สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

(Effect of calcium carbide residue finenesses on mechanical properties of concrete)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

#0156997
- 6 มิ.ย. 2556
321167

เริ่มบริการ
- 2 ส.ค. 2556

กันยายน พ.ศ. 2555

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง "ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต" จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 มีงบประมาณทั้งโครงการ 356,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	356,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหิน (FA) ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตโดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงไปบดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 12-15, 15-18, และ 18-20 โดยน้ำหนัก กลุ่มแรกผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ 2 ใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40 โดยน้ำหนัก ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ทำการทดสอบกำลังอัด, ความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซึมน้ำในคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 7, 28, 60 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัด ที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน

นอกจากนั้นได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมกับเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 โดยน้ำหนักวัสดุประสานใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ ทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตหลังบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 90 วัน ตลอดจนหาความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดัด และกำลังดึงมากขึ้น ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนั้นพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมในคอนกรีตร้อยละ 20 ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ สำหรับกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยตรงจากโรงงานผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น 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/ความหนาแน่น/การดูดซึมน้ำ/กำลังดัด/กำลังดึง

Abstract

This research aimed to utilize fly ash (FA) and calcium carbide residue (CCR) mixtures as a cementitious material in concrete. The CCR from industries was ground until the particles retained on a sieve No.325 of 12%-15%, 15%-18% and 18%-20% by weight. The first group, a ratio of 50:50 by weight of CCR and Mae Moh fly ash were used as a binder to cast concrete, without Portland cement. Second group, a ratio of 20:40:40 by weight of Portland cement type I, CCR and Mae Moh fly ash were also used as a binder in concrete. The W/B ratio of concrete was kept constant of 0.45. Compressive strength, water absorption and density of concrete were investigated at 7, 28 and 60 days of water curing. In addition, splitting tensile and flexural strengths were investigated at 28 days of water curing.

In addition, the original calcium carbide residue, fly ash and Portland cement type I were also used 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 compressive strength of concrete was tested 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 showed that the compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and density of concrete increased with the increase in CCR finenesses, while water absorption of concretes founded to be decreased. In addition, the use Portland cement type I in concrete of 20% by weight of binder produce higher compressive strength than that concrete without Portland cement. For original CCR, 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.

Keyword; Calcium carbide residue/Fly ash/ Compressive strength/ Density/ Water absorption/ Flexural strength/ Tensile strength

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่แช่ตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตให้เป็นรูปธรรมมากขึ้น ตลอดจนช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ และส่งเสริมการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานคอนกรีต

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์	4
2.2 เถ้าถ่านหิน	6
2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน	10
2.4 วัสดุปอซโซลาน	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	**14**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	14
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	16
3.3 วิธีการศึกษา	19

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล **27**

4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 27

4.2 ผลของความละเอียดต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 30

4.3 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต 43

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ **52**

5.1 สรุปผล 52

5.2 ข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง **54**

ภาคผนวก ก **56**

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ 9
3.1 ส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ศึกษาผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีต 21
3.2 ส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในคอนกรีต 22
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน 29
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต 31
4.3 ตารางแสดงค่าความหนาแน่นของคอนกรีต 42
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต 46
4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต 51

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	บ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์	5
2.2	การเปรียบเทียบลักษณะระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	8
3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	16
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.3	หล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัด	23
3.4	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	24
3.5	การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต	25
4.1	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน	30
4.2	ความสัมพันธ์ของคอนกรีตระหว่างอายุของอัตราส่วน 50:50 กับกำลังอัด	32
4.3	ความสัมพันธ์ของคอนกรีตระหว่างอายุของอัตราส่วน 20:40:40 กับกำลังอัด	34
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต	35
4.5	กำลังดัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50	36
4.6	กำลังดัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40	37
4.7	กำลังดึงผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50	38
4.8	กำลังดึงผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 20:40:40	39
4.9	ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50	40
4.10	ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 20:40:40	40
4.11	ผลของความละเอียดของอนุภาคกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อความหนาแน่นของคอนกรีต	41
4.12	ร้อยละการดูดซึมของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน	43
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์	47
4.14	ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน	48

4.15 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ก) 28 วัน และ ข) 90 วัน 50

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางวัสดุเพื่อผลิตวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทดแทนวัสดุเดิมที่มีการใช้งาน ถือเป็นสิ่งจำเป็นในสภาวะปัจจุบัน อาจเป็นผลเนื่องมาจาก วัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษอาจจะจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น ในเทคโนโลยีด้านการก่อสร้างที่ผ่านมาหรือแม้แต่ปัจจุบัน ต้องยอมรับว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก ความเหมาะสมทางด้านราคา การผลิตที่ไม่ยุ่งยากและสามารถควบคุมคุณสมบัติได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุคอนกรีตอาจมีข้อจำกัดที่ตามมาทั้งทางด้านคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการมากขึ้น หรือกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม กระบวนการผลิตซีเมนต์ทำให้เกิดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อการเกิดก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse gas) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน(Global warming) ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านวัสดุที่ผ่านมาจึงได้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง โดยการใช้วัสดุของเหลือใช้ หรือกากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งก็ได้ผลดีทั้งทางด้านการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้คอนกรีตดีขึ้น และลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ดังกล่าว เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมให้ผลที่ดีทั้งคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติด้านความคงทน อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตดังกล่าวสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วนเท่านั้นเนื่องจากเถ้าถ่านหินไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานได้ด้วยตัวเอง และถ้าใช้ในปริมาณสูงจะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลในระยะแรก ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงต้องอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้ได้สารประกอบที่ให้ความแข็งแรงและได้ด่างเพื่อไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับเถ้าถ่านหินต่อไป จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CaC_2) เป็นกากจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่ประกอบด้วยด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกกับวัสดุปอซโซลานได้โดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเคมีในการผลิตก๊าซอเซทิลีน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) การผลิตก๊าซอเซทิลีน 1 ส่วนจะได้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 1.16 ส่วน คือกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งก๊าซ

อะเซทิลีนนี้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเชื่อม การตัดโลหะ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ติดไฟ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น ในปัจจุบันพบว่าความต้องการใช้ก๊าซอะเซทิลีนของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปีทางโรงงานที่ทำการสำรวจต้องทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงถึงปีละประมาณ 12,000 ตัน ส่วนใหญ่นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปถมที่ บางส่วนก็นำไปทิ้ง หรือกองไว้เป็นบริเวณกว้างจึงส่งกลิ่นไปทั่วบริเวณ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณข้างเคียง นอกจากนี้ความเป็นด่างที่สูงมากของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ดินในบริเวณพื้นที่ทิ้งมีความเป็นด่างสูงจึงไม่สามารถใช้เป็นพื้นที่ทำการเกษตรได้ ปัจจุบันจึงเริ่มมีปัญหาในเรื่องของการกำจัดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เนื่องจากมีความเป็นด่างที่สูงมาก ทำให้การกำจัดทิ้งโดยการถมบ่อแทนดินมีปัญหาในเรื่องของดินบริเวณนั้นมีความเป็นด่างสูง และเป็นมลพิษทางกลิ่น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยการบดเพื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่มีความละเอียดสูงสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้มากขึ้น หรือเกือบแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด ตลอดจนส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น อย่างไรก็ตามการบดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ก็จะมีค่าใช้จ่ายที่ตามมา ยิ่งมีความละเอียดมากขึ้นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ซึ่งจะได้ฐานข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสม ทั้งทางด้านกำลังอัดและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ดีโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น ตลอกจนมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และการใช้การงานได้เชิงวิศวกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสม

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นส่วนผสม

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความละเอียดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหิน (FA) ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตโดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงไปบดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 12-15, 15-18, และ 18-20 โดยน้ำหนัก กลุ่มแรกผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ 2 ใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 20:40:40 โดยน้ำหนัก ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัด, ความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซึมน้ำในคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 7, 28, 60 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัด ที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน

นอกจากนั้นได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมกับเถ้าถ่านหิน 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 โดยน้ำหนักวัสดุประสานใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในกลุ่มนี้ หลังบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 90 วัน ตลอดจนหาความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) ทราบถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานและสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ ภายใต้ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม

1.4.2) ทราบถึงขนาดอนุภาคกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต

2.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

ขบวนการผลิตก๊าซอะเซทีลีน ได้จากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2)มารวมกับน้ำซึ่งปริมาณก๊าซอเซทีลีนที่ได้ จะขึ้นอยู่กับชั้นคุณภาพของแคลเซียมคาร์ไบด์ คือชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 316 จะได้ปริมาณก๊าซอเซทีลีนไม่น้อยกว่า 290 ลูกบาศก์เดซิเมตร ต่อแคลเซียมคาร์ไบด์ 1 กิโลกรัม ส่วนชั้นคุณภาพที่ 2, 3 และ 4 ควรได้ปริมาณก๊าซอะเซทีลีนไม่น้อยกว่า 270, 250 และ 220 ลูกบาศก์เดซิเมตร ตามลำดับ

ในการเตรียมก๊าซอะเซทีลีนสามารถเตรียมได้โดยใช้หินปูน ($CaCO_3$) มาเผาให้เป็นปูนขาว (Lime) ในเตาเผา โดยใช้ถ่านโค้ก (Coke) เป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$\underset{\text{Limestone}}{CaCO_3} \xrightarrow{\text{เผา}} \underset{\text{Lime}}{CaO} + \underset{\text{Carbondioxide}}{CO_2} \qquad (2.1)$$

นำปูนขาวที่ได้จากการเผาหินปูนมาผสมกับถ่านโค้ก แล้วเผาในเตาหลอมภายใต้อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส เผาจนกระทั่งปูนขาว และถ่านโค้กหลอมเป็นของเหลวเนื้อเดียวกัน ปล่อยทิ้งไว้เพื่อให้อุณหภูมิลดลง ของเหลวที่เกิดจากปูนขาวและถ่านโค้กหลอมเหลวรวมกัน คือแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว แสดงดังสมการที่ (2.2)

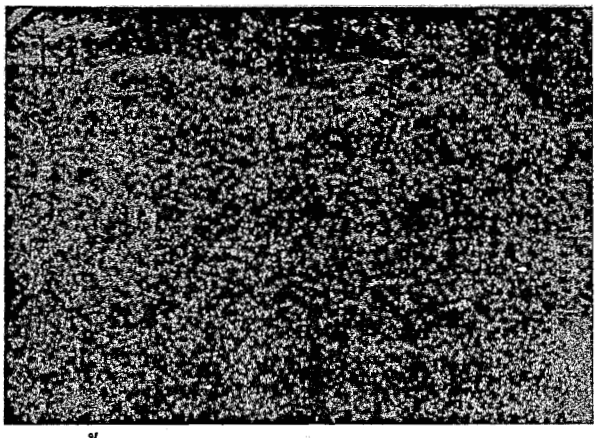
$$\underset{\text{Lime}}{CaO} + \underset{\text{Coke}}{3C} \xrightarrow{\text{เผา}} \underset{\text{Calcium Carbide}}{CaC_2} + \underset{\text{Carbonoxide}}{CO} \qquad (2.2)$$

แคลเซียมคาร์ไบด์จะเปลี่ยนสถานะอยู่ในรูปของแข็งเป็นก้อนๆ หลังจากอุณหภูมิเริ่มเย็นลง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดให้เป็นก้อนเล็กๆ แล้วร่อนผ่านตะแกรงออกมาตามขนาด ก๊าซอเซทีลีนจะได้จากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีสภาพเป็นของแข็งมาทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังสมการที่ (2.3)

$$\underset{\text{Calcium Carbide}}{CaC_2} + \underset{\text{Water}}{H_2O} \longrightarrow \underset{\text{Acetylene}}{C_2H_2} + \underset{\text{Calcium Hydroxide}}{Ca(OH)_2} \qquad (2.3)$$

กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากสมการ (2.3) พบว่า ถ้าใช้ CaC_2 64 กรัม จะได้ $Ca(OH)_2$ 74 กรัม และก๊าซอะเซทิลีนเท่ากับ 26 กรัม นั่นหมายความว่าหากใช้ CaC_2 ผลิตก๊าซอะเซทีลีน 1 ส่วนจะได้กากแคลเซียมคาร์ไบด์อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.16 ส่วน และกาก

แคลเซียมคาร์ไบด์ในรูปของเหลว เมื่อถูกปล่อยให้ตกตะกอนและแห้งไปเองตามธรรมชาติจะมีสีขาวอมเทาและจับตัวเป็นก้อนหลวมๆ ดังรูป 2.1 ปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์นับวันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทีลีนแต่พื้นที่หรือบ่อทิ้งกากเหล่านี้มีจำกัด ซึ่งปริมาณการเพิ่มของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในแต่ละปีมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยยังไม่มีวิธีการหรือมาตรการใดๆ ที่จะกำจัดหรือนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ให้เกิดประโยชน์ จะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการทิ้งกากเหล่านี้ และจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากเนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งส่งผลทำให้ดินบริเวณที่ทิ้งมีความเป็นด่างสูง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการกำจัดกากเหล่านี้เป็นอย่างมาก ปัจจุบันวิธีการกำจัดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำโดย ถมที่แทนดินซึ่งทำให้ดินบริเวณนั้นมีความเป็นด่างสูง และส่งกลิ่นไปทั่วบริเวณ โดยแสดงในรูปที่ 2.1



(ก) บ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสภาพแห้งตามธรรมชาติ

(ข) บริเวณทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ขณะที่อยู่ในสภาพแห้ง

รูปที่ 2.1 บ่อทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยทั่วไปจะมีสีเทาเข้ม เนื่องจากโดยปกติแล้วกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะมีความชื้นในตัวสูงมากทำให้มีสีเข้ม แต่เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากจนแห้งจะมีสีเทาขาว และเมื่อบดทุบจนละเอียดแล้วจะมีสีเทาขาวขึ้นอยู่กับความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ส่วนรูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคล้ายปูนซีเมนต์

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

องค์ประกอบหลักทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ซึ่งใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 51.94 ส่วนปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณร้อยละ 63.94 ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.36 และ มีน้ำหนักสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) คิดเป็นปริมาณร้อยละ 41.72 สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าเท่ากับ 12.23 (บุญมาก รุ่งเรือง, 2541)

2.2 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินได้จากการเผาถ่านหินซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรืออุตสาหกรรมอื่นที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื่อเพลิง มีลักษณะเป็นผงละเอียด ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1- 150 ไมโครเมตร มีสีเทา เทาดำ หรือสีน้ำตาล เถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นออกไซด์ของซิลิก้า และอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) โดยที่คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของ ถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าถ่านหินจึงขึ้นอยู่กับแต่ละแหล่งที่เผาถ่านหิน (ปีติศานต์ กร้ำมาตรและ คณะ, 2539)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุ และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก

ในการเผาระบบนี้ถ้าถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้เถ้าถ่านหินมีปริมาณ CaO และ $CaSO_4$ สูงได้ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้เถ้าถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นเถ้าถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มูลไลต์ และควอรตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย เถ้าถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในเถ้าถ่านหิน ทำให้เถ้าถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere)

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence ประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิก้าออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์(SO_3) เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีค่าต่างกันตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าถ่านหิน กระบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา ด้วยเหตุนี้จึงมีการแยกประเภทเถ้าถ่านหินดังมาตรฐาน ASTM C 618

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอริคออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

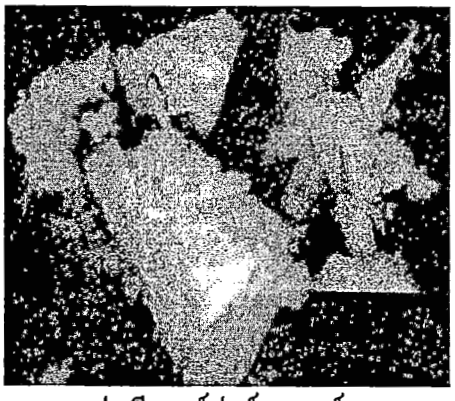
เถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้าถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

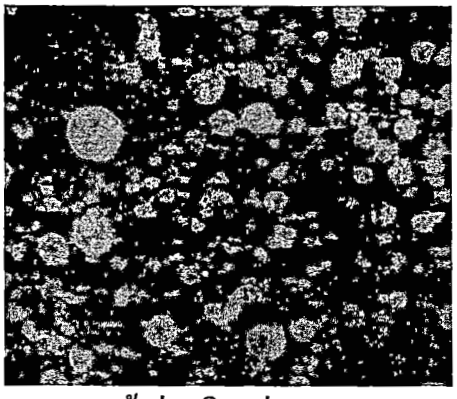
คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าถ่านหินประกอบด้วย

