

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



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ...ความคงทนของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล
(Durability of type V concrete containing fly ash under marine exposure)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

๒๕๐๑๕๖๑๑๔

AD ๐๑๐๙๙๓๗

25 ส.ย. 2558

354886

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

กันยายน พ.ศ. 2555

เริ่มบริการ

19 เม.ย. 2559

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ความคงทนของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเล” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 มีงบประมาณทั้งโครงการ 512,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	512,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์และการกักคร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และ พูลเวอร์ไรซ์ (PC) หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดนำมาบดละเอียดให้ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์นำมาใช้จากโรงงานโดยตรง แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.65 ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นอกจากนั้น ได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. สำหรับทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณ จ.ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ทดสอบกำลังอัด ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และการกักคร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินทุกกลุ่มสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 35) สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กลงได้ นอกจากนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ มีการพัฒนา กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

คำสำคัญ : การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด, การเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์, สิ่งแวดล้อมทะเล, เถ้าถ่านหิน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, การแทรกซึมคลอไรด์, การกักคร่อนเหล็ก

Abstract

In this study, compressive strength, chloride penetration profile, and corrosion of embedded steel bars in Portland cement type V concrete containing fly ash from fluidized-bed (FC) and pulverized combustions (PC) under marine site were investigated. Fly ash obtained from fluidized-bed combustion was ground to small particle which retained on a sieve No.325 about 2-5% by weight. Fly ash from pulverized combustion was received directly from the power plants. The fly ashes were used to replace Portland cement type V at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. A water to binder (W/B) ratio of concrete was kept constant at 0.65. The 200x200x200 mm³ concrete cube specimens were cast and steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm in concrete specimens. The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were also cast for the strength test at 28 days of curing and 5-year exposure in marine site. Concrete specimens were cured in fresh water for 28 days and then were placed at the tidal zone of sea water at Chonburi Province. The specimens were tested for compressive strength, total chloride penetration and corrosion of embedded steel bars after being exposed to the tidal zone of sea water for 5 years.

The results showed that concrete containing fly ash from pulverized combustions produces a better chloride resistance than that ground fly ash from fluidized-bed combustions. All fly ash concrete had better chloride resistance and steel corrosion than that of Portland cement type V concrete. An increase of fly ash replacement in concrete (not more than 35%) could reduce the chloride penetration and steel corrosion in concrete. In addition, compressive strength development of concretes containing fly ash from pulverized combustion was higher than those of concrete containing fly ash from fluidized-bed combustion.

Keyword; Fluidized-bed combustion, Pulverized combustion, Marine environment, Fly ash, Portland cement type V Chloride penetration, Steel corrosion

กิตติกรรมประกาศ

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

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปแก้ปัญหาคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนช่วยส่งเสริมการใช้ถ้ำถ่านหินให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	4
2.2 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	5
2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	7
2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	9
2.5 วัสดุปอซโซลาน	10
2.6 ปฏิกริยาปอซโซลาน	11
2.7 เถ้าถ่านหิน	12
2.8 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	20
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	20

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.3 ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	23
3.4 วิธีการศึกษา	25
3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์	26
3.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	27
3.7 การทดสอบปริมาณคลอไรด์	28
3.8 การวัดปริมาณสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง	32
4.1 วัสดุประสานและมวลรวม	32
4.2 คุณสมบัติของน้ำทะเล	33
4.3 ลักษณะของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล	35
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต	35
4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์	38
4.6 การกัดกร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผล	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงประเภทที่ 5	4
3.1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	24
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	33
4.2 คุณสมบัติของมวลรวม	33
4.3 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	34
4.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	38
4.5 พื้นที่สนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	44

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ โครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล	6
3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	20
3.2 ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20	20
3.3 เครื่องเจาะคอนกรีต	21
3.4 เครื่องตัดคอนกรีต	21
3.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก	21
3.6 เครื่องตีบ	22
3.7 เครื่องแก้วที่ใช้การไทเทรต	22
3.8 ครกหินบดคอนกรีต	22
3.9 บิวเรตต์	23
3.10 กรวยกรอง	23
3.11 แพลนฟุ้งเหล็กเส้นกลมในคอนกรีต	25
3.12 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล	26
3.13 การเจาะตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	26
3.14 การตัดตัวอย่างทดสอบ	27
3.15 ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดละเอียด	27
3.16 การกดสำรวจเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต	28
3.17 ลักษณะสีของจุดยุติของสารละลายในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรด (Acid soluble)	30
3.18 ลักษณะสีของจุดยุติของสารละลายในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำ (Water soluble)	31
4.1 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินแซ่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี	35
4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน FC หลังแช่ในน้ำทะเล 5 ปี	40
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน PC หลังแช่ในน้ำทะเล 5 ปี	40
ผลของเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและแบบพูลเวอร์ไรซ์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในน้ำทะเล 5 ปี	42
4.5 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน FC และ PC เมื่อแช่ในน้ำทะเล	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตนอกเหนือจากคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี และปัญหาเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิม สาเหตุเหล่านี้เกิดเนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือต่าง ๆ ละลายอยู่ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ คลอไรด์ และซัลเฟต ความทนทานของคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมคอนกรีต คุณภาพงาน การบ่ม และระยะหุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลจึงนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำปฏิกิริยากับซัลเฟตทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนน้อยลง อย่างไรก็ตามน้ำทะเลส่วนใหญ่มีคลอไรด์ร้อยละ 90 และซัลเฟตร้อยละ 10 ดังนั้นจึงควรพิจารณาผลกระทบจากคลอไรด์และซัลเฟตร่วมกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ จะมีผลทำให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์มีมากขึ้นเนื่องจาก การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรลูมินเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย C_4AF ผลที่ได้คือแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรต์ ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ดังนั้น จากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับน้อยเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A ต่ำ และจะปล่อยคลอไรด์อิสระที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ ในขณะเดียวกันการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ที่ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรง การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จึงทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น และการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางหนึ่งที่สามารถทำให้คอนกรีตสามารถทนทานการกัดกร่อนต่อสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดี

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการนำเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วน เพื่อช่วยลดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ และซัลเฟต พร้อมทั้งศึกษาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้เป็นการเพิ่มข้อมูลทางด้านนี้ให้มากขึ้น เนื่องจากข้อมูลการศึกษาการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยยังมีน้อย โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมน้ำทะเลจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.2.2 ศึกษาผลของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.2.3 เพื่อศึกษาชนิดของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด, การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อยู่ริมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งโดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหิน โดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าบริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด อ.ศรีมหาโพธิ จ.ปราจีนบุรี ซึ่งผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งได้จากโรงงานโดยตรง ซึ่งได้จากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ (PC)

คอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 โดยหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัด และหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วันจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายหาดโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในสถานะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำคอนกรีตทรงกระบอกมาทดสอบกำลังอัด และนำคอนกรีตทรงลูกบาศก์มาทำการเจาะให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. สูง 200 มม. แล้วทำการตัดคอนกรีตเป็นชั้น ๆ ละ 10 มม. เพื่อหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต จากนั้นนำคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ไปทดสอบให้แตกเพื่อทำการสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) ทราบคุณสมบัติทางด้านการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมแล้วผ่านหินซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานที่หาได้ง่ายในประเทศ และแช่น้ำทะเลที่นานถึง 5 ปี เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่น่าเชื่อถือและสอดคล้องกับการใช้งานจริงให้มากขึ้น และเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานซ่อมแซมและออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในสถานะแวดล้อมทะเลให้มีคุณสมบัติทางด้านความคงทนที่ดีและประหยัด

1.4.2) ทราบฐานข้อมูลที่ใช้ประกอบในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ ในสถานะแวดล้อมทะเล (ในประเทศไทย) ภายใต้การประยุกต์ใช้วัสดุที่มีในประเทศให้เกิดประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูง ภายใต้ความคุ้มทุนตามหลักวิศวกรรม

1.4.3) นำเสนอดัชนีประกอบในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสถานะแวดล้อมทะเล ที่พัฒนามาจากการศึกษาในสถานะแวดล้อมจริงในประเทศไทยและวัสดุที่มีในประเทศ ซึ่งจะได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริง ที่มีความชัดเจนและครอบคลุมมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น ๆ ซึ่งประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับ C_3S และ C_2S เป็นสารประกอบทางเคมีที่สำคัญในการควบคุมกำลังความแข็งแรงของซีเมนต์เมื่อซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบของ C_3S สูงแต่มี C_2S ต่ำจะให้กำลังและความร้อนสูงในช่วงต้น ในทางตรงกันข้ามหากปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S สูงจะให้กำลังและความร้อนต่ำในช่วงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในปูนซีเมนต์เมื่อใช้ปริมาณที่เท่ากัน พบว่า C_3A เป็นสารประกอบทางเคมีที่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องคุณสมบัติที่ไม่ดีของปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะในด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของปูนซีเมนต์เมื่อแข็งตัวแล้วก่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้น

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยทั่วไปมักมี C_3A อยู่ไม่มากนักน้อย ได้มีการพยายามขจัด C_3A ออกไปหรือทำให้ลดน้อยลง โดยการพิถีพิถันเลือกใช้ชนิดของวัตถุดิบและวิธีการผลิตที่เหมาะสม วัตถุดิบที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตปูนซีเมนต์แต่ละประเภะนั้นตามธรรมชาติหาได้ยาก โดยมักจะมีส่วนประกอบที่แปรผันไม่แน่นอน ปกติจะมีการผสมวัตถุดิบจากแหล่งที่ต่างกันเข้าด้วยกัน เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ตามข้อกำหนดมาตรฐานของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงประเภทที่ 5 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

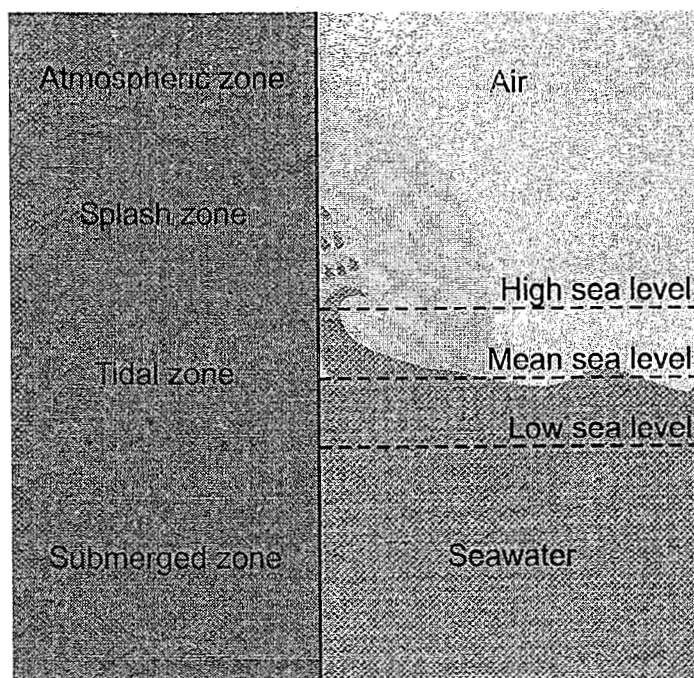
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	1	4	5
C_3S	49	46	46	25	30
C_2S	25	29	15	30	46
C_3A	15	6	15	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13

สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละรวมของ C_3S และ C_2S อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง และร้อยละรวมของ C_3A และ C_4AF อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ การลดค่าของ C_3A และ C_4AF ให้ต่ำนั้น เป็นการเพิ่มค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 นั้น จะให้ความต้านทานต่อซัลเฟตน้อยในปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณของ C_2S สูง การพัฒนากำลังอัดจะสูงหลังจาก 4 สัปดาห์ (ปริญญาจินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) ทำให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ที่อายุมากกว่า 90 วัน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ในเกณฑ์ต่ำใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 ที่ใช้กับงานเขื่อนและคอนกรีตหยาบ (mass concrete) ฉะนั้นหากมองในแง่ทฤษฎีแล้ว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ควรจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทที่มีความเหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ไม่เฉพาะแต่ใช้กับงานต้านทานซัลเฟตเท่านั้น แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีราคาแพง จึงไม่นิยมใช้กับโครงสร้างทั่วไปที่ไม่จำเป็นต้องพบปัญหาการกัดกร่อนของซัลเฟต

2.2 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีตรวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการซัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่าง ๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

2.2.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.2.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรงเนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ

2.2.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขีดสีจากรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

2.2.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

2.2.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Scabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ (Neville, 1995)

2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

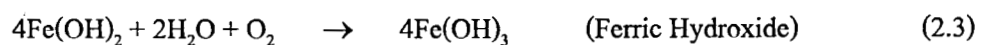
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิด

ชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น

ความเป็นต่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริม และทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไป ตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ 2.2 และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2.3 (Broomfield, 1996)

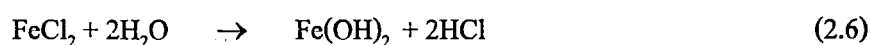
Anodic Reaction :



Cathodic Reaction :



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ 2.5 และ 2.6



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 6 เท่า และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting Crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกระเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลกระทบต่อการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุด ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอาจได้รับมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำทะเล ดินอากาศ หรือมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งโดยน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของคลอไรด์อิออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต หรือการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่ใช่อุปสรรค

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดน้ำ (Absorption) หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ใน

สภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริมซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloroaluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหลาและในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.5 วัสดุพอซโซลาน

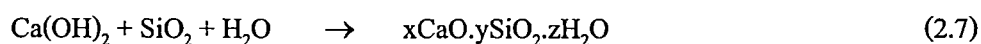
วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความไว้ว่า “วัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุพอซโซลานมีความละเอียดมากและ

มีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้ออก 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ ดินขาว เป็นต้น วัสดุปอซโซลานอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานเป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นหลายประการ ทั้งด้านกำลังรับแรงอัด ความทนทาน เช่น ลดการแทรกซึมของสารเคมี ตลอดจนความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ จึงเป็นการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ได้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ

2.6 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzalanic Reaction) เกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบที่สำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อยู่ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ซึ่งสารประกอบทั้งสองทำให้คุณสมบัติในการยึดประสานของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น เพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ และทำให้คอนกรีตมีอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง



โดยปกติปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดเมื่อคอนกรีตมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และจะมีปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงอายุมากกว่า 3 ปีครึ่ง (ปริญญา จินดา ประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553) องค์ประกอบที่สำคัญของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ เป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือ อลูมินา และมีความละเอียดสูง โดยวัสดุมีคุณสมบัติความเป็นวัสดุประสานน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย และสามารถทำปฏิกิริยากับค่างที่อุณหภูมิปกติ

2.7 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะนำไปเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงมายังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 0.15 มม. ความละเอียดของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้าถ่านหิน, อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 จึงแยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ $\text{SiO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณผลรวมของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน Class F ส่วนถ่านหินสับบิทูมินัส (sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน Class C

เถ้าถ่านหินหากมีความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในปริมาณสูงจะทำให้คุณภาพของเถ้าถ่านหินลดลง มาตรฐาน ASTM C 311 กำหนดให้ทดสอบปริมาณความชื้น โดยการเผาจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ตามมาตรฐาน ASTM C 114 โดยการเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้ทดสอบปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิ 750±50 องศาเซลเซียส โดยใช้ถ้วยดินขาวเผา (porcelain) มาตรฐาน ASTM C 618 ระบุปริมาณความชื้นให้ได้ไม่เกินร้อยละ 0.3 ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ระบุให้ไม่เกินร้อยละ 6

โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1) และหากเถ้าถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูงเช่นกันซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้สามารถใช้เถ้าถ่านหิน Class F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลการใช้งานหรือผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้

เถ้านหินมีลักษณะเป็นรูพรุน (cellular) มีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดน้ำได้มาก และทำให้ความต้องการน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ยังดูดซับสารเคมีผสม ทำให้ต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มมากขึ้น

2.8 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมีความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B Ratio) ต่ำ มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่าอัตราส่วนของ W/C อยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะเวลาการหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 ชม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต)

การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์ อีพ็อกซี โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีหรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีน เช่น เถ้านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุพอลิโพรพิลีนสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุพอลิโพรพิลีนส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรง อย่างเช่น สภาวะแวดล้อมทะเล การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นการลด

ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จึงทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางหนึ่งที่สามารถทำให้คอนกรีตสามารถทนทานการกัดกร่อนต่อสภาวะแวดล้อมทะเล

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้ว ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพ โดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีตรวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมีความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขจัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่าง ๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตก ร้าว เล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9 ถึง 8.2, ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่า 2,200 ถึง 2,500 มก./ล. โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต อย่างรุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ cm^2 ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กก./ cm^2 ที่อายุ 28 วัน

จากการศึกษาที่ผ่านมา Chalee และคณะ (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง มีการเกิดสนิมมากกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน ซึ่งผลการวิจัยที่น่าเสนอเป็นการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้ง ซึ่งการทำลายเนื่องจากคลอไรด์จะชัดเจนมากกว่าซัลเฟต ดังนั้น โดยองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มี

ปริมาณของ C_3A สูงกว่าประเภทที่ 5 และ C_3A มีคุณสมบัติในการดักจับคลอไรด์ จึงส่งผลให้ปริมาณของคลอไรด์อิสระที่ทำให้เกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีน้อยกว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะมีการเกิดสนิมของเหล็กมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำทะเลมีการทำลายเนื่องจากซัลเฟตควบคู่ไปด้วย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีคุณสมบัติในการป้องกันการทำลายเนื่องจากซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นถ้าเป็นโครงสร้างที่อยู่ใต้ทะเลลึกที่ไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจน ผลของการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ก็จะน้อยกว่าซัลเฟต และการเลือกใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ก็จะมีเหมาะสมมากกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

แนวทางการใช้เถ้านหินเพื่อเพิ่มความคงทนของคอนกรีต ถือว่าประสบความสำเร็จอย่างมาก ทั้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คอนกรีตมีราคาถูกลง หรือการใช้ในงานเฉพาะด้านที่ต้องการเถ้านหินในการปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นที่ต้องการ เช่น ลดการแตกร้าว ลดการขยายตัว ลดความร้อนในคอนกรีตและเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถ้านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ผลในการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในบริเวณที่อยู่ริมชายฝั่งทะเลที่สัมผัสกับระดับน้ำขึ้นลง โดย Chalce และคณะ (2010) ศึกษาการใช้เถ้านหินแม่เมาะในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างถึงระยะเวลา 7 ปี ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เถ้านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาข้อมูลถึง 7 ปี คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ส่วนการศึกษาในต่างประเทศ Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ โดยหล่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล ผลปรากฏว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเริ่มต้นแต่เมื่อแช่น้ำทะเลนานๆจะมีผลไม่แตกต่างกัน อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าน

ถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และยังลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านหินมากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถ่านหินร้อยละ 30 และ 50 มีค่าลดลงในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 2 ถึง 10 ปี เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Saadoun และคณะ (1993) ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตแล้วแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1,000 วัน ปรากฏว่าคอนกรีตที่แทนที่ถ่านหินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ถึง 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ และระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นของคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ร้อยละ 9, 11 และ 14 มีค่ามากกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ร้อยละ 2 เท่ากับ 1.75, 1.93 และ 2.45 เท่า ตามลำดับ

Thomas และคณะ (1994) ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มตัวอย่างแตกต่างกัน หลังจากบ่มจึงนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เมื่อครบอายุการแช่จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 1 และ 2 ปี พบว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลนานขึ้นผลไม่แตกต่างกันมาก อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่ถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้

Tarun และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมถ่านหิน Class C ในปริมาณมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบ พบว่าระยะต้นกำลังอัดมีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่ถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมถ่านหินมีค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยการแทนที่ถ่านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ให้ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดที่อายุ 91 วัน เนื่องจากถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงเข้าไปอุดแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตจึงลดลง

Bai และคณะ (2003) ได้ทำการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน โดยตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ ถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยทำให้ความชื้นเหลวและความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ซึ่งระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้นจะให้ผลที่ชัดเจนขึ้น

มณเฑียร ทีฆวณิช และคณะ (2548) ได้ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมมีปัญหาการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาานาน

Chindaprasirt และคณะ (2008) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าถ่านหินละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ให้มอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) ปรับให้อัตราไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 ผลการทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 1202 ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 90 วัน มอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (SP) เพื่อให้มีอัตราไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5

Chindaprasirt และคณะ (2007) ได้ทำการผสมคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 3 และทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 และ 6 เดือน เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบและคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน

อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมทะเลมีการทำลายทั้งจากคลอไรด์และซัลเฟต การใช้เถ้าถ่านหินซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตที่ดี จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการพัฒนาคอนกรีตให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดสร้างงานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำเถ้าถ่านหินที่มีมากในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต ซึ่งเถ้าถ่านหินเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม ดังนั้นการศึกษาถึงผลของแหล่งผลิตความละเอียด ปริมาณเถ้าถ่านหิน ระยะเวลาคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตและระยะเวลาที่เหมาะสม ตลอดจน

เป็นแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทยให้มี
ประสิทธิภาพและมีความทนทานยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
2. ใ้ถ้ำ่านหิน ใช้ใ้ถ้ำ่านหินจากบริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด (โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น.พี.เอส.) อำเภอสริมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี และใ้ถ้ำ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางและใ้ถ้ำ่านหินกาญจนบุรี
3. K_2CrO_3 5%
4. ซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$)
5. $NaHCO_3$ 2%
6. สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล สภาพเปียกสลับแห่งบริเวณโรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี (แสดงดังรูปที่ 3.12)

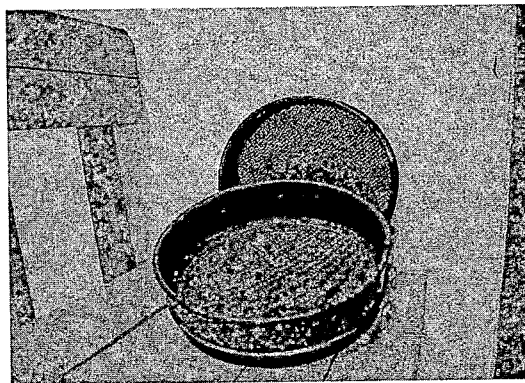
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) (แสดงดังรูปที่ 3.1)
2. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (แสดงดังรูปที่ 3.2)
3. เครื่องเจาะคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.3)
4. เครื่องตัดคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 3.4)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก (แสดงดังรูปที่ 3.5)
6. เครื่องต้ม (แสดงดังรูปที่ 3.6)
7. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาดต่างๆ (แสดงดังรูปที่ 3.7)
9. ครกหิน (แสดงดังรูปที่ 3.8)
10. บิวเรตต์ (แสดงดังรูปที่ 3.9)
11. ขวดชมพู (แสดงดังรูปที่ 3.7)
12. กระดาษกรอง
13. ปิเปตต์ (pipette) (แสดงดังรูปที่ 3.7)
14. ป้อม
15. กระบอกตวง (แสดงดังรูปที่ 3.7)
16. แท่งแก้ว, ที่ตักสาร (แสดงดังรูปที่ 3.7)

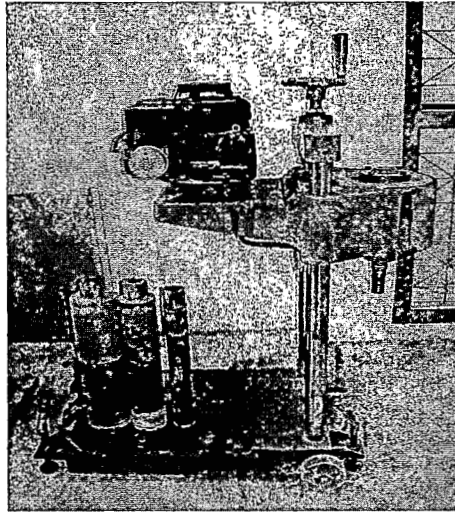
17. กรวยกรอง (แสดงดังรูปที่ 3.10)
18. หลอดหยด(Dropper) (แสดงดังรูปที่ 3.7)



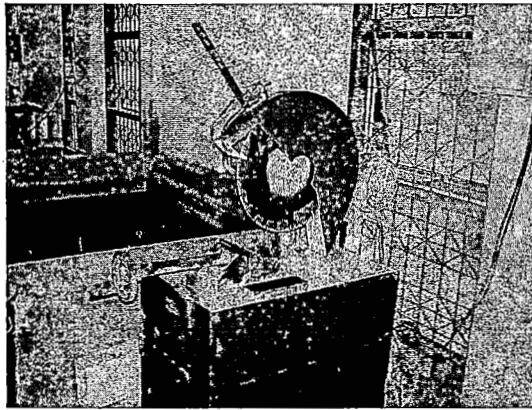
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



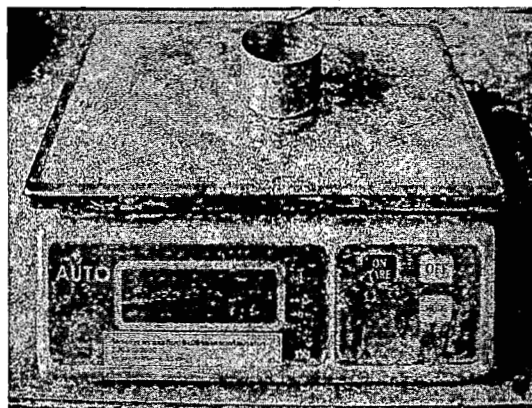
รูปที่ 3.2 ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20



