

การกักเก็บคลอไรด์และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี

(CHLORIDE BINDING AND CHLORIDE PENETRATION OF FLY ASH
CONCRETE UNDER 15-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT)

นันทรัตน์ โยคะวัฒน์

อภิเดช รัตนดิถก ณ ภูเก็ต

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2556

**CHLORIDE BINDING AND CHLORIDE PENETRATION OF FLY ASH
CONCRETE UNDER 15-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT**

Ms. Nantarat Yokawat

Mr. Apidate Rattanadilok Na Phuket

An Engineering Project Submitted in Partial fulfillment of Requirements

For the Degree of Bachelor of Engineering

Department of Civil Engineering

Burapha University 2013

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำของวัสดุประสาน และปริมาณเถ้าน หินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 15 ปี โดยใช้เถ้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 หล่อกอนกรีตขนาด 200x200x250 มม.³ หลังจากบ่ม คอนกรีตในน้ำประปาครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ที่บริเวณชายหาด จังหวัดชลบุรี จากนั้นได้นำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 15 ปี

ผลการศึกษา พบว่าการใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีต ปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง และความสามารถในการกัก เก็บคลอไรด์สูงขึ้น นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ทำให้การแทรกซึมของ คลอไรด์ลดลงชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน

คำสำคัญ : เถ้านหิน / สภาวะแวดล้อมทะเล / การกักเก็บคลอไรด์ / การแทรกซึมคลอไรด์

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of W/B ratios and fly ash content on chloride penetration and chloride binding capacity of concrete under 15-year exposure marine in environment. Fly ash from Mae Moh power plant were used as a partial replacement of Portland cement type I at 0, 15, 25, 35, and 50% by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) were varied as 0.45, 0.55 and 0.65. Concrete specimens of 200x200x250 mm³ were cast and cured in fresh water for 28 days. After that, the specimens were placed to the tidal zone of marine environment in Chonburi province. Subsequently, the specimens were tested for chloride penetration after being exposed to the tidal zone for 15 years.

The results showed that the increase of fly ash replacement of Portland cement type I in concrete reduced the chloride penetration with increased the chloride binding capacity in concrete. In addition, the decrease of W/B ratio of concrete result in decreased chloride penetration of cement concrete was higher than that of the fly ash concrete.

Key word : Fly ash / Marine environment / Chloride binding / Chloride penetration

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานิพนธ์เรื่อง “การกักเก็บคลอไรด์และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี” ในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาปฏิญานิพนธ์ และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และแนะนำในสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทำให้สามารถจัดทำปฏิญานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่มีส่วนช่วยเหลือในการจัดทำปฏิญานิพนธ์ครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณ โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จังหวัดชลบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ในการเช่าตัวอย่าง

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลองเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำปฏิญานิพนธ์ ซึ่งทำให้การจัดทำปฏิญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยหวังว่า ปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ จะเกิดประโยชน์แก่การแก้ไขปัญหของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลในด้านความคงทนของคอนกรีต และความคุ้มค่าในการใช้อาคาร

นนทรัตน์ โยคะวัฒน์

อภิเดช รัตนดิถก ณ ภูเก็ต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูปภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คุณสมบัติและหน้าที่ของคอนกรีต	4
2.2 คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล	6
2.3 เกลือคอลลอยด์ในคอนกรีต	7
2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก	9
2.5 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.6 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์	13
2.7 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	18
2.8 วัสดุปอซโซลาน	21
2.9 ปฏิกริยาปอซโซลาน	21
2.10 เถ้าถ่านหิน	22
2.11 การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต	30
2.12 ผลดีของการใช้เถ้าถ่านหิน	33
2.13 คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหิน	34
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต	36
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	
3.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.3 วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่าง เมื่อ 15 ปีที่แล้ว	47
3.4 วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 15 ปี	51
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	
4.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่างในการวิจัย	62
4.2 คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่าง	66
4.3 สภาพผิวของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 15 ปี	67
4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินหลังแช่ในน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 15 ปี	69
4.5 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	89

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 ปฏิภาศส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา (เตรียมเมื่อ 15 ปีที่แล้ว)	50
ตารางที่ 4.1 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย	64
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	65
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย	66
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของน้ำทะเล	67
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน หลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	80
ตาราง ก. ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) ในคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล 15 ปี	90-94
ตาราง ข. ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล 15 ปี	95-99
ตาราง ค. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล 15 ปี	100-102

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถเผาได้ของคอนกรีตสด	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล	11
รูปที่ 2.3 บริเวณความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	12
รูปที่ 2.4 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมค้นคอนกรีตให้แตกร้าวหรือหลุดร่อนออกมา	14
รูปที่ 2.5 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต	15
รูปที่ 2.6 แสดงการแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก	17
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต	18
รูปที่ 2.8 แสดงรูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal	23
รูปที่ 2.9 แสดงรูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed	24
รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต	43
รูปที่ 3.2 ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20	44
รูปที่ 3.3 เครื่องเจาะคอนกรีต	44
รูปที่ 3.4 เครื่องตัดคอนกรีต	44
รูปที่ 3.5 เครื่องซั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง	45
รูปที่ 3.6 เครื่องตัมสาร	45
รูปที่ 3.7 เครื่องแก้วที่ใช้ในการไทเทรต	45
รูปที่ 3.8 ครกหิน	46
รูปที่ 3.9 บิวเรตต์	46
รูปที่ 3.10 กรวยกรอง	46
รูปที่ 3.11 เครื่องดูดสูญญากาศ	47
รูปที่ 3.12 แสดงการหล่อคอนกรีตขนาด 200x200x250 mm ³ . เมื่อ 15 ปีที่แล้ว	49
รูปที่ 3.13 สถานที่แช่ตัวอย่างโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี	49
รูปที่ 3.14 การเจาะตัวอย่างคอนกรีต	52
รูปที่ 3.15 การตัดตัวอย่างทรงกระบอก	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.16 การบดและร่อนตัวอย่าง	53
รูปที่ 3.17 แสดงการซั่งผงตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ในบีกเกอร์	56
รูปที่ 3.18 แสดงการเติมน้ำกลั่น	56
รูปที่ 3.19 แสดงการเติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1)	56
รูปที่ 3.20 แสดงการคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที	57
รูปที่ 3.21 การต้มสารละลายตัวอย่าง	57
รูปที่ 3.22 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง	58
รูปที่ 3.23 เจือจางตัวอย่าง 5 เท่า	58
รูปที่ 3.24 ปิเปตตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 10 มล. ใส่ขวดรูปชมพู่	59
รูปที่ 3.25 เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มล. และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 2% ลงไป 10 มล.	59
รูปที่ 3.26 การไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) จนเป็นสีส้ม	60
รูปที่ 4.1 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	62
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	63
รูปที่ 4.3 สภาพผิวคอนกรีต ที่แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	68
รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี	70-73
รูปที่ 4.5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลัง แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	75
รูปที่ 4.6 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆในคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	76-79
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	81
รูปที่ 4.8 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรง โดยเฉพาะโครงสร้างในสถานะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งส่วนใหญ่มักจะพบใน โครงสร้างที่อยู่ในสถานะแวดล้อมบริเวณชายฝั่งทะเลรวมไปถึงสถานะแวดล้อมที่อยู่ในทะเลด้วย เนื่องจากในน้ำทะเลประกอบด้วยปริมาณเกลือชนิดต่างๆมากถึงร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก [1] โดยจะมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ประมาณร้อยละ 1.6-1.8 โดยน้ำหนักน้ำทะเล [2] ซึ่งคลอไรด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของโครงสร้าง ทั้งในด้านกำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานความล้า (Fatigue Strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างที่ลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ลดน้อยลงตามไปด้วย สาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหาย และมักจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก จึงได้มีการคิดค้นการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตขึ้นมาใหม่ ที่ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ดี โดยการนำเอาถ่านหินที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ยังสามารถลดมลภาวะจากการทิ้งเถ้าเหลือใช้ดังกล่าว และยังช่วยลดต้นทุนในการใช้ปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย

คลอไรด์อาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตเอง เนื่องจากมวลรวมและน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีคลอไรด์ปะปนอยู่หรืออาจอยู่ในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนใหญ่มักจะมาจากสถานะแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน และแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้แต่ถ้าไม่มีการสัมผัสกับออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แต่หากคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่มีความชื้นและอากาศเพียงพอจะส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและขยายตัวทำให้คอนกรีตแตกหลุดร่อนได้ ความเสี่ยงที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) รองลงมาเป็นบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) และ

บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนน้อยมาก

วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัสดุที่เหลือภายหลังจากการใช้ประโยชน์แล้วและยังเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น เถ้าที่เหลือจากการเผาวัสดุเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงด้านพลังงาน นั่นคือ เถ้าจากการเผาถ่านหิน (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ซึ่งเป็นเถ้าที่มีปริมาณเหลือทิ้งมากที่สุดในประเทศไทย ประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปีหรือร้อยละ 70 ของปริมาณเถ้าเหลือทิ้งทั้งหมด จึงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตมากที่สุด แต่เถ้าที่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ มีซิกาออกไซด์หรือซิลิกาและอลูมินาออกไซด์มากกว่าร้อยละ 50 มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้ ไม่เป็นผลึกสามารถทำปฏิกิริยากับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (เป็นด่างซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ) ได้

การศึกษาความคงทนของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจำเป็นต้องใช้เวลาในการแช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ยาวนานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ข้อมูลด้านความคงทนสอดคล้องกับพฤติกรรม การกัดกร่อนจริงมากที่สุดและสามารถประเมินสถานะการกัดกร่อนในระยะยาวได้อย่างถูกต้องและส่งผลให้การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตได้เหมาะสมกับการใช้งานจริงมากที่สุด ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงต้องการที่จะศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลที่ใช้ระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างคอนกรีตยาวนานถึง 15 ปี โดยมุ่งเน้นไปที่การแทรกซึมของคลอไรด์อิสระและคลอไรด์ทั้งหมด ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินตลอดจนข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์การกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านความคงทนที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 15 ปี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตในงานก่อสร้าง ที่ต้องการความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ ได้ดี โดยการเจาะตัวอย่างทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลของการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กรดและน้ำเป็นตัวทำลาย เพื่อมาวิเคราะห์ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ที่อายุ 15 ปี โดยเป็นตัวอย่างที่มี ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อคอนกรีตขนาด 200x200x250 มม.³ หลังจากบ่มคอนกรีตครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายหาด โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 15 ปี เมื่อครบกำหนดเวลา จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การนำวัสดุปอชโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ประหยัดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้มาก
2. ทำให้โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสภาวะแวดล้อมทะเลมีอายุยืนยาวขึ้น เนื่องจากการนำวัสดุปอชโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตดีขึ้นทั้งด้านกำลังและความทนทาน โดยเฉพาะความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์
3. ใช้เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาวจากผลการทดสอบในระยะสั้นและระยะกลาง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการความคงทนเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 คุณสมบัติและหน้าที่ของคอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความนิยมใช้งาน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีความเหมาะสมกว่าวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ทั้งด้านราคาและด้านคุณสมบัติต่างๆ และแยกพิจารณาคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต และส่วนที่เป็นมวลรวม ได้แก่ ทราย หิน หรือกรวด เมื่อนำวัสดุต่างๆ ของคอนกรีตมาผสมกัน คอนกรีตจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดเวลาหนึ่งซึ่งสามารถนำไปเทลงแบบหล่อตามต้องการได้ เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็ง และในเวลาต่อมาก็จะเป็นของแข็งในที่สุดซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลานึงความสามารถรับกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน

ปูนซีเมนต์ จะทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีต โดยทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำเกิดเป็นของเหลวหนืดจะทำหน้าที่หล่อลื่นคอนกรีตให้สามารถเทได้และยึดประสานมวลรวมเข้าด้วยกันเมื่อแข็งตัวจะให้กำลังกับคอนกรีตคุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคมีและความละเอียดของเม็ดปูนซีเมนต์

วัสดุผสมย่อยอย่างละเอียด การก่อสร้างในประเทศไทยวัสดุผสมย่อยอย่างละเอียดจะใช้ทรายเป็นตัวแทรกประสาน ที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนและปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงมากและทรายที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติที่สะอาดแข็งแกร่ง ทนทาน ไม่มีสารเคมีหรืออินทรีย์วัตถุเจือปน เพราะจะทำให้การยึดเหนี่ยวของปูนซีเมนต์เสียกำลัง ก่อนที่จะนำทรายมาใช้ต้องร่อนให้สะอาดก่อน

วัสดุผสมย่อยอย่างหยาบ ใช้หินย่อยขนาดที่เหมาะสมกับการผสมคอนกรีตคือต้องไม่ใหญ่เกินไป เพราะทำให้ไม่สามารถเทเข้าไปในระหว่างแบบหล่อกับเหล็กเสริมของคานหรือเสาได้ในกรณีที่ทำคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับหินย่อยที่ใช้ผสมควรมีขนาดที่ละกัน เช่น หินเบอร์ 2 และหินเบอร์ 1 เพื่อลดช่องว่างระหว่างหินให้น้อยลงทำให้คอนกรีตแข็งแรง แน่นและทนทาน

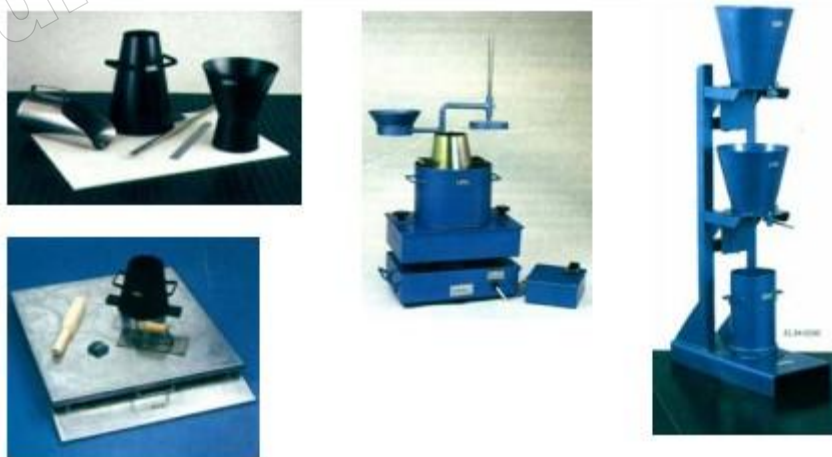
น้ำ จะทำหน้าที่ผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและยังช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทลงในแบบหล่อได้ น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำที่สะอาด ซึ่งในการ

ก่อสร้างส่วนมากมักกระบวนจะต้องเป็นน้ำสะอาดที่ใช้ดื่มเช่น น้ำประปาเพราะน้ำที่มีสารปนเปื้อนหรือไม่สะอาดอาจจะทำให้วัสดุผสมในคอนกรีตสุกก่อนคอนกรีตแข็งตัวช้าหรือกำลังลดลงถ้าหากงานก่อสร้างนั้นอยู่ใกล้ทะเลและมีความจำเป็นต้องใช้น้ำทะเลมาผสม เช่นที่ทำเรืออยู่ทะเล สามารถใช้น้ำยาผสมกันซัลเฟตผสมเพิ่ม อุณหภูมิที่ดีที่สุดของน้ำที่นำมาผสมคอนกรีตคือ 20 องศาเซลเซียส

