

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



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลและในสารละลาย
ซัลเฟตโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์

(Utilization of calcium carbide residue in corrosion protection for reinforced
concrete under marine environment and sulfate solution)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

7 ก.ค. 2558

354924

04-016618

กันยายน พ.ศ. 2556

เริ่มบริการ

๗ 6 ค.ค. 2558

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลและในสารละลายซัลเฟตโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 มีงบประมาณทั้งโครงการ 357,700 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน
งบประมาณ : 357,700 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงที่มีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ส่วนผสมแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 และ 0:0:100 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28, 90 และ 180 วัน เพื่อศึกษาผลของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีต ได้ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 90 และ 180 วัน นอกจากนั้นเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม³ โดยทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้ม 20 และ 50 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก หลังจากแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตมากขึ้นส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มทำให้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีขึ้นถึงแม้กำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา การลดลงของกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟตมีมากขึ้น ตามปริมาณการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหิน, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, สิ่งแวดล้อมทะเล, สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Abstract

This research aimed to utilize calcium carbide residue (CR) and fly ash (F) mixtures for corrosion protection of reinforced concrete under marine environment. The original CR from industries with the particles passed a sieve No.8 was used. The ratio of 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 and 0:0:100 by weight of CR : Mae Moh fly ash : Portland cement were used as a binder. The concrete cylinder specimens of 100 mm x 200 mm were prepared for compressive strength test at 28, 90 and 180 days after curing in the water at room temperature. In order to study the effect of magnesium sulfate solution on concrete, the compressive strength was also investigated after being exposed to magnesium sulfate solution for 90 and 180 days. In addition, concrete cube specimens of 150x150x150 mm³ were cast and steel bars of 9-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at the covering depth of 20 and 50 mm in concrete. These concrete specimens were tested for steel corrosion after exposed to a tidal zone of seawater for 90 and 180 days. The result showed that the use of CCR in concrete can be efficiently employed to protect the steel corrosion in concrete, although the compressive strength of CCR concrete was lower than normal concrete. The loss of compressive strength due to magnesium sulfate (MgSO₄) solution founded to be increased with increasing of CCR replacement.

Keywords: calcium carbide residue, fly ash, steel corrosion, marine, magnesium sulfate solution

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่เช่าตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตให้เป็นรูปธรรมมากขึ้น ตลอดจนช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ และส่งเสริมการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพในงานคอนกรีต

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทากแคลเซียมคาร์ไบด์	5
2.2 เถ้าถ่านหิน	6
2.3 การกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	9
2.4 ความเสียหายของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทางทะเล	12
2.5 กลไกการกักกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต	13
2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	15
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์	16
2.8 ระดับคลอไรด์วิกฤติที่มีผลต่อเหล็กเสริมคอนกรีต	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	20
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	20

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	23
3.3 วิธีการศึกษา	25
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	30
4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	30
4.2 สมบัติของน้ำทะเล	32
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต	33
4.4 ผลของสารละลายซัลเฟตต่อกำลังอัดของคอนกรีต	37
4.5 การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผล	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต	25
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	31
4.2 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 90 และ 180 วันหลังบ่มในน้ำประปา	33
4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบคาร์ไบด์ เมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน	38

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 พื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ของโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน	2
2.1 บริเวณทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ขณะที่อยู่ในสภาพแห้ง	6
2.2 กระบวนการกักก่ร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	15
3.1 การเตรียมกากแคลเซียมคาร์ไบด์	21
3.2 ถ้ำถ่านหิน	21
3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	21
3.4 ทราแม่่น้ำ	22
3.5 หินปูน	22
3.6 สารลดน้ำพิเศษ	22
3.7 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8	23
3.8 เครื่องผสมคอนกรีต	23
3.9 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 มมx200 มม	23
3.10 ชุดการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต	24
3.11 เครื่องทดสอบกำลังอัด	24
3.12 การผสมคอนกรีต	26
3.13 เตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	27
3.14 ตัวอย่างทดสอบที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	27
3.15 เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการกักก่ร่อนเหล็กเสริม	28
3.16 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	28
3.17 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	29
3.18 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก	29
4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน	32
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับอายุคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา	35
4.3 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา (ก) 28 และ (ข) 180 วัน	37
4.4 การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม. หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา (ก) 90 และ (ข) 180 วัน	41

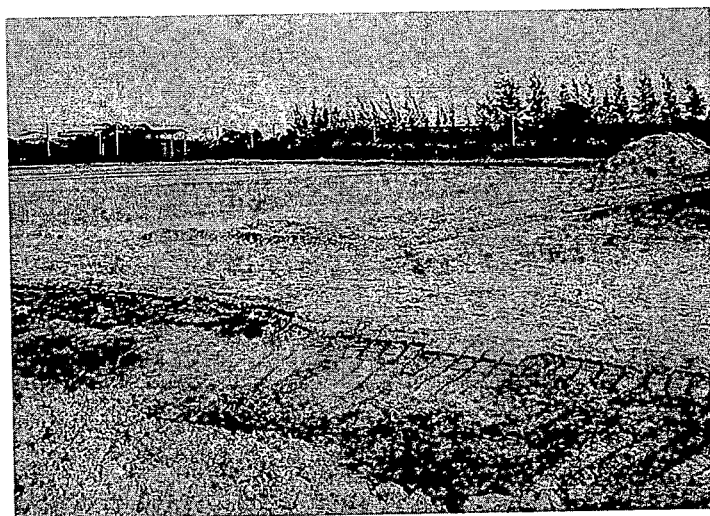
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ในงานคอนกรีตและอิฐคอนกรีต ในปี พ.ศ.2550 ประเทศไทยใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงถึง 26 ล้านตัน (สถิติอุตสาหกรรม, 2550) และในอุตสาหกรรมการก่อสร้างส่วนใหญ่ล้วนใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักในการหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างประเภท พื้น, คาน และ เสา ทั้งสิ้น ในขณะที่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานความร้อนในการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ (Chindaprasirt et al., 2009) รายงานว่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดผลกระทบด้านต่างๆ ต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ปัญหาเรื่องฝุ่นละอองและชั้น โอโซนในบรรยากาศถูกทำลาย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างจึงได้พยายามหาวัสดุมาใช้ทดแทนหรือแทนที่ปูนซีเมนต์โดยยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติทั้งด้านกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) คือกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งก๊าซอะเซทิลีนนี้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเชื่อม การตัดโลหะ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ติดไฟ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น ในปัจจุบันพบว่าความต้องการใช้ก๊าซอะเซทิลีนของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปีทางโรงงานที่ทำการสำรวจต้องทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงถึงปีละประมาณ 12,000 ตัน (Makaratat et al., 2009) ส่วนใหญ่นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปถมที่ บางส่วนก็นำไปทิ้งหรือกองไว้เป็นบริเวณกว้างจึงส่งกลิ่นไปทั่วบริเวณ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณข้างเคียง นอกจากนี้ความเป็นด่างที่สูงมากของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ดินในบริเวณพื้นที่ทิ้งมีความเป็นด่างสูงจึงไม่สามารถใช้เป็นพื้นที่ทำการเกษตรได้ รูปที่ 1.1 แสดงพื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ของโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน



รูปที่ 1.1 พื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ของ โรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน

จากปัญหาด้านมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้มีการศึกษาเพื่อนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุประสาน เพื่อแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต ซึ่งเป็นการกระตุ้นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์รวมทั้งการกองเก็บกากแคลเซียมคาร์ไบด์

โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล ส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมี C_3A ในปริมาณที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ความเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟตในน้ำทะเลกับ C_3A ในคอนกรีตลดลงได้ อย่างไรก็ตามในสภาวะแวดล้อมทะเล มีคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลเสียต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมส่งผลให้น้ำตักของเหล็กเสริมลดลงซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงด้วย ดังนั้นในการพิจารณาคอนกรีตที่นำมาใช้งานในสภาวะดังกล่าว จึงต้องพิจารณาถึงกลไกการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัส เช่น บริเวณชายฝั่งทะเลที่มีน้ำขึ้นน้ำลง สาเหตุการทำลายจะเกิดจากคลอไรด์เป็นหลัก ซึ่งการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้รายงานไว้ว่า คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นบริเวณใต้ท้องทะเลลึกที่โครงสร้างไม่ได้สัมผัสกับน้ำและ ออกซิเจนปัญหาเนื่องจากคลอไรด์ก็น้อยลงแต่ปัญหาซัลเฟตจะชัดเจนมากขึ้นการเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ก็จะถูกเหมาะสมกว่า

โดยปกติคอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูง ซึ่งช่วยป้องกันเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม แต่ถ้าคลอไรด์จากน้ำทะเลซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนเกินปริมาณคลอไรด์วิกฤต จะทำให้ออกไซด์ฟิล์มถูกทำลายและเมื่อความชื้นและออกซิเจนเพียงพอจะส่งผลให้เหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตเป็นสนิมได้ เมื่อพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยาและให้กำลังของคอนกรีตที่ใช้กาก

แคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CaC_2) เป็นกากจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่ประกอบด้วยต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกกับสารประกอบซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลานได้ โดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเคมีในการผลิตก๊าซอะเซทิลีน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งถ้านำปูนซีเมนต์มาผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และผสมเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีสารประกอบซิลิกาและอลูมินา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน และทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังได้ นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม น่าจะต้านทานการทำลายเนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดี เพราะกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นสารที่เป็นด่าง ตลอดจนการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมคอนกรีตลงก็จะส่งผลให้ลด C_3A ลงด้วย และน่าจะส่งผลให้ลดการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ ดังนั้นแนวทางในการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กที่เสริมคอนกรีต และการป้องกันการป้องกันการทำลายคอนกรีตจากสารประกอบซัลเฟตโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับงานเทคโนโลยีคอนกรีตเพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังอัด และเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน

1.2.2) ศึกษาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

1.2.3) ศึกษาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานต่อการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเมื่อแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

1.2.4) ศึกษาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานต่อการต้านทานทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น

ร้อยละ 5

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะการศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้านหินเพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงาน โดยตรงที่มีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ส่วนผสมแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้านหินและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 และ 0:0:100 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28, 90 และ 180 วัน และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 90 และ 180 วัน นอกจากนั้นเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่จะฝังเหล็กที่ระยะหุ้ม 20 และ 50 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก หลังจากแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 90 และ 180 วัน

รายละเอียดในการศึกษาจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กัน โดยหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุคอนกรีต 28, 90, 180 วันหลังจากบ่มในน้ำ

กลุ่มที่ 2 ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟต โดยทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุเวลา 90, 180 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดในกลุ่มที่บ่มในน้ำประปาที่อายุเดียวกัน

กลุ่มที่ 3 ทดสอบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้ส่วนผสมเดียวกับ 2 กลุ่มแรก และทำการฝังเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก เท่ากับ 20 มม. และ 50 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาครบ 28 วัน แล้วนำไปแช่ในน้ำทะเลบริเวณน้ำขึ้น-ลง เมื่อครบอายุ 90, 180 วัน นำมาวัดการเกิดสนิมเหล็กในเหล็กเสริม โดยจะหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 มม.³

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินเป็นวัสดุประสานต่อการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตและการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตเมื่อแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

1.4.2 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.4.3 ศึกษาแนวทางการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดละเอียดในงานคอนกรีต

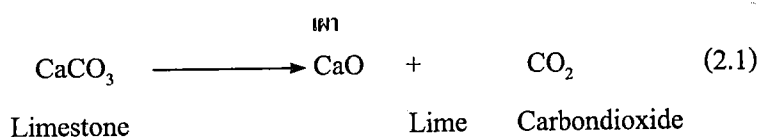
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

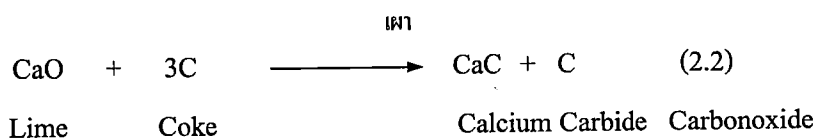
2.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับน้ำในกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมงานเชื่อม โดยปกติกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ปล่อยทิ้งจากโรงงานมีลักษณะเป็นโคลนเหลวสีเทาอมขาว เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนและแห้งตามธรรมชาติแล้วกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะจับตัวเป็นก้อนและมีสีขาวเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมีปริมาณลดลง สำหรับปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในแต่ละปีที่โรงงานแห่งหนึ่งต้องทิ้งและไม่สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้

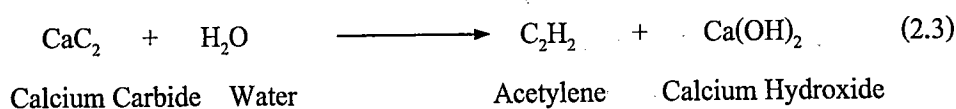
กากแคลเซียมคาร์ไบด์เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งได้จากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์มารวมกับน้ำ การเตรียมก๊าซอะเซทิลีนทำได้โดยใช้หินปูน (CaCO_3) มาเผาให้เป็นปูนขาว (Lime) ในเตาเผา โดยใช้ถ่านโค้ก (Coke) เป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงในสมการที่ (2.1)



