การประเมินกำลังและการหดตัวของคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลและใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสาน

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

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเต หทเือ า

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 ชลดรงด์ 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 ดินขาวเผา หรือเถ้าถ่านหิน เป็นต้น [11] จากงานวิจัยที่ผ่านมา Katz [12] ทำการศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้กระตุ้นด้วยด่าง ซึ่งส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ดีขึ้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และใช้สารละลายด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

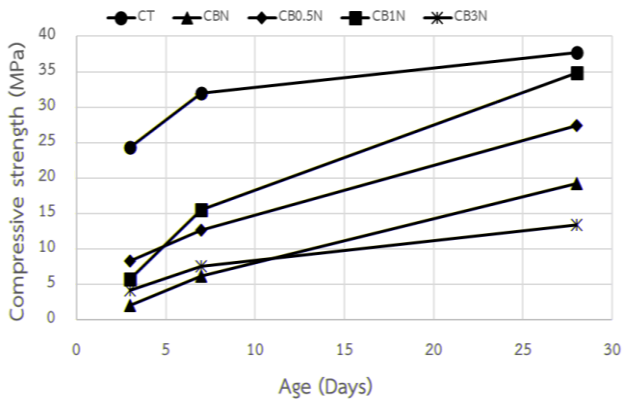
2.1 *วัสดุประสาน*

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย เถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด ซึ่งเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง โดยนำเถ้าก้นเตามาปรับปรุงคุณภาพโดยคัดเลือกให้มีขนาด

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

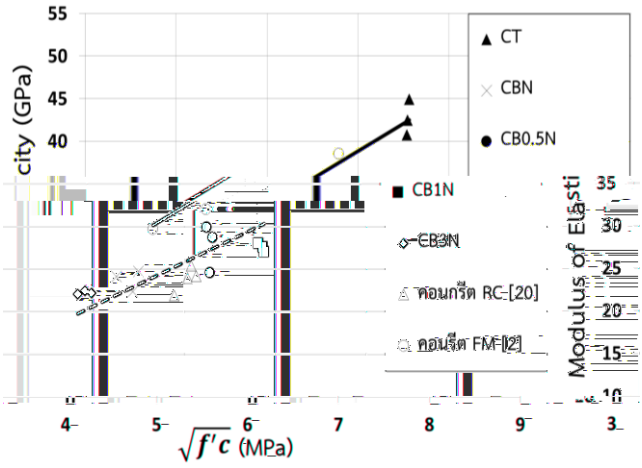


รูปที่ 1 กำลังอัดของคอนกรีต

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

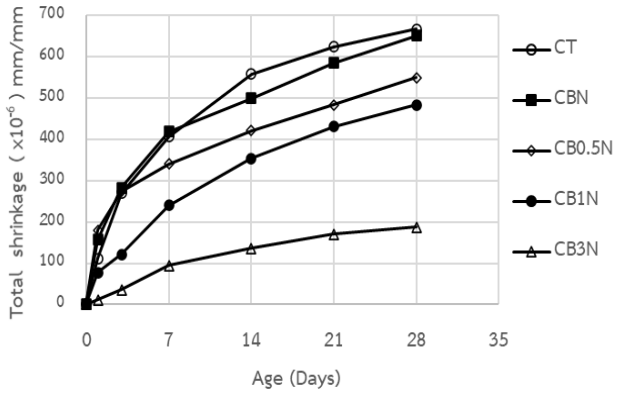
จากรูปที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบผลของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด และจากงานวิจัยของ สุพัตร์ ขำคล้าย [20] ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ดแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20, 35 และ 50 พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน 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 45-μm (No. 325) 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.