น้ำยาผสมคอนกรีต จะทำหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน อาทิเช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถในการเทได้ กำลังอัด เป็นต้น

คอนกรีตที่มีคุณภาพ คือ คอนกรีตที่มีคุณสมบัติต่างๆ เหมาะสมตรงตามลักษณะของการใช้งานในประเภทนั้นๆ คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการโดยทั่วไป คือในสภาพเหลวต้องมีความสามารถเทได้ (workability), ไม่มีการแยกตัว (segregation), ใช้พลังงานในการทำงานน้อย ในสภาพที่แข็งตัวแล้วจะต้องมีกำลัง (strength) สูงพอ, ทึบน้ำ (impermeability), หดตัวน้อย ปราศจากรอยแตกร้าวภายใน ไม่มีโพรงหรือช่องว่างจากการเท

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัด ในขณะที่ความสามารถรับแรงดึงได้ต่ำประมาณ 10% ของแรงอัดแต่ถ้าต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ต้องเพิ่มเหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อเหล็กจะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต และคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตในคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถเทได้ (workability), การยึดเกาะ (cohesion), ความชื้นเหลว (consistency), การแยกตัว (segregation), การเยิ้ม (bleeding) ส่วนในคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลังอัด (compressive strength), ความหนาแน่น (density), ความทึบน้ำ (impermeability), ความคงทน (durability), ต้านทานการขัดสี (resistance to abrasion)



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด [3]

นอกจากคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว ก็ยังอาจต้องการคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากนี้ไปตามลักษณะของการนำไปใช้งาน เช่น ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (heat of hydration), ระยะเวลาการก่อตัว (setting time), การหดตัว (shrinkage), การต้านทานซัลเฟต (sulfate resistance) ฯลฯ ถึงแม้ว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการแล้ว ก็ยังต้องคำนึงถึงด้านราคาของคอนกรีตให้มีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

2.2 คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล [4]

วิศวกรโยธาที่ทำงานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเลหรือในสภาพ สิ่งแวดล้อมทะเล เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล หรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าที่ควรเป็น ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งาน (Service life) ที่สั้น ทั้งนี้โดยมากเกิดเนื่องจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมแล้วคั่งให้เนื้อ ของคอนกรีตที่หุ้มอยู่เกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจำนวนมาก ทั้งนี้ที่โครงสร้างดังกล่าวก็ใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตในการก่อสร้าง สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่สั้นส่วนหนึ่งเป็นเพราะว่าผู้ที่ เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างยังขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาพการทำลายที่รุนแรงของน้ำทะเล ทั้งนี้ในน้ำทะเลมีเกลือหลักๆ อยู่สองชนิดคือ เกลือคลอไรด์ (Cl⁻) และเกลือซัลเฟต (SO⁴) ซึ่งแต่เดิมวิศวกรมีความเข้าใจว่าคอนกรีตสำหรับ โครงสร้างที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า (Sulfate resisting Portland cement) ซึ่งต้านทานซัลเฟตเท่านั้นเป็นส่วนผสมจึงจะป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้าง คอนกรีตได้ แต่ความจริงแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าเหมาะกับการใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญเกลือซัลเฟตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จะเห็นได้จากในปูนจะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดสาร Etringite ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และลดการสูญเสียความสามารถยึดประสานของคอนกรีตเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสาร C-S-H ให้เป็นสาร M-S-H ที่ไม่มีความสามารถยึดประสาน แต่เราสามารถใช้อุณหภูมิสูงปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าใน โครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียในชุมชน หรือใน โครงสร้างบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งมีเกลือซัลเฟต แต่ไม่มีเกลือคลอไรด์ละลายอยู่ หรืออาจใช้งานคอนกรีตล้วนที่ต้องเผชิญทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ก็ได้ แต่ไม่มีเหล็กเสริมอยู่ในคอนกรีต เช่น พื้นคอนกรีตล้วนที่ไม่มีเหล็กเสริมแต่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้นมา ใน

ส่วนนี้จึงเกิดเป็นคำถามว่าควรจะใช้คอนกรีตแบบใดกับโครงสร้างคอนกรีต เสริมเหล็กที่ต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีทั้งเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟต คำตอบของคำถามนี้มีได้หลายแนวทางทั้งปรับปรุงที่รายละเอียดของแบบก่อสร้าง หรือปรับปรุงที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ก็ได้ หรืออาจใช้หลายๆ แนวทางประกอบกันก็ได้ เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานยาวนานตามที่ต้องการ แนวทางเหล่านี้ ได้แก่ การเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering depth) ของคอนกรีตในแบบก่อสร้างให้มากขึ้น เพื่อให้ระยะทางที่เกลือคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปถึงผิวเหล็กมีค่ามากขึ้นซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้มากขึ้น หรือการลดอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (Water to binder ratio) ในคอนกรีตให้ต่ำลงมากๆ เพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งจะทำให้ทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุประสานที่ต้านทาน ทั้งการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากเกลือซัลเฟตและการเกิดสนิมของเหล็ก เสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ด้วย ซึ่งวัสดุประสานดังกล่าวคงไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าต้านทานเฉพาะเกลือซัลเฟต แต่เราอาจใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง (Ordinary Portland cement) ผสมกับเถ้าถ่านหิน (Fly ash) โดยใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ได้คอนกรีตมีความพรุนต่ำเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าถ่านหินไปเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต และเพิ่มความสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ให้เคลื่อนที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เถ้าถ่านหินในประเทศไทยก็มีหลายชั้นคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) วิศวกรจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมด้วย สรุปได้ว่าการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเลจึงต้องพิจารณาป้องกันทั้งปัญหาการทำลายคอนกรีตโดยเกลือซัลเฟตและปัญหาการเกิด สนิมของเหล็กเสริม โดยเกลือคลอไรด์ควบคู่กันไปพร้อมกัน

2.3 เกลือคลอไรด์ในคอนกรีต [5,6]

คลอไรด์ เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ด้วยความเข้มข้นต่างๆกัน คลอไรด์นั้นแปรผันตามปริมาณเกลือแร่ที่เพิ่มขึ้น น้ำธรรมชาติตามภูเขาหรือในพื้นที่สูงจะมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ในปริมาณสูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมจากน้ำที่ต่างๆ มีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือปริมาณมาก

น้ำในธรรมชาติได้รับคลอไรด์เพิ่มขึ้นได้หลายทาง เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำ ทำให้สามารถละลายคลอไรด์จากชั้นดินต่างๆ ละอองจากมหาสมุทรถูกพัดเข้ามาสู่แผ่นดินในสภาพของหยดน้ำเล็กๆ ซึ่งมีเกลืออยู่ บ้างจายเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณคลอไรด์บนพื้นดินสูงขึ้น

น้ำจากทะเลและมหาสมุทรไหลขึ้นตามลำน้ำที่ไหลทอดตัวลงสู่มหาสมุทรได้โดยเฉพาะในแม่น้ำที่มีความลึกมากๆ น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลทวนน้ำในแม่น้ำขึ้นมาภายใต้ น้ำจืดที่ไหลลงทะเลจึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด

น้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับทะเลและมหาสมุทร จะมีแรงดันของน้ำเท่ากับน้ำทะเลแต่ถ้ามีการดูดเอาน้ำใต้ดินมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปแล้ว จะเกิดความแตกต่างของ Hydrostatic head ทำให้น้ำทะเลมีความดันมากกว่าก็จะไหลขึ้นสู่น้ำจืด

2.3.1 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต [5]

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นกับปัจจัย ต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทไอออน (Cation) และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณ คลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของ คลอไรด์ 2 ประเภท ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

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

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

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

2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก [6,7]

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุด ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตอาจได้รับมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำทะเล ดินอากาศ หรือมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งโดยน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของคลอไรด์ไอออนจากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต หรือการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการดูดน้ำ (Absorption) หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การ

กัลดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณไอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

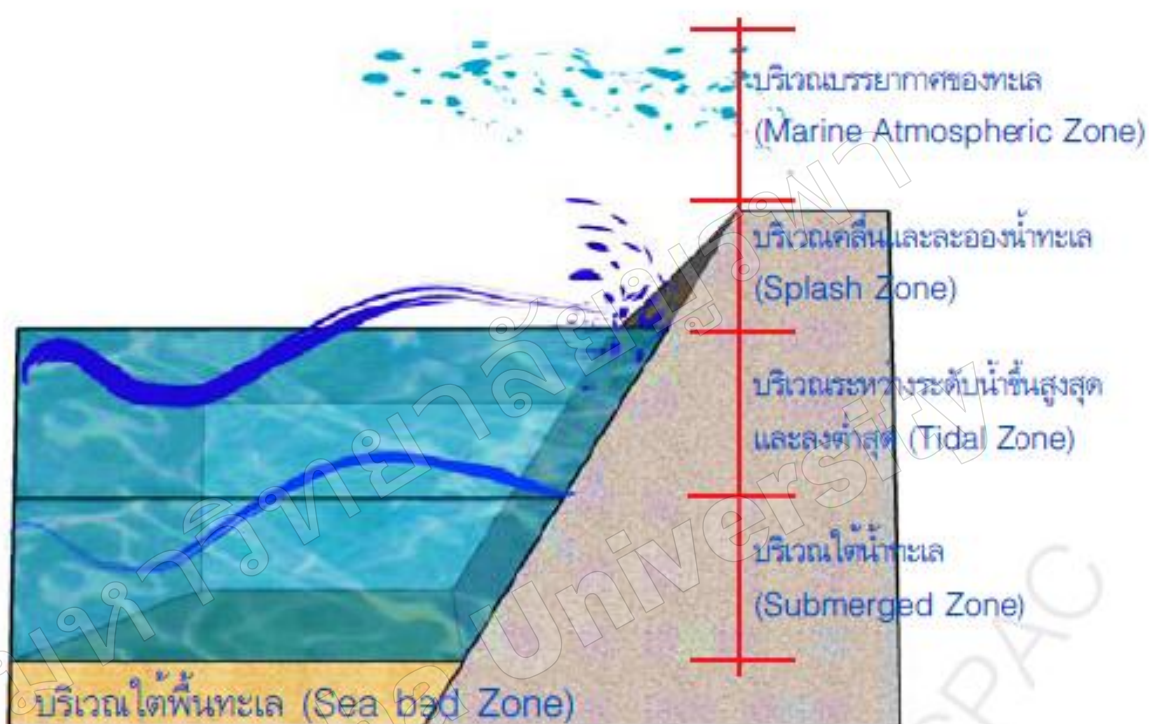
คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloroaluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ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

2.5 กลไกการทำลายของสภาวะแวดล้อมทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก [8,9,10]

ลักษณะความเสียหายที่อาจเกิดกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพ โดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัลดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี[8]

โดยความรุนแรงของการกัลดกร่อนต่อคอนกรีตในแต่ละบริเวณอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการซัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัลดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจาก

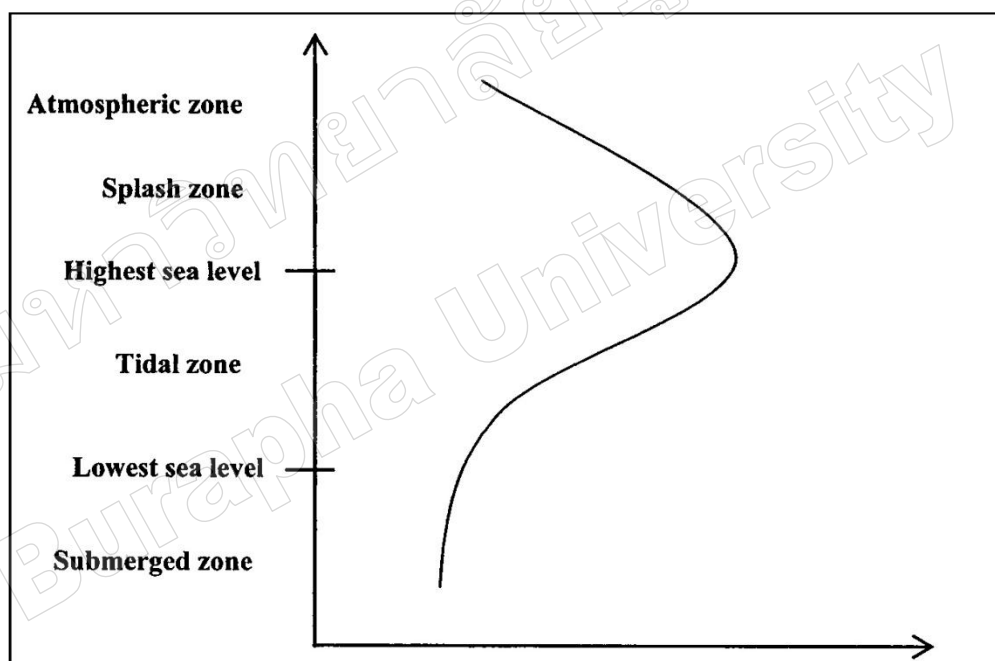
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่ง ได้ 5 บริเวณ (แสดงดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล [10]

2.5.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทางและความแรงของกระแสลมที่พัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.5.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ (แสดงดังรูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 บริเวณความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [7]

2.5.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ

การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขุดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

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

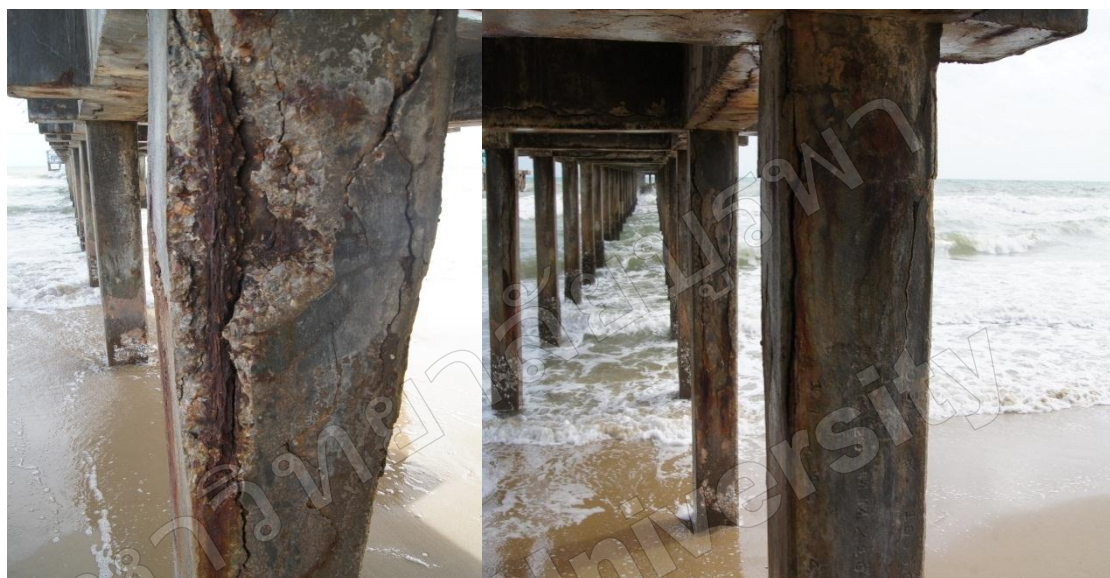
2.5.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 [11] การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ [12]