2.2.2.1 สี ปกติเถ้าถ่านหินจะมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือบางครั้งสีน้ำตาลตามแต่ชนิดของถ่านหิน วิธีการเผา และอุณหภูมิขณะเผา เช่น เถ้าถ่านหินที่มีสีเทาถึงเทาเข้ม อาจเพราะมีประมาณคาร์บอนอยู่มาก

2.2.2.2 รูปร่างของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีรูปร่างส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาสามารถลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะ เป็นแท่งหรือเป็นเหลี่ยมดังรูป 2.2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาเถ้าถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนจะเผาและชนิดของถ่านหิน



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ข) เถ้าถ่านหินแม่เมาะ

รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

2.2.2.3 ความละเอียด (Fineness) ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าถ่านหินจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจะใช้ทดสอบความละเอียดของเถ้าถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM C 430 – 08 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย ทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface – area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 – 11 หรือวิธี

(Particle – size analysis) หรือวิธี Brunauer – Emmett – Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่จากการทดสอบเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างนั้นการบอกขนาดของอนุภาค

2.2.3 ความถ่วงจำเพาะเถ้าถ่านหิน

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเถ้าถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด ตารางที่ 2.1 ได้เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	Retained on Sieve 325(%)	Air Permeability (cm^2/g)	Mean Particle (ไมโครเมตร)
ปูนซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	2.02	37.4	2370	28.5
เถ้าถ่านหินระยอง	2.19	37.4	3380	32.0
เถ้าถ่านหินสมุทรสาคร	2.24	18.3	5380	18.3
เถ้าถ่านหินกาญจนบุรี	2.24	18.3	5380	18.3
เถ้าถ่านหินจากต่างประเทศ	2.24	27.0	5380	27.0

จะเห็นได้ว่าเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณค้างบนตะแกรงน้อย จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า ยกเว้นเถ้าถ่านหินจากกาญจนบุรีซึ่งขัดกันอยู่ทั้งนี้จากการใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนในเนื้อเถ้าถ่านหินทำให้พื้นที่ผิวจะเพาะโดยวิธีของเบลน สูงมากทั้งที่อนุภาคหยาบ

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) ถึง (2.6) (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

$$2(3CaO.2SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.4)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.5)$$

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.6)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.ySiO_2.zH_2O \quad (2.7)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO.yAl_2O_3.zH_2O \quad (2.8)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.7) และ (2.8) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.4 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic material) ตามคำจำกัดความของมาตรฐาน ASTM C 618 หมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิก้า (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก วัสดุปอซโซลานโดยทั่วไปมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งใช้

มาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยเกิดขึ้นเองจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟและหินภูเขาไฟ เป็นต้น ส่วนประเภทที่สอง คือ วัสดุที่เป็นผลพลอยได้ (By-Produst Materials) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกวันนี้ โดยได้จากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมและการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าถ่านหิน, ซิลิกาฟูม และ เถ้าแกลบ เป็นต้น ซึ่งพบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานเหล่านี้ผสมกันปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสามารถเพิ่มศักยภาพของคอนกรีตให้สูงขึ้นได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีจะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวเนื่องจากผสมกับน้ำ มีสภาพความเป็นด่างสูง มีลักษณะเป็นสีเทาอมขาวขุ่น ภายหลังจากการผลิตก๊าซอะเซทีลีนแล้ว กากแคลเซียมคาร์ไบด์เหล่านี้จะถูกปล่อยให้ไหลลงสู่บ่อพัก เมื่อปริมาณของกากแคลเซียมมากพอก็จะทำการปั๊มเพื่อนำไปทิ้งที่ในที่ทิ้งต่อไป

โดยทั่วไปแล้วในคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน มีกลไกการให้กำลังที่สามารถรับแรงได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบ 2 ชนิด คือ Calcium Silicate Hydrate หรือที่เรียกสั้นๆว่า C-S-H และ Free Limes หรือ Calcium Hydroxide ($Ca(OH_2)$) ซึ่ง Calcium Silicate Hydrate ที่ได้มีคุณสมบัติทำให้คอนกรีตแข็งตัวและให้กำลังกับคอนกรีต ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) มีคุณสมบัติเป็นด่างที่ก่อประโยชน์น้อยมาก เช่น เป็นฟิล์มบางๆ ช่วยเคลือบผิวหน้าเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้การกัดกร่อนของเหล็กช้าลง ส่วนใหญ่แล้ว ($Ca(OH_2)$) ก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีต เช่น ทำให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้การจับยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ต้าร์ไม่ดีนักหรืออาจก่อให้เกิดปัญหากับการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตในระยะยาว แต่เมื่อใช้ ($Ca(OH_2)$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นขึ้น

จากคุณลักษณะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ วัสดุปอซโซลานและ ปฏิกิริยาปอซโซลานที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้ จึงเสนอแนวทางการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมี $Ca(OH)_2$ เป็นจำนวนมากมาผสมกับเถ้าถ่านหินซึ่งมี SiO_2 และ Al_2O_3 ทำเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์โดยอาศัยปฏิกิริยาทางปอซโซลานของเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยมุ่งเน้นไปที่ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสม ทั้งทางด้านคุณสมบัติเชิงกลและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบดกากแคลเซียมคาร์ไบด์

จากปัญหาและผลกระทบด้านสภาพแวดล้อมเนื่องจากการกองเก็บและการเหลือทิ้งของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหินที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นและพัฒนาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าถ่านหิน เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาจากวัสดุทั้งสอง เพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และยังเป็นการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้มที่เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาของปิติศานต์ กร้ำมาตร และคณะ (2539) ได้นำเสนอแนวทางการนำส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยจากการวิจัยพบว่า ส่วนอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 กับเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของมอร์ต้า ที่อายุ 90 วัน สูงถึง 209 กก./ซม^2 และยังแนะนำว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยควรมีการวิจัยเพิ่มเติม

สุภิชาติ มาตย์ภูธร และคณะ (2542) ทำการศึกษา ผลกระทบของอนุภาค อนุภาคของเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เผาและไม่เผาต่อกำลังอัดของมอร์ต้า ในการศึกษาแบ่งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกไม่เผาและส่วนที่สองแบ่งออกไปเผาที่อุณหภูมิ 200 , 400 , 600 และ 800 องศาเซลเซียส ผสมกับเถ้าถ่านหินคัดขนาด 3 ขนาด โดยใช้อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เผาที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าและระยะเวลาการก่อตัวที่น้อยกว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่เผา และมอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้ามาตรฐาน โดยให้กำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีค่าประมาณ 300 กก./ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของกำลังอัดมอร์ต้ามาตรฐานที่อายุ 90 วัน จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมาพัฒนาเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ในมอร์ต้า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นวัสดุประสานได้

ส่วนในการวิจัยในงานคอนกรีต ชรินทร์ นมรักษ์ และคณะ (2545) ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดให้มีความละเอียดสูงขึ้น ใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงสุดเท่ากับ 205 กก./ซม^2 ที่อายุ 90 วัน เมื่อใช้วัสดุประสาน 375 กก./ซม^2 และกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ซึ่งนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาในงานปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนหรืออาคารสูง เนื่องจากกำลังอัดที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินนั้นเพียงพอที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินในการก่อสร้าง ดังนั้นจากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตได้เช่นกัน

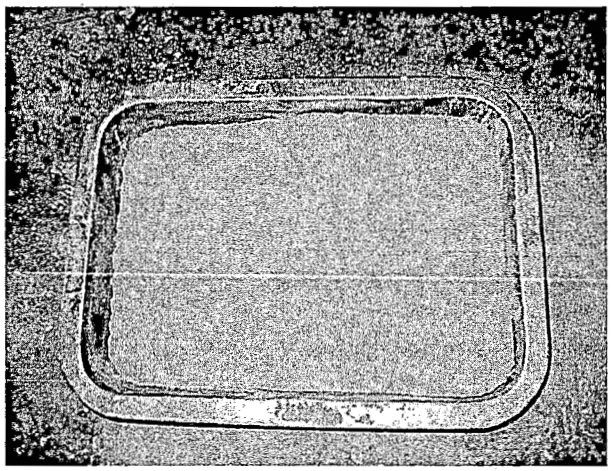
จากงานวิจัยที่กล่าวมานี้ชี้ให้เห็นว่าการนำปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมาใช้ศึกษาคุณสมบัติการใช้เป็นวัสดุประสานนั้นมีความเป็นไปได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำวัสดุทั้ง 2 ประเภท มาพัฒนากันอย่างหลากหลาย แต่ในงานคอนกรีตค้นพบว่าการพัฒนายังคงมีน้อย โดยเฉพาะผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เพื่อจะได้เลือกใช้ความละเอียดที่เหมาะสม มีค่าใช้จ่ายในการบดต่ำ แต่ให้คุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและดีพอในการใช้ในงานคอนกรีตแต่ละประเภท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินมาเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต โดยวิเคราะห์จากผลกระทบของขนาดอนุภาคกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ความละเอียดต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งยังเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อน ของโลกได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

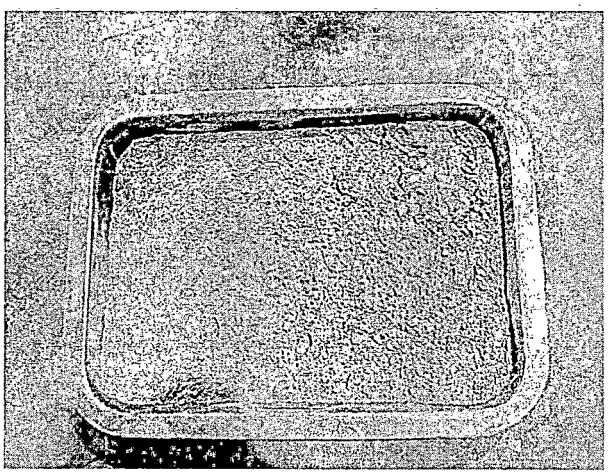
ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวอย่างรวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

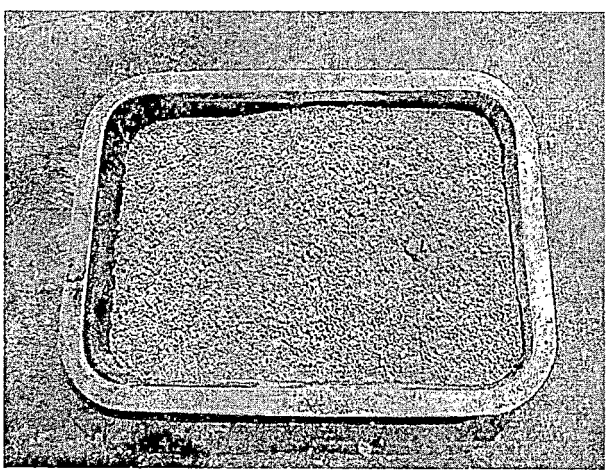
3.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์	ใช้ของโรงงานบริษัท เอ็ม.ไทย อินดัสเทรียล จำกัด ผ่านตะแกรงมาตรเบอร์ 8 ตามรูปที่ 3.1 (ก)
3.1.2 เถ้าถ่านหิน	ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตามรูปที่ 3.1 (ข)
3.1.3 ปูนซีเมนต์	ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15-2532 ตามรูปที่ 3.1 (ค)
3.1.4 ทรายแม่น้ำสะอาด	ใช้ทรายแม่น้ำสะอาด ตามรูปที่ 3.1 (ง)
3.1.5 หิน	ใช้หินย่อยสะอาด ขนาดใหญ่สุด 19 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.1 (จ)
3.1.6 น้ำ	ใช้น้ำประปาในการทดลอง
3.1.7 สารลดชนิดน้ำพิเศษ	Superpleticizer ตามรูปที่ 3.1 (ฉ)



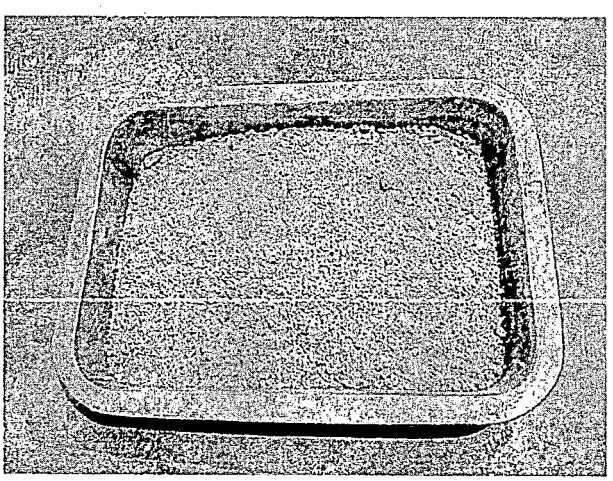
(ก) กากแคลเซียมคาร์ไบด์



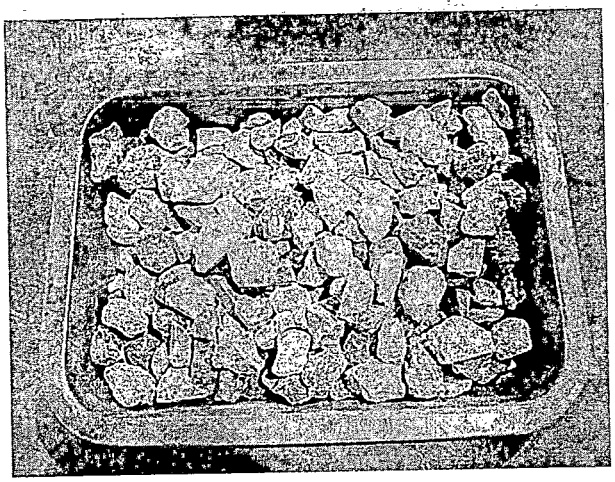
(ข) เถ้าถ่านหิน



(ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ง) ทรายแม่น้ำสะอาด

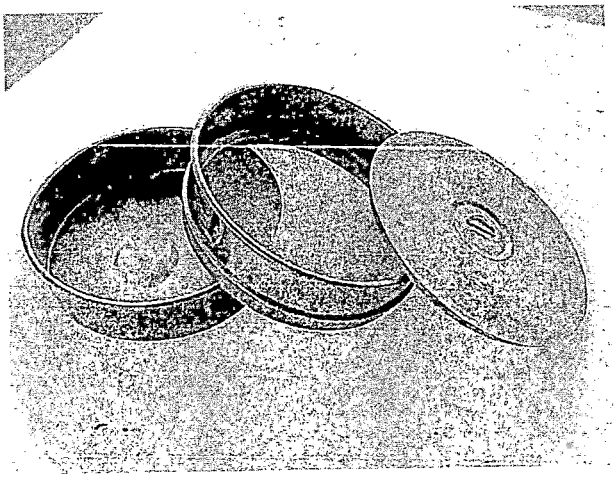


(จ) หินย่อยสะอาด

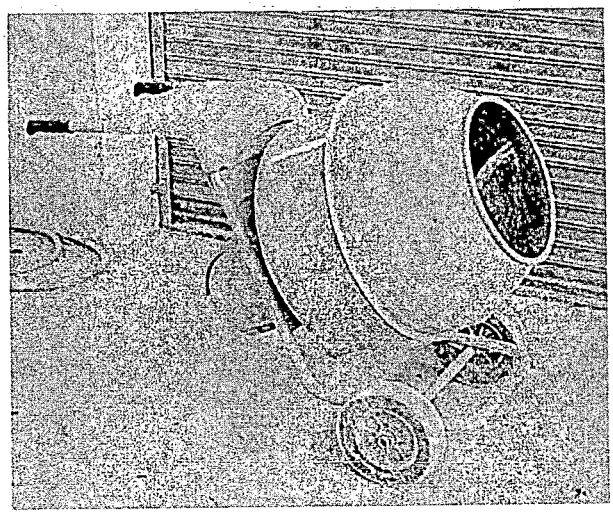
(ฉ) สารลดชนิดน้ำพิเศษ

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

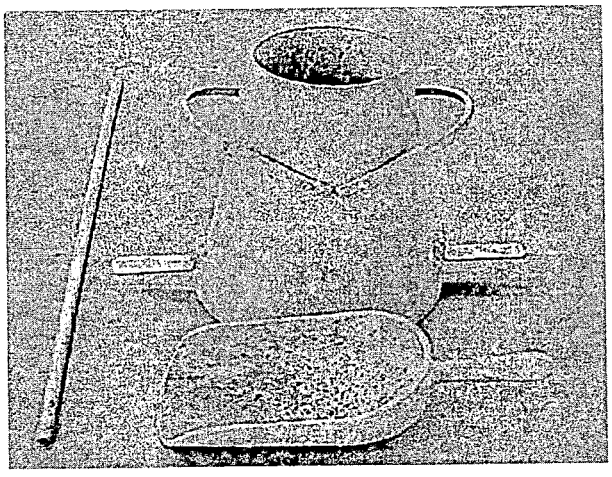
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ



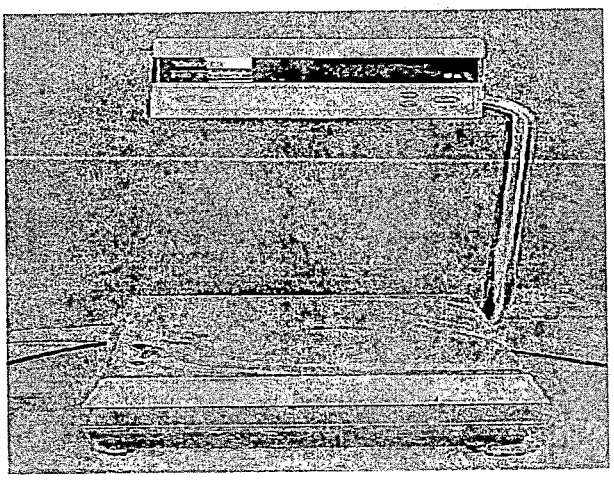
(ก) ชุดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 และเบอร์ 325



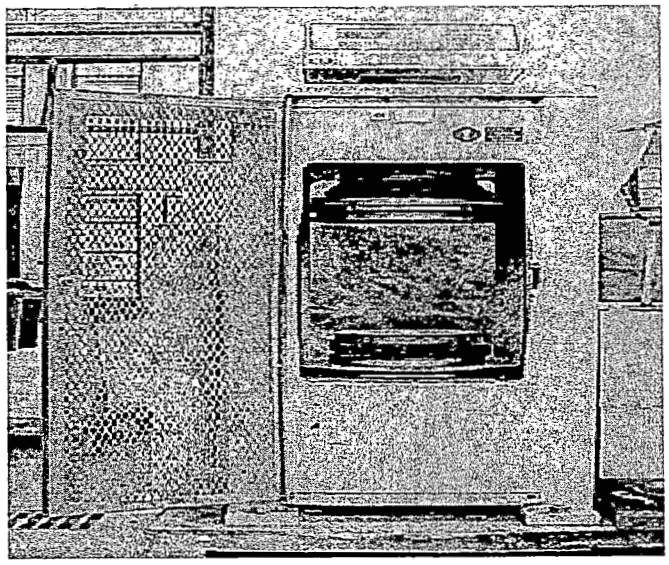
(ข) เครื่องผสมคอนกรีต



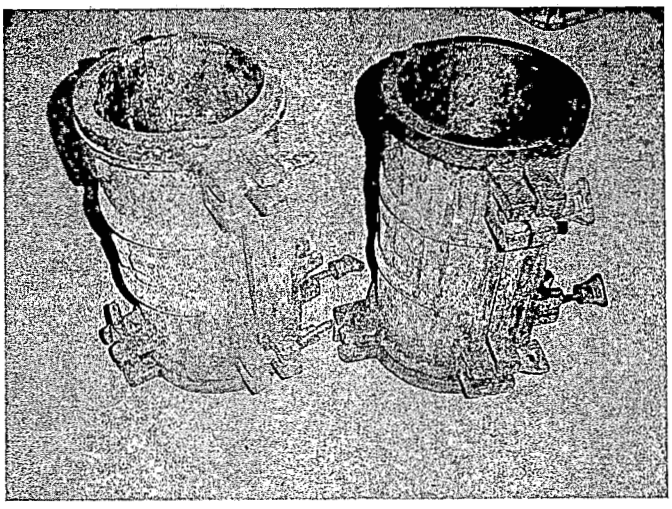
(ค) ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต



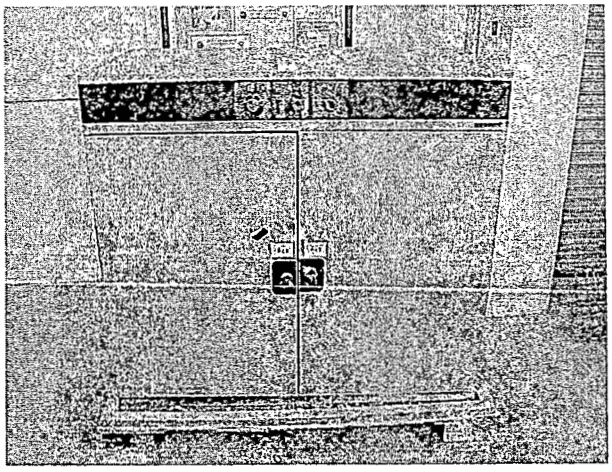
(ง) เครื่องชั่งน้ำหนัก



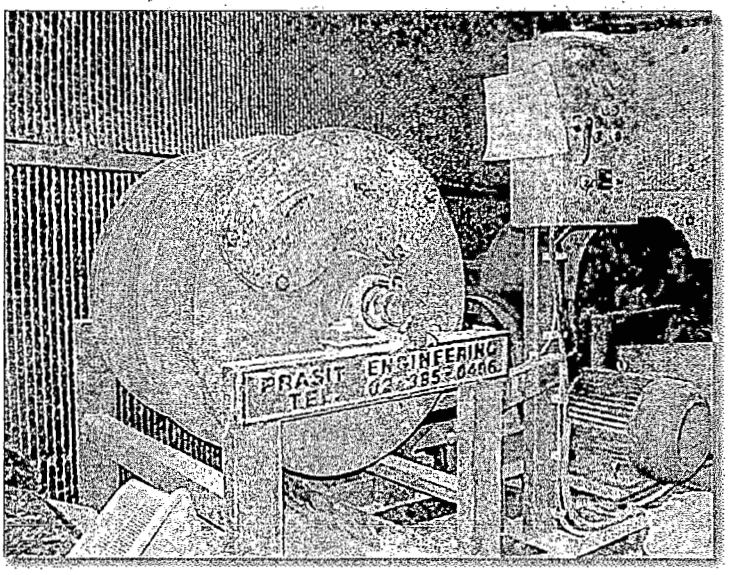
(จ) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



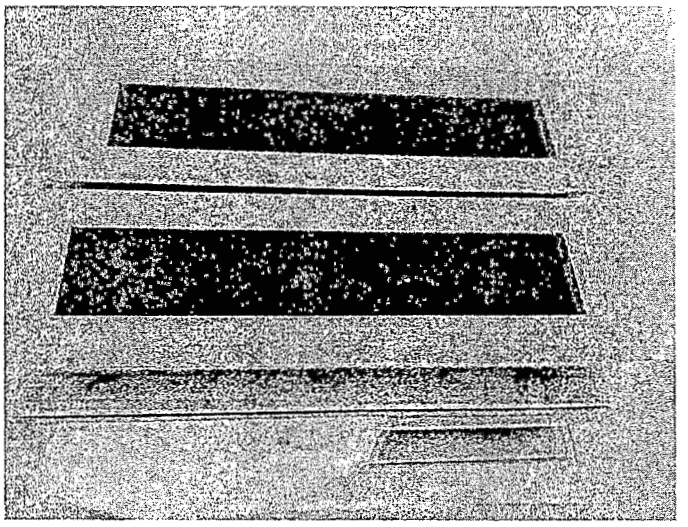
(ฉ) แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม^2 และขนาด 150 x 300 มม^2



(ช) ตู้อบวัสดุ



(ซ) เครื่องบดวัสดุ



(ญ) แบบหล่อคอนกรีตขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 500 มม. และสูง 100 มม.

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาของงานวิจัยนี้แบ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบต่างๆ ดังนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์

นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากแดดให้แห้งแล้วนำมาบดให้มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ที่มีความละเอียดต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 12-15,

15-18, 18-20 และ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 ทั้งหมด (ไม่บด) ซึ่งค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ระหว่างร้อยละ 22-25 โดยน้ำหนัก

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างเถ้าถ่านหิน

ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะโดยตรง

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างทราย

ใช้ทรายแม่น้ำสะอาดที่ผ่านการอบให้แห้ง จากนั้นจัดเก็บด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้น

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างหิน

ใช้หินขนาดใหญ่สุด 19 มิลลิเมตร ล้างด้วยน้ำประปาให้สะอาดจากนั้นไปอบในตู้อบให้แห้ง จากนั้นจัดเก็บด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้น

3.3.5 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งส่วนผสมคอนกรีตเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกศึกษาผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยใช้เถ้าถ่านหิน (FA) ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตโดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงไปบดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 12-15, 15-18, และ 18-20 โดยน้ำหนัก กลุ่มแรกผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ 2 ใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40 โดยน้ำหนัก ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัด, ความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซึมน้ำในคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 7, 28, 60 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัด ที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน ส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 3.1

กลุ่มที่สองศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต 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 โดยน้ำหนักวัสดุประสานใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในกลุ่มนี้ หลังบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 90 วัน ตลอดจนหาความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ส่วนผสมคอนกรีตดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ศึกษาผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีต

ส่วนผสม	Mix Proportions (kg/m^3)							W/B	Slump
	Cement type I	กากแคลเซียมคาร์ไบด์	เถ้าถ่านหิน	ทราย	หิน	น้ำ	Super P.		(cm)
FC 50:50	-	225	225	700	895	194	10	0.45	5.5
MC 50:50	-	225	225	700	895	194	10	0.45	6
LC 50:50	-	225	225	700	895	194	22	0.45	5.8
OC 50:50	-	225	225	700	895	194	45	0.45	7
FC 20:40:40	90	180	180	700	895	194	10	0.45	6.7
MC 20:40:40	90	180	180	700	895	194	15	0.45	5.6
LC 20:40:40	90	180	180	700	895	194	10	0.45	7.4
OC 20:40:40	90	180	180	700	895	194	40	0.45	7.5
Cement concrete	450	-	-	700	895	194	-	0.45	5.8

หมายเหตุ FC, MC, LC = กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีขนาดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 12-15, 15-18, และ 18-20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มที่ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในคอนกรีต

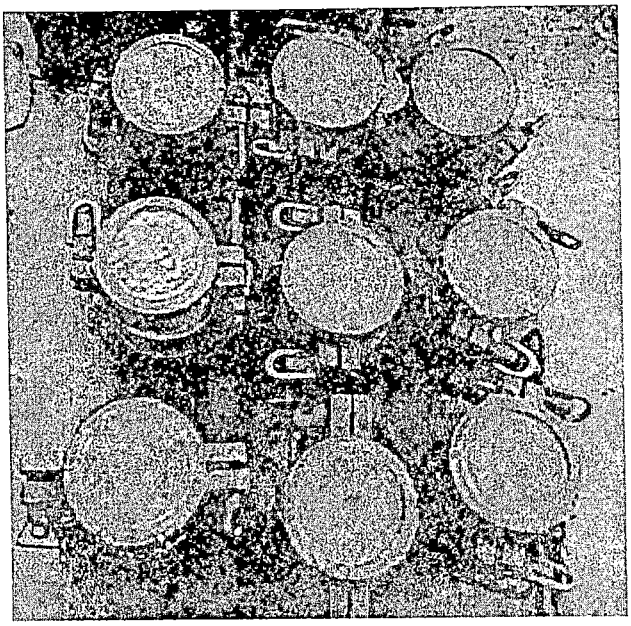
ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม (กก./ม^3)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ
CR:F:C 60:30:10	45	270	135	830	1050	194	8.5
CR:F:C 60:20:20	90	270	90	840	1050	194	7.0
CR:F:C 60:20:20	135	270	45	860	1050	194	7.0
CR:F:C 50:40:10	45	225	180	780	1050	194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

หมายเหตุ CR, F, C = กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีขนาดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 เถ้าถ่านหิน และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

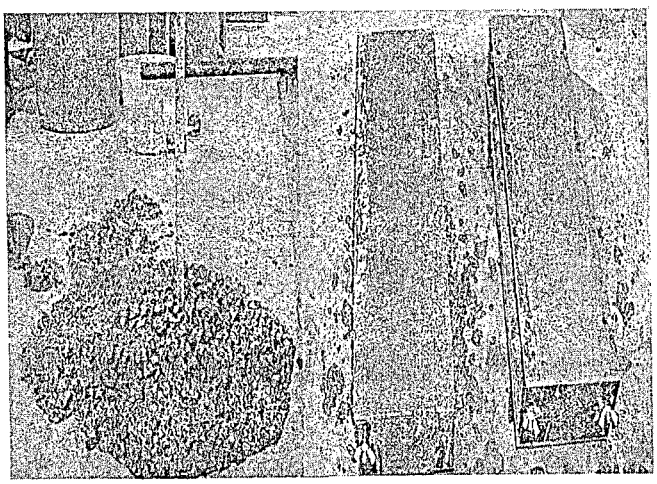
3.3.6 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

การผสมและการหล่อตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ จะต้องผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินแม่เมาะผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเสียก่อน จากนั้นจึงทำการผสมน้ำ,ทราย,หิน และสารลดน้ำเพื่อทำคอนกรีต จนกระทั่งเนื้อคอนกรีตเข้ากันดีแล้วจึงทำการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตสดทุกอัตราส่วนผสม ตามมาตรฐาน ASTM C 143 (แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก)-(ค)) โดยทันทีหลังจากทำการผสมคอนกรีต เพื่อควบคุมการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 5-10 เซนติเมตร โดยปรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ จากนั้นทำการหล่อในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม^2 เพื่อทดสอบกำลังอัด และทรงกระบอกขนาด 150 x 300 มม^2 เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 100 มม. ยาว 500 มม. และสูง 100 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึง (แสดงดังรูปที่ 3.3 (จ)-(ซ)) ทำการถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28 60 และ 90 วัน (แสดงดังรูปที่ 3.4) ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



(ก) เตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก



(ข) เตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด

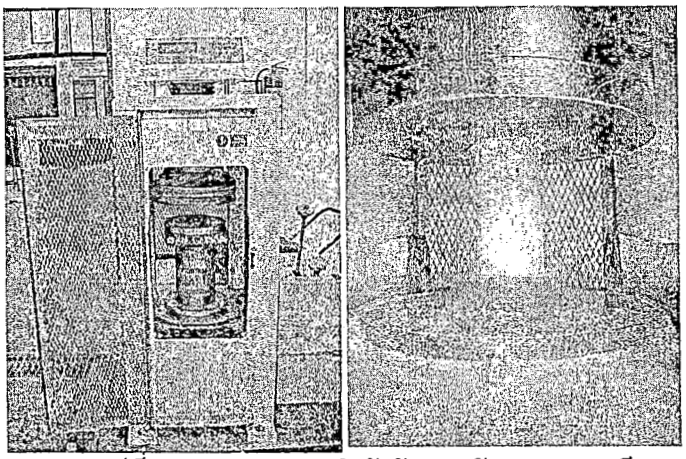
รูปที่ 3.3 หล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัด

620.136
ว 559 ว
ป.2

321167

3.3.7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทำทดสอบกำลังอัดประลัยในคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม^2. ตามมาตรฐาน ASTM C 39 โดยทำการบ่มคอนกรีตในน้ำจนถึงอายุทดสอบ จึงนำคอนกรีตมาแคบหัวให้เรียบและกดคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดดังรูปที่ 3.4 เพื่อหาน้ำหนักกดสูงสุด กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหาจากน้ำหนักกดสูงสุดหารด้วยพื้นที่รับแรง



รูปที่ 3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3.3.8 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต โดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 × 100 × 500 มม.^{3} เมื่อคอนกรีตอายุครบ 28 วันจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 3 จุด (Three point bending) ตามมาตรฐาน ASTM C293-79 โดยวางเป็นคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย และใช้น้ำหนักกระทำแบบ Center - Point Loading (รูปที่ 3.5) ผลของค่ากำลังต้านทานแรงดัดจะอยู่ในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยเป็น ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด ณ จุดแตกร้าวในคานที่ทำการทดสอบ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

$$\text{Modulus of Rupture (R)} = \frac{3PL}{2bd^2} \qquad (3.1)$$

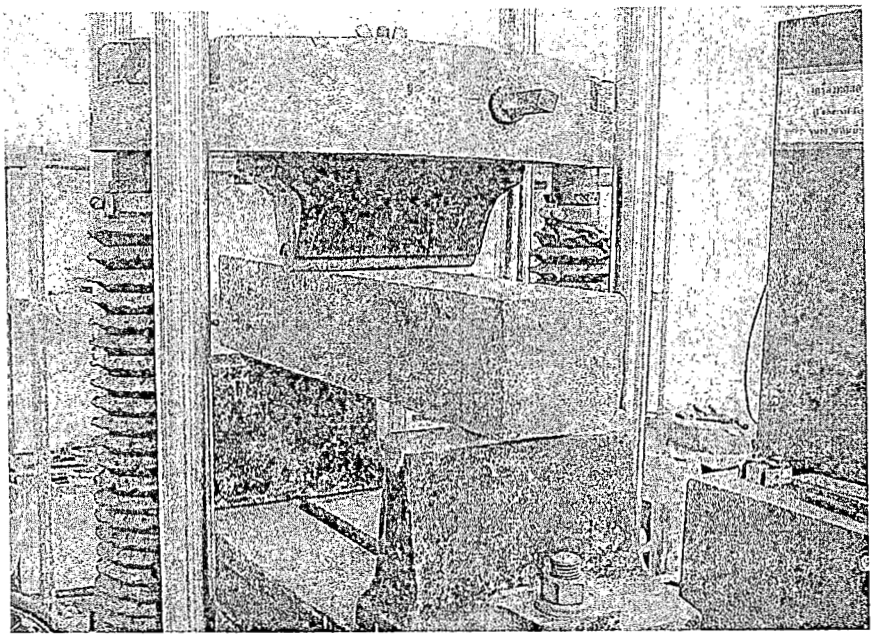
โดยที่ R = โมดูลัสการแตกร้าว (Middle one of Span), (kg/cm^2)

