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

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง การป้องกันการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้เถ้าเถ้าแกลบเปลือกไม้

(Utilization of Rice Husk-Bark Ash in Corrosion Protection for Reinforced Concrete under Marine environment)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

TH01014326S
29 มี.ค. 2555
301454
ตุลาคม พ.ศ. 2554
เริ่มบริการ
22 พ.ค. 2555
อภินันทนาการ

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง "การป้องกันการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าเถ้าแกลบเปลือกไม้" จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 มีงบประมาณทั้งโครงการ 216,700 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	216,700 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ ความละเอียดของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีผลต่อปริมาณของการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเล ในสภาวะเปียกสลับแห้ง เป็นเวลา 30 เดือน โดยใช้ส่วนผสมในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบด (ตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ) ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำประปาจนครบ 28 วันแล้วนำตัวอย่างไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งในน้ำประปาจนครบ 30 เดือน เพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีต และดูการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ และต้านทานการเกิดสนิมได้ดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ส่วนผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมในคอนกรีตได้ดีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง

คำสำคัญ : เถ้าแกลบเปลือกไม้, การแทรกซึมของคลอไรด์, การกัดกร่อนเหล็ก, สภาวะแวดล้อมทะเล

Abstract

This research is to study the effects of rice husk-bark ashes content and W/B ratio on chloride penetration profile and steel corrosion in concrete after 30 months exposure under marine environment. Ground rice husk-bark ashes were used to replace Portland cement type 1 at the percentage of 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. Control concretes were cast by using Portland Cement type I with W/B of 0.45 and 0.65. Concrete cube specimens of 200 mm3 with having the embedded steel bar (12 mm in diameter and 50 mm in length) at the covering depth of 10, 20, 50 and 75 mm were prepared. The concrete cubes were cured in fresh water for 28 days and then placed to the tidal zone of marine environment. The specimens were tested for total and free chloride contents and corrosion of embedded steel bar after being exposed to sea water for 30 months.

The results showed that the use of rice husk-bark ashes in concrete have a better chloride and steel corrosion resistant than control concretes. Besides, concrete with a low W/B ratio clearly decrease the chloride penetration and steel corrosion when compared with that a high W/B ratio. In addition, chloride binding capacity increased with the increase of rice husk-bark ash in the concrete. However, the use of high volume rice husk-bark ash in concrete (50% replacement) results in decreases the chloride binding capacity.

Keyword; Rice husk-bark ash, Chloride penetration, Steel corrosion, Marine environment

กิตติกรรมประกาศ

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

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทย ให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนช่วยส่งเสริมการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ให้สามารถใช้งานได้จริงในงานคอนกรีต

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	7
2.3 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	10
2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	11
2.5 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	14
2.6 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	15
2.7 วัสดุปอซโซลาน	16
2.8 ปฏิกิริยาปอซโซลาน	17
2.9 เถ้าแกลบ – เปลือกไม้ (Rice husk–bark ash)	17
2.10 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีต	18
2.11 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล	20

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต 21

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 26

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 26

3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ 26

3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมไว้เมื่อ 30 เดือนที่แล้ว 30

3.4 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 30 เดือน 32

บทที่ 4 ผลการทดลอง 38

4.1 คุณสมบัติวัสดุประสาน 38

4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 30 เดือน 41

4.3 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะ แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน 49

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 52

5.1 สรุปผลการทดสอบ 52

5.2 ข้อเสนอแนะจากการทดสอบ 52

บรรณานุกรม 53

ภาคผนวก ก 56

ภาคผนวก ข 58

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน 40
4.2 พื้นที่สนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 49

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล	5
2.2	บริเวณความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	6
2.3	การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	8
2.4	การแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก	10
2.5	แผนภาพแสดงการดึงดูดแบบแคปิวลารี	12
2.6	แผนภาพแสดงการดึงดูดอิออนเข้าไปในคอนกรีต	12
2.7	ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด	18
3.1	ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20	26
3.2	เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม	27
3.3	เครื่องทดสอบกำลังอัด	27
3.4	อุปกรณ์บดคอนกรีต	28
3.5	เครื่องตัดคอนกรีต	28
3.6	เครื่องเจาะคอนกรีต	29
3.7	เครื่องดูดสุญญากาศ	29
3.8	แสดงตำแหน่งที่ฝังเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ	31
3.9	บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ โรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี	32
3.10	การเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์	33
3.11	การตัดตัวอย่างออกเป็นชั้นเพื่อทดสอบคลอไรด์	33
3.12	การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์	34
3.13	การนำตัวอย่างไปต้มให้เดือด 3 นาที	35
3.14	การนำตัวอย่างที่เย็นแล้วมากรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ	36
3.15	การนำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว มาไตเตรตด้วยมือ	36
3.16	การนำตัวอย่างคอนกรีตมาทุบเพื่อนำเอาเหล็กที่ฝังไว้ที่ระยะต่างๆ ออกมาวัดหาพื้นที่สนิม	37
4.1	ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	38
4.2	ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบเปลือกไม้	39
4.3	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65	41

ที่ระยะ 15 25 และ 35 มม.

4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 43

4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 44

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 45

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ 46

4.8 การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ0.45 และ 0.65 ที่ระยะ 15 มม. 48

4.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเล 30 เดือน 50

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญเป็นอย่างมากในงานโครงสร้างในปัจจุบัน ซึ่งการทำให้ได้คอนกรีตที่ดีนั้น ต้องอาศัยทั้งหลักวิชาการ ประสบการณ์ เทคนิคต่างๆ และเทคโนโลยีที่มีความเจริญก้าวหน้าในปัจจุบัน คอนกรีตนั้นไม่เหมือนกับวัสดุอย่างอื่นเช่นไม้ และเหล็ก ถ้าหากการทำงานเกิดผิดพลาดขึ้นแล้วก็นำไปดัดแปลงใช้ทำอย่างอื่นได้ แต่สำหรับงานคอนกรีตถ้าการทำงานเกิดผิดพลาดขึ้นแล้วนั้น มีวิธีแก้ไขอยู่วิธีเดียวคือทุบทิ้ง และวัสดุที่ทุบนั้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้นอกจากจะใช้ถมที่ ซึ่งทำให้เสียทั้งเวลา แรงงานและวัสดุ ฉะนั้นในการผลิตคอนกรีตจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องให้ความสำคัญทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความแข็งแรง คงทน และมีความประหยัด ภายใต้หลักวิศวกรรม

ปัจจุบันคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้อย่างกว้างขวาง เพราะมีราคาถูก และสามารถหล่อเป็นรูปร่างตามที่ต้องการได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่การเลือกใช้ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่นำมาผสมเป็นคอนกรีตที่จะนำมาใช้ในแต่ละสภาวะมีความแตกต่างกัน ฉะนั้นควรพิจารณาเลือกประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ถูกต้องกับความต้องการนั้นๆ เช่น เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล จะเกิดความเสียหายที่รุนแรงมากกว่าโครงสร้างปกติโดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำทะเลมีสารเคมี ที่เป็นอันตรายต่อเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นอย่างมาก เช่น คลอไรด์ และซัลเฟต ซึ่งเป็นสาเหตุหลักให้ให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว สูญเสียกำลังรับแรงของโครงสร้าง และส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างดังกล่าว

โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลนั้น ส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมี C_3A ในปริมาณที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ความเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟตในน้ำทะเลกับ C_3A ในคอนกรีตลดลงได้ อย่างไรก็ตามในสภาวะแวดล้อมทะเล มีคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลเสียต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมส่งผลให้หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงด้วย ดังนั้นในการพิจารณาคอนกรีตที่นำมาใช้งานในสภาวะดังกล่าว จึงต้องพิจารณาถึงกลไกการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับบริเวณที่โครงสร้างสัมผัส เช่น บริเวณชายฝั่งทะเลที่มีน้ำขึ้นน้ำลง สาเหตุการทำลายจะเกิดจากคลอไรด์เป็นหลัก ซึ่งการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้

รายงานว่า คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นบริเวณใต้ท้องทะเลลึกที่โครงสร้างไม่ได้สัมผัสกับน้ำและ ออกซิเจนปัญหาเนื่องจากคลอไรด์ ก็น้อยลงแต่ปัญหาซัลเฟตจะชัดเจนมากขึ้นการเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ก็จะดูเหมาะสมกว่า ปกติคอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูงซึ่งช่วยป้องกันเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม แต่ถ้าคลอไรด์จากน้ำทะเลซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนเกินปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะทำให้ออกไซด์ฟิล์มถูกทำลาย และเมื่อความชื้นและออกซิเจนเพียงพอ จะส่งผลให้เหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตเป็นสนิมได้

การนำเถ้าแกลบเปลือกไม้มาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแนวความคิดที่จะทำคอนกรีตสมัยใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังอัด เพิ่มความทนทาน ลดการหดตัว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยจากข้อดีเหล่านี้ของเถ้าแกลบเปลือกไม้ จึงควรที่จะศึกษาถึงผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อเป็นการศึกษาถึงแนวทางที่จะผลิตคอนกรีตที่ทนต่อสภาวะแวดล้อมทะเลและอยู่ภายใต้ความประหยัดตามหลักการทางวิศวกรรมต่อไป ดังนั้นในโครงงานนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาผลของการนำเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีอยู่ในปริมาณมากในประเทศไทย มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานคอนกรีตโดยพิจารณาไปที่คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตและการเกิดสนิมเหล็กภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 30 เดือน

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.2.3 ศึกษาผลของการใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

1.2.4 ศึกษาผลของไม้ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบของสภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตและการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ซึ่งได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Content) ตาม ASTM C 1152 และคลอไรด์อิสระ (Free Content) ตาม ASTM C1218 ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่คัดแยกขนาด และไม่คัดแยกขนาดในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยคอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ทำการหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม^3. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด ไปแช่น้ำทะเลที่บริเวณโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จ. ชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้งซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนสูงสุด เมื่อแช่คอนกรีตถึงระยะเวลา 30 เดือน ได้นำคอนกรีตเจาะ เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต โดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำลาย และหลังจากนั้นได้กดดูการเกิดสนิมของเหล็กที่ผังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงส่วนผสมที่เหมาะสมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งที่มีน้ำขึ้นน้ำลง

1.4.2 ได้ทราบระยะหุ้มคอนกรีตที่เหมาะสมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเลเปียกสลับแห้ง

1.4.3 ได้ทราบถึงพฤติกรรมทางด้านความคงทนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลจริงเป็นเวลา 30 เดือน

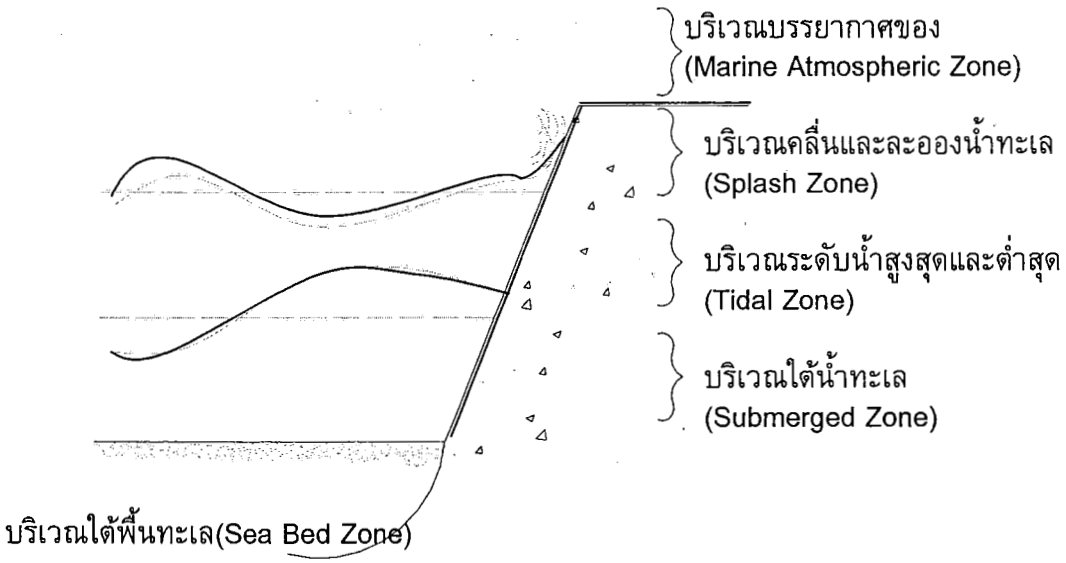
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าแกลบเปลือกไม้ การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

2.1 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระแทกจากคลื่น ทราย กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

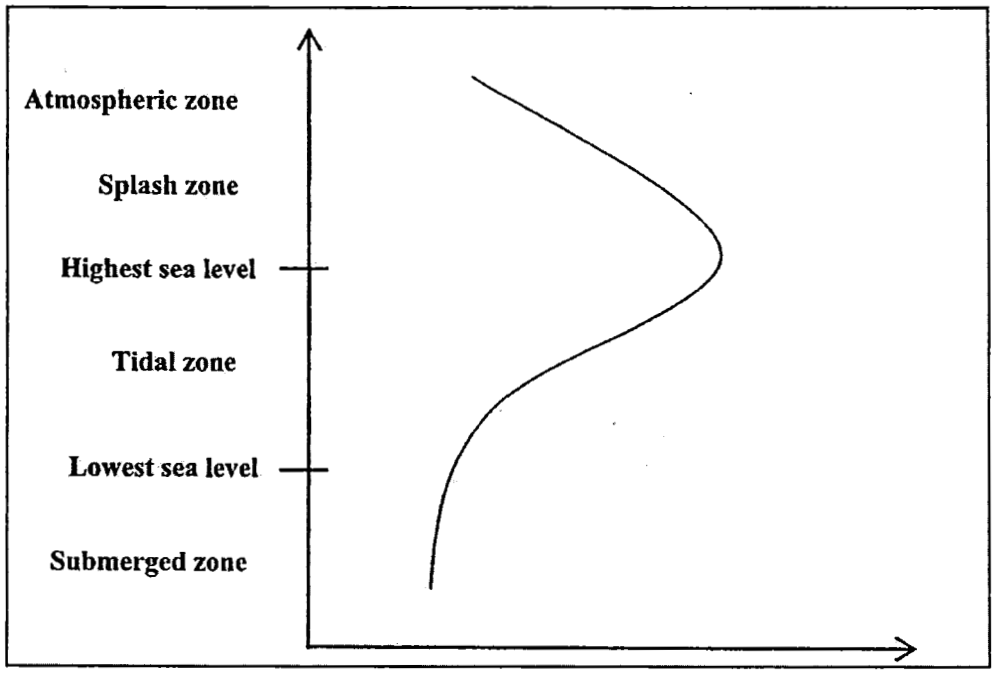
ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระแทกของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (แสดงดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล

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 เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ (แสดงดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 บริเวณความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [ทวีชัย สำราญวานิช, 2552]

2.2.3 บริเวณระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุด (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