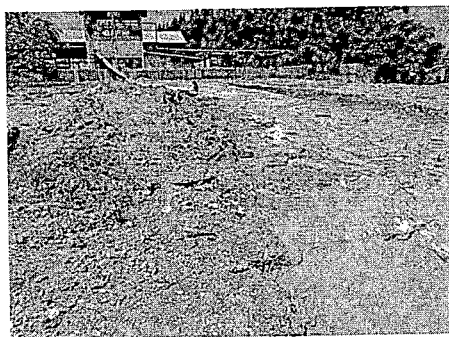
นำปูนขาวที่ได้จากการเผาหินปูนมาผสมกับถ่านโค้ก แล้วเผาในเตาหลอมภายใต้อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส เผาจนกระทั่งปูนขาวและถ่านโค้กหลอมเป็นของเหลวเนื้อเดียวกัน ปล่อยให้เย็นลงเพื่อให้อุณหภูมิลดลง ของเหลวที่เกิดจากปูนขาวและถ่านโค้กหลอมเหลวรวมกัน คือ แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว แสดงดังสมการที่ (2.2)



แคลเซียมคาร์ไบด์จะเปลี่ยนสถานะอยู่ในรูปของแข็งเป็นก้อนๆ หลังจากอุณหภูมิเริ่มเย็นลง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดให้เป็นก้อนเล็กๆ แล้วร่อนผ่านตะแกรงออกมาตามขนาด ก๊าซอะเซทิลีนจะได้ออกมาจากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีสภาพเป็นของแข็งมาทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังสมการที่ (2.3)



กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากสมการ (2.3) พบว่า ถ้าใช้ CaC_2 64 กรัม จะได้ Ca(OH)_2 74 กรัม และก๊าซเซทีลีนเท่ากับ 26 กรัม นั้นหมายความว่าหากใช้ CaC_2 ผลิตก๊าซเซทีลีน 1 ส่วนจะได้กากแคลเซียมคาร์ไบด์อยู่ในรูปของ Ca(OH)_2 เท่ากับ 1.16 ส่วน ปัจจุบันพบว่ามีการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์สะสมอยู่มาก เนื่องจากไม่มีการใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากนัก และนำไปทิ้งเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลทำให้ดินบริเวณที่ทิ้งมีความเป็นด่างสูง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการกำจัดกากเหล่านี้เป็นอย่างมาก ปัจจุบันวิธีการกำจัดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำโดย ถมที่แทนดินซึ่งทำให้ดินบริเวณนั้นมีความเป็นด่างสูง และส่งกลิ่นไปทั่วบริเวณ โดยแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บริเวณทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ขณะที่อยู่ในสภาพแห้ง

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยทั่วไปจะมีสีเทาเข้ม แต่เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากจนแห้งจะมีสีเทาขาว เนื่องจากโดยปกติแล้วกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะมีความชื้นในตัวสูงมากทำให้มีสีเข้มและเมื่ออบจนละเอียดแล้วจะมีสีเทาอ่อนข้างเข้มขึ้นอยู่กับความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ส่วนรูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคล้ายปูนซีเมนต์

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีค่าของแคลเซียมออกไซด์ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 51.94 ส่วนปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณร้อยละ 63.94 ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.36 และมีน้ำหนักสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) คิดเป็นปริมาณร้อยละ 41.72 สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าเท่ากับ 12.23 (Makaratat et al., 2009)

2.2 ถ้ำถ่านหิน

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุดและมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้

ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียสของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาแบบนี้ถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO₄ สูงได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้ถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไทต์ แมกเนไทต์ มุลไลต์ และควออตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกวาง

2.2.1 รูปร่างและลักษณะของถ่านหิน

เมื่อถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้ถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว ถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้ถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง ถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

ถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในถ่านหิน และยังมีถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าฟลิโรสเฟีย ถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของถ่านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากถ่านหินกลวงเป็นถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบาและคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง

ถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน

ส่วนเถ้าถ่านหินก้นเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากเถ้าถ่านหินกลวงเป็นเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.²/กก.

2.2.2 ขนาดและความละเอียดของเถ้าถ่านหิน

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

2.2.3 ความถ่วงจำเพาะเถ้าถ่านหิน

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

2.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO, Na₂O, K₂O, SO₃ เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI)

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 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

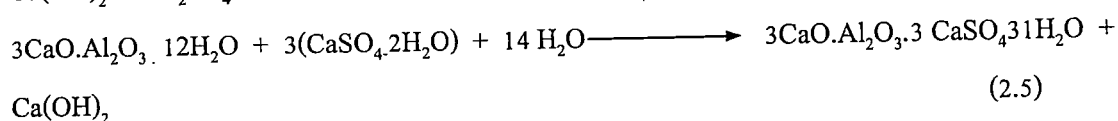
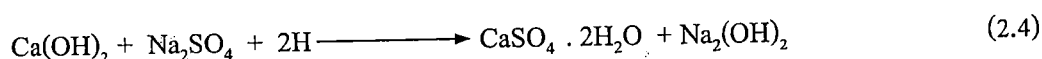
2.3 การกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (Neville, 1996)

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4), แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ความรุนแรงของการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น ซึ่งสารซัลเฟตที่อยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และการทำลายของซัลเฟตจะไม่เกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงอย่างมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อย ๆ ซึมเข้าภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้ กระบวนการกักกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำมาเสนอเฉพาะกระบวนการกักกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟตกับปูนซีเมนต์เท่านั้น โดย

จะนำเสนอเฉพาะสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายคอนกรีต และพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ในสถานะแวดล้อมทะเล ในบริเวณดินเค็ม เป็นต้น

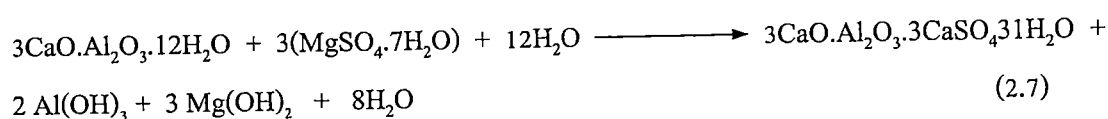
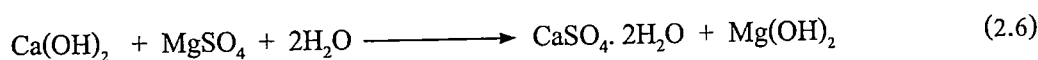
2.3.1. กระบวนการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ต่อคอนกรีต

เริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.4) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.5) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตไอออนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหลายนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือ Ettringite



2.3.2. กระบวนการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ต่อคอนกรีต

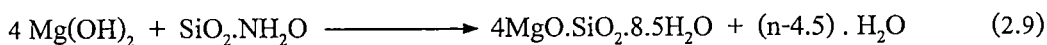
ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.6) จากนั้นยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาตามสมการที่ (2.5) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ (2.7) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.5) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ 2.9



ยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้น มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิมมีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปทำให้กำลังคอนกรีตลดลง การลดปริมาณ C_3A ให้น้อยลงจะทำให้ปริมาณแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกักกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 ได้กำหนดปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนทนซัลเฟตไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ACI 318 แนะนำว่าหากใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A มากถึงร้อยละ 10 ควรใช้ W/C ต่ำคือประมาณ 0.4 ซึ่งจะทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงและการกักกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตก็จะน้อยลงด้วย ในกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงคือเมื่อซัลเฟตในดินร้อยละ 0.2 หรือมีซัลเฟตในน้ำ 1,500 ถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ค่า W/C ที่ใช้ไม่ควรเกิน 0.45 และควรใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และกรณีที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงมาก คือมีซัลเฟตในดินเกินร้อยละ 2.0 หรือมีซัลเฟตในน้ำเกินกว่า 10,000 ppm นอกจากคอนกรีตต้องมี W/C ไม่เกิน 0.45 แล้ว ยังต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เป็นต้น ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าวัสดุปอซโซลานสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะดังกล่าวได้โดยสรุปแล้วกระบวนการกักกร่อนทางเคมีเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตทำให้ได้สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตดังนี้

- แคลเซียม โพลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งโดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ C_3A และ C_4AF ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนักดังที่กล่าวมาแล้ว

- แคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมจะมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารดั้งเดิม ถึง

2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีต สูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม อันเนื่องจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเพื่อลด C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะเป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้

- แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาวและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

2.3.4 วิธีการวัดความต้านต่อซัลเฟต (Neville, 1996; ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

1) ทดสอบกำลังอัด

การทดสอบการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์สามารถทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่แช่อยู่ในสารละลายซัลเฟตโดยตรง โดยตัวอย่างคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่มีการสูญเสียกำลังอัดน้อย แสดงว่าต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้สูง

2) ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์

การทดสอบการขยายตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ซึ่งนำแท่งมอร์ตาร์ขนาดหน้าตัด 25x25 มม. ยาว 285 มม. โดยมอร์ตาร์มีกำลังอัดระหว่าง 19 ถึง 21 เมกะปาลกาล แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 จากนั้นวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ตามอายุที่กำหนด หากแท่งมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวน้อยแสดงว่าวัสดุประสานสามารถต้านทานการกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้

2.4 ความเสียหายของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทางทะเล (Mehta, 1991)

คอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ อาจเกิดความเสียหายหรือขาดความทนทาน อันเนื่องจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องไม่เหมาะสม ความเสียหายอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งาน โครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงเวลาหนึ่งและความเสียหายอาจเกิดมาจากสาเหตุภายใน หรือภายนอกเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 สาเหตุ คือ สาเหตุด้านกายภาพ เช่น ความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ, คลื่น, แรงดันน้ำ, ทางชีวภาพ น้ำหนักบรรทุกมากเกินไป เป็นต้น และสาเหตุด้านเคมี เช่น มีการซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งหลักๆ ได้แก่ คลอไรด์ และ ซัลเฟต (Chalee et al., 2010)

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่ง จะเกิดความเสียหายทั้งทางกายภาพและทางเคมีได้หลายประการ เช่น การกัดกร่อนโดยซัลเฟต, การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์,

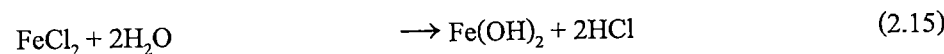
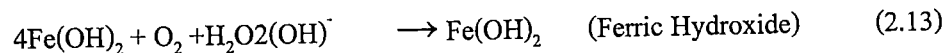
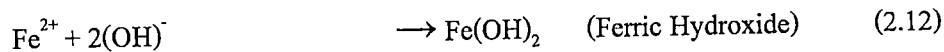
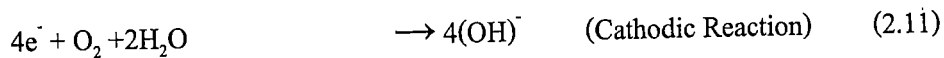
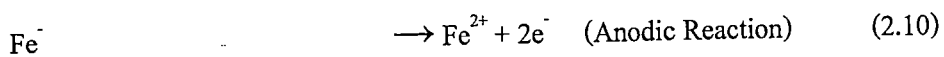
การตกผลึกของเกลือ, การสึกกร่อนจากการกัดสีของทรายและคลื่นทะเลหรือแม้แต่การเสื่อมสภาพที่เกิดจากสาเหตุทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งความเสียหายจากสาเหตุเหล่านี้มีความรุนแรงแตกต่างกันแล้วแต่สภาพแวดล้อม ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อยเนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย เมื่อคอนกรีตอยู่ใต้น้ำทะเลช่องว่างภายในคอนกรีตจะเป็นช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำ ทำให้ออกซิเจนที่ละลายน้ำได้แพร่กระจายเข้าไปในคอนกรีตได้ต่ำ เป็นผลให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหามากนัก แต่ในบริเวณระหว่างระดับน้ำขึ้นน้ำลงสูงสุดเป็นบริเวณที่เกิดความเสียหายรุนแรงที่สุด เนื่องจากเป็นสภาวะที่คอนกรีตเปียกและแห้งสลับกัน ช่วงที่ผิวคอนกรีตแห้ง น้ำจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว โดยถ้าสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ จะทำให้ความเข้มข้นของเกลือในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าน้ำ (Chalee et al., 2007) และในสภาวะเปียกสลับแห้งนี้ยังทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึมออกจากคอนกรีต เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจึงทำให้เกิดเป็นคราบหินปูนบนผิวคอนกรีตปรากฏการณ์นี้ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งช่วยเร่งให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้เร็วขึ้น (Broomfield,1996) ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมดังกล่าวเพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีความคงทนแข็งแรง ขอบเขตของความเสียหายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฉพาะที่มาเกี่ยวข้องกับอันได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วน้ำทะเลมีเกลือต่างๆ ละลายอยู่ประมาณร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเกลือต่างๆ เหล่านี้มีไอออนของสารเคมีต่างๆ ละลายอยู่ ส่วนใหญ่ได้แก่ ไอออนของคลอไรด์, โซเดียม, ซัลเฟต, แมกนีเซียม, แคลเซียม, โบรอน, โพแทสเซียม และอื่นๆ ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตอาจทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงบ้าง

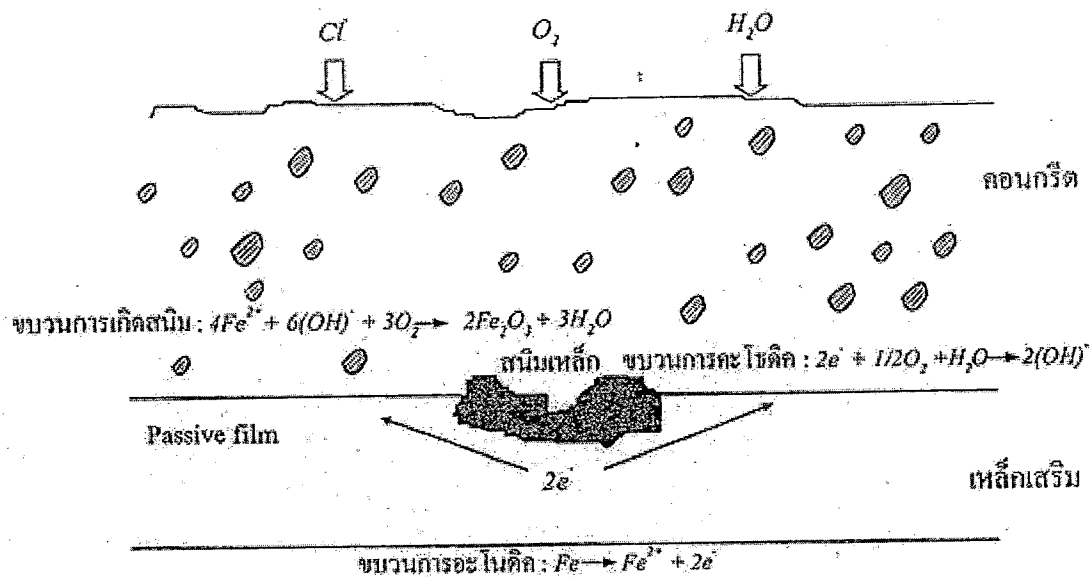
2.5 กลไกการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต (Broomfield,1996)