2.6 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ [8,11,13]

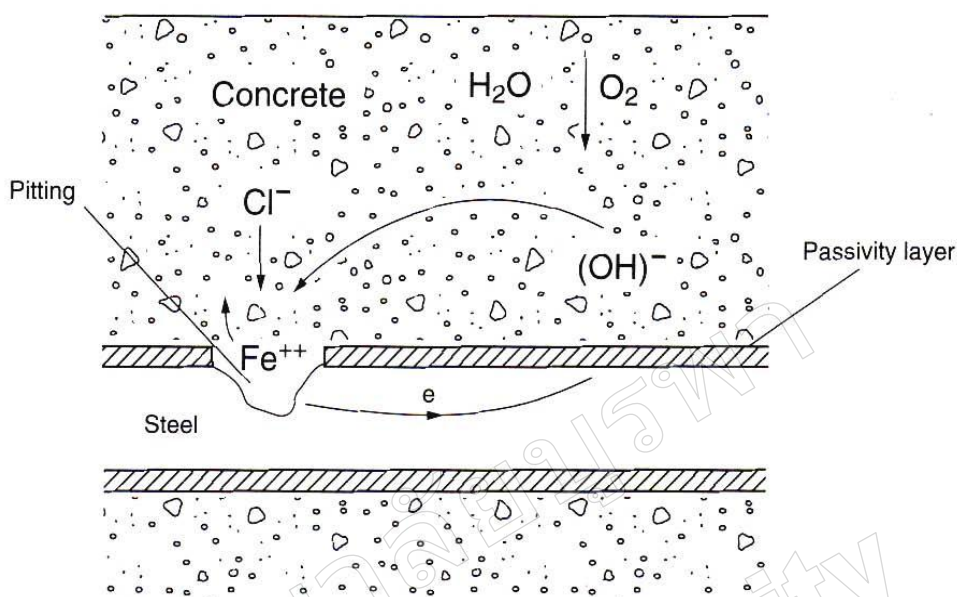
โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์ไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำที่มีคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น [8] เพราะเป็นสารเร่งการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อให้รับแรงดึงเพราะจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อยมาก และการที่คอนกรีตมีเหล็กเสริมนี้เองจึงส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความชัดเจนและรุนแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนจากสารเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์สามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ซึ่งดัน

คอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว ตลอดจนทำให้ความสามารถในการรับแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและคอนกรีตต่ำลงและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยลักษณะการทำลายของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์โดยเหล็กเป็นสนิมดันคอนกรีตให้แตกร้าวหรือหลุดร่อนออกมา

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยา ไฮดรอกไซด์จะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต [11]

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

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ(2.1) ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-)

จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็น ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) ดังสมการ (2.4) และเมื่อ Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ดังสมการ (2.2) และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ (2.3)

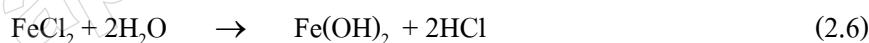
Anodic Reaction:



Cathodic Reaction:

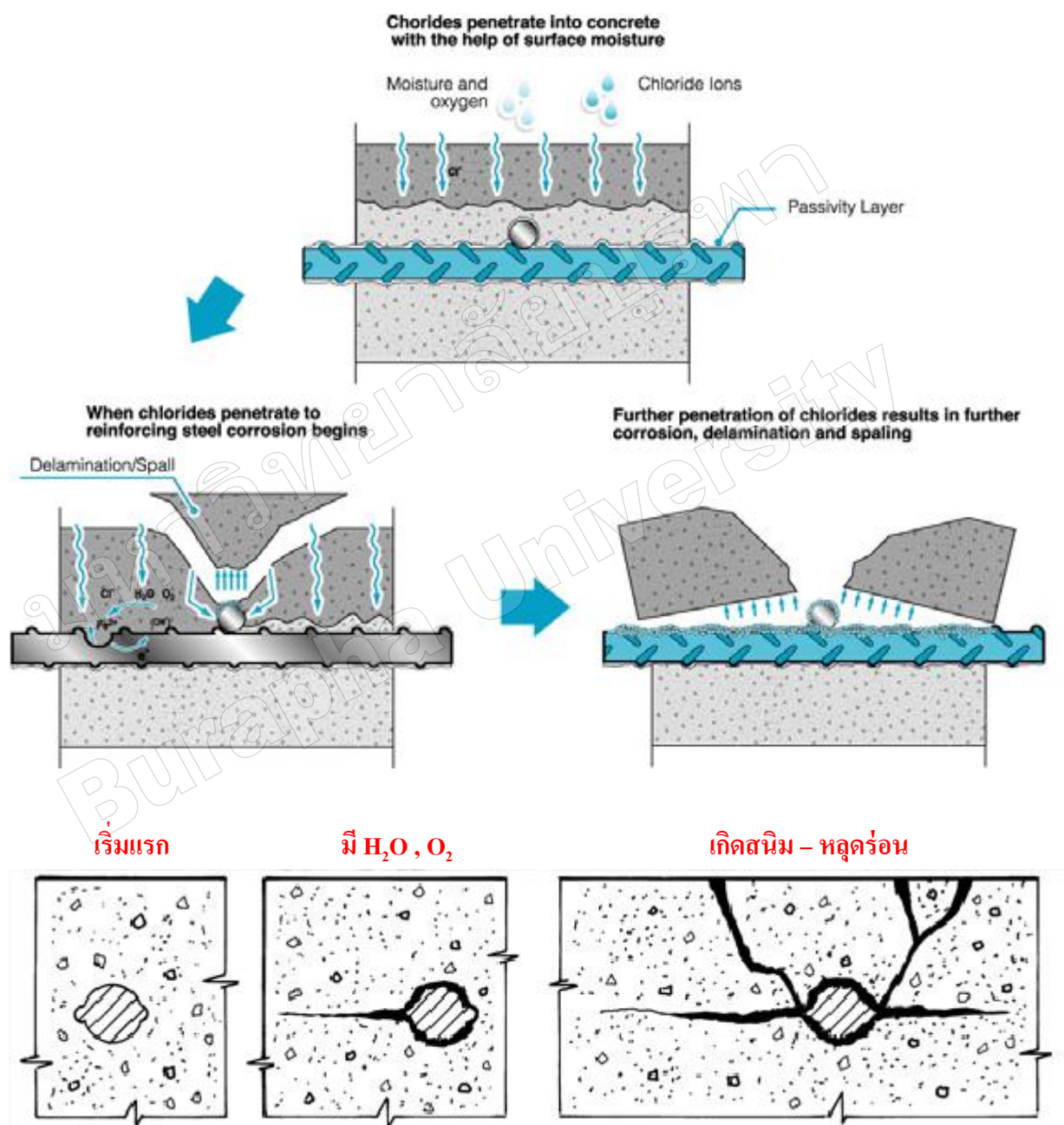


Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ (2.5) และ (2.6)



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาตรมากกว่า เนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่า และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (แสดงดังรูปที่ 2.6) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting Crack) จนในที่สุดก็จะหลุดร่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัด

กร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลกระทบต่อการใช้งานรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.6 แสดงการแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก [7]

2.7 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต [8]

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4), แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้น ความรุนแรงจากการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น สารซัลเฟตที่อยู่ในสถานะของแข็งไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และการทำลายของซัลเฟตไม่เกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงอย่างมากในกรณีที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายซัลเฟตค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ขึ้นซึ่งมีการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

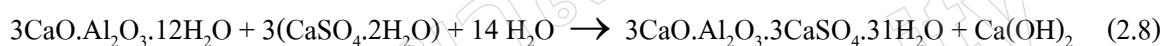
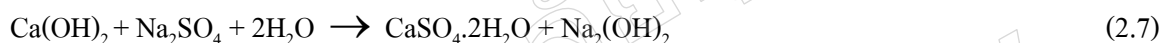
เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลเฟต โดยทั่วไปคอนกรีตมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำเสนอเฉพาะกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น โดยนำเสนอเฉพาะสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการทำลายคอนกรีต และพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ในสภาพแวดล้อมทะเล ในบริเวณดินเค็ม เป็นต้น ในที่นี้กล่าวถึงกระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบมากในสภาพแวดล้อมทั่วไปและมีผลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างรุนแรง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วการทำลายเนื่องจากซัลเฟตต่อคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้คอนกรีตขยายตัว แตกร้าวและสูญเสียกำลังรับแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการทำลายของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต [14]

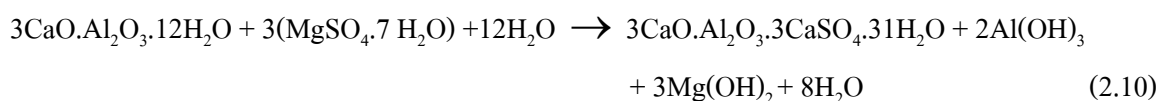
2.7.1 กระบวนการกักกร่อนของโซเดียมซัลเฟตต่อคอนกรีต

กระบวนการกักกร่อนของสารประกอบของโซเดียมซัลเฟตต่อคอนกรีตเริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือยิปซัม ตามสมการที่ (2.7) โดยยิปซัมสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.8) และบางส่วนอาจทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตไอออนหายไป หรืออาจทำปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือ Ettringite

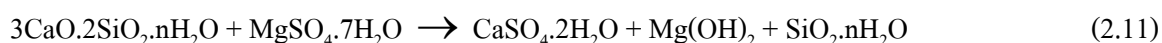


2.7.2 กระบวนการกักกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีต

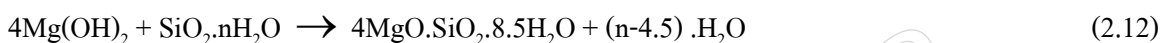
ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ตามสมการที่ (2.9) จากนั้นยิปซัมจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.8) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ (2.10) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.11)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.10) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.11) ยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ (2.12)



ยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้น มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาณมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง จากสมการทางเคมีข้างต้นพบว่า การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลงทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย ทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ดี

โดยสรุปแล้วกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตทำให้ได้สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตดังนี้

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ มีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดจากสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ด้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ C_3A และ C_4AF ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนัก

แคลเซียมซัลเฟต หรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารดั้งเดิมถึง 2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟสกับมวลรวม อันเนื่องจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อลด C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาว มีความแข็งแรงต่ำและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย

2.8 วัสดุปอซโซลาน [15]

ASTM C 618 ให้นิยามว่า วัสดุปอซโซลานหมายถึงวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีลักษณะเป็นฝุ่นและไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อมีมวลละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นเพียงพอภายใต้อุณหภูมิปกติ จะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้คือคล้ายปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ซึ่งปัจจุบันได้มีการแบ่งวัสดุปอซโซลานเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

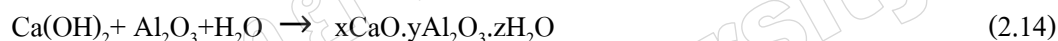
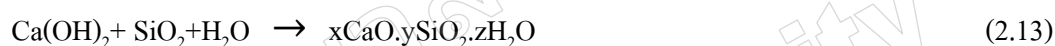
เมื่อวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้แล้ว และยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่นความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่นกำลังอัด และสิ่งที่สำคัญคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทานเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ รวมทั้งต้องการต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามในการใช้วัสดุปอซโซลานนั้น ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะด้วย จึงได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง

2.9 ปฏิกิริยาปอซโซลาน [15]

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H)

2.9.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปี ครึ่งก็ตาม



2.9.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน

ความสามารถของเถ้าถ่านหินในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่มีสถานะซึ่งไม่เป็นผลึก (glassy phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 โดยเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าถ่านหิน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน

2.10 เถ้าถ่านหิน

2.10.1 การเผาถ่านหิน [16]

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่

- 1) แอนทราไซต์ (anthracite)
- 2) บิทูมินัส (bituminous)
- 3) ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
- 4) ลิกไนต์ (lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ [16] สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากนี้ถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

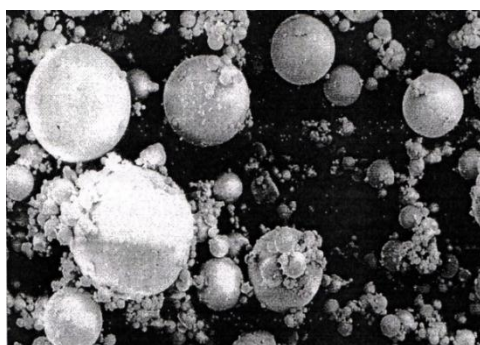
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบ ได้แก่

1) การเผาความร้อนสูง

เป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย และรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าถ่านและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ (Vitreous Particle)

2) การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าถ่าน เถ้าลอยที่ได้จากการเผาประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบนี้จะมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

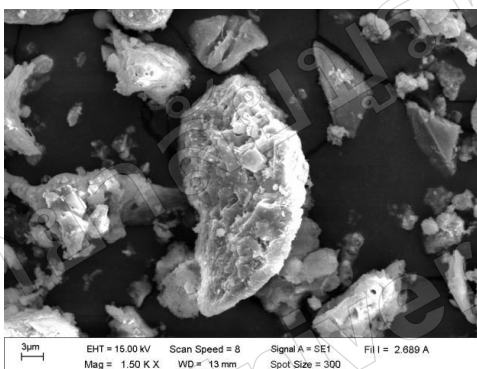


รูปที่ 2.8 แสดงรูปขยายอนุภาคของถ่านหินจากแม่เถ้าที่ได้จากการเผาแบบ

Pulverized Coal

3) การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาด่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เผาด่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) ผิวขรุขระ และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเผาด่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเผาลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ



รูปที่ 2.9 แสดงรูปขยายอนุภาคของเผาด่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed

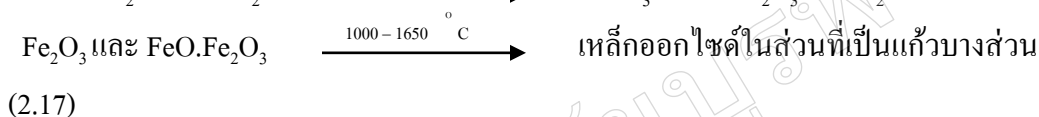
เผาด่านหินหากมีความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในปริมาณสูงจะทำให้คุณภาพของเผาด่านหินลดลง มาตรฐาน ASTM C 311 กำหนดให้ทดสอบปริมาณความชื้นโดยการเผาจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ตามมาตรฐาน ASTM C 114 โดยการเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้ทดสอบปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิ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

2.10.2 การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผา

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เคาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรด์