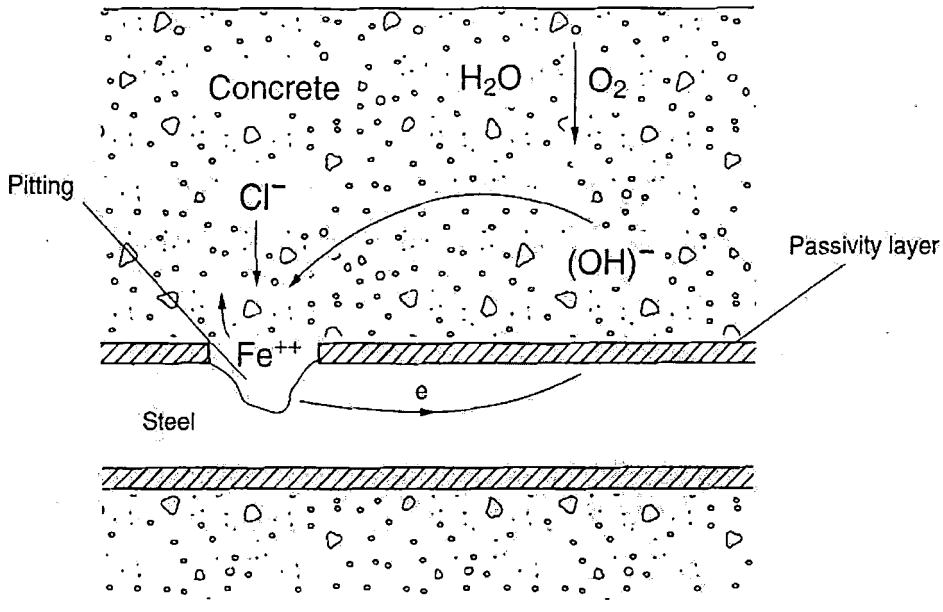
2.2.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

2.2.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่อยู่ในน้ำทะเล 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 [Neville, 1996] การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ [Gjorv และ Vennesland, 1976]

2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ γ-Fe_2O_3 เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังรูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต [Neville, 1996]

ความเป็นด่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริมและทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิค (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเลคโทรไลต์ให้อิเลคตรอนวิ่งผ่าน

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสอิออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ 2.1 ส่วนอิเลคตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเลคโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิค (Anodic Reaction) จากนั้นอิเลคตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิคจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็น ไฮดรอกซิลอิออน ($(OH)^-$) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิค (Cathodic Reaction) ดังสมการ 2.4 และเมื่อ Fe^{2+}

รวมตัวกับ $(OH)^-$ จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ดังสมการ 2.2 และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2.3 [Broomfield, 1997]

Anodic Reaction:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (2.1)$$

$$Fe^{2+} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad \text{(Ferrous Hydroxide)} \quad (2.2)$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad \text{(Ferric Hydroxide)} \quad (2.3)$$

Cathodic Reaction:

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^- \quad (2.4)$$

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

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 \quad (2.5)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \quad (2.6)$$

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่า และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (แสดงดังรูปที่ 2.4) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting Crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลอันตรายต่อการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2.4 การแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก

2.3 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์อิออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทอิออน (Cation) และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณ คลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543] ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Friedel's salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium Chloroferrite)

1.2 Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

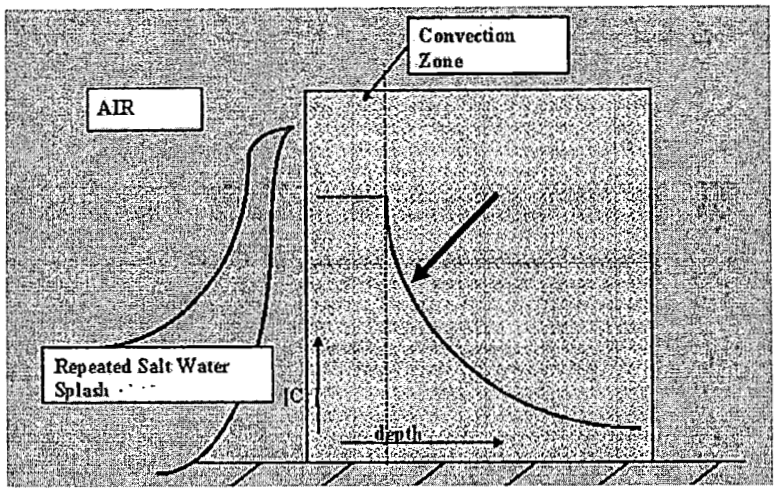
2) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้

2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุดคลอไรด์ของเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีต [วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543] โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจาก คลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาวะแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตด้วยกระบวนการต่อไปนี้

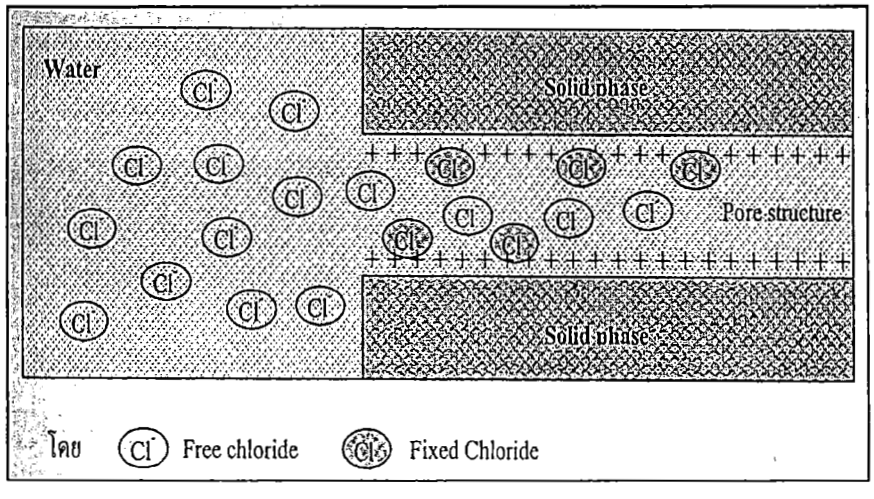
การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อิออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอิออน โดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูงไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนต่ำ

การดึงดูดแบบแคปิวลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบแคปิวลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 2.5) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบแคปิวลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการดึงดูดแบบแคปิวลารี

การดึงดูดอิออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์การนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกดึงดูดอิออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์อิออน ซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น (แสดงดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการดึงดูดอิออนเข้าไปในคอนกรีต [ทวีชัย สำราญวานิช, 2552]

แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์อิออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่านจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้น อิออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอิออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอิออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้ อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอิออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหลา และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลาย

ซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.5 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์อิออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบน้ำของคอนกรีตและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจึงเป็นปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กขั้นต่ำ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก อันดับแรก คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่าง ๆ สามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือต้านทานการสึกกร่อน การมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มากเกินไป เป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาตรมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม นอกจากนั้น ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กยังช่วยควบคุมการหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีความหนามากเกินไปพิสูจน์แล้วว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ในทางปฏิบัติ ความหนาของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

การเลือกใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้างอาจวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง

2.6 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) อำนาจการทำลายของซัลเฟต ต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อย ๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟต อื่น ๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) จากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ [Mather, 1966]

แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 2.7

$$3(MgSO_4.7H_2O)+2(3CaO.Al_2O_3.12H_2O) \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O+3Mg(OH)_2 +2Al(OH)_3+8H_2O \quad (2.7)$$

แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ 2.8

$$MgSO_4.7H_2O+Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4.2H_2O+Mg(OH)_2+5H_2O \quad (2.8)$$

แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.9

$$3(CaSO_4.2H_2O)+3CaO.Al_2O_3.12H_2O+13H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.31H_2O \quad (2.9)$$

นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ 2.10

$$MgSO_4.7H_2O+3CaO.2SiO_2.nH_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O+Mg(OH)_2+SiO_2.nH_2O \qquad (2.10)$$

แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.10 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.9 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.11

$$4Mg(OH)_2+SiO_2.nH_2O \longrightarrow 4MgO.SiO_2.8.5H_2O+(n-4.5)H_2O \qquad (2.11)$$

ยิปซัมที่เกิดตามสมการที่ 2.8 และ 2.10 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่เกิดตามสมการที่ 2.7 และ 2.9 มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปตามสมการที่ 2.10 ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

2.7 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ

เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

2.8 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-A-H)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [Fraay, et al., 1989] และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม [Hansen, 1990]

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.ySiO_2.zH_2O \qquad (2.12)$$

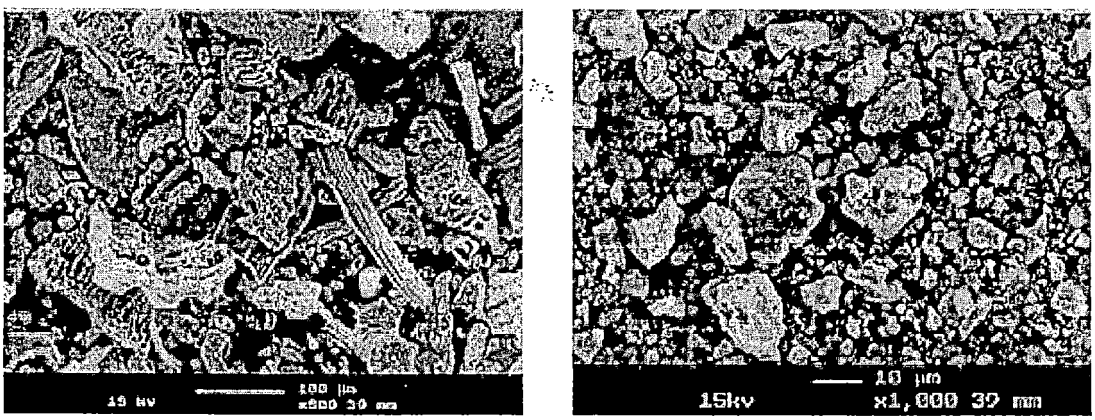
$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO.yAl_2O_3.zH_2O \qquad (2.13)$$

2.9 เถ้าแกลบ – เปลือกไม้ (Rice husk–bark ash)

เถ้าแกลบ–เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยู-คาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาคงที่ประมาณ 800 – 900 องศา

เซลเซียส หลังจากการเผาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้งกระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ–เปลือกไม้ มีองค์ประกอบรวมของ ซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก-ออกไซด์ (SiO_2, Al_2O_3,Fe_2O_3) ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO_3 และ LOI เท่ากับร้อยละ 0.60 และ 3.72 ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีความพรุนสูงดังแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 จะน้อยลงเมื่อผ่านการบดละเอียดซึ่งจะมีค่าประมาณร้อยละ 3.8-32.6 ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาในการบด ความถ่วงจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เพราะการบดจะไปทำลายรูพรุนและโพรงอากาศในอนุภาคทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น มีค่าประมาณ 2.1-2.3 รูปที่ 2.7 แสดงภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด



ก. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนการบด ข. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หลังการบด

รูปที่ 2.7 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด

2.10 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดจะมีอนุภาคที่หยาบ มีความพรุนสูงและไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา [วลัยลักษณ์ และคณะ 2550] พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ–เปลือกไม้ ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) ทุกอัตราการแทนที่ และทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน โดยกำลังอัดจะมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบ - เปลือกไม้ก่อนบดมากขึ้นเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด มีอนุภาคขนาดใหญ่จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย และมีความ

พรุนสูงทำให้คอนกรีตต้องการน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จึงเป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานจึงส่งผลให้กำลังอัดลดลง

เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 27.5 ไมครอน) พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากความละเอียดของเถ้า-แกลบ-เปลือกไม้ที่สูงขึ้น สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูงสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น กำลังอัดจึงสูงขึ้น

ผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ความละเอียดแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น

ส่วนคุณสมบัติด้านการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ– เปลือกไม้ วลัยลักษณ์และคณะ (2550) พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และมีความพรุนสูงจึงมีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่งผลทำให้คอนกรีตมีช่องว่างมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ผสมคอนกรีตพบว่า ในทุกอัตราการแทนที่มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้ความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้อนุภาคเล็กลง เมื่อแทนที่ในคอนกรีตจะแทรกตัวในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดปานกลางและความละเอียดสูง ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คือ การแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำที่สุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความพรุนเหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้น ความต้องการน้ำในอัตราส่วนผสมจึงมากขึ้น ทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดสูงไม่เกินร้อยละ 20 เป็นคอนกรีตที่มีทั้งคุณสมบัติในด้านกำลังอัดที่สูงกว่า และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 30 และ 40 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การขยายผลของการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงผสมในคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดการซึมผ่านน้ำลงได้ ประกอบกับมีการพัฒนากำลังอัดไปในทิศทางที่ดี จึงน่าจะให้ผลดีต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

2.11 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมีความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 ถึง 60 มม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต)

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรงอย่างเช่นสภาวะแวดล้อมทะเล

การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์ อีพ๊อกซี่ โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ๊อกซี่หรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว การป้องกันหรือเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและคลอไรด์อาจมีวิธีการอื่นๆ อีกหลายวิธี ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจใช้ร่วมกันได้เพื่อให้เกิดผลดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการพิจารณาตามความเหมาะสม เช่น ความสำคัญของโครงสร้าง อายุและลักษณะการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การซ่อมแซมบำรุงรักษา เป็นต้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

Saadoun และคณะ (1993) ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตแล้วแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1,000 วัน ปรากฏว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 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)ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มตัวอย่างแตกต่างกัน หลังจากบ่มจึงนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เมื่อครบอายุการแช่จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 1 และ 2 ปี พบว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลนาน

ขึ้นผลไม่แตกต่างกันมาก อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้

Tarun และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน Class C ในปริมาณมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบ พบว่าระยะต้นกำลังอัดมีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ให้ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดที่อายุ 90 วัน เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงเข้าไปอุดแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตจึงลดลง

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และคณะ (1999) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ ชนิดแคลเซียมออกไซด์ต่ำ และชนิดแคลเซียมออกไซด์สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30 และ 50 แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราต่ำ ๆ สามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ดีกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราสูง ๆ มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทุกระดับความเข้มข้น

Bai และคณะ (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมี

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

ความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น Thomas รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โข่ศรี (2005) ได้ทำการหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ถึง 80 จากนั้นทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การแทนที่เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้นเช่นกัน ด้านกำลังอัดพบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนอย่างละร้อยละ 20 (เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20) ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ

มณเฑียร ฑีฆวาณิช และคณะ (2005)ได้ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมมีปัญหาการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลานาน

กิตติศักดิ์ คงธนเกษมพร และคณะ (2005) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตา ดินขาวเผา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 0.47 ทุกส่วนผสม จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 และ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าก้นเตา และดินขาวเผา กำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทุกอายุของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะต้านทานได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จะต้านทานได้ดีที่สุด

620.136
ก451
ค.3
301454

วิเชียร ชาลี และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ช่วยป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 30 เมกะปาสคาล (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65) สามารถลดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลจาก 50 มม. เหลือ 30 มม. เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2006) ได้ทำการผสมคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะขนาดต่าง ๆ กันโดยใช้ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 จากนั้นจึงแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 และทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 และ 6 เดือน คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่หยาบ และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

วิเชียร ชาลี และคณะ (2007) ได้หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200X200 มม. ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะไม่แยกขนาด และแยกขนาดละเอียดซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่เผาที่อุณหภูมิสูง และมีคุณภาพดี ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และทำการฝังเหล็กเส้นกลมที่ระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 4 ปี พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด

ธวัชชัย สาสกุล (2007) ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 หลังจากนั้นจึงนำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ (2007) ได้หล่อคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 นำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าผลการทดสอบให้ผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ ธวัชชัย สาสกุล (2007) และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (W/B ratio 0.45) จะมีกำลังอัด ความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง (W/B ratio 0.65)

ปริญญา จินดาประเสริฐ และสำเริง รักซ้อน (2008) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าถ่านหินแม่เมาะละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) ปรับให้อัตราไหลแผ่ของมอร์ต้าร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 โดยใช้มอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม ผลการทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 1202 ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 90 วัน มอร์ต้าร์ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ผู้ศึกษาจึงมีแนวความคิดสร้างผลการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำเถ้าถ่านหินที่มีมากในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต ซึ่งเถ้าถ่านหินเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม แนวความคิดในการนำเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ดีขึ้น สามารถศึกษาและทำการวิจัยจนประสบความสำเร็จมาแล้ว ดังนั้น การทดลองนำเถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล และมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยนำมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำทะเล และมุ่งประเด็นความสำคัญไปที่การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ทั้งนี้จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้มีซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก สามารถที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดและความทึบน้ำของคอนกรีต ซึ่งน่าจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