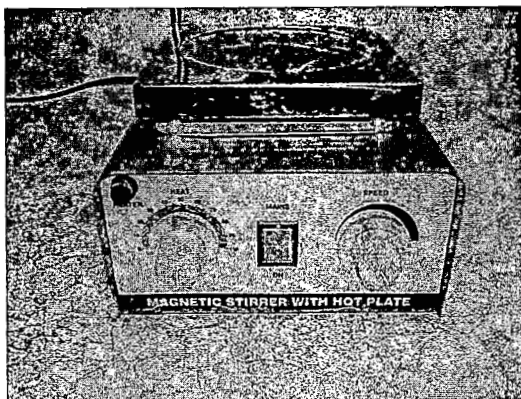
รูปที่ 3.3 เครื่องเจาะคอนกรีต



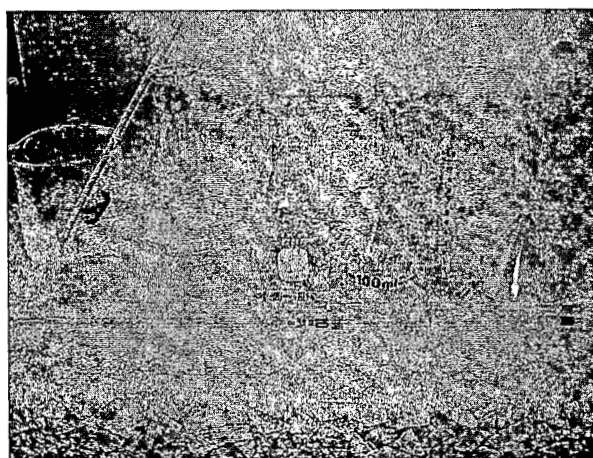
รูปที่ 3.4 เครื่องตัดคอนกรีต



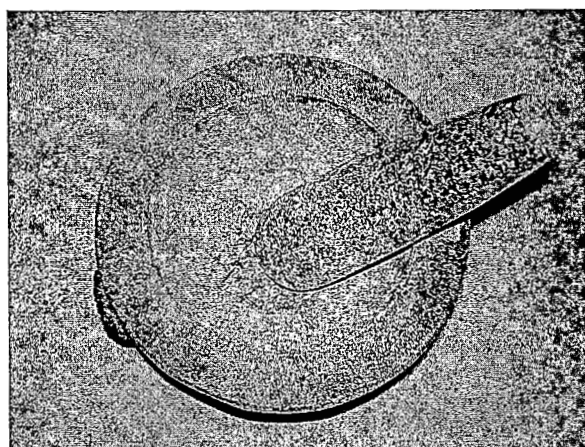
รูปที่ 3.5 เครื่องขนาน้ำหนัก



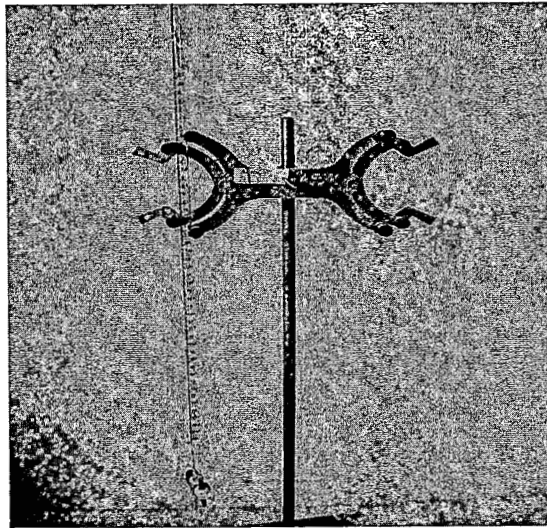
รูปที่ 3.6 เครื่องต้ม



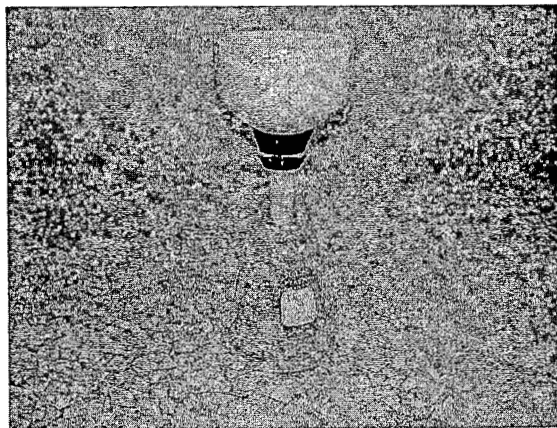
รูปที่ 3.7 เครื่องแก้วที่ใช้การไทเทรต



รูปที่ 3.8 ครกหินบดคอนกรีต



รูปที่ 3.9 บิวเรตต์



รูปที่ 3.10 กรวยกรอง

3.3 ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยในครั้งนี้กำหนดปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ใช้เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่ง คือ เถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. (NPS) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และเถ้าถ่านหินแม่เมาะซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ (PC) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตารางที่ 3.1 แสดงปฏิกิริยาคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยโดยกลุ่มสัญลักษณ์ที่ใช้มีดังนี้

354886

666.94
75590
2.4

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

Mix	Mix Proportion of Concretes (kg/m ³)							Slump (cm)
	Cement Type V	Fly Ash		Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	SP (%)	
		NPS	Mae Moh					
V	295	-	-	814	1039	192	-	8
VFC15	251	44	-	814	1025	192	0.2	8
VFC25	221	74	-	815	1017	192	0.3	7
VFC35	192	103	-	815	1009	192	0.4	7
VFC50	148	148	-	815	996	192	0.6	5
VPC15	245	-	43	815	1039	187	-	7
VPC25	215	-	72	815	1039	187	-	7
VPC25	186	-	100	815	1039	186	-	9
VPC50	132	-	132	815	1039	172	-	7

“V” คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

“FC” และ “PC” คือ แก้วฉนวนที่ได้ออกจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (เอ็น.พี.เอส.) และแบบพูลเวอร์ไรซ์ (แม่เมาะ) ตามลำดับ

“15, 25, 35, 50” คือ คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วยแก้วฉนวนในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“V” หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

“VFC15” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยแก้วฉนวนที่ได้ออกจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

“PC15” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยแก้วฉนวนที่ได้ออกจากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ จากโรงงานโดยตรงในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

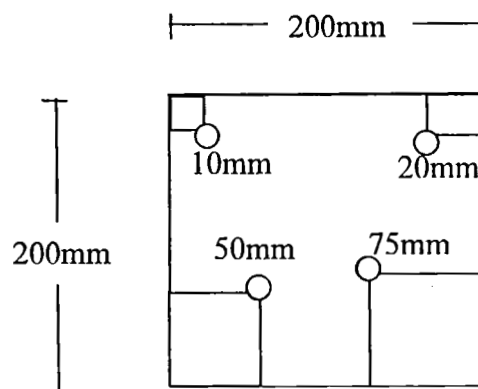
3.4 วิธีการศึกษา

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

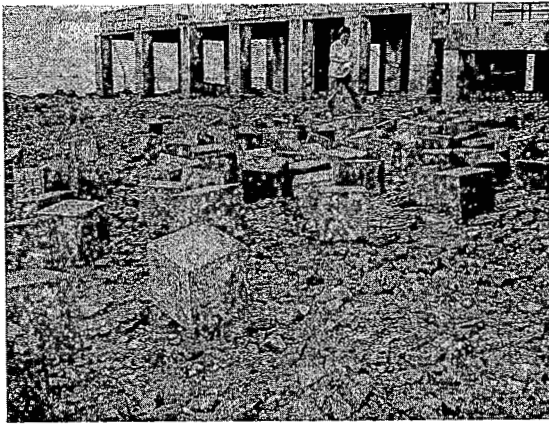
ออกแบบปฏิภาคส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเป็นคอนกรีตควบคุม (V) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.บดละเอียด และเถ้าถ่านหินแม่เมาะจากโรงงานโดยตรง ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีต 12 ส่วนผสม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. จากนั้นฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ลงในคอนกรีตระยะห่างจากผิวคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อใช้ทดสอบการเกิดสนิมเหล็ก (ดังรูปที่ 3.11)

ถอดแบบหล่อคอนกรีตเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง และนำคอนกรีตบ่มในน้ำประปา 27 วัน หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเล ณ ชายหาด โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี ซึ่งทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งทุกวันดังรูปที่ 3.12 ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 5 ปี เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต



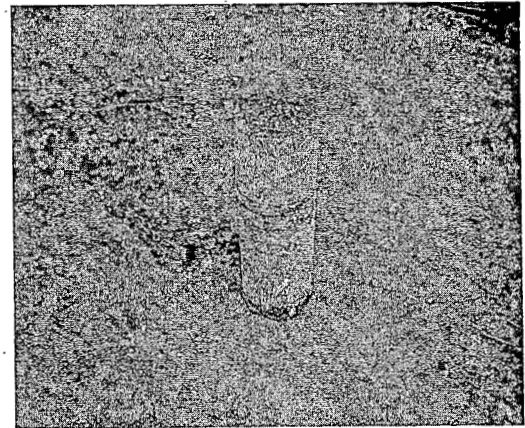
รูปที่ 3.11 แพลนฝังเหล็กเส้นกลมในคอนกรีต



รูปที่ 3.12 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล

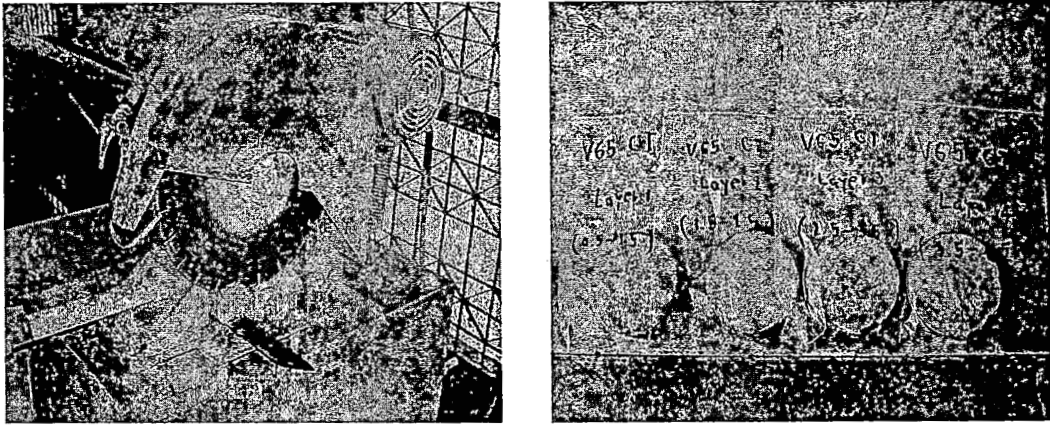
3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์

3.5.1 นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200 มม. ที่เก็บมาจากสถานที่แช่ตัวอย่างมาทำการเจาะด้วยหัวเจาะเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ให้ได้เป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ดังรูปที่ 3.13



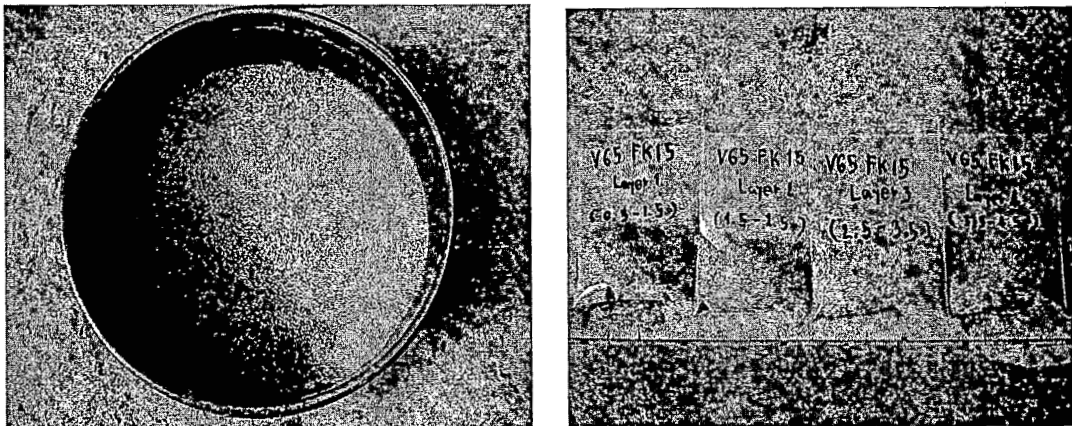
รูปที่ 3.13 การเจาะตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

3.5.2 จากนั้นนำตัวอย่างทรงกระบอก มาทำการตัดเป็น 4 ชั้น ที่ความลึก 5, 15, 25 และ 35 มม. ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การตัดตัวอย่างทดสอบ

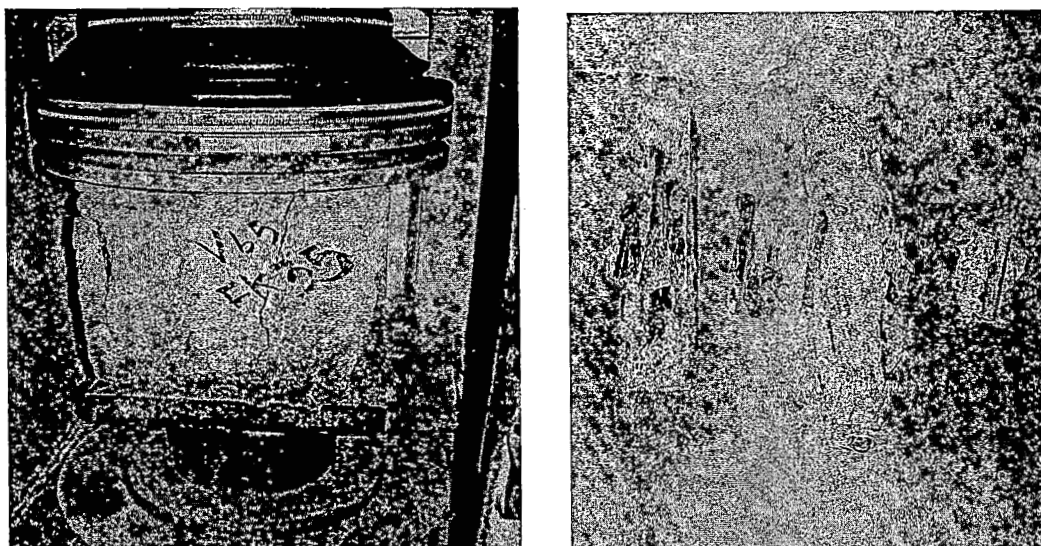
3.5.3 นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตของแต่ละความลึกที่ได้มาทำการบดโดยครกหินแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 20 ดังรูปที่ 3.15 แล้วนำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดละเอียด

3.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

3.6.1 นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³. ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 100 มม. แล้วมาทำการกัดโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต ดังรูปที่ 3.16

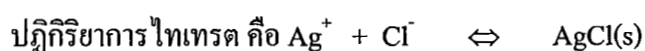


รูปที่ 3.16 การกคสำรวจเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

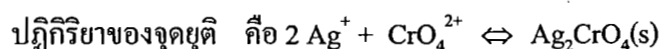
3.7 การทดสอบปริมาณคลอไรด์

ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method)

วิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ก่อน เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ตะกอนขาว



ตะกอนแดง

3.7.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

สารละลาย AgNO_3 0.05 m

เนื่อง AgNO_3 เป็นสารที่ไม่เสถียร ดังนั้นต้องทำการเตรียมสารละลาย โดยใช้ beaker

จากสมการ ความเข้มข้น
$$\left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right) = \frac{\text{g}}{\text{Mw}} \times \frac{1000}{V}$$

$$V = \text{ml ที่ต้องการเตรียม, Mw ของ } \text{AgNO}_3 = 169.87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

จากสมการจะได้ค่า g ซึ่งก็คือประมาณ AgNO_3 ที่ต้องใช้

วิธีเตรียม ใช้ beaker เติมน้ำกลั่น ตามค่า V ที่ใช้ จากนั้นเติม AgNO_3 ที่หามา คนจนละลายแล้วเก็บใส่ขวดสีชา

สารละลาย NaCl 0.05 M (500ml)

สารละลาย NaCl 0.05 m เอาไว้เทียบมาตรฐานหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย AgNO_3 (ใช้ ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

$$\text{NaCl} \text{ มีมวลโมเลกุล (Mw)} = 58.5 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

ซึ่ง NaCl ประมาณ 1.46 กรัม (บันทึกทศนิยม 3 ตำแหน่ง)

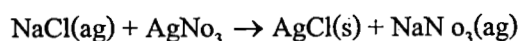
คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย NaCl

$$\begin{aligned} M_{\text{NaCl}} &= \frac{\text{g}}{\text{Mw}} \times \frac{1000}{500} \\ &= ? \frac{\text{mol}}{\text{l}} \end{aligned}$$

เอาไปไทเทรตกับ AgNO_3 เพื่อหาความเข้มข้นของ AgNO_3 ที่แน่นอน

3.7.2 การเทียบมาตรฐานสารละลาย AgNO_3

การคำนวณหา AgNO_3 ที่แน่นอน จากสมการ



$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad \frac{\text{mol NaCl}}{\text{mol AgNO}_3} &= \frac{1}{1} \\ \text{mol NaCl} &= \text{mol AgNO}_3 \\ (\text{MV})_{\text{NaCl}} &= (\text{MV})_{\text{AgNO}_3} \\ M_{\text{NaCl}} \cdot V_{\text{NaCl}} &= M_{\text{AgNO}_3} \cdot V_{\text{AgNO}_3} \end{aligned}$$

M_{NaCl} จากการคำนวณ , V_{NaCl} จาก pipet 10 ml

$$\therefore M_{\text{AgNO}_3} = ? \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

3.7.3 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์

3.7.3.1 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรด (Acid soluble)

นำตัวอย่าง 10 กรัม , กรดไนตริก(1:1) 75 มล. และน้ำกลั่น 25 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้ม 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า (เนื่องจากคลอไรด์มีความเข้มข้นสูง) แล้วดูตัวอย่างที่เจือจางแล้วใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10

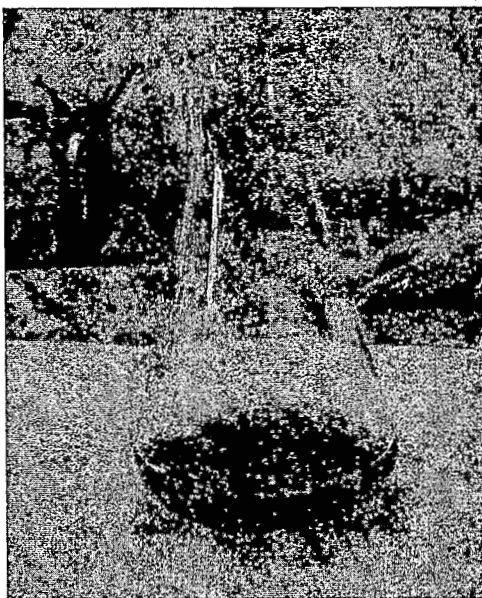
มล. เติม K_2CrO_3 5% 1 มล. และ $NaHCO_3$ 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้มีการตกตะกอน จากนั้นนำมาหยดด้วย ซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม(ดังรูปที่3.17) บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.17 ลักษณะสีของจุดยุติของสารละลายในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรด (Acid soluble)

3.7.3.2 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำ (Water soluble)

นำตัวอย่าง 10 กรัม , น้ำกลั่น 10 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้ม 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ ปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น แล้วดูดตัวอย่างใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10 มล. เติม K_2CrO_3 5% 1 มล. และ $NaHCO_3$ 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้ทั่ว จากนั้นนำมาหยดด้วย ซิลเวอร์ไนเตรด ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม(ดังรูปที่3.18) บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 ลักษณะสีของจุดยุติของสารละลายในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำ (Water soluble)

3.8 การวัดปริมาณสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 100 มม. แล้วมาทำการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1x1 มม.² มาทาครอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้คือพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก (ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิม) ดังสมการที่ 3.1 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูปสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

$$C_s(\%) = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ	C	คือ	ร้อยละของพื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม
	RA	คือ	พื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม (มม. ²)
	SA	คือ	พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก (มม. ²)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และแบบพุลเวอร์ไรซ์ (PC) โดยเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (เถ้าถ่านหินจาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) ผ่านการบดละเอียดให้ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.35 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพุลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.41 และ 72.51 ตามลำดับ แม้ว่าปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 70 แต่เนื่องจากมีปริมาณ LOI เท่ากับร้อยละ 25.0 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 6 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 จึงไม่สามารถจัดเถ้าถ่านหินนี้ อยู่ในเถ้าถ่านหิน Class F และ Class C ได้ ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลักของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.07 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 4.1 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.85 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.95 ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2-3.1 (ACI 221R-89) ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 และ ASTM C128-93 โดยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72 และ 2.61 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5	เถ้าถ่านหิน	
		FC	PC
Silicon Dioxide, SiO ₂	21.52	46.7	36.02
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	3.56	12.85	20.58
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.56	5.91	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	4.17	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-	-
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.10	0.14	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O	3.56	1.07	1.69
Sulfur Trioxide, SO ₃	3.56	4.17	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	25.06	0.07

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวม	
	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61
Apparent Specific Gravity	2.72	2.61
Absorption (%)	0.43	0.90
Fineness Modulus	0.43	2.61
Maximum Size (mm)	20	N/A

Remark: N/A = Not applied

4.2 คุณสมบัติของน้ำทะเล

คุณสมบัติของน้ำทะเลที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 ซึ่งเป็นค่าอ่อน ๆ และผลการทดสอบพบว่า มีปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 19,000 มก./ล. และปริมาณซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200 ถึง 2,700 มก./ล. พบว่ามีปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟตประมาณ 8 เท่า โดยคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำทะเลส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 10

ACI 318-05 (2005) แนะนำให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.² และกำหนดว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟต ละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มล./ล. แสดงว่าคอนกรีตอยู่ในสภาวะอาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ซม.² ดังนั้นสภาวะแวดล้อมทะเลที่ทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีแนวโน้มส่งผลทำลายต่อตัวอย่างคอนกรีตเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตค่อนข้างรุนแรง แต่ทั้งนี้สาเหตุของการทำลายไม่ได้มีผลมาจากสารประกอบซัลเฟตเพียงอย่างเดียว แต่มีผลมาจากคลอไรด์ (ซึ่งทำลายเหล็กเสริม) และปัจจัยทางกายภาพอื่น ๆ เช่น แรงกระแทกจากคลื่น กรวด และทราย เป็นต้น

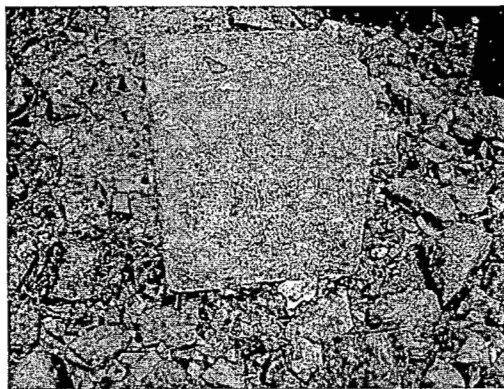
สภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณชายหาดริมทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ระดับน้ำทะเลขึ้นและลง วันละ 2 รอบ คือตอนเช้าน้ำทะเลมีระดับสูงสุดจากนั้นเวลาบ่ายน้ำทะเลจะลดลงต่ำสุดจนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง และช่วงเย็นน้ำทะเลจะขึ้นสูงสุดอีกครั้งและลดระดับในเวลากลางคืน ระยะเวลาขึ้นลงของน้ำทะเลจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น ฤดูหนาวน้ำทะเลจะขึ้นสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะเปียกนานกว่าฤดูอื่น ๆ หรือคอนกรีตไม่ได้อยู่ในสภาวะแห้งสนิท

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

Time	Parameter			
	Sample Condition	pH	Chloride, Cl ⁻ (mg/L)	Sulphate, SO ₄ ²⁻ (mg/L)
2001 January	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
2001 October	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
2002 May	Clear, No Color	8.2	18,000	2,500
2002 September	Clear, No Color	7.8	18,000	2,500
2003 August	Clear, No Color	7.9	17,000	2,500
2003 December	Clear, No Color	8.2	19,000	2,700
2004 April	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
2005 February	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200

4.3 ลักษณะของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล

สภาพตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ซึ่งได้แก่ คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ใช่เถ้าถ่านหิน คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ และคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินกาญจนบุรีพบว่า คอนกรีตเหล่านี้ มีลักษณะผิวคอนกรีตมีความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนของสารเคมีหรือเกิดการขัดสี พบรอย เปรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวคอนกรีต มีคราบเกลือติดอยู่ที่ผิวของคอนกรีตเกือบทั้งก้อน นอกจากนี้ยังเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมี พบคราบสนิม และรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าคอนกรีตซึ่งพบมากที่สุดคือคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ใช่เถ้าถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ไม่ใช่เถ้าถ่านหิน และที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งสามชนิดยังคงมีสภาพผิวคอนกรีตใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 สภาพผิวคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

พิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดเกือบทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ซึ่งอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นต่ำในช่วงต้น (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2551) อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 25 (VFC25) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 337 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 35 และ 50) ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีค่าลดลง ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด ไรซ์มีเนว โน้ม เหมือนกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด กล่าวคือเมื่อแทนที่เถ้าถ่าน

หินเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ทั้งนี้เนื่องจาก กลไกการเกิดกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบ มีลักษณะเหมือนกัน คือเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำในช่วงต้น และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินกับด่างในคอนกรีตต่อเนื่องเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น ดังนั้นการที่กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในปริมาณสูงขึ้น เป็นผลจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณน้อยลง ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงสุดที่การแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 25 โดยให้กำลังอัดเท่ากับ 337 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน PC ทุกส่วนผสม (คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน PC อัตราส่วนร้อยละ 35 มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 324 กก./ซม.²) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดถึงแม้จะมีอนุภาคหยาบ มี LOI สูง และมีความพรุนสูง เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียด ก็สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรกสูงกว่าเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟูลเวอรีไรซ์ได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคูสมบัติทางกายภาพพบว่า เถ้าถ่านหิน FC ที่ผ่านการบดมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด (ค่าตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) กว่าเถ้าถ่านหิน PC (ค่าตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก) ก่อนข้างมาก จึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงต้นเกิดขึ้นได้เร็ว (Sata et al., 2007 ; Kiattikomol et al., 2001) และมีกำลังอัดที่สูง อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่างกันมาก โดยปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เหมาะเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุดคือเท่ากับร้อยละ 25 และ 35 สำหรับเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดและแบบฟูลเวอรีไรซ์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (ตารางที่ 4.4) พบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งโดยภาพรวมแล้วคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน PC มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC ก่อนข้างชัดเจน เช่น การแทนที่เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟูลเวอรีไรซ์ในคอนกรีตร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปีเท่ากับ 439, 444, 445 และ 405 กก./ซม.² ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 434, 428, 406 และ 327 กก./ซม.² ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี (ตารางที่ 4.4) พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 2 กลุ่ม มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจาก 28 วัน จนถึงหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสม

เถ้านหิน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน PC มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน FC ซึ่งอาจเป็นผลจากเถ้านหิน PC มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าเถ้านหิน FC ตลอดจนลักษณะอนุภาคที่กลมตัน ของเถ้านหิน PC ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวดีขึ้น Chalee et al., 2010) โดยกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 135.6, 127.1, 129.7 และ 149.1 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้านหินจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ มีร้อยละของกำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 137.7, 138.2, 137.3 และ 157.5 ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้พบว่า คุณสมบัติทางเคมีและอนุภาคที่กลมตันของเถ้านหิน PC มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวหลังแช่น้ำทะเลมากกว่าความละเอียดของเถ้านหิน โดยสังเกตได้ว่าถึงแม้เถ้านหิน FC จะผ่านการบดละเอียด (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) และมีอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้านหิน PC (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก) อย่างมาก แต่กลับมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล ได้ต่ำกว่าเถ้านหิน PC ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ให้ผลในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลในแง่ของคุณสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีค่าค่อนข้างสูงถึงแม้ว่าจะผ่านการแช่น้ำทะเลมาถึง 5 ปี จึงสามารถที่จะใช้เป็นคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลายทางกายภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนด้วยเถ้านหินทั้งสองกลุ่ม ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มการแทนที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินทั้งสองกลุ่มในปริมาณมาก ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในช่วง 5 ปี ที่แช่น้ำทะเลค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้านหินปริมาณสูงในคอนกรีตมีผลให้กำลังอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตที่มีการรับแรงเชิงกล โดยเฉพาะแรงคด อาจเกิดรอยร้าวเล็กๆ ที่ส่งผลให้การทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ และซัลเฟตในสิ่งแวดล้อมทะเลในช่วงต้นเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และมีผลทำลายชัดเจนมากขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะใช้งานที่อายุมากขึ้น ดังนั้นถึงแม้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 จะมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงก็ตาม ก็ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ตัวผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)		ร้อยละกำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	
V	333	403	121.0
VFC15	320	434	135.6
VFC25	337	428	127.1
VFC35	313	403	129.7
VFC50	219	327	149.1
VPC15	319	439	127.1
VPC25	321	444	138.2
VPC35	321	445	127.1
VPC50	257	405	157.5

4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์

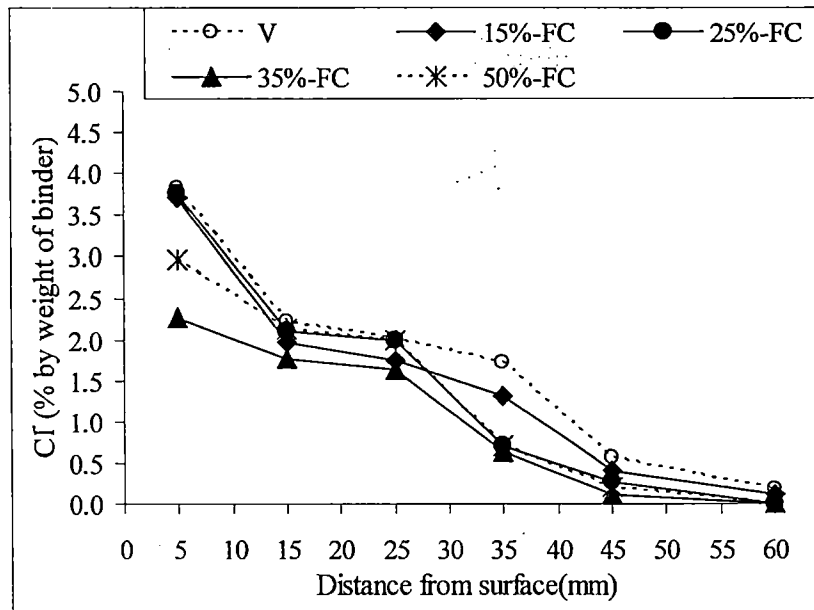
พิจารณาผลของเถ้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบคและแบบพุลเวอร์ไรซ์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับพบว่า เถ้านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินทุกกลุ่มพบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้านหิน การแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้น ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเหมือนกันทั้งสองกลุ่ม ตลอดจนการใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 35 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีที่สุด อาจเกิดจากคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินไม่เกินร้อยละ 35 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ค่อนข้างสูง (มากกว่า 400 กก.ซม.²) ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น ทำให้ลดโพรงในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ละลายน้ำได้และส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาการใช้เถ้านหินในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบมีการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การแทนที่เถ้านหิน

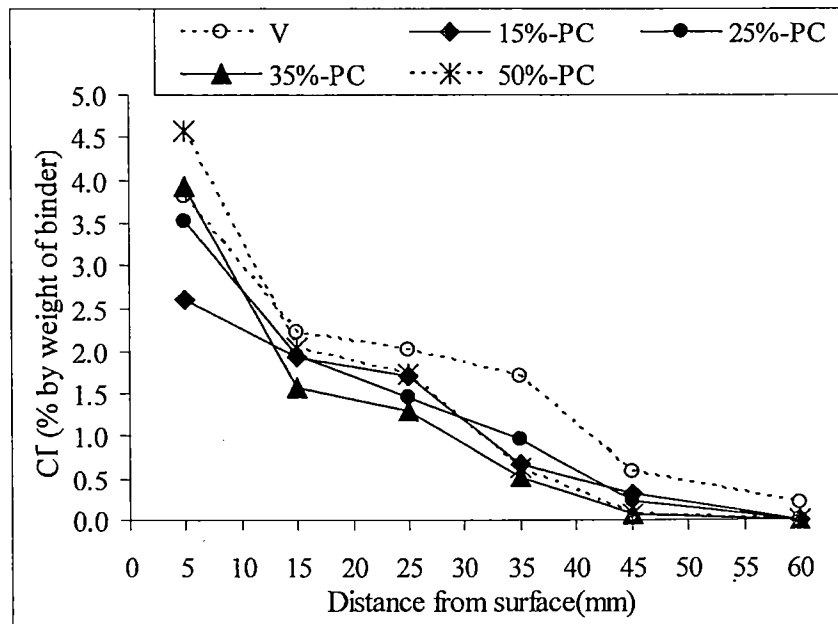
ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 มีผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น (Chalce et al., 2009 ; Rukzon et al., 2009) การใช้เส้นใยปริมาณสูงในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ต่ำลง อาจเป็นผลจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยร้อยละ 50 ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตกลุ่มอื่น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เส้นใยปริมาณสูง เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้กำลังกับคอนกรีต ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นน้อย นอกจากนั้น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อาจไม่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเส้นใยได้สมบูรณ์ จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนและกำลังอัดต่ำลงได้ ตลอดจนคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงถึง 0.65 จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนและเกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและแบบฟูลเวอร์ไรซ์ที่ปริมาณการแทนที่เส้นใยต่างกันต่างๆ ดังรูปที่ 4.4ก-4.4ง พบว่าเส้นใยจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์มีแนวโน้มที่จะต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยเห็นผลชัดเจนที่ระดับความลึกที่มากขึ้น เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเส้นใยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 1.31, 0.70, 0.63 และ 0.71 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเส้นใยจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ พบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.68, 0.97, 0.52 และ 0.63 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้เส้นใย PC ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียด แต่สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเส้นใย FC ที่ผ่านการบดละเอียด ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ผ่านการเผาทั้งสองแบบ พบว่าเส้นใย FC มีลักษณะผิวขรุขระ ความพรุนค่อนข้างสูง รูปร่างไม่แน่นอน มีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง ในขณะที่เส้นใย PC มีลักษณะเป็นทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาก่อนบดมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้เส้นใยหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนประกอบทางเคมีดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเส้นใย PC มีผลรวมของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก สูงกว่าเส้นใย FC และมีค่า LOI ต่ำกว่าจึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเส้นใย PC มีการเปลี่ยนรูปของ Ca(OH)_2 ให้เป็น C-S-H ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใย FC และทำให้คอนกรีตที่ผสมเส้นใย PC สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใย FC ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เท่ากัน

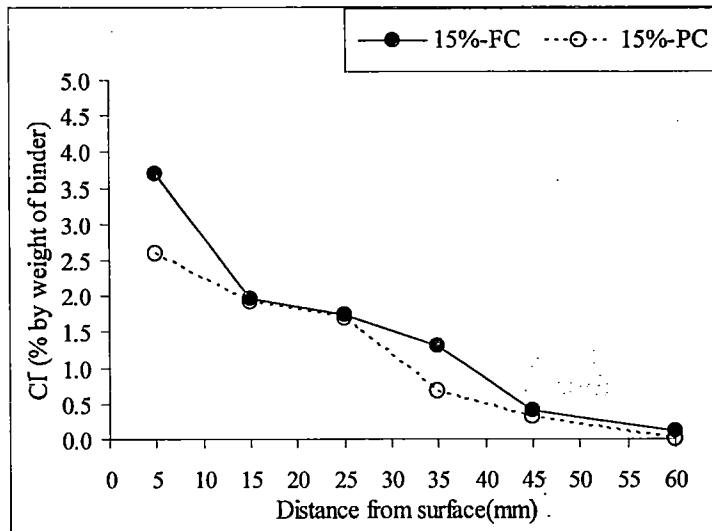
นอกจากองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านหิน PC ที่ส่งผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหิน FC ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าแล้ว เถ้าถ่านหิน PC ที่มีลักษณะอนุภาคกลมตันและมีขนาดคละกันที่ดีกว่าเถ้าถ่านหิน FC ก็สามารถอุดช่องว่างภายในคอนกรีตได้ดีอีกด้วย (Tangpagasit et al.,2005) และส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น



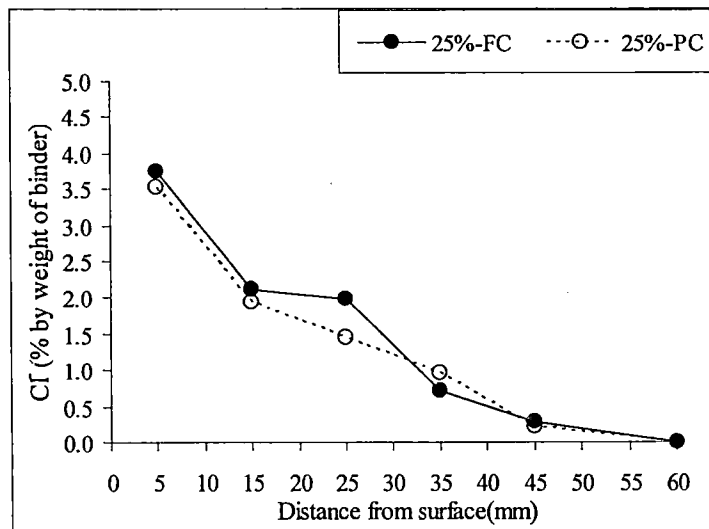
รูปที่ 4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC หลังแช่ในน้ำทะเล 5 ปี



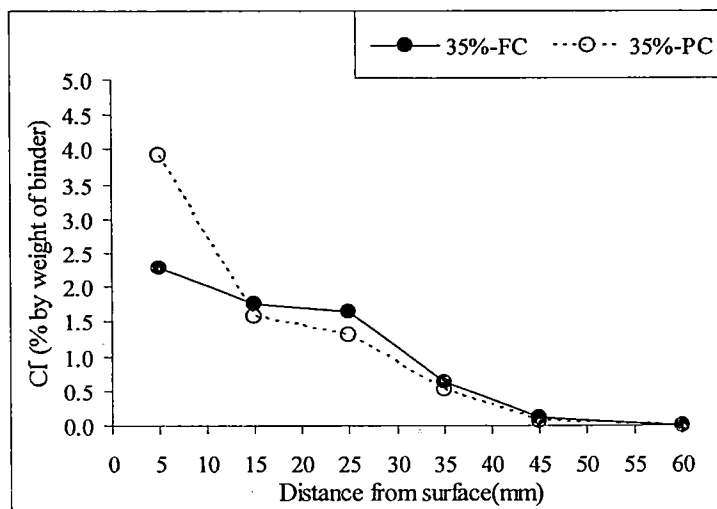
รูปที่ 4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน PC หลังแช่ในน้ำทะเล 5 ปี



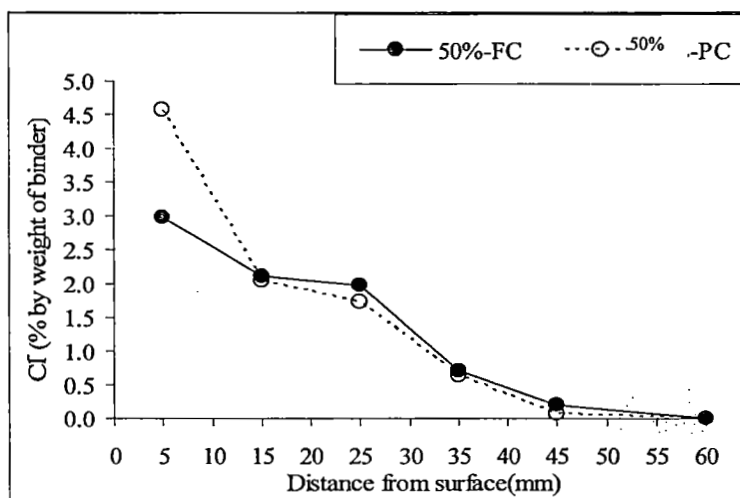
ก) ผสมแก้ต่างหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ข) ผสมแก้ต่างหินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ค) ผสมแก้ต่างหินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ง) ผสมแก้ถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

รูปที่ 4.4 ผลของแก้ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดและแบบพุลเวอร์ไรซ์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