(Chlorite) มาเคไชต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

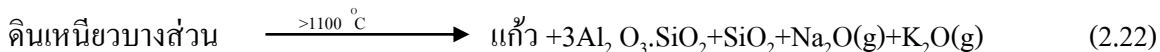
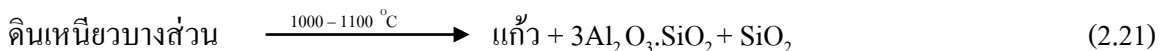
1) ไพไรต์และมาเคไชต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไทต์ ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของถ่านหิน ดังสมการที่ 2.15–2.17



2) แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ดังสมการที่ 2.18–2.19



3) ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) และควอตซ์ (SiO_2) ในรูปของผลึกของคริสโตบาลิต (Cristobalite) ดังสมการที่ 2.20–2.22



4) ควอตซ์ (SiO_2) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว ดังสมการที่ 2.23



จะเห็นได้ว่าเถาถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาแบบนี้ถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้เถาถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO₄ สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้เถาถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นเถาถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไทต์ แมกเนไทต์ มุลไลต์ และควอตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย เถาถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในเถาถ่านหิน ทำให้เถาถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเถาถ่านหินกลวง (Cenosphere)

2.10.3 ชนิดของเถาถ่านหิน [16]

เถาถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถาถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) ชนิด F (Class F) เป็นเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถาถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถาถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกา-ออกไซด์ (SiO₂) มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถาถ่านหินที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) สูง

2) ชนิด C (Class C) เป็นเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 เถาถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถาถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่

ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้เถ้านหินชนิด C นอกจากนี้มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

เถ้านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 [17,18]

นอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่เหมือนกันของเถ้านหินชั้น F และชั้น C คือ กำหนดให้มีปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI, Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนักสำหรับชั้น C ส่วนชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาผ่านน้ำด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด ส่วนกำลังอัดคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต้องให้กำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมด)

2.10.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้านหิน

เมื่อเถ้านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ เถ้านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆที่ผิวเนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้านหินขนาดเล็กจะผ่านจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ [16]

เถ้านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของเถ้านหินถูกกักไว้ภายในเถ้านหิน และยังมีเถ้านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้านหินกลวงคือ แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากเถ้านหินกลวงเป็นเถ้านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมี

คุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเม็ดถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง (Acoustic)

เม็ดถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเม็ดถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระ เช่นกัน

2.10.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเม็ดถ่านหินโดยทั่วไปมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน ความละเอียดของเม็ดถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะมีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่กรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเม็ดถ่านหินจะไม่แน่นอน เม็ดถ่านหินที่ละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เม็ดถ่านหินที่หยาบกว่า

การวัดความละเอียดของเม็ดถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเม็ดถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เม็ดถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8 – 30 [16]

สามารถหาความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเม็ดถ่านหินได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มาตรฐาน ASTM C188 เม็ดถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เม็ดถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเม็ดถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเม็ดถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเม็ดถ่านหินละเอียด

2.10.6 องค์ประกอบทางเคมี [19]

องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินคือ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของเถ้าถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 จึงแบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิด F และ ชนิด C โดยเถ้าถ่านหิน ชนิด F มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เถ้าถ่านหิน ชนิด C มีผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหินชนิด F โดยทั่วไปเถ้าถ่านหิน ชนิด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างต่ำ คือ น้อยกว่า ร้อยละ 5 ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Low-Calcium Fly Ash ส่วนถ่านหินสับบิทูมินัส (sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหิน ชนิด C เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเถ้าถ่านหิน ชนิด C จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 10 ถือเป็นเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ซึ่งอาจจะมีคุณสมบัติของซีเมนต์ร่วมกับคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเอง

โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1) และหากเถ้าถ่านหินมีปริมาณแคลเซียมสูงจะมีปริมาณคาร์บอนสูงเช่นกันซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้สามารถใช้เถ้าถ่านหิน ชนิด F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีการใช้งานหรือผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นรูพรุน (cellular) มีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถดูดน้ำได้มาก และทำให้ความต้องการน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ยังดูดซับสารเคมีผสม ทำให้ต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มมากขึ้น

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้นเตาอีกประมาณร้อยละ 20 และประมาณว่ามีเถ้าถ่านหินลิกไนต์ที่ได้จากการเผาถ่านหินเฉพาะที่แม่เมาะถึงปีละ 3 ล้านตันในปี พ.ศ.2536 [20] นอกจากนี้ยังมีเถ้าถ่านหินจากแหล่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงอีกปีละประมาณ 2.8 แสนตันต่อปี และมีการนำเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งไปใช้ในงานคอนกรีตประมาณปีละ 1.5 ล้านตันในปี พ.ศ. 2546 [21]

เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยามคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 cm^2 /ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-

Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเก้าถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.² /ก. โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 35,000 ซม.² /ก. [16]

2.11 การใช้เก้าถ่านหินในงานคอนกรีต

การใช้เก้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เก้าถ่านหินก็มีข้อเสียด้วย คือทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศ มากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกันกับคอนกรีตที่ไม่มีเก้าถ่านหินผสมอยู่ Yu และคณะ. 2005: 1814-1820 ได้ใช้เก้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 0.36 0.32 และ 0.28 และมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุดที่ 5, 13 และ 25 มิลลิเมตรในการทดสอบหาปริมาณการสึกกร่อนโดยวิธี water-borne sand พบว่า อัตราการขจัดสีเพิ่มขึ้น ร้อยละ 76 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.28-0.50

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนชั่นซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เช่นกัน

1) การทำลายโดยสารซัลเฟต การใช้เก้าถ่านหินจากแม่เมาะนอกจากจะมีคุณสมบัติของปอชโซลานแล้วยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี ACI 232.2R กล่าวว่า เก้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเก้าถ่านหิน Class F ซึ่งต้านทานได้ดีมากกว่าการใช้เก้าถ่านหิน Class C การต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดหรือซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่ปฏิกิริยาปอชโซลานได้เปลี่ยนรูปของ Ca(OH)_2 ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากจะเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตแล้วยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูงกว่า Ca(OH)_2 อย่างมาก [19]

สารซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ทำให้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) หรือเอททริงไทต์ (Ettringite) และซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้ การใช้เถ้าถ่านหินทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตลดลง [22] การลดการทำลายของซัลเฟตยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ลดปริมาณน้ำ เข้าไปแทรกทำให้เพสต์แน่นขึ้นทำให้สารซัลเฟตซึมเข้าสู่เนื้อภายในได้ยากขึ้น

2) การทำลายโดยกรด คอนกรีตและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ไม่ดีนัก เพราะมีความเป็นด่างสูงและถูกทำลายกรดได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ และส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือของกรดนั้นๆ ได้ น้ำหนักและกำลังรับแรงของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะลดลงจากการทำลายของกรดซัลฟูริก การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 10 ได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน [23] แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหรือไม่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกค่อนข้างสูง

การใช้เถ้าถ่านหินหยาบในส่วนผสมมอร์ตาร์สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินละเอียดในสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกร้อยละ 5 เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหยาบทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เพราะการใช้เถ้าถ่านหินหยาบมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าถ่านหินละเอียดและปูนซีเมนต์ และจากการที่เถ้าถ่านหินหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดี

3) การซึมผ่านของคลอไรด์ การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นด่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ γ - Fe_2O_3 เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้รอบนอกของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ คลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตและเมื่อมีปริมาณสูงกว่าระดับวิกฤต (Chloride Threshold Value) จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น

4) การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน การเพิ่มเถ้านหินจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันมากขึ้น และการบ่มคอนกรีต 7 และ 28 วัน สามารถลดการเกิดคาร์บอนเนชันได้ เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการบ่มเพียงวันเดียว การเลือกส่วนผสมที่มีเนื้อแน่น (Dense) จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชันอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนเนชันเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างประเภทนี้จึงไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดคาร์บอนเนชัน อย่างไรก็ตามการใช้เถ้านหินแม้ว่าจะลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชันลดลง ดังนั้นการใช้เถ้านหินจึงมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในคอนกรีต

เถ้านที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตต้องมีลักษณะดังนี้

- 1) มีออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 50
- 2) มีสถานะไม่เป็นผลึก สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน
- 3) มีออกไซด์ของซัลเฟอร์ ออกไซด์ของอัลคาไล ปูนขาวอิสระ และ LOI ต่ำ
- 4) มีความละเอียดสูง มีรูปร่างกลมตัน มีความพรุนต่ำ

โดยสรุปแล้ว เถ้านหินนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่าเถ้านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้านหินจะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้นทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

งานวิจัยในประเทศไทยและต่างประเทศหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติในการลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม ทำให้เถ้าถ่านหินมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล

2.12 ผลดีของการใช้เถ้าถ่านหิน

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ทั้งในด้านปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและด้านการประหยัด ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้น ลดอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต เพิ่มความทนทานของคอนกรีต และที่สำคัญเพิ่มกำลังอัดประลัยในระยะยาวของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น อย่างไรก็ตามการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตต้องคำนึงถึงคุณภาพของเถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ด้วย เพราะเถ้าถ่านหินแต่ละแหล่งอาจมีคุณภาพที่แตกต่างกันออกไปตามกระบวนการผลิต ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตควรมีการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าถ่านหินก่อนนำมาใช้ทุกครั้ง

การนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ยังสามารถช่วยประหยัดการใช้พลังงานโดยรวมของประเทศ เนื่องจากการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้ลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงด้วย การผลิตปูนซีเมนต์ต้องเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1,400 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ในการเผาอาจเป็นน้ำมันเตาหรือถ่านหินก็ได้ ประมาณว่าการเผาเม็ดปูน 1 ตันต้องใช้ถ่านหินประมาณ 220 กิโลกรัม หรือใช้น้ำมัน 125 ลิตร และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศโลกประมาณ 1 ตัน [19] ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเรือนกระจกต่อสภาวะแวดล้อมโลก ดังนั้นการลดการผลิตปูนซีเมนต์ลงจึงทำให้ลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ แต่ยังคงมีปริมาณวัสดุประสานที่จะนำไปใช้เท่าเดิม (นั่นคือบางส่วนของปูนซีเมนต์จะมีเถ้าถ่านหินปนอยู่) โดยผลที่ได้จากการลดการผลิตปูนซีเมนต์คือ ทำสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้ทุกๆตันที่ผลิตปูนซีเมนต์ จากการคำนวณอย่างคร่าวๆ(พ.ศ.2546) พบว่าถ่านหินมีราคาประมาณ 480 ถึง 500 ต่อตัน (ขึ้นอยู่กับ BTU, British Thermal Unit หรือ คุณภาพของเถ้าถ่านหิน) การเผาเม็ดปูนเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน ต้องใช้ถ่านหินประมาณ 220 กิโลกรัม หรือ 0.22 ตัน คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการเผาเม็ดปูนประมาณ 106 บาท หากใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะและแหล่งอื่นๆ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก็สามารถประหยัดเงินที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไป 106 บาทต่อตัน จากปริมาณทั้งหมดของเถ้าถ่านหินประมาณ 3.3 ล้านตันในแต่ละปี ในปี พ.ศ. 2546 มีการใช้เถ้าถ่านหินทั้งสิ้นประมาณ 1.5 ล้านตัน โดย

เป็นเถาถ่านหินจากแม่เมาะ 1.4 ล้านตัน และ จากแหล่งอื่นๆ อีกประมาณ 0.1 ล้านตัน ทำให้ประหยัดเงินไปเท่ากับ $106 \times 1.5 = 159$ ล้านบาทต่อปี [19]

2.13 คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถาถ่านหิน [19]

1) ความต้องการน้ำ

เถาถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้งานขึ้นและต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถาถ่านหินนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำแล้ว ในหลายกรณีพบว่ายังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถาถ่านหินแม่เมาะร้อยละ 0,20 และ 40 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0,45 มีค่าเท่ากับร้อยละ 125, 135 และ 145 ตามลำดับ ในทางกลับกันหากเถาถ่านหินที่ใช้มีรูปร่างไม่แน่นอน มีรูพรุนสูง จะต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น และทำให้กำลังอัดต่ำลง

2) ระยะเวลาการก่อตัว

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถาถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ด้วยเถาถ่านหินทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถาถ่านหินที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถาถ่านหินที่หยาบทำให้การก่อตัวช้าลง เถาถ่านหินที่มี SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมาก โดยปกติทั่วไปการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมเถาถ่านหินมีระยะเวลานานกว่าเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับความละเอียดลักษณะรูปร่างของเถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหิน รวมถึงอุณหภูมิในการก่อตัวและปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของเพสต์ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของเถาถ่านหินแต่ละแหล่งผลิตมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา วิธีการเผา และอุณหภูมิในการเผา

3) การแยกตัวและการยึมน้ำ

การผสมเถาถ่านหินทำให้ปริมาณของสารซีเมนต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเถาถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทำให้เกิดการยึมน้ำของเพสต์และมอร์ตาร์ลดลง การยึมน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพสต์และมอร์ตาร์เนื่องจากมีปริมาณเพสต์ต่ำกว่า โดยทั่วไปคอนกรีตผสมเถาถ่านหินจะมีการยึมน้ำลดลงเช่นกัน เถาถ่านหินสามารถลดปริมาณน้ำในคอนกรีตและมีการกระจายตัวที่ดีจึงสามารถเข้าไปช่วยอุดช่องว่างและช่วยลดการยึมน้ำ เมื่อผสมเถาถ่านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันโดยไม่ลดน้ำ คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นเนื่องจากมีน้ำอิสระ มากกว่าคอนกรีตธรรมดาทำให้การยึมน้ำเพิ่มขึ้นได้

คอนกรีตที่มีปริมาณของปูนซีเมนต์ต่ำหรือมีมวลรวมส่วนละเอียดต่ำจะมีการเข้มน้ำมาก การผสมเข้ากันที่หนาแน่นที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณอนุภาคส่วนละเอียดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นและการเข้มน้ำลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดีเป็นผลให้ออกาสในการเกิดการแยกตัว (segregation) ของคอนกรีตลดน้อยลง

4) โพร่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้เม็ดถ่านหิน

การใช้เม็ดถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ขนาดและโครงสร้างของโพร่ง (pore) เปลี่ยนไป ปฏิกริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้เม็ดถ่านหินทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพร่งเพสต์มีมากขึ้น แต่ทั้งนี้ การกระจายตัวของโพร่งจะดีขึ้นเพราะเม็ดถ่านหินมีลักษณะอนุภาคกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในซีเมนต์เพสต์ และทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพร่งเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดถ่านหิน เมื่ออายุมากขึ้นการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของเพสต์ยังคงมีต่อไป ผลผลิตจากปฏิกริยาไฮเดรชันและปอซโซลานเข้าไปแทรกตามโพร่งทำให้ปริมาตรโพร่งลดลง สำหรับส่วนผสมที่มีเม็ดถ่านหินพอเหมาะประมาณร้อยละ 20 การลดลงของโพร่งจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าส่วนผสมที่มีเม็ดถ่านหินมาก ปริมาตรโพร่งของเพสต์ผสมเม็ดถ่านหินลดลงต่ำกว่าของเพสต์ธรรมดาได้