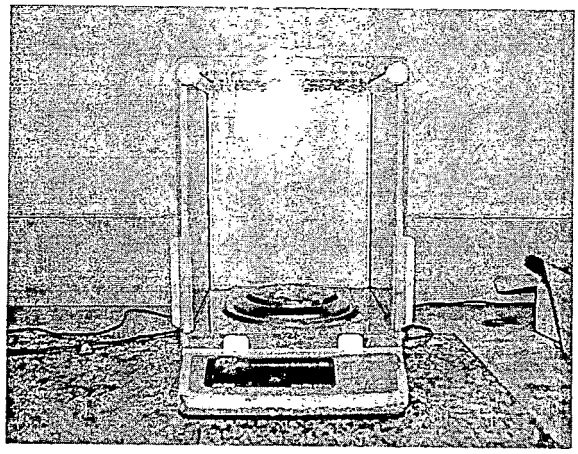
3.1.1 ปูนซีเมนต์	ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532
3.1.2 เถ้าแกลบเปลือกไม้	ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
3.1.3 ทราย	ใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
3.1.4 หิน	ใช้หินคละที่มีขนาดใหญ่สุด 19 มม.
3.1.5 น้ำ	ใช้น้ำสะอาด การทดลองนี้ใช้น้ำประปา

3.2 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือ

3.2.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 (รูปที่ 3.1)

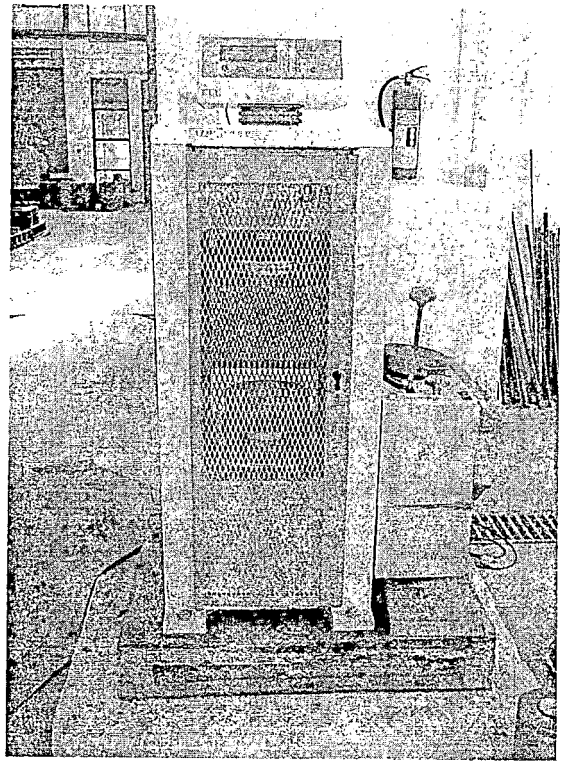
รูปที่ 3.1 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20

3.2.2 เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม (รูปที่ 3.2)



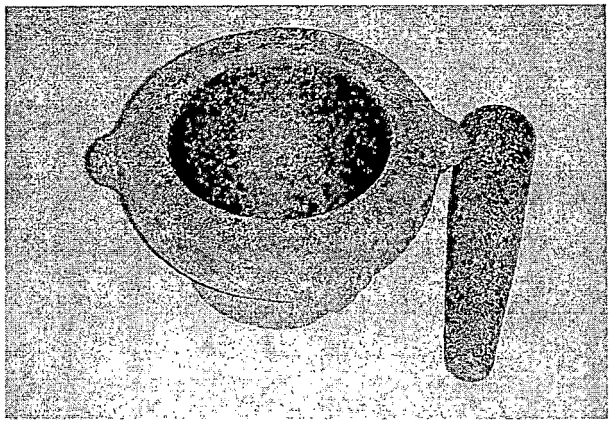
รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.0001 กรัม

3.2.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 3.3)



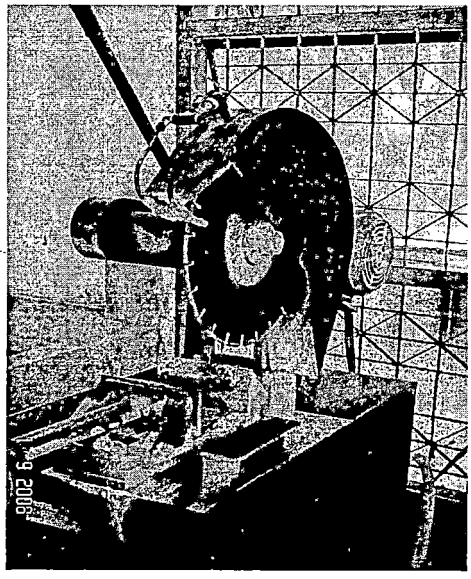
รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.4 อุปกรณ์บดคอนกรีต (รูปที่ 3.4)



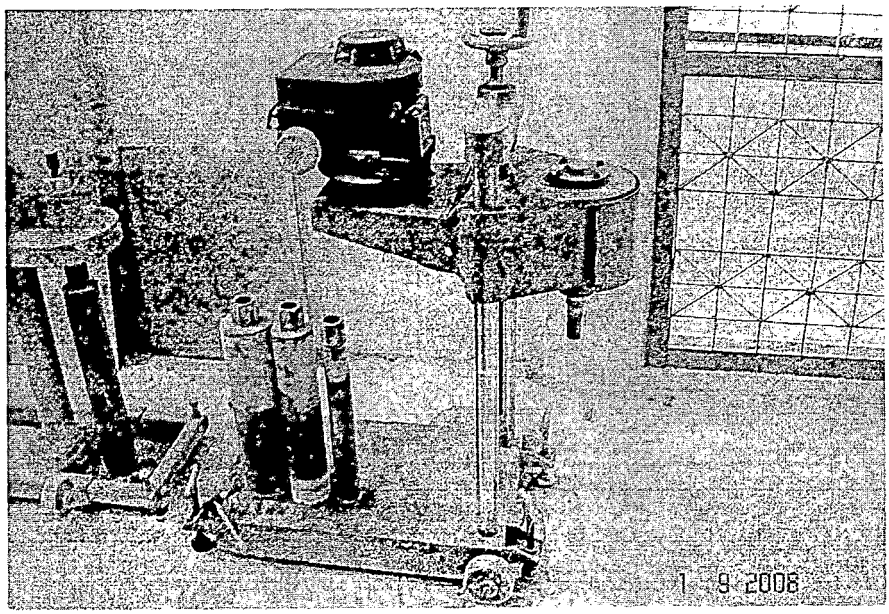
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์บดคอนกรีต

3.2.5 เครื่องตัดคอนกรีต (รูปที่ 3.5)



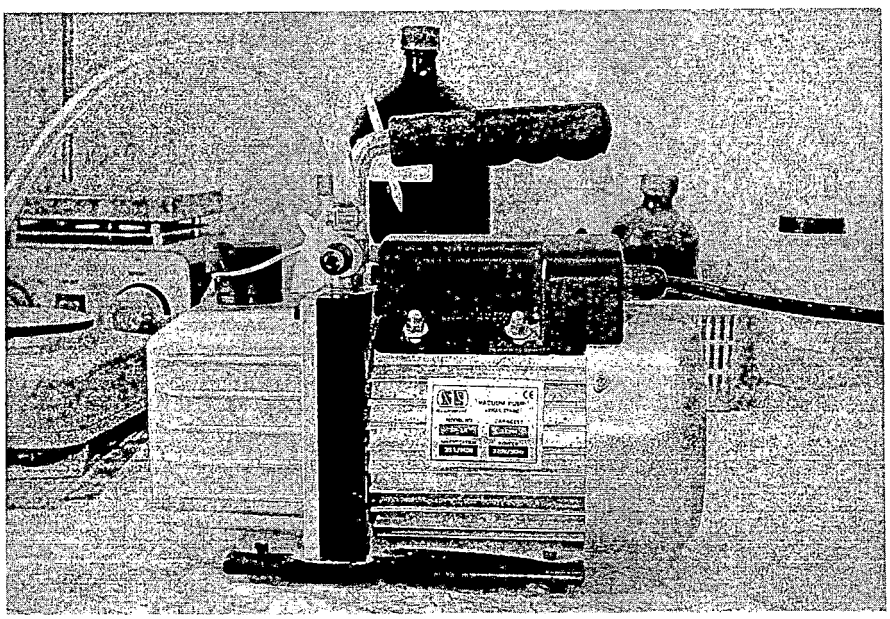
รูปที่ 3.5 เครื่องตัดคอนกรีต

3.2.6 เครื่องเจาะคอนกรีต (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องเจาะคอนกรีต

3.2.7 เครื่องดูดสุญญากาศ (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องดูดสูญญากาศ

3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมเมื่อ 30 เดือนที่แล้ว

3.3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียด โดยค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ ดังนั้น มีคอนกรีตในงานวิจัยนี้ 10 ส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})				
	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าแกลบเปลือกไม้ (R)	หิน	ทราย	น้ำ
I45	424	-	979	767	190
I45	295	-	1,039	814	192
I45R15	360	64	957	767	190
I45R25	318	106	938	767	190
I45R35	276	148	925	767	190
I45R50	212	212	957	767	190
I65R15	251	64	1,023	814	192
I65R25	221	74	1,012	814	192
I65R35	192	103	1,000	814	192
I65R50	148	148	982	814	192

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

“I”	หมายถึง	คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน
“R”	หมายถึง	เถ้าแกลบเปลือกไม้
“45, 65”	หมายถึง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, และ 0.65 ตามลำดับ
“15, 25, 35, 50”	หมายถึง	คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

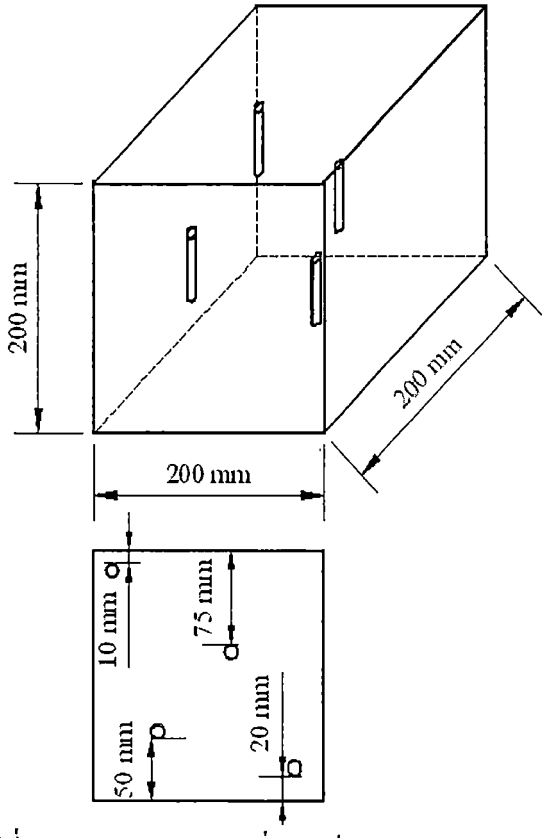
ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

" I45 " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

" I45R15 " หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดขนาดร้อยละ15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

3.3.2 ตัวอย่างคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม^3. ในแต่ละสัดส่วนผสมฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้ได้ตำแหน่งระยะหุ้มที่ 10, 20, 50 และ 75 มม. แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งที่ฝังเหล็กเสริมในตัวอย่างทดสอบ

หลังจากที่หล่อคอนกรีตและบ่มจนอายุครบ 28 วัน จึงได้นำไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกและแห้งตามน้ำขึ้น-ลง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเข้า

มาในห้องปฏิบัติการคอนกรีต เพื่อการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์และดูการเกิดสนิมเหล็กเมื่ออายุแช่น้ำทะเลครบ 30 เดือน

รูปที่ 3.9 บริเวณแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ โรงพยาบาล สมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี

3.4 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

3.4.1 ทดสอบปริมาณคลอไรด์

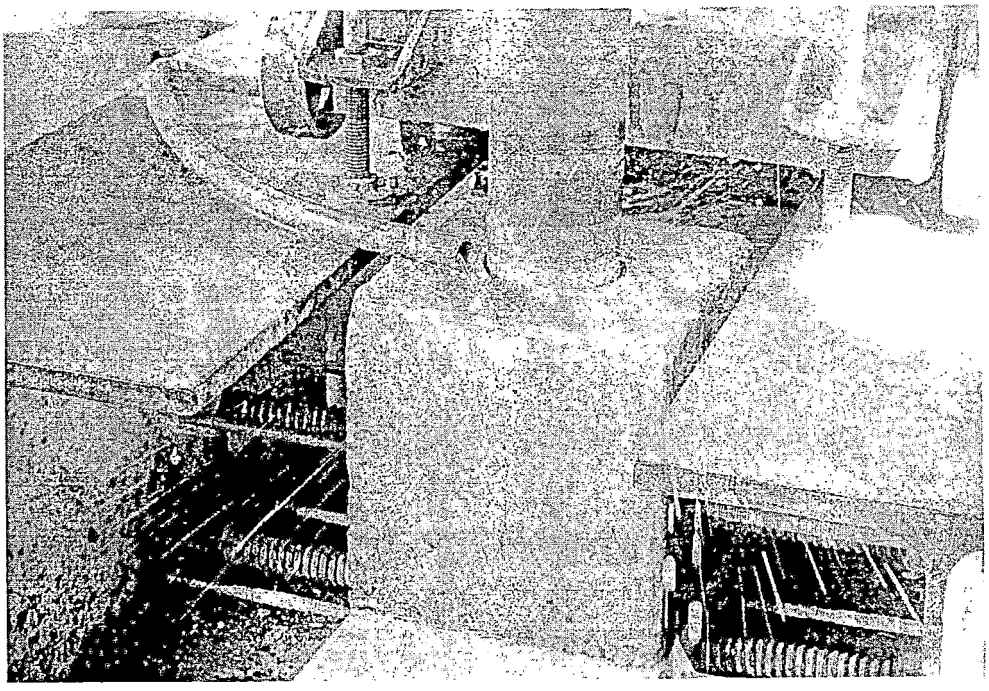
1) การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

1.1) เมื่ออายุแช่น้ำทะเลครบ 30 เดือน ทำการเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เพื่อทดสอบหาการซึมผ่านของคลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม.

