

ผลกระทบของการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงต่อกำลังอัดโมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง

ทวิช กล้าแท้^{1*} Trinh Nhat Ho Tran¹ Sambath Men² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding Author: Tawich.civil@mail.kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 30 มิถุนายน 2564

แก้ไข : 19 มกราคม 2565

ตอบรับ : 24 มกราคม 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.3

คำสำคัญ :

เถ้าขานอ้อยปริมาณสูง /

คอนกรีตกำลังสูง / กำลังอัด /

โมดูลัสยืดหยุ่น / การหดตัวแบบแห้ง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (OPC) ในปริมาณสูงที่มีต่อกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าขานอ้อยมาบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 4.67 ไมโครเมตร แทนที่ OPC ที่ร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (60GSCBA, 70GSCBA และ 80GSCBA) กำหนด ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก/ม³ ควบคุมค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.28 และใช้สารลด น้ำพิเศษควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าระหว่าง 150–200 มม. ผลการวิจัย พบว่า คอนกรีต 60GSCBA, 70GSCBA และ 80GSCBA สามารถพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 71.1, 63.8 และ 56.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูง (มากกว่า 55 เมกะปาสคาล) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ขึ้นกับกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าปริมาณการแทนที่ OPC ด้วย GSCBA กล่าวคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสม GSCBA มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) และมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ OPC ด้วย GSCBA เพิ่มขึ้น สำหรับการประเมินต้นทุนการผลิตคอนกรีต พบว่า คอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ OPC ด้วย GSCBA มีต้นทุนวัสดุลดลง ร้อยละ 13–18 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า GSCBA เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถใช้แทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้ด้วย

Effect of High Volume Replacement of Ordinary Portland Cement by Ground Bagasse Ash on Compressive Strength, Elastic Modulus and Drying Shrinkage of High Strength Concrete

Tawich Klathae^{1*}, Trinh Nhat Ho Tran¹, Sambath Men², Weerachart Tangchirapat³ and Chai Jaturapitakkul⁴

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: Tawich.civil@mail.kmutt.ac.th

¹ Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: June 30, 2021

Revised: January 19, 2022

Accepted: January 24, 2022

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.3

Keywords:

High Volume Sugarcane

Bagasse Ash /

High-Strength Concrete /

Compressive Strength /

Elastic Modulus /

Drying Shrinkage

Abstract

This research aimed to study the effect of ground sugarcane bagasse ash (GSCBA) as a cement replacement at high volume on compressive strength, elastic modulus and drying shrinkage of high-strength concrete. Sugarcane bagasse ash (SCBA) was ground until its median particle size (d_{50}) was 4.67 micron. GSCBA was then used to replace ordinary Portland cement (OPC) at 60, 70 and 80 wt% of binder (60GSCBA, 70GSCBA and 80GSCBA). All mixtures had a constant binder content of 560 kg/m³ with a W/B ratio of 0.28; type F superplasticizer (SP) was engaged in order to maintain the slump of fresh concrete between 150–200 mm. The results indicated that 60GSCBA, 70GSCBA and 80GSCBA concretes had the compressive strengths at 28 days of 71.1, 63.8 and 56.8 MPa, respectively, which met the minimum specification of high-strength concrete (HS-C) (than 55 MPa). Elastic modulus of the concretes depended on their compressive strength rather than on the replacement of GSCBA, i.e., elastic modulus of concretes increased with compressive strength. All concretes incorporating HVSCBA exhibited higher drying shrinkages than CT concrete; shrinkage increased with an increasing rate of GSCBA replacement. In terms of the production cost, GSCBA concretes resulted in a reduction in the material cost by 13–18% when compared with CT concrete. GSCBA could be used as a good pozzolanic material to replace OPC by up to 80 wt% for the production of eco-friendly high-strength concrete at reduced material cost.

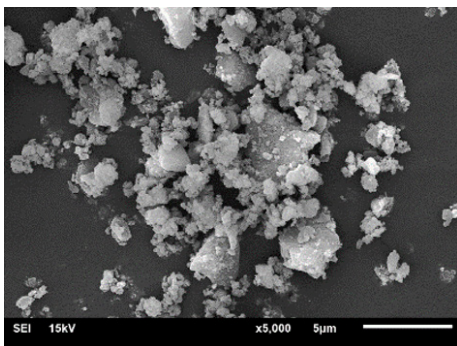
1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ปลูกอ้อยมากเป็นอันดับ 4 ของโลก และเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลทรายเป็นอันดับ 2 ของโลก โดยอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลของไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลก ในฤดูการผลิต ค.ศ. 2018/2019 มีโรงงานน้ำตาลทรายเปิดที่อ้อยทั้งสิ้น 57 โรงงาน มีปริมาณผลผลิตอ้อยเข้าหีบจำนวน 130.97 ล้านตัน มีพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศ 12 ล้านไร่ ส่วนผลผลิตน้ำตาลทราย มีจำนวนทั้งสิ้นมากกว่า 14.6 ล้านตัน/ปี โดยใน ค.ศ 2020 สร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกอ้อยมากกว่า 430,000 ล้านบาท รวมถึงผู้ประกอบการและแรงงานในอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้องอีกจำนวนมาก คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 250,000 ล้านบาท [1-2]