5) ความร้อนจากปฏิกริยาไฮเดรชัน

ปฏิกริยาไฮเดรชัน คือ ปฏิกริยาระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำทำให้คอนกรีตเกิดการก่อตัวและเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติในด้านการรับกำลัง ในขณะที่เดียวกันการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในคอนกรีต โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการทำปฏิกริยาของ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่คลายความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกริยากับน้ำ อัตราการเกิดปฏิกริยาและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความละเอียด และปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม รวมถึงอุณหภูมิขณะเท และปริมาณคอนกรีตที่ใช้เทในแต่ละครั้ง ความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยาส่งผลต่อการรับกำลังต่อคอนกรีตอย่างมากโดยเฉพาะคอนกรีตที่ต้องการเทในปริมาณมากทำให้อุณหภูมิภายในคอนกรีตสูงในขณะที่อุณหภูมิภายนอกต่ำกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวทำให้คอนกรีตเกิดรอยร้าว ส่งผลให้การรับกำลังลดลงหรือเสียหาย

การใช้เม็ดถ่านหินในส่วนผสมของคอนกรีตโดยทั่วไปสามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเม็ดถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงอัตราการเกิดปฏิกริยาช้าลง ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง แต่อย่างไรก็ตามเม็ดถ่านหินบางประเภทอาจไม่

สามารถลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินในแต่ละแหล่งผลิตที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกักร้อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

Saadoun และคณะ (1993) [24] ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตแล้วแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1,000 วัน ปรากฏว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้านหินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการกักร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ถึง 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ และระยะเวลาการกักร้อนเริ่มต้นของคอนกรีตที่มีปริมาณ 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) [25] ได้ทำการฝังแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มตัวอย่างแตกต่างกัน หลังจากบ่มจึงนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เมื่อครบอายุการแช่จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 1 และ 2 ปี พบว่าอัตราการแพร่กระจายและการกักร้อนของเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลนานขึ้นผลไม่แตกต่างกันมาก อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากการกักร้อนในคอนกรีตผสมเถ้านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการกักร้อนของเหล็กเสริมได้

Tarun และคณะ (1994) [26] ได้ทำการศึกษาค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน Class C ในปริมาณมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบ พบว่าระยะต้นกำลังอัดมีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ให้ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดที่อายุ 90 วัน เนื่องจากเถ้านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงเข้าไปอุดแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีตจึงลดลง

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ (1999) [27] ได้ศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ ชนิดแคลเซียมออกไซด์ต่ำ และชนิดแคลเซียมออกไซด์สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30 และ 50 แซะในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราต่ำ ๆ สามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ดีกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราสูง ๆ มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทุกระดับความเข้มข้น

Bai และคณะ (2003) [28] ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) [29] ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ สิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนขึ้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น โทมัส (Thomas) รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โชษศรี (2005) [30] ได้ทำการหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ถึง 80 จากนั้นทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การแทนที่เถ้าถ่านหิน

และถ้าแคลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้นเช่นกัน ด้านกำลังอัดพบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแคลบในอัตราส่วนอย่างละ ร้อยละ 20 (เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 ผสมเถ้าแคลบร้อยละ 20) ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินและเถ้าแคลบ

มณเฑียร ทิฆมาณิช และคณะ (2005) [31] ได้ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 3 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน มีกำลังอัดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมมีปัญหาการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลานาน

กิตติศักดิ์ คงนเกษมพร และคณะ (2005) [32] ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตา ดินขาวเผา และเถ้าแคลบ-เปลือกไม้ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 0.47 ทุกส่วนผสม จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแคลบ-เปลือกไม้ มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 และ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าแคลบ เถ้าก้นเตา และดินขาวเผา กำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทุกอายุของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทาน การแทรกซึมของคลอไรด์ คอนกรีตทุกส่วนผสมจะต้านทานได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้าแคลบ-เปลือกไม้ จะต้านทานได้ดีที่สุด

วิเชียร ชาลี และคณะ (2007) [33] ได้หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะไม้แยกขนาด และแยกขนาดละเอียด ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่เผาที่อุณหภูมิสูง และมีคุณภาพดี ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และทำการฝังเหล็กเส้นกลมที่ระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลบแห้งเป็นเวลา 4 ปี พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้า

ถ่านหินแยกขนาดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2006) [34] ได้ทำการผสมคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย แม่เมาะขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 จากนั้นจึงแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 และทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 และ 6 เดือน คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่หยาบ และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

รัชชัย สาสกุล (2007) [35] ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 หลังจากนั้นจึงนำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลที่สถานะเปียกสลับแห้ง พบว่าเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ (2007) [36] ได้หล่อคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส.ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 นำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลสถานะเปียกสลับแห้ง พบว่าผลการทดสอบให้ผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ รัชชัย สาสกุล (2007) [35] และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ($W/B = 0.45$) จะมีกำลังอัด ความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ($W/B = 0.65$)

ประจักษ์ เข็มบุบผา (2005) [37] ได้ศึกษาถึงยากุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน โดยนำมวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบจากห้องทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัด 200,400 และ $600 \pm 10\%$ กก./ชม.²ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ของแต่ละกำลังอัดมาผสมกัน พบว่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ส่วนอัตราจากการดูดซึมน้ำและความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

ปกป้อง รัตนชู (2008) [38] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดและการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าขานอ้อย พบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่า

คอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 4 – 10 และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2011) [39] ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ทำการหล่อคอนกรีตควบคุมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. นำคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ที่ จ.ชลบุรี และเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และวัดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่อายุ 3 ปี ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว คอนกรีตที่เพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ (2011) [40] ศึกษาถึงพฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะ โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0 10 และ 20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.38 และ 0.45 จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม (W/B) เท่ากับ 0.38 จะมีอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.45 ในส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลงและอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าของเถ้าแกลบ ในส่วนของค่าไดอิเล็กตริก ควรเลือกค่าในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและเมื่อบ่มได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วควรปรับพลังงานให้มีค่าลดลงเพราะค่าไดอิเล็กตริกจะลดลงตามเวลา ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความชื้นในวัสดุทดสอบลดลงจนแห้ง ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดตอนปลายลดลงได้ สำหรับค่า

ความจุความร้อนจำเพาะพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงใดๆ ของร้อยละการแทนที่เท่ากันทั้งถ้ำลอยและถ้ำเคลือบที่มีความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. จะมีค่าการคายความร้อนที่น้อยกว่าของถ้ำลอยและถ้ำเคลือบที่มีความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ทั้งนี้เนื่องจากที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำมากกว่าที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. ทำให้น้ำที่ไม่ได้ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Free water) ลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิและพลังงานในการคายความร้อนลดลงตามไปด้วย

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ [41] ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดถ้ำถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยนำถ้ำถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คือถ้ำถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด มีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 ไมโครเมตร และถ้ำถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด มีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 6.4 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โดยใช้วิธี X-Ray Diffraction (XRD) และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสต์มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นตามอายุ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากขึ้น แต่เพสต์ผสมถ้ำถ่านหิน พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ปริมาณการแทนที่และความละเอียดของถ้ำถ่านหินมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยถ้ำถ่านหินในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง และการแทนที่ถ้ำถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ยังทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมถ้ำถ่านหินที่หยาบกว่า และผลของภาพถ่ายพื้นผิวของตัวอย่างด้วย SEM พบว่าเพสต์ที่ผสมถ้ำถ่านหินที่อายุ 7 วัน มีช่องว่างมากและเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น

วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2011) [42] ได้ศึกษาผลของถ้ำเคลือบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้ถ้ำเคลือบเปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 ลบ.มม. และบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล และเก็บตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะทดสอบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรดทำละลาย) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำ

ทำละลาย) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ผลการวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณสูงในคอนกรีต (แทนที่ร้อยละ 50) กลับส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงขึ้น

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2533
2. ใ้ถ้า่านหิน โดยใช้ใ้ถ้า่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
3. มวลรวมหยาบ ใ้ห็นขนาดใ้ใหญ่สุด 3/4 นิ้ว
4. ทราษแม่ใ้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4
5. ใ้ประปา เพื่อใ้ใช้ในการผสมคอนกรีต
6. สารเคมีใ้ใ้ใช้ในการทดสอบ มีโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4), ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$), กรดไนตริก (HNO_3), โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) และ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ใ้ใ้ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต (แสดงใ้รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

2. ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20 (แสดงในรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 20

3. เครื่องเจาะคอนกรีต (แสดงในรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่องเจาะคอนกรีต

4. เครื่องตัดคอนกรีต (แสดงในรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่องตัดคอนกรีต

5. เครื่องชั่งน้ำหนัก (แสดงในรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง

6. เครื่องต้ม (แสดงในรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องต้มสาร

7. เครื่องแก้วที่ใช้ในการไทเทรต ได้แก่ บีกเกอร์ (Beaker) ขนาดต่างๆ, ขวดชมพู, ปิเปตต์ (Pipette), กระจกตวง, แท่งแก้วที่ตัดสาร และหลอดหยด (แสดงในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องแก้วที่ใช้ในการไทเทรต

8. ครกหิน (แสดงในรูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ครกหิน

9. บิวเรตต์ (แสดงในรูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 บิวเรตต์

10. กรวยกรอง (แสดงในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 กรวยกรอง

11. เครื่องดูดสูญญากาศ (แสดงในรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 เครื่องดูดสูญญากาศ

12. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ หิน ทราบ
13. ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
15. ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
16. กระดาษกรอง

3.3 วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่าง เมื่อ 15 ปีที่แล้ว

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

เมื่อ 15 ปีที่แล้วได้ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเออร์ (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยปริมาตรของวัสดุที่ทำให้การทดสอบหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหิน ทำให้ปูนซีเมนต์หรือเถ้าถ่านหินแข็งตัวมีปริมาตรเปลี่ยนไป

ทดสอบความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักวัสดุก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้ น้ำ เมื่อนำไปบอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเก้าถ่านหิน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และเก้าถ่านหิน วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

เมื่อ 15 ปีที่แล้วได้ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

เมื่อ 15 ปีที่แล้วได้ออกแบบปฏิภาคส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ด้วยเก้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษา 15 ส่วนผสม ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ทำการหล่อคอนกรีตขนาด 200x200x250 มม³. โดยการบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อให้เต็ม และ ตกแต่งผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.12



(ก.) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสดให้เต็มแบบหล่อ (ข.) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ
รูปที่ 3.12 แสดงการหล่อคอนกรีตขนาด $200 \times 200 \times 250 \text{ mm}^3$. เมื่อ 15 ปีที่แล้ว

หลังจากทำการถอดแบบคอนกรีตแล้วเสร็จ จะนำคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในน้ำประปาจนอายุคอนกรีตรอบ 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง พร้อมทั้งทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเลครบ 15 ปี เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยรูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 3.13 สถานที่แช่ตัวอย่าง โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา (เตรียมเมื่อ 15 ปีที่แล้ว)

ส่วนผสม	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					W/B
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	มวล รวม ละเอียด	มวล รวม หยาบ	น้ำ	
I45	0	478	-	639	1,024	215	0.45
I45O15	15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45O25	25	359	119	639	990	215	0.45
I45O35	35	311	167	639	977	215	0.45
I45O50	50	239	239	639	957	215	0.45
I55	0	478	-	639	971	262	0.55
I55O15	15	406	72	639	948	262	0.55
I55O25	25	359	119	639	933	262	0.55
I55O35	35	311	167	639	918	262	0.55
I55O50	50	239	239	639	897	262	0.55
I65	0	478	-	639	922	311	0.65
I65O15	15	406	72	639	898	311	0.65
I65O25	25	359	119	639	881	311	0.65
I65O35	35	311	167	639	864	311	0.65
I65O50	50	239	239	639	840	311	0.65

ความหมายและสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

“F” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

“O” หมายถึง เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการแยกขนาด

“45,55,65” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

“15,25,35,50” หมายถึง ร้อยละของเถ้าถ่านหินที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก วัสดุ ประสาน

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“I45” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.45

“I55O25” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าถ่าน หินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

3.4 วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 15 ปี

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์

1. เมื่อตัวอย่างอายุแช่น้ำทะเลครบ 15 ปี นำตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x250 มม³. มา ทำการเจาะด้วยหัวเจาะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. ยาว 200 มม. (แสดงในรูปแบบที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 การเจาะตัวอย่างคอนกรีต

2. นำตัวอย่างทรงกระบอก มาตัดเป็น 10 ชั้น ที่ความลึก 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ซม. จากผิวคอนกรีต (แสดงในรูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 การตัดตัวอย่างทรงกระบอก

3. จากนั้นนำตัวอย่างจากการตัดแต่ละความลึกมาทำการบดโดยครกหินแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 20 แล้วนำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป (แสดงในรูปที่ 3.16)



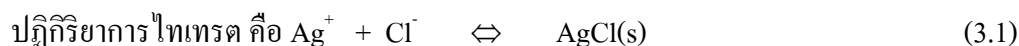
รูปที่ 3.16 การบดและร่อนตัวอย่าง

3.4.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

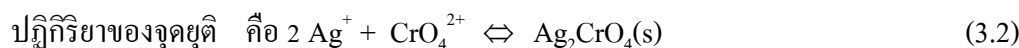
ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method)

วิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ

นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ก่อน ดังสมการที่ 3.1 เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 ดังสมการที่ 3.2 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ตะกอนขาว



ตะกอนแดง

3.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

สารละลาย AgNO_3 0.05 M

เนื่องจาก AgNO_3 เป็นสารที่ไม่เสถียร ดังนั้นต้องทำการเตรียมสารละลาย โดยใช้ปิเกตอร์

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

V คือ ปริมาณสารละลายที่ต้องการเตรียม (ml) , Mw ของ $\text{AgNO}_3 = 169.87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$

จากสมการจะคำนวณได้ค่า g ซึ่งก็คือ ค่าประมาณของ AgNO_3 ที่ต้องใช้ เป็นกรัม

วิธีการเตรียม ใช้ปิเกตอร์ เติมน้ำกลั่น ตามค่า V ที่ใช้ จากนั้นเติม AgNO_3 ปริมาณตามที่คำนวณได้ หรือใกล้เคียง คนจนละลายแล้วเก็บใส่ขวดสีชา

สารละลาย NaCl 0.05 M (500ml)

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

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

ซึ่ง NaCl 1.463 กรัม (บันทึกทศนิยม 3 ตำแหน่ง)

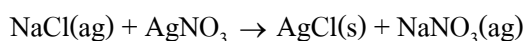
คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย NaCl

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

เอาไปไทเทรตกับ AgNO_3 เพื่อหาความเข้มข้นของ AgNO_3 ที่แท้จริง

3.4.2.2 การเทียบมาตรฐานสารละลาย AgNO_3

การคำนวณหา AgNO_3 ที่แน่นอน จากสมการ



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

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

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

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

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

จะได้ความเข้มข้นที่แท้จริงของ AgNO_3 ; $M_{\text{AgNO}_3} = ? \frac{\text{mol}}{\text{l}}$

3.4.2.3 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดด้วยกรด (Acid soluble)

การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยกรดตามมาตรฐาน ASTM C 1152 หาได้โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม, กรดไนตริก (1:1) 25 มล. และน้ำกลั่น 75 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้มประมาณ 3 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจาง 5 เท่า (เนื่องจากคลอไรด์มีความเข้มข้นสูง) แล้วดูตัวอย่างที่เจือจางแล้วใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10 มล, เติม K_2CrO_4 5% 1 มล. และ NaHCO_3 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้มีการตกตะกอน จากนั้นนำมาหยดด้วยซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จนเกิดเป็นสีส้ม บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง

1. ชั่งผงตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ประมาณ 10 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่ใช้ละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. (แสดงในรูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 แสดงการชั่งผงตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ในบีกเกอร์ ประมาณ 10 กรัม

2. เติมน้ำกลั่น 75 มล. ลงในบีกเกอร์ (แสดงรูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 แสดงการเติมน้ำกลั่น

3. เติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มล. ในบีกเกอร์ แล้วปิดด้วยกระดาษฟิวส์ (แสดงในรูปที่ 3.19)



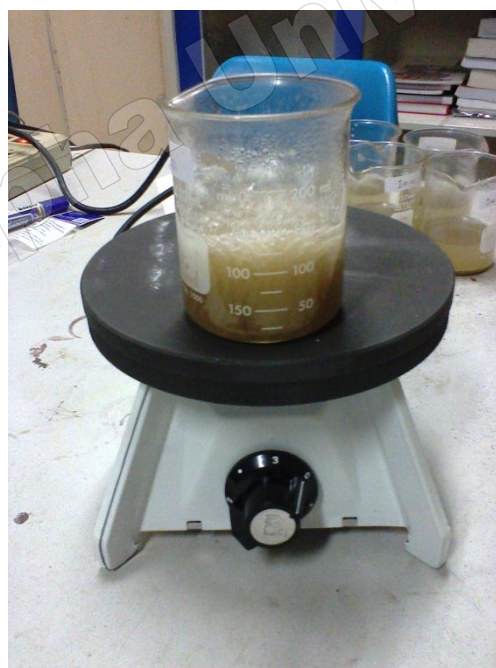
รูปที่ 3.19 แสดงการเติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มล.

4. คนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที (แสดงในรูปที่ 3.20)



รูปที่ 3.20 แสดงการคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที

5. นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว (แสดงในรูปที่ 3.21)



รูปที่ 3.21 การต้มสารละลายตัวอย่าง

6. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองคดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น (แสดงในรูปที่ 3.22)



รูปที่ 3.22 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง

7. เจือจางตัวอย่าง 5 เท่า โดยการบีบอัด ตัวอย่าง 10 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่น 40 มล. (แสดงในรูปที่ 3.23)



รูปที่ 3.23 เจือจางตัวอย่าง 5 เท่า

8. ปิเปตตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 10 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ จำนวน 2 ขวด (แสดงในรูปที่ 3.24)



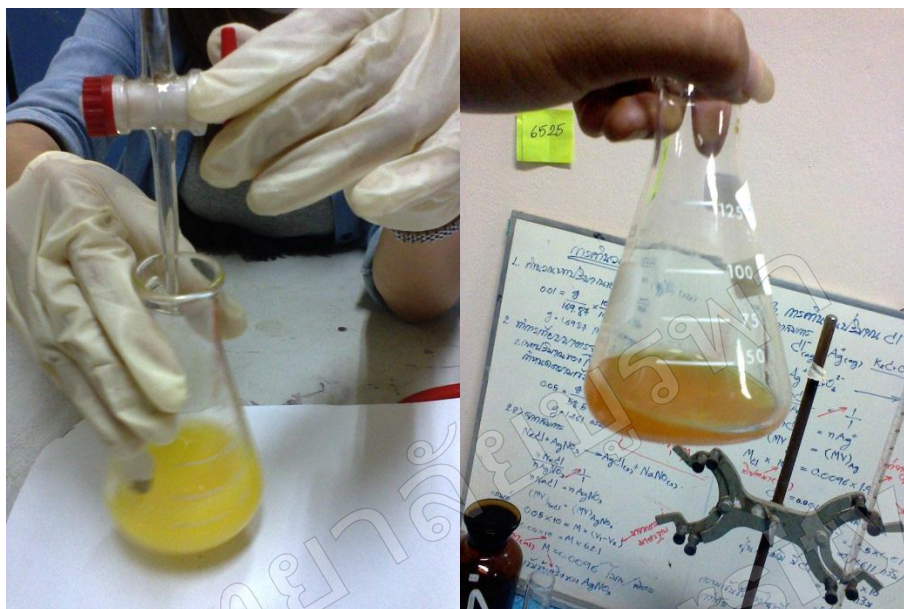
รูปที่ 3.24 ปิเปตตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 10 มล. ใส่ขวดรูปชมพู่

9. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มล. และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 2% ลงไป 10 มล. แล้วนำไปไทเทรต (แสดงในรูปที่ 3.25)



รูปที่ 3.25 เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มล. และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 2% ลงไป 10 มล.

10. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จนเป็นสีส้ม (แสดงในรูปที่ 3.26)



รูปที่ 3.26 การไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จนเป็นสีส้ม

11. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

12. เตรียมการไทเทรตแบบลงค์ โดยชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่างที่จะไทเทรต แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรตตัวอย่างแบบลงค์ บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

3.4.2.4 การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยน้ำ (Water soluble)

การไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หาได้โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม และ น้ำกลั่น 50 มล. ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟิกันนำไปต้มประมาณ 4 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ ปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำมากรองด้วยกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น แล้วดูตัวอย่างใส่ขวดชมพู 2 ขวด ขวดละ 10

มล. เติม K_2CrO_4 5% 1 มล. และ $NaHCO_3$ 2% 10 มล. ทั้ง 2 ตัวอย่าง เขย่าให้ทั่ว จากนั้นนำมาหยดด้วย ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเกิดเป็นสีส้ม บันทึกค่าจากบิวเรตต์ ทำเหมือนกันทั้ง 2 ตัวอย่าง

1. ชั่งผงตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ประมาณ 10 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่ใช้ละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. (แสดงในรูปที่ 3.17)
2. เติมน้ำกลั่น 50 มล. ลงในบีกเกอร์ (แสดงรูปที่ 3.18)
3. นำไปต้มให้เดือดประมาณ 4 นาที แล้วปล่อยให้เย็น 24 ชั่วโมง (แสดงรูปที่ 3.21)
4. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น (แสดงรูปที่ 3.22)
5. ปิเปตตัวอย่าง(ไม่ต้องเจือจาง) 10 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ จำนวน 2 ขวด (แสดงในรูปที่ 3.24)
6. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มล. (แสดงในรูปที่ 3.25)
7. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม (แสดงในรูปที่ 3.26)
8. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ
9. เตรียมการไทเทรตแบลนค์ โดยชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่างที่จะไทเทรต แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มล. แล้วนำไปไทเทรตตัวอย่างแบลนค์ บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

บทที่ 4

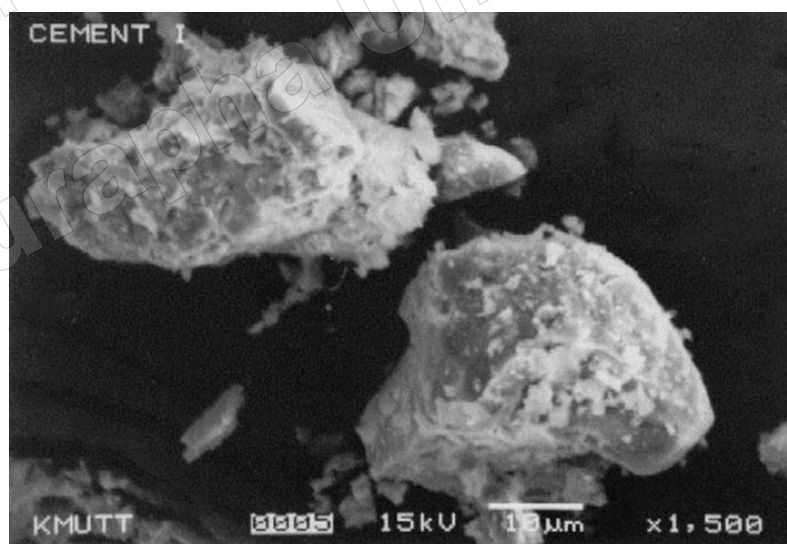
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่างในการวิจัย

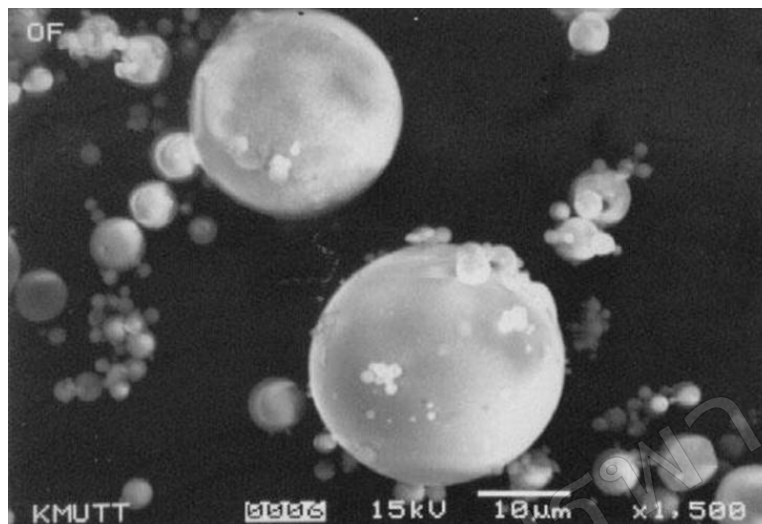
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน แม่เมาะ

4.1.1.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ จากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM พบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคมีหลายขนาดปะปนกัน (ดังรูปที่ 4.1) ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะ อนุภาคจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$ ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน (ดังรูป 4.2)



รูปที่ 4.1 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.1.1.2 ความละเอียด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ คือไม่เกินร้อยละ 34 [43] จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น และมีแนวโน้มในการเพิ่มความคงทนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินได้อีกด้วย

4.1.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 ที่กำหนดไว้ คือ ความถ่วงจำเพาะต้องไม่ต่ำกว่า 1.90 [44]

ตารางที่ 4.1 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	น้ำหนักข้างบน ตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.13	-
เถ้าถ่านหิน	2.23	32

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน แม่เมาะ

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 94.43 มาตรฐาน ASTM C 150 [45] กำหนดว่าปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งก็นำมาใช้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของเถ้าถ่านหิน ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 79.45 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.52 ซึ่งถือเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F (Class F) ตามมาตรฐาน C 618 [46]

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน แม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัสดุประสาน	
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO ₂	20.80	44.95
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	5.50	23.70
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.08	0.07
Potassium Oxide, K ₂ O	0.55	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.96	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	0.52
Tricalcium Silicate, C ₃ S	56.50	-
Dicalcium Silicate, C ₂ S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C ₃ A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF	9.62	-

4.1.3 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่งมวลรวมดังกล่าวอยู่ในช่วงของข้อกำหนดมวลรวมปกติ ตาม ASTM C33 [47] ที่ใช้ในคอนกรีตโดยทั่วไป

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

รายการ	มวลรวม	
	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.57
Apparent Specific Gravity	2.80	2.61
Absorption (%)	0.64	0.96
Fineness Modulus	6.66	2.63
Maximum Size (mm)	19	-

4.2 คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่าง

จากการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา พบว่า น้ำทะเลมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8-8.2 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อนๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล (2537) ที่รายงานว่าบริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชามีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.86-8.63 ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่า มีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับทะเลทั่วไป [48] คือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. และซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. จากการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์มากกว่าซัลเฟต ประมาณ 8 เท่า โดยปริมาณคลอไรด์ที่มีในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 90 และอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 1,500 ถึง 10,000 มก./ล. ถือว่าคอนกรีตอยู่ในสถานะที่อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตอย่างรุนแรง จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลในบริเวณด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ส่งผลให้คอนกรีตอยู่ในสถานะแวดล้อมที่รุนแรง ACI จึงแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.45 และมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 310 กก./ cm^2 ส่วนคอนกรีตที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ACI จึงเสนอให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.40 และมีกำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 350 กก./ cm^2 ที่อายุ 28 วัน

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

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของน้ำทะเล

Time	Parameters			
	Sample Condition	pH	Chloride, Cl ⁻ (mg/L)	Sulphat, SO ₄ ²⁻ (mg/L)
January 2001	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
October 2001	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
May 2002	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
September 2002	Clear, No Color	7.8	18,000	2,500
August 2003	Clear, No Color	7.9	17,000	2,200
December 2003	Clear, No Color	8.2	19,000	2,700
April 2004	Clear, No Color	8.2	16,000	2,500
Feb 2005	Clear, No Color	8.2	18,000	2,200
May 2008	Clear, No Color	8.1	17,500	2,300
September 2009	Clear, No Color	8.2	18,120	2,250
April 2010	Clear, No Color	8.1	18,910	2,610

4.3 สภาพผิวของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 15 ปี

หลังจากการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี โดยเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักรวบรวม มีจำนวนทั้งหมด 15 ก้อนตัวอย่าง พบว่า ผิวหน้าของคอนกรีตมีการสึกกร่อน

และหลุดร่อน เนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมีและแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตบางก้อนพบ หอย เพรียง และตะไคร่น้ำติดอยู่ตามผิวคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล ถึง 15 ปี ไม่พบการกัดกร่อนผิวของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การพิจารณาการทำลายที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีตจึงไม่สามารถวิเคราะห์ถึงผลของการใช้เถ้าถ่าน หินต่อการทำลายตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลได้ชัดเจน



(ก) สภาพผิวคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมจริง



(ข) สภาพผิวคอนกรีตตัวอย่าง

รูปที่ 4.3 สภาพผิวคอนกรีต ที่แช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

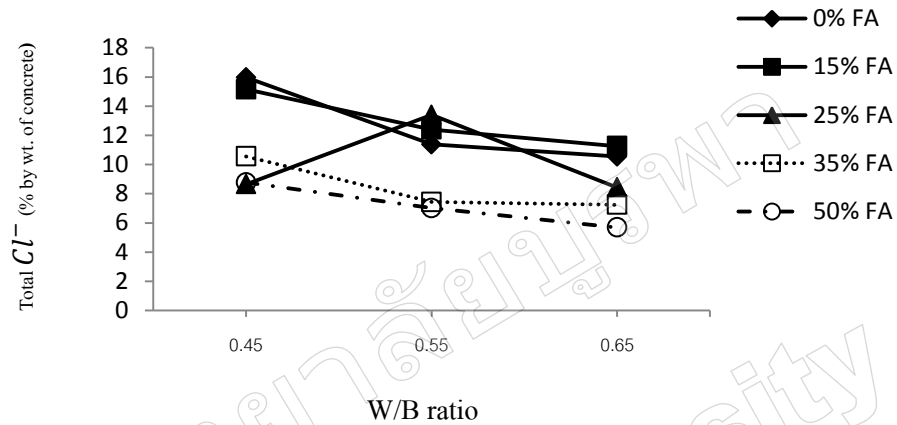
4.4.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวคอนกรีต โดยที่ระดับความลึกใกล้ผิวหน้าคอนกรีต ได้รับผลกระทบทางกายภาพและเคมีทะเลมาก ปริมาณคลอไรด์จึงมีความแปรปรวนและไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่ชัดเจนได้ ได้แก่ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. จากผิวคอนกรีต เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้น (35 มม. ขึ้นไป) พบว่า ในการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ลดลงมีแนวโน้มทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงด้วย

