การประเมินกำลังและการหดตัวของคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลและใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสาน

Investigation on Strength and Shrinkage of Eco-Friendly Concrete Containing Recycled Aggregate and Using Ground Bottom Ash and Calcium Carbide Residue Mixture as a Binder

ปิ่นพงศ์ กันหาลา[1], วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[2], ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[3]

[1]*นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (maxkystory@outlook.com)*
[2]*รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมแกล้าธนบุรี (weerachart.tan@kmutt.ac.th)*
[3]*ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (chai.jat@kmutt.ac.th)*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียด (GBA) ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (GCR) เป็นวัสดุประสานในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NA) เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์และหินย่อยจากธรรมชาติ และใช้สารละลายด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในอัตราร้อยละ 0, 0.5, 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ทำจากวัสดุประสานที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (CBN) มีการพัฒนากำลังอัดที่ช้ากว่าคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราร้อยละ 1 (CB1N) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 34.8 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด และมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (CT) ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ นอกจากนี้คอนกรีตที่ทำจากวัสดุประสานที่ได้จากเถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด และใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานสามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT)

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, กากแคลเซียมคาร์ไบด์, มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, กำลังอัด, การหดตัวรวม

Abstract

The objectives of this research are to study the compressive strength, modulus of elasticity, and shrinkage of concrete using ground bottom ash (GBA) mixed with ground calcium carbide residue (GCR) as a binder and containing recycled concrete aggregate (RCA) as coarse aggregate. A ratio of GBA to GCR was 70:30 by weight. A binder content of concrete was 550 kg/m^3 and water to binder ratio (w/b) was 0.30. Sodium hydroxide was used as a strength accelerator at rates of 0, 0.5, 1 and 3% by weight of binder. The results were found that the recycled aggregate concrete made with GBA-GCR mixture (CBN) had lower compressive strength than that of conventional concrete (CT). However, the compressive strength at 28 days of concrete made from GBA-GCR mixture as a binder with activated by 1% NaOH and containing recycled aggregate (CB1N) was 3.48 MPa which was the best with proportion and the same as that of CT concrete. Moreover, the modulus of elasticity of concrete made with GBA-GCR mixture and coarse recycled concrete aggregate was lower than CT concrete. In addition, the use of GBA-GCR mixture as a binder could also reduce the shrinkage of concrete as compared with the CT concrete.

Keywords: Bottom ash, Calcium carbide residue, Recycled aggregate concrete, Sodium hydroxide, Compressive strength, Total Shrinkage

1. คำนำ

ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมทั่วโลก ซึ่งปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักในส่วนผสมคอนกรีตแต่การผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆอยู่มากทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ (หินปูน, หินดินดาน, ยิปซั่ม) และการใช้เชื้อเพลิงสูงในกระบวนการผลิต อีกทั้งกระบวนการผลิตยังส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ส่วนผสมของคอนกรีตประกอบด้วยมวลรวมร้อยละ 70 ถึง 80 โดยปริมาตรของคอนกรีต ดังนั้นมวลรวมจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญของคอนกรีต ซึ่งการได้มาของมวลรวมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการระเบิดภูเขาเพื่อนำหินมาย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมในงานคอนกรีต ในขณะเดียวกันเนื่องจากมีการใช้งานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดขยะคอนกรีตเป็นจำนวนมากตามมาด้วยเช่นกันไม่ว่าจะเป็น เศษคอนกรีตจากการรื้อถอนโครงสร้างคอนกรีต หรือตัวอย่างจากการทดสอบคอนกรีต

ดังนั้นเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์จึงมีการศึกษาวัสดุประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และ เถ้าชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากนี้มีนักวิจัยได้ศึกษาการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เช่น เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล และคณะ [1] ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อพัฒนากำลังอัดในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าสามารถให้กำลังอัดที่สูงถึง 29.7 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 33.2 และ 36.8 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 60 และ 90 วัน ตามลำดับโดยไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยากับเถ้าก้นเตาได้เป็นอย่างดี ต่อมา พงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์ และคณะ [2] ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุประสาน พบว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานออ้อยเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีกำลังอัดเท่ากัน ขณะที่สมบัติเชิงกลของคอนรีต ได้แก่ การรับกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นไม่ต่างกันมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน Chi [3] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนโมดูลัสและปริมาณของสารละลายที่กระตุ้นด้วยอัลคาไลต่อคุณสมบัติและโครงสร้างขนาดเล็กของเถ้าลอยที่กระตุ้นด้วยด่าง พบว่าความเข้มข้นของสารละลายในปริมาณที่สูงขึ้นสามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้