P = น้ำหนักสูงสุด (Maximum Load), (kg)

L = ความยาวคาน (Span Length), (cm)

B = ความกว้างเฉลี่ยของคาน, (cm)

d = ความลึกเฉลี่ยของคาน, (cm)



รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

3.3.9 การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting test)

การทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (splitting tensile test) ตาม ASTM C496 ได้ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.6 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. วางนอนเพื่อรับแรงกดที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. และคอนกรีตจะแตกออกเป็น 2 ซีก (รูปที่ 3.8) การคำนวณค่าแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีผ่าซีกสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

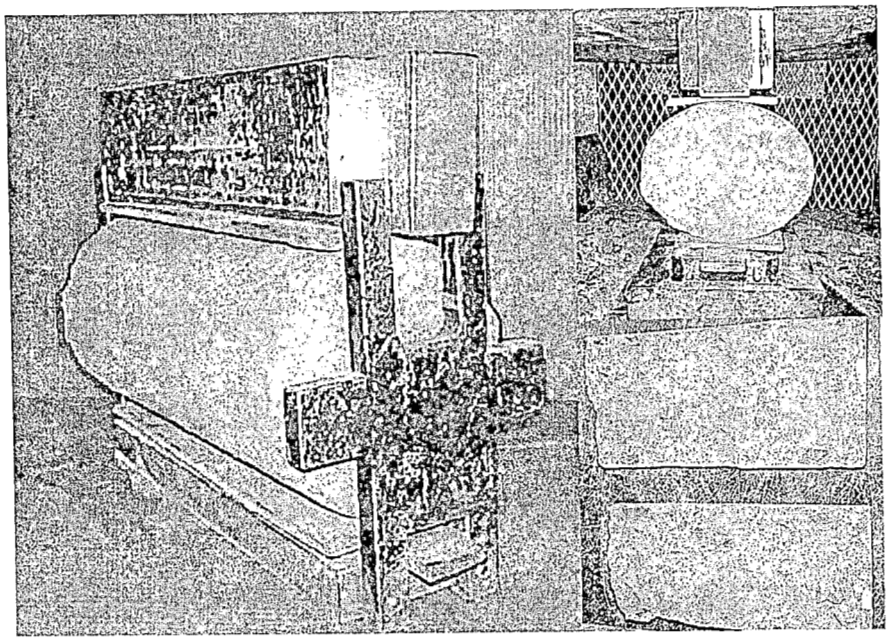
แรงดึงของคอนกรีต $$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (3.2)$$

เมื่อ σ_t คือ แรงดึงของคอนกรีตตามแนวราบโดยวิธีผ่าซีก (กก/ซม^2)

P คือ แรงกดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (กก.)

L คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงประบอก (ซม.)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต (ซม.)



รูปที่ 3.6 การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก

3.3.10 การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ในการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำในคอนกรีตจะทดสอบด้วยวิธีการนำก้อนตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100×200 มม^2 ไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างออกจากภาชนะ ใช้ผ้าซับน้ำบนผิวคอนกรีต แล้วชั่งให้เสร็จภายใน 3 นาที ทำการบันทึกผล จากนั้นนำตัวอย่างที่ทำการชั่งเสร็จแล้วไปอบเพื่อทำให้ความชื้นของก้อนตัวอย่างหมดไป ทำการอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำได้

บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึง ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน สารเคมีผสมเพิ่ม และมวลรวม ซึ่งได้แก่ ความละเอียด การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด การดูดซึมน้ำและความหนาแน่น

4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชนิด ได้แก่ลักษณะรูปร่างทั่วไปของอนุภาค สีของอนุภาค ความละเอียดของอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาคซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเพื่อทำการวิเคราะห์และกำหนดแนวทางในการเลือกใช้วัสดุประสานต่อไป

4.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 4.1(ก) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ เป็นก้อนรูปทรงไม่แน่นอน ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 (Fe_2O_3) รวมกันได้ร้อยละ 96.3 (ตารางที่ 4.1)

4.1.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงมีความชื้นอยู่มาก ลักษณะเหมือนดินเหนียวสีเทาเข้มสามารถปั้นเป็นก้อนได้ เมื่อนำไปตากแดดให้แห้งได้เป็นสีเทาอ่อน ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถพิจารณาได้จากปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ที่ทดสอบด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 ซึ่งพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 22 ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ได้ดีขึ้น จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุด้วยกล้อง SEM ดังรูปที่ 4.1(ข)พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ ความถ่วงจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 2.32 ซึ่งใกล้เคียงกับความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน สำหรับสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังตารางที่ 4.1 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

4.1.3 เถ้าถ่านหิน

การศึกษานี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน (รูปที่ 4.1(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 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปะสาน แสดงดังตารางที่ 4.1

4.1.4 สารลดน้ำชนิดพิเศษ (Super plasticizer)

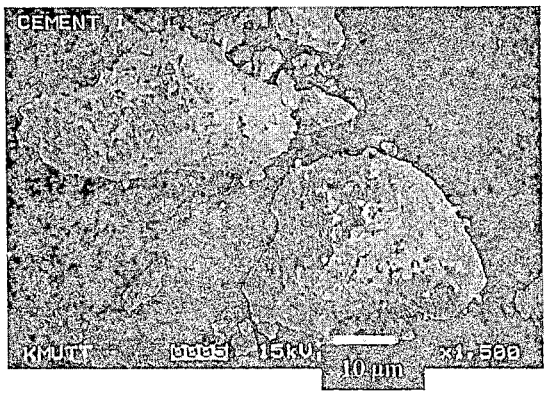
สารชนิดนี้ส่วนใหญ่ทำมาจากกรดหรือเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulphonic) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมทำเยื่อไม้ (Wood pulp industry) เกลือของกรดไฮดรอกซิเลตคาร์บอไซลิค (Hydroxylated Carboxylic Acid) ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 494

4.1.5 มวลรวม

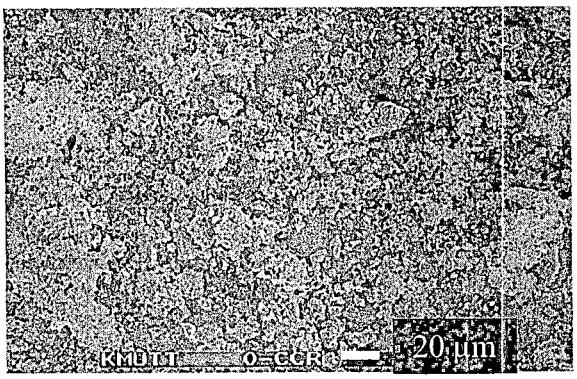
ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.72 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.55 และ 1.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

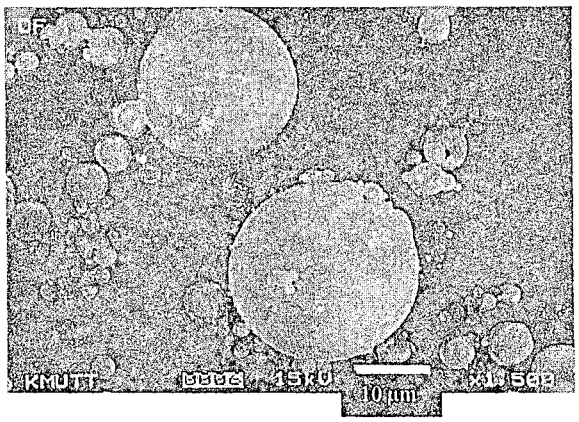
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	3.51	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	2.42	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	0.31	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.71	52.71	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	0.52	-
Sodium Oxide,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



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์



ค) เถ้าถ่านหิน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน

4.2 ผลของความละเอียดต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

4.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมทุกอายุได้แสดงในตารางที่ 4.2 ให้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

Sample	Compressive Strength (ksc) - Normalized Compressive Strength (%)		
	7 วัน	28 วัน	60 วัน
OC 50:50	71 - ***20***	164 - ***32***	195 - ***33***
LC 50:50	67 - ***19***	164 - ***32***	214 - ***36***
MC 50:50	80 - ***22***	175 - ***34***	229 - ***38***
FC 50:50	81 - ***23***	181 - ***36***	243 - ***41***
OC 20:40:40	132 - ***37***	236 - ***46***	310 - ***52***
LC 20:40:40	138 - ***39***	247 - ***49***	317 - ***53***
MC 20:40:40	138 - ***39***	252 - ***50***	229 - ***38***
FC 20:40:40	145 - ***41***	276 - ***54***	329 - ***55***
Cement	357 - ***100***	508 - ***100***	596 - ***100***

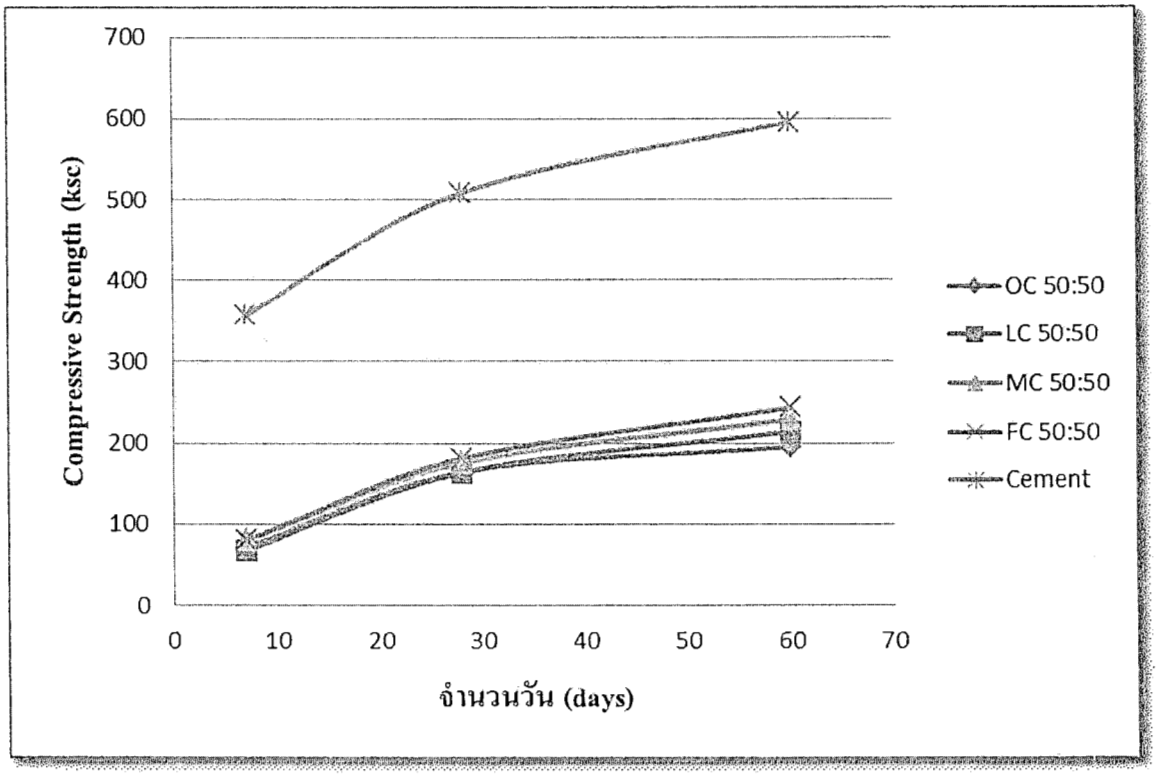
ก) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : เถ้าถ่านหินอัตราส่วน 50:50

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน 450 กก./ม^3 ได้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าคอนกรีต OC 50:50 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วันเท่ากับ 71.46 , 163.81 และ 195.11 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 20 , 32 และ 33 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ คอนกรีต LC 50:50 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วันเท่ากับ 67.48 , 163.5 และ 214.27 กก./ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 19 , 32 และ 36 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ คอนกรีต MC 50:50 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วัน เท่ากับ 80.02 , 174.92 และ 228.95 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 22 , 34 และ 38 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) และคอนกรีต FC 50:50 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วัน เท่ากับ 80.63 , 180.94 และ 242.81 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 23 , 36 และ 41 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาบ่มคอนกรีตพบว่าคอนกรีตมีแนวโน้มการพัฒนากำลังได้สูงในช่วงอายุต้นๆ คือ อายุ 7-28 วันแรก โดยสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟซึ่งจะเห็นได้ว่า ในระยะเวลาประมาณ 7-28 วันแรก กราฟจะมีความชันมากกว่าระยะเวลาบ่มคอนกรีตช่วงหลัง ดังนั้น การพัฒนากำลังของคอนกรีตหลังจาก 28 วัน แล้วจะค่อนข้างน้อย ซึ่งจะ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชรินทร์ นมรักษ์ (2545) และ ศราวุธ เริงฤทธิ์ (2544) ที่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังกำลังอย่างรวดเร็วในช่วง 60 วันแรก และมีแนวโน้มคงที่เมื่อคอนกรีตอายุมากกว่า 90 วัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแทนวัสดุประสานโดยบดให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความละเอียดแตกต่างกัน 4 ตัวอย่าง พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของอนุภาคมากกว่าจะให้กำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ละเอียดน้อยกว่าและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ที่พบว่าเมื่อนำเถ้าถ่านหินมาแยกให้มีความละเอียดต่างกัน มอร์ต้าหรือคอนกรีตที่มีความละเอียดสูงจะมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าหรือคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า เช่น คอนกรีต FC 50:50 ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ให้กำลังอัดเท่ากับ 80.63 , 180.94 และ 242.81 กก./ซม^2 ตามลำดับในขณะที่คอนกรีต OC 50:50 ที่อายุ 7,28 และ 60 วัน ให้กำลังอัดเท่ากับ 71.46 , 163.81 และ 195.1 กก./ซม^2 ตามลำดับซึ่งอาจเป็นผลจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคละเอียดกว่าจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า อนุภาคที่หยาบกว่า ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความละเอียดมากกว่า มีกำลังอัดที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตนี้ยังคงให้ค่ากำลังอัดที่น้อยมาก มีค่าน้อยกว่าประมาณ 3-5 เท่า ของคอนกรีตควบคุม (C 450)

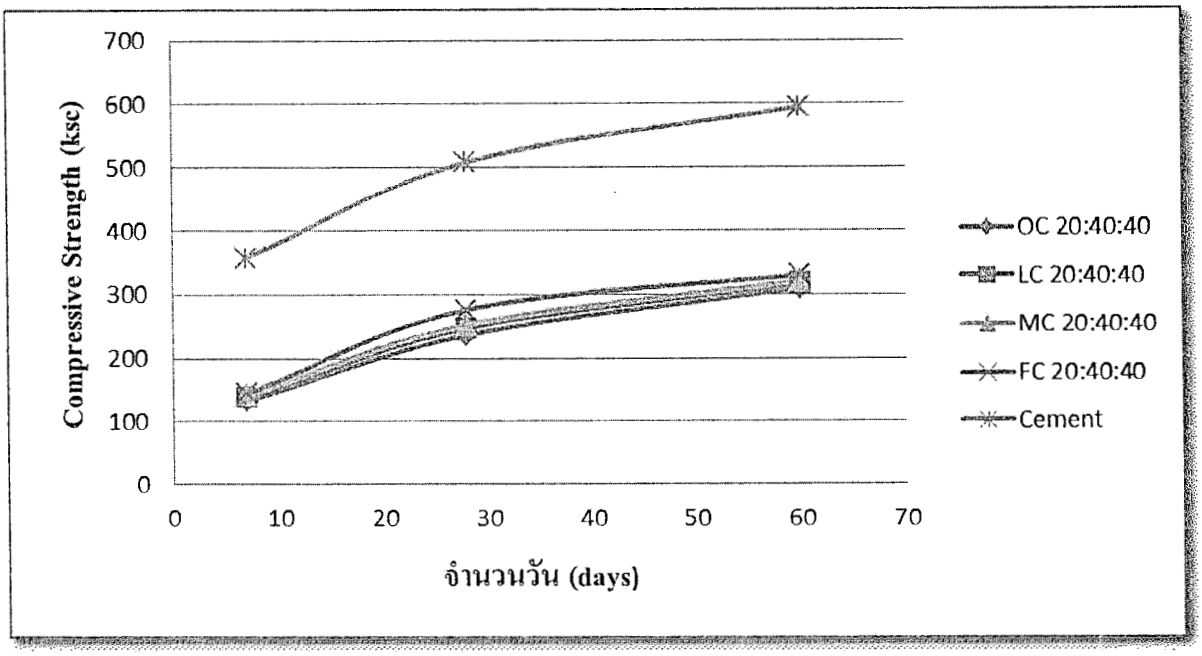


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของคอนกรีตระหว่างอายุของอัตราส่วน 50:50 กับกำลังอัด