4.6 การกักร่อนเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละของพื้นที่ที่เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมแก้ถ่านหิน FC และ PC หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี พบว่า การเกิดสนิมในเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10 และ 20 มม. ของคอนกรีตทุกกลุ่มมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง และมีสนิมเหล็กเกิดขึ้นปริมาณมาก (พื้นที่เกิดสนิมร้อยละ 90-100) จึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลของแก้ถ่านหินต่อการเกิดสนิมได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 และ 75 มม. ดังรูปที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข) ตามลำดับ พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมแก้ถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมแก้ถ่านหินอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้ถ่านหินสามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตได้ดี ถึงแม้จะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเลนานถึง 5 ปี ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมแก้ถ่านหิน พบว่าน้ำทะเลสามารถกักร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตได้ถึงระยะหุ้มเหล็ก 75 มม. โดยพื้นที่เกิดสนิมมีมากถึงร้อยละ 72 ส่วนกลุ่มที่ผสมแก้ถ่านหินพบพื้นที่เกิดสนิมไม่เกินร้อยละ 26 ที่ระดับความลึกดังกล่าว

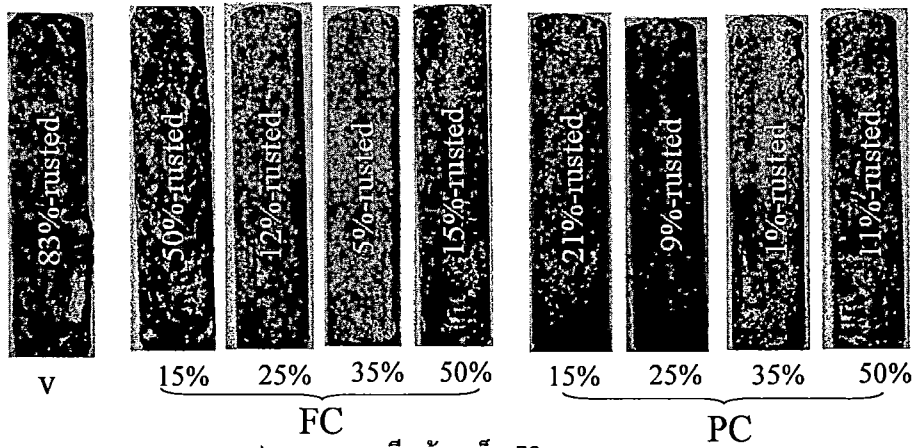
จากรูปที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข) พบว่า การใช้แก้ถ่านหินให้ผลในการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ค่อนข้างชัดเจน และการเพิ่มแก้ถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การเกิดสนิมในเหล็กลดลง โดยการผสมแก้ถ่านหินในคอนกรีตร้อยละ 25 ถึง 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กได้ดี และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่ใช้แก้ถ่านหิน FC และ PC ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้แก้ถ่านหินผสมในคอนกรีต ส่งผลให้การแทรกซึม

ของคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ลดลง รวมทั้งการคักจับคลอไรด์มีมากขึ้นซึ่งช่วยลดปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กกล้าได้ (Cheewaket et al.,2010) โดยพบว่า การใช้เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบผสมในคอนกรีตร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ผลในการต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต อย่างไรก็ตามในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินปริมาณมากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้สนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมีแนวโน้มมากขึ้น เช่นเดียวกับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ การเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อาจขึ้นกับระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤตอีกด้วย โดยการศึกษที่ผ่านมา (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) พบว่า การใช้เถาถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับของคลอไรด์วิกฤตต่ำลง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตได้เร็วขึ้นอีกด้วย

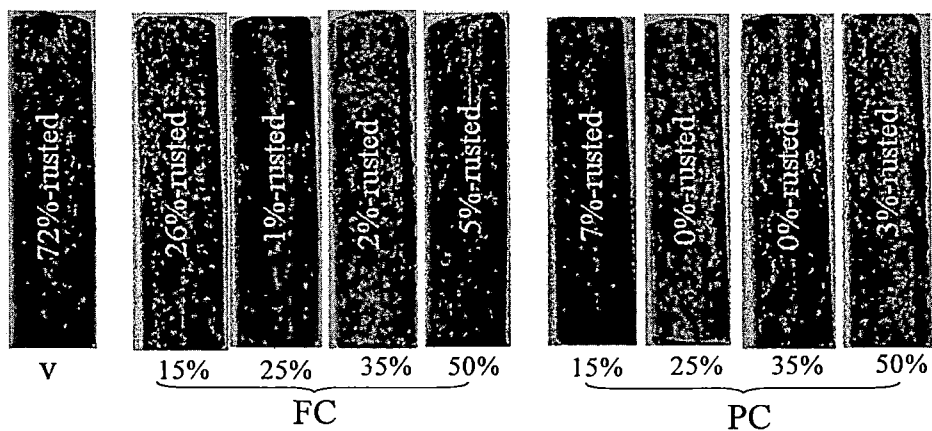
เมื่อเปรียบเทียบการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถาถ่านหิน FC และ PC พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน PC สามารถต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน FC และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่ระดับความลึก 50 และ 75 มม. เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยวัสดุประสาน พบพื้นที่สนิมในเหล็กที่ฝังระดับความลึก 50 มม. เท่ากับร้อยละ 50, 12, 5 และ 15 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยเถาถ่านหินจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ พบพื้นที่สนิมในเหล็กที่ฝังระดับความลึก 50 มม. เท่ากับร้อยละ 21, 9, 1 และ 11 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ที่ไม่ต้องผ่านการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถป้องกันการทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดจะต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้น้อยกว่าเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ แต่ผลการทดสอบถึง 5 ปี เป็นที่ยืนยันได้ว่า เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดที่ผ่านการบดละเอียด จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นวัสดุปะจิวโซลานเพื่อป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 4.5 พื้นที่สนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	พื้นที่สนิมเหล็ก (ร้อยละ)			
	ระยะหุ้มเหล็ก	ระยะหุ้มเหล็ก	ระยะหุ้มเหล็ก	ระยะหุ้มเหล็ก
	10 มม.	20 มม.	50 มม.	75 มม.
V	99	98	83	72
VFC15	100	96	50	26
VFC25	99	98	12	1
VFC35	98	97	5	2
VFC50	100	97	15	5
VPC15	100	97	21	1
VPC25	100	100	9	0
VPC35	99	98	1	0
VPC50	100	95	11	3



ก) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม.



ข) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

รูปที่ 4.5 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน FC และ PC เมื่อแช่น้ำ

ทะเล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษາสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 5.1.1) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิเดไรซ์ มีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิเดไรซ์แบบ
- 5.1.2) คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบทุกอัตราส่วนการแทนที่ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็ก ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน
- 5.1.3) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิเดไรซ์ ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็ก ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิเดไรซ์แบบ
- 5.1.4) ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 25-35 ให้ผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็ก และกำลังอัดคอนกรีตไปในทิศทางที่ดี ส่วนการแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงและการเกิดสนิมเหล็กมีมากขึ้น
- 5.1.5) เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิเดไรซ์แบบที่ผ่านการบดละเอียด สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อป้องกันการทำลายของสิ่งแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรดำเนินการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ใช้งานได้จริง

5.2.2) ควรเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากชายฝั่งทะเลอันดามัน และพื้นที่ชายฝั่งทะเลอื่นๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับน้ำทะเลชายฝั่งอ่าวไทย ที่ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในงานวิจัยนี้

5.2.3) ควรมีการศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ตลอดจนสร้างดัชนีความคงทนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหล่านี้

เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุฑทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-73.
2. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 6, สมาคมคอนกรีตไทย
3. มณฑิธร ศรีมหาณิช และคณะ, 2548, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.
4. วิเชียร ชาติ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 7 (1), 2554, หน้า 21-28
5. ACI 221R-89.. Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete. ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Detroit, 1992.
6. ACI 201.2R-01. Guide to durable concrete. ACI Committee 201, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48333-9094, 2003.
7. ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 4, Michigan, 2005.
8. ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
9. ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards, 1999, 04.01.
10. ASTM C127-88. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards 2001 ;04.02.
11. ASTM C128-93. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards 2001, 04.02.
12. 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.
13. ASTM C311. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
14. ASTM C114. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.

15. Broomfield J.P., 1996, Corrosion of Steel in Concrete. England Taylor & Francis Ltd.
16. Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B., (2003). Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.
17. Chalee W., Jaturapitakkul C., (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Mater Struct* 42, pp. 505-514.
18. Chalee W., Teekavanit M., Kiattikomol K., Siripanichgorn A., Jaturapitakkul C., (2007). Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. *Constr Build Mater* 21, pp. 965-971.
19. Chalee, W., Ausapanit, P. & Jaturapitakkul, C., (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, 1242-1249.
20. Cheewaket T., Jaturapitakkul C., Chalee W., (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Constr Build Mater* 24, pp. 1352-1357.
21. Chindaprasirt P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V., (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 5, pp. 932-938.
22. Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Songpiriyakij S., Shutubtim S., (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cem Concr Comp* 23, pp. 335-343.
23. Neville A.M., 1996, *Properties of Concrete*, 4th ed., England, Addison Wesley
24. Rukzon S., Chindaprasirt P., (2009). Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash. *Inter J Minera Metallu Mater* 16, pp. 475-481.
25. Saadoun S.S, Rasheeduzzafar and Gahtani, A.S., (1993). Corrosion of reinforced steel in fly ash blended cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 3, August, pp. 356-371.
26. Sata V., Jaturapitakkul C., Kiattikomol K., (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Constr Build Mater* 21, pp. 1589-1598.
27. Tarun, R.N., Shiw, S.S. and Mohammad, M.H., (1994). Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, pp. 913-922.

28. Tangpagasit J., Cheerarot R., Jaturapitakkul C., Kiattikomol K., (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cem Concr Res* 35, pp. 1145–1151.
29. Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D., (2004). Performance of pfa Concrete in a Marine Environment-10-year Results. *Cement and Concrete Composites*, 26, 5-20.
30. Thomas, M.D.A., Matthews, J.D. and Haynes, C.A., (1994). Chloride diffusion and reinforcement corrosion in marine exposed concrete containing pulverized-fuel ash. Elsevier Applied Science, London/New York, pp. 198-212.

ภาคผนวก ก
ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ตารางที่ ก.1 ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

Mix	Cl ⁻ penetration at 5-year exposure			
	% by weight of concrete		% by weight of binder	
	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)
V	5	0.80	5	3.82
	15	0.46	15	2.21
	15	0.42	15	2.01
	15	0.80	15	1.71
	15	0.42	15	0.58
	60	0.04	60	0.19
VFC15	5	0.71	5	3.70
	15	0.38	15	1.96
	15	0.38	15	1.74
	15	0.71	15	1.31
	15	0.46	15	0.42
	60	0.04	60	0.58
VFC25	5	0.67	5	3.75
	15	0.38	15	2.21
	15	0.36	25	1.99
	15	0.13	35	0.70
	45	0.05	45	0.58
	60	0.00	60	0.00
VFC25	5	0.38	5	2.27
	15	0.29	15	1.76
	15	0.27	15	1.64
	15	0.80	35	0.63
	35	0.02	45	0.12
	60	0.00	60	0.00
VFC25	15	0.46	35	2.97
	45	0.71	35	2.12
	15	0.29	35	1.96
	15	0.19	15	0.71
	45	0.63	35	0.38
	45	0.80	60	0.80
VPC15	5	0.46	35	2.60
	15	0.38	15	1.92
	45	0.31	15	1.64
	35	0.63	35	0.63
	45	0.00	35	0.27
	60	0.80	60	0.00

ตารางที่ ก.1 ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี (ต่อ)

Mix	Cl ⁻ penetration at 5-year exposure			
	% by weight of concrete		% by weight of binder	
	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)
VPC25	5	0.61	5	3.52
	15	0.34	5	1.94
	15	0.25	25	1.46
	35	0.17	25	0.97
	15	0.04	45	0.23
	60	0.00	60	0.00
VPC35	5	0.63	5	3.93
	15	0.25	45	1.57
	25	0.21	25	1.31
	25	0.00	25	0.52
	45	0.04	45	0.06
	60	0.00	60	0.06
VPC50	5	0.61	5	4.57
	15	0.27	15	2.05
	15	0.23	25	1.73
	25	0.00	35	0.63
	15	0.01	45	0.06
	60	0.00	60	0.00

ตารางที่ ก.2 ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ ในคอนกรีตที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็น
เวลา 5 ปี

Mix	Cl ⁻ penetration at 5-year exposure			
	% by weight of concrete		% by weight of binder	
	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)
V	5	0.69	5	3.32
	15	0.45	15	2.16
	15	0.45	15	1.70
	35	0.34	35	1.62
	45	0.10	15	0.48
	60	0.03	60	0.14
VFC15	5	0.69	5	3.43
	45	0.37	35	1.92
	15	0.19	35	0.98
	35	0.18	35	0.92
	45	0.03	35	0.36
	60	0.01	60	0.05
VFC25	5	0.64	5	3.56
	15	0.35	15	1.94
	15	0.13	15	0.74
	35	0.07	35	0.41
	45	0.64	45	0.22
	60	0.00	60	0.00
VFC35	5	0.35	5	2.10
	45	0.14	35	0.87
	45	0.00	25	0.98
	35	0.00	25	0.46
	45	0.07	45	0.98
	60	0.00	60	0.00
VFC35	5	0.42	5	2.85
	15	0.18	45	1.09
	15	0.19	25	0.71
	15	0.00	35	0.52
	45	0.01	45	0.14
	60	0.00	60	0.00
VFC35	5	0.45	5	2.34
	15	0.26	45	1.39
	45	0.10	25	0.95
	15	0.03	45	0.39
	45	0.05	45	0.27
	60	0.00	60	0.00

