การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต
Utilization of Original Calcium Carbide Residue in Concrete Work

ณัฐกร แนบทอง และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
NuttaKorn Nabtong and Wichian Chalee*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมกับเถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรง ที่มีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และใช้ส่วนผสมแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อ เถ้าถ่านหิน ต่อ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 60:30:10, 60:20:20, 60:10:30, 50:40:10, 50:30:20, 50:20:30, 40:50:10, 40:40:20, 40:30:30 และ 0:0:100 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดคอนกรีตหลังบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 90 วัน ตลอดจนหาความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันลดลง โดยคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำสุด (ในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์) อย่างไรก็ตาม การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตมากขึ้น มีผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 ถึง 90 วันสูงขึ้น และสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตอัตราส่วน 40:30:30 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 224 กก./ซม.^{2} (ร้อยละ 51 ของคอนกรีตควบคุม) และพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องเป็น 262 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 90 วัน (ร้อยละ 52 ของคอนกรีตควบคุม) นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน กำลังอัด ความหนาแน่นคอนกรีต

***Corresponding author.** E-mail: wichian@buu.ac.th

Abstract

This research aimed to utilize original calcium carbide residue, fly ash and Portland cement type I as a cementitious material in concrete. The original calcium carbide residue from industries with the particles passed a sieve No.8 were used. The ratio of 60:30:10, 60:20:20, 60:10:30, 50:40:10, 50:30:20, 50:20:30, 40:50:10, 40:40:20, 40:30:30 and 0:0:100 by weight of calcium carbide residue : Mae Moh fly ash : Portland cement type I were used as a binder to cast concrete. The water to binder (W/B) ratio was kept constant at 0.45 and the slump of fresh concrete was also controlled between 50 to 100 mm by varying the amount of superplasticizer. The cylindrical concrete specimen of 100-mm diameter and 200-mm height were cast and tested for compressive strength after 7, 14, 28 and 90 days of water curing. In addition, the density of concrete was determined at the age of 28 days. The results show that the compressive strength at 28 days decreases as the amount of calcium carbide residue replacement increases, and the lowest compressive strength was founded in concrete containing calcium carbide residue of 60% by weight of binder (for each cement content). However, during 28 to 90-day, the increase of calcium carbide residue replacement level resulted in the increase of strength development of calcium carbide residue concrete, which was higher than that of Portland cement type I concrete. The study found that the maximum compressive strength at 28 days was 224 ksc (normalized compressive strength of 51%) and developed to be 262 ksc at 90 days (normalized compressive strength of 52%) for the mixture of 40:30:30. Also, the density of all concrete containing calcium carbide residue was lower than that of Portland cement type I concrete.

Keywords : calcium carbide residue, fly ash, compressive strength, density of concrete

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีด้านวัสดุก่อสร้างเพื่อผลิตวัสดุใหม่ที่มีสมบัติทดแทนวัสดุเดิมที่มีการใช้งานอยู่แล้ว ถือเป็นสิ่งจำเป็นในสภาวะปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษมากขึ้น ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่ง เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านราคาการผลิตที่ไม่ยุ่งยากและสามารถควบคุมสมบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตามการใช้คอนกรีตอาจมีข้อจำกัดที่ตามมาทั้งทางด้านสมบัติพิเศษที่ต้องการมากขึ้น หรือกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม โดยกระบวนการผลิตซีเมนต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ได้ ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านวัสดุก่อสร้างที่ผ่านมาจึงได้คิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง โดยการใช้กากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งก็ได้ผลดีทั้งทางด้านการเพิ่มสมบัติบางอย่างให้คอนกรีตดีขึ้น และลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ดังกล่าว เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554; Chalee *et al*., 2007 ; Thomas *et al*., 2004 ; Chalee *et al*., 2009) พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมให้ผลดีทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทน อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วนเท่านั้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินไม่มีสมบัติเชื่อมประสานได้ด้วยตัวเอง และถ้าใช้ในปริมาณสูงจะมีผลเสียต่อสมบัติเชิงกลในระยะต้น (Gengying, 2004 ; Siddique, 2003) ดังนั้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงต้องอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้ได้สารประกอบที่ให้ความแข็งแรงและได้ด่างเพื่อไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับเถ้าถ่านหินต่อไป การศึกษาที่ผ่านมา (ปิติศานต์ กร้ำมาตร, 2539) พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นกากจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่ประกอบด้วยด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับวัสดุปอซโซลานได้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเคมีในการผลิตก๊าซอเซทิลีน โดยการใช้แคลเซียมคาร์ไบด์ทำปฏิกิริยากับน้ำตามสมการที่ (1)