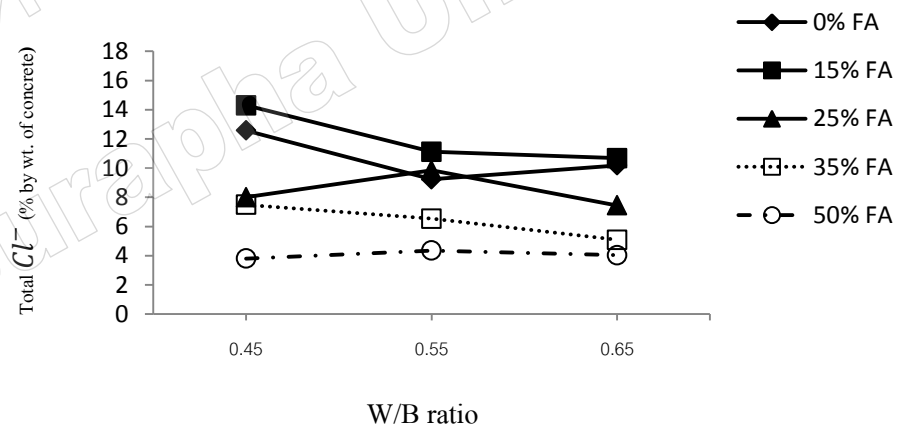
เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 45 มม. ดังรูปที่ 4.4 (จ) พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 1.37, 2.38 และ 3.98 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 85 มม. ดังรูปที่ 4.4 (ฉ) ในตัวอย่างเดียวกัน (คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.43, 0.51 และ 1.97 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาคอนกรีตแต่ละอัตราส่วนผสมและความลึกต่างๆ พบว่าแนวโน้มของปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดีขึ้น โดยมีแนวโน้มชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (สังเกตจากความชันกราฟในคอนกรีตธรรมดามีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน)

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ต่ำกว่าจะมีปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่า เป็นผลจาก การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีรูพรุนน้อยลง ความทึบน้ำสูง และยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องการหดตัวแบบแห้ง ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น น้ำหรือสารประกอบคลอไรด์ที่สามารถเข้าไปในเนื้อคอนกรีตก็จะแทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น เนื่องจากภายในคอนกรีตไม่มีช่องว่างหรือมีช่องว่างน้อยมาก และการลดปริมาณน้ำในคอนกรีตส่งผลต่อการต้านทานคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นผลจาก

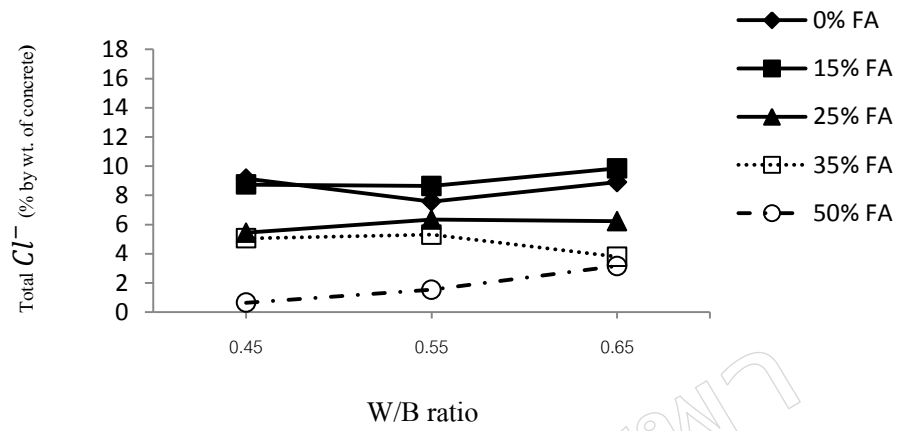
ความทึบน้ำในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับปริมาณน้ำเป็นหลัก กล่าวคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่ำลง กำลังสูงขึ้น ความพรุนในคอนกรีตลดลง และสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ความพรุนของคอนกรีตไม่ขึ้นกับกำลังอัดอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของเถ้าถ่านหินด้วย



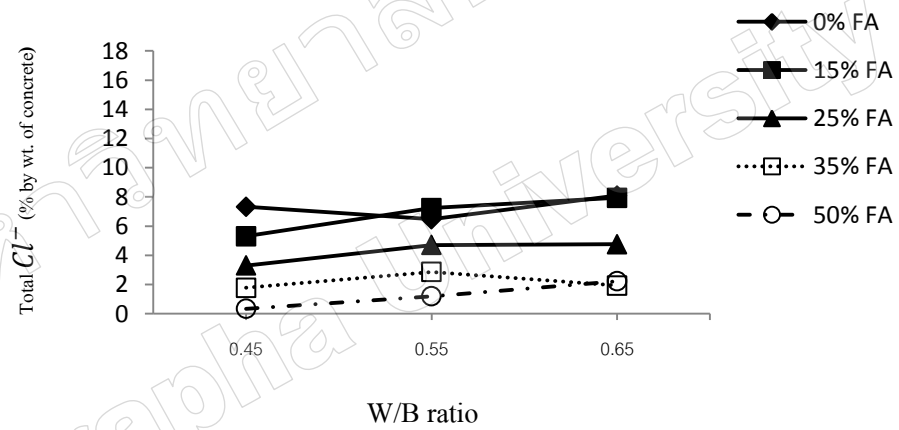
(ก) ความลึก 5 มม.



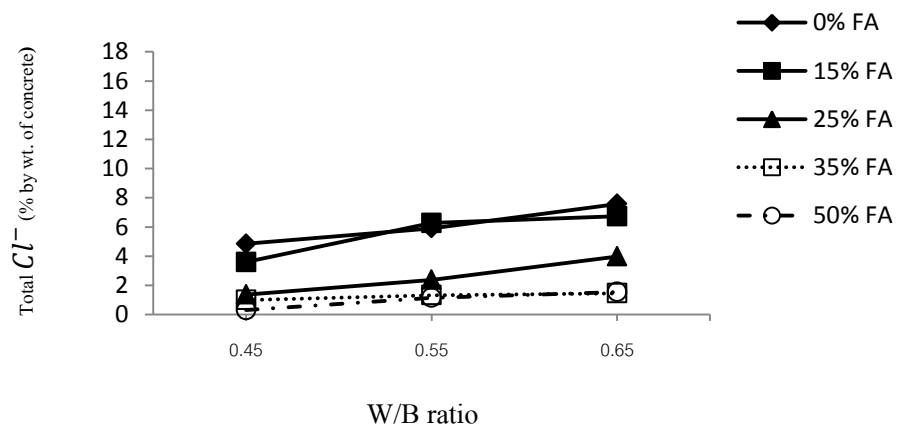
(ข) ความลึก 15 มม.



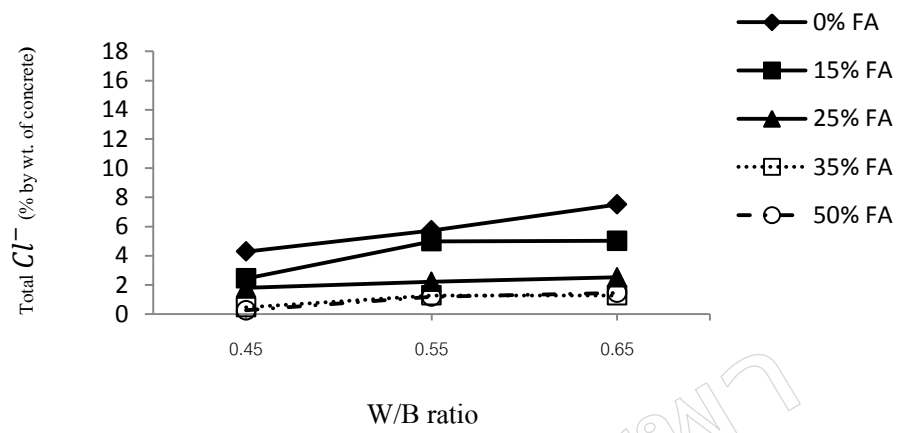
(ค) ความลึก 25 มม.



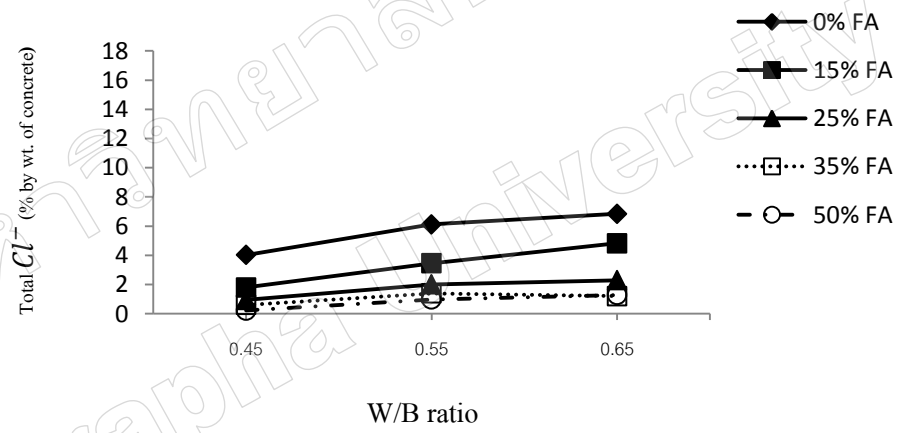
(ง) ความลึก 35 มม.



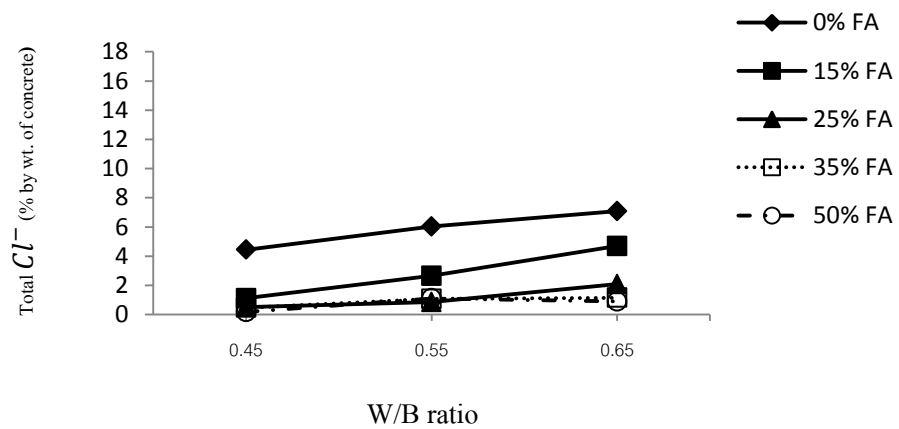
(จ) ความลึก 45 มม.



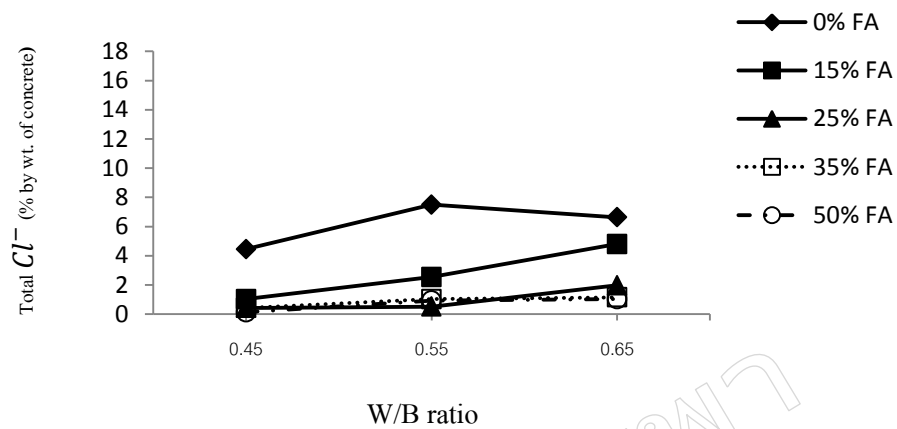
(ก) ความลึก 55 มม.



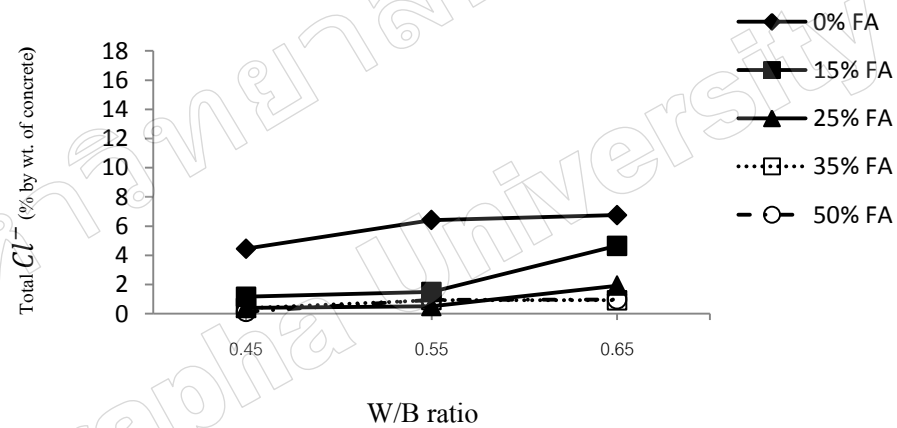
(ข) ความลึก 65 มม.



(ค) ความลึก 75 มม.



(ก) ความลึก 85 มม.



(ข) ความลึก 95 มม.