ข) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : เถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 20:40:40

ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 20:40:40 เป็นวัสดุประสาน 450 กก./ม^3 ได้แสดงดังในตารางที่ 4.2 พบว่า คอนกรีต OC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วันเท่ากับ 131.87 , 236.22 และ 309.58 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 37 , 46 และ 52 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ คอนกรีต LC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 , 28 และ 60 วันเท่ากับ 137.89 , 247.16 และ 317.23 กก./ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 39,49 และ 53 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ คอนกรีต MC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7,28 และ 60 วัน เท่ากับ 141.49 , 252.19 และ 320.18 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 39 , 50 และ 54 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) และคอนกรีต FC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7,28 และ 60 วัน เท่ากับ 144.92 , 276.38 และ 329.20 กก./ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 41 , 54 และ 55 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) ตามลำดับ

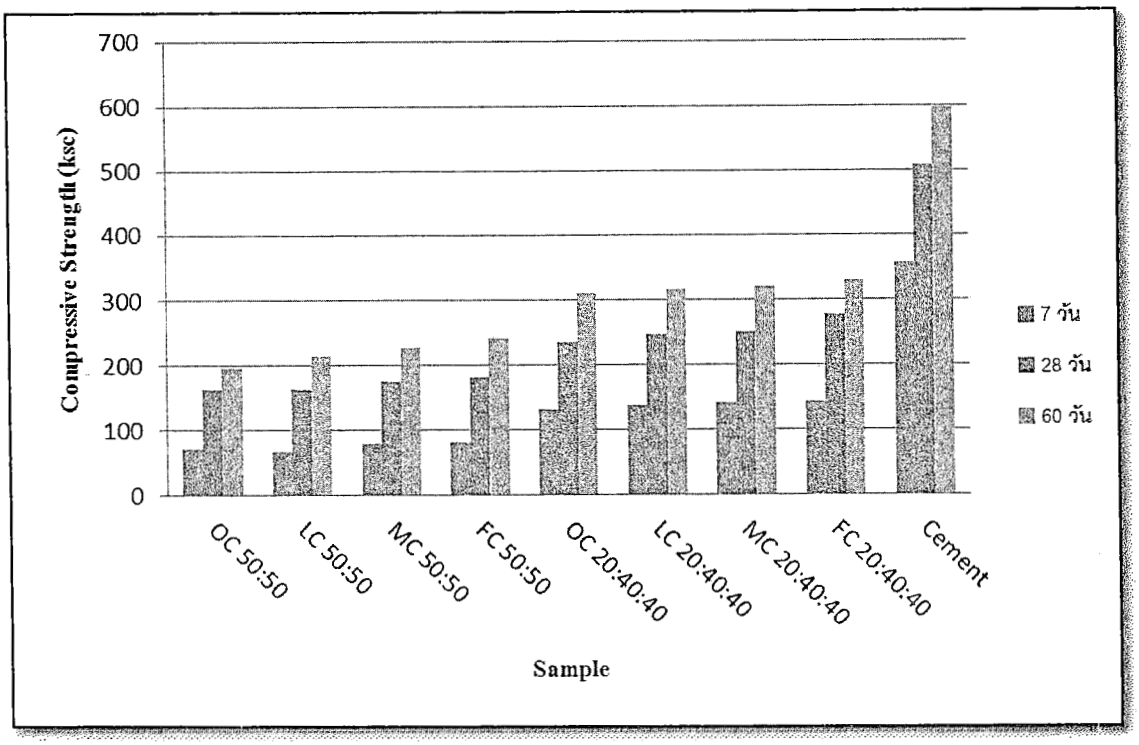
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดแตกต่างกันในอัตราส่วน 20:40:40 เป็นวัสดุประสาน จากรูปที่ 4.3 พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของอนุภาคมากจะให้กำลังอัดมากกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของอนุภาคน้อยกว่าเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน (50:50) เช่นคอนกรีต FC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7,28 และ 60 วัน เท่ากับ 144.92 , 276.38 และ 329.20 กก./ซม^2 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต OC 20:40:40 ให้กำลังอัดที่อายุ 7,28 และ 60 วัน เท่ากับ 131.87 , 236.22 และ 309.58 กก./ซม^2 ซึ่งมีเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้น แต่ในคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมนี้จะให้กำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานประมาณ 1-2 เท่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน (W/B = 0.45) เนื่องจากปูนซีเมนต์มีปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นด้วยในขณะที่กลุ่มไม่มีปูนซีเมนต์จะมีแค่ปฏิกิริยาปอซโซลานเท่านั้น กล่าวโดยสรุปคือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานอัตราส่วน 20:40:40 มีค่าความหนาแน่นและกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแต่มีอัตราการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมในวัสดุประสาน นอกจากนี้พบว่ามีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นและวัสดุประสานละเอียดมากขึ้น แต่เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (C 450) อยู่มาก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของคอนกรีตระหว่างอายุของอัตราส่วน 20:40:40 กับกำลังอัด

ค) เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์และไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม

จากการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์และไม่ใช้ปูนซีเมนต์พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่เท่ากันเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีความแข็งแรงมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในคอนกรีต โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตแต่ละกลุ่มจะเรียงจากค่าน้อยไปมากตามระยะเวลาการบ่มและเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มคอนกรีตผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ปูนซีเมนต์และไม่ใช้ปูนซีเมนต์จะเห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดสูงกว่ากลุ่มคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตาม คอนกรีตทั้ง 2 กลุ่มยังให้ค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมาตรฐาน

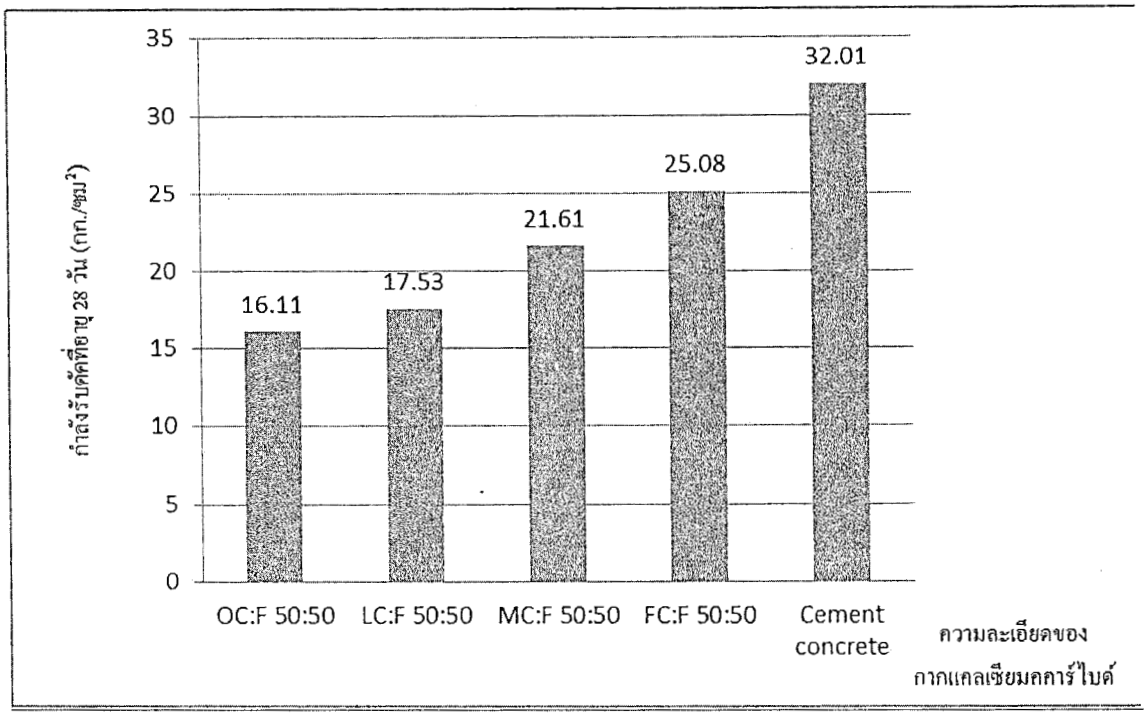


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4.2.2 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ก) กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : เถ้าถ่านหินอัตราส่วน 50:50

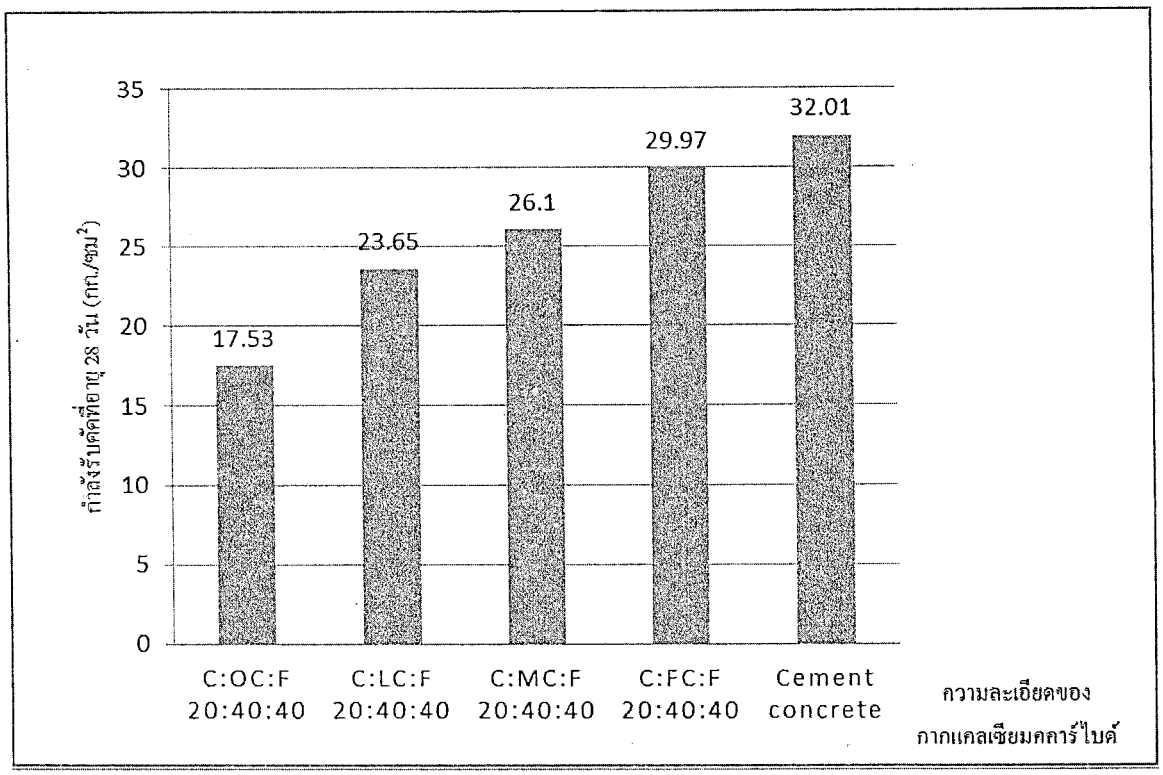
รูปที่ 4.5 แสดงผลของความละเอียดของกากแคลซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ซึ่งพบว่า กำลังดัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เกิดได้สมบูรณ์มากขึ้นในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูงกว่า ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ดังที่ได้แสดงให้เห็นในข้างต้น คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ FC, MC, และ LC มีกำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน เท่ากับ 25.08 , 21.61 , และ 17.53 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50

ข) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : เถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40

พิจารณาคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40 เทียบกับคอนกรีตควบคุม จากการเพิ่มปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น และสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น กำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : เถ้าถ่านหินอัตราส่วน 50:50 โดยคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ FC, MC และ LC มีกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 29.97, 26.10 และ, 23.65 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

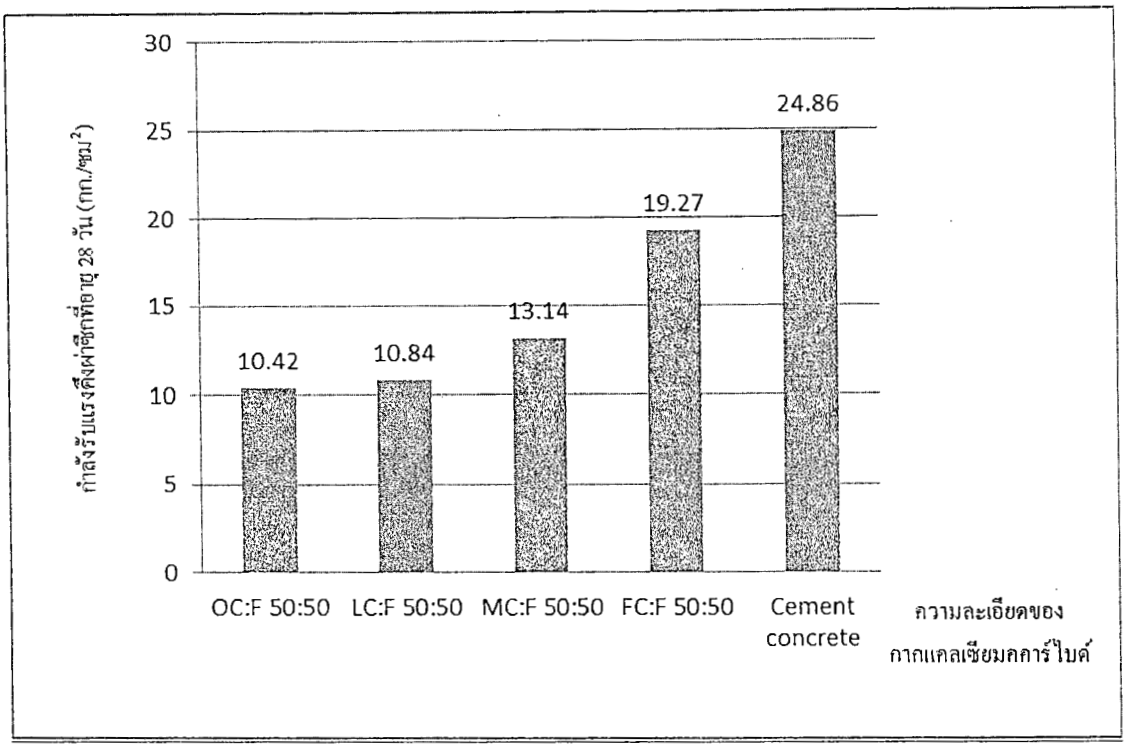


รูปที่ 4.6 กำลังดัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40

4.2.3 กำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ก) กำลังรับแรงดึงผ่าซีกในคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 50:50

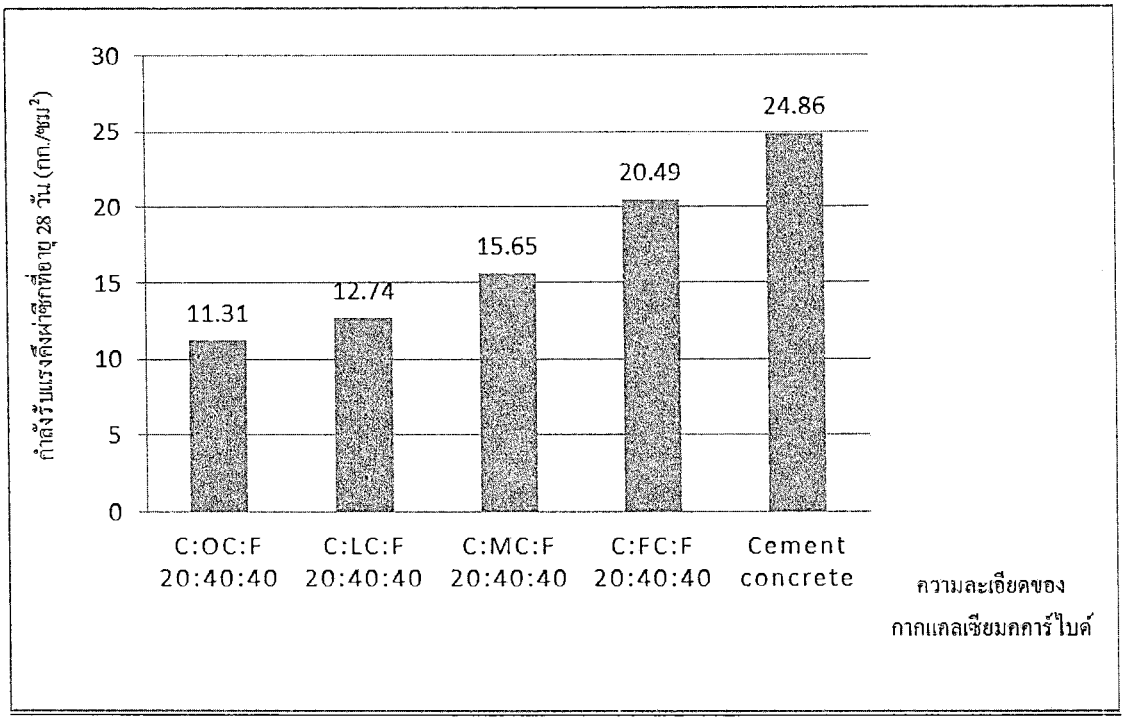
กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 50:50 เทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ความละเอียดของกากแคลเซียมคาไบด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกำลังดัด และกำลังอัดดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อนุภาคกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลมีทิศทางที่ดี เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และเร็วยิ่งขึ้น กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ FC, MC, และ LC มีกำลังดึงผ่าซีกที่ 28 วัน เท่ากับ 19.27 , 13.14 , และ 10.84 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กำลังดึงผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50