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2 \qquad (1)$$

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ตามสมการที่ (1) อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) การผลิตก๊าซอเซทิลีน 1 ส่วนจะได้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 1.16 ส่วน (Jaturapitakkul & Roongreung, 2003) ปัจจุบันพบว่า ความต้องการใช้ก๊าซอะเซทิลีนของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยแต่ละปีทางโรงงานที่ทำการสำรวจต้องทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงถึงปีละประมาณ 12,000 ตัน (Makaratat *et al*., 2009) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณข้างเคียง งานวิจัยที่ผ่านมา (Krammart *et al*., 2004 ; Roongreung, 2003) ได้ปรับปรุงสมบัติของกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยการบด เพื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูง สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้มากขึ้นหรือเกือบแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด ตลอดจนส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม การบดกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ตลอดจนยังไม่มีเครื่องบดในเชิงพาณิชย์เพื่อใช้งาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นที่การพัฒนาส่วนผสมของคอนกรีตโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบด โดยพิจารณากำลังอัดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงมาก แต่สามารถใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดให้ละเอียด ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น ตลอดจนมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และการใช้การงานได้เชิงวิศวกรรมต่อไป

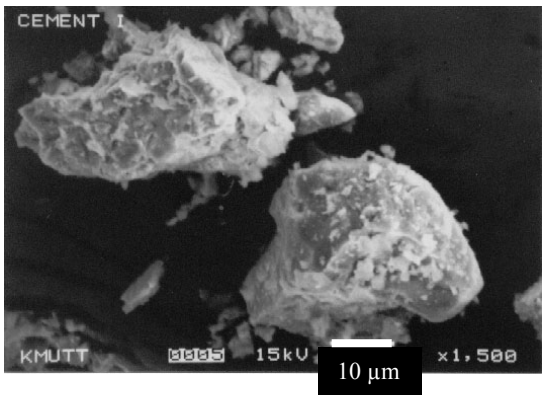
วัสดุและอุปกรณ์การวิจัย

วัสดุประสาน

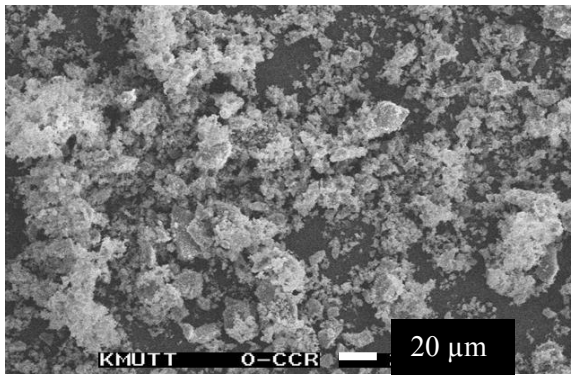
การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังภาพที่ 1(ก) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ เป็นก้อนรูปทรงไม่แน่นอน ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์

ค) เถ้าถ่านหิน

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (C)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	3.51	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	2.42	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	0.31	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.71	52.71	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	0.52	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.12	0	0.69
Potassium Oxide, K_2O	0.24	0	1.69
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	0.22	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	40.1	0.07

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe2O3) รวมกันได้ร้อยละ 96.3 (ตารางที่ 1)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงมีความชื้นอยู่มาก ลักษณะเหมือนดินเหนียวสีเทาเข้มสามารถปั้นเป็นก้อนได้ เมื่อนำไปตากแดดให้แห้งได้เป็นสีเทาอ่อน ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถพิจารณาได้จากปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ที่ทดสอบด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 22 ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุด้วยกล้อง SEM ดังภาพที่ 1(ข) พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ ความถ่วงจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 2.32 ซึ่งใกล้เคียงกับความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน สำหรับสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ดังตารางที่ 1 พบว่ามี CaO สูงถึงร้อยละ 52.71 และมี LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 40.1 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ LOI มีค่าสูงประมาณ 950 องศาเซลเซียส และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีองค์ประกอบ $Ca(OH)_2$ เป็นส่วนใหญ่ทำให้สามารถสลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป (Jaturapitakkul & Roongreung, 2003)

