



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE FROM A BINDER OF BOTTOM ASH AND CALCIUM CARBIDE RESIDUE

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล^{1*}, อรรถเดช อับดุลมาติน², วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: May 27, 2016

Received Revised Form:

July 15, 2016

Accepted: July 21, 2016

ABSTRACT :

In this study, two waste materials, calcium carbide residue and bottom ash, were used as a binder in concrete. Bottom ash from the Mae Moh power plant in Lampang province was mixed with calcium carbide residue, a waste obtained from an acetylene gas production industry in Samutsakorn province. The mixture was used as a binder for casting concrete. This paper focused on the development of compressive strength of the concrete made from the two waste materials to replace cement in concrete. Also, the cement not exceeding 55 kg/m³ was used to promote and increase the compressive strength of concrete. The results demonstrated that the compressive strengths of concrete without cement were as high as 29.7 and 36.8 MPa at 28 days and 90 days, respectively. Also, the adding 55 kg/m³ of cement in the concrete mixture produced the compressive strength of 44.3 and 51.4 MPa at 28 and 90 days, respectively. For cement concrete to have the compressive strength of 47 MPa at 28 days, the use of cement in the mixture of 450 kg/m³ was needed. The results also illustrated that the use of concrete made from calcium carbide residue and bottom ash as a binder provided a satisfactory compressive strength and also reduced the use of cement in concrete mixture..

KEYWORDS: Binder, bottom ash, calcium carbide residue, concrete

บทคัดย่อ :

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุเหลือทิ้ง 2 ชนิดเป็นวัสดุประสาน คือ เถ้าก้นเตาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีนจากจังหวัดสมุทรสาคร โดยมุ่งเน้นพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุทั้ง 2 ชนิด เพื่อเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ตลอดจนใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเร่งและพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 55 กก/ม³) การศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 29.7 และ 36.8 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ 55 กก/ม³

สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัด 44.3 และ 51.4 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัดประมาณ 47 เมกะปาสกาลที่อายุ 28 วัน ต้องใช้

ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมถึง 450 กก/ม³ แสดงให้เห็นถึงการใช้คอนกรีตที่ทำจากกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดคอนกรีตสูงเป็นที่น่าสนใจ ในขณะที่สามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้จำนวนมากในส่วนผสมคอนกรีต

*Corresponding Author,

Email address:
penpichcha.kh@gmail.com

คำสำคัญ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์, คอนกรีต, เถ้าก้นเตา, วัสดุประสาน

1. บทนำ

วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานคอนกรีตประกอบด้วย มวลรวม เช่น หิน หินทราย และวัสดุประสาน ซึ่งปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักในส่วนผสมคอนกรีตแต่การผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอยู่ทุกแห่ง ทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ (หินปูน, หินดินดาน, ยิปซัม) การใช้เชื้อเพลิงสูงในกระบวนการผลิต อีกทั้งกระบวนการผลิตยังส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศในประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ในปี พ.ศ. 2558 สูงถึง 37.2 ล้านตัน [1] อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าขานอ้อย เถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรมต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยได้ศึกษาการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เช่น เศษราฐ เรียงฤทธิ์ [2] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบร่วมกับ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นวัสดุประสานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าสามารถให้กำลังอัดได้สูงถึง 19 เมกะปาสกาลที่อายุ 180 วัน เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าแกลบได้เป็นอย่างดี ต่อมาพงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์ และคณะ [3] ศึกษาถึงสมบัติของคอนกรีตที่ใช้

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสาน พบว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีกำลังอัดเท่ากัน ขณะที่สมบัติเชิงกลของคอนกรีต ได้แก่ การรับกำลัง กำลังดึงผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นไม่ต่างกันมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่ามีประมาณปีละ