คอนกรีตช่วยป้องกันเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตจากการกัดกร่อน โดยมีสภาพความเป็นด่างของน้ำในโพรงสูง ค่า pH ของน้ำในโพรงมีค่าระหว่าง 12.5-13.5 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆ เคลือบผิวอยู่ ซึ่งช่วยป้องกันความชื้นและออกซิเจนทำให้ไม่เกิดสนิม แต่เมื่อไอออนคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงเหล็กเสริมและมีปริมาณมากพอจะทำลายชั้นฟิล์ม ประกอบกับเมื่อมีออกซิเจนและความชื้นที่เหมาะสม กระบวนการไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นทำให้บริเวณชั้นฟิล์มถูกทำลายมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วลบ (Anodic) ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Reaction) ดังสมการที่ (2.10) อิเล็กตรอน

ที่เกิดขึ้นจะวิ่งผ่านไปยังบริเวณชั้นฟิล์มไม่ได้ทำลายซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) และเกิดปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ดังสมการที่ (2.11) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) วงจรกระแสไฟฟ้าจะไหลระหว่าง 2 จุดที่เกิดปฏิกิริยาแอโนดและปฏิกิริยาแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแอโนดจะมีแรงดันมากกว่าจะวิ่งไปหาปฏิกิริยาแคโทด ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) ที่ขั้วลบส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนกลายเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) ดังสมการที่ (2.12) และสมการที่ (2.13) ไอออนของเหล็กที่เกิดอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนคลอไรด์ (Cl^-) เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) ดังสมการที่ (2.14) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นสนิมเหล็กเพิ่ม ดังสมการที่ (2.15)



สิ่งที่เกิดภายหลังการกัดกร่อนเหล็กเสริมแบ่งออกเป็น 2 อย่าง ได้แก่ อย่างที่หนึ่ง กระบวนการเกิดการกัดกร่อนที่แอโนดลดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ทำให้องค์อาคารนั้นรับน้ำหนักได้น้อยลง ในการเชื่อมต่อการกัดกร่อนคลอไรด์เกิดเฉพาะจุดแอโนดเล็กๆ ทำให้เกิดเป็นหลุมในเหล็กเสริม อย่างที่สองในบริเวณขั้วบวกจะเกิดสนิมมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากประมาณ 4-6 เท่า จนดันให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่กะเทาะออก ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยปกติเกิดกับแนวขนานกับเหล็กเสริม (Broomfield, 1996)



รูปที่ 2.2 กระบวนการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ไอออนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นในน้ำ ดังนั้นการเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ก็ต่อเมื่อมีอยู่ในระบบโพรง กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดซึมน้ำแบบคาปิลลารี (Capillary Suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนในน้ำในโพรงที่อยู่หนึ่ง ในกรณีแรกจะเกิดในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้ง น้ำจะเสมือนเป็นขดขานที่พาไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ในกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิ่มตัว น้ำจะเสมือนเป็นตัวกลางให้ไอออนคลอไรด์ผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกันจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น

คลอไรด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท อย่างแรกคือคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บไว้ สามารถแบ่งได้เป็นคลอไรด์ที่กักเก็บไว้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Bound) โดยไอออนคลอไรด์ได้ถูกรวม (Incorporate) เข้ากับผลิผลไฮดรอกไซด์และปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical Bound) ไอออนของคลอไรด์จะถูกดูดซับที่ผิวของผลิผลไฮดรอกไซด์ เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น (Plangngern et al., 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และอย่างที่ที่สองคือ คลอไรด์อิสระเป็นสารละลายคลอไรด์ที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสามารถแพร่ไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าได้ แต่ถ้าคลอไรด์แพร่เข้าไปจะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเพราะไอออนคลอไรด์ที่หนักกว่าจะเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อิสระแพร่เข้าไปถึงตำแหน่งของเหล็กเสริมแล้วทำให้ค่า pH ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริมลดลงเหลือประมาณ 9

ปริมาณของคลอไรด์อิสระที่มีอยู่ในคอนกรีต สามารถทราบได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอไรด์ในช่องว่างของคอนกรีต สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บดั่งนั้นถ้าสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้มากคลอไรด์อิสระก็จะมีน้อย ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานนานขึ้น

2.7 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์

ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการกักกันคลอไรด์ของคอนกรีต โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ มีดังต่อไปนี้

2.7.1 ระยะเวลาของคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กเสริม

อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับความพรุนและระยะของคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กเสริมความพรุนของคอนกรีต หมายถึง โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตถ้าโพรงอากาศน้อยไม่ต่อเนื่องกันก็จะทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ยังมีระยะคอนกรีตหุ้มมากเท่าใด เวลาที่ใช้จนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับของเหล็กเสริมถึงวิกฤติจะมากขึ้น ซึ่งระยะคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กเสริมจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต หากคุณภาพของคอนกรีตดีจะสามารถลดระยะหุ้มลงได้ (Chalee et al., 2007) นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มต่างส่งผลต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการควบคุมอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ จะต้องบ่มคอนกรีตหุ้มให้ดี และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำตลอดแนวของเหล็กเสริม

2.7.2 อุณหภูมิ

บริเวณเสี่ยงอันตรายจากสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเลของ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กควรคำนึงถึงช่วงอุณหภูมิด้วย โดยเฉพาะในสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเลร้อน อุณหภูมิมีผลต่อขบวนการแพร่ อัตราการแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการทดลองสามารถอธิบายถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ ประสิทธิภาพของคอนกรีตคุณภาพสูง (Soloka, 1993) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส กระบวนการแพร่ (รวมคลอไรด์ด้วย) นิยมใช้สมการของอาร์เนียส อัตราการแพร่ของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในรูปของลอการิทึม กับส่วนของอุณหภูมิที่มีหน่วยเป็นเคลวินจะเป็นเส้นตรง โดยในสภาพอากาศร้อนเวลาที่คลอไรด์ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ถึงเหล็กจะสั้นกว่าสภาพอากาศอุณหภูมิปานกลาง และสังเกตว่าอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

2.7.3 ชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะปริมาณ C_3A จะมีอิทธิพลต่อระยะเวลาเริ่มต้นการกักคร่อนดังแสดงในรูปที่ 2.5 คลอไรด์จะเข้ามารวมกับสารผลิตภัณฑ์ของ C_3A เกิดทั้งหมดยกกลายเป็นเกลือฟริเดิล (Friedels Salt) ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะขึ้นกับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ (C_3A) ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์มีความสามารถในการกักเก็บมากเท่าไรก็ย่อมจะหน่วงการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้ช้าลงเท่านั้น และจะทำให้ช่วงเริ่มต้นของการกักคร่อนช้าลงอีก การเริ่มต้นการกักคร่อนประมาณได้จากการทดสอบกระแสไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมรรถนะความทนทาน ซึ่งรวมไปถึงผลกระทบของการแพร่และการเก็บกักปริมาณคลอไรด์โดยผลิตภัณฑ์ C_3A ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มีปริมาณ C_3A มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตมีความทนทานต่อการกักคร่อนของคลอไรด์ได้ดีกว่า พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์มากขึ้นการกักคร่อนของเหล็กเสริมจะมีค่าน้อยลงดังเห็นได้ชัดเจน (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)

2.8 ระดับคลอไรด์วิกฤติที่มีผลต่อเหล็กเสริมคอนกรีต

ระดับคลอไรด์วิกฤติ หมายถึง ระดับหรือปริมาณที่คลอไรด์ที่มากเพียงพอที่จะทำให้เริ่มเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต ทั้งนี้ต้องมีปัจจัยหลายปัจจัย อาทิ ความชื้น ออกซิเจน ในปริมาณที่เหมาะสมโดยกระบวนการในการเกิดสนิมดังที่กล่าวนี้จะอยู่ในช่วงขยายตัวต่อเนื่อง Propagation period ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีอย่างต่อเนื่อง ในการศึกษาเกี่ยวกับระดับคลอไรด์ทั้งหมดนั้นเราสามารถเปรียบเทียบค่าระดับคลอไรด์วิกฤติในรูปของ ค่าเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์อัตราส่วน Cl^- ต่อ OH^- (Cheewaket et al., 2012)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาและผลกระทบด้านสภาพแวดล้อมเนื่องจากการกองเก็บและการเหลือทิ้งของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหินที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นและพัฒนากำหนดกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าถ่านหิน เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาจากวัสดุทั้งสอง เพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และยังเป็นการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาของ สุภิชาติ และคณะ (2542) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตด้วยเถ้าถ่านหิน และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณสูงต่อกำลังอัดของคอนกรีต ผลการศึกษา

พบว่า เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่า pH สูง ซึ่งแสดงว่ามีสภาพ เป็นด่างและเถ้าถ่านหิน ช่วยทำให้เพสต์ไหลลื่นได้ดีขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เมื่อมีการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากขึ้น

ศราวฐ และคณะ (2544) ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตก๊าซเซทิลีน ผสมกับเถ้าแกลบเพื่อเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดสอบได้บดละเอียดโดยกำหนดความละเอียดจากปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าแกลบได้จากการเผาเถ้าแกลบข้าวในระบบเปิดแล้วนำไปบดจนละเอียด โดยกำหนดปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า เพสต์ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสานมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานกว่าซีเมนต์เพสต์มาก นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสานมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสานมีอัตราการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุก่อน 14 วันสูงและลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น

ชรินทร์ นมรัักษ์ และคณะ (2545) ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินที่แยกขนาดให้มีความละเอียดสูงขึ้น ใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงสุดเท่ากับ 205 กก./ซม² ที่อายุ 90 วัน เมื่อใช้วัสดุประสาน 375 กก./ซม² และกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ซึ่งนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาในงานปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนหรืออาคารสูง เนื่องจากกำลังอัดที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินนั้นเพียงพอที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินในการก่อสร้าง ดังนั้นจากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตได้เช่นกัน

สุภิชาติ มาตย์ภูธร (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 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความ เป็นวัสดุประสานได้

ณัฐกร แนบทอง และ วิเชียร ชาลี (2555) ได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงผสมกับเถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตผล พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันลดลง โดยคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดต่ำสุด (ในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์) อย่างไรก็ตาม การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตมากขึ้น มีผลให้การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 ถึง 90 วันสูงขึ้น และสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดย 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) และคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า ได้มีการนำเอาวัสดุต่างๆ มาเป็นส่วนผสมเพื่อใช้เป็นวัสดุปอช โขลานและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำคอนกรีต จะทำให้ได้กำลังคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และการใช้ถ่านเถ้าหินเป็นวัสดุปอช โขลาน ในการทำคอนกรีต โดยพิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินมีผลต่อคุณสมบัติด้านความคงทน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีเหมาะสมสำหรับใช้งาน เป็นการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และเป็นการสนับสนุนในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินให้เป็นประโยชน์มากขึ้น

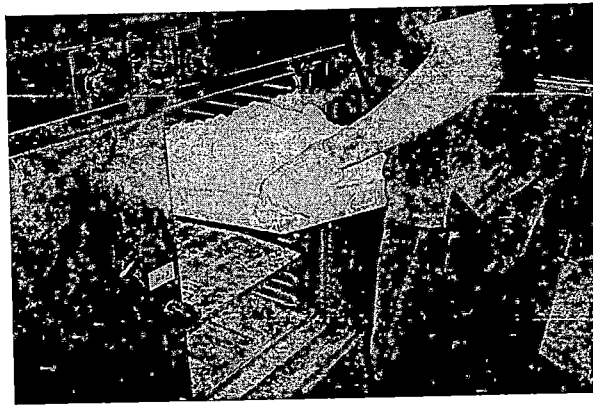
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

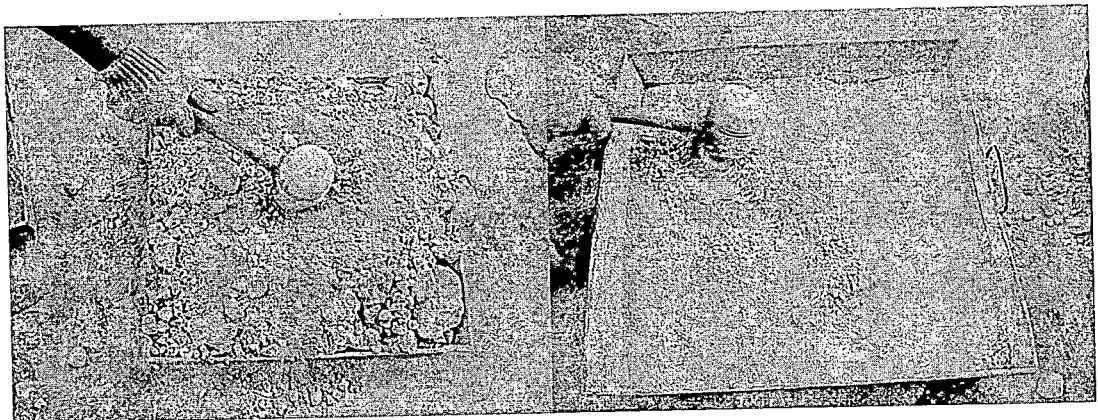
ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัด การต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยมีการเตรียมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) – 3.1 (จ))