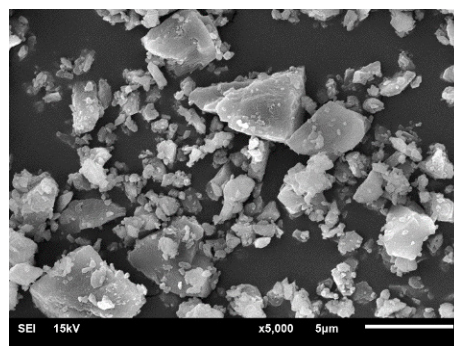
หลังจากอ้อยผ่านกระบวนการผลิตน้ำตาลแล้ว ขานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ โดยความร้อนที่ได้นำไปใช้ในการผลิตพลังงานไอน้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงาน โดยทุก ๆ 1 ตันของน้ำหนกอ้อย มีขานอ้อยคงเหลือประมาณ 260 กิโลกรัม หรือมีขานอ้อยประมาณ 34.05 ล้านตัน/ปี และหลังจากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เหลือเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าร้อยละ 0.62 ของน้ำหนกอ้อยหรือประมาณ 812,000 ตัน/ปี [3-5] และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเถ้าขานอ้อยที่เหลือจากกระบวนการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่า บางส่วนนำไปใช้ประโยชน์

ทางการเกษตร เช่น ใช้ปรับสภาพดินที่เป็นกรด แต่เป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยเถ้าขานอ้อยส่วนใหญ่นำไปกองทิ้งไว้ไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งเถ้าขานอ้อยมีลักษณะที่เป็นฝุ่นผงขนาดเล็กทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาจึงก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นปัญหาของโรงงานผลิตน้ำตาลในการกำจัดเถ้าขานอ้อยส่วนที่เหลือเป็นอย่างมาก ในการจัดพื้นที่กองเถ้าหรือพื้นที่ฝังกลบ [6] นอกจากนี้ ยังไม่มีวิธีการกำจัดเถ้าขานอ้อยอย่างมีประสิทธิภาพ หรือนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังนั้น หากสามารถพัฒนาเถ้าขานอ้อยภายในประเทศไทยให้มีศักยภาพเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหินหรือวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย จะเป็นการจัดการปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และเพิ่มประสิทธิภาพของอุตสาหกรรมคอนกรีตได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อใช้ในงานคอนกรีต พบว่า เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตได้ดี หากมีการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การบดละเอียด และมีการแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถเพิ่มสมบัติที่ดีด้านกำลังอัด และด้านความทนทานของคอนกรีต [7-11] โดยทั่วไปเถ้าขานอ้อยมีสีเทาเข้ม หรือสีดำ รูปร่างขรุขระ มีเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน และมีความพรุนสูง



(a) เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค (a) เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA)

(b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

(รูปที่ 1 (a)) ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับวัสดุพอลิโพรพิลีนอื่น ๆ โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 60–85 ในขณะที่ Al_2O_3 อยู่ระหว่างร้อยละ 5–9 [12–14] ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] ได้กำหนดวัสดุพอลิโพรพิลีน Class N ต้องมีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และปริมาณ SO_3 ต้องไม่สูงกว่าร้อยละ 4 ในขณะที่ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่ควรเกินร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย (GSCBA) (ตารางที่ 1) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] พบว่าเถ้าชานอ้อยมีองค์

ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุพอลิโพรพิลีน Class N

ใน ค.ศ. 2012 Rukzon และ Chindaprasirt [16] ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) แทนที่ปูนซีเมนต์ (OPC) ในอัตราร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสาน (ตารางที่ 2) เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูง ผลการวิจัย พบว่า คอนกรีตที่ผสม GSCBA มีค่ากำลังอัดมากกว่า 55 MPa ที่อายุ 7 วัน ทุกอัตราส่วนผสม และคอนกรีตมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ดีขึ้นเมื่อใช้ GSCBA ในปริมาณที่สูงขึ้น ต่อมาใน ค.ศ. 2018 Rerkpiboon และคณะ [17]

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ (OPC), เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) และเถ้าชานอ้อยจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Chemical compositions (%)	OPC	GSCBA	Akkarapongtrakul และคณะ	Rios-Parada และคณะ	Cordeiro และ Kurtis
Silicon dioxide (SiO_2)	20.5	63.4	74.0	66.1	53.2
Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.7	8.1	3.7	15.0	13.9
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.3	6.0	1.8	7.2	4.4
Calcium oxide (CaO)	64.2	8.8	1.7	2.6	2.4
Magnesium oxide (MgO)	1.3	1.7	0.7	1.2	-
Potassium oxide (K_2O)	2.6	2.8	4.4	3.5	1.6
Sodium oxide (Na_2O)	0.3	0.2	-	0.5	-
Sulfur trioxide (SO_3)	0.2	1.5	0.3	0.5	1.5
Loss on ignition (LOI)	2.8	7.5	11.2	9.0	20.9
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	77.5	79.5	88.28	71.5

ศึกษากำลังอัด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ปริมาณสูง ในอัตราร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสาน (ตารางที่ 2) ผลการศึกษา พบว่า การใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน นอกจากนี้ ยังมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

และค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีต CT อย่างชัดเจน และยังพบว่าสามารถใช้ GSCBA แทนที่ OPC ได้สูงถึงร้อยละ 65 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยที่คอนกรีตยังคงมีสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีต CT ต่อมา Klathae และคณะ [18] ศึกษาผลกระทบเนื่องจากค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของ GSCBA ที่มีต่อความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน กำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต

ตารางที่ 2 การศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Authors	Main materials	Application	Binder content (kg/m ³)	W/B	OPC replacement level (%)	SP dosage (%)	Slump (mm)	Compressive strength (MPa)		
								7-D	28-D	90-D
Rukzon และ Chindapasirt [16]	OPC, sand, aggregates	High strength concrete	560	0.30	0	1.34	210	60.5	65.6	75.2
					10	1.07	220	63.0	68.0	80.0
					20	1.80	210	62.0	67.0	78.0
					30	3.48	210	59.9	66.3	77.5
Rerkpiboon และ คณะ [17]	OPC, sand, aggregates	Normal concrete	400	0.45	0	1.00	170	42.6	47.8	49.4
					35	2.00	180	39.3	46.5	52.0
					50	2.50	190	34.9	45.6	50.9
					65	3.00	185	26.9	42.5	48.9
					80	3.50	190	10.5	16.0	21.4
Klathae และคณะ [18]	OPC, sand, aggregates	Normal concrete	400	0.45	0	0.60	170	41.8	48.0	50.8
					50	1.58	185	27.0	40.6	47.5
					65	1.88	180	20.8	38.5	46.1
					80	2.33	190	10.0	14.9	20.3
Chindapasirt และ คณะ [20]	OPC, sand, aggregates	Normal concrete	500	0.40	0	0.70	90	35.8	48.6	52.4
					50	2.50	85	34.9	44.6	50.8
					60	3.00	80	27.9	35.2	39.8
					70	4.10	80	22.4	26.2	38.8

ที่แทนที่ OPC ด้วย GSCBA ในปริมาณสูง ในอัตราร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ตารางที่ 2) ผลการวิจัย พบว่า คอนกรีตที่แทนที่ด้วย GSCBA ในปริมาณสูง สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตได้ 13–24 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต CT การใช้ GSCBA ที่มีค่า LOI ร้อยละ 10 และ 15 สามารถแทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยคอนกรีตยังคงมีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า GSCBA เป็นวัสดุพอซโซลานที่มีคุณภาพดีและมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้แทนที่ OPC ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น แต่งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการนำ GSCBA แทนที่ OPC ในอัตราไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง [16] หรือใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูงในงานคอนกรีตกำลังปรกติ [17–20] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาคอนกรีตที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูงเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาถึงผล

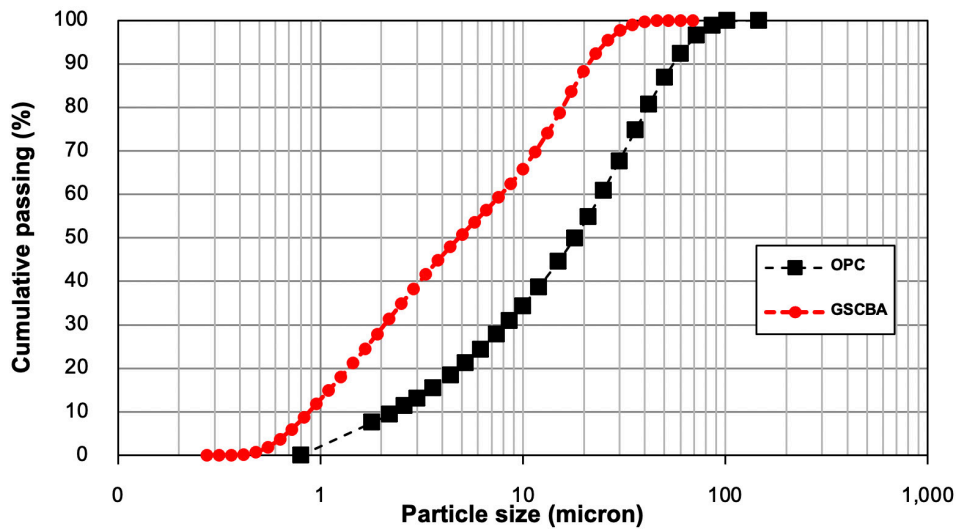
กระทบต่อค่ากำลังอัดประลัย โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง เปรียบเทียบกับคอนกรีต CT ซึ่งไม่ใช่ GSCBA ในส่วนผสม

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [21] เป็นวัสดุประสานหลักในการศึกษา โดยภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของ OPC แสดงใน รูปที่ 1 (b) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีเนื้อแน่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 12.5 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาค ของ OPC แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

2.1.2 เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) เถ้าขานอ้อยที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดลพบุรี ซึ่งเถ้าขานอ้อยที่ได้อยู่ในสภาวะที่แห้ง จากนั้นนำเถ้าขานอ้อยที่ได้ไปอบในตู้อบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA)

110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมา นำเถ้าขานอ้อย 10 กิโลกรัม เข้าเครื่องบดแบบตกรกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลูกเหล็กกละขนาดน้ำหนัก 50 กิโลกรัม จนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 4.67 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาคของ GSCBA แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

2.1.3 มวลรวม มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ โดยมีขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.84 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.04 ส่วนมวลรวมหยาบที่ใช้คือหินแกรนิตจาก จังหวัดกาญจนบุรี เนื่องจากในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง การคัดเลือกวัสดุ มวลรวม และขนาดคละของวัสดุมวลรวมนั้นจึงมีความ สำคัญ เพราะจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด และคุณภาพ ของคอนกรีต โดยหินแกรนิตมีความสามารถในการรับ กำลังอัดได้สูง อีกทั้งยังมีความสามารถในการต้านทาน

การสึกหรอแบบลอสเองเจลิสได้ดีกว่าหินปูนทั่วไป โดยมีขนาดใหญ่สุด 10 มม. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.52 และมีค่า การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.68 โดยมวลรวมละเอียด และ มวลรวมหยาบอยู่ในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อน ผสมคอนกรีต

2.1.4 สารลดน้ำพิเศษ ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด โพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate-based) ซึ่งมี สมบัติสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C494 [22] ชนิด F เพื่อควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 150 ถึง 200 มม.