1.4 ล้านตัน เถ้าก้นเตาเป็นเถ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปเถ้าถ่านหินจะมีอนุภาคที่เล็กและลักษณะเป็นทรงกลมมนและตัน เมื่ออยู่ในกระบวนการเผาจะลอยขึ้นสู่ปล่องควันและดับจับเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือนำไปทิ้ง แตกต่างจากเถ้าก้นที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และมีรูพรุนมากกว่า เนื่องจากมีน้ำหนักมากจึงตกลงสู่ก้นเตา องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าก้นเตา คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมินัมไดออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและชนิดของถ่านหิน [4]

ประเภทของเถ้าถ่านหินแยกเป็น 2 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618 [5] โดยจัดแยกประเภทเป็น Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 ขณะที่ Class C มีออกไซด์ข้างต้นร้อยละ 50 ถึง 70 การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าก้นเตามาประยุกต์เป็นวัสดุประสานตามมาตรฐานดังกล่าว โดยปรับปรุงสมบัติของเถ้าก้นเตาด้วยการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดให้แก่เถ้าก้นเตา ซึ่งคาดว่าจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานที่มีศักยภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งการศึกษาของ อธิพงศ์ อารยวงศ์วาท และ วีระ หอสกุลโท [6] พบว่าการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 47.8 เมกะปาสกาล อีกทั้งยังสามารถต้านทานการแตกร้าวจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตที่ทำจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีนเพื่อนำมาใช้ในการตัดเชื่อมโลหะและอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ต้องการใช้

ก๊าซอะเซทิลีนเป็นเชื้อเพลิง ผลพลอยได้จากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน คือ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งอยู่ในรูป Ca(OH)_2 เฉพาะที่โรงงานหนึ่งในประเทศไทยมีกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งอยู่ประมาณ

21,500 ตัน/ปี [7] หากไม่ได้รับการนำมาปรับปรุงเพื่อใช้ประโยชน์ย่อมต้องหาพื้นที่กำจัดทิ้ง รวมไปถึงความเป็นพิษสูงของ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ส่งผลเสียต่อดินบริเวณโดยรอบ เพราะจะทำให้ดินเสื่อมคุณภาพและไม่สามารถทำการเกษตรได้

งานวิจัยของชรินทร์ นมรักษ์ [8] พบว่าเมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินที่บดให้มีความละเอียดสูงมีองค์ประกอบทางเคมีเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ และงานวิจัยของ ปิติศานต์ กร่ำมาตร และคณะ [9] พบว่าการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา

ปอซโซลานต้องอาศัยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิด คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านเตาผสมรวมกันและใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งอัตราเศษ อับดุลมาดิน และคณะ [10] พบว่าการใช้มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้กำลังอัดมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาการนำวัสดุประสานอื่นมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตอย่างหลากหลาย ซึ่งส่งผลดีในด้านการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตอย่างเด่นชัด การไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมอาจทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำในช่วงอายุต้น แต่เมื่อทำการบ่มจนปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ มีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงและเพียงพอต่อการใช้งานได้เป็นอย่างดี กรกฎ วิจิตรพงศ์ [11] พบว่า การนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีต สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตสดซึ่งส่งผลที่ดีต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างดี รวมทั้ง ธนพล เหล่าสมาธิกุล [12] ได้ศึกษาพบว่า การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหินโดยบดให้มีความละเอียดสูง ส่งผลให้การพัฒนาของกำลังอัดคอนกรีตดีขึ้น และสามารถให้กำลังอัดสูงถึง 33.5 เมกะปาสคาลที่อายุ 90 วัน

โครงสร้างคอนกรีตทั่วไปหากต้องการการรับน้ำหนัก 20-30 เมกะปาสคาลต้องใช้ปูนซีเมนต์อย่างน้อย 200-300 กก/ม³ ในส่วนผสม ดังนั้นหากคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่สูง และกระบวนการผลิตที่ยากลำบากแล้ว การมีวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตแทนที่ใช้ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมดหรือบางส่วนจึงนับเป็นเรื่องที่ดีเป็นอย่างยิ่ง

การนำเถ้าถ่านเตามาใช้ประโยชน์ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไม่ได้มีจุดประสงค์เพียงเพื่อหาวัสดุประสานชนิดใหม่ในงานคอนกรีตเท่านั้น แต่ยังช่วยสนับสนุนการนำทรัพยากรที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ของประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์ที่คุ้มค่า อนุรักษ์พลังงาน ลดการผลิตปูนซีเมนต์และลดผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ยังคงมีขีดจำกัด เนื่องจากขาดงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ of HPC with commonly used SCMs and admixtures.