ข) กำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 20:40:40

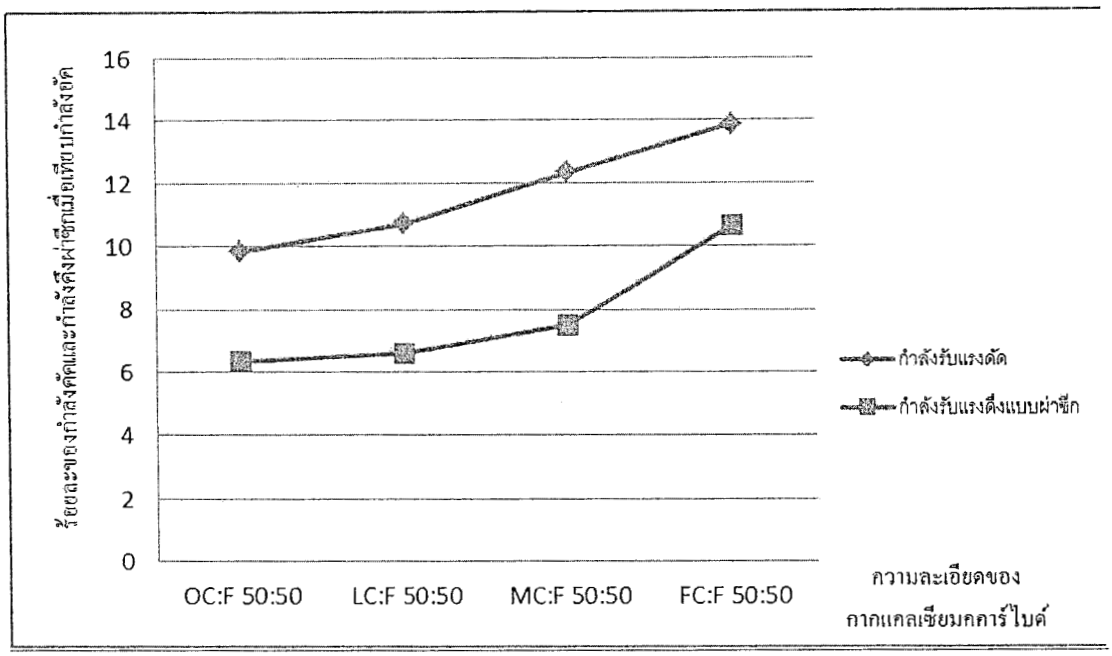
รูป 4.8 แสดงกำลังดึงผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่าน หิน เท่ากับ 20:40:40 ซึ่งพบว่า ความละเอียดสูงขึ้นยังคงส่งผลให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกลุ่มนี้มีค่ามากขึ้น โดย มีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 50:50 คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ FC, MC และ LC มีกำลังดึงผ่าซีกที่ 28 วัน เท่ากับ 20.49 , 15.65 , และ 12.74 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ นอกจากนั้น ผลมาจากการเพิ่มปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 เข้ามาในคอนกรีต ส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า กลุ่มที่ไม่ได้ใช้ปูนซีเมนต์เพราะมีปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์กับน้ำเข้ามาช่วยเสริมกำลัง ทำให้ได้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกสูงขึ้น



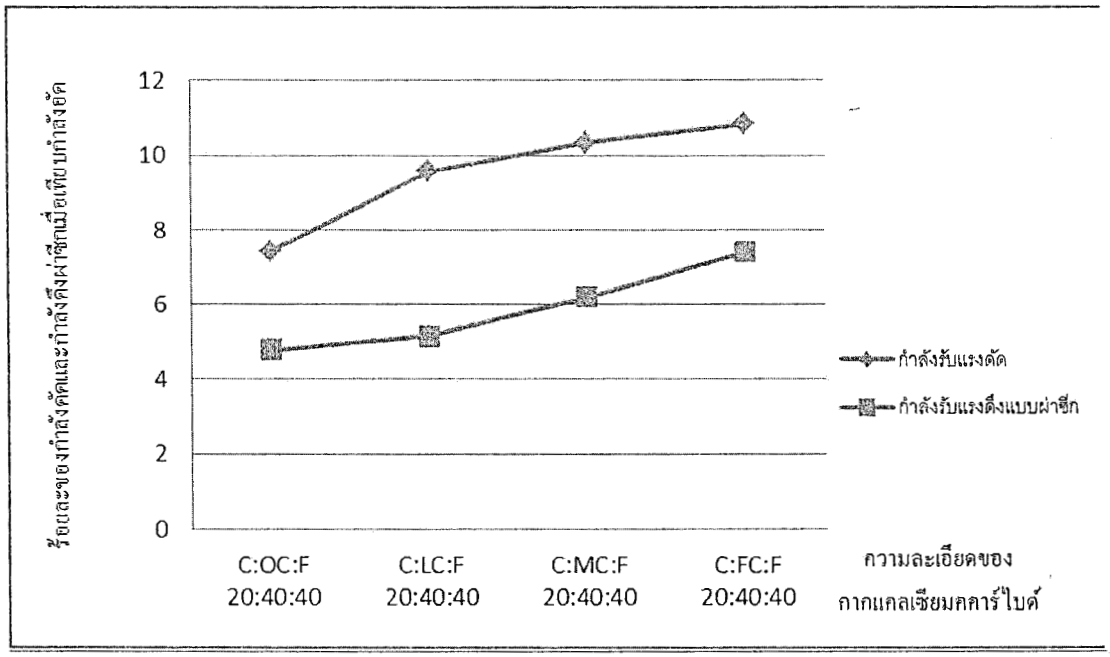
รูปที่ 4.8 กำลังดึงผ่าซีกที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 20:40:40

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังดึงเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงร้อยละของกำลังดึงคอนกรีต เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วันของกลุ่ม ที่ใช้อัตราส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50 และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน 20:40:40 ตามลำดับ โดยพบว่าคอนกรีตทั้งสองกลุ่มให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือ ร้อยละของกำลังดึงคอนกรีต ที่ทดสอบแบบผ่าซีกและทดสอบแบบดัด เมื่อเทียบกับกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความละเอียดสูงขึ้น และ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตดังกล่าวสูงขึ้นตามค่ากำลังอัดที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.9 ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ พบว่าร้อยละกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อเทียบกำลังอัดมีค่าในช่วงร้อยละ 6-8 ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไปมีค่าร้อยละของกำลังอัดประมาณร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในส่วนผสมคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงดึงลดลงและเป็นแนวโน้มเดียวกันในกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับกำลังอัด ซึ่งโดยทั่วไปกำลังดัดของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเทียบกับกำลังอัดจะประมาณร้อยละ 20-30 ของกำลังอัด แต่ในการศึกษาครั้งนี้กำลังดัดมีค่าประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 เมื่อเทียบกับกำลังอัด



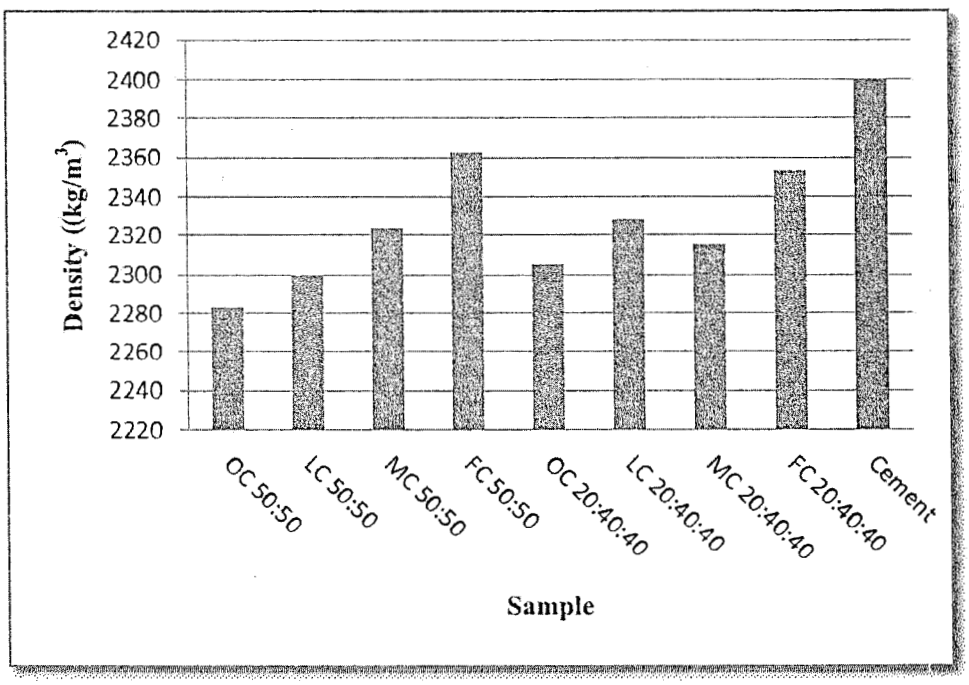
รูปที่ 4.9 ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก เทียบกับกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน 50:50



รูปที่ 4.10 ผลของความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังอัดและกำลังดึงแบบ ผ่าซีก เทียบกับกำลังอัดในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าถ่านหิน 20:40:40

4.2.5 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์หลายความละเอียดผสมกับเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 50:50 เป็นวัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์หลายความละเอียดกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11 พบว่า คอนกรีตที่มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์ละเอียดสูงกว่า (FC) จะมีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดต่ำกว่า (OC) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt al et., 2005 ที่พบว่า เมื่อมีการแยกขนาดของเถ้าถ่านหินเล็กลงจะมีความหนาแน่นสูงและส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้ที่ พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ละเอียดมากกว่าจะมีความหนาแน่นที่มากกว่า และให้กำลังอัดที่มากกว่าด้วย ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุประสานที่มีความละเอียดสูงขึ้น จะมีพื้นที่ผิวมากที่จะช่วยในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สมบูรณ์มากขึ้น จึงส่งผลให้มีความหนาแน่นสูง และเมื่อพิจารณาเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตค่อนข้างใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมคือ มากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม (C 450) อย่างไรก็ตามถึงแม้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะมีความหนาแน่นสูงใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ก็ยังคงให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.11 ผลของความละเอียดของอนุภาคกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อความหนาแน่นของคอนกรีต

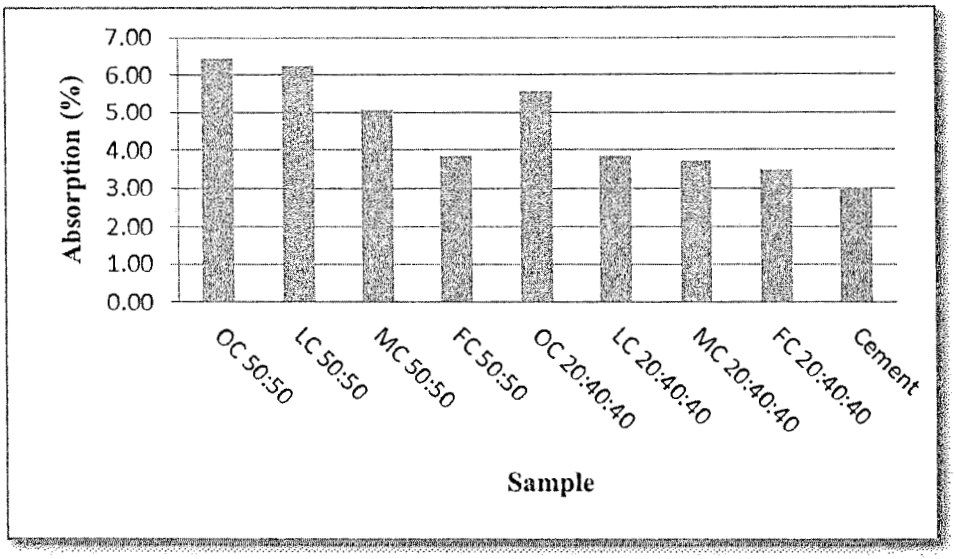
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

Sample	Density (kg/m^3) - Normalized Density (%)
OC 50:50	2283 - ***95***
LC 50:50	2283 - ***95***
MC 50:50	2283 - ***95***
FC 50:50	2363 - ***98***
OC 20:40:40	2363 - ***98***
LC 20:40:40	2363 - ***98***
MC 20:40:40	2283 - ***95***
FC 20:40:40	2363 - ***98***
Cement concrete	2399 - ***100***

4.2.6 การดูดซึมน้ำ

ดังรูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากขึ้น ตลอจนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมในคอนกรีตส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงด้วย ซึ่งอาจเป็นผลจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูง เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ส่งผลให้ได้เจลที่มีความแข็งแรง เช่น C-S-H หรือ C-A-H ช่วยอุดรูพรุนในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และสามารถลดการดูดซึมน้ำลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Chindaprasirt al et., 2005 ที่พบว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะทำให้เพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น เนื่องจากผลการกระจายตัวที่ดีในเพสต์ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยามีการอุดช่องว่างในเพสต์ได้ดี ส่งผลให้มีความทึบน้ำ หากพิจารณาเทียบกันระหว่างคอนกรีตทั้ง 2 อัตราส่วนผสม คอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานทั้งหมดจะมีค่าดูดซึมน้ำที่มากกว่าวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต FC 50:50 มีค่าดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 3.86 โดยน้ำหนัก ขณะที่คอนกรีต FC 20:40:40 มีค่าดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 3.46 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นพบว่า ร้อยละการดูดซึมของคอนกรีต มีแนวโน้มสอดคล้องกับกำลังอัด กล่าวคือ ส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงค่าการดูดซึมน้ำจะต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีความทึบน้ำสูง มีความพรุนน้อยและมี

ความหนาแน่นมากกว่า โดยกลไกทางปฏิกิริยาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานหรือใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากจะส่งผลดีต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความทึบน้ำค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้ดีและสมบูรณ์ดังที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุที่มีความละเอียดสูง ก็จะเสียค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย ดังนั้นแนวทางที่เหมาะสมในการเลือกใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในงานคอนกรีตต้องเลือกใช้ความละเอียดที่เหมาะสมกับกำลังอัดที่ต้องการและให้เหมาะสมกับลักษณะของงานจริง



รูปที่ 4.12 ร้อยละการดูดซึมของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน

4.3 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4.3.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (เฉลี่ยจากตัวอย่างคอนกรีต 3 ก้อน) ที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อายุบ่มในน้ำ 7, 14, 28 และ 90 วัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามรูปที่ 4.13 (ก), 4.13 (ข) และ 4.13 (ค) ตามลำดับ พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ทุกอายุทดสอบ โดยคอนกรีต CR:F:C 40:30:30 มีกำลังอัดสูงสุดในกลุ่มที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยคิดเป็นร้อยละ 38, 43, 51 และ 52 ของกำลังอัดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงสุดเพียงร้อยละ 52 ของคอนกรีตควบคุมเท่านั้น อาจเป็นผลจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้มี