2.2. การทดสอบสมบัติของวัสดุ

การวิจัยครั้งนี้ ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้า ขานอ้อย (GSCBA) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 [23] จากนั้นทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน

ASTM C 127 [24] และ ASTM C 128 [25] ตามลำดับ นอกจากนี้ทำการทดสอบขนาดคละและโมดูลัสความละเอียด ของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 136 [26] วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution, HORIBA Scientific/LA-960, Japan) ของ OPC และ GSCBA รวมถึงทำการถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้ Scanning Electron Microscope (JEOL JSM-6610LV, USA) สำหรับการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (BRUKER S4 Explorer, USA)

2.3 ส่วนผสมและการทดสอบคอนกรีตกำลังสูง

ส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 กำหนดปริมาณวัสดุประสานของส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 560 กก/ม³ และแทนที่ OPC ด้วย GSCBA ในอัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.28 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 150–200 มม. เนื่องจากเถ้าขานอ้อยบดละเอียดมีความพรุนมาก และมีความต้องการน้ำที่สูง การกำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตในช่วงดังกล่าวเพื่อชดเชยการดูดซึมน้ำของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด และยังคงความสามารถในการทำงานได้ เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียดในปริมาณสูงจะมีความสูญเสียการเทได้ค่อนข้าง

ช้ารวดเร็ว โดยขั้นตอนการผสมคอนกรีตทั้งหมดใช้วิธี Two-stage mixing approach ซึ่งประยุกต์จากคำแนะนำของ Tam และคณะ [27] โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกนำมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบทั้งหมดผสมให้เข้ากันใช้เวลา 60 วินาที ในไม่ผสม ต่อมาใส่วัสดุประสานครึ่งหนึ่งผสมให้เข้ากันต่ออีกเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำที่ต้องการทั้งหมดผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที ขั้นตอนที่สองเติมวัสดุประสานที่เหลือและใส่น้ำทั้งหมดในไม่ผสม แล้วทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 120 วินาที ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [28] ที่อายุ 1, 7, 28, 90 และ 120 วัน การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 [29] ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้มาจากค่าเฉลี่ยของคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

การหัดตัวแห้งของคอนกรีตโดยใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75×75×285 มม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C490 [30] ทำการถอดแบบคอนกรีตหลังจากหล่อแท่งคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากบ่อบ่ม เช็ดด้วยผ้าให้ผิวหน้าตัวอย่างคอนกรีตปราศจากหยดน้ำ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

Mix	Mix proportion (kg/m ³)					SP* (wt% of binder)	W/B	Slump (mm)
	OPC	GSCBA	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water			
CT	560	–	760	955	157	1.00	0.28	190
60GSCBA	224	336	705	880	157	3.25	0.28	175
70GSCBA	168	392	695	870	157	3.75	0.28	170
80GSCBA	112	448	685	860	157	4.00	0.28	180

* The water in the superplasticizer is approximately 50% by weight

แล้วทำการวัดความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทันที หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ไว้ในตู้ซึ่งควบคุมอุณหภูมิภายในให้มีค่า 23 ± 2 องศาเซลเซียส และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 5 จากนั้นวัดการหดตัวแห้งของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ไว้ในตู้จนอายุครบ 182 วัน คำนวณค่าการหดตัวแบบแห้ง ดังสมการที่ 1

$$L = \frac{Li - Lx}{Lg} \quad (1)$$

- โดยที่ L คือ ค่าการหดตัวแบบแห้ง ($\times 10^{-6}$ มม./มม.)
- Lx คือ ค่าความยาวที่เวลาใด ๆ
- Li คือ ค่าความยาวที่อายุเริ่มต้น
- Lg คือ ค่าระยะพิกัด (Gauge length)