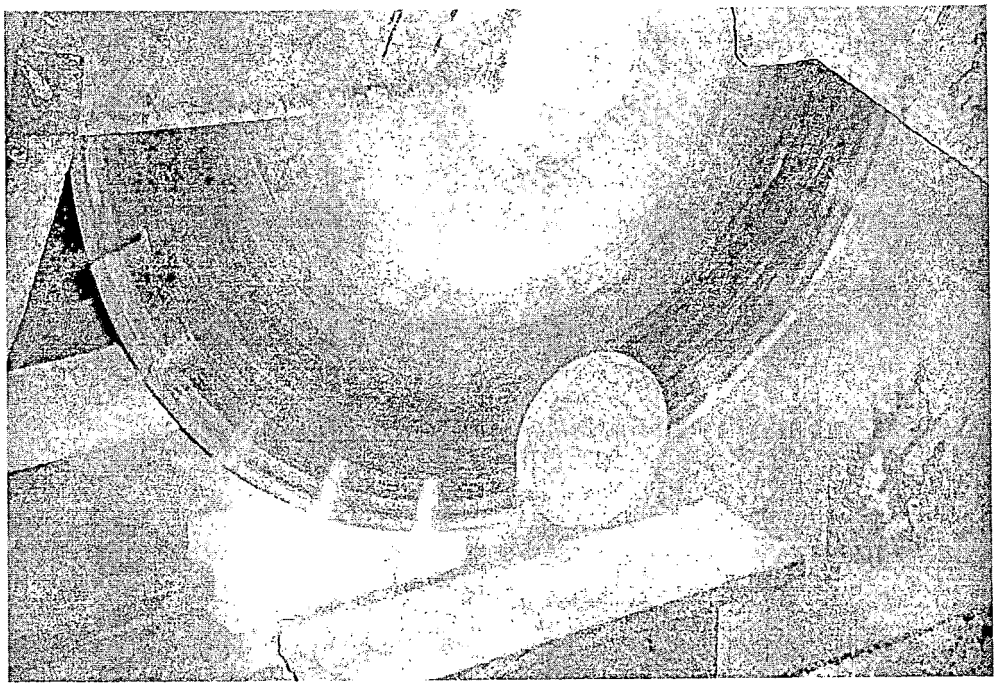
1.2) ทำการตัดตัวอย่างเป็นชั้น จากผิวบนไปยังแนวกึ่งกลางโดยในแต่ละชั้นหนา 10 มม.

1.3) ทำการบดตัวอย่างที่ตัดแต่ละชั้นให้ละเอียด โดยนำบริเวณกึ่งกลางของแต่ละชั้นมาบด

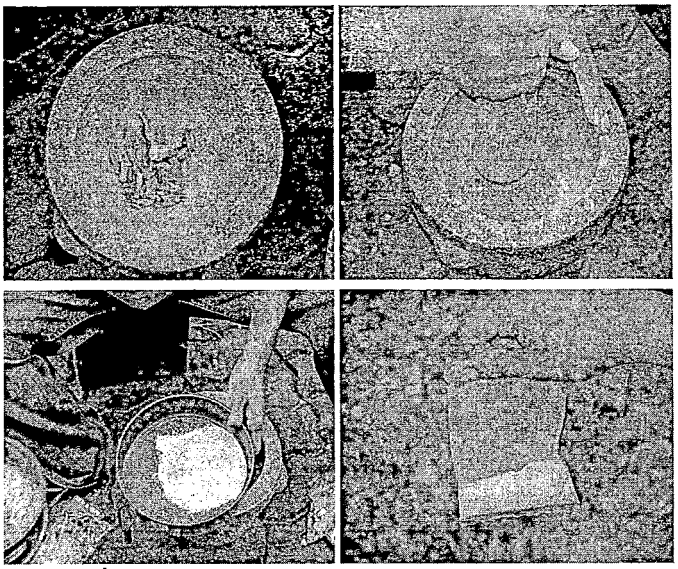
1.4) นำตัวอย่างที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์



รูปที่ 3.10 การเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์



รูปที่ 3.11 การตัดตัวอย่างออกเป็นชั้นเพื่อทดสอบคลอไรด์



รูปที่ 3.12 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์

2) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1152

2.1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2) เติมน้ำปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

2.3) เติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

2.4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว

2.5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง

2.6) ปิเปตตัวอย่าง 10 มล. ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่

2.7) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 1 มล.

2.8) ทำการไตเตรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$)

2.9) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

3) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1218

3.1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2) เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์

3.3) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

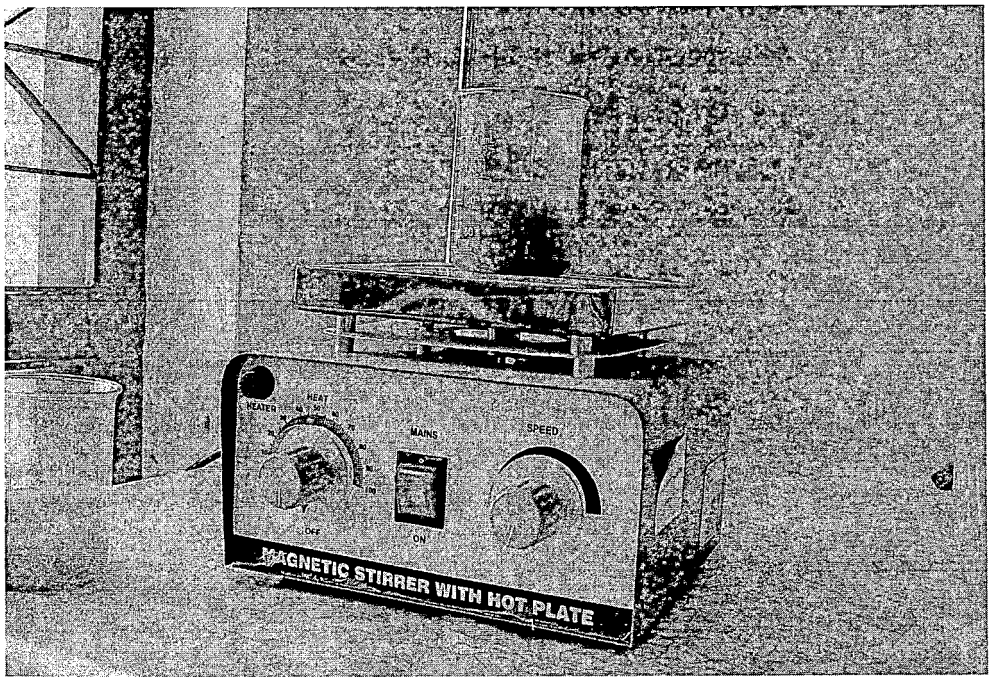
3.4) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง

3.5) ปิเปตตัวอย่าง 10 มล. ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่

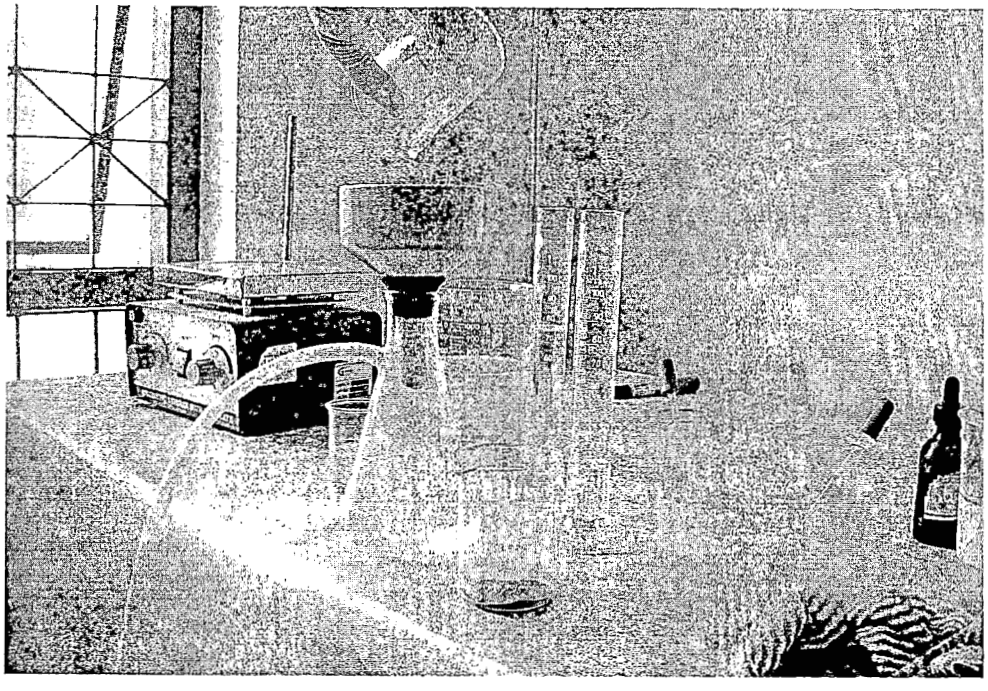
3.6) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 1 มล.

3.7) ทำการไตเตรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$)

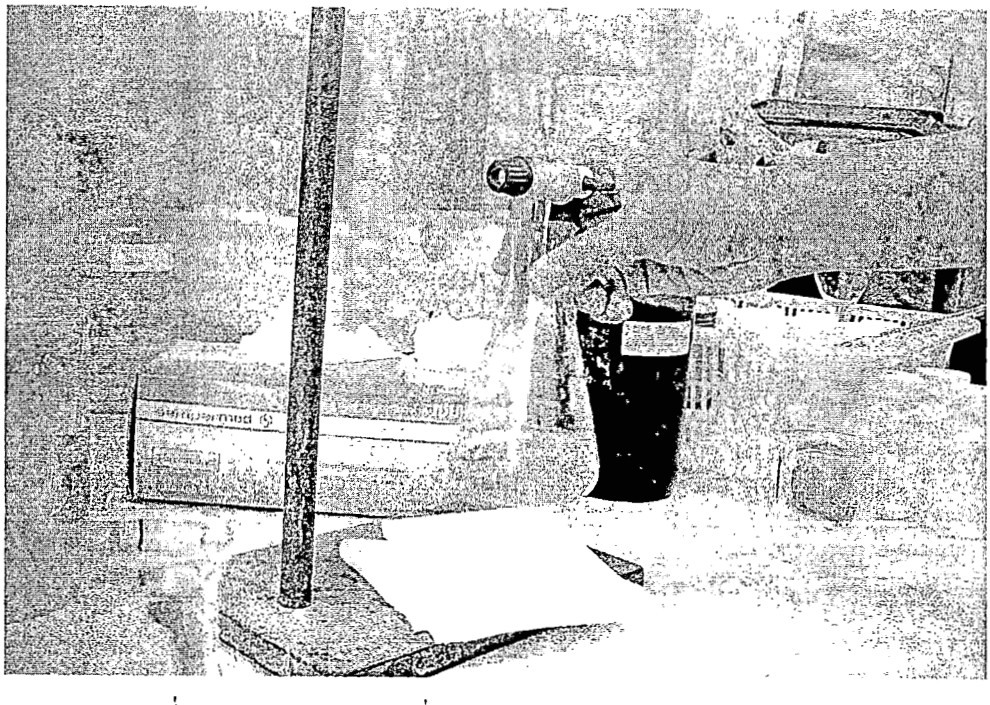
3.8) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ



รูปที่ 3.13 การนำตัวอย่างไปต้มให้เดือด 3 นาที



รูปที่ 3.14 การนำตัวอย่างที่เย็นแล้วมากรองโดยใช้เครื่องดูดสูญญากาศ



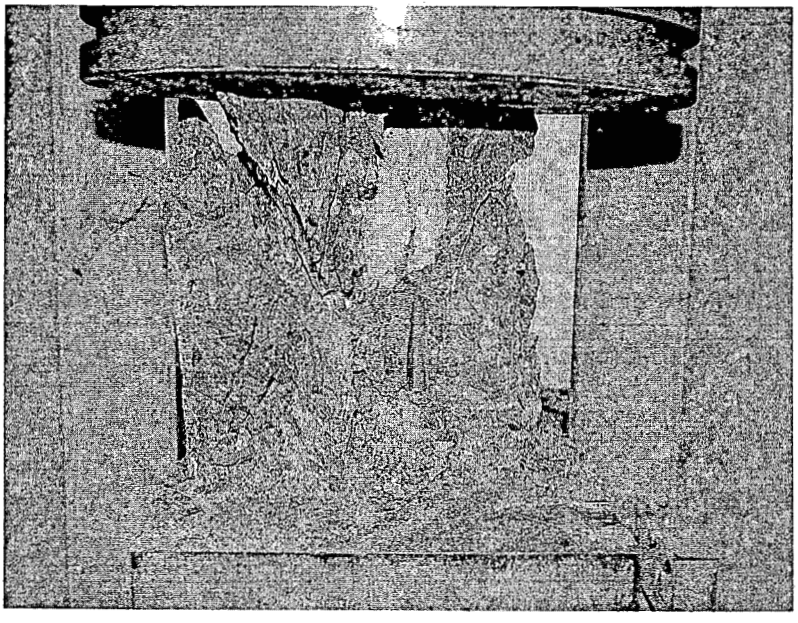
รูปที่ 3.15 การนำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว มาไตเตรตด้วยมือ

3.4.2 หาปริมาณการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

1) นำคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม^3. ที่เจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตแล้วมากดดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ75 มม. โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดกดให้ก้อนคอนกรีตแตกออก

2) นำเหล็กออกมาทำการวัดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กด้วยการทาบพื้นที่ผิวเหล็กที่เป็นสนิม ลงบนกระดาษกราฟใสซึ่งทำเป็นช่องขนาด 2x2 มม. แล้วนับจำนวนช่องเพื่อหาพื้นที่การเกิดสนิม

3) ถ่ายรูปการเกิดสนิมในแต่ละระยะหุ้มของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต



รูปที่ 3.16 การนำตัวอย่างคอนกรีตมาทุบเพื่อนำเอาเหล็กที่ฝังไว้ที่ระยะต่างๆออกมาวัดหาพื้นที่สนิม

บทที่ 4

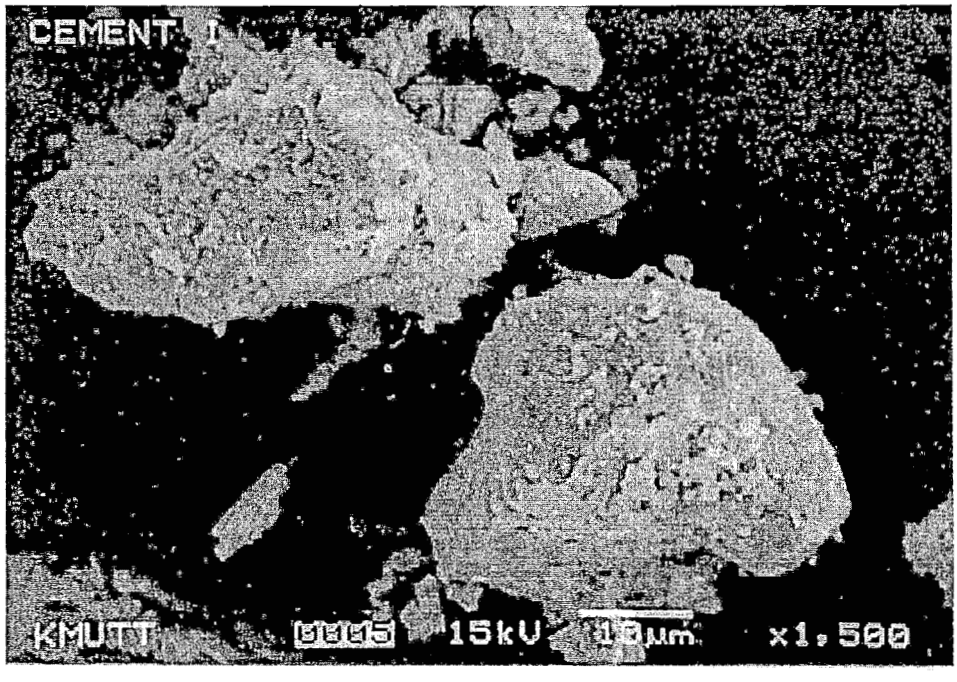
ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติวัสดุประสาน

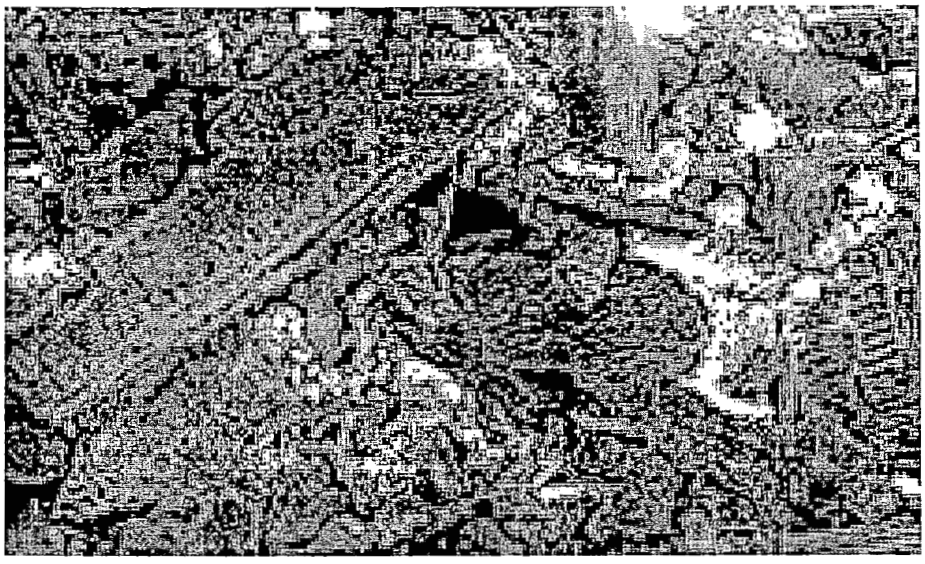
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.1.1.1 รูปร่าง

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบเปลือกไม้จากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ในกำลังขยายต่างๆกันตามความเหมาะสมของขนาดอนุภาค ตามรูปที่ 4.1 เห็นได้ชัดเจนว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างเป็นก้อน เหลี่ยมมุม และมีผิวที่ขรุขระไม่เรียบ ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างเถ้าแกลบเปลือกไม้ รูปร่างของเถ้าแกลบเปลือกไม้มีอนุภาคที่เป็นแผ่นยาว ซึ่งอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเปลือกไม้ จะช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น เนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่มีมาก ส่งผลให้การยึดเกาะส่วนผสมต่างๆในคอนกรีตดีขึ้น และพัฒนากำลังอัดได้มากขึ้น



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.1.1.2 ความละเอียดและการกระจายตัวของอนุภาค

ความละเอียดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูง การพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเป็นไปอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ 28 วันแรก แต่จะค่อยๆพัฒนากำลังอัดในระยะยาวจนถึง 3 ปีครึ่ง [จตุพล และคณะ, 2548] และทำให้ความพรุนต่ำ เพราะความละเอียดสูงก็หมายถึงมีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเนื่องจากความละเอียดไปอุดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.^{2}/ก. และค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 25 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ใช้ มีค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 12.2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.16 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 9,460 ซม.^{2}/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 10.04 ไมโครเมตร

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเปลือกไม้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่า ความละเอียดของวัสดุมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก [วันชัย และคณะ, 2546] พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี MgO, SO_3, LOI, C_3A และ C_4AF อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดของ ASTM C 150 ซึ่ง C_3A ช่วยในการยึดจับคลอไรด์ เมื่อพิจารณาผลรวมออกไซด์ของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าแกลบเปลือกไม้มีค่ารวมเท่ากับร้อยละ 90.66 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO_3 และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.09 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASTM C 618 คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ และจัดให้อยู่ใน Class N ได้

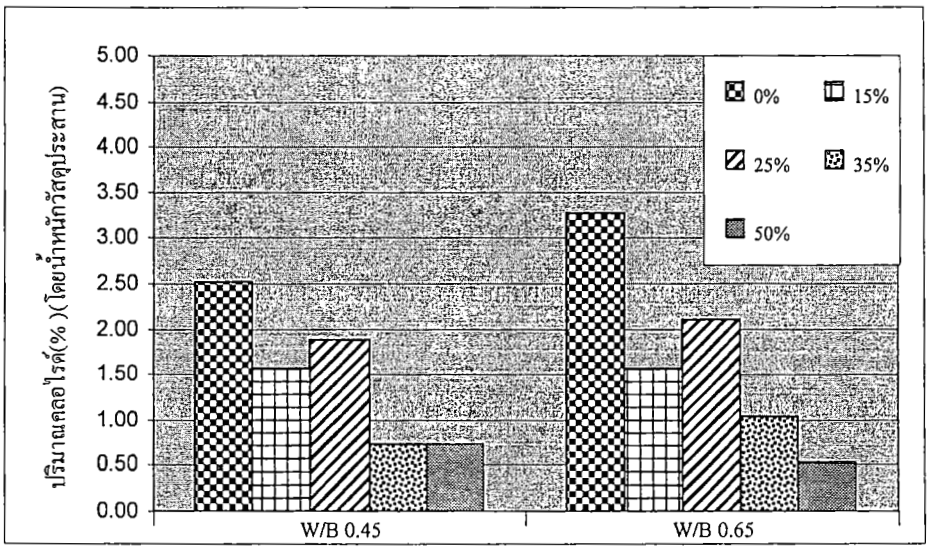
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี โดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ เปลือกไม้
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	87.0
Aluminum Oxide, Al_2O_3	5.50	1.08
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	2.58
Calcium Oxide, CaO	64.97	1.25
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.08
Potassium Oxide, K_2O	0.55	1.00
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	0.09
Loss On Ignition, LOI	2.89	5.71
Tricalcium Silicate,C_3S	56.50	-
Dicalcium Silicate,C_2S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C_3A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite,C_4AF	9.62	-

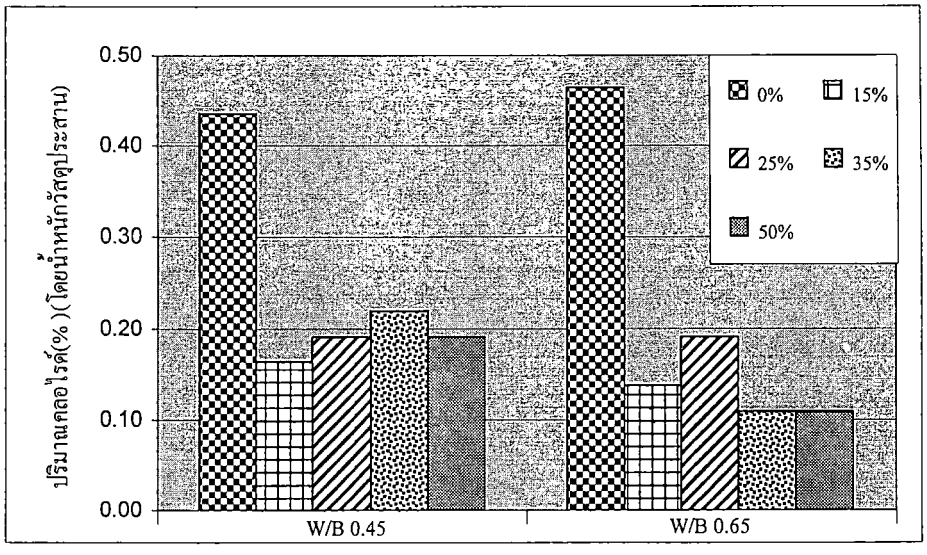
4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

4.2.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

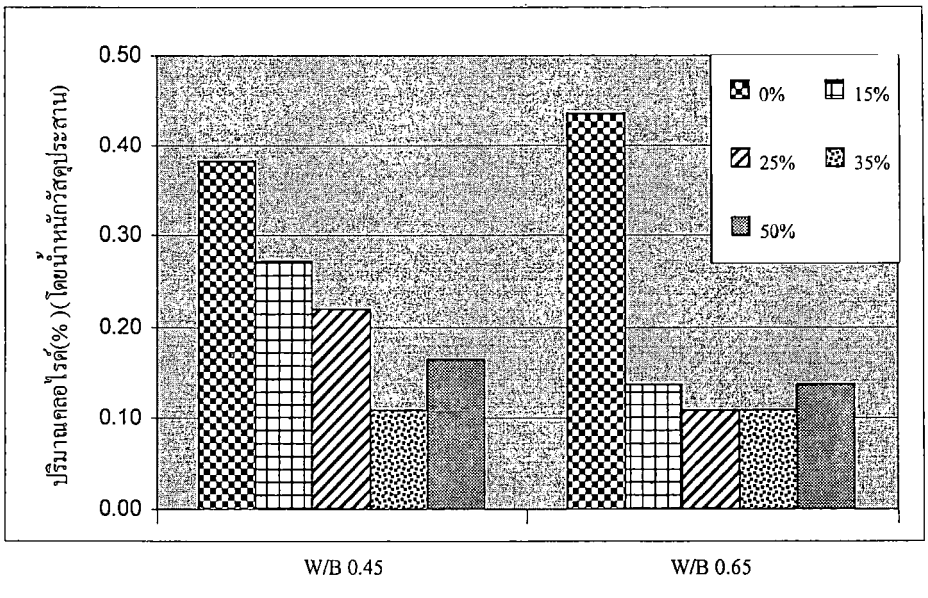
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นค่าปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะความลึกต่างๆกันพบว่า อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ กล่าวคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในระยะห่างจากผิวคอนกรีตที่เท่าๆกัน และแสดงแนวโน้มที่เหมือนกันที่ระดับความลึกอื่นๆดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข.) และ 4.3(ค.) ที่แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 25 และ 35 มม. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความลึกจากผิวคอนกรีตมากขึ้นจะเห็นว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น และสิ่งที่สังเกตได้ชัดอีกอย่างคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้มากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เป็น 0.65 ในคอนกรีตธรรมดาจะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. เท่ากับ 0.44 และ 0.46 ตามลำดับในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับเดียวกันเท่ากับ 0.22 และ 0.11 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในคอนกรีตธรรมดา คุณสมบัติด้านการซึมผ่านในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัด และขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ คุณสมบัติด้านการซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย



ก.ความลึก 15 มม.



ข. ความลึก 25 มม.



ค. ความลึก 35 มม.

รูปที่ 4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ที่ระยะ 15, 25 และ 35 มม.

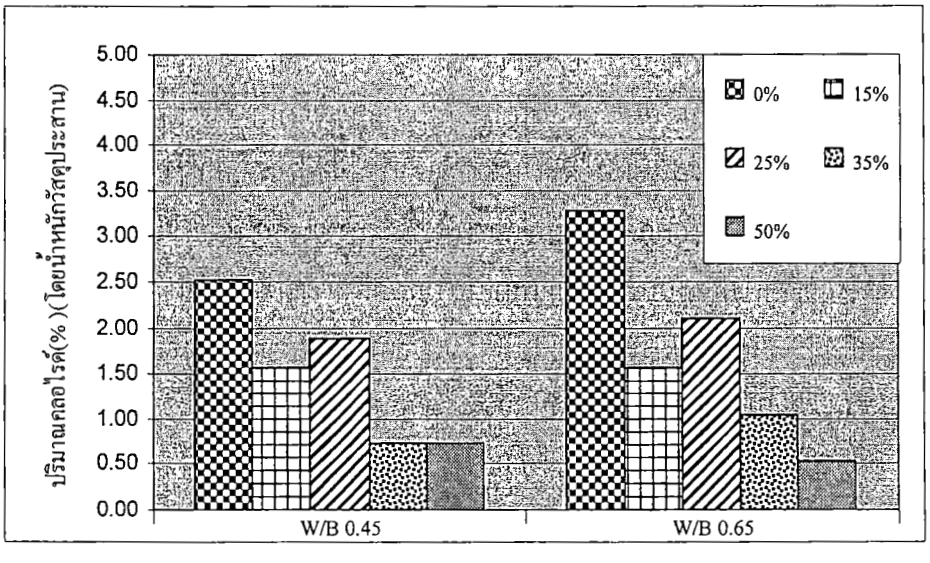
4.2.2 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ตามลำดับ พบว่ามีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณผิวของคอนกรีต ทั้งในส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 และ 0.65 ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในส่วนผสมคอนกรีตมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง โดยการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของ

4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

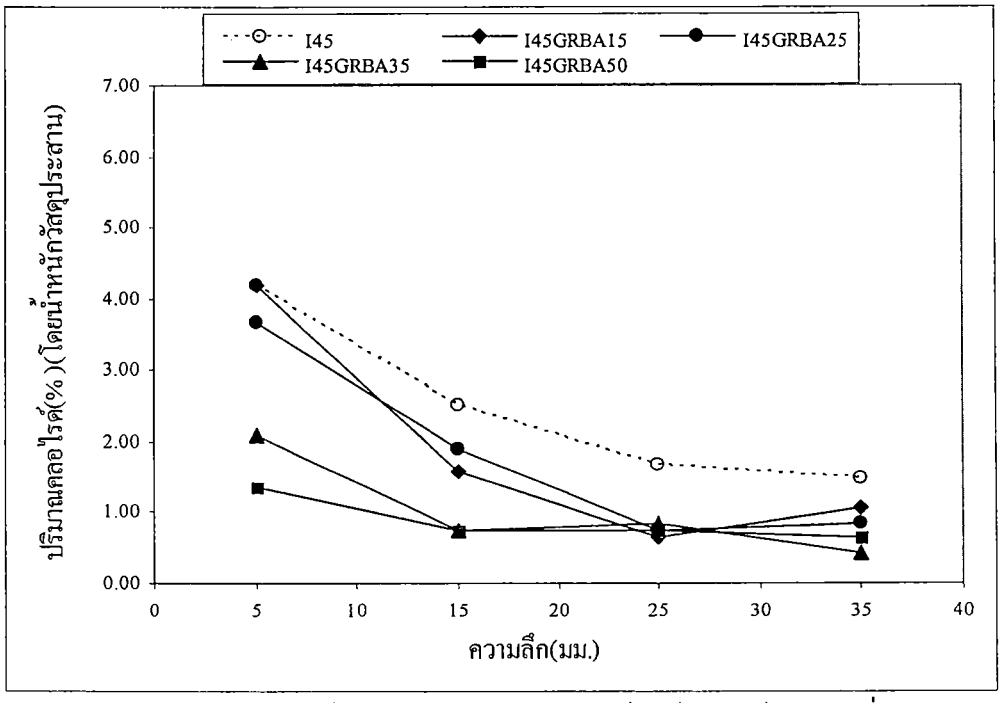
4.2.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นค่าปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะความลึกต่างๆกันพบว่า อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ กล่าวคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในระยะห่างจากผิวคอนกรีตที่เท่าๆกัน และแสดงแนวโน้มที่เหมือนกันที่ระดับความลึกอื่นๆดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข.) และ 4.3(ค.) ที่แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 25 และ 35 มม. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความลึกจากผิวคอนกรีตมากขึ้นจะเห็นว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น และสิ่งที่สังเกตได้ชัดอีกอย่างคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้มากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เป็น 0.65 ในคอนกรีตธรรมดาจะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. เท่ากับ 0.44 และ 0.46 ตามลำดับในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับเดียวกันเท่ากับ 0.22 และ 0.11 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในคอนกรีตธรรมดา คุณสมบัติด้านการซึมผ่านในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัด และขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ คุณสมบัติด้านการซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย

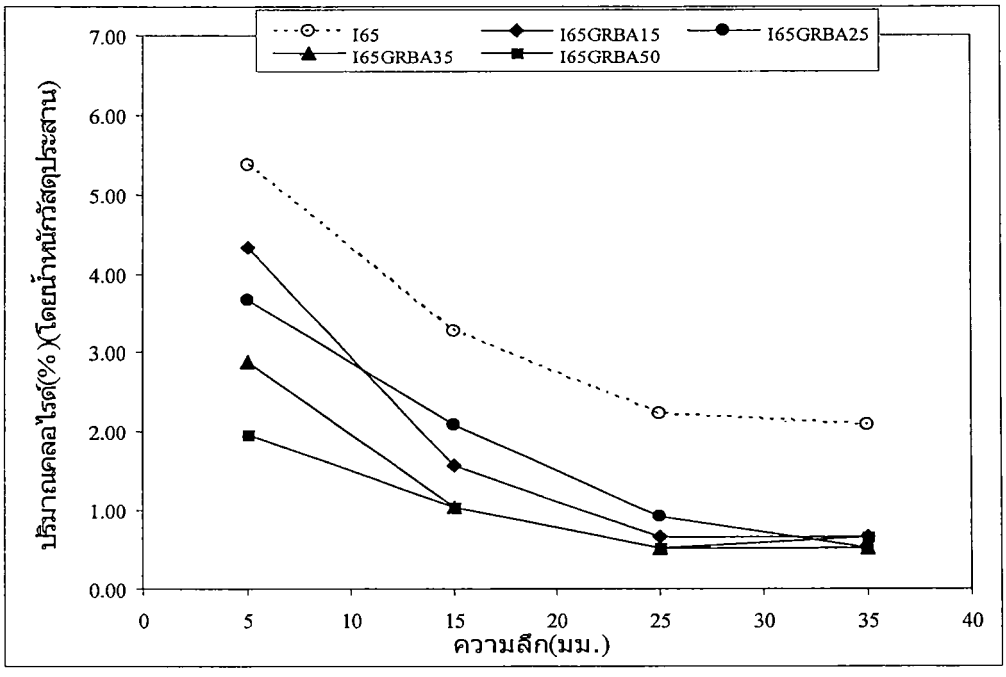


ก.ความลึก 15 มม.