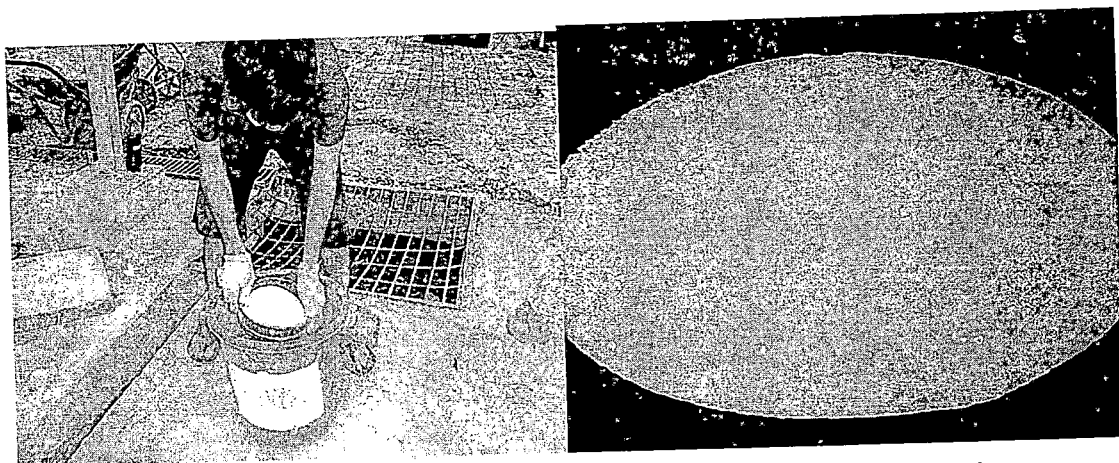


(ก) นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง



(ข) ขั้นตอนการทุกากแคลเซียมคาร์ไบด์

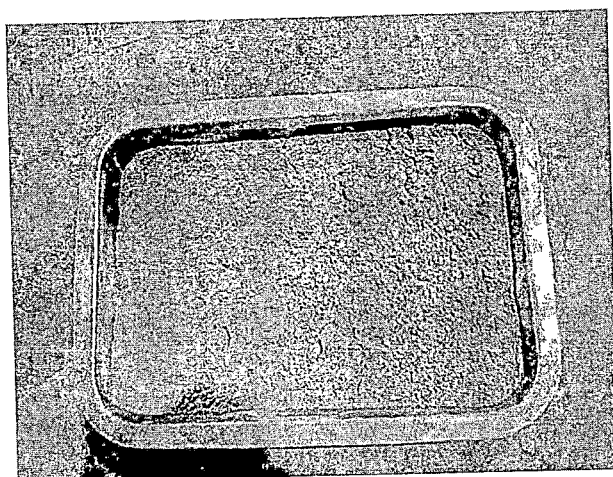
(ค) ภายหลังจากการทุกากแคลเซียมคาร์ไบด์



(ง) นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (จ) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่พร้อมใช้งาน

รูปที่ 3.1 การเตรียมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

3.1.2 เถ้าถ่านหิน เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แม่เมาะ จ.ลำปาง (รูปที่ 3.2)



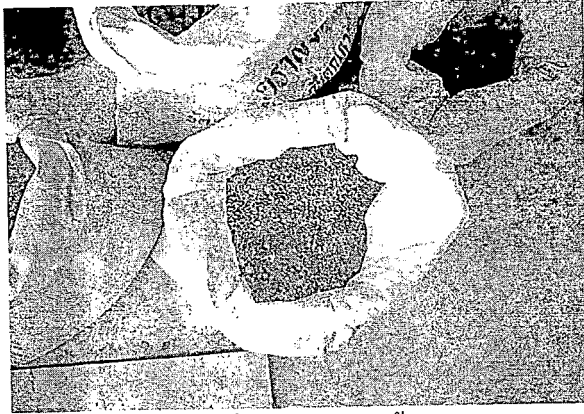
รูปที่ 3.2 เถ้าถ่านหิน

3.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 3.3)



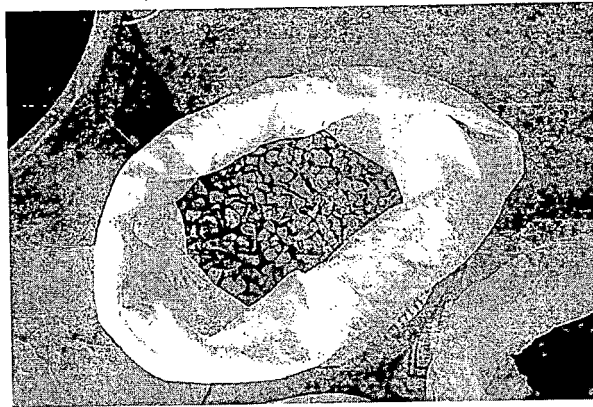
รูปที่ 3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.4 ทราย ใช้ทรายแม่ น้ำสะอาด ล่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 ทรายแม่ น้ำ

3.1.5 หิน ใช้หินขนาดใหญ่มากเท่ากับ 19 มิลลิเมตร (แสดงดังรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 หินปูน

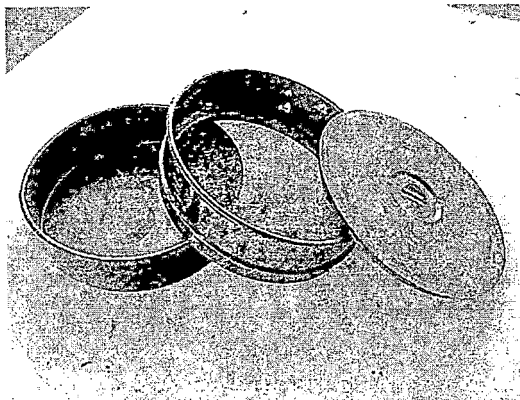
3.1.6 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) (แสดงดังรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 สารลดน้ำพิเศษ

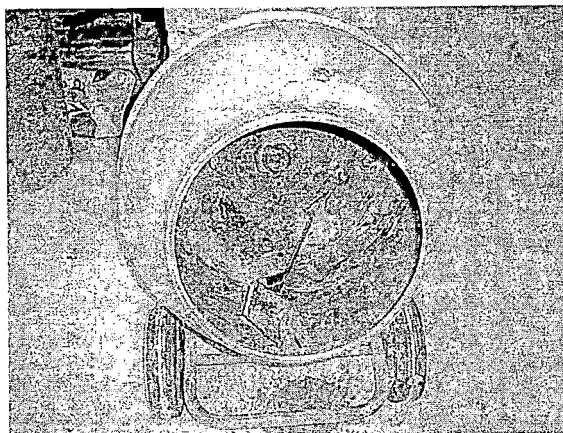
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 (แสดงดังรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8

3.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.3 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม² (รูปที่ 3.9)

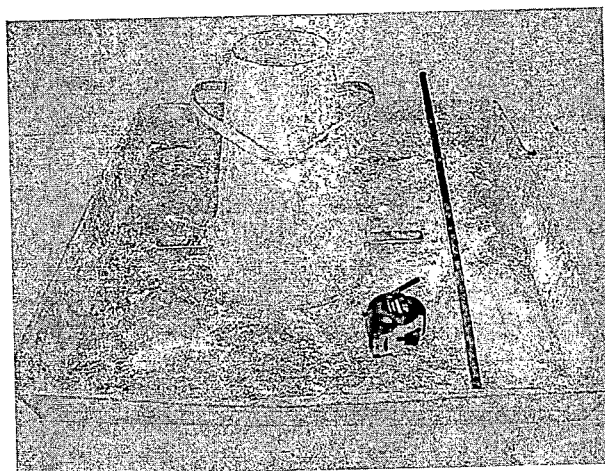


รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x200 มม²

354924

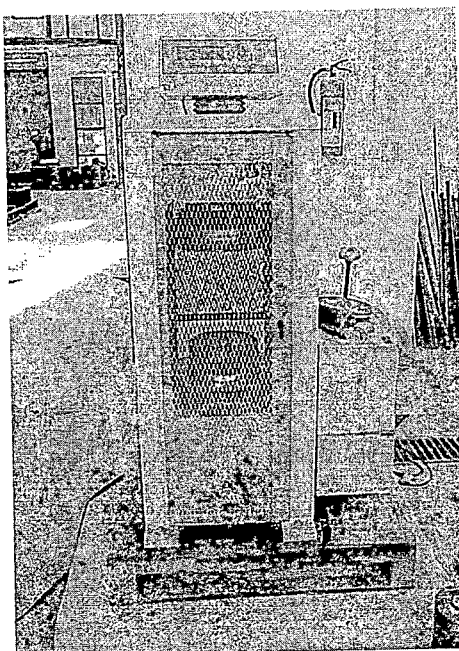
๒๒๐.๑๓๖
๗๕๔๙๑
๗.๑

3.2.4 ชุดการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 ชุดการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต

3.2.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (แสดงดังรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบกำลังอัด

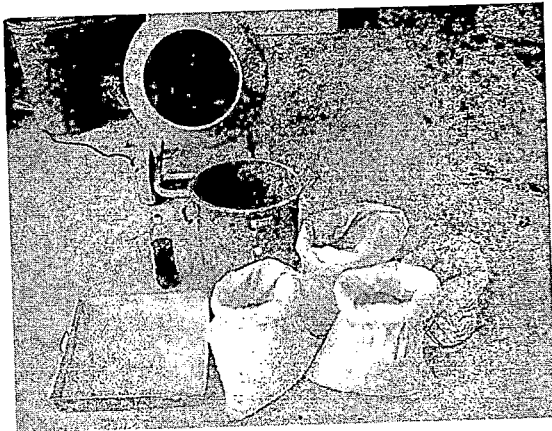
3.3 วิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

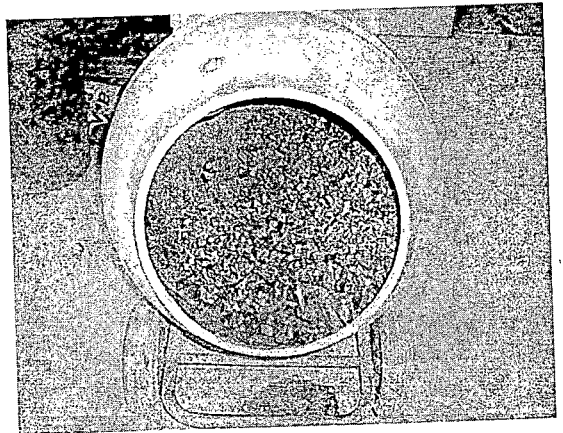
การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต โดยใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) กับเถ้าถ่านหิน (F) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ในอัตราส่วน 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 และ 0:0:100 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซต ช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3.12 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. (รูปที่ 3.13) ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มในน้ำประปาและทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 39 ที่อายุ 28, และ 90 วัน ได้แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตและได้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุเวลา 90 และ 180 วัน (รูปที่ 3.14) เพื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดในกลุ่มที่บ่มในน้ำประปาที่อายุเดียวกัน นอกจากนั้นได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 มม³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 20 มม. และ 50 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน (รูปที่ 3.15) นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง (รูปที่ 3.16)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

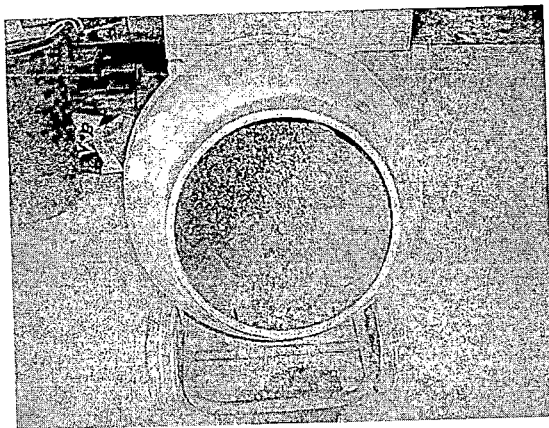
ส่วนผสม	ส่วนผสม (กก/ม ³)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ
CR:F:C 50:30:20	90	225	135	800	1050	194	15.4
CR:F:C 50:20:30	135	225	90	810	1050	194	12.2
CR:F:C 40:40:20	90	180	180	750	1050	194	11.5
CR:F:C 40:30:30	135	180	135	750	1050	194	9.7
CR:F:C 30:50:20	90	135	225	700	1050	194	8.2
CR:F:C 30:40:30	135	135	180	700	1050	194	7.4
CR:F:C 0:0:100	450	0	0	650	1050	194	3.1



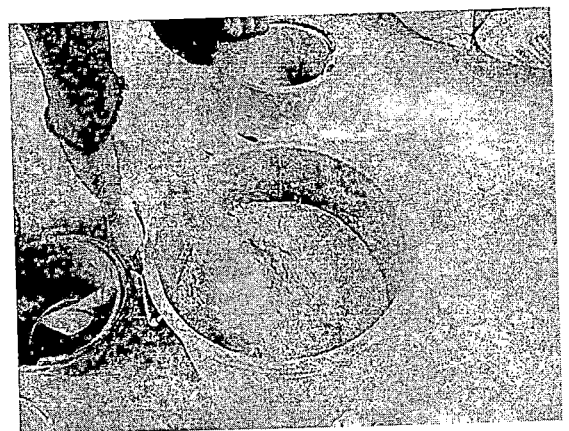
(ก) วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต



(ข) ผสมหินและน้ำ



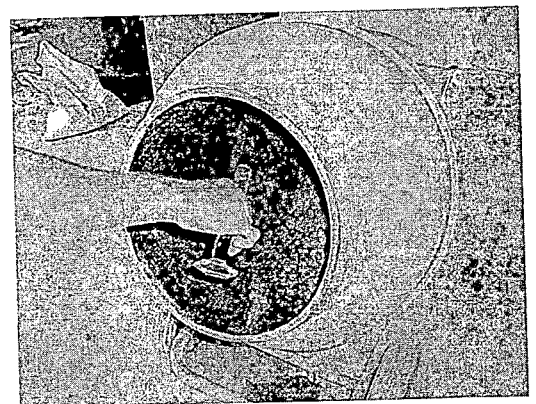
(ค) เติมทรายในส่วนผสม



(ง) เติมวัสดุประสาน

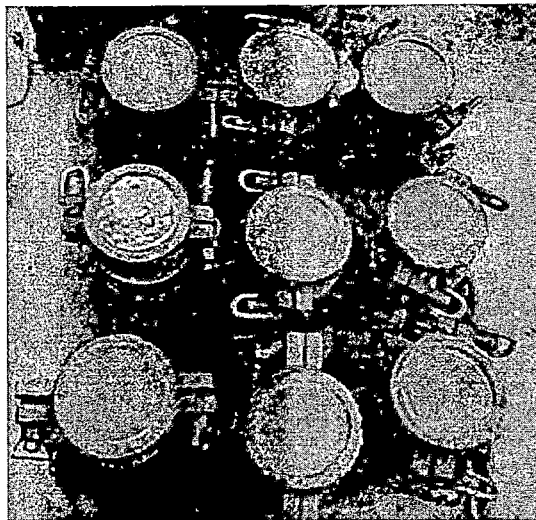


(จ) เติมน้ำ

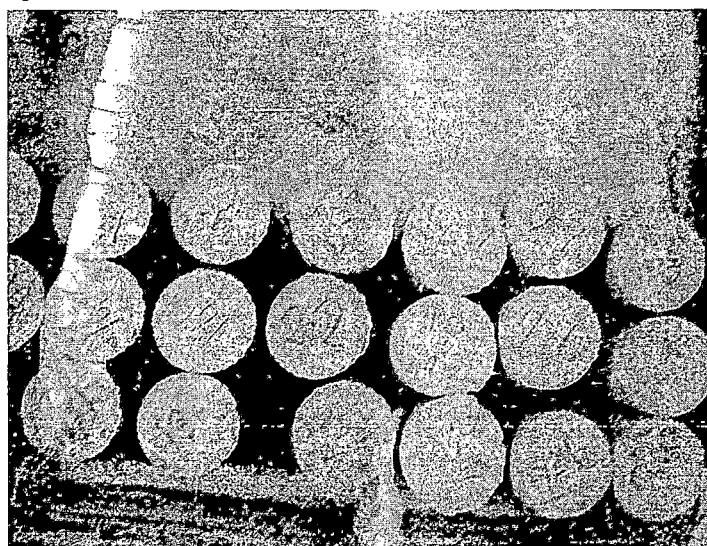


(ฉ) ผสมสารลดน้ำพิเศษ

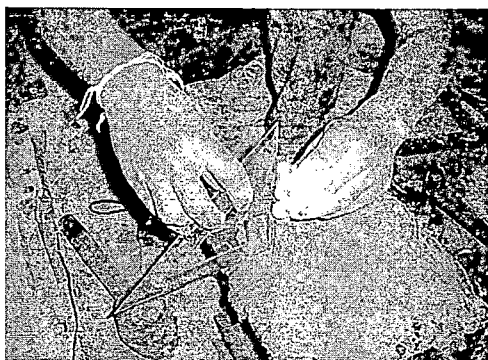
รูปที่ 3.12 การผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.13 เตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างทดสอบที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)



(ก) แสดงระยะที่ทำการฝังกเหล็ก



(ข) ฝังกเหล็กตามตำแหน่งที่กำหนด



(ค) หลังทำการดึงเหล็กแท่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบร้อย

รูปที่ 3.15 เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริม



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างคอนกรีตที่เข้บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังรับแรงอัด ตาม ASTM C 39 (รูป 3.17) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำที่อายุ 28, 90, 180 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลา และทดสอบกำลังอัดในกลุ่มที่เข้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อายุ 90 และ 180 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดในกลุ่มที่บ่มในน้ำประปาที่อายุเดียวกัน

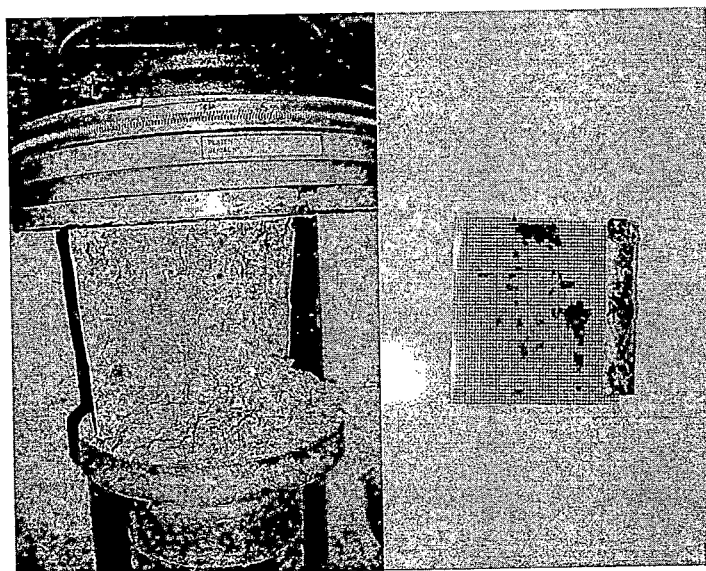


รูปที่ 3.17 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3.3.3 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กเมื่อแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล

หลังจากคอนกรีตแช่ในน้ำทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ครบอายุที่ 90 วัน และ 180 วัน ทำการวัดการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โดยกดตัวอย่างคอนกรีตให้แตกโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดและนำเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมาวัดพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กโดยใช้กระดาษกราฟที่มีตารางขนาดเท่ากับ 1x1 มม. พันรอบเหล็กและวัดพื้นที่การเกิดสนิม (ดังรูปที่ 3.18) วัดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในรูปร้อยละของพื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมเทียบกับพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมดดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละการเกิดสนิมเหล็ก} = \frac{\text{พื้นที่ของการเกิดสนิม}}{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็กเสริม}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.18 การทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน และมวลรวม และการวิเคราะห์ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตและการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 4.1(ก) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันได้ร้อยละ 96.3 (ตารางที่ 4.1)

4.1.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงมีความชื้นอยู่มาก ลักษณะเหมือนดินเหนียว สีเทาเข้มสามารถปั้นเป็นก้อนได้ เมื่อนำไปตากแดดให้แห้งได้เป็นสีเทาอ่อน ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถพิจารณาได้จากปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ที่ทดสอบด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 22 ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น 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 มีอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าถ่านหิน (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 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 4.1

4.1.4 สารลดน้ำชนิดพิเศษ (Super plasticizer)

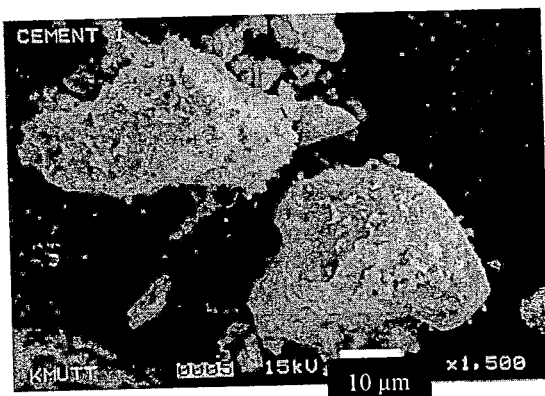
สารชนิดนี้ส่วนใหญ่ทำมาจากกรดหรือเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulphonic) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมทำเยื่อไม้ (Wood pulp industry) เกลือของกรดไฮดรอกซีเลตคาร์บอกซีลิก (Hydroxylated Carboxylic Acid) ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 494

4.1.5 มวลรวม

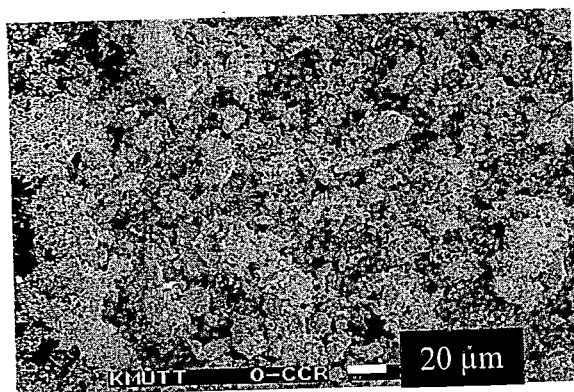
ในการศึกษารุ่นนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.72 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 ร้อยละการงอของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.55 และ 1.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

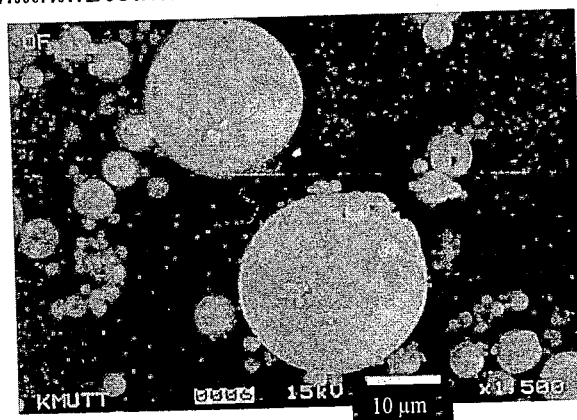
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 (C)	กาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	3.51	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	2.42	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	0.31	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.71	52.71	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	0.52	-
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.12	0	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O	0.24	0	1.69
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	0.22	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	40.1	0.07



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์



ค) ถั่วถ่านหิน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุประสาน

4.2 สมบัติของน้ำทะเล

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อน ๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่า บริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.86 ถึง 8.63 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,700 มก./ล. จากการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็น โซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็น แมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-89 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากซัลเฟต อย่างรุนแรง

โดยทั่วไป ระดับน้ำทะเลบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ขึ้นและลง วันละ 2 รอบ คือ มีระดับสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตในช่วงเวลาเช้า จากนั้นระดับน้ำเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่ายจนคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง ช่วงเย็นระดับน้ำเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตอีกครั้ง และลดระดับลงในเวลากลางคืน ซึ่งในแต่ละฤดูกาล เวลานั้นขึ้น-ลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เช่น ช่วงฤดูหนาว ระดับน้ำที่สูงขึ้นจนท่วมคอนกรีตจะมีระยะเวลายาวนานกว่าปกติ และลดระดับลงเพียงเล็กน้อย ทำให้บางครั้งคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งในช่วงเวลาสั้นมาก หรือไม่ได้อยู่ในสภาพแห้งเลย

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.2 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมตามระยะเวลาบ่มในน้ำประปา พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแล้วผ่านหินเป็นวัสดุประสานให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 90 ถึง 188 กก/ซม² และเพิ่มเป็น 187 ถึง 233 กก/ซม² ที่อายุ 180 วัน อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแล้วผ่านหินเป็นวัสดุประสานมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (CR:F:C 0:0:100) ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดและแล้วผ่านหินส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่หยาบของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สมบูรณ์จึงมีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ลดลงอย่างชัดเจน

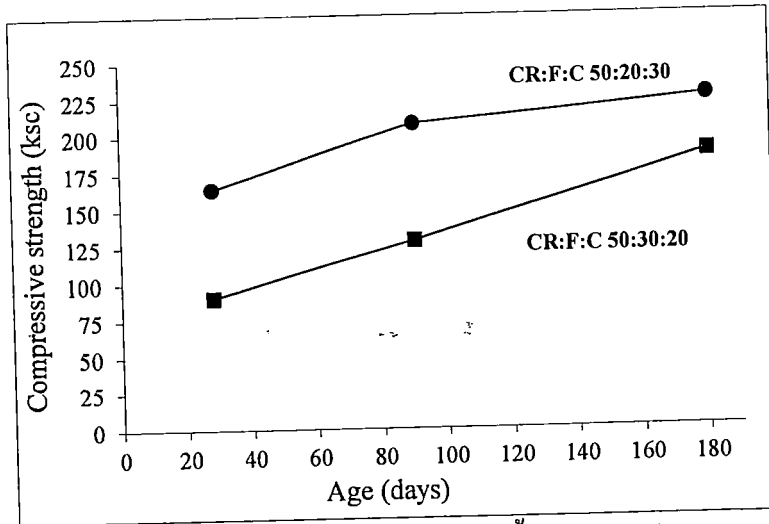
ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 90 และ 180 วันหลังบ่มในน้ำประปา

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)		
	28 วัน	90 วัน	180 วัน
CR:F:C 50:30:20	90	128	187
CR:F:C 50:20:30	164	208	225
CR:F:C 40:40:20	138	181	197
CR:F:C 40:30:30	170	207	227
CR:F:C 30:50:20	157	188	205
CR:F:C 30:40:30	188	223	233
CR:F:C 0:0:100	359	385	414