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านเตาเป็นวัสดุประสานและเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานตลอดจนพิจารณาถึงการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต รวมทั้งศึกษาถึงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านเตาเป็นวัสดุประสาน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าถ่านเตา (Bottom Ash) นำมาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านเตามีข้อดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ได้จากกระบวนการผลิตเดียวกัน เนื่องจากเถ้าถ่านเตามีขนาดใหญ่ ดังนั้นการนำมาใช้ในงานคอนกรีตต้องทำการบดให้มีความละเอียดสูงก่อน รูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านเตาก่อนและหลังการบด ก่อนบดอนุภาคของเถ้าถ่านเตามีขนาดใหญ่โดยมีลักษณะคล้ายทราย หลังการบดพบว่าสีของเถ้าถ่านเตามีสีน้ำตาลเข้มและมีความละเอียดสูงขึ้น จากการทดสอบปริมาณน้ำหนักร้อยละ

บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าร้อยละ 3.95 ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาหลังจากการบดซึ่งพบว่ามีปริมาณรวมของออกไซด์ ซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกที่สูงถึงร้อยละ 71 และมี SO_3 ร้อยละ 1.7 รวมทั้งค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ร้อยละ 3.6 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบทางเคมีที่สอดคล้องกับเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [5]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical Compositions (%)	CR	BA	Portland Cement
			Type I
Silicon Dioxide, SiO_2	5.2	36.0	20.9
Aluminium Oxide, Al_2O_3	2.5	19.9	4.8
Ferric Oxide, Fe_2O_3	2.0	15.1	3.4
Calcium Oxide, CaO	59.3	19.0	65.4
Magnesium Oxide, MgO	2.1	2.4	1.3
Chloride, Cl	0.7	0.0	-
Sulfur Trioxide, SO_3	1.0	1.7	2.7
Potassium Oxide, K_2O	0.3	2.3	0.4
Loss On Ignition, LOI	26.9	3.6	2.9



ก.ก่อนบด



ข.หลังบด

รูปที่ 1 เถ้าก้นเตา จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ก่อนและหลังบดละเอียด

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จ.สมุทรสาคร รูปที่ 2 แสดงลักษณะทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ก่อนและหลังการบด หลังจากได้รับการบดจนมีความละเอียดสูง มีปริมาณน้ำหนักร้อยละบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 9.85 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงตามตารางที่ 1 พบว่ามีปริมาณ CaO

เท่ากับร้อยละ 59.3 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงส่งผลดีต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานแต่มี LOI สูงถึงร้อยละ 26.9 ซึ่งเป็นผลมาจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งสลายตัวเป็น CaO และ H_2O ภายใต้การทดสอบ LOI ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 750 องศาเซลเซียส [13] กากแคลเซียมคาร์ไบด์ภายหลังจากการบดละเอียดมีสีเทาเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าคล้ายปูนซีเมนต์



ก.ก่อนบด



ข.หลังบด

รูปที่ 2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร ก่อนและหลังบดละเอียด

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นำมาใช้เพื่อเป็นสารเร่งและพัฒนากำลังโดยใช้ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

มวลรวมละเอียดที่ใช้ คือ หยาบแม่น้ำ และมวลรวมหยาบที่ใช้ คือ หินปูน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.54 และ 0.23 ตามลำดับ และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.93 และ 6.74 ตามลำดับ

สารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [14] ซึ่งนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของคอนกรีตสดเนื่องจากรูปร่างของเถ้าก้นเตาที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมและมีรูพรุนสูงทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลง การใช้สารลดน้ำพิเศษจึงช่วยเพิ่มความชื้นเหลวในคอนกรีตได้

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดมาผสมกับเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานจากงานวิจัยของอรรคเดช อับดุลมาดิน และคณะ [10] พบว่าอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดมอร์ต้ารมีค่าสูงที่สุด คือปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าก้นเตาเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนของวัสดุประสานคล้ายคลึงกับการศึกษาของ สุธี ลิ้มปน

ชัยพรกุล และคณะ [15] งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเร่งและพัฒนาการกำลังอัดในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 อีกทั้งยังมีคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่ใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเล็กน้อยอีกด้วย ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 7.5-12.5 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษในการปรับค่ายุบตัวของคอนกรีต สัดส่วนผสมของคอนกรีตและค่ายุบตัวแสดงในตารางที่ 2

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. หลังจากถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อภายหลังจากการเทคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำสะอาดและทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบกำลังอัดได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต

Mixed	Mix Proportion (kg/m ³)							W/B Ratio	Slump (cm)
	Cement	CR	BA	Sand	Stone	Water	Super P.		
0.3CT	550	-	-	755	960	165	1.65	0.3	10.0
0.4CT	450	-	-	775	980	180	0.90	0.4	10.5
0.5CT	375	-	-	815	1040	188	0.18	0.5	8.5
0.7CT	300	-	-	794	1009	210	-	0.7	11.5
0.3CB	-	165	385	805	1025	165	7.25	0.3	8.0
0.4CB	-	135	315	815	1040	180	3.78	0.4	8.0
0.5CB	-	113	263	850	1080	188	2.30	0.5	7.5
0.3CB10	55	149	347	800	1020	165	7.25	0.3	9.5
0.4CB10	45	122	284	815	1030	180	3.60	0.4	9.0
0.5CB10	38	101	236	845	1075	188	2.25	0.5	9.5

4. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

4.1 คอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมหรือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานซึ่งพบว่าการพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วจนกระทั่งอายุคอนกรีต 28 วัน จึงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในอัตราที่ต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถให้กำลังอัดค่อนข้างสูงในช่วงอายุ 28 วัน แรกและหลังจากอายุ 28 วัน พบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าๆ ส่งผลให้คอนกรีตควบคุม 0.3CT ที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 68.2 เมกะปาสคาลที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.4, 0.5 และ 0.7 ส่งผลให้กำลังของคอนกรีต

ควบคุม 0.4CT, 0.5CT และ 0.7CT โดยมีค่าลดลงเท่ากับ 46.9, 43.0 และ 29.3 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อ

คอนกรีตควบคุมมีอายุเพิ่มขึ้นจนถึง 90 วัน พบว่ากำลังอัดคอนกรีตยังคงมีแนวโน้มเดียวกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กล่าวคือที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่สูง คือที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.7 มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 70.3, 51.2, 45.9 และ 30.6 เมกะปาสคาลตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

Mixed	Compressive Strength (MPa)			
	7 days	28 days	60 days	90 days
0.3CT	56.2	68.2	68.8	70.3
0.4CT	38.2	46.9	47.5	51.2
0.5CT	36.0	43.0	46.0	45.9
0.7CT	23.1	29.3	30.5	30.6
0.3CB	21.4	29.7	33.2	36.8
0.4CB	16.6	25.8	29.9	31.0
0.5CB	10.7	16.1	18.5	19.7
0.3CB10	34.7	44.3	47.1	51.4
0.4CB10	23.8	32.9	39.5	41.9
0.5CB10	15.7	24.6	26.2	28.4

