCO_3 ซึ่งมีองค์ประกอบ

ของ CaO และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Feng *et al.*, 2019)



ภาพที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยคาร์บอนปริมาณสูง และซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยคาร์บอนปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่อายุ 28 และ 90 วัน

ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยคอนกรีต CON มีค่าความพรุนของคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 6.07 และ 5.54 ในขณะที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 89.3 และ 92.2 MPa ที่อายุ 28 และ 90

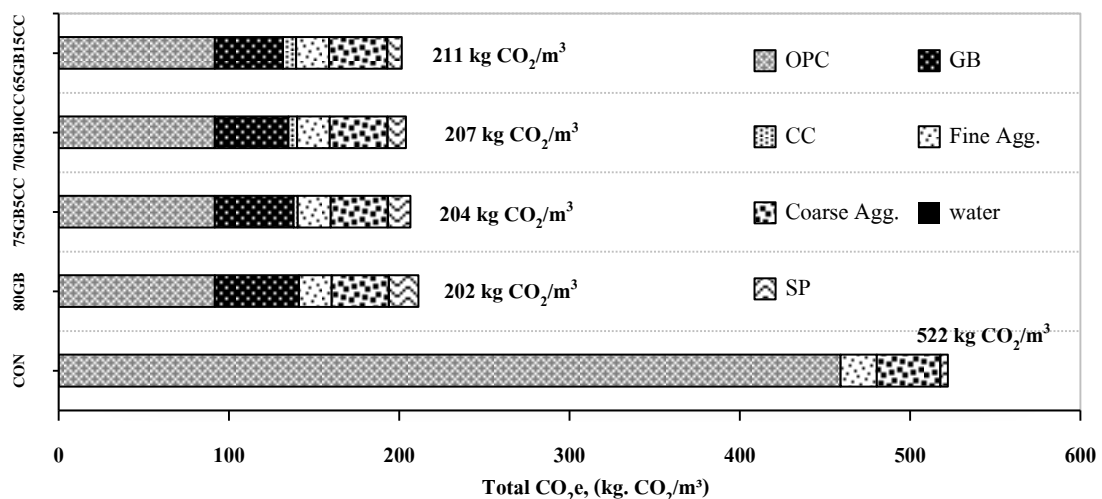
วัน ตามลำดับ คอนกรีต 80GB มีค่าความพรุนสูงกว่าคอนกรีต CON โดยค่าความพรุนของคอนกรีต 80GB ที่อายุ 28 วัน คือร้อยละ 12.88 และลดลงเป็นร้อยละ 11.99 ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 56.8 และ 67.4 MPa ตามลำดับ

สำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่มี GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC แทนที่ OPC โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่าความพรุนที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 14.89, 12.06 และ 16.52 และลดลงเหลือร้อยละ 12.84, 9.53 และ 12.82 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 55.5 ถึง 71.2 MPa อายุ 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงทั้งหมด ลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต นอกจากนี้ค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงจะเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ของ GB ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ GB มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของ OPC มีปริมาณที่ลดลง ด้วยเหตุนี้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) จึงไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาออกไซด์จาก GB (Singh *et al.*, 2000; Rukzon and Chindaprasirt, 2012) อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC พบว่าอนุภาคนาขนาดเล็กของ CC ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $2.64 \mu\text{m}$ มีส่วนช่วยในการเติมเต็มช่องว่างและ

ลดความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง ส่งผลให้มีช่องว่างที่ซึมน้ำผ่านได้ต่ำกว่าในอายุช่วงต้นของคอนกรีต (Liu and Yan, 2010; Sua-Iam and Makul, 2013)

นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่น และเนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น (Rukzon and Chindaprasirt, 2012) นอกจากนี้ อนุภาคนาเล็กของ CC ที่สามารถกระจายส่วนเคลือบของวัสดุประสานได้ดี ส่งผลให้ GB สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีมากขึ้น ทำให้ช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ และช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ช่องว่างมีขนาดเล็กลง ทำให้ร้อยละความพรุนของคอนกรีตต่ำลง (Sua-Iam and Makul, 2013; Shaikh and Supit, 2014)

5. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง



ภาพที่ 7 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

ภาพที่ 7 แสดงข้อมูลผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของคอนกรีต

กำลังสูง 1 m^3 โดยค่าการปล่อย CO_2 ของ OPC และ GB มีค่าเท่ากับ 820.0 และ 110.0 กก. CO_2/t ตามลำดับ (Nisbet

et al., 2002; Huber Crete, 2015; Chindaprasirt *et al.*, 2020) ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆ ของคอนกรีตกำลังสูง ได้แก่ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 28.0, 39.0, 1.0 และ 772.0 kg. CO_2/t ตามลำดับ (Nisbet *et al.*, 2002; Huber Crete, 2015; Leeuwen *et al.*, 2016; Chindaprasirt *et al.*, 2020) การปล่อย CO_2 ของคอนกรีตกำลังสูง 1 m^3 พบว่าคอนกรีต CON มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 522 กก. CO_2/m^3 ในขณะที่คอนกรีตกำลังสูง 80GB มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 211 กก. CO_2/m^3 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 59 ของคอนกรีต CON ในส่วนของคอนกรีตกำลังสูงที่มี GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC ผลการคำนวณพบว่าคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 207, 204 และ 202 กก. CO_2/m^3 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 60 ถึง 61 ของคอนกรีต CON

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าค่าการปล่อย CO_2 ของคอนกรีตกำลังสูงลดลงเมื่อปริมาณของ GB และ CC เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตกำลังสูง 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC สามารถลดค่าการปล่อย CO_2 ได้มากถึงร้อยละ 59 ถึง 61 ของคอนกรีต CON จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ GB ในปริมาณสูง ร่วมกับ CC ในคอนกรีตกำลังสูงสามารถลดการปล่อย CO_2 ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ นอกจากนี้การใช้ GB ในปริมาณสูงยังมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การลดปริมาณขยะ และลดพื้นที่การกองเก็บเถ้าขานอ้อยในโรงงาน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเถ้าขานอ้อยจากอุตสาหกรรมอ้อย หรือน้ำตาล รวมถึงเป็นการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

สรุป

1. ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer, SP) ของคอนกรีตกำลังสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้

GB ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ CC ร่วมกับ GB สามารถลดความต้องการ SP ได้ถึงร้อยละ 25 ถึง 50 เมื่อเทียบกับคอนกรีต 80GB

2. คอนกรีตที่ใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC แทนที่ OPC โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC) จัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน คือมีกำลังอัดสูงกว่า 55 MPa แม้จะมี OPC ในส่วนผสมคอนกรีตเพียง 112 kg/m^3

3. ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ลดลง เป็นผลเนื่องจาก CC มีความสามารถในการกระจายส่วนละเอียดของวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น นำไปสู่การพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นของซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC

4. ความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ GB ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC สามารถลดค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยค่าความพรุนของคอนกรีตจะมีค่าลดลง เมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

5. คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดค่าการปล่อย CO_2 ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง 1 m^3 ได้มากถึงร้อยละ 60 ถึง 61 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CON

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สัญญาเลขที่ 144-145/2560 ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา แก่ผู้เขียน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือในการทำการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- American Concrete Institute. 2010. ACI 363R Report on High-Strength Concrete, ACI Committee. American Concrete Institute & International Organization for Standardization, Farmington Hills, Michigan.
- American Society for Testing and Materials. 2013. ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2014a. ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2014b. ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- Awal, A.A. and Abubakar, S.I. 2011. Properties of concrete containing high volume palm oil fuel ash: a short-term investigation. **Malaysian Journal of Civil Engineering** 23(2): 54-66.
- Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. and Lewis, M.H. 2003. Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. **Cement and Concrete Research** 33(8): 1189-1202.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. 2000. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. **ACI Materials Journal** 97(1): 41-48.
- Chaipanich, A. and Nochaiya, T. 2010. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 99(2): 487-49.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C. 2007. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. **Construction and Building Materials** 21(7): 1492-1499.
- Chindaprasirt, P., Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Suriyo, W. and Jaturapitakkul, C. 2020. Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. **Journal of Building Engineering** 31: 101415.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. 2009. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials** 23(11): 3352-3358.
- Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M. and Fairbairn, E.D.M.R. 2009. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as

- pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research** 39(2): 110-115.
- El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1977. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. **Cement and Concrete Research** 7(3): 247-257.
- Esping, O. 2008. Effect of limestone filler BET (H_2O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research** 38(7): 938-944.
- Felekoglu, B. 2007. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). **Conservation and Recycling** 51(4): 770-791.
- Feng, Y., Kero, J., Yang, Q., Chen, Q., Engström, F., Samuelsson, C. and Qi, C. 2019. Mechanical activation of granulated copper slag and its influence on hydration heat and compressive strength of blended cement. **Materials** 12(5): 772.
- Huber Crete. 2015. **Let huber crete calcium carbonate help you produce the brightest white concrete building products possible. Marble Falls, Texas: Huber Carbonates, LLC.** Available Source: <https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Let%20HuberCrete%20Help%20You%20Manufacture%20Superior%20Concrete.pdf>. June 25, 2020.
- Johari, M.M., Zeyad, A.M., Bunnori, N.M. and Ariffin, K.S. 2012. Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials** 30: 281-288.
- Kakhuntodd, N., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Homwuttiwong, S. 2012. The investigation of water permeability of high volume pozzolan concrete. **Journal of Science Technology** 31: 563-570.
- Klathae, T., Tanawuttiiphong, N., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P. and Jaturapitakkul, C. 2020. Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs. **Construction and Building Materials** 258: 119443.
- Kroehong, W. and Sinsiri, T. 2012. A study microstructure of blended cement paste containing palm oil fuel ash. **KMUTT Research & Development Journal** 35(2): 187-200. (in Thai)
- Leeuwen, R.V., Kim, Y.J. and Sriraman, V. 2016. The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete. **Journal of Civil Engineering Research** 6(4): 104-113.
- Liu, S. and Yan, P. 2010. Effect of limestone powder on microstructure of concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition** 25(2): 328-331.
- Malhotra, V.M. 1986. Superplasticized fly ash concrete for structural applications. **Concrete International** 8(12): 28-31.
- Malhotra, V.M. 2002. High-performance high-volume fly ash concrete. **Concrete International** 24(7): 30-34.

- Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M. 2002. **Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete**. Available Source: http://www.vangeemconsulting.com/73_Environmental_Life_Cycle_Inverntory_SN_2137.pdf, December 20, 2020.
- Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M. and Saraswathy, V. 2018. Durability characteristics of ultra high strength concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials** 171: 350-356.
- Rerkpiboon, A., Tanawutti Phong, N., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2017. Effects of high-volume ground bagasse ash on compressive strength and heat evolution of concrete, pp. B-045. *In International conference, The 2nd ACF Symposium Innovations for sustainable concrete infrastructures*. Chiang Mai, Thailand.
- Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2015. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials** 101: 983-989.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2012. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials & Design** 34: 45-50.
- Saladi, N. and Ashraf, W. 2020. Ground and Sieved Bio Ash versus Coal Fly Ash: Comparative Analysis of Pozzolanic Reactivity. **Journal of Materials in Civil Engineering** 32(12): 04020377.
- Shaikh, F.U. and Supit, S.W. 2014. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO_3) nanoparticles. **Construction and building materials** 70: 309-321.
- Singh, N.B., Singh, V.D. and Rai, S. 2000. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research** 30: 1485-1488.
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2013. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production** 57: 308-319.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. 2009. Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. **Construction and Building Materials** 23(7): 2641-2646.
- Thai Industrial Standard. 2012. TIS. 15-2555. Quality Standards for Industrial Products Portland Cement: Part I specification. TISI, Bangkok. (in Thai)
- The European Cement Association (CEMBUREAU). 2018. **Activity Report 2017 (1st ed)**. CEMBUREAU. Brussels, Belgium. Available Source: <https://cembureau.eu/media/1716/activity-report-2017.pdf>. December 20, 2020.
- Yahia, A., Tanimura, M. and Shimoyama, Y. 2005. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. **Cement and Concrete Research** 35(3): 532-539.