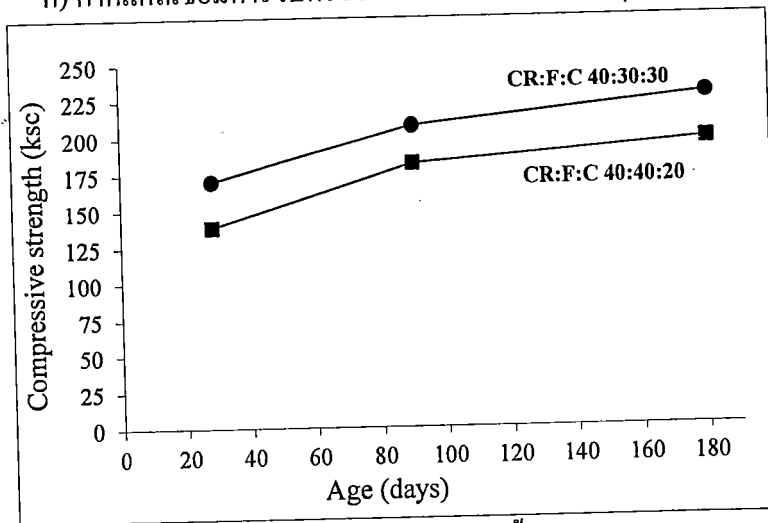
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาบ่มคอนกรีตดังรูปที่ 4.2 พบว่า คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมแล้วผ่านหินเป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงก่อนอายุ 90 วันค่อนข้างเร็ว และอัตราการเพิ่มกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงหลังจากตัวอย่างมีอายุ 90 วัน ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยที่ผ่านมา (ศราวุฑู เรืองฤทธิ์, 2544 ; ชรินทร์ นมรัักษ์ และคณะ, 2545) ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 60 วัน และมีแนวโน้มคงที่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 90 วัน

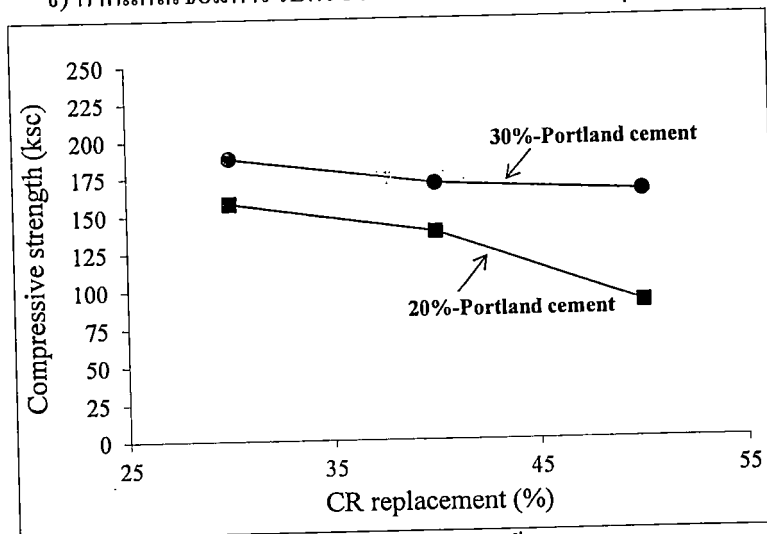
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2(ก) ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 โดยนำหน้าวัสดุประสาน และแปรเปลี่ยนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้านหินเป็นร้อยละ 20 และ 30 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ได้ขึ้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังของคอนกรีตส่วนใหญ่ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ยังมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวมากขึ้น โดยสังเกตจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 180 วัน เมื่อลดปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ลงเป็นร้อยละ 40 และ 30 ดังรูปที่ 4.2 (ข) และ 4.2 (ค) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของกำลังยังคงไปในทิศทางเดิม กล่าวคือ ผลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์, กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา (สุภิชาติ มาตย์ภูธร และคณะ, 2542 ; ณัฐกร แนบทอง และ วิเชียร ชาติ, 2555) พบว่า การให้กำลังของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ส่วนแรกเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนที่สอง เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งผลการศึกษารุ่นนี้สามารถยืนยันได้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างมีบทบาทสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงถึงร้อยละ 50 (รูปที่ 4.2ก) ซึ่งผลต่างของกำลังอัดของกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 และ 30 ค่อนข้างชัดเจน ส่วนกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 และ 30 พบว่า ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อกำลังอัดจะลดน้อยลง เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 โดยสังเกตจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน ส่งผลต่อความแตกต่างของกำลังอัดคอนกรีตของทั้งสองกลุ่มน้อยลง โดยคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50, 40 และ 30 โดยนำหน้าวัสดุประสาน ให้ผลต่างของระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตของกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73, 32 และ 30 กก/ซม² ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 ในระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการใช้วัสดุปอซโซลานที่มากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อยลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ให้กำลังกับคอนกรีตจึงลดลงด้วย



ก) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



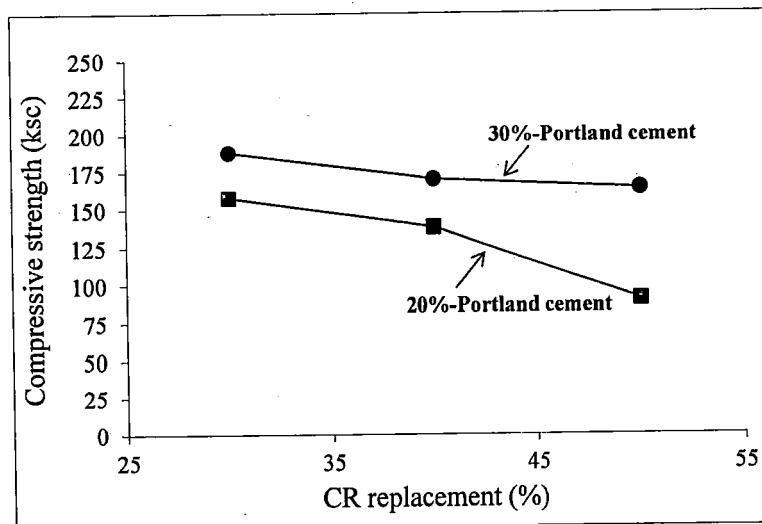
ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



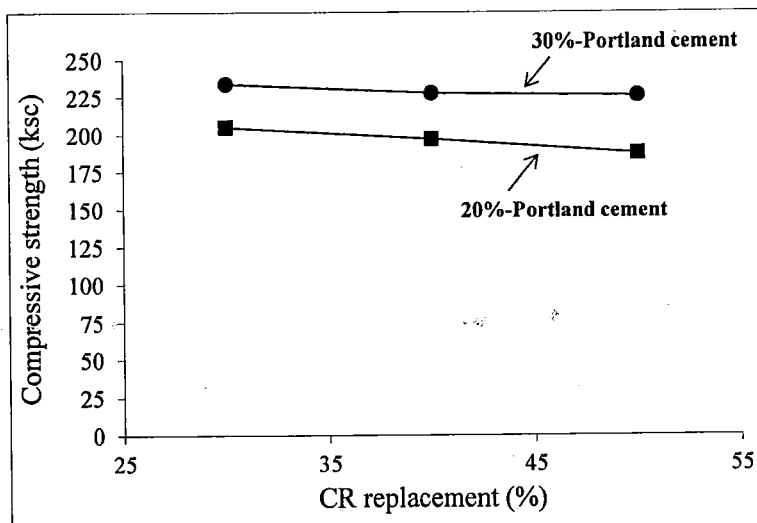
ค) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับอายุคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา

เมื่อพิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 180 วัน ดังรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.3(ก) พบว่า ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 และ 30 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีผลทำให้เถ้าถ่านหินลดลง ซึ่งเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ ที่มีอนุภาคกลมตัน และมีคุณภาพดี (Chalee et al., 2010) ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อการให้กำลังของคอนกรีตมากกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบด ดังนั้นในปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงด้วย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินที่มีการแปรเปลี่ยนสัดส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 20) และสังเกตจาก การเพิ่มขึ้นของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 30 กลับพบว่า การเพิ่มปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตมีผลให้กำลังอัดลดลงน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีผลต่อกำลังอัดมีมากขึ้น และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานอาจมีผลน้อยลง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์มากขึ้นมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก โดยแนวโน้มของกำลังอัดคอนกรีตดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 180 วัน ดังรูปที่ 4.3(ข)



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 180 วัน

รูปที่ 4.3 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา (ก) 28 และ (ข) 180 วัน

4.4 ผลของสารละลายซัลเฟตต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 90 และ 180 วัน พบว่า คอนกรีต CR:F:C 40:40:20 มีค่าร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟตเทียบกับบ่มในน้ำประปาที่อายุ 90 และ 180 วัน สูงถึงร้อยละ 99 และ 98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CR:F:C 0:0:100) ที่ให้ค่าร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟตเทียบกับบ่มในน้ำประปาที่อายุ 90 และ 180 วัน ร้อยละ 91 และ 89 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ของวัสดุปอซโซลาน สามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตลงได้ โดยคอนกรีต CR:F:C 40:40:20 ให้ค่าร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟตเทียบกับบ่มในอากาศ สูงกว่าคอนกรีตควบคุมแสดงให้เห็นว่ามีการต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้มากกว่า เมื่อพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซัลเฟต หรือ ยิปซัม ซึ่งยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจาก C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตอ้อนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือ Ettringite โดยยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้นนั้นทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวมีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวในที่สุด (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553) การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม และ

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกักกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ จึงสามารถลดการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ จะเห็นได้ว่าคอนกรีต CR:F:C 40:40:20 มีร้อยละกำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 20 ประกอบกับสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหิน ทำให้มีการต้านทานซัลเฟตได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาคอนกรีตหลังแช่สารละลายซัลเฟตที่อายุ 180 วัน พบว่า คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากัน แต่ลดปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ลง สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ทำให้คอนกรีตเป็นด่างจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากซัลเฟต มากยิ่งขึ้น ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น มีผลต่อการต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเห็นผลได้ชัดเจนเมื่ออายุเวลายาวนานขึ้น (Chalee et al., 2010; Neville, 1996) ดังนั้นการลดปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ลงจะช่วยลดปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ซึ่งเป็นอันตรายต่อคอนกรีต และสัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าถ่านหินก็ยังช่วยต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ด้วย

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)				ร้อยละกำลังอัดที่แช่ในซัลเฟตเทียบกับบ่มในน้ำประปา	
	บ่มในน้ำประปา		แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก			
	90 วัน	180 วัน	90 วัน	180 วัน	90 วัน	180 วัน
CR:F:C 50:30:20	90	128	70	91	78	71
CR:F:C 50:20:30	164	208	143	173	87	83
CR:F:C 40:40:20	138	181	137	177	99	98
CR:F:C 40:30:30	170	207	128	178	75	86
CR:F:C 30:50:20	157	188	124	179	79	95
CR:F:C 30:40:30	188	223	179	207	95	93
CR:F:C 0:0:100	359	385	327	343	91	89

4.5 การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การศึกษาค้นคว้าพบว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการเกิดสนิมหลังแช่น้ำทะเล 90 และ 180 วัน เฉพาะเหล็กฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 20 มม. เท่านั้น ส่วนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ไม่ปรากฏสนิมเหล็กในทุกส่วนผสมคอนกรีต

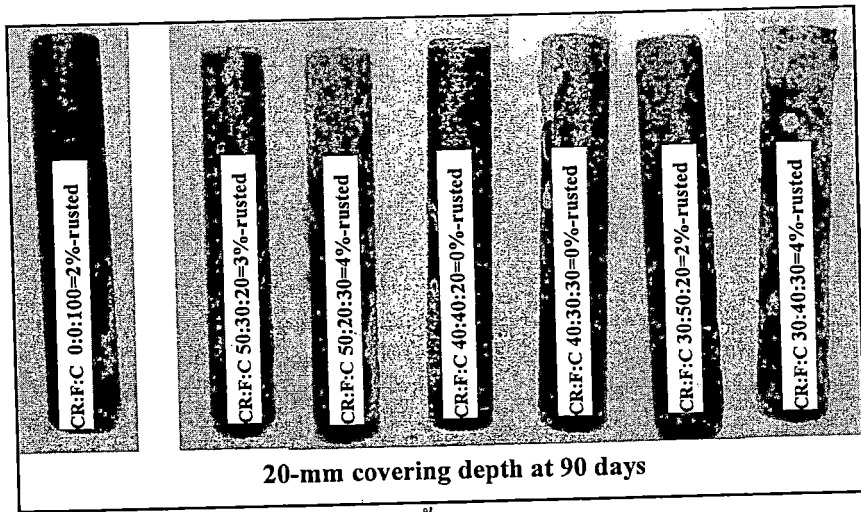
การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. หลังคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 90 และ 180 วัน แสดงดังรูปที่ 4.4(ก) และ รูปที่ 4.4(ข) ตามลำดับ ซึ่งพบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังไม่มีการทำลายเนื้อของเหล็กเสริม ระยะเวลาที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ค่อนข้างสั้น ดังนั้น

การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตยังไม่เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามจากแนวโน้มที่สังเกตได้ พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการเกิดสนิมในเหล็กเสริมใกล้เคียงกับตัวอย่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CR:F:C 0:0:100) ถึงแม้กำลังอัดจะต่ำกว่าค่อนข้างมากก็ตาม โดยทั่วไปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความที่บ้น้ำ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ และปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เป็นต้น (Cheewaket et al., 2010; Chalee et al., 2009) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างที่ผิวของเหล็กเสริมด้วย โดยถ้าผิวเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะเกิดสนิมได้ช้าเนื่องจาก Passive film ที่ป้องกันการเกิดสนิมถูกทำลายช้าลง