4.2 คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสาน

คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานโดยไม่มีปูนซีเมนต์ มีปฏิกิริยาหลักในคอนกรีตคือ ปฏิกิริยาปอซโซลาน [16] การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังต่ำในช่วงอายุต้นของคอนกรีตจากตารางที่ 3 เห็นได้ชัดถึงอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของกำลังอัดคอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตามาใช้ในงานคอนกรีต เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น กล่าวคือ คอนกรีตที่อายุ 60 วันให้กำลังอัดเท่ากับ 32.2, 29.9 และ 18.5 เมกะปาสคาลที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 (หรือคอนกรีต 0.3CB, 0.4CB และ 0.5CB) ตามลำดับ

วัสดุประสานทั้งสองที่ใช้ในการศึกษา ได้รับการบดจนมีความละเอียดสูง มีอนุภาคที่เล็กลงซึ่งช่วยในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Sybertz และ Wiens [17] ที่พบว่าเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานและการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและสอดคล้องกับงานวิจัยของ เศกสรรค์ ชูทับทิม [18] ซึ่งพบว่าความละเอียดที่ลดลงทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงมีผลต่อการ

เพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งมีผลมาจากความละเอียดมากกว่าผลจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

เนื่องจากรูปร่างที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมที่มากและมีรูพรุนของเถ้าก้นเตา ส่งผลให้มีความสามารถในการเทที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในการวิจัยครั้งนี้จึงอาศัยสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ประเภท F ซึ่งส่งผลที่ดีในการทำงานของคอนกรีตและไม่มีผลกระทบต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น ปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตมีเวลายาวนานกว่า 28 วัน ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดขึ้นช้าตาม ส่งผลถึงการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่เป็นไปอย่างช้าๆ เช่นกัน ดังนั้นการนำเถ้าก้นเตามาใช้ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ควรเลือกใช้งานกับโครงสร้างที่ไม่ต้องการความเร่งรีบในการรับกำลังมากนักหากต้องการกำลังอัดที่สูงในช่วงอายุต้น เช่น ที่อายุ 7 วัน ควรเลือกคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ เช่น 0.3CB ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 21.4 เมกะปาสคาลและเพิ่มเป็น 29.7 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน

4.3 คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานและมีปูนซีเมนต์เพื่อเร่งกำลัง

คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาและมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน สามารถเร่งกำลังอัดในช่วงอายุต้นและปลาย ช่วยส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้จากปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานที่ได้จากเถ้าก้นเตาร่วมกับ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ การแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ไม่เกิน 55 กก/ม³) ส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในทุกๆ ส่วนผสมเนื่องจากปฏิกิริยาในชั้นแรก คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้ผลผลิตจากปฏิกิริยาเป็นซีเมนต์เจล ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ยิ่งไปกว่านั้นในปฏิกิริยาขั้นที่สอง คือปฏิกิริยาปอซโซลาน ยังช่วยเพิ่มปริมาณซีเมนต์เจล ทำให้ช่องว่างที่อยู่ในโพรงคอนกรีตลดลงอีกระดับหนึ่ง เมื่อทดสอบที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตา และมีปูนซีเมนต์ช่วยเร่งกำลังอัด (คอนกรีต 0.3CB10) ให้กำลังอัดสูงเพียงพอต่อการนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาล ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 โดยใช้

ปูนซีเมนต์เพียง 55 กก/ม³ ยิ่งไปกว่านั้นที่อายุ 60 และ 90 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 47.1 และ 51.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชรินทร์ นมรัช [8] ซึ่งใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้รับการบดจากมีปริมาณน้ำหนักร้อยละ 10 ตามมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 14.85 ผสมกับเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 450 กก/ม³ มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 พบว่าคอนกรีตสามารถให้กำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 30.7 เมกะปาสคาลนอกจากนี้

สุทธินันท์ แอเดียว [19] นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ผสมร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วน 40:60 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานและใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังอัดในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพียง 90 กก/ม³) ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 28.0 เมกะปาสคาลที่อายุ 180 วัน