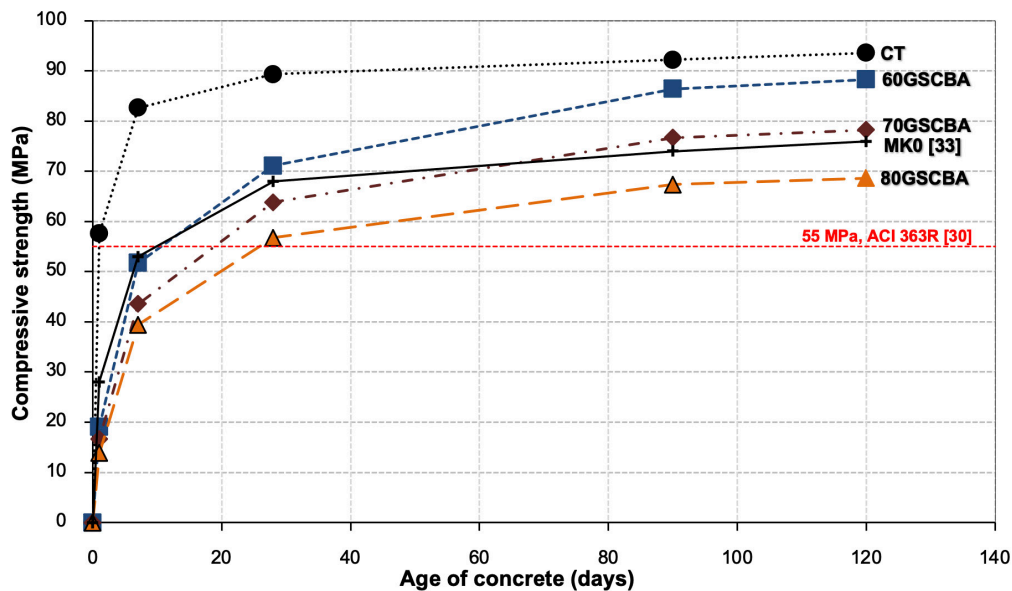
3. ผลการทดสอบ

3.1 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

รูปที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) ร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยนำหน้าแก้วสุประสาน พบว่าการใช้ GSCBA แทนที่

OPC ทั้งหมด มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CT ที่อายุ 1 และ 7 วัน และกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อแทนที่ OPC ด้วย GSCBA ในปริมาณสูงขึ้น เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน การใช้ GSCBA ในอัตราร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยนำหน้าแก้วสุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตได้มากกว่า 55 เมกะปาสคาล ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363 [31] และเมื่ออายุ 90 วัน คอนกรีต 60GSCBA, 70GSCBA และ 80GSCBA สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตให้มีค่าใกล้เคียงคอนกรีต CT โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 94, 83 และ 73 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ

ต่อมาที่อายุ 120 วัน คอนกรีต CT มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 93.6 เมกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต 60GSCBA, 70GSCBA และ 80GSCBA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 88.3, 78.2 และ 68.6 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 94, 84 และ 73 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ OPC ด้วย GSCBA ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยากับซิลิกอนได



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอายุของคอนกรีตกำลังสูง

ออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GSCBA การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ GSCBA จึงเกิดช้ากว่าคอนกรีต CT ทำให้คอนกรีตที่ใช้ GSCBA มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CT ที่อายุ 1 และ 7 วัน ค่อนข้างมาก แต่สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28, 90 และ 120 วัน จนเป็นคอนกรีตกำลังสูง และต่ำกว่าคอนกรีต CT ไม่มากนัก นอกจากนี้การแทนที่ OPC ด้วย GSCBA สามารถช่วยให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นขึ้น เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า OPC ของ GSCBA สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของ OPC [32–33] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Güneysi และ คณะ [34] คอนกรีต MK0 ซึ่งใช้ OPC เป็นส่วนผสมของคอนกรีตอย่างเดียวนั้น มีปริมาณเท่ากับ 450 กก/ม^3 โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำเท่ากับ 957 กก/ม^3 มวลรวมหยาบที่ใช้คือกรวดแม่น้ำโดยมีขนาดใหญ่สุด 16 มม. เท่ากับ 852 กก/ม^3 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และใช้สารลดน้ำจำนวนมาก (High-range water-reducers admixture) เท่ากับ 7.9 กก/ม^3 เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 180 ± 200 มม. พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 28, 53, 68, 74 และ 76 เมกะปาสคาล ที่อายุ 1, 7, 28, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีต 60GSCBA และคอนกรีต 70GSCBA ที่อายุ 90 และ 120 วัน ตามลำดับ และมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต 80GSCBA ในขณะที่คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง มีปริมาณ OPC เพียง $112\text{--}224 \text{ กก/ม}^3$ เท่านั้น อย่างไรก็ตามการใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูงมากที่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากการแทนที่ GSCBA ในปริมาณสูงทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซัลเฟต (C3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ให้กำลังแก่คอนกรีตในช่วงอายุต้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง OPC กับน้ำมีค่าน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นต่ำ นอกจากนี้การแทนที่ GSCBA เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณ OPC ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ลดลงตามไป

ด้วย ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เพียงพอที่ชดเชยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC ที่หายไป ดังนั้นคอนกรีตที่แทนที่ OPC ด้วย GSCBA ในปริมาณสูงมากถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จึงพัฒนากำลังอัดที่อายุปลายของคอนกรีตได้ต่ำกว่าคอนกรีต CT [18–20, 35]

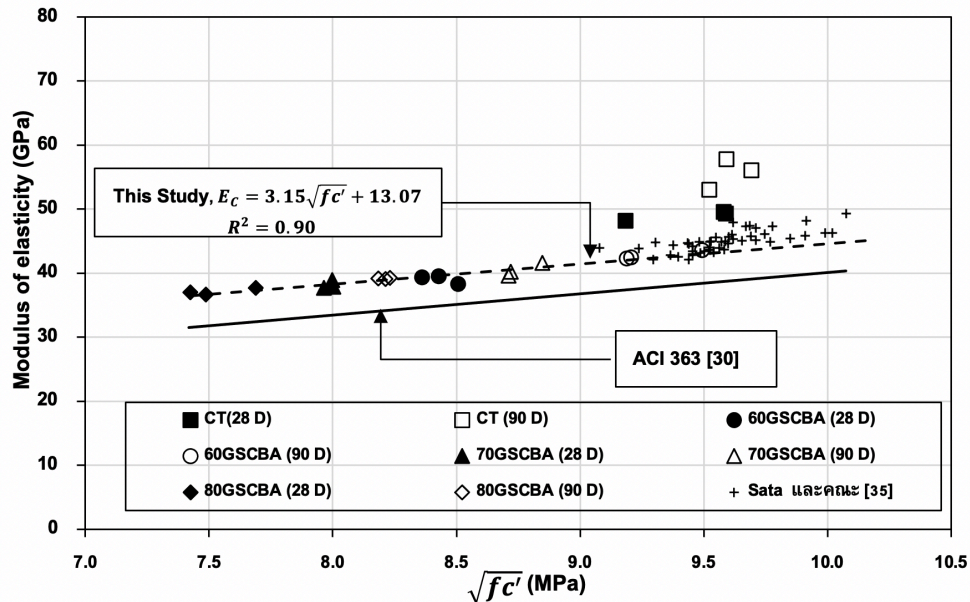
3.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต CT ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 49.0 และ 55.7 จิกะปาสคาล ส่วนกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GSCBA) เป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน มีค่าระหว่าง 37.2 ถึง 39.0 จิกะปาสคาล และที่อายุ 90 วัน มีค่าระหว่าง 39.2 ถึง 42.8 จิกะปาสคาล