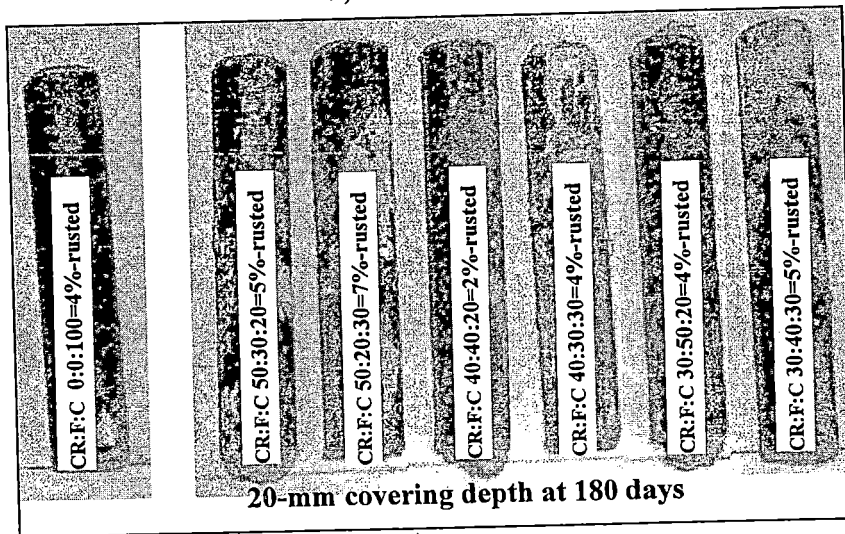
เมื่อพิจารณาผลของการแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ดังรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) โดยภาพรวมแล้วพบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มนำในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นต่ำสุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งแนวโน้มนำดังกล่าวมีความสอดคล้องกันทั้งสองอายุที่ทำการทดสอบ โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมร้อยละ 20 และผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของพื้นที่สนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. หลังแช่น้ำทะเล 90 วัน เท่ากับ 2, 0 และ 3 ตามลำดับ และมีการเกิดสนิมเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อแช่น้ำทะเล 180 วัน เป็น ร้อยละ 4, 2 และ 5 ตามลำดับ นอกจากนี้ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ก็ให้แนวโน้มนำของการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักประสานดีที่สุดในเช่นเดียวกัน การที่คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 โดย

น้ำหนักรีดสุประสาณ มีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้คืออาจเป็นผลจากสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินของคอนกรีตกลุ่มนี้ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณาควบคู่กับกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้กลับพบว่า กำลังอัดคอนกรีตกลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 สูงกว่ากลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 แต่ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 เล็กน้อย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee and Jaturapitakkul, 2009) ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์คล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เนื่องจากเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานเหมือนกัน แต่คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์อาจเพิ่มความเปราะบางบริเวณผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้สามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะของสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นเป็นสนิมที่ผิวเหล็กและแตกต่างกัน ไม่มากนัก ดังนั้นการแช่คอนกรีตในสถานะแวดล้อมที่อายุมากขึ้นจะเห็นผลการศึกษาที่ชัดเจนมากขึ้น

คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำมาก และมีโอกาสที่เกลือคลอไรด์จากน้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าไปและส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กได้ง่าย แต่พบว่าสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นมีน้อยมากและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีกำลังอัดสูงกว่าประมาณเกือบ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่า ความเปราะบางของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เมื่อผสมในคอนกรีตทำให้สามารถป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน ซึ่งถ้ามีพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ให้มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แล้ว คอนกรีตดังกล่าวจะสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในน้ำทะเลที่เข้าไปในคอนกรีตได้ดี ตลอดจนค่าที่มีในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ก็จะป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้อีกทางด้วย ซึ่งน่าจะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความคงทนในสถานะแวดล้อมทะเลได้ดี และเป็นแนวโน้มที่ดีในการพัฒนาวัสดุดังกล่าวให้ใช้งานได้ดีขึ้น



ก) แฉ่น้ำทะเล 90 วัน



ข) แฉ่น้ำทะเล 180 วัน

รูปที่ 4.4 การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม. หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง เป็นเวลา (ก) 90 และ (ข) 180 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1) ปฏิกริยาไฮเดรชันมีบทบาทสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น โดยกลุ่มที่ชัดเจนมากที่สุดคือกลุ่มที่ใช้กากแกลเลียมคาร์ไบด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งมีค่าผลต่างของกำลังอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

5.1.2) ปริมาณกากแกลเลียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยมีแนวโน้มชัดเจนในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณต่ำ ทั้งนี้เป็นผลจากสมบัติของกากแกลเลียมคาร์ไบด์ ที่มีอนุภาคหยาบไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับต่างให้เปลี่ยนเป็นของแข็ง (C-S-H) ได้สมบูรณ์

5.1.3) การใช้กากแกลเลียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มทำให้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดีใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงแม้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแกลเลียมคาร์ไบด์จะต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่อนข้างมาก

5.1.4) การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแกลเลียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ดีที่สุด

5.1.5) การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนของกากแกลเลียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินต่อปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 40:40:20 (CR:F:C 40:40:20) สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีที่สุดและดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากให้คาร์บอนต่ำกำลังอัดที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับบ่มในอากาศสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมกากแกลเลียมคาร์ไบด์ที่บดละเอียดเนื่องจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้นที่บ่มมากขึ้น ความคงทนของคอนกรีตน่าจะดีขึ้นมาก

5.2.2) ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแกลเลียมคาร์ไบด์แทบไม่มีการเกิดสนิม ถึงแม้ว่ากำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างมากก็ตาม ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้กากแกลเลียมคาร์ไบด์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนั้นหากสามารถพัฒนา

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมจากแคลเซียมคาร์ไบด์ให้สูงขึ้น น่าจะทำให้คอนกรีตถูกนำไปใช้งานในการก่อสร้าง อาคาร สะพาน ที่อยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี

เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543, ความคงทนของคอนกรีต : คอนกรีตในสภาวะแห้งตัว, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 72-76.
2. ชรินทร์ นมรักษ์, วันชัย สะตะ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, “ผลกระทบของปริมาณวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, หน้า MAT 178 - MAT 183
3. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย : หน้า 197-199.
4. ธีรกร แนนทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, Burapha Sci. J. 17 (2) : 38-49
5. วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 16(2), 51-56.
6. ศราวุธ เรืองฤทธิ์, 2544, “ผลกระทบของแคลเซียมคาร์ไบด์ไบต์และเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 152 หน้า
7. สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2537, “การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก,” หน้า 55.
8. สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2542, “การศึกษาเพื่อใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, หน้า MAT 100 – MAT106
9. 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.
10. ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards;1997, V. 04.02.
11. American Concrete Institute, 1992, “ACI 318-89 : Building Code Requirement for Reinforce Concrete,” in ACI Manual of Concrete Practice Part 3, Detroit, pp. 35.
12. Broomfield, J.P., 1996. Corrosion of Steel in Concrete, England, Taylor & Francis Ltd
13. Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Rattanasak, U., 2009. “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”. Waste Management 29, (2) : pp 539-543.

14. Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. and Jaturapitakkul, C., 2007. "Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment". *Construction and Building Materials* 21 ; pp 965-71.
15. Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., 2010. "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis". *Materials and Design*, 31, 1242-1249.
16. Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt P, 2009. "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater". *Marine Structures*, 22, pp. 341-353.
17. Chalee, W. and Jaturapitakkul C., 2009. "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment". *Materials and Structures*, 42, pp. 505-514.
18. Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W., 2010. "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment". *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1352-1357.
19. Cheewaket, T., Jaturapitakkul C. and Chalee W., 2012. "Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site", *Construction and Building Materials* 37, pp. 693-698.
20. Makaratat, N., Laosamathikul, T. and Jaturapitakkul, C., 2009. "Utilization of calcium carbide residue-fly ash mixture as a cementing material in concrete". *The 33rd International Association for Bridge and Structural Engineering*, 96, 144-149.
21. Mehta, P.K., 1991. *Concrete in the Marine Environment*, 1st ed., England, Taylor & Francis Ltd.
22. Neville, A.M., 1996. *Properties of Concrete*, 4th ed., England, Addison Wesley
23. Plang-ngern, S., and Tangtermsirikul, S., 1999. "Chloride Binding Capacity in Fly Ash Concrete". *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand* 10; pp 1-8.
24. Soloka I., 1993. *Concrete in hot environment*. Great Britain : Alden Press.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) วิชย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทุมสุด และ วิเชียร ชาติ, 2556, “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112.

การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ Utilization of Calcium Carbide Residue in Corrosion Protection for Reinforced Concrete under Marine Environment

วิชย พรหมรักษ์¹, อภิชาติ ทุ่มสุด² และ วิเชียร ชาลี³*

^{1, 2, 3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

E-mail: ³ wichian@buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงที่มีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ส่วนผสมแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 และ 0:0:100 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28, 90 และ 180 วัน นอกจากนี้เตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 150x150x150 มม.³ โดยทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้ม 20 และ 50 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก หลังจากแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียก สลับแห้งเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมในคอนกรีตมากขึ้นส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มทำให้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีขึ้นถึงแม้กำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา คำสำคัญ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหิน, การกัดกร่อนเหล็กเสริม, สิ่งแวดล้อมทะเล

Abstract

This research aimed to utilize calcium carbide residue (CR) and fly ash (F) mixtures for corrosion protection of reinforced concrete under marine environment. The original CR from industries with the particles passed a sieve No.8 was used. The ratio of 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 and 0:0:100 by weight of CR : Mae Moh fly ash : Portland cement were used as a binder. The concrete cylinder specimens of 100 mm x 200 mm were prepared for compressive strength test at 28, 90 and 180 days after curing in the water at room temperature. In addition, concrete cube specimens of 150x150x150 mm³ were cast and steel bars of 9-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at the covering depth of 20 and 50 mm in concrete. These concrete specimens were tested for steel corrosion after exposed to a tidal zone of seawater for 90 and 180 days. The result showed that the use of CCR in concrete can be efficiently employed to protect the steel

corrosion in concrete, although the compressive strength of CCR concrete was lower than normal concrete.

Keywords: calcium carbide residue, fly ash, steel corrosion, marine environment

1. บทนำ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) คือกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเชื่อม การตัดโลหะ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ติดไฟ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น ปัจจุบันพบว่าความต้องการใช้ก๊าซอะเซทิลีนของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปีทางโรงงานที่ทำการสำรวจต้องทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงถึงปีละประมาณ 12,000 ตัน [1] ส่วนใหญ่นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปถมที่ บางส่วนก็นำไปทิ้งหรือกองไว้เป็นบริเวณกว้างจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณข้างเคียง จากปัญหาด้านมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้มีการศึกษาเพื่อนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุประสาน เพื่อแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต [2-4] ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูง สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้มากขึ้น หรือเกือบแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด ตลอดจนส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น ซึ่งเป็นการกระตุ้นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาปูนซีเมนต์รวมทั้งการกองเก็บกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้ โดยปกติคอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูง และช่วยป้องกันเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม แต่ถ้าคลอรีนจากน้ำทะเลซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนเกินปริมาณคลอรีนวิกฤต จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ออกไซด์ฟิล์มถูกทำลายและเมื่อความชื้นและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตเป็นสนิมได้ จากการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถรับแรงอัดได้พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CaC₂) เป็นกากจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่ง ที่ประกอบด้วยต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานีนอกกับสารประกอบซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลานีนอกได้ [5, 6] และทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังได้ นอกจากนี้ คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม จะลดต้นทุนการก่อสร้างเนื่องจาก

เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตได้ดี เพราะกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นส่วนที่เป็นต่าง ตลอดจนการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมคอนกรีตลงก็จะส่งผลให้ลด C_3A ลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ลดการทำลายเนื่องจากสารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลต่อคอนกรีตได้อีกด้วย แนวทางในการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กที่เสริมคอนกรีตโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่ต้องการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงให้ใช้งานได้มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตต่อการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้งให้ใช้งานได้ดีในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ประกอบด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงที่มีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 8 เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 22 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.32 สำหรับสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 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 [7] ส่วนเถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [8] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมี ค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

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

ตารางที่ 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	0.22	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	40.1	0.07

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต โดยใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) กับเถ้าถ่านหิน (F) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ในอัตราส่วน 50:30:20, 50:20:30, 40:40:20, 40:30:30, 30:50:20, 30:40:30 และ 0:0:100 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 50-100 มม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพลีเมอแลนมีนฟอรัมาติไฮโดรคอนเดนเซต ช่วยในการเพิ่มความสามารถได้ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มในน้ำประปา และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (แต่ละส่วนผสมเฉลี่ยจากตัวอย่างคอนกรีต 3 ก้อน) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน นอกจากนั้นได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม³ และฝึกลูกเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 20 มม. และ 50 มม. เพื่อทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส หลังจากแช่เมื่อแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลครบ 90 และ 180 วัน เก็บตัวอย่างมาทดสอบปริมาณสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต การวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมได้ใช้แผ่นกราฟพลาสติกที่มีช่องตาราง

ขนาด 2x2 มม.² ทาบรอบแท่งเหล็กและใช้ปากการบายนพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด คำนวณพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กในรูปของร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสม (กก/ม ³)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C)	กากเคลือบคาร์โบไนด์ (CR)	เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ
CR:F:C 50:30:20	90	225	135	800	1050	194	15.4
CR:F:C 50:20:30	135	225	90	810	1050	194	12.2
CR:F:C 40:40:20	90	180	180	750	1050	194	11.5
CR:F:C 40:30:30	135	180	135	750	1050	194	9.7
CR:F:C 30:50:20	90	135	225	700	1050	194	8.2
CR:F:C 30:40:30	135	135	180	700	1050	194	7.4
CR:F:C 0:0:100	450	0	0	650	1050	194	3.1

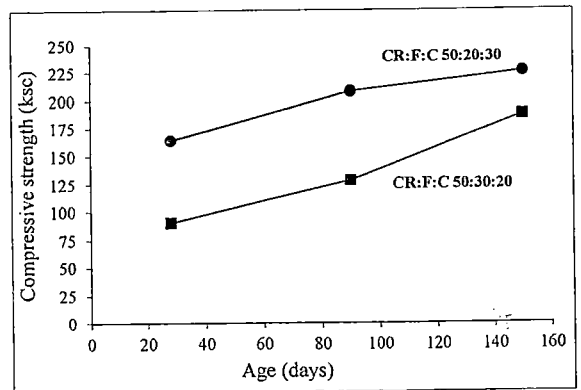
3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การพัฒนากำลังของคอนกรีต