คลอไรด์ลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 35 ของน้ำหนักวัสดุประสานมีแนวโน้มจะลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้เลย (Tangchirapat et al., 2008; Chindaprasirt et al., 2005; Suwanmaneechot et al., 2009) ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น นั่นหมายถึงความคงทนต่อสารเคมีที่เข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยลง แต่การแทนที่ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลดีต่อคอนกรีต โดยลดการซึมผ่านของน้ำลง และดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน โดยการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้ความแข็งแรง ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และนอกจากนั้นปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ส่วนที่เกินและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานก็สามารถที่ละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น และผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65



รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45



รูปที่ 4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์อิสระกับคลอไรด์ทั้งหมด หาได้จากการนำค่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด(ใช้กรดเป็นตัวทำละลาย)และปริมาณคลอไรด์อิสระ(ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยรูปที่ 4.6 และ 4.7 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในกลุ่มคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ และในกลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ตามลำดับ การวิเคราะห์เชิงถดถอยจากกราฟ จะได้สมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระในส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ได้ Free Cl^- = 0.9278Total Cl^--0.0496

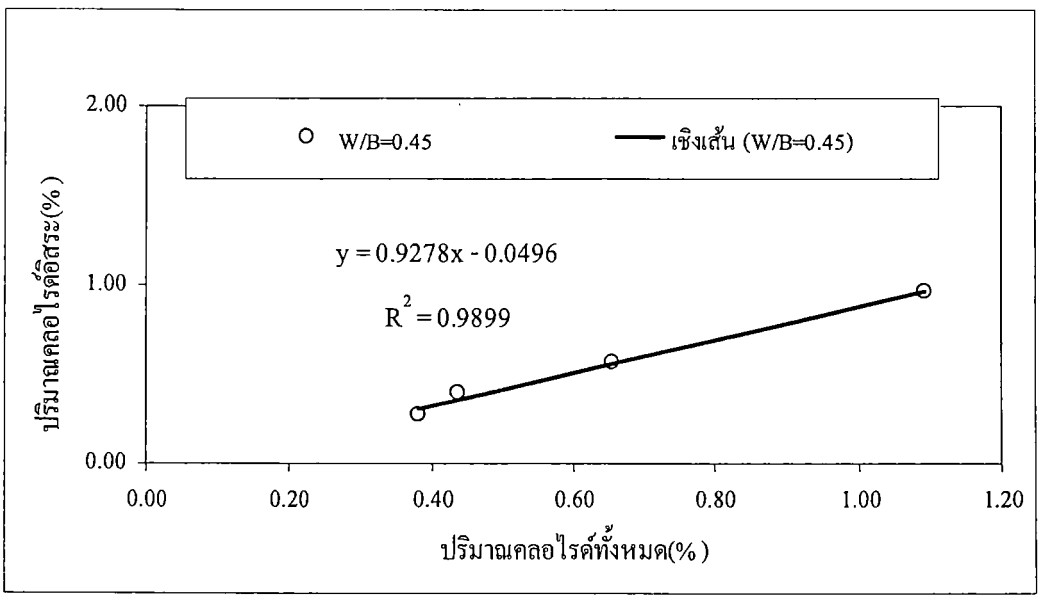
คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 ได้ Free Cl^- = 0.9671Total Cl^--0.0436

คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ได้ Free Cl^- = 0.9263Total Cl^--0.0747

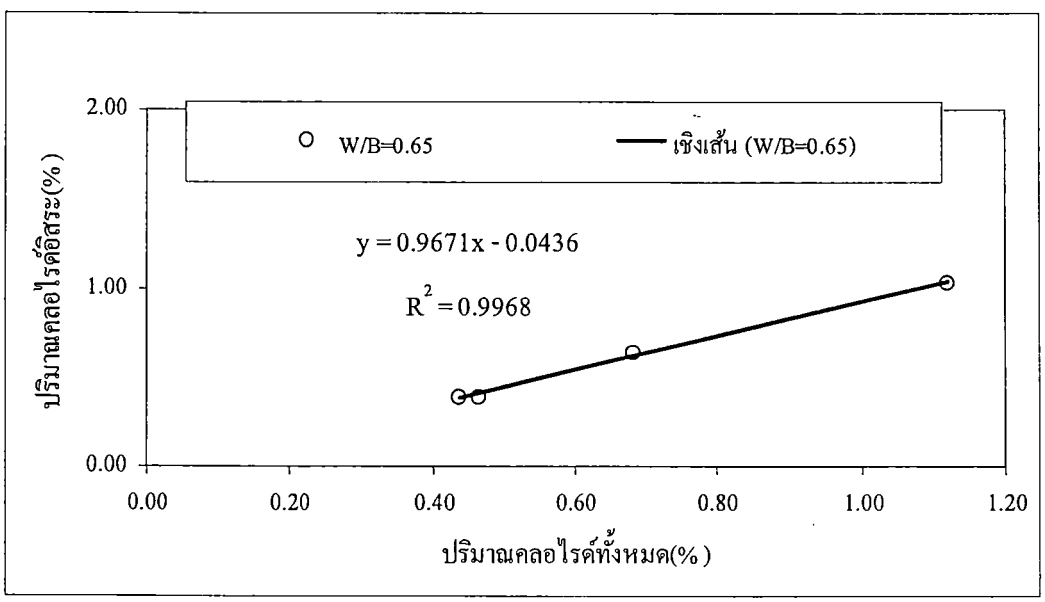
คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 ได้ Free Cl^- = 0.9551Total Cl^--0.0292

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์อิสระแปรผันตรงกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และจะสังเกตเห็นว่าความชันของเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์ของทั้ง 4 กลุ่ม มีความใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีประโยชน์ในการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เกิดสนิมและกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในทางปฏิบัติ และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระจากการทดลองมีความ

ซับซ้อน และใช้เวลานานมากกว่าการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่สามารถทำได้สะดวก และเวลาไม่นาน แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต้องได้จากฐานข้อมูลที่มีจำนวนมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ อาจมีจำนวนฐานข้อมูลที่ยังไม่เพียงพอที่จะให้ความสัมพันธ์ที่มีความชัดเจนและถูกต้อง แต่สามารถที่จะใช้เป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาในเรื่องนี้ต่อไป

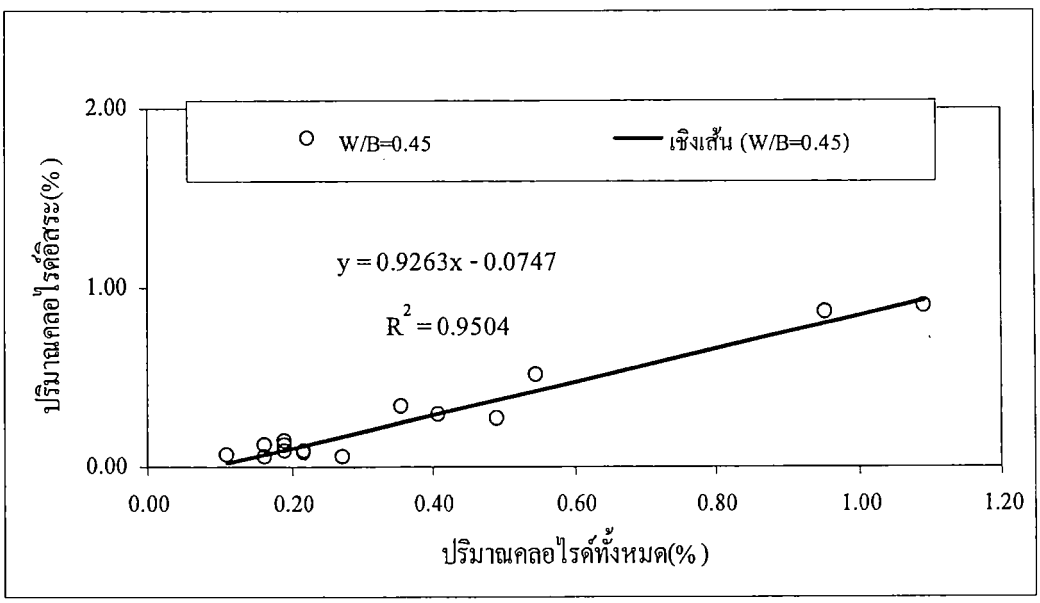


ก. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่มี W/B เท่ากับ 0.45

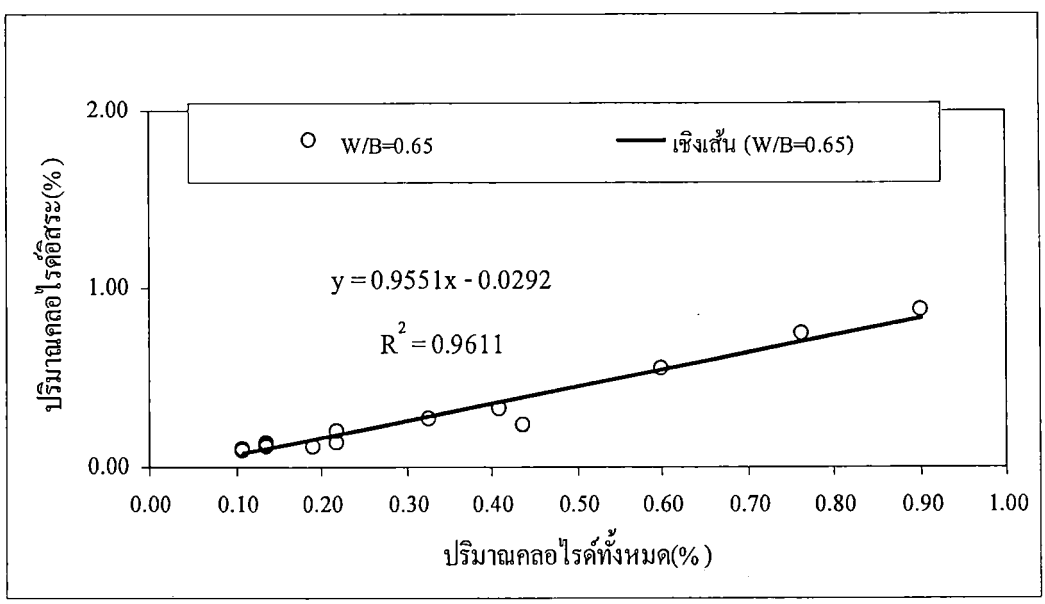


ข. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45



ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดใน คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.2.4 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการดักจับคลอไรด์(Chloride binding capacity)

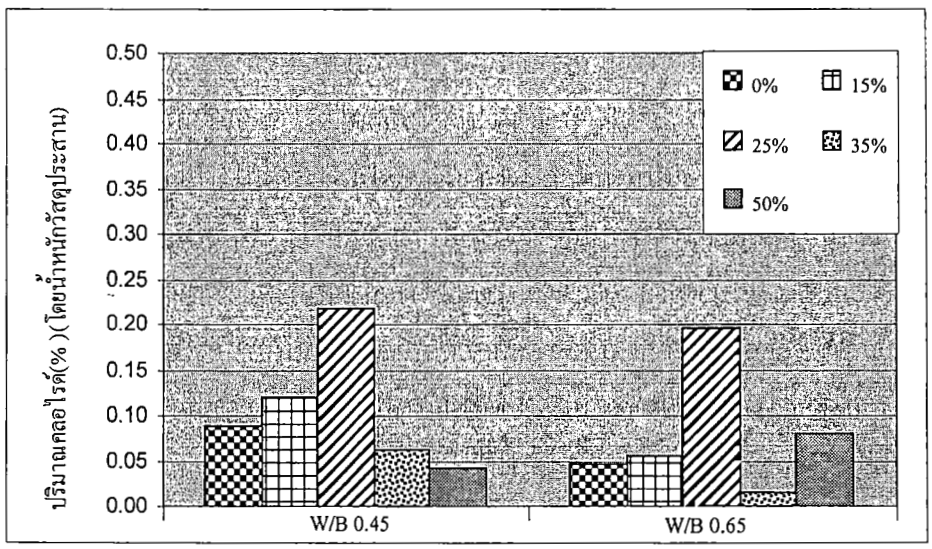
คลอไรด์ที่ถูกดักจับคือคลอไรด์ที่ถูกเนื้อของคอนกรีตดักจับทั้งที่ผิวหน้าและภายใน การหาปริมาณของคลอไรด์ที่ถูกดักจับ สามารถทำได้โดย ใช้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ลบด้วยค่าปริมาณคลอไรด์อิสระ จะได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดักจับ คลอไรด์ที่ดักจับนี้จะส่งผลให้คลอไรด์อิสระที่จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมและกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กลดน้อยลง

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดักจับกับอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้มากขึ้นถึงร้อยละ 25 จะทำให้การดักจับคลอไรด์ได้ผลดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา โดยที่อัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้เท่ากับร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การดักจับคลอไรด์ได้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มคอนกรีต และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้มากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ลดลงแต่จะใกล้เคียงกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้านการต้านทานคลอไรด์ จะมีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระ นั่นหมายถึงที่อัตราการแทนที่วัสดุปอซโซลานที่มากขึ้น การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีตน่าจะดีขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยที่แสดงผลของการดักจับคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50 กลับทำให้การดักจับคลอไรด์มีค่าลดลง [สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 1999] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย การดักจับคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต (3CaO.Al2O3.CaCl2.10H2O) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543] การศึกษาครั้งนี้พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผสมในคอนกรีตมีปริมาณของสารประกอบประเภทอลูมินัมต่ำมาก (ร้อยละ 1.08) ซึ่งมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ในวัสดุประสานจึงไม่น่าจะส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้ อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น [Cheewaket. et al., 2010] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว นั่นหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและ

การดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และและมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณที่สูงมากกว่าร้อยละ 25

การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีต เป็นเพียงองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่พิจารณาว่าวัสดุประสารชนิดใดสามารถเพิ่มการดักจับคลอไรด์ได้ดีและลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะเข้าไปทำอันตรายกับเหล็กเสริมและใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ป้องกันคลอไรด์ แต่ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้แก่ ความทึบน้ำของคอนกรีตก็จะส่งผลทำให้การแรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเข้าไปได้ยากขึ้น ดังนั้นแนวทางในการป้องกันการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคือการเลือกใช้วัสดุประสานที่มีผลต่อการดักจับคลอไรด์ที่มากขึ้นและส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการซึมผ่านน้อยลง กล่าวคือคอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้นนั่นเองแต่ครั้งนี้ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับกำลังอัดของคอนกรีตด้วย ซึ่งแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.8 การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ที่ระยะ 15 มม.