ตารางที่ ก.2 ผลทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็น
เวลา 5 ปี (ต่อ)

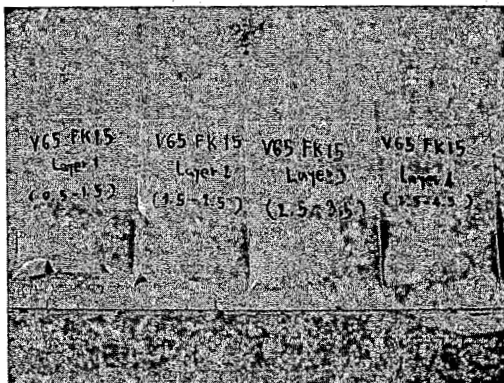
Mix	Cl ⁻ penetration at 5-year exposure			
	% by weight of concrete		% by weight of binder	
	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)	dis. (mm)	Cl ⁻ (%)
VPC25	5	0.56	5	3.26
	15	0.29	15	1.68
	15	0.09	15	0.56
	35	0.09	35	0.37
	45	0.03	35	0.37
	60	0.09	60	0.09
VPC35	5	0.61	5	3.79
	35	0.21	15	1.31
	15	0.09	15	0.53
	35	0.09	35	0.37
	15	0.61	60	0.06
	60	0.09	60	0.09
VPC50	5	0.57	5	4.30
	35	0.21	35	1.70
	25	0.09	35	0.70
	35	0.05	35	0.56
	45	0.00	45	0.00
	60	0.00	60	0.00

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์และตัวอย่างการคำนวณ

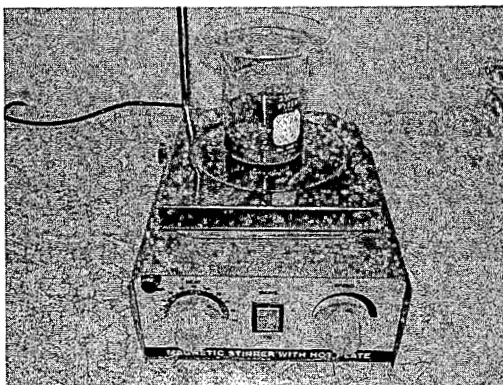
ข.1) วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ข.1.1) ตัวอย่างที่ผ่านการบดละเอียดและกรองผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ดังรูปที่ ข.1.1



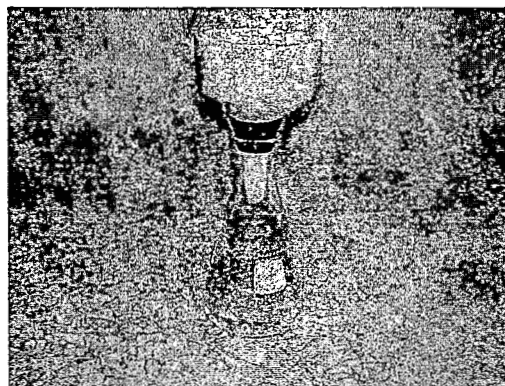
รูปที่ ข.1.1 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20

ข.1.2) นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงมาตรฐาน 10g, กรดไนตริก(1:1) 75 ml และน้ำกลั่น 25 ml ผสมในบีกเกอร์ กวนด้วยแท่งกวนประมาณ 1-2 นาที แล้วนำมาต้มให้เดือด(ปิดด้วยกระจกนาฬิกาและไม่ควรต้มนานเพราะจะทำให้คลอไรด์ระเหย) ดังรูปที่ ข.1.2 ปลอຍให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ข.1.2 แสดงตัวอย่างที่นำมาต้มให้เดือด

ข.1.3) นำตัวอย่างที่ผ่านการต้มมากรองด้วยกระดาษกรอง ดังรูปที่ ข.1.3



รูปที่ ข.1.3 แสดงตัวอย่างที่ผ่านการกรอง

ข.1.4) นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า แล้วดูตัวอย่างที่เจือจางแล้วใส่ขวดชมพู 10 ml ,เติม K_2CrO_4 (5%) 1 ml และ $NaHCO_3$ (2%) 10 เขย่าให้ทั่ว จากนั้นนำมาหยดด้วยซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม (ดังรูปที่ ข.1.4) บันทึกค่าจากบิวเรตต์



รูปที่ ข.1.4 ลักษณะสีของจุดยุติของสารละลายในการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรด (Acid soluble)

ข.2) วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ

นำตัวอย่าง 10 g, น้ำกลั่น 10 ml ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้มให้เดือด(ไม่ควรต้มนานเพราะจะทำให้คลอไรด์ระเหยได้) แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ ปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. ทำเหมือนขั้นตอนข.1.3 ของวิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ข.3) ตัวอย่างการคำนวณ

ข.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง

$$\begin{aligned}
 - \text{AgNO}_3 (\text{ความเข้มข้น, \%}) &= \frac{g}{M_w} \cdot \frac{1000}{V} \\
 0.05 &= \frac{g}{169.87} \cdot \frac{1000}{500} \\
 \backslash \quad g &= 4.246 \text{ กรัม} \quad (\text{คำตอบสมการที่ 1})
 \end{aligned}$$

* AgNO_3 (มีความเข้มข้น 5%, โมลโมเลกุลเท่ากับ 169.87, และ V คือปริมาณน้ำที่ต้องการละลาย หน่วยมิลลิลิตร)

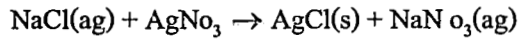
$$\begin{aligned}
 - \text{NaCl} (\text{ความเข้มข้น, \%}) &= \frac{g}{M_w} \cdot \frac{1000}{V} \\
 0.05 &= \frac{g}{58.50} \cdot \frac{1000}{500} \\
 \backslash \quad g &= 1.462 \text{ g} \quad (\text{คำตอบสมการที่ 2})
 \end{aligned}$$

* AgNO_3 (มีความเข้มข้น 5%, โมลโมเลกุลเท่ากับ 58.50, และ V คือปริมาณน้ำที่ต้องการละลาย หน่วยมิลลิลิตร)

ข.3.2 หาความเข้มข้นของสารละลาย NaCl ที่ละลายในน้ำ 500 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned}
 - \text{จากคำตอบสมการที่ 2} \quad Q \quad \frac{\text{mol}}{l} &= \frac{g}{M_w} \cdot \frac{1000}{V} \\
 M &= \frac{1.462}{58.50} \cdot \frac{1000}{500} \\
 &= 0.0499 \frac{\text{mol}}{l} \quad (\text{คำตอบสมการที่ 3})
 \end{aligned}$$

ข.3.3 เทียบมาตรฐานสารละลาย NaCl กับสารละลาย AgNO₃



จากสมการ $\frac{\text{mol NaCl}}{\text{mol AgNO}_3} = \frac{1}{1}$

$$\text{mol NaCl} = \text{mol AgNO}_3$$

$$(\text{MV})_{\text{NaCl}} = (\text{MV})_{\text{AgNO}_3}$$

$$M_{\text{NaCl}} \cdot V_{\text{NaCl}} = M_{\text{AgNO}_3} \cdot V_{\text{AgNO}_3}$$

จากคำตอบสมการที่ 2

$$\text{จะได้ } 0.0499 \text{ค } 10 = M \text{ค } (10.45)$$

จากปิเปตที่ดูดสารละลาย NaCl
ในปริมาณ 10 มิลลิลิตร

จากบิวเรตต์ที่หยดสารละลาย
AgNO₃ ในปริมาณ 10 มิลลิลิตร
จนเกิดจุดยุติหรือเกิดเป็นสีส้ม

$$M = 0.0477 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \text{ (คำตอบสมการที่ 4)}$$

ข.3.4 กำหนดหาปริมาณคลอไรด์ ณ จุดยุติของบิวเรตต์ที่ 0.95 มิลลิลิตร (หยด AgNO₃ จนเกิดตะกอนสีแดง)

สมมติให้ จุดยุติของบิวเรตต์ เท่ากับ 0.95 มิลลิลิตร

จากสมการ Cl (molar) = Mค (จุดยุติของบิวเรตต์/10)

จากคำตอบสมการที่ 4

$$\text{จะได้ } = 0.0477 \text{ค } \frac{0.95}{10}$$

$$= 0.004531 \text{ molar}$$

หรือ Cl = 35.5ค 0.004531

$$= 0.16 \text{ g/1000 ml}$$

หรือ Cl (%by wt.concret) = 0.5ค 100ค $\frac{0.16}{10}$

เจือจาง 5 เท่า

ตัวอย่างที่เจือจาง (ml)

$$= 0.8 \quad (\% \text{ by wt. concrete})$$

$$\text{หรือ } Cl \text{ (by wt. of binder)} = \frac{[(\text{วัสดุประสาน+หิน+ทราย+น้ำ}) \times \text{by wt. of concrete}] / (\text{วัสดุประสาน+น้ำ})$$

- * การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์อิสระและการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดคำนวณในลักษณะเดียวกัน

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) ปิยพงษ์ สุวรรณณีโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “ความคงทนของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเส้นใยหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ตอบรับตีพิมพ์)



ที่ ศธ ๐๕๒๕.๑(๒)/พิเศษ

กองบริการการศึกษา สำนักงานอธิการบดี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
๑๕๑๘ ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กทม. ๑๐๘๐๐

พฤษภาคม ๒๕๕๕

เรื่อง รับทศวรรษเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน ผศ.ดร.วิเชียร ซาลี

ตามที่ท่านได้เสนอขอความวิจย เรื่อง ความคงทนของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสม
เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพุลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล เพื่อตีพิมพ์ลงใน
วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บรรณาธิการวารสารวิชาการได้พิจารณาอนุมัติรับทศวรรษดังกล่าวและให้
จัดพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๓ เดือนกันยายน - ธันวาคม ๒๕๕๕

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

ผู้ช่วยบรรณาธิการวารสารวิชาการ

งานเอกสารและการพิมพ์

โทรศัพท์ ๐-๒๙๑๓-๒๕๐๐-๒๔ ต่อ ๑๖๒๖, ๑๖๒๗

โทรสาร ๐-๒๙๑๓-๕๘๑๔

การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพุลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

Chloride penetration and steel corrosion in Portland cement type V concrete containing fly ash from Fluidized-bed and Pulverized combustions under marine exposure

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ¹ และ วิเชียร ชาลี²
Piyapong Suwanmaneechot¹ and Wichian Chalee²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และพุลเวอร์ไรซ์ (PC) หลังจากแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดนำมาบดละเอียดให้ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์นำมาใช้จากโรงงานโดยตรง แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.65 ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นอกจากนั้น ได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. สำหรับทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณ จ.ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ทดสอบกำลังอัด ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเมื่อแช่น้ำทะเลครบ 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินทุกกลุ่มสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 35) สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กลงได้ นอกจากนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

คำสำคัญ : การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด, การเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์, สิ่งแวดล้อมทะเล, เถ้าถ่านหิน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, การแทรกซึมคลอไรด์, การกัดกร่อนเหล็ก

Abstract

in this study, compressive strength, chloride penetration profile, and corrosion of embedded steel bars in Portland cement type V concrete containing fly ash from fluidized-bed (FC) and pulverized combustions (PC) under marine site were investigated. Fly ash obtained from fluidized-bed combustion was ground to small particle which retained on a sieve No.325 about 2-5% by weight. Fly ash from pulverized combustion was received directly from the power plants. The fly ashes were used to replace Portland cement type V at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. A water to binder (W/B) ratio of concrete was kept constant at 0.65. The 200x200x200 mm³ concrete cube specimens were cast and steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm in concrete specimens. The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were also cast for the strength test at 28 days of curing and 5-year exposure in marine site. Concrete specimens were cured in fresh water for 28 days and then were placed at the tidal zone of sea water at Chonburi Province. The specimens were tested for compressive strength, total chloride penetration and corrosion of embedded steel bars after being exposed to the tidal zone of sea water for 5 years. The results showed that concrete containing fly ash from pulverized combustions produces a better chloride resistance than that ground fly ash from fluidized-bed combustions. All fly ash concrete had better chloride resistance and steel corrosion than that of Portland cement type V concrete. An increase of fly ash replacement in concrete (not more than 35%) could reduce the chloride penetration and steel corrosion in concrete. In addition, compressive strength development of concretes containing fly ash from pulverized combustion was higher than those of concrete containing fly ash from fluidized-bed combustion.