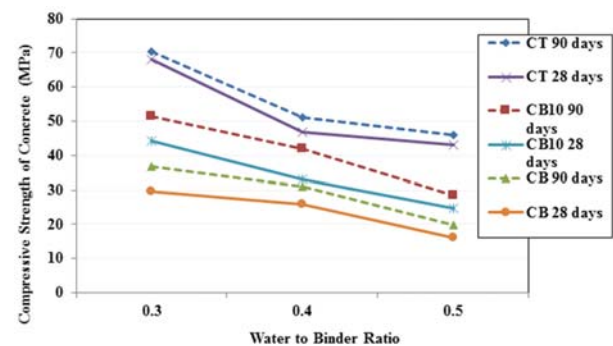
การวิจัยครั้งนี้ ได้เพิ่มส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 เพื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน พบว่าคอนกรีตควบคุม (0.7CT) ที่อายุ 28 วันมีกำลังอัด 29.3 เมกะปาสคาล โดยใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 300 กก/ม³ ซึ่งมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต 0.3CB ที่มีกำลังอัด 29.7 เมกะปาสคาลที่อายุเดียวกันที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเพิ่มปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

(ปูนซีเมนต์ 45กก/ม³) ส่งผลให้คอนกรีต 0.4CB10 มีกำลังอัดสูงขึ้นเป็น 32.9 เมกะปาสคาลโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และในโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดที่สูงกว่า 45 เมกะปาสคาล โดยทั่วไปจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมประมาณ 375 กก/ม³ จากการศึกษาวิจัยนี้ คอนกรีตควบคุม 0.5CT ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 มีกำลังอัดเท่ากับ 43.0 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน แต่เมื่อพิจารณาถึงคอนกรีต 0.3CB10 ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ 55 กก/ม³) มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 สามารถให้กำลังอัดเท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน

ที่อายุ 90 วัน คอนกรีตควบคุม 0.7CT ให้กำลังอัดเท่ากับ 30.6 เมกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีต 0.4CB10

ซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ 45 กก/ม³ ยังคงพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 41.9 เมกะปาสคาล ขณะที่คอนกรีต 0.4CT ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ 450 กก/ม³ ให้กำลังอัดเท่ากับ 51.2 เมกะปาสคาลใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีต 0.3CB10 ที่มีกำลังอัดเท่ากับ 51.4 เมกะปาสคาล โดยใช้ปูนซีเมนต์เพียง 55 กก/ม³ ซึ่งสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้สูงถึง 395 กก/ม³ และให้กำลังอัดที่สูงกว่าเล็กน้อยในขณะเดียวกัน

อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งพบว่าในทุกๆ ส่วนผสม กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กล่าวคือเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของอายุคอนกรีตทำให้กำลังอัดสูงขึ้นแต่ยังคงมีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเช่นเดิม แสดงดังรูปที่ 3 แม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต แต่ก็ยังคงแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับงานวิจัยของมณเฑียร ธิฆวนิช [20] อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำทำให้มีกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงเนื่องจากมีความตึงน้ำที่สูงกว่า



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ความสำคัญของงานวิจัยนี้ คือ สมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งสองชนิด ความละเอียดสูงและสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัดไม่น้อยไปกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อีกทั้งวัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ในปริมาณที่สูง ก่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น ช่วยลดความพรุนในเนื้อคอนกรีต และส่งผลดีในส่วนความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต [21,22]

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าก้นเตาเพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้วัสดุประสานมีความละเอียดสูงซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้มีปริมาณค่าตั้งแต่วัสดุมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าก้นเตาเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก

5.2 คอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด มีกำลังอัดของคอนกรีตที่แปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

5.3 คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 สามารถให้กำลังอัด 29.7 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 33.2 และ 36.8 เมกะปาสคาล ที่อายุ 60 และ 90 วันตามลำดับ โดยไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