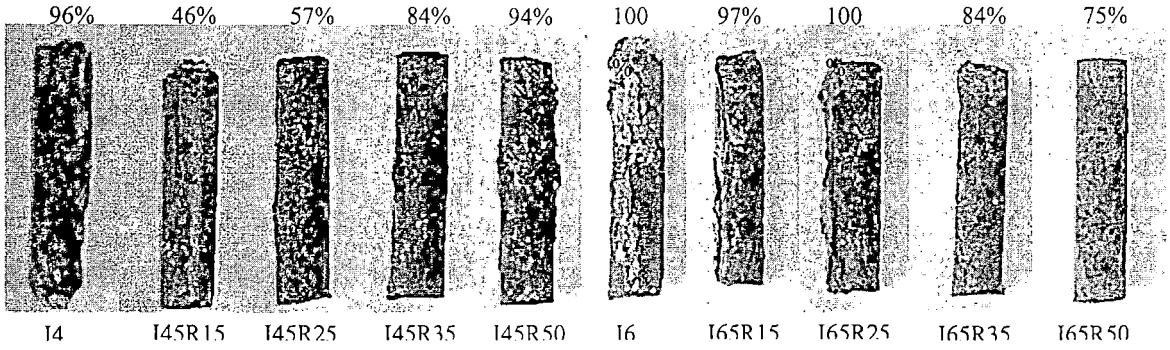
4.3 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

4.3.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสนิมเหล็ก

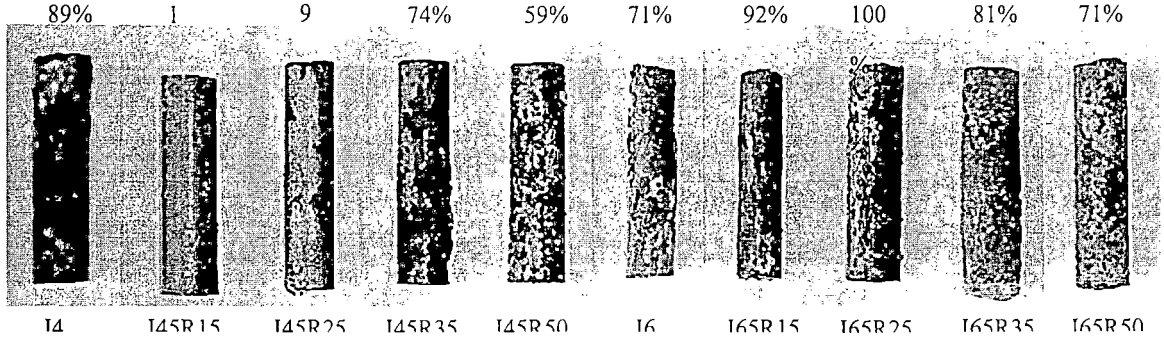
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าร้อยละการเกิดสนิมที่ระยะ 10 มม. มีร้อยละการเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 50 เกือบทุกส่วนผสมตัวอย่างทั้งในส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 และ 0.65 แต่เมื่อความลึกเข้าไปที่ระยะ 20 มม. อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 จะมีร้อยละการเกิดสนิมที่น้อยกว่า ซึ่งจากรูปภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ร้อยละการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง โดยแสดงผลสอดคล้องทุกๆระยะความลึกของคอนกรีตหุ้มเหล็ก ซึ่งจุดนี้เองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการซึมน้ำได้น้อยลง จึงส่งผลให้คลอไรด์เข้าไปทำลายเหล็กเสริมได้ยากขึ้น และลักษณะการเกิดสนิมมีทิศทางที่สอดคล้องกับปริมาณแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตดังที่กล่าวไปแล้ว และเมื่อพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ซึ่งเป็นระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้งานจริง ในสภาพแวดล้อมทะเลพบว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล ทั้งนี้เนื่องจากมีการเกิดสนิมเหล็กคอนข้างชัดเจนแต่การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 และ 35 ก็มีทิศทางที่ดีในการป้องกันสนิมเหล็กส่วน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่เกินร้อยละ 35

ตารางที่ 4.2 พื้นที่สนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

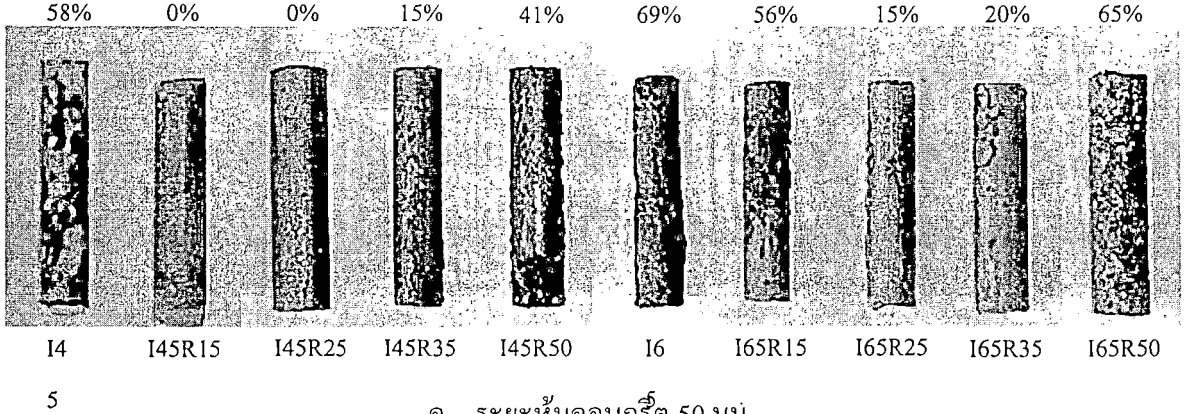
ส่วนผสม	พื้นที่สนิม (ร้อยละ)			
	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก			
	10 มม.	20 มม.	50 มม.	75 มม.
I45CT	96	89	58	1
I45R15	96	1	0	1
I45R25	57	9	0	0
I45R25	84	74	15	0
I45R50	94	59	41	33
I65CT	100	71	69	64
I65R15	57	92	56	1
I65R25	100	100	15	1
I65R35	84	81	20	1
I65R50	75	71	65	64



ก. ระยะหุ้มคอนกรีต 10 มม.

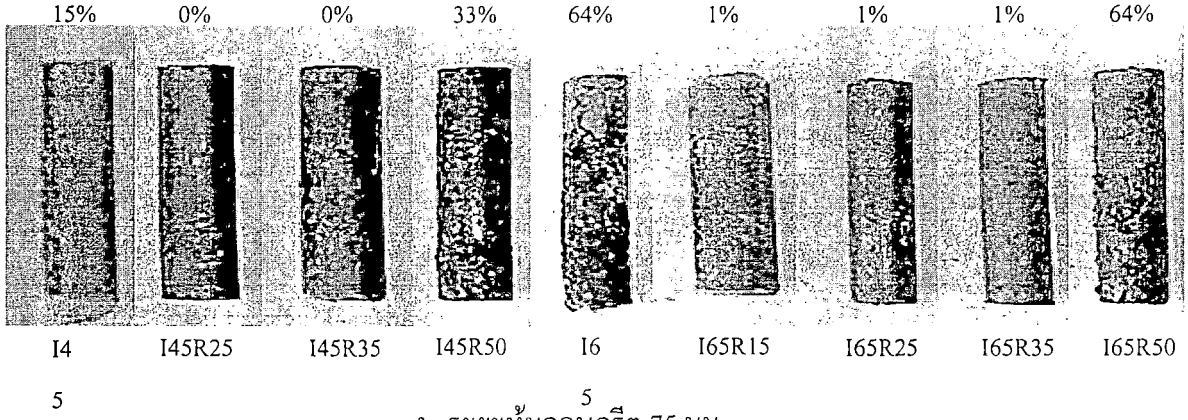


ข. ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.



5

ค. ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.



5

5

ง. ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

รูปที่ 4.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเล 30 เดือน

4.3.2 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อสนิมเหล็ก

จากตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตทุกส่วนผสมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ โดยภาพรวมแล้ว การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น จะสามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีขึ้น และจะเห็นได้ว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. เกือบทุกส่วนผสมมีพื้นที่สนิมมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการเกิดสนิมระหว่างส่วนผสมต่างๆ ได้ ที่ระดับความลึกของการฝังเหล็กที่มากขึ้นจะสามารถวิเคราะห์ถึงผลของการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการเกิดสนิมเหล็กได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 จะส่งผลดีต่อการต้านทางการเกิดสนิมแต่ถ้าแทนที่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้การเกิดสนิมเหล็กสูงมากขึ้น

โดยเหล็กเสริมถูกทำลายเข้าไปถึงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ซึ่งจะเห็นได้จากรูปของเหล็กเสริมที่ 4.8 ของตัวอย่าง I45 R50 นั่นแสดงให้เห็นว่าการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มากถึงร้อยละ 50 การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก ถึงแม้จะใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ 75 มม. ก็ตาม เหล็กเสริมก็จะถูกทำลายได้ภายในระยะเวลา 30 เดือน เท่านั้น แต่สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 การเกิดสนิมเหล็กจะเข้าไปถึงระดับความลึกที่ 50 มม. เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะที่ส่วนผสม I45R25 ในการออกแบบคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลต้องให้ความสำคัญทั้งส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ และอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานด้วย โดยคำนึงถึงระยะหุ้มคอนกรีตควบคู่กันไป แต่ในความเป็นจริงเมื่อมีการลดปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานลงอาจส่งผลต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ทำให้การทำงานยากขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ให้สามารถเทเข้าแบบได้ง่ายและต้านการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีด้วย เพื่อที่จะลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีหลังจากการเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

5.1.2 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่า

5.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะมีผลต่อการลดปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

5.1.4 การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า จะสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดีกว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก

5.1.5 ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ส่วนผสมที่ใช้ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15-25 เนื่องจาก ให้ผลต่อการต้านการแทรกซึมของคลอไรด์ การดักจับคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กไปในทิศทางที่ดี

5.2 ข้อเสนอแนะจากการทดสอบ

ควรมีการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ มาใช้ในการผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ เพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต และ การเกิดสนิมในเหล็กเสริม เพราะในสภาวะแวดล้อมจริงมีทั้งคลอไรด์ และ ซัลเฟต รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิ และสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจจะได้ผลลัพธ์ออกมาดีกว่าก็ได้

บรรณานุกรม

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543, *ความคงทนของคอนกรีต : คอนกรีตในสภาวะแข็งตัว, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์,* หน้า 72-76.

จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548, *"การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน", วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.,* ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 465-476.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และสุรพันธ์ สุคันปรีย์, 2545, *"การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ* ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม 2545, ขอนแก่น, หน้า (MAT-163)-(MAT-172).

ทวีชัย สำราญวานิช, (2552). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย *การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์,* ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โข่ศรี, (2548). *"กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ", เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ* ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.

วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, *"การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง", วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา,* ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.

วลัยลักษณ์ สาระจันทร์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูลย์, *"ผลกระทบของความละเอียดและอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ* ครั้งที่ 12, พฤษภาคม พ.ศ. 2550, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

วิเชียร ชาลี และคณะ, (2007). *"ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี"*, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.* ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, หน้า 153-166

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, (2537). *การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก*, มิถุนายน, หน้า 55.

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, (1999). *"ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย"*, *วิศวกรรมสาร*, เมษายน, หน้า 62-66.

American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C1152 : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," in 1997 Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 638-641.

American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C1218 : Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," in 1997 Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 657-659.

American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C618-00 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete," in Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, pp. 310-313.

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.

Chalee, W., et al., (2006). "Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment", Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 5, pp. 965-971.

Cheewaket, T., Jaturapitakkul C., and Chalee W., 2010, "Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment", Construction and Building Materials 24, 1352–1357

Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk–Bark Ash", Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.

Chindaprasirt, P., Chaiyasena, T. and Sirivivatnanon, V., High Strength Concrete Containing Fly Ash and Black Boiler Rice Husk Ash, Proceedings of the 4th Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID), Bangkok, Thailand, 363-368, 2003.

Chindaprasirt P., Chotithanorm C., Cao, H.T., and Sirivivatnanon V., 2007, "Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete," Construction and Building Materials, V.21, pp.356-361

Hensen, T.C., 1990, "Long-Term Strength of Fly Ash Concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 20, No. 2, pp.193-196.

Kijsawasdi, A., Making Cement from Rice Husk Ash, Research Report, Research Division, Department of Scientific Service, Thailand, 1979.

Mohammed, T.U., Hamada, H. and Yamaji, T., (2004). "Performance of Seawater-Mixed Concrete in the Tidal Environment", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 4, pp. 593-601.

Neville, A.M., (1996). Properties of Concrete, 4th ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.

Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, "Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.

Yoon-Seok Choi , Jung-Gu Kim , Kwang-Myong Lee. "Corrosion behavior of steel embedded in fly ash concrete." Corrosion Science. : pp 1733 – 1745 ; 2005

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

ตารางที่ ก1 แสดงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเล 30 เดือน

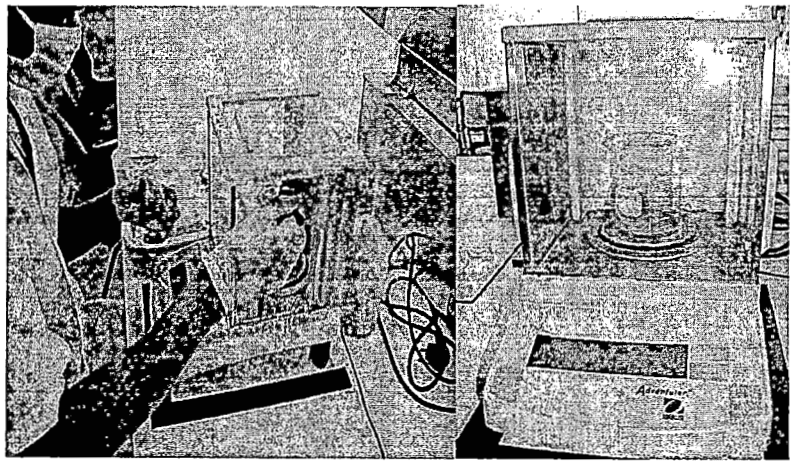
ส่วนผสม	ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)	Total Chloride(%) (by weight of cementious)	Free Chloride(%) (by weight of cementious)	ส่วนผสม	ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)	Total Chloride(%) (by weight of cementious)	Free Chloride(%) (by weight of cementious)
I45	5	1.09	0.96	I45	5	1.12	1.09
	10	0.65	0.57		10	0.68	0.65
	15	0.44	0.39		15	0.44	0.39
	10	0.38	0.57		20	0.44	0.39
I45R15	5	1.09	0.90	I45R15	5	0.90	0.87
	20	0.44	0.26		20	0.39	0.27
	15	0.26	0.08		15	0.14	0.14
	10	0.27	0.08		20	0.14	0.27
I45R15	5	0.96	0.68	I45R15	5	0.26	0.26
	10	0.38	0.26		20	0.44	0.24
	15	0.14	0.08		15	0.14	0.27
	20	0.22	0.00		20	0.11	0.10
I45R15	5	0.65	0.11	I65R35	5	0.68	0.26
	10	0.14	0.13		10	0.22	0.20
	15	0.22	0.07		15	0.14	0.09
	20	0.11	0.06		20	0.14	0.10
I45R50	5	0.11	0.14	I65R35	5	0.41	0.57
	10	0.19	0.15		10	0.22	0.10
	15	0.19	0.19		15	0.19	0.10
	10	0.19	0.13		20	0.13	0.12

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ ตัวอย่างการคำนวณ และการเตรียมสารเคมี