Keywords : Fluidized-bed combustion, Pulverized combustion, Marine environment, Fly ash, Portland cement type V Chloride penetration, Steel corrosion

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (wichian@buu.ac.th)

* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

1. บทนำ

ความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กจะขึ้นกับส่วนผสมคอนกรีต คุณภาพงานก่อสร้าง การบ่มคอนกรีต ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ตลอดจนสิ่งแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส [1, 2] คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือใกล้ชายฝั่งทะเล มักประสบปัญหาความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมีต่อเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริม การทำลายเนื้อคอนกรีตเป็นผลจากซัลเฟตในน้ำทะเลที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวส่งผลให้แตกร้าว โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะเป็นสารตั้งต้นที่ส่งผลให้การทำลายเนื่องจากซัลเฟตรุนแรงมากขึ้น [3, 4] ดังนั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลจึงนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากมีปริมาณ C_3A ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งจะลดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตลงได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลมีเกลือคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เกิดการทำลายเหล็กเสริมค่อนข้างรุนแรง โดยปริมาณ C_3A ที่ต่ำในวัสดุประสานทำให้การดักจับคลอไรด์จากน้ำทะเลได้น้อยและส่งผลให้คลอไรด์อิสระที่กระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิมมีมากขึ้น [5] ดังนั้นส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบเพื่อใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลจำเป็นต้องพิจารณาวัสดุประสานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถต้านทานการทำลายทั้งคลอไรด์และซัลเฟตควบคู่กันไป ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา [6, 7] พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนให้ผลในการต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตและคลอไรด์ได้ดี ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 น่าจะเป็นการนำคุณสมบัติที่ดีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากเกลือซัลเฟตได้ดี ร่วมกับคุณสมบัติที่ดีของเถ้าถ่านหินที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีด้วย

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีมากขึ้น ทั้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง หรือการใช้ในงานเฉพาะด้านที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น ลดการแตกร้าว ลดการขยายตัว ลดความร้อนในคอนกรีตและเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เป็นต้น การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มาก

ขึ้น ส่งผลให้เถ้าถ่านหินคุณภาพดีมีปริมาณจำกัดอาจไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานได้

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแบบพุลเวอร์ไรซ์ (Pulverized Coal Combustion) ใช้คุณสมบัติของการเผาถ่านหินอยู่ในช่วง 1,100 - 1,400 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous phase) บ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงโครงสร้างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเหมาะสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อหล่อคอนกรีต [7, 8] จากการศึกษาที่ผ่านมา [9-11] พบว่า เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะซึ่งได้จากการเผาในระบบพุลเวอร์ไรซ์สามารถทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านความคงทนดีขึ้น ตลอดจนมีความต้องการเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณเถ้าถ่านหินไม่เพียงพอในการนำมาใช้งาน ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed Coal Combustion) เป็นการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular shape) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง [7, 8] ซึ่งแม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่อาจด้อยกว่าเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพุลเวอร์ไรซ์ จากการศึกษาที่ผ่านมา [12, 13] พบว่า การนำเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่บดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานไปในทิศทางที่ดี และน่าจะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดีด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FC) และพุลเวอร์ไรซ์ (PC) ที่มีในประเทศแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อต้านทานการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลทางเลือกให้กับการใช้ประโยชน์จากเถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่มีการก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมทะเลให้มากขึ้น ตลอดจนเป็นการขยายฐานการใช้งานในเถ้าถ่านหินที่เผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดให้เป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้การเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมทะเลจริงที่ระยะเวลาจนถึง 5 ปี จะทำให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนและมั่นใจในการนำไปใช้งานมากขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และแบบพูลเวอร์ไรซ์ (PC) โดยเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [14] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เอ็น. พี. เอส.) ผ่านการบดละเอียดให้ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.35

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.41 และ 72.51 ตามลำดับ แม้ว่าปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 70 แต่เนื่องจากมีปริมาณ LOI เท่ากับร้อยละ 25.0 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 6 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [14] จึงไม่สามารถจัดเถ้าถ่านหินนี้ อยู่ในเถ้าถ่านหิน Class F และ Class C ได้ ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [14] โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.85 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.95 ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่มีค่าระหว่าง 5.5-8.5 และมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.2-3.1 [15] ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 [16] และ C128-93 [17] โดยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72 และ 2.61 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	เถ้าถ่านหิน	
		FC	PC
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	46.7	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	12.8	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	5.91	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	4.17	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.10	0.14	0.69
Potassium Oxide, K_2O	0.24	1.07	1.69
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	0.77	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	25.0	0.07

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวม	
	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.61
Apparent Specific Gravity	2.74	2.65
Absorption (%)	0.43	0.90
Fineness Modulus	6.85	2.95
Maximum Size (mm)	20	N/A

Remark: N/A = Not applied

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 โดยใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FC) และพูลเวอร์ไรซ์ (PC) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 ทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด

200x200x200 มม.³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในเหล็กเสริม หลังจากปรมคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วันจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายหาดโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม ³)					น้ำ
	ปูนซีเมนต์ประเภท 5	เถ้าถ่านหิน		ทราย	หิน	
		FC	PC			
V	295	-	-	814	1039	192
VFC15	251	44	-	814	1025	192
VFC25	221	74	-	815	1017	192
VFC35	192	103	-	815	1009	192
VFC50	148	148	-	815	996	192
VPC15	251	-	44	815	1039	187
VPC25	221	-	74	815	1039	187
VPC35	192	-	103	815	1039	186
VPC50	148	-	148	815	1039	172

หมายเหตุ

“V” คือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

“FC” และ “PC” คือ เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดและแบบพูลเวอร์ไรซ์ ตามลำดับ

“15, 25, 35, 50” คือ คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

2.2.2 ทดสอบกำลังอัด

ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่อายุ 28 วัน และทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

2.2.3 ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

นำตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาเจาะบริเวณกึ่งกลาง และนำแท่งตัวอย่างที่เจาะมาตัดที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วบดให้ละเอียดและนำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ความลึกต่างๆ มาทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 [18] เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Total chloride content) ที่ระดับความลึกใดๆ จากผิวคอนกรีต

2.2.4 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีต ทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. มากดให้แตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal Testing Machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต ทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมโดยใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 2x2 มม.² ทาบรอบแท่งเหล็กและใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด คำนวณพื้นที่การกัดกร่อนของเหล็กในรูปของร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก ดังสมการที่ 1 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายสนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

$$R, (\%) = \left(\frac{A_R}{A} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $R, (\%)$ คือร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก

A_R คือพื้นที่ผิวของเหล็กบริเวณที่เกิดสนิม

A คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของเหล็ก

2.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,600 มก./ล. โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำทะเลที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของน้ำทะเล

Parameters	April 2004	Feb 2005	May 2008	Sep 2009	April 2010
Chloride, Cl ⁻ (mg/l)	18,910	18,000	17,500	18,120	18,910
Sulfate, SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,500	2,250	2,250	2,250	2,610
pH	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลั้งอัดของคอนกรีต

พิจารณากำลั้งอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า กำลั้งอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเกือบทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ซึ่งอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นต่ำในช่วงต้น [1, 7] อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่แทนที่ด้วยแก้้ถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 25 (VFC25) มีกำลั้งอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 337 กก./ชม.² ซึ่งสูงกว่ากำลั้งอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมแก้้ถ่านหินเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อแทนที่แก้้ถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 35 และ 50) ส่งผลให้กำลั้งอัดคอนกรีตมีค่าลดลง ส่วนกำลั้งอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์มีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด กล่าวคือเมื่อแทนที่แก้้ถ่านหินเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้กำลั้งอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (V) ทั้งนี้เนื่องจาก กลไกการเกิดกำลั้งของ

คอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบ มีลักษณะเหมือนกัน คือเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำในช่วงต้น และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอลูมินาในแก้้ถ่านหินกับต่างในคอนกรีตต่อเนื่องเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น ดังนั้นการที่กำลั้งอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในปริมาณสูงขึ้น เป็นผลจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณน้อยลง ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหิน FC มีกำลั้งอัดที่อายุ 28 วัน สูงสุดที่การแทนที่แก้้ถ่านหินร้อยละ 25 โดยให้กำลั้งอัดเท่ากับ 337 กก./ชม.² ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหิน PC ทุกส่วนผสม (คอนกรีตที่แทนที่ด้วยแก้้ถ่านหิน PC อัตราส่วนร้อยละ 35 มีค่ากำลั้งอัดสูงสุดเท่ากับ 324 กก./ชม.²) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดถึงแม้จะมีอนุภาคหยาบ มี LOI สูง และมีความพรุนสูง เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียด ก็สามารถพัฒนากำลั้งอัดของคอนกรีตในช่วงแรกสูงกว่าแก้้ถ่านหินจากการเผาแบบฟูลเวอร์ไรซ์ได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า แก้้ถ่านหิน FC ที่ผ่านการบดมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด (ค่ากระจายเบอร์ 325 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) กว่าแก้้ถ่านหิน PC (ค่ากระจายเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก)ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงต้นเกิดขึ้นได้เร็ว [12, 13] และมีกำลั้งอัดที่สูง อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้งสองแบบให้กำลั้งอัดที่อายุ 28 วันไม่ต่างกันมาก โดยปริมาณการแทนที่แก้้ถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เหมาะเพื่อให้ได้กำลั้งอัดสูงสุดคือเท่ากับร้อยละ 25 และ 35 สำหรับแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและแบบฟูลเวอร์ไรซ์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลั้งอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี (ตารางที่ 5) พบว่า คอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลั้งอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน โดยคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหินที่ได้จากการเผาทั้ง 2 แบบในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลั้งอัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งโดยภาพรวมแล้วคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหิน PC มีกำลั้งอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมแก้้ถ่านหิน FC

ค่อนข้างชัดเจน เช่น การแทนที่แก้วด้านหินจากการเผาแบบ พูลเวอร์โรสในคอนกรีตร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปีเท่ากับ 439, 444, 445 และ 405 กก./ซม.² ตามลำดับ ขณะที่ คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ด้วยแก้วด้านหินจากการ เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เท่ากับ 434, 428, 406 และ 327 กก./ซม.² ตามลำดับ เมื่อ พิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำทะเล ครบ 5 ปี (ตารางที่ 5) พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้ว ด้านหินทั้ง 2 กลุ่ม มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจาก 28 วัน จนถึงหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมแก้วด้านหิน โดย คอนกรีตที่ผสมแก้วด้านหิน PC มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่า คอนกรีตที่ผสมแก้วด้านหิน FC ซึ่งอาจเป็นผลจากแก้วด้าน หิน PC มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มากกว่าแก้ว ด้านหิน FC ตลอดจนลักษณะอนุภาคที่กลม ดัน ของแก้วด้าน หิน PC ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวดี ขึ้น [19] โดยกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัด ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผสมแก้วด้านหินจากการเผา แบบฟลูอิดไดซ์เบดร้อยละ 15, 25, 35, และ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 135.6, 127.1, 129.7 และ 149.1 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ เมื่อแทนที่ ด้วยแก้วด้านหินจากการเผาแบบพูลเวอร์โรส มีร้อยละของ กำลังอัดที่ 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับ 137.7, 138.2, 137.3 และ 157.5 ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้พบว่า คุณสมบัติทางเคมีและ อนุภาคที่กลมดันของแก้วด้านหิน PC มีผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวหลังแช่น้ำทะเลมากกว่า ความละเอียดของแก้วด้านหิน โดยสังเกตได้ว่าถึงแม้แก้วด้าน หิน FC จะผ่านการบดละเอียด (ค้ำงตะแกรงเบอร์ 325 ร้อย ละ 2 โดยน้ำหนัก) และมีอนุภาคที่เล็กกว่าแก้วด้านหิน PC (ค้ำงตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก) อย่างมาก แต่กลับมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลได้ต่ำกว่าแก้ว ด้านหิน PC ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตที่ผสมแก้ว ด้านหินที่ได้จากการเผาแบบพูลเวอร์โรสให้ผลในการ ต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลในแง่ของ คุณสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าแก้วด้านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลู อิดไดซ์เบด อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองกลุ่ม

มีค่าค่อนข้างสูงถึงแม้ว่าจะผ่านการแช่น้ำทะเลมาถึง 5 ปี จึง สามารถที่จะใช้เป็นคอนกรีตเพื่อรองรับการทำลายทาง กายภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนด้วยแก้วด้านหินทั้งสองกลุ่ม ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับกำลัง อัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มการแทนที่ ซึ่ง แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมแก้ว ด้านหินทั้งสองกลุ่มในปริมาณมาก ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัด ในช่วง 5 ปี ที่แช่น้ำทะเลค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การ ใช้แก้วด้านหินปริมาณสูงในคอนกรีตมีผลให้กำลังอัดในช่วง ต้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตที่มีการรับแรงเชิงกล โดยเฉพาะแรงดัด อาจเกิดรอยร้าวเล็กๆ ที่ส่งผลให้การ ทำลายเนื่องจาก เกลือคลอไรด์ และซัลเฟตในสิ่งแวดล้อม ทะเลในช่วงต้นเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และมีผลทำลายชัดเจน มากขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะใช้งาน ที่อายุนานขึ้น ดังนั้น ถึงแม้ว่าคอนกรีตที่ผสมแก้วด้านหิน ปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 จะมีการพัฒนากำลังอัดหลังแช่น้ำ ทะเล 5 ปี เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงก็ตาม ก็ไม่ เหมาะสมที่จะใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม ²)		ร้อยละ กำลังอัดที่ 5 ปีเทียบ กับ 28 วัน
	28 วัน	แช่น้ำทะเล 5 ปี	
V	333	403	121.0
VFC15	320	434	135.6
VFC25	337	428	127.1
VFC35	313	403	129.7
VFC50	219	327	149.1
VPC15	319	439	137.7
VPC25	321	444	138.2
VPC35	324	445	137.3
VPC50	257	405	157.5

20. W. Chalee, C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Mater Struct* 42, 2009, pp. 505-514.
21. S. Rukzon, P. Chindaprasirt, "Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash" *Inter J Minera Metallu Mater* 16, 2009, pp. 475-481.
22. J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar", *Cem Concr Res* 35, 2005, pp. 1145-1151.
23. วิเชียร ชาติ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล", *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 7 (1), 2554, หน้า 21-28