เถ้าถ่านหิน

การศึกษานี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน (ภาพที่ 1(ค)) พบว่า เถ้าถ่านหินมีลักษณะกลมและมีขนาดคละกัน ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ตลอดจนขนาดที่คละกันสามารถอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นด้วย (Chalee *et al*., 2010) สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

มวลรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.72 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.55 และ 1.12 ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 2 ซึ่งได้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานของ ACI 211.1-91 เป็นส่วนผสมควบคุม และกำหนดใช้อัตราส่วนวัสดุประสานคือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) ต่อ เถ้าถ่านหิน (F) ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) เท่ากับ 60:30:10, 60:20:20, 60:10:30, 50:40:10, 50:30:20, 50:20:30, 40:50:10, 40:40:20 และ 40:30:30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.45 ทำการควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มในน้ำประปา และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (แต่ละส่วนผสมเฉลี่ยจากตัวอย่างคอนกรีต 3 ก้อน) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 ที่อายุ 7, 14, 28, และ 90 วัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (เฉลี่ยจากตัวอย่างคอนกรีต 3 ก้อน) ที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อายุบ่มในน้ำ 7, 14, 28 และ 90 วัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามภาพที่ 2(ก), 2(ข) และ 2(ค) ตามลำดับ พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ทุกอายุทดสอบ โดยคอนกรีต CR:F:C 40:30:30 มีกำลังอัดสูงสุดในกลุ่มที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยคิดเป็นร้อยละ 38, 43, 51 และ 52 ของกำลังอัด

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

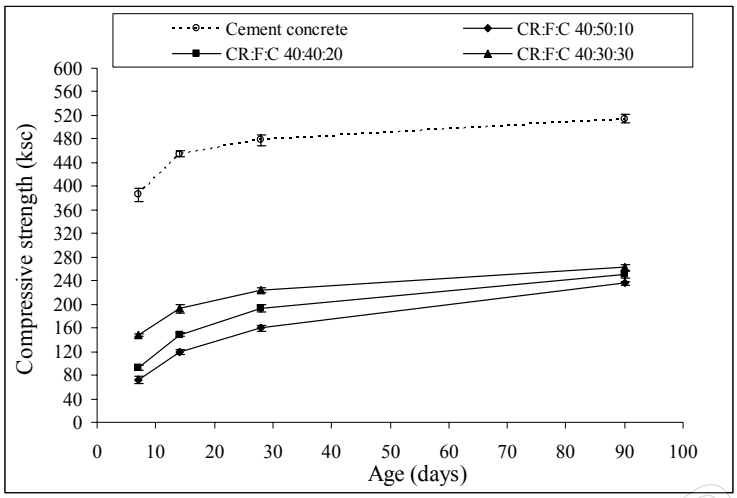
ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม (กก./ม^3)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ
CR:F:C 60:30:10	45	270	135	830	1050	194	8.5
CR:F:C 60:20:20	90	270	90	840	1050	194	7.0
CR:F:C 60:10:30	135	270	45	860	1050	194	7.0
CR:F:C 50:40:10	45	225	180	780	1050	194	4.0
CR:F:C 50:30:20	90	225	135	790	1050	194	5.0
CR:F:C 50:20:30	135	225	90	810	1050	194	6.0
CR:F:C 40:50:10	45	180	225	740	1050	194	4.0
CR:F:C 40:40:20	90	180	180	750	1050	194	4.0
CR:F:C 40:30:30	135	180	135	760	1050	194	4.0
Cement concrete	450	0	0	650	1050	194	2.0