ข.1) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

ข.1.1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังรูปที่ ข.1

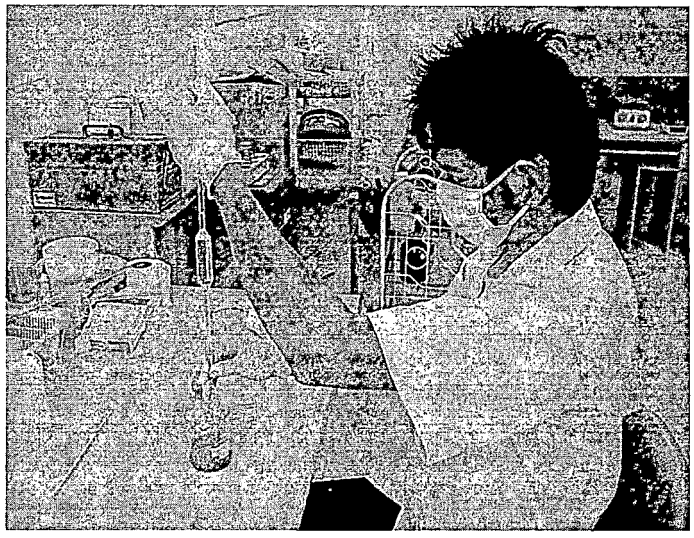


รูปที่ ข.1 แสดงการชั่งตัวอย่างคอนกรีตโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

ข.1.2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ ข.2

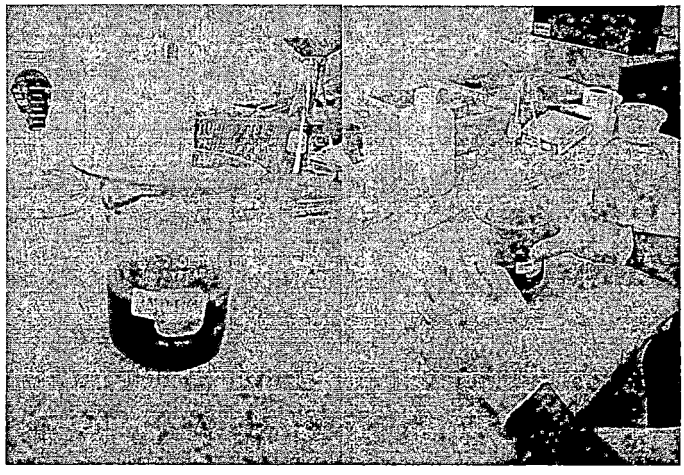
รูปที่ ข.2 การเติมน้ำกลั่น ลงในบีกเกอร์

ข.1.3) เติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ ข.1.3



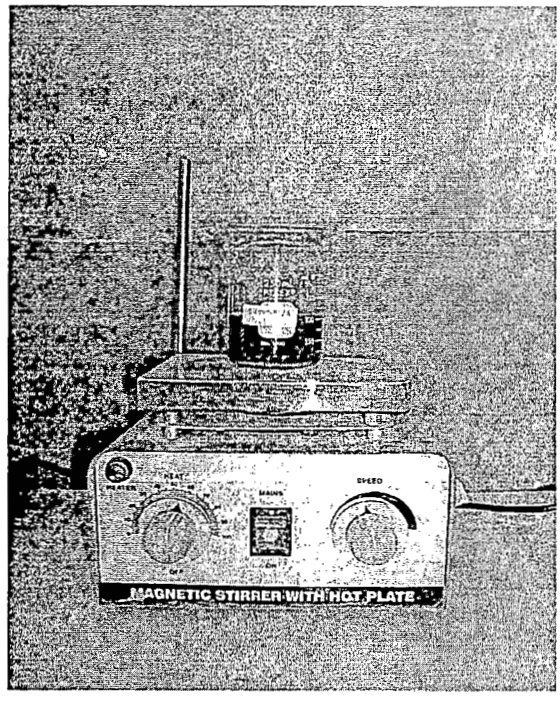
รูปที่ ข.3 การเติมกรดไนตริก ลงในบีกเกอร์

ข.1.4) ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกและคนให้เข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที ดังรูปที่ ข.4



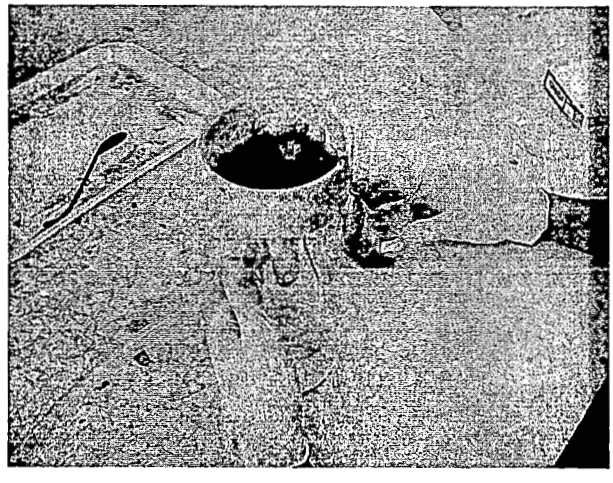
รูปที่ ข.4 ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกและคนให้เข้ากัน

ข.1.5) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 การต้มตัวอย่างให้เดือด

ข.1.6) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 การกรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง

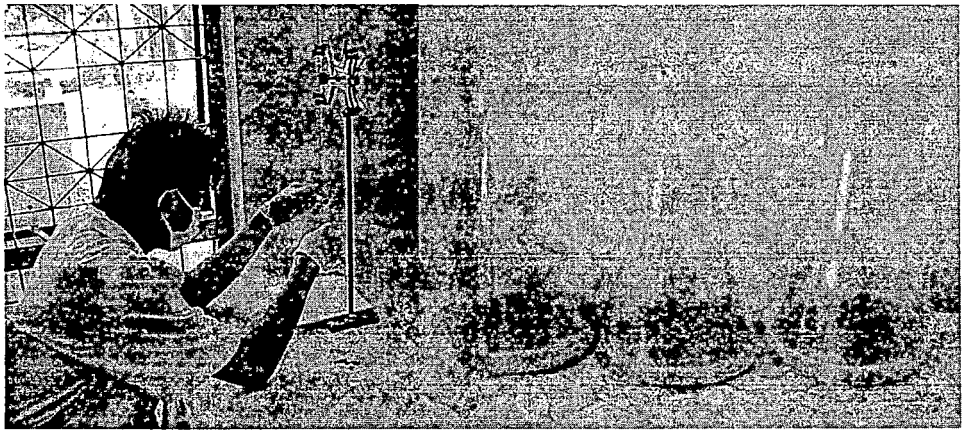
ข.1.7) ปีเปตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ ดังรูปที่ ข.7

รูปที่ ข.7 การปีเปตต์ ตัวอย่างไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่

ข.1.8) เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร ดังรูปที่ ข.8 แล้วนำไปไทเทรต

รูปที่ ข.8 การเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร

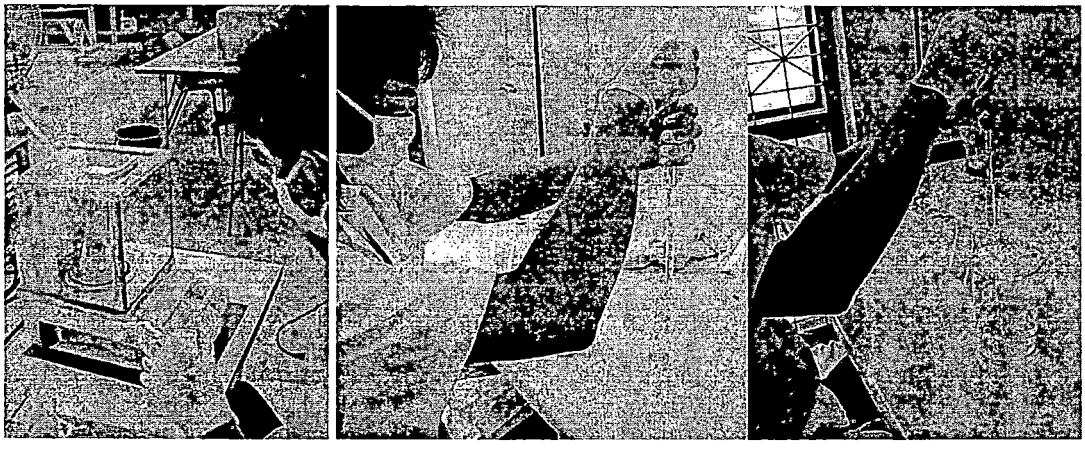
ข.1.9) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม ดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.9 การไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม

ข.1.10) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

ข.1.11) เตรียมการไทเทรตแบลงค์ โดยใช้สารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 0.2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร ดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 การเตรียมตัวอย่างในการไทเทรตแบลงค์

ข.1.12) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม ดังรูปที่ ข.1.9

ข.1.13) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

ข.2) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-Soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

ข.2.1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัมโดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังรูปที่ ข.1.1

ข.2.2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ ข.1.2

ข.2.3) ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกและคนให้เข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที ดังรูปที่ ข.1.4

ข.2.4) นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ ข.1.5

ข.2.5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น ดังรูปที่ ข.1.6

ข.2.6) ปิเปตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่ ดังรูปที่ ข.1.7

ข.2.7) เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตรดังรูปที่ ข.1.8 แล้วนำไปไทเทรต

ข.2.8) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม ดังรูปที่ ข.1.9

ข.2.9) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

ข.2.10) เตรียมการไทเทรตแบลงค์ โดยใช้สารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 0.2 กรัม ใส่ ขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร ดังรูปที่ ข.1.10

ข.2.11) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม ดังรูปที่ ข.1.9

ข.2.12) บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

ข.3) ตัวอย่างการคำนวณ

ข.3.1) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง

ข.3.1.1) การคำนวณหามวลของ $AgNo_3$ 0.025 โมล/ลิตร ในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร

จากสมการ ความเข้มข้น (โมล/ลิตร) $= \frac{g}{M_w} x \frac{1000}{V}$ (ข.1)

โดยที่ g = มวลเป็นกรัมของ $AgNo_3$

M_w = มวลโมเลกุลของ $AgNo_3$

V = ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

จะได้ $0.025 = \frac{g}{169.87} x \frac{1000}{1000}$

เพราะฉะนั้น g = 4.24 กรัม

ข.3.1.2) การคำนวณหามวลของ NaCl 0.05 โมล/ลิตร ในน้ำ 500 มิลลิลิตร

จากสมการ ความเข้มข้น (โมล/ลิตร) $= \frac{g}{M_w} x \frac{1000}{V}$ (ข.2)

โดยที่ g = มวลเป็นกรัมของ NaCl

M_w = มวลโมเลกุลของ NaCl

V = ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

จะได้ $0.05 = \frac{g}{58.5} x \frac{1000}{500}$

เพราะฉะนั้น g = 1.462 กรัม

ข.3.1.3) เทียบมาตรฐานสารละลาย NaCl กับสารละลาย $AgNo_3$

เนื่องจาก สารละลาย $AgNo_3$ ไม่เสถียรจึงต้องเทียบกับสารละลายมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอน

$NaCl(ag) + AgNo_3 \rightarrow AgCl(s) + NaN\ o_3(ag)$

จากสมการ $\frac{mol\ NaCl}{mol\ AgNo_3} = \frac{1}{1}$

$\text{mol NaCl} = \text{mol } AgNo_3$

$(MV)_{NaCl} = (MV)_{AgNo\ 3}$

$M_{NaCl} . V_{NaCl} = M_{AgNo3}\ V_{AgNo3}$

โดยที่ M_{NaCl} = ความเข้มข้นของ NaCl โมล/ลิตร

V_{NaCl} = ปริมาตรของ NaCl ที่ปีเปตมา 10 มิลลิลิตร

M_{AgNo3} = ความเข้มข้นของ $AgNo_3$ โมล/ลิตร

V_{AgNo3} = ปริมาตรของ NaCl ที่อ่านค่าจากบิวเรตต์

จะได้ $0.05 \times 10 = M_{AgNo3} \times 22.25$

$M_{AgNo3} = 0.0225$ โมล/ลิตร

ข.3.2) คำนวณหาปริมาณคลอไรด์

ข.3.2.1) หาความเข้มข้นของ NaCl โมล/ลิตรสมมุติให้จุดยุติของบิวเรตต์ของการไทเทรตตัวอย่างเฉลี่ย 1.35 มิลลิลิตร (หยด $AgNo_3$ จนเกิดตะกอนสีแดง) และจุดยุติที่บิวเรตต์ของการไทเทรตแบลงค์เฉลี่ย 0.25 มิลลิลิตร (หยด $AgNo_3$ จนเกิดตะกอนสีแดง)

จะได้ ค่า $\Delta V_{AgNo3} = 1.35 - 0.25 = 1.10$ มิลลิลิตร

จาก $NaCl(ag) + AgNo_3 \rightarrow AgCl(s) + NaNo_3(ag)$

จากสมการ $\frac{mol\ NaCl}{mol\ AgNo_3} = \frac{1}{1}$

$\text{mol NaCl} = \text{mol } AgNo_3$

$(MV)_{NaCl} = (MV)_{AgNo3}$

$M_{NaCl} \cdot V_{NaCl} = M_{AgNo3} V_{AgNo3}$

โดยที่ M_{NaCl} = ความเข้มข้นของ NaCl โมล/ลิตร

V_{NaCl} = ปริมาตรของ NaCl ที่ปีเปตมา 10 มิลลิลิตร

M_{AgNo3} = ความเข้มข้นของ $AgNo_3$ โมล/ลิตร

V_{AgNo3} = ปริมาตรของ NaCl ที่อ่านค่าจากบิวเรตต์

จะได้ $M_{NaCl} \times 10 = 0.0225 \times 1.10$

$M_{NaCl} = 0.002475$ โมล/ลิตร

ข.3.2.2) การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์

จาก $\%\ Cl^-$ by Wt. of concrete $= \frac{M_{NaCl} x M_w x 100\%}{Wt.of\ concrete}$

โดยที่ M_{NaCl} = ความเข้มข้นของ NaCl โมล/ลิตร

M_w = มวลโมเลกุลของ NaCl

จะได้ $\%\ Cl^-$ by Wt. of concrete $= \dfrac{0.002475x35.5x100\%}{10.014}$

$= 0.88$

และ $\%\ Cl^-$ by Wt. of binder = [(วัสดุประสาน+หิน+ทราย+น้ำ) x $\%\ Cl^-$ by Wt. of Concrete] / (วัสดุประสาน+น้ำ)

* การคำนวณหาค่าปริมาณคลอไรด์อิสระและการคำนวณหาค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คำนวณในลักษณะเดียวกัน

ข.4) การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ข.4.1) การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร

1) ชั่งน้ำหนักซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จากการคำนวณ 4.24 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร คนให้ละลาย แล้วเก็บใส่ขวดแก้ว พร้อมทั้งเขียนชื่อ และวันที่ติดไว้ ดังรูปที่ ข.11

รูปที่ ข.11 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$)

ข.4.2) การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

1) ชั่งน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จากการคำนวณ 1.462 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร คนให้ละลาย แล้วเก็บใส่ขวด พร้อมทั้งเขียนชื่อ และวันที่ติดไว้

301454

ข.4.3) การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5%

1) ชั่งน้ำหนักโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 10 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร คนให้ละลาย แล้วเก็บใส่ขวด พร้อมทั้งเขียนชื่อ และวันที่ติดไว้

ข.4.4) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 2%

1) ชั่งน้ำหนักโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 10 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร คนให้ละลาย แล้วเก็บใส่ขวด พร้อมทั้งเขียนชื่อ และวันที่ติดไว้

ข.4.4) การเตรียมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1)

1) ผสมกรดไนตริกกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อน แล้วเติมกรดไนตริกทีหลัง คนให้เข้ากันแล้วเก็บใส่ขวด พร้อมทั้งเขียนชื่อ และวันที่ติดไว้