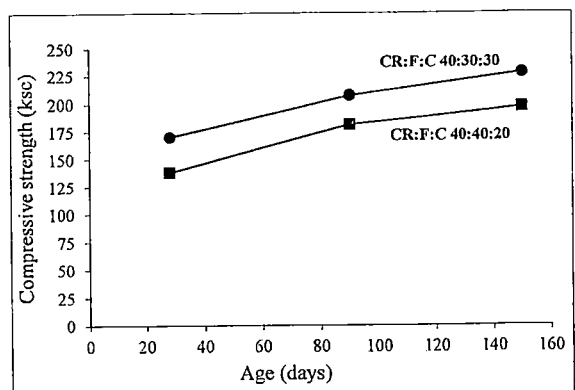
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบคาร์โบไนด์กับอายุคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา พบว่า คอนกรีตที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงก่อนอายุ 90 วัน ค่อนข้างเร็ว และอัตราการเพิ่มกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงหลังจากตัวอย่มีอายุ 90 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4, 9] ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 60 วัน และมีแนวโน้มคงที่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 90 วัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 1(ก) ที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ผสมในคอนกรีตสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแปรเปลี่ยนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน เป็นร้อยละ 20 และ 30 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ได้ขึ้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังของคอนกรีตส่วนใหญ่ยังขึ้นอยู่กับการปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินและกากเคลือบคาร์โบไนด์ยังมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวมากขึ้น โดยสังเกตจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 180 วัน เมื่อลดปริมาณของกากเคลือบคาร์โบไนด์ลงเป็นร้อยละ 40 และ 30 ดังรูปที่ 1(ข) และ 1(ค) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของกำลังยังคงไปใน

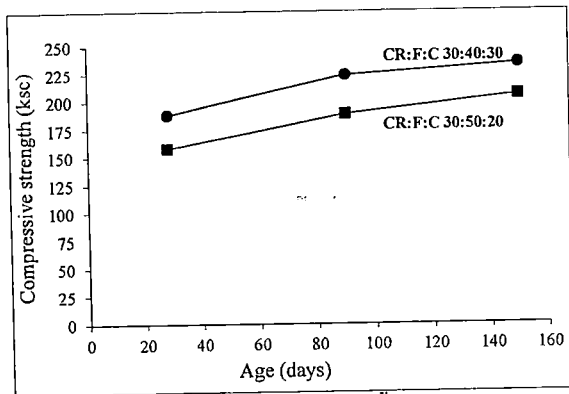
ทิศทางเดิม กล่าวคือ ผลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์, กากเคลือบคาร์โบไนด์และเถ้าถ่านหินก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา [5, 6] พบว่า การให้กำลังของคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบคาร์โบไนด์ ส่วนแรกเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนที่สอง เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งผลการศึกษารังนี้สามารถยืนยันได้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างมีบทบาทสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบคาร์โบไนด์สูงถึงร้อยละ 50 (รูปที่ 1ก) ซึ่งผลต่างของกำลังอัดของกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 และ 30 ค่อนข้างชัดเจน ส่วนกลุ่มที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ร้อยละ 40 และ 30 พบว่า ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อกำลังอัดจะลดลง เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ร้อยละ 50 โดยสังเกตจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน ส่งผลต่อความแตกต่างของกำลังอัดคอนกรีตของทั้งสองกลุ่มน้อยลง โดยคอนกรีตที่ใช้กากเคลือบคาร์โบไนด์ร้อยละ 50, 40 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ผลต่างของระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตของกลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73, 32 และ 30 กก/ซม² ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 ในระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้วัสดุปอซโซลานที่มากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อยลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ให้กำลังกับคอนกรีตจึงลดลงด้วย



ก) กากเคลือบคาร์โบไนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ข) กากเคลือบคาร์โบไนด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

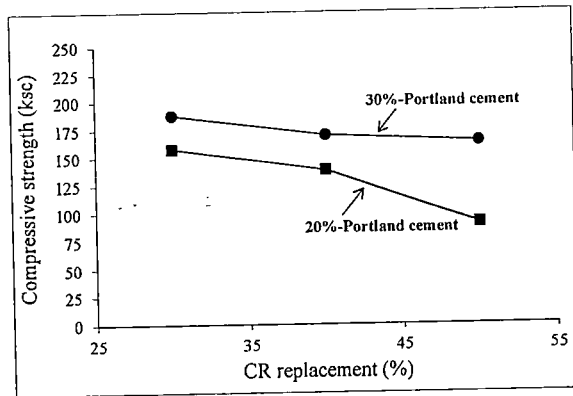


ค) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

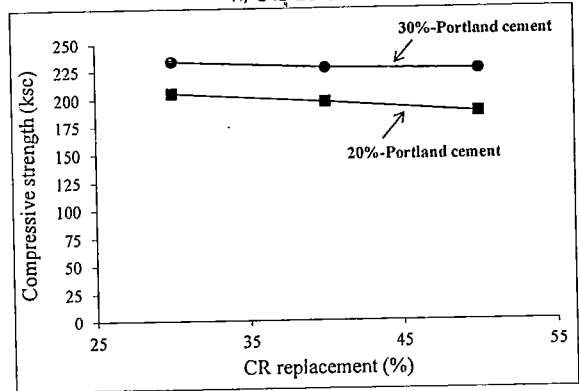
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับอายุคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา

3.2 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 180 วัน ดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 2(ก) พบว่า ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 และ 30 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีผลทำให้เถ้านหินลดลง ซึ่งเถ้านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้านหินจากแม่เมาะ ที่มีอนุภาคกลมตัน และมีคุณภาพดี [10] ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อการให้กำลังของคอนกรีตมากกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบด ดังนั้นในปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงด้วย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้านหินที่มีการแปรเปลี่ยนสัดส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้านหิน มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 20) และสังเกตจาก การเพิ่มขึ้นของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 30 กลับพบว่า การเพิ่มปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในคอนกรีตมีผลให้กำลังอัดลดลงน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีผลต่อกำลังอัดมีมากขึ้น และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานอาจมีผลน้อยลง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มากขึ้นมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก โดยแนวโน้มของกำลังอัดคอนกรีตดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 180 วัน ดังรูปที่ 2(ข)



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 180 วัน

รูปที่ 2 ผลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา (ก) 28 และ (ข) 180 วัน

3.3 การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้พบว่า เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการเกิดสนิมหลังแช่น้ำทะเล 90 และ 180 วัน เฉพาะเหล็กฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้ม 20 มม. เท่านั้น ส่วนที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ไม่ปรากฏสนิมเหล็กในทุกส่วนผสมคอนกรีต

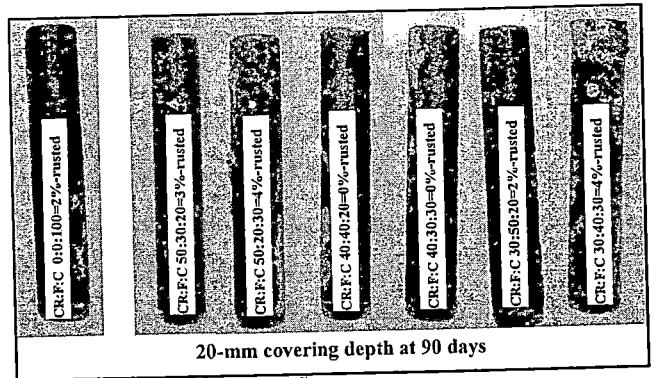
การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. หลังคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 90 และ 180 วัน แสดงดังรูปที่ 3(ก) และรูปที่ 3(ข) ตามลำดับ ซึ่งพบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีการเกิดสนิมที่ผิวเหล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังไม่มีการทำลายเนื้อของเหล็กเสริมระยะเวลาที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในการศึกษาครั้งนี้ค่อนข้างสั้น ดังนั้น

การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตยังไม่เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามจากแนวโน้มที่สังเกตได้ พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ใกล้เคียงกับตัวอย่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CR:F:C 0:0:100) ถึงแม้กำลังอัดจะต่ำกว่าค่อนข้างมากก็ตาม โดยทั่วไปการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความชื้นน้ำ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ และปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เป็นต้น [11, 12] ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเป็นด่างที่ผิวของเหล็กเสริมด้วย โดยถ้าผิวเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะเกิดสนิมได้ช้าเนื่องจาก Passive film ที่ป้องกันการเกิดสนิมถูกทำลายช้าลง

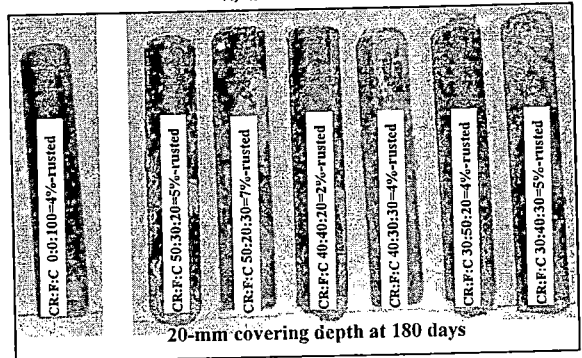
เมื่อพิจารณาผลของการเคลือบผิวคาร์โบไนด์ต่อการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) โดยภาพรวมแล้วพบว่า คอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นต่ำสุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวมีความสอดคล้องกันทั้งสองอายุที่ทำการทดสอบ โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมร้อยละ 20 และผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของพื้นที่สนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. หลังแช่น้ำทะเล 90 วัน เท่ากับ 2, 0 และ 3 ตามลำดับ และมีการเกิดสนิมเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อแช่น้ำทะเล 180 วัน เป็น ร้อยละ 4, 2 และ 5 ตามลำดับ นอกจากนี้ในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ก็ให้แนวโน้มของการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในกลุ่มที่ใช้กากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักประสานดีที่สุด เช่นเดียวกัน การที่คอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ก็อาจเป็นผลมาจากสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์และเม็ดถ่านหินของคอนกรีตกลุ่มนี้ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณาควบคู่กับกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้กลับพบว่า กำลังอัดคอนกรีตกลุ่มที่ใช้กากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 40 สูงกว่ากลุ่มที่ใช้กากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 50 แต่ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้กากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ร้อยละ 30 เล็กน้อย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับคอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินในงานวิจัยที่ผ่านมา [13] ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์คล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหิน เนื่องจากเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานเหมือนกัน แต่คอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์อาจเพิ่มความเป็นด่างบริเวณผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้สามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะของสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นเป็นสนิมที่มีผิวเหล็กและแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นการแช่คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่อายุยาวนานขึ้นจะเห็นผลการศึกษาที่ชัดเจนมากขึ้น

คอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำมาก และมีโอกาสที่เกลือคลอไรด์จากน้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าไปและส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กได้ง่าย แต่พบว่าสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นมีน้อยมากและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีกำลังอัดสูงกว่าประมาณเกือบ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่า ความเป็นด่างของกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์เมื่อผสมในคอนกรีตทำให้สามารถป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจน ซึ่งถ้ามีพัฒนาการกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ ให้มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แล้ว คอนกรีตดังกล่าวน่าจะสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในน้ำทะเลที่เข้าไปในคอนกรีตได้ดี ตลอดจนต่างที่มีในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ ก็จะป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้อีกทางด้วย ซึ่งน่าจะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมกาก

เคลือบผิวคาร์โบไนด์มีความคงทนในสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี และเป็นแนวโน้มที่ดีในการพัฒนาวัสดุดังกล่าวให้ใช้งานได้ดีขึ้น



ก) แช่น้ำทะเล 90 วัน



ข) แช่น้ำทะเล 180 วัน

รูปที่ 3 การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม. หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา (ก) 90 และ (ข) 180 วัน

4. สรุป

- 1) ปริมาณกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง โดยมีแนวโน้มชัดเจนในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณต่ำ
- 2) การใช้กากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มทำให้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดีใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงแม้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์จะต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่อนข้างมาก
- 3) การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากเคลือบผิวคาร์โบไนด์ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2556

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Makaratat, T. Laosamathikul and C. Jaturapitakkul. "Utilization of calcium carbide residue -fly ash mixture as a cementing material in concrete". *The 33rd International Association for Bridge and Structural Engineering, 2009*, pp. 144-149.
- [2] P. Krammart and S. Tangtermsirikul. "Properties of cement made by partially replacing cement law materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste". *Construction and Building Materials*, 18, pp. 579-583, 2004.
- [3] บัณฑิต กร้ามาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมลเงาพิสดาร "การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน" *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, 7 (2) หน้า 65-75
- [4] ศรราช เริงฤทธิ์ "ผลกระทบของแคลเซียมคาร์ไบด์ไบต์และเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน", *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 152 หน้า, 2544
- [5] สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล "การศึกษาเพื่อใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่" *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5*, หน้า MAT 100 - MAT106, 2542
- [6] ณัฐกร แนนทอง และ วิเชียร ซาลี "การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต" *Burapha Sci. J.* 17 หน้า 38-49, 2555
- [7] C. Jaturapitakkul and B. Roongreung. "Cementing material from calcium carbide residue-rice husk ash". *Journal of materials in Civil Engineering, ASCE*, 4(5), pp. 470-475, 2003.
- [8] 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.
- [9] ชรินทร์ นมรักษ์, วันชัย สะตะ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล "ผลกระทบของปริมาณวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์" *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8*, หน้า MAT 178 - MAT 183, 2545
- [10] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul. "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis". *Materials and Design*, 31, pp. 1242-1249, 2010.
- [11] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee. "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment". *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1352-1357, 2010.
- [12] W. Chalee, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt. "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater". *Marine Structures*, 22, pp. 341-353, 2009.
- [13] W. Chalee and C. Jaturapitakkul. "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment". *Materials and Structures*, 42, pp. 505-514, 2009.