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต

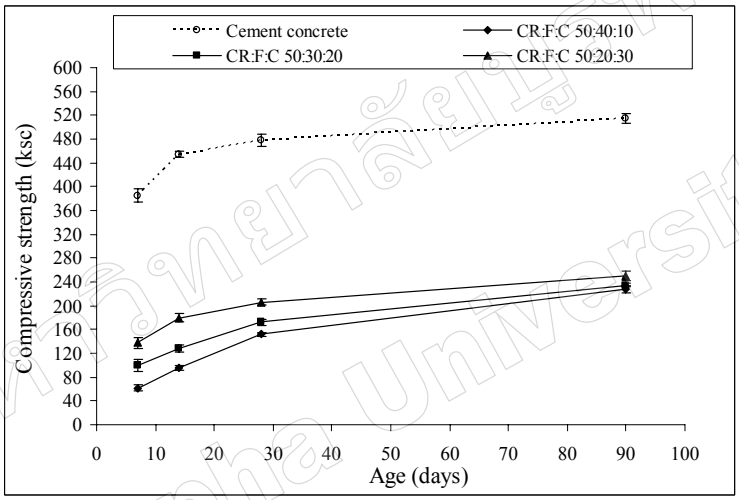
Mix	Compressive Strength (ksc) - *Normalized Compressive Strength* (%)				90-day/28-day strength (%)	Density (kg/m^3) - *Normalized Density* (%)
	7-day	14-day	28-day	90-day		
CR:F:C 60:30:10	69-*18*	90-*20*	133-*27*	224-*44*	168.4	2400-**96**
CR:F:C 60:20:20	95-*25*	111-*24*	142-*30*	199-*39*	140.1	2380-**95**
CR:F:C 60:10:30	113-*29*	133-*29*	149-*31*	196-*38*	131.5	2427-**97**
CR:F:C 50:40:10	61-*16*	96-*21*	152-*32*	222-*43*	150.0	2360-**94**
CR:F:C 50:30:20	99-*26*	129-*28*	173-*36*	235-*45*	135.8	2320-**93**
CR:F:C 50:20:30	137-*36*	179-*39*	206-*43*	251-*49*	121.8	2360-**94**
CR:F:C 40:50:10	70-*18*	120-*26*	160-*33*	236-*46*	147.5	2340-**93**
CR:F:C 40:40:20	93-*24*	149-*33*	192-*40*	250-*49*	130.2	2320-**93**
CR:F:C 40:30:30	147-*38*	193-*43*	224-*51*	262-*52*	117.0	2393-**95**
Cement concrete	385-*100*	454-*100*	478-*100*	500-*100*	107.5	2506-**100**

หมายเหตุ กำลังอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบ 3 ก้อน

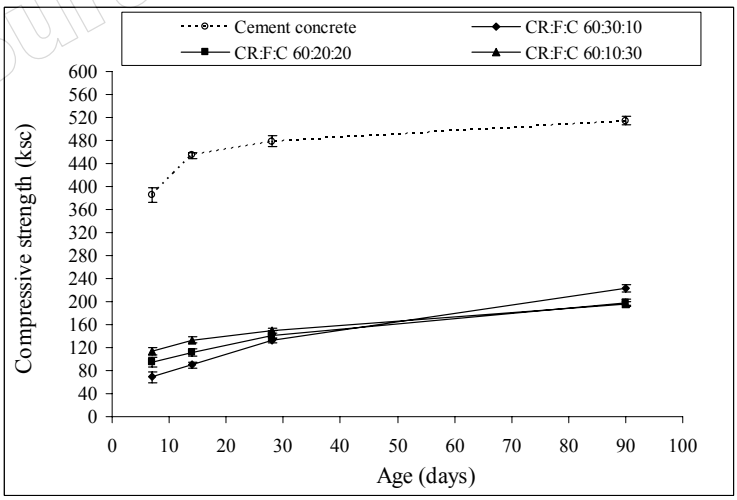
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



(ก) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40



(ข) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50



(ค) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 60

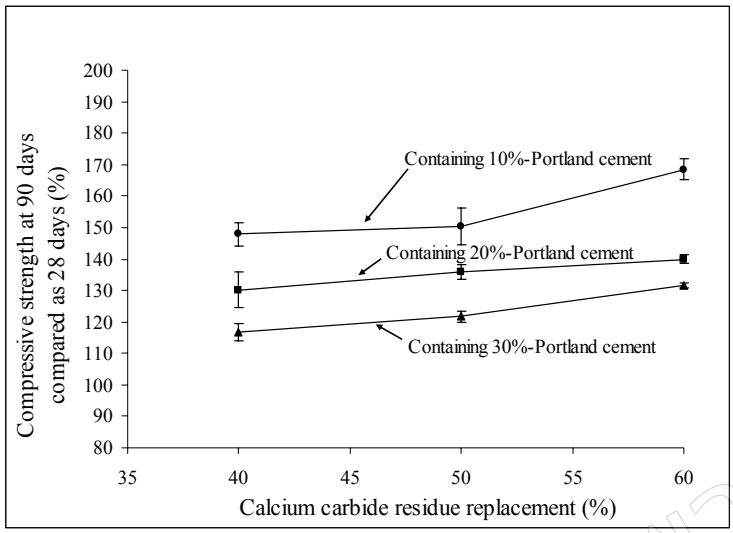
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