อนุภาคที่หยาบเพราะไม่ได้ผ่านการปรับปรุงขนาดอนุภาคโดยการบดให้ละเอียด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ (Kiattikomol et al., 2001 ; Jaturapitakkul et al., 2003) กลไกการให้กำลังของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 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 ; Jaturapitakkul et al., 2003) ดังนั้นกากแคลเซียมคาร์ไบด์น่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ที่มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาค่อนข้างสูง ตลอดจนมีอนุภาคที่กลมตัน มีขนาดคละที่ดีที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีอยู่แล้ว ตลอดจนมีผลการศึกษายืนยันได้ว่า เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องบดละเอียด (Chalee *et al.*, 2010) นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 28 วันแรก หลังจากนั้น กำลังอัดมีการพัฒนาในอัตราที่ลดลง กำลังอัดที่เพิ่มในช่วงต้นอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลักคือ C_3A และ C_3S ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้เกิดการก่อตัวช่วงต้นของคอนกรีต ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น (Neville, 1996) ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ประกอบกับอนุภาคที่หยาบของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ (Kiattikomol *et al.*, 2001 ; Jaturapitakkul et al., 2003) โดยผลการศึกษาพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตในช่วง 28 วันสูงขึ้น เช่น คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 (รูปที่ 4.13 (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 ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก), 4.13(ข) และ 4.13(ค) ตามลำดับ นั่นแสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดคอนกรีตน้อยลงเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากกำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในช่วงหลังเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง ซิลิกา หรืออลูมินาที่มีใน

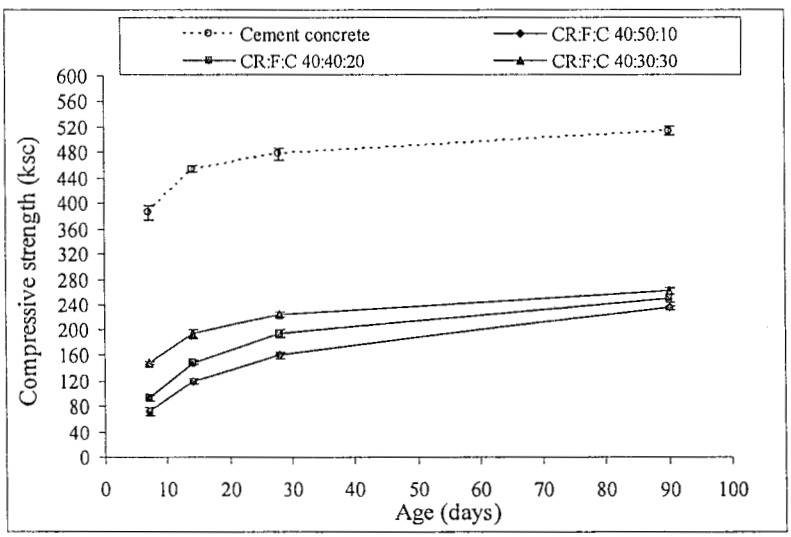
เถ้าถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ หรือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้

พิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เทียบกับอายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.14 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

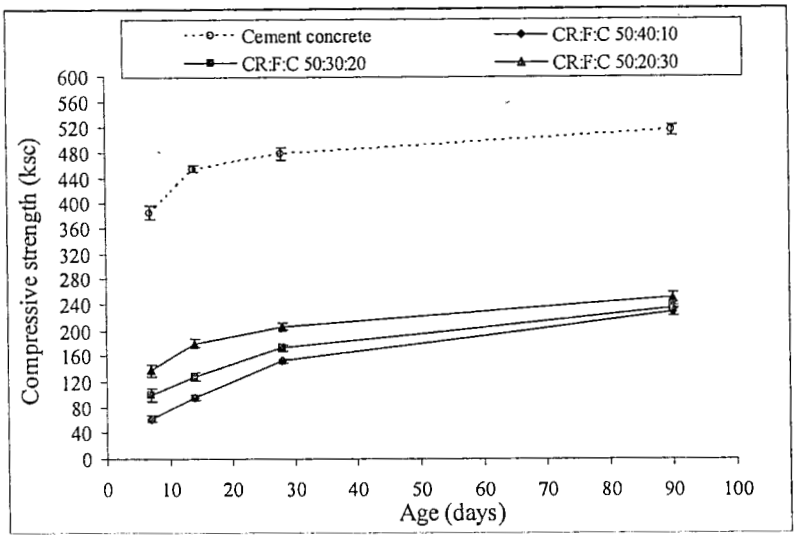
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต

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**

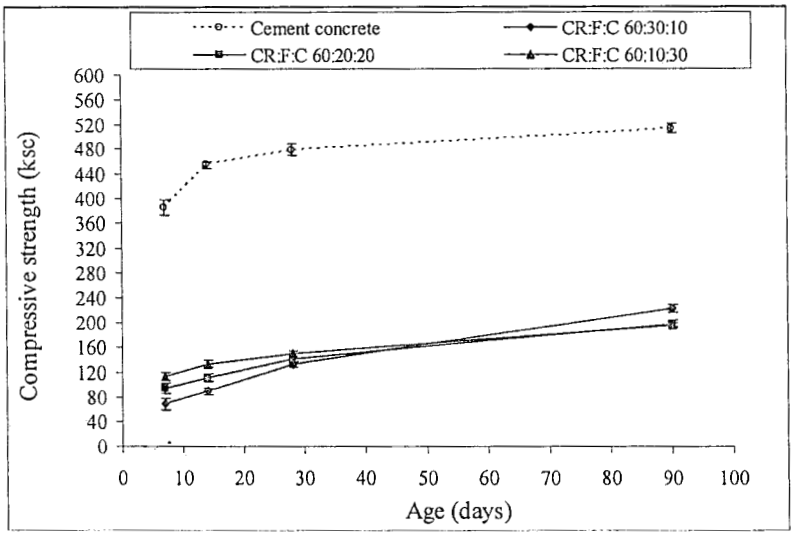
หมายเหตุ กำลังอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบ 3 ก้อน



(ก) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40

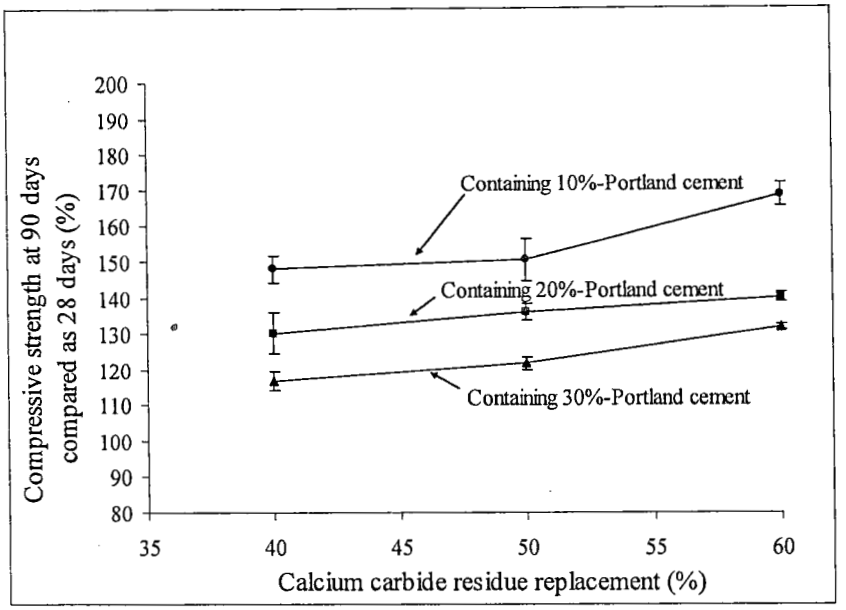


(ข) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50



(ค) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 60

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์



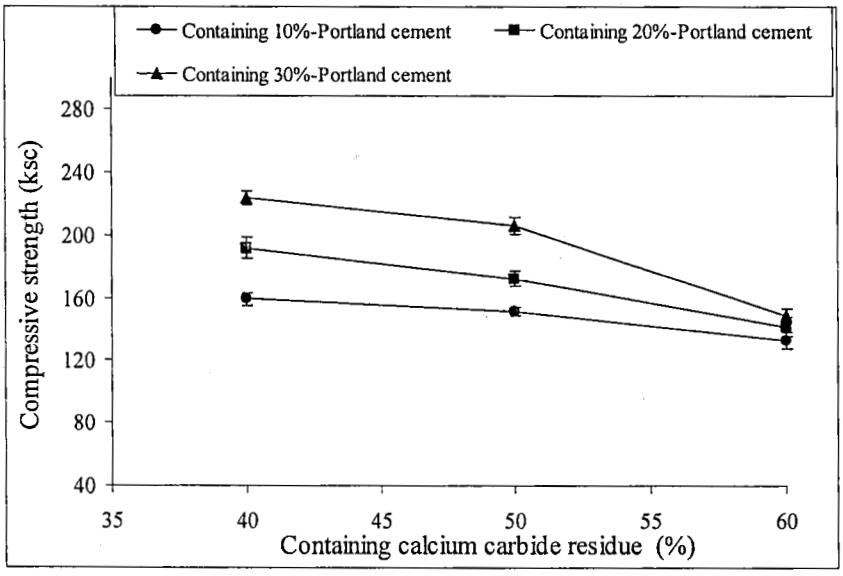
รูปที่ 4.14 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วันเทียบกับอายุ 28 วัน

4.3.2 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

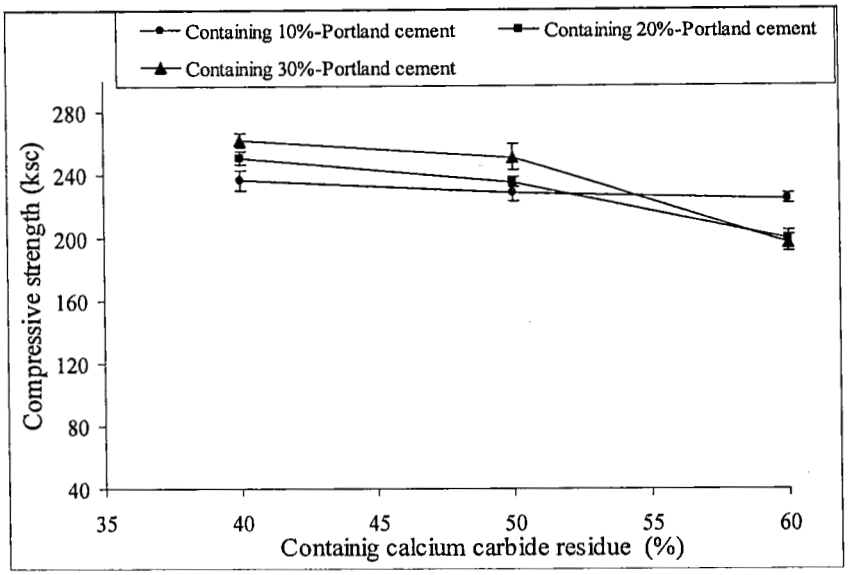
พิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15(ก) และ 4.15(ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง โดยมีผลเหมือนกันทั้งสองอายุทดสอบ เช่น คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน 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) รวมทั้งการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสัดส่วนมากขึ้น ทำให้ปริมาณของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณสูงขึ้น (เถ้าถ่านหินปริมาณน้อยลง) มีกำลังอัดต่ำลงดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งอาจเป็นเพราะกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีอนุภาคที่หยาบจึงทำ

ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนที่อายุ 90 วัน ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาจากเถ้าถ่านหิน เริ่มมีอิทธิพลต่อการเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังน่าจะเกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นหลัก

ถึงแม้ว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงจะมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่พบว่า การพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 ถึง 90 วัน ที่แสดงในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เทียบกับ 28 วัน (ดังรูปที่ 4.14) มีแนวโน้มสูงขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตส่งผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว โดยเฉพาะในช่วงหลังจาก 90 วัน เป็นต้นไป ดังนั้นถ้ามีการใช้งานจริงของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ควรให้การรับแรงเชิงกลในช่วงต้นต่ำลง เพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีต



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 90 วัน

รูปที่ 4.15 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ก) 28 วัน และ ข) 90 วัน

4.3.3 ความหนาแน่นของคอนกรีต

พิจารณาความหนาแน่นของคอนกรีตตามตารางที่ 4.4 พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นเพราะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงร้อยละ 93 ถึง 97 ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ความหนาแน่นคอนกรีตที่ต่ำลง จะเป็นผลดีในการใช้งาน เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างลงได้

4.3.4 การประยุกต์ใช้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงในงานก่อสร้าง

จากผลการศึกษาสมบัติด้านการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ได้จากโรงงานโดยตรงและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ แต่ต้องคำนึงถึงลักษณะของงานที่เหมาะสม ตามกำลังอัดที่มีผลทดสอบยืนยัน ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เสนอแนะส่วนผสมที่เหมาะสม ตามลักษณะของงานโดยใช้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ดังนี้

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

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

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

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมเถ้าถ่านหิน มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสองทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้ความแข็งแรงเชิงกลกับคอนกรีต และสามารถใช้กับงานที่ไม่ต้องการกำลังของคอนกรีตในระยะแรกสูง เป็นการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และเป็นการสนับสนุนในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้เป็นประโยชน์มากขึ้น

ตารางที่ 4.5 แนะนำส่วนผสมที่เหมาะสำหรับงานต่างๆ

ประเภทงาน / ส่วนผสมที่แนะนำ	คอนกรีตบล๊อกชนิดรับแรง คอนกรีตบล๊อกปูนพื้น (กำลังอัดที่ 28 วัน ช่วง 100 ถึง 200 กก/ซม^2)	ที่พักอาศัยชั้นเดียวขนาดเล็ก งานปูพื้นทั่วไป (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 50:40:10	✓	✓
CR:F:C 40:50:10	✓	✓
CR:F:C 40:50:10	✓	✓
CR:F:C 40:30:30	-	✓

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1) การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดัด และกำลังดึงมากขึ้น ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำลดลง

5.1.2) การใช้ปูนซีเมนต์ผสมในคอนกรีตร้อยละ 20 ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม

5.1.3) ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอิทธิพลต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วงต้น โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากขึ้น มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วง 28 วัน สูงขึ้น ส่วนที่อายุ 90 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

5.1.4) การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณสูงขึ้น ทำให้กำลังอัดคอนกรีตในระยะต้นลดลง แต่มีผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 90 วันเทียบกับอายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวที่ดีขึ้น

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

5.1.6) คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.1.7) คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของงานก่อสร้าง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วย เช่น การแทรกซึมของคลอไรด์ การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก เป็นต้น

5.2.2) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อใช้เป็นสารเร่งในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานเนื่องจากคอนกรีตดังกล่าวมีการก่อตัวช้า และกำลังอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำ

5.2.3) ควรมีการศึกษาถึงการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากน้ำทะเล

เอกสารอ้างอิง

1. ชรินทร์ นมรักษ์, วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล "ผลกระทบของปริมาณวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม 2545, โรงแรมโซฟิเทลราชาออคิด, จ.ขอนแก่น, หน้า MAT-178 ถึง MAT-183
2. บุญมาก รุ่งเรือง, 2541, การศึกษาส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 21-36
3. ปิติศานต์ กร้ำมาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เงาพิสดาร. (2539). การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 7(2), 65-75.
4. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 6, สมาคมคอนกรีตไทย
5. ศราวุธ เริงฤทธิ์, 2544, ผลกระทบของแคลเซียมคาร์ไบด์ไบด์และเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 152 หน้า.
6. ASTM C618-03. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
7. ASTM C311. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
8. ASTM C430-08. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
9. ASTM C204-11. Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
10. ASTM C188-09. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
11. ASTM C293. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
12. ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards;1997, V. 04.02.

13. ASTM C 143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", In 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 89-91.

14. ASTM C 496-96. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", In 2001 Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 273-276.

15. 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.

16. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement and Concrete Composites 27 (4) 425-428.

17. Jaturapitakkul C and Roongreung, B, (2003). Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. Journal of materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 5, pp. 470-475

18. 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.

19. 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.

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

21. 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.