ในทางเดียวกันเพื่อเป็นการลดปริมาณของเศษคอนกรีตและลดการใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติจึงมีการศึกษาเพื่อนำขยะคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ โดยนำเศษคอนกรีตมาย่อยเพื่อใช้แทนมวนรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต Tangchirapat และคณะ [4] พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตต่ำลง เนื่องจากการดูดซึมน้ำที่มากกว่าและความแข็งแรงที่น้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางลดผลกระทบดังกล่าว เช่น การปรับปรุงคุณภาพมวลรวมหยาบก่อนนำมาผสม [5] และการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต [6] สามารถทำให้คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตดีขึ้นได้

เถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน แต่เถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีรูพรุนสูงจึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน จึงเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าก้นเตามีสมบัติเป็นวัสุปอซโซลานเมื่อมีความละเอียดที่สูงขึ้น [7] และ ชลดรงค์ เจริญไวยเจตน์ [8] ได้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตามาคัดเลือกขนาดโดยตะแกรงขนาดต่างๆ จากนั้นนำไปบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 แล้วนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ก่อนบดละเอียดสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด และมีดัชนีกำลังที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตก๊าซอะเซทิลีนเพื่อนำมาใช้ในการตัดเชื่อมโลหะและอุตสาหกรรมอื่นๆ ผลพลอยได้จากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูป $Ca(OH)_2$ เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความเป็นด่างสูง จึงส่งผลต่อดินบริเวณโดยรอบเพราะจะทำให้ดินเสื่อมคุณภาพและไม่สามารถทำการเกษตรได้ งานวิจัยของ ชรินทร์ นมรักษ์ [9] พบว่าเมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินที่บดให้มีความละเอียดสูงมีองค์ประกอบทางเคมีเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิด คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตามาผสมรวมกันและใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่ง อรรคเดช อับดุลมาติน และคณะ [10] พบว่าการใช้มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated Binder) ผลิตจากการผสมสารละลายอัลคาไล เช่น อัลคาไลไฮดรอกไซด์ หรืออัลคาไลซิลิเกต เป็นต้น และสารตั้งต้นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาว เผา หรือเถ้าถ่านหิน เป็นต้น [11] จากงานวิจัยที่ผ่านมา Katz [12] ทำการศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้กระตุ้นด้วยด่าง ซึ่งส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ดีขึ้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และใช้สารละลายด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย เถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด ซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง โดยนำเถ้าก้นเตามาปรับปรุงคุณภาพโดยคัดเลือกให้มีขนาด

ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 จากนั้นนำไปบดละเอียดจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงขนาดมาตรฐานที่มีช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความไว (Sensitivity) ในการทำปฏิกิริยา และกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตก๊าซอะเซทิลีน โดยนำมาปรับปรุงคุณภาพเช่นเดียวกับเถ้าก้นเตาโดยบดจนมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C430 [13]

2.2 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NA) และมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) มวลรวมหยาบจากธรรมชาติใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม ส่วนมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตได้จากการนำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม สูง 300 มม ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดมาแล้ว ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 30 ถึง 40 เมกะปาสคาล ย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตแบบขบ (Jaw crusher) จากนั้นนำเศษคอนกรีตมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มม (ตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/4 นิ้ว) และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เพื่อใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต สมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ศึกษาได้แก่ ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127 [14] ทดสอบขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C136 [15]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

Mixed	Mix Proportion (kg/m^3)								W/B	Na(OH) (%)	SP (%)	Slump (cm)
	Binder	Cement	GCR	GBA	Fine aggregate	Coarse aggregate		Water				
					Sand	NA	RCA					
CT	400	400	-	-	772	995	-	200	0.5	-	-	17.5
CBN	550	-	165	385	642	-	855	165	0.3	0	1	18.0
CB0.5N	550	-	165	385	642	-	855	165	0.3	0.5	1.2	17.0
CB1N	550	-	165	385	642	-	855	165	0.3	1	3.6	16.5
CB3N	550	-	165	385	642	-	855	165	0.3	3	12	9.0

2.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ทรายแม่น้ำ ซึ่งมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าการดูดน้ำร้อยละ 1 และมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.43