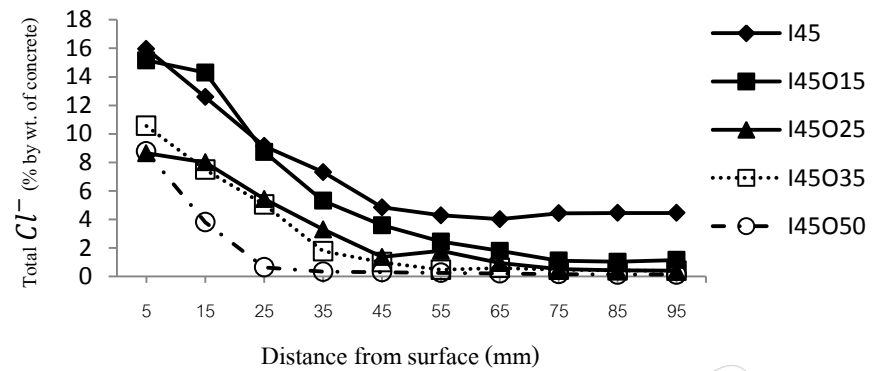
รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเล 15 ปี

4.4.2 ผลของเถ้านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด

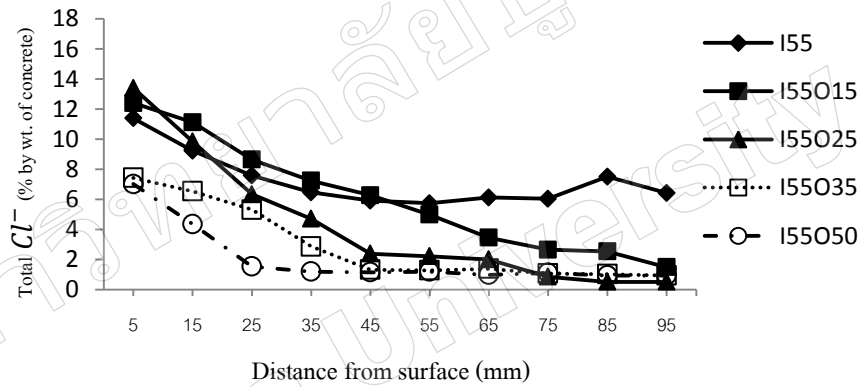
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ผสมเถ้านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า การผสมเถ้านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหิน ดังรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 55 มม.ขึ้นไป ของทุ้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่า

คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน มีอัตราการลดลงของการแทรกซึมคลอไรด์น้อยมาก ซึ่งต่างจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ยังคงมีอัตราการลดลงของการแทรกซึมคลอไรด์อย่างต่อเนื่อง เช่น จาก รูปที่ 4.5 (ก) คอนกรีต I45 ที่ระดับความลึก 45, 55, 65, 75, 85 และ 95 มม. มีปริมาณคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 4.84, 4.28, 4.02, 4.44, 4.45 และ 4.45 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และคอนกรีต I45O15 ที่ระดับความลึก 45, 55, 65, 75, 85 และ 95 มม. มีปริมาณคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 3.59, 2.44, 1.80, 1.11, 1.03 และ 1.16 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้อัตราการลดลงของปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ต่อระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นจากผิวคอนกรีตในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

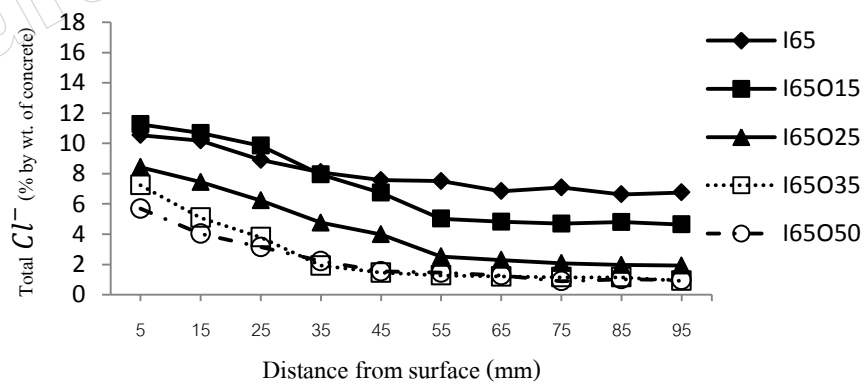
เมื่อพิจารณาในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและทุกๆความลึก พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน เช่น ที่ระดับความลึก 55 มม. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 จากรูปที่ 4.6 (ข) พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ เท่ากับ ร้อยละ 5.74, 4.99, 2.21, 1.28 และ 1.20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระดับความลึกต่างๆ มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต ให้ผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทน และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจะส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น [49] และ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ วิเชียร ชาลี และคณะ (2007) [33]



(ก) W/B = 0.45

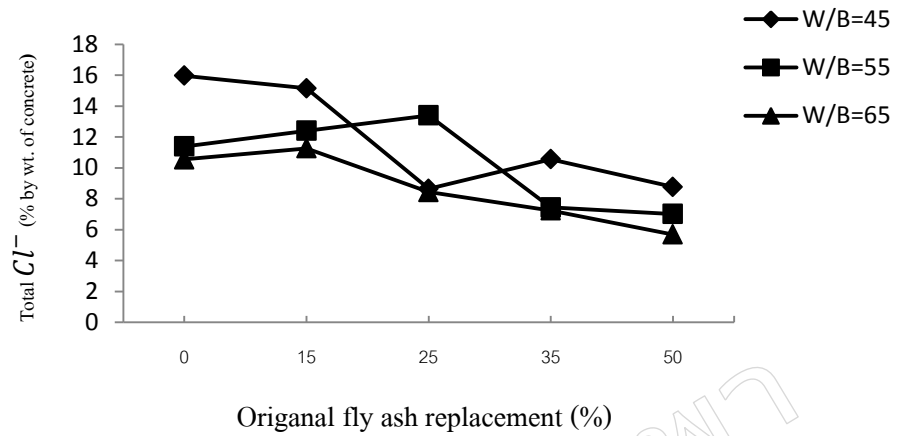


(ข) W/B = 0.55

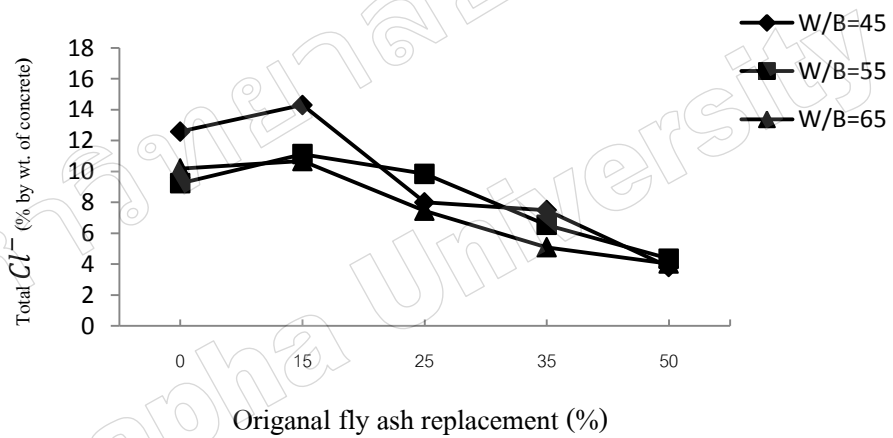


(ค) W/B = 0.65

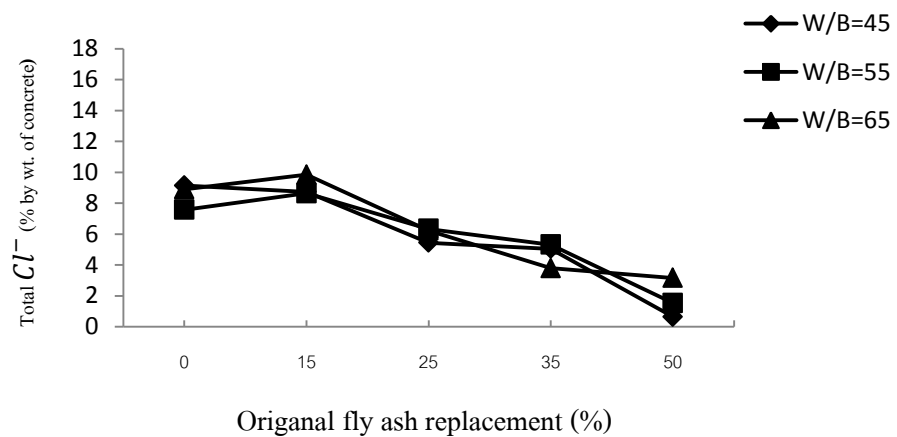
รูปที่ 4.5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลัง
 แฉ่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี



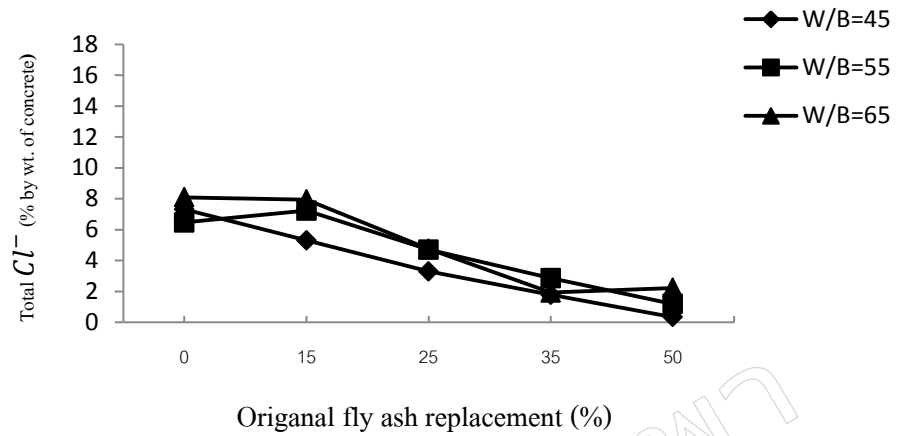
(ก) ความลึก 5 มม.



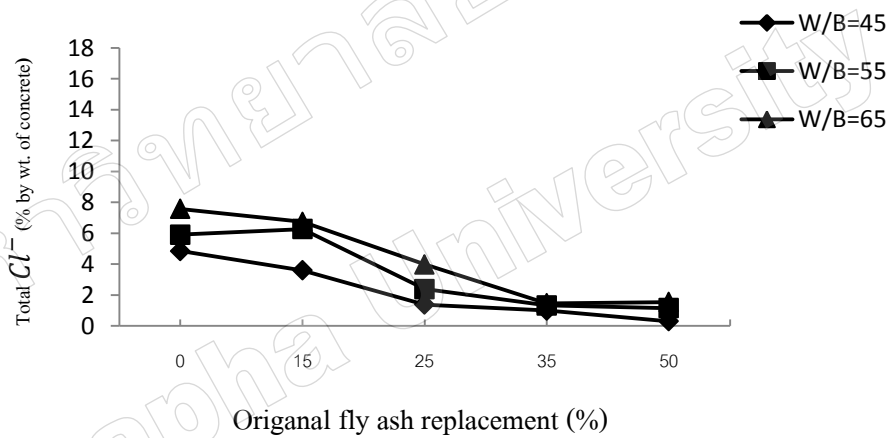
(ข) ความลึก 15 มม.



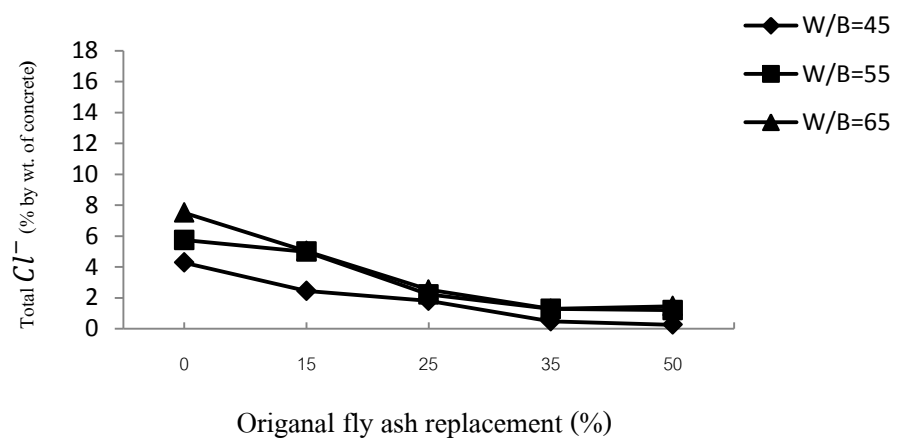
(ค) ความลึก 25 มม.



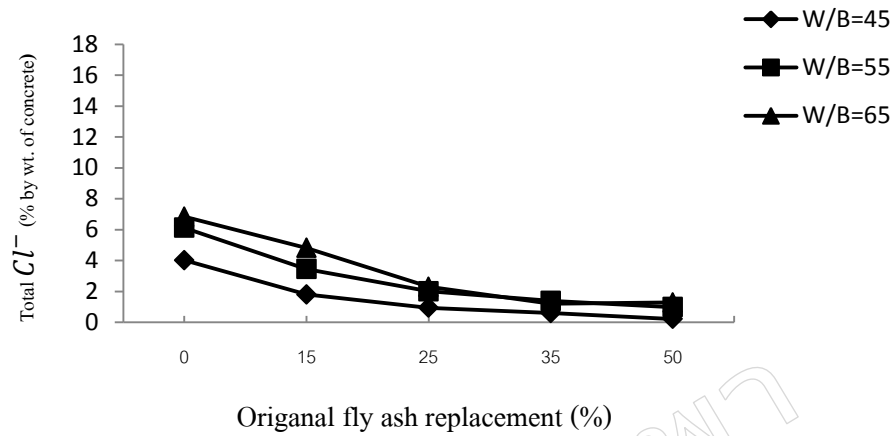
(ง) ความลึก 35 มม.



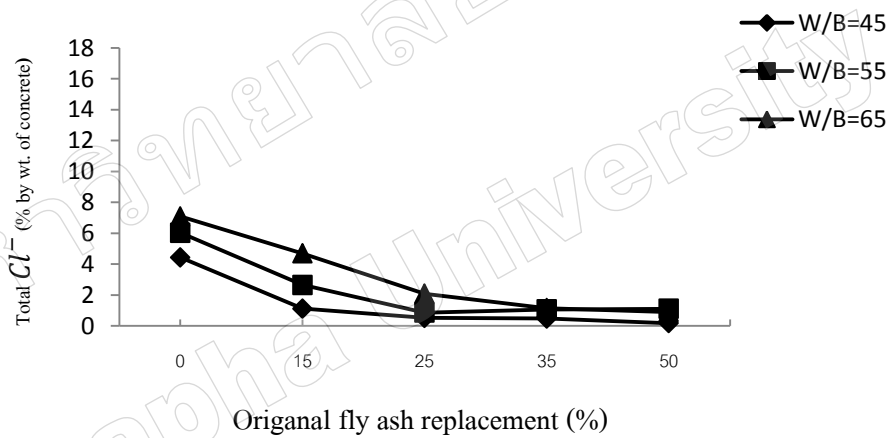
(จ) ความลึก 45 มม.



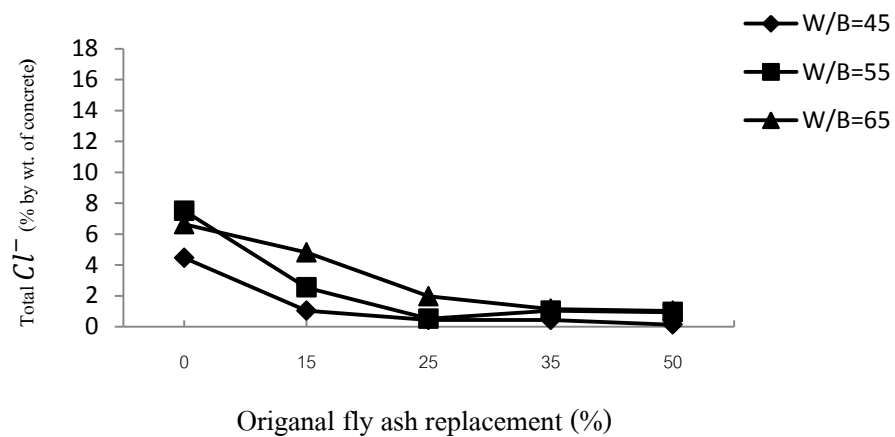
(ฉ) ความลึก 55 มม.