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

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1) ณัฐกร แนบทองและ วิเชียร ชาลี, 2555, "การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต",วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา (ตอบรับตีพิมพ์)

บันทึกข้อความ

ส่วนงาน คณะวิทยาศาสตร์ งานวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา โทร.๓๐๔๒
ที่ศธ ๖๖๑๕.๑/วารสาร ๐๓๔ **วันที่** ๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๕
เรื่อง แจ้งผลตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

เรียน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี และคุณณัฐกร แนบทอง

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง **การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบด ในงานคอนกรีต** เพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์บูรพานั้น กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์บูรพาได้ดำเนินการตามขั้นตอนเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงขอแจ้งผลตอบรับการตีพิมพ์บทความดังกล่าว ซึ่งจะดำเนินการตีพิมพ์ในวารสาร**วิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๑ (มกราคม-มิถุนายน ๒๕๕๖)** ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ขอขอบคุณที่ท่านได้ให้ความไว้วางใจในการส่งบทความเพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความสนใจจากท่านในการส่งบทความในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภูษิต มัณฑะจิตร)
บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต

Utilization of original calcium carbide residue in concrete work

ณัฐกร แนบทอง[1] วิเชียร ชาลี [2*]

[1]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2*] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

(wichian@buu.ac.th)

NuttaKorn Nabtong[1], Wichian Chalee [2*]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

[2*]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Thailand, E-mail: wichian@buu.ac.th

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.** Email: wichian@buu.ac.th; Tel. 66-81-7915171

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

บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีด้านวัสดุก่อสร้างเพื่อผลิตวัสดุใหม่ที่มีสมบัติทดแทนวัสดุเดิมที่มีการใช้งานอยู่แล้ว ถือเป็นสิ่งจำเป็นในสภาวะปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษมากขึ้น ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่ง เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านราคา การผลิตที่ไม่ยุ่งยากและสามารถควบคุมสมบัติได้ง่าย 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) เป็นกากจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่ง ที่ประกอบด้วยด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก 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 ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูง 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) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ เป็นก้อนรูปทรงไม่แน่นอน ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 (Fe_2O_3) รวมกันได้ร้อยละ 96.3 (ตารางที่ 1)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงมีความชื้นอยู่มาก ลักษณะเหมือนดินเหนียวสีเทาเข้ม สามารถปั้นเป็นก้อนได้ 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 สำหรับสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังตารางที่ 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 ของกำลังอัดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงสุดเพียงร้อยละ 52 ของคอนกรีตควบคุมเท่านั้น อาจเป็นผลจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้มีอนุภาคที่หยาบเพราะไม่ได้ผ่านการปรับปรุงขนาดอนุภาคโดยการบดให้ละเอียด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ (Kiattikomol *et al.*, 2001 ; Roongreung, 2003) กลไกการให้กำลังของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากปฏิกิริยาสองส่วนได้แก่ 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 (คอนกรีต

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ที่มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาค่อนข้างสูง ตลอดจนมีอนุภาคที่กลมตัน มีขนาดคละที่ดีที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีอยู่แล้ว ตลอดจนมีผลการศึกษายืนยันได้ว่า เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องบดละเอียด (Chalee *et al.*, 2010) นอกจากนั้นพบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 28 วันแรก หลังจากนั้น กำลังอัดมีการพัฒนาในอัตราที่ลดลง กำลังอัดที่เพิ่มในช่วงต้นอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลักคือ C_3A และ C_3S ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้เกิดการก่อตัวช่วงต้นของคอนกรีต ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น (Neville, 1996) ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ประกอบกับอนุภาคที่หยาบของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ (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

ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

พิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง 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) รวมทั้งการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในสัดส่วนมากขึ้น ทำให้ปริมาณของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณสูงขึ้น (เถ้าถ่านหินปริมาณน้อยลง) มีกำลังอัดต่ำลงดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งอาจเป็นเพราะกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีอนุภาคที่หยาบจึงทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนที่อายุ 90 วัน ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาจากเถ้าถ่านหิน เริ่มมีอิทธิพลต่อการเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังน่าจะเกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นหลัก

ถึงแม้ว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงจะมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่พบว่า การพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 ถึง 90 วัน ที่แสดงในรูปร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เทียบกับ 28 วัน (ดังรูปที่ 3) มีแนวโน้มสูงขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตส่งผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว โดยเฉพาะในช่วงหลังจาก 90 วัน เป็นต้นไป ดังนั้นถ้ามีการ

ใช้งานจริงของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ควรให้การรับแรงเชิงกลในช่วงต้นต่ำลง เพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีต

ความหนาแน่นของคอนกรีต

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

การประยุกต์ใช้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงในงานก่อสร้าง

จากผลการศึกษาสมบัติด้านการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ได้จากโรงงานโดยตรงและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ แต่ต้องคำนึงถึงลักษณะของงานที่เหมาะสม ตามกำลังอัดที่มีผลทดสอบยืนยัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้เสนอแนะส่วนผสมที่เหมาะสม ตามลักษณะของงานโดยใช้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 4 ดังนี้

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

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

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

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมเถ้าถ่านหิน มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสองทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้ความแข็งแรงเชิงกลกับคอนกรีตและสามารถใช้กับงานที่ไม่ต้องการกำลังของคอนกรีตในระยะแรกสูง เป็นการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและเป็นการสนับสนุนในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้เป็นประโยชน์มากขึ้น

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

ปีติศานต์ กร้ำมาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เงาพิสดาร. (2539). การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 7*(2), 65-75.

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

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

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.

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	กาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (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	3.56	3.51	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	0.52	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.06	40.1	0.69

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม (กก./ม^3)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C)	กาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (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	4.0
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

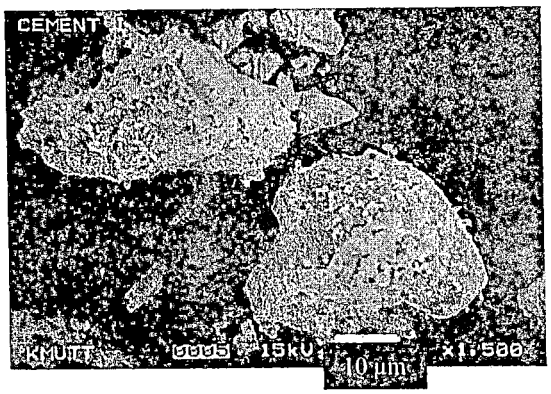
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีต

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**

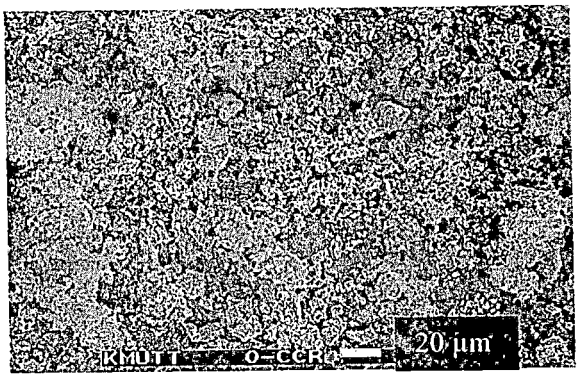
หมายเหตุ กำลังอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบ 3 ก้อน

ตารางที่ 4 แนะนำส่วนผสมที่เหมาะสำหรับงานต่างๆ

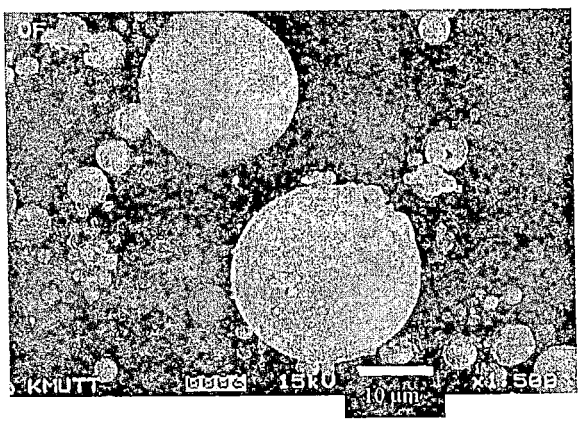
ประเภทงาน / ส่วนผสมที่แนะนำ	คอนกรีตบล็อกชนิดรับแรง คอนกรีตบล็อกปูนพื้น (กำลังอัดที่ 28 วัน ช่วง 100 ถึง 200 กก/ซม^2)	ที่พักอาศัยชั้นเดียวขนาดเล็ก งานปูพื้นทั่วไป (กำลังอัดที่ 28 วัน มากกว่า 200 กก/ซม^2)
CR:F:C 60:30:10	✓	-
CR:F:C 60:30:10	✓	-
CR:F:C 60:10:30	✓	-
CR:F:C 50:40:10	✓	-
CR:F:C 50:30:20	✓	-
CR:F:C 50:20:30	✓	-
CR:F:C 40:50:10	✓	-
CR:F:C 40:40:20	✓	-
CR:F:C 40:30:30	✓	-



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

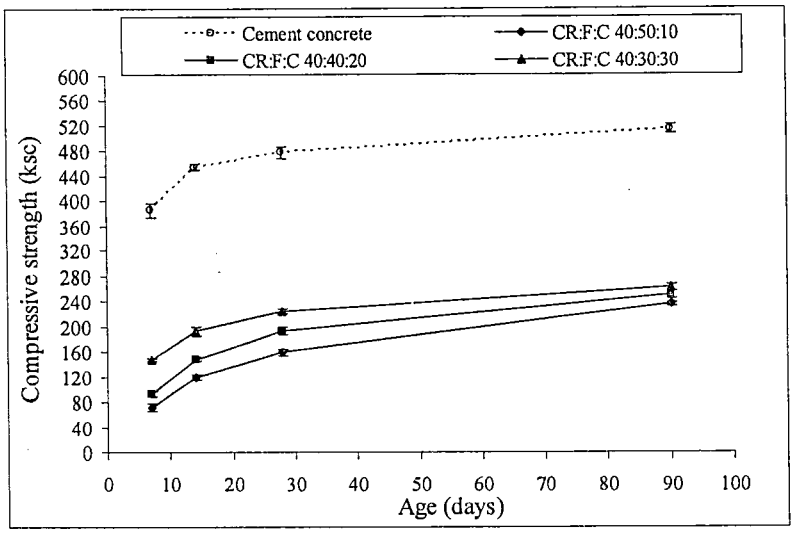


ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์

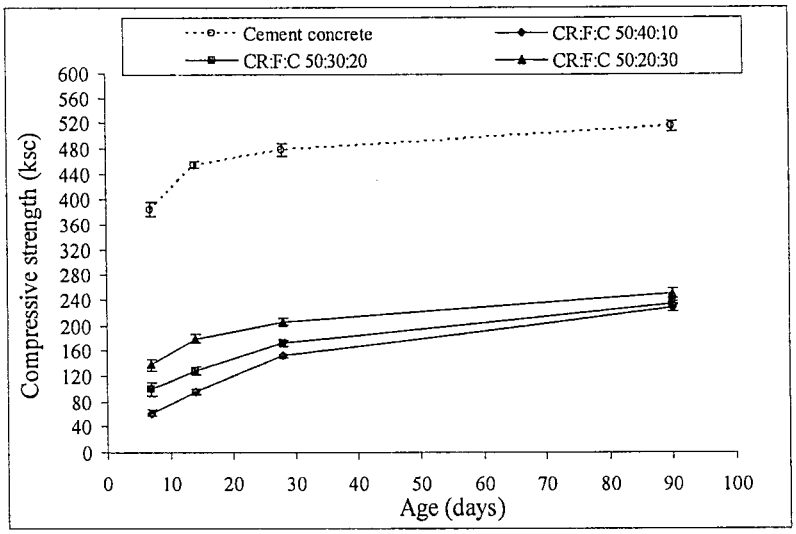


ค) เถ้าถ่านหิน

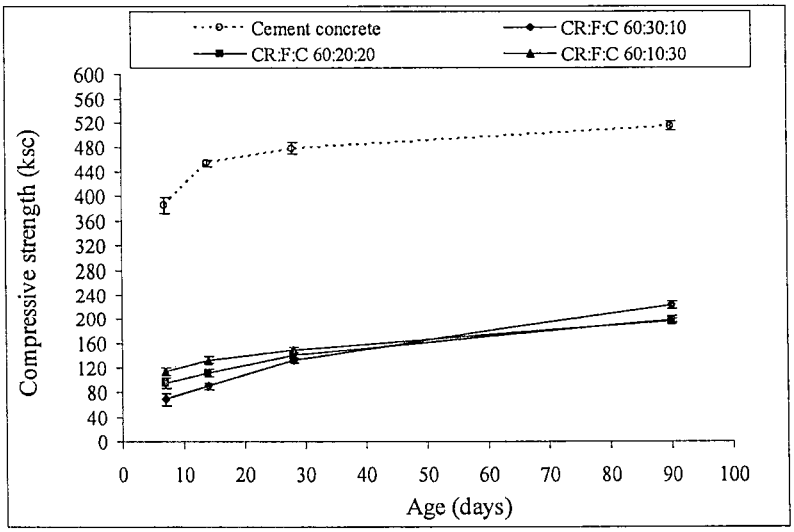
ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน



(ก) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40

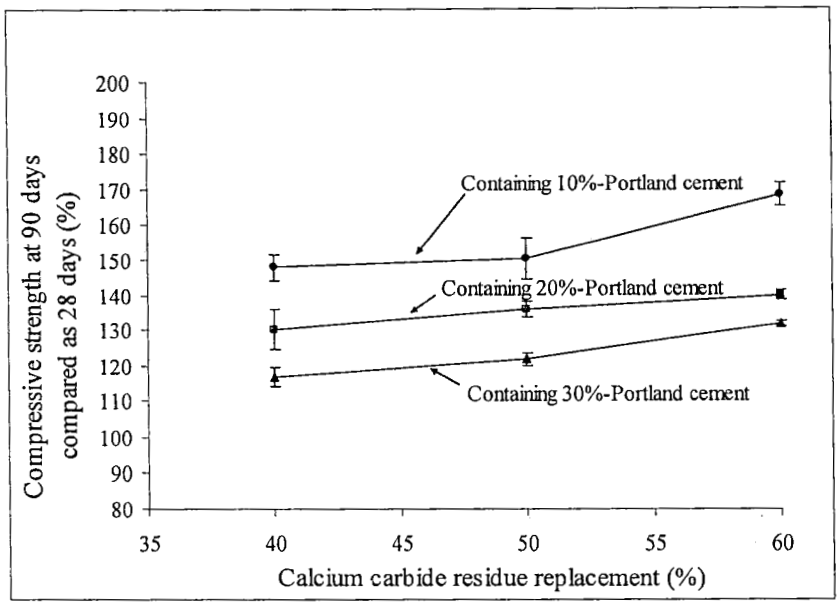


(ข) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50

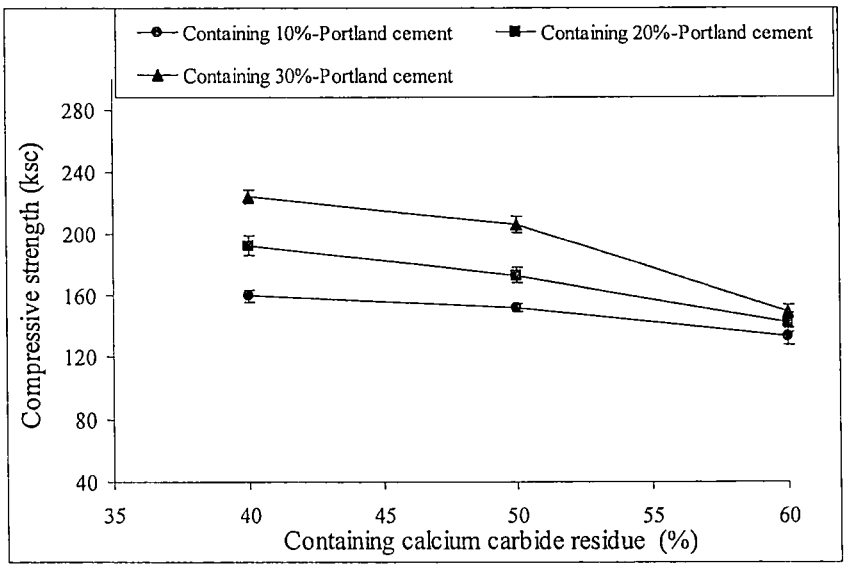


(ค) ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 60

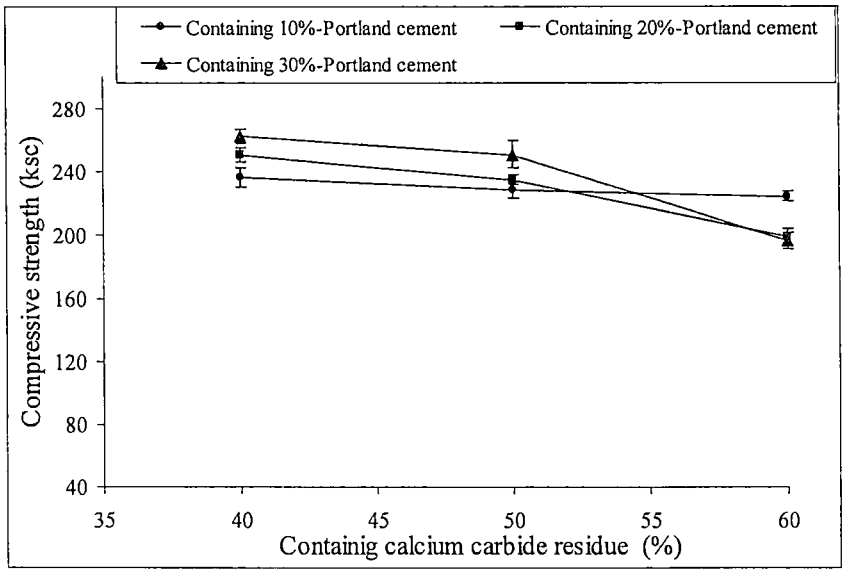
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์



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