2.4 สารละลายด่าง

สารละลายด่างที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98

2.5 ส่วนผสมและการทดสอบคอนกรีต

การศึกษานี้แบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกคือคอนกรีตควบคุม (CT) ซึ่งใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ) กลุ่มที่สองคือคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดในอัตราส่วน 70:30 (CBN) ซึ่งใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NA) ทั้งหมดกลุ่มที่สามคือคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดในอัตราร้อยละ 70:30 ซึ่งใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติทั้งหมด และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวกระตุ้นในอัตราร้อยละ 0.5, 1 และ 3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CB0.5N, CB1N และ CB3N ตามลำดับ) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 0.5 และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 150-200 มม โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer หรือ SP) ซึ่งอัตราส่วนผสมของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 1 ผสมและเทคอนกรีตในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม สูง 200 มม และแบบหล่อรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 75 x 75 x 285 มม เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดและการหดตัวรวมของคอนกรีตตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตจากคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสาน เมื่อหล่อเสร็จทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการถอดแบบแล้วนำตัวอย่างทรงกระบอกไปบ่มในน้ำ ทดสอบหาค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C469 [17] ในขณะเดียวกันตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 75 x 75 x 285 มม หลังถอดแบบแล้วนำไปเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25±2 องศาเซลเซียส ทดสอบการหดตัวของคอนกรีตที่อายุ 0, 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C157 [18]

3. ผลการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีปริมาณอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ขณะที่เถ้าก้นเตาบดละเอียด (GBA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (GCR) มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ 0.55 และ 8.12 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.53 และ 2.26 ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานดีขึ้นได้ [8]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Material	Retained on a sieve No.325 (% by weight)	Specific gravity
OPC	11.35	3.15
GBA	0.55	2.53
GCR	8.12	2.66

3.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีแล้วพบว่าเถ้าก้นเตา (BA) มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เท่ากับร้อยละ 63.2 และมีผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 94.9 ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C 618 [19] ที่ระบุไว้ว่าผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าเท่ากับร้อยละ 65.4 ขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีปริมาณ LOI ที่สูง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงที่ใช้ในการเผาทำให้น้ำระเหยออกไป

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	OPC	BA	CCR
Silicon dioxide (SiO_2)	20.9	63.2	3.9
Aluminium oxide (Al_2O_3)	4.8	24.4	2.3
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	7.3	0.5
Calcium oxide (CaO)	65.4	2.3	65.4
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	0.1	0.7
Magnisium oxide (MgO)	1.3	0.8	0.7
Sodium oxide (Na_2O)	0.3	0.4	-
Potassium oxide (K_2O)	0.4	1.3	-
Loss on ignition (LOI)	1	0.2	26.5

3.3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมรวม

ตารางที่ 4 แสดงถึงสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากการศึกษาพบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.79 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (Crushed Limestone หรือ NA) ที่มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.72 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัตร์ ขำคล้าย [20] พบว่าการที่ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงเนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมมีความพรุน จึงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม RCA มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.47 ซึ่งน้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติที่มีค่าเท่ากับ 2.77 เนื่องจาก RCA มีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์เกาะติดที่ผิวของมวลรวมจากธรรมชาติเดิม ทำให้มีความพรุนสูง มีความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ความหนาแน่นของ RCA ลดลง

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบ

Properties	Coarse Aggregate	
	Crushed Limestone	RCA
Specific gravity (SSD)	2.77	2.47
Absorption (%)	0.72	5.79

3.4 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบของคอนกรีตควบคุม (CT) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานพบว่ามีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 28 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตค่อนข้างสูงที่ช่วงอายุ 28 วันแรก ส่งผลให้คอนกรีตควบคุม (CT) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 24, 32, และ 37.7 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

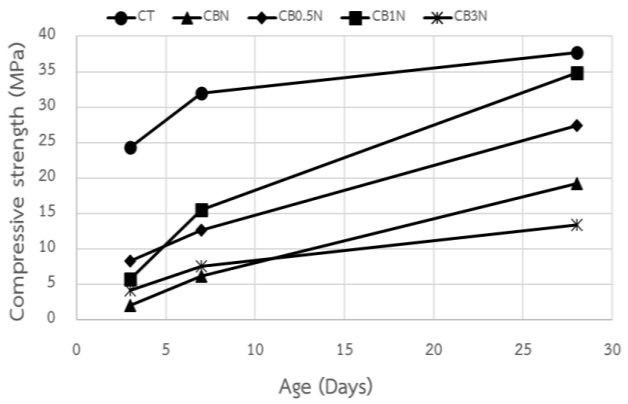
คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานโดยไม่มีปูนซีเมนต์ มีปฏิกิริยาหลักในคอนกรีตคือ ปฏิกิริยาปอซโซลาน [21] การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดช้าในช่วงอายุต้นของคอนกรีต จากตารางที่ 5 คอนกรีต CBN มีค่ากำลังอัดที่ต่ำและการพัฒนากำลังอัดที่ช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 2, 6.2 และ 19.2 เมกกะปาสคาล โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.3 ที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ

นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานโดยไม่มีปูนซีเมนต์ในการทดสอบนี้ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (NA) ทั้งหมด จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ RCA มีค่ากำลังอัดที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Kou และ Poon [22] ที่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย RCA และใช้มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากค่าการดูดซึมน้ำที่สูงของ RCA ทำให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมาก และความแข็งแรงของ RCA ที่ต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีต

Mixes	compressive strength (MPa) - Normalized compressive strength (%)		
	3 days	7 days	28 days
CT	24.3 - (100)	32.0 - (100)	37.7 - (100)
CBN	2.0 - (8)	6.2 - (19)	19.2 - (51)
CB0.5N	8.3 - (34)	12.6 - (40)	27.4 - (72)
CB1N	5.8 - (24)	15.5 - (48)	34.8 - (92)
CB3N	4.2 - (17)	7.5 - (23)	13.4 - (35)

อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ผู้วิจัยจึงใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับน้ำในอัตราร้อยละ 0.5, 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานให้เกิดเร็วขึ้น จากรูปที่ 1 เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ RCA และใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลาย (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CB0.5N และ CB1N) มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CBN ที่ไม่ได้ใช้สารเร่งปฏิกิริยา โดยคอนกรีต CB0.5N ค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.3, 12.6 และ 27.4 เมกกะปาสคาล และคอนกรีต CB1N มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 5.8, 15.5 และ 34.8 เมกกะปาสคาลที่ อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดพบว่า คอนกรีต CB1N ที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (CT) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.8 เมกกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 92 ของคอนกรีตควบคุม (CT) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reaksmery Soeurt และ วิเชียร ชาลี [23] พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.5 ถึง 1 โมลาร์ มีแนวโน้มให้การพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเข้มข้นที่สูงกว่า 1 โมลาร์ พบว่าการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากความหนืดที่เพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้คอนกรีตมีการยึดประสานภายในส่วนผสมต่ำลง และทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงด้วย เห็นได้จากคอนกรีต CB3N มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.2, 7.5 และ 13.4 เมกกะปาสคาลที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ 28 วันน้อยกว่าคอนกรีตทุกส่วนผสม

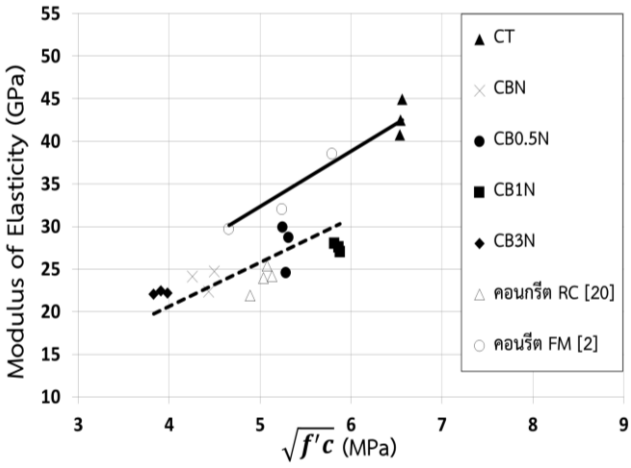


รูปที่ 1 กำลังอัดของคอนกรีต

3.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

รูปที่ 2 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่ามวลรวมมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมหลักในคอนกรีตและมีผลต่อกำลังอัดโดยตรง การใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด เห็นได้จากเส้นแนวโน้มของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติของคอนกรีตควบคุม (CT) ร่วมกับ พงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์ [2] ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 42.73 และ 33.4 จิกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ระหว่าง 22.21-27.78 จิกะปาสคาล ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีต ที่ใช้หินธรรมชาติทุกส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัตร์ ขำคล้าย [20] ที่พบว่าการใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมจากธรรมชาติ รวมถึงช่องว่างที่เกิดจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่เกาะอยู่ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตปกติ

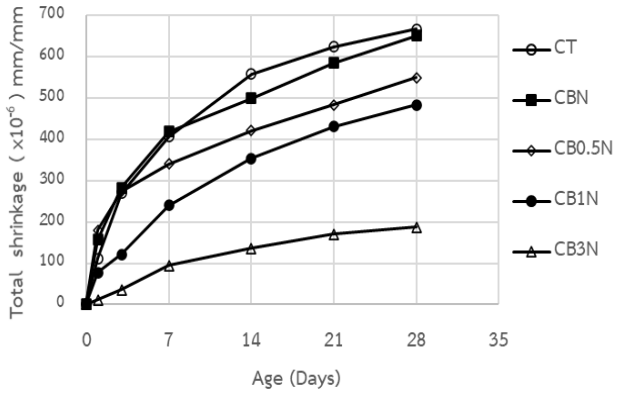
จากรูปที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบผลของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด และจากงานวิจัยของ สุพัตร์ ขำคล้าย [20] ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20, 35 และ 50 พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ยังน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าผลของการใช้วัสดุประสานที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากนัก และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมคอนกรีต แม้จะสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นได้แต่ไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากนักเช่นกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.6 การหดตัวรวมของคอนกรีต