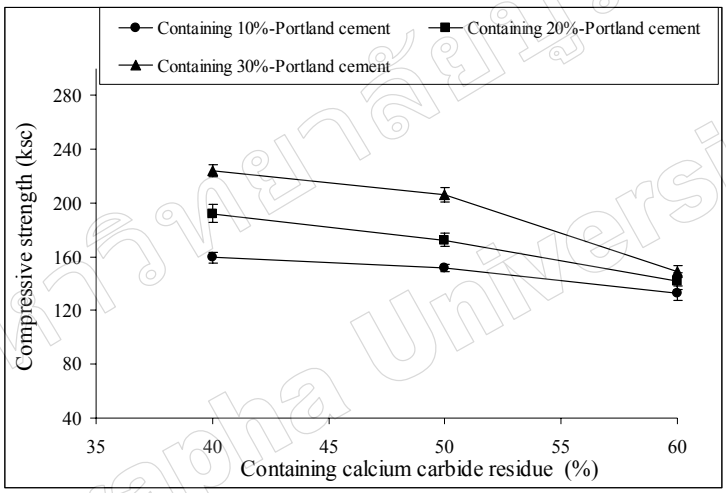
คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงสุดเพียงร้อยละ 52 ของคอนกรีตควบคุมเท่านั้น อาจเป็นผลจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้มีอนุภาคที่หยาบเพราะไม่ได้ผ่านการปรับปรุงขนาดอนุภาคโดยการบดให้ละเอียด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ (Kiattikomol *et al*., 2001 ; Roongreung, 2003) กลไกการให้กำลังของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากปฏิกิริยาสองส่วน ได้แก่ ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจาก ซิลิกา (SiO_2) กับ อลูมินา (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าถ่านหิน เข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อยู่ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่เป็นสารที่ให้ความแข็งแรงกับคอนกรีต ส่วนที่สองเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ให้กำลังกับคอนกรีตโดยตรง และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหิน และเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้อีกด้วย (Makaratat *et al*., 2009 ; Roongreung, 2003) ดังนั้นกากแคลเซียมคาร์ไบด์น่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ที่มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาค่อนข้างสูง ตลอดจนมีอนุภาคที่กลมตัน มีขนาดคละที่ดีที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีอยู่แล้ว ตลอดจนมีผลการศึกษายืนยันได้ว่า เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องบดละเอียด (Chalee *et al*., 2010) นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 28 วันแรก หลังจากนั้น กำลังอัดมีการพัฒนาในอัตราที่ลดลง กำลังอัดที่เพิ่มในช่วงต้นอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลักคือ C_3A และ C_3S ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้เกิดการก่อตัวช่วงต้นของคอนกรีต ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น (Neville, 1996) ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นประกอบกับอนุภาคที่หยาบของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ (Kiattikomol *et al*., 2001 ; Roongreung, 2003) โดยผลการศึกษาพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตในช่วง 28 วันสูงขึ้น เช่น คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 (ภาพที่ 2(ข)) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 152, 173 และ 206 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 90 วัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณต่างกัน ให้กำลังอัดที่อายุ 90 วัน ใกล้เคียงกัน และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งกลุ่มที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในภาพที่ 2(ก), 2(ข) และ 2(ค) ตามลำดับ นั่นแสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดคอนกรีตน้อยลงเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจาก กำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในช่วงหลังเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง ซิลิกา หรืออลูมินาที่มีในเถ้าถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ หรือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้

พิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน ดังภาพที่ 3 พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เทียบกับ 28 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้น แสดงถึงปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 ถึง 90 วันมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในช่วง 28 ถึง 90 วัน เช่น คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน เท่ากับ 147.5, 150.0 และ 168.4 ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่า ที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วันเมื่อเทียบกับ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมกากแคลซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เทียบกับอายุ 28 วันเท่ากับ 147.5, 130.2 และ 117.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 ถึง 90 วัน น้อยกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์

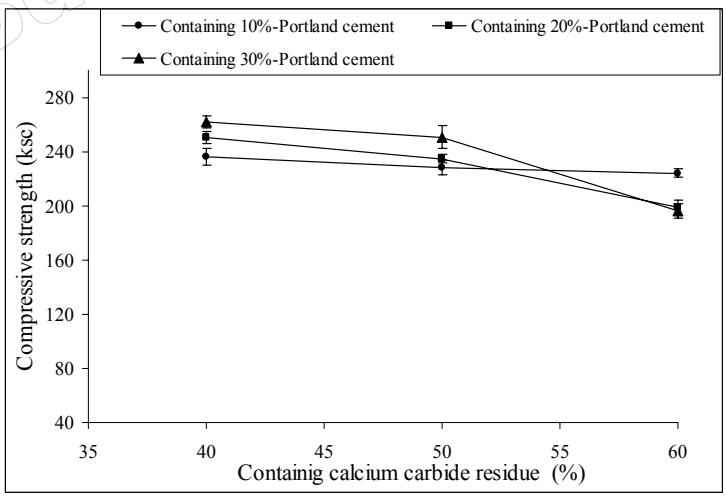
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 3 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วันเทียบกับอายุ 28 วัน



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 90 วัน

ภาพที่ 4 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ก) 28 วัน และ ข) 90 วัน

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

พิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง โดยมีผลเหมือนกันทั้งสองอายุทดสอบ เช่น คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 160, 152, 148 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่า คอนกรีตกลุ่มดังกล่าวมีกำลังอัดใกล้เคียงกันมากขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 236, 222, และ 224 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์มากขึ้นมีผลให้กำลังอัดต่ำลงโดยเฉพาะที่อายุต้นๆ เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นน้อย และไม่มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น (Makaratat *et al*., 2009) รวมทั้งการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสัดส่วนมากขึ้นทำให้ปริมาณของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณสูงขึ้น (เถ้าถ่านหินปริมาณน้อยลง) มีกำลังอัดต่ำลงดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งอาจเป็นเพราะกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีอนุภาคที่หยาบจึงทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนที่อายุ 90 วัน ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาจากเถ้าถ่านหิน เริ่มมีอิทธิพลต่อการเพิ่มกำลังอัดในระยะยาวตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังน่าจะเกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นหลัก

ถึงแม้ว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงจะมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 ถึง 90 วัน ที่แสดงในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เทียบกับ 28 วัน (ดังภาพที่ 3) มีแนวโน้มสูงขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตส่งผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว โดยเฉพาะในช่วงหลังจาก 90 วัน เป็นต้นไป ดังนั้นถ้ามีการใช้งานจริงของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ควรให้การรับแรงเชิงกลในช่วงต้นต่ำลง เพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีต

ความหนาแน่นของคอนกรีต

พิจารณาความหนาแน่นของคอนกรีตตามตารางที่ 3 พบว่าคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นเพราะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงร้อยละ 93 ถึง 97 ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ความหนาแน่นคอนกรีตที่ต่ำลง จะเป็นผลดีในการใช้งาน เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างลงได้

การประยุกต์ใช้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงในงานก่อสร้าง

จากผลการศึกษาสมบัติด้านการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ได้จากโรงงานโดยตรงและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ แต่ต้องคำนึงถึงลักษณะของงานที่เหมาะสมตามกำลังอัดที่มีผลทดสอบยืนยัน ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เสนอแนะส่วนผสมที่เหมาะสม ตามลักษณะของงานโดยใช้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 4 ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสมที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่า 100 กก/ซม^2 ควรใช้ในงานก่อสร้างอิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก (มอก. 77-2517) เพื่อใช้ในงานผนังและงานทั่วไปที่ใช้กำลังอัดคอนกรีตต่ำ

2. คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในช่วง 100 ถึง 200 กก./ซม^2 ควรใช้ในงานก่อสร้าง อิฐบล็อกชนิดรับน้ำหนัก (มอก. 57-2530) เพื่อใช้ในงานคอนกรีตบล็อกปูพื้น และงานผนังชนิดรับน้ำหนัก

3. คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 200 กก/ซม^2 สามารถนำไปใช้ในงานโครงสร้างที่พักอาศัยขนาดเล็กและงานปูพื้นคอนกรีตทั่วไปได้

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมเถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสองทำให้

Burapha University

ตารางที่ 4 แนะนำส่วนผสมที่เหมาะสำหรับงานต่างๆ

ประเภทงาน / ส่วนผสมที่แนะนำ	คอนกรีตบล็อกชนิดรับแรง, คอนกรีตบล็อกปูพื้น (กำลังอัดที่ 28 วัน ช่วง 100 ถึง200 กก/ซม^2)	ที่พักอาศัยชั้นเดียวขนาดเล็กงานปูพื้นทั่วไป (กำลังอัดที่ 28 วัน มากกว่า 200 กก/ซม^2)
CR:F:C 60:30:10	✓	-
CR:F:C 60:20:20	✓	-
CR:F:C 60:10:30	✓	-
CR:F:C 50:40:10	✓	-
CR:F:C 50:30:20	✓	-
CR:F:C 50:20:30	-	✓
CR:F:C 40:50:10	✓	-
CR:F:C 40:40:20	✓	-
CR:F:C 40:30:30	-	✓

เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้ความแข็งแรงเชิงกลกับคอนกรีต และสามารถใช้กับงานที่ไม่ต้องการกำลังของคอนกรีตในระยะแรกสูง เป็นการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และเป็นการสนับสนุนในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้เป็นประโยชน์มากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอิทธิพลต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วงต้น โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากขึ้น มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วง 28 วัน สูงขึ้น ส่วนที่อายุ 90 วันปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

2. การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณสูงขึ้น ทำให้กำลังอัดคอนกรีตในระยะต้นลดลง แต่มีผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 90 วันเทียบกับอายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวที่ดีขึ้น

3. การศึกษาครั้งนี้ พบว่า คอนกรีต CR:F:C 40:30:30 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 224 กก./ซม.^{2} โดยคิดเป็นร้อยละ 51 ของคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และสามารถพัฒนาเป็นคอนกรีตโครงสร้างได้

4. คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5. คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของงานก่อสร้าง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2555

เอกสารอ้างอิง

ปิติศานต์ กร้ำมาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวิมล เงาพิสดาร. (2539). *การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 7*(2), 65-75.

วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 16*(2), 51-56.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2530). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. มอก. 57-2530*, 1-17.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2517). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้าง. มอก. 77-2517*, 1-15.

ACI 211.1-91.(1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. *ACI Commitee Report*, 1-38

ASTM C150. (1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.

ASTM C430. (1997). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.

ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

ASTM C39.(1997). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02*.

Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. & Jaturapitakkul, C., (2007). Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *Construction and Building Materials, 21*, 965-71.

Chalee, W., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt P., (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures, 22*, 341-353.

Chalee, W., Ausapanit, P. & Jaturapitakkul, C., (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design, 31*, 1242-1249.

Gengying, Li., (2004). Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO_2. *Cement and Concrete Research, 33*, 425-31.

Jaturapitakkul, C. & Roongreung, B., (2003). Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. *Journal of materials in Civil Engineering, 15*, 470-475.

Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. & Shutubtim, S., (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites, 23*, 335-343.

Krammart, P. & Tangtermsirikul, S., (2004). Properties of cement made by parlially replacing cement law materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste. *Construction and Building Materials, 18*, 579-583.

Makaratat, N., Laosamathikul, T. & Jaturapitakkul, C., (2009). Utilization of calcium carbide residue –fly ash mixture as a cementing material in concrete. *The 33rd Internaltional Association for Bridge and Structural Engineering, 96*, 144-149.

Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete, 4th ed.*, England, Addison Wesley

Siddique, R., (2003). Performance Characteristics of High-Volumn Class F Fly Ash Concrete. *Cement and Concrete Research, 33*, 539–547.

Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D., (2004). Performance of pfa Concrete in a Marine Environment-10-year Results. *Cement and Concrete Composites, 26*, 5-20.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University