5.4 การใช้ปูนซีเมนต์เพียง 55, 45 และ 38 กก/ม³ สามารถพัฒนาคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานให้มีกำลังอัดสูงถึง 44.3, 32.9 และ 24.6 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และกำลังอัดสูงขึ้นไปเป็น 51.4, 41.9 และ 28.4 เมกะปาสคาลที่อายุ 90 วันตามลำดับ

5.5 การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้อย่างมาก ในขณะที่มีกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงได้เช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT-FTERO 5901) และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่สนับสนุนทุนการศึกษาวิจัยภายใต้โครงการทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจ จังหวัดชายแดนภาคใต้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2558, รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี 2559, หน้า 139-147.
- [2] ศราวุธ เริงฤทธิ์, 2544, ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 123 หน้า.
- [3] พงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์, ไชยพันธ์ รัตนโชตินันท์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าขาน้อยเป็นวัสดุประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม, หน้า MAT 183.
- [4] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Properties of Cement Made by Partially Replacing Cement Raw Materials with Municipal Solid Waste Ashes and Calcium Carbide Waste”, *Construction and Building Materials*, Vol. 18, pp. 579, 2004.
- [5] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 1-5, 2015
- [6] อธิพงศ์ อารยวงศ์วาท และวีระ หอสกุลไท, 2550, “ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต,” *วารสารวิจัย มข.*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, หน้า 46-51.
- [7] K. Amnadhua, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakul, “Strength, Water Permeability and Heat Evolution of High Strength Concrete Made from the Mixture of Calcium Carbide Residue and Fly Ash”, *Materials and Design*, Vol. 51, pp. 894-901, 2013.
- [8] ชรินทร์ นมรักษ์, วันชัย สะตะ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2544, “ผลกระทบของวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม, หน้า MAT 178-183.

- [9] ปิติศานต์ กร้ามาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวิมล เกฬาสิตาร, 2539, “การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน”, **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 65-75.
- [10] อรรถเดช อับดุลมาดิน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2558, “ผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน,” **วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย**, ฉบับที่ 3, หน้า 31-41.
- [11] กรกฎ วิจิตรพงศ์, 2530, **การใช้เถ้าลอยแม่เมาะในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [12] ธนพล เหล่าสมาธิกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน”, **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4**, 20-22 ตุลาคม, ณ โรงแรมลายทองอุบลราชธานี, หน้า MAT 88-95.
- [13] C. Jaturapitakkul, and B. Roongreung, “Cementing Material from Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No.5, pp. 470-475, 2003.
- [14] American Society for Testing and Materials, “ASTM C494: Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete,” *ASTM International*, West Conshohocken, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 1-10, 2015.
- [15] สุธี ลิ้มปณชัยพรกุล, บุษกร ออมวิทย์ และธีระพงษ์ วงษ์เรือง, 2537, **การศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์**, วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 147 หน้า.
- [16] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “Influence of Pozzolan from Various by-Product Materials on Mechanical Properties of High Strength Concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1589-1598, 2007.
- [17] F. Sybertz, and U. Wiens, “Effect of Fly Ash Fineness on Hydration Characteristics and Strength Development,” *Blended Cement in Construction*, Vol. 1, pp. 152-165, 1991.
- [18] เสกสรรค์ ชูทับทิม, 2541, **การศึกษาศักยภาพของเถ้าถ่านหินหยาบบดละเอียดเป็นวัสดุปอชโซลาน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 132 หน้า.
- [19] สุทธินันท์ แอเดียว, 2553, **การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินและผสมเถ้าปล้นน้ำมันเป็นวัสดุประสาน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 174 หน้า.
- [20] มณฑิยา ธิฆวานิช, 2549, **ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อคอนกรีตที่แช่ในสภาพแวดล้อมทางทะเล**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 138 หน้า.
- [21] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, “Packing Effect and Pozzolan Reaction of Fly Ash in Mortar”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1145-1151, 2005.
- [22] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, “Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis”, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 1242-1249, 2010.