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตที่ทำจากเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานและถูกกระตุ้นด้วยด่างเพื่อเร่งปฏิกิริยา โดยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกของคอนกรีต CBN เกิดการหดตัวมากสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 650.69 x 10^{-6} มม/มม ในขณะที่คอนกรีต CB0.5N, CB1N และ CB3N เกิดการหดตัวเท่ากับ 549.15 x 10^{-6} , 483.37 x 10^{-6} และ 187.34 x 10^{-6} มม/มม ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าการหดตัวของคอนกรีตที่ทำจากเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิวานันท์ ไทยวิชญ์เจริญ และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ [24] พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ทำให้มีความสามารถในการชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าก้นเตาได้ดีขึ้น และงานวิจัยของ Chi [3] พบว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้เกิดซิลิกาเจลภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้การหดตัวลดน้อยลง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและการหดตัวรวมของคอนกรีต

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลและเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม (CT) โดยที่ คอนกรีต CB1N มีกำลังอัดเท่ากับ 34.8 เมกกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 92 ของ คอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 28 วัน

4.2 การใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ลดลง เนื่องจาก RCA มีความพรุนสูงความหนาแน่นน้อยและความแข็งแรงต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากนัก

4.3 การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานทำให้การหดตัวของคอนกรีตลดน้อยลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองที่สนับสนุนเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2559). การพัฒนากำลังอัดของอคนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด, *วารสารวิชาการสมาคมคอนหรีตแห่งประเทศไทย*, Vol.4 No.1 หน้า 12.

[2] พงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์, ไชยนันท์ รัตนโชตินันท์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554). คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุประสาน",*การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16*, 18-20 พฤษภาคม, หน้า MAT 183.

[3] Chi, M. (2015). Effects of Modulus Ratio and Dosage of Alkali–Activated Solution on the Properties and Micro-Structural Characteristics of Alkali–Activated Fly Ash Mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 99, pp. 128-136.

[4] Tangchirapat W., Buranasing R., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt P. (2008). Influence of rice husk–bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, No. 8, pp. 1812-1819.

[5] Bui N.K., Satomi T., TakahaShi H. (2018). Mecchanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol. 163, pp. 496-507.

[6] Jaturapitakkul C., Cheerarot R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanicmaterial. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 48-53.

[7] Tangchirapat W., Rattanashotinunt C., Buranasing R., Jaturapitakkul C. (2013). Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 243-251.

[8] ชลดรงค์ เจริญไวยเจตน์ (2560). *การพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 110.

[9] ชรินทร์ นมรักษ์, วันชัย สะตะ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2544). ผลกระทบของวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8*, 23-25 ตุลาคม, หน้า MAT 178-183.

[10] อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2558). ผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ฉบับที่ 3, หน้าที่ 31-41.

[11] Shi C., Roy D., and Krivenko P. (2003). Alkali-activated cements and concretes, CRC press.

[12] Katz A., (1998). Microscopic study of alkali-activation fly ash. *Cement and Concrete Research*, No. 28, pp. 197-208.

[13] Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 4 5 -μm (No. 3 2 5) Sieve, ASTM C430, 2015.

[14] Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C127, 2015.

[15] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM C136/C136M, 2014.

[16] Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C39/C39M, 2016.

[17] Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM C469/C469M, 2014.

[18] Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM C157/ C157M, 2017.

[19] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

[20] สุพัตร์ ขำคล้าย (2552). *การศึกษาค่าการซึมผ่านน้ำและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 36-43.

[21] Sata V., C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol. (2007). Influence of Pozzolan from Various by-Product Materials on Mechanical Properties of High Strength Concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1589-1598.

[22] Kou S.C. and Poon C.S. (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 77, pp. 501-508.

[23] Reaksmery Soeurt และ วิเชียร ชาลี (2559). การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26*, ฉบับที่ 3 , หน้า 351-355

[24] ศิวานันท์ ไทยวิชญ์เจริญ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2555). การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบอะลูมิเนียมต่อการเกิดเอททริงไกต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่8*, ฉบับที่ 3, หน้าที่ 1-8.