รูปที่ 4 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต CT และคอนกรีตที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในอัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง และได้นำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานชนิดต่าง ๆ เช่น เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์ม น้ำมัน ที่ศึกษาโดย Sata และคณะ [36] มาร่วมในการวิเคราะห์ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีต [37] กล่าวคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GSCBA ปริมาณสูงแทนที่ OPC แสดงดังสมการที่ 2

$$E_c = 3.15\sqrt{f'_c} + 13.07 \quad (2)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (จิกะปาสคาล) และ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (เมกะปาสคาล) ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 55 ถึง 90 เมกะปาสคาล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัด ของคอนกรีตกำลังสูง ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง และสมการของ ACI 363 [31] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ ACI 363 [31] เล็กน้อยเนื่องจากสมการของ ACI 363 [31] วิเคราะห์และใช้ผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบาบางส่วน ซึ่งมีสมบัติความต้านทานต่อการเสีรูปร่างที่น้อยกว่ามวลรวมปกติ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณจากสมการ ACI 363 [31] ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า การใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก [18–19, 37–38]

3.3 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง

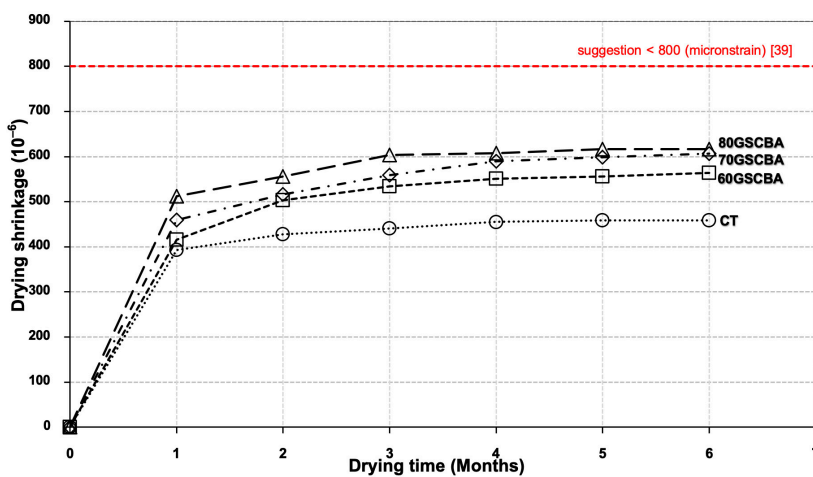
รูปที่ 5 แสดงค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ GSCBA ปริมาณสูงแทนที่ OPC คอนกรีต CT จนถึง

6 เดือน พบว่าคอนกรีตทั้งหมดมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 1 เดือน (30 วัน) จากนั้นการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงอายุ 6 เดือน (182 วัน) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barr และคณะ [39] ที่พบว่า การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในอายุ 90 วัน และหดตัวอย่างช้า ๆ เมื่ออายุมากกว่า 90 วัน

ผลการทดสอบพบว่าที่อายุ 6 เดือน (182 วัน) คอนกรีต CT มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 459×10^{-6} ในขณะที่คอนกรีต 60GSCBA, 70GSCBA และ 80GSCBA มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 564×10^{-6} , 607×10^{-6} และ 617×10^{-6} ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ GSCBA แทนที่ OPC ทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีต CT ทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรของวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC มีมากกว่าคอนกรีต CT เพราะค่าความถ่วงจำเพาะของ GSCBA มีค่าเท่ากับ 2.17 ซึ่ง

ต่ำกว่า OPC ที่มีค่าเท่ากับ 3.15 อยู่มาก ดังนั้นที่น้ำหนักเท่ากัน GSCBA จึงมีปริมาตรมากกว่า OPC ส่งผลทำให้คอนกรีตที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง มีปริมาณเพสต์มากกว่าคอนกรีต CT และมีปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ GSCBA ในปริมาณที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้คอนกรีตมีการหดตัวแบบแห้งที่มากกว่าคอนกรีต CT ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Klathae และคณะ

[18] ที่พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุประสานในปริมาณสูง ทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดปริมาณสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่าค่าการหดตัวแบบแห้งอยู่ระหว่าง 200–800 ไมโครสเตรน ซึ่งแนะนำโดย ACI Committee 209 [40] ดังนั้น การใช้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตกำลังสูง

GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถนำไปใช้งานได้ แม้ว่าจะมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีต CT

3.4 การประเมินราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

รูปที่ 6 แสดงราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง 1 ม³ ราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตกำลังสูงประกอบด้วย OPC เท่ากับ 2,357 บาท/ตัน [20, 41] ในขณะที่ GSCBA ซึ่งมีเพียงค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 471 บาท/ตัน เท่านั้น [20] นอกจากนั้นราคาของสารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 31,400 บาท/ตัน [20] ซึ่งมีราคาสูงและส่งผลกระทบต่อราคาโดยรวมของส่วนผสมคอนกรีตได้

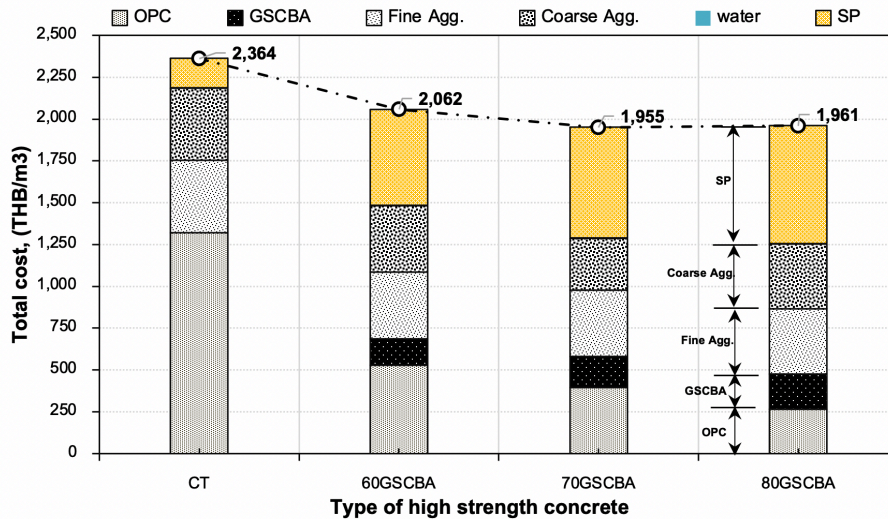
การเปรียบเทียบระหว่างราคาการผลิต และประเภท

ของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีต CT มีราคาของคอนกรีตเท่ากับ 2,364 บาท/ม³ หรือเท่ากับ 25 บาท/เมกะปาสคาล ที่อายุ 120 วัน ในขณะที่คอนกรีตกำลังสูง 60GSCBA, 70GSCB และ 80GSCBA มีราคาเท่ากับ 2,062, 1,955 และ 1,961 บาท/ม³ หรือคิดเป็นร้อยละ 87, 83 และ 83 ของคอนกรีต CT หรือเท่ากับ 23, 25 และ 29 บาท/เมกะปาสคาล ตามลำดับ ที่อายุ 120 วัน สังเกตได้ว่าราคาหลักของคอนกรีตกำลังสูงที่มี GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูงคือสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 28–35 ของราคาทั้งหมดต่อคอนกรีต 1 ม³ เพื่อควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 150–200 มม.

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าราคารวมของวัสดุที่ทำคอนกรีตกำลังสูงลดลงเมื่อปริมาณของ GSCBA เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตกำลังสูง 60GSCBA, 70GSCB และ

80GSCBA สามารถลดราคาโดยรวมในการผลิตคอนกรีตได้ประมาณร้อยละ 13-18 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การใช้ GSCBA ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนราคาในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง นอกจากนี้การใช้ GSCBA ในปริมาณสูง ยัง

มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การลดปริมาณการทิ้งแก่ชานอ้อย และลดพื้นที่การกองเก็บในโรงงาน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมอ้อย และน้ำตาล รวมถึงเป็นการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน



รูปที่ 6 ราคาวัสดุของของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง 1 ม³

4. สรุป

1. GSCBA สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยการใช้ GSCBA แทนที่ OPC ร้อยละ 60, 70, และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 71.1, 63.8 และ 56.8 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ

2. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GSCBA ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก โดยการแทนที่ OPC ด้วย GSCBA ไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

3. คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ GSCBA ในปริมาณสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการหดตัวแบบแห้งอยู่ระหว่าง 200-800 ไมโครสเตรน ซึ่งแนะนำโดย ACI Committee 209 [40] ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้

แม้ว่าจะมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีต CT

4. คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GSCBA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมของคอนกรีตได้ประมาณร้อยละ 13-18 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สัญญาเลขที่ 144-145/2560 ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาแก่ผู้เขียน (ทวิช กล้าแท้) และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัย Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under Fundamental Fund 2022 (Project : Advanced Construction Towards Thailand 4.0)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Office of Cane and Sugar Board, 2018, Report on Total Cane Crushing and Sugar Production 2018/2019, Ministry of Industry, Thailand, 111 p. (In Thai)
2. Krungsri Research, 2021, Thailand Industry Outlook 2021–23, Sugar Industry, Thailand, 12 p.
3. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M., Tavares, L.M.M. and Oliveira, C.H., 2004, “Influence of Mechanical Grinding on the Pozzolanic Activity of Residual Sugarcane Bagasse Ash,” *Proceedings of International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, Barcelona, Spain, pp. 731–40.
4. Srinivasan, R. and Sathiya, K., 2010, “Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete,” *International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship*, 5 (2), pp. 60–66.
5. Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A. and Murugesan, R., 2018, “Evaluation of Mechanical Properties of Sugar Cane Bagasse Ash Concrete,” *Construction and Building Materials*, 176, pp. 608–617.
6. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2009, “Utilization of Bagasse Ash as a Pozzolanic Material in Concrete,” *Construction and Building Materials*, 23 (11), pp. 3352–3358.
7. Singh, N.B., Singh, V.D. and Rai, S., 2000, “Hydration of Bagasse Ash–Blended Portland Cement,” *Cement and Concrete Research*, 30 (9), pp. 1485–1488.
8. Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K., 2007, “Evaluation of Bagasse Ash as Supplementary Cementitious Material,” *Cement and Concrete Composites*, 29 (6), pp. 515–524.
9. 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), pp. 110–115.
10. 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, pp. 350–356.
11. Zareei, S.A., Ameri, F. and Bahrami, N., 2018, “Microstructure, Strength, and Durability of Eco-Friendly Concretes Containing Sugarcane Bagasse Ash,” *Construction and Building Materials*, 184, pp. 258–268.
12. Akkarapongtrakul, A., Julphunthong, P. and Nochaiya, T., 2017, “Setting Time and Microstructure of Portland Cement–Bottom Ash–Sugarcane Bagasse Ash Pastes,” *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 148 (7), pp. 1355–1362.
13. Ríos–Parada, V., Jiménez–Quero, V.G., Valdez–Tamez, P.L. and Montes–García, P., 2017, “Characterization and Use of an Untreated Mexican Sugarcane Bagasse Ash as Supplementary Material for the Preparation of Ternary Concretes,” *Construction and Building Materials*, 157, pp. 83–95.
14. Cordeiro, G.C. and Kurtis, K.E., 2017, “Effect of Mechanical Processing on Sugar Cane Bagasse Ash Pozzolanicity,” *Cement and Concrete Research*, 97, pp. 41–49.
15. American Society for Testing and Materials, 2017, “ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States.

16. Rukzon, S. and Chindapasirt, P., 2012, "Utilization of Bagasse Ash in High-Strength Concrete," *Materials and Design*, 34, pp. 45–50.
17. Rerkpiboon, A., Tanawutti Phong, N., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Ion Penetration of High Volume Ground Bagasse Ash Concrete," *Journal of Thailand Concrete Association*, 6 (1), pp. 1–9. (In Thai)
18. Klathae, T., Tanawutti Phong, N., Tangchirapat, W., Chindapasirt, 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, p.119443.
19. Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2015, "Strength, Chloride Resistance, and Expansion of Concretes Containing Ground Bagasse Ash," *Construction and Building Materials*, 101, pp. 983–989.
20. Chindapasirt, 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, p. 101415.
21. American Society for Testing and Materials, 2018, "ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement," *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
22. American Society for Testing and Materials, 2016, "ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
23. American Society for Testing and Materials, 2014, "ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.01, Philadelphia, United States, 3 p.
24. American Society for Testing and Materials, 2012, "ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States, 6 p.
25. American Society for Testing and Materials, 2012, "ASTM C 128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States, 6 p.
26. American Society for Testing and Materials, 2006, "ASTM C 136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States, 5 p.
27. Tam, V.Y., Gao, X.F. and Tam, C.M., 2006, "Comparing Performance of Modified Two-stage Mixing Approach for Producing Recycled Aggregate Concrete," *Magazine of Concrete Research*, 58 (7), pp. 477-484.
28. American Society for Testing and Materials, 2014, "ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States, 7 p.
29. American Society for Testing and Materials, 2014, "ASTM C469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

30. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C 490 Standard Test Method for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.01, Philadelphia, United States, 5 p.
31. American Concrete Institute (ACI) Committee, 2010, Report on High-Strength Concrete, ACI 363 R, American Concrete Institute.
32. Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S., 2000, "Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High-Volume Fly Ash/Cement Systems," *Cement and Concrete Research*, 30 (5), pp. 747-756.
33. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. and Chutubtim, S., 2001, "A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Finenesses from Various Sources as Pozzolanic Materials," *Cement and Concrete Composites*, 23 (4-5), pp. 335-343.
34. Güneysi, E., Gesoglu, M. and Mermerdas, K., 2008, "Improving Strength, Drying Shrinkage, and Pore Structure of Concrete Using Metakaolin," *Materials and Structures*, 41 (5), pp. 937-949.
35. Arif, E., Clark, M.W. and Lake, N., 2016, "Sugar Cane Bagasse Ash from a High Efficiency Co-Generation Boiler: Applications in Cement and Mortar Production," *Construction and Building Materials*, 128, pp. 287-297.
36. Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2004, "Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (6), pp. 623-628.
37. Cetin, A. and Carrasquillo, R.L., 1998, "High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties," *Materials Journal*, 95 (3), pp. 252-261.
38. Neville, A., 1997, "Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete," *Materials Journal*, 94 (1), pp. 71-74.
39. Barr, B., Hoseinian, S.B. and Beygi, M.A., 2003, "Shrinkage of Concrete Stored in Natural Environments," *Cement and Concrete Composites*, 25 (1), pp. 19-29.
40. Al-Manaseer, A.A., Chiorino, M.A., Issa, M.A., Rieder, K.A., Bazant, Z.P., Daye, M.A., Marzouk, H., Robertson, I., Brooks, J.J., Dilger, W.H. and Miao, B., 2005, "Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete," *Concrete International*, 21.
41. Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M., 2000, Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete, Portland Cement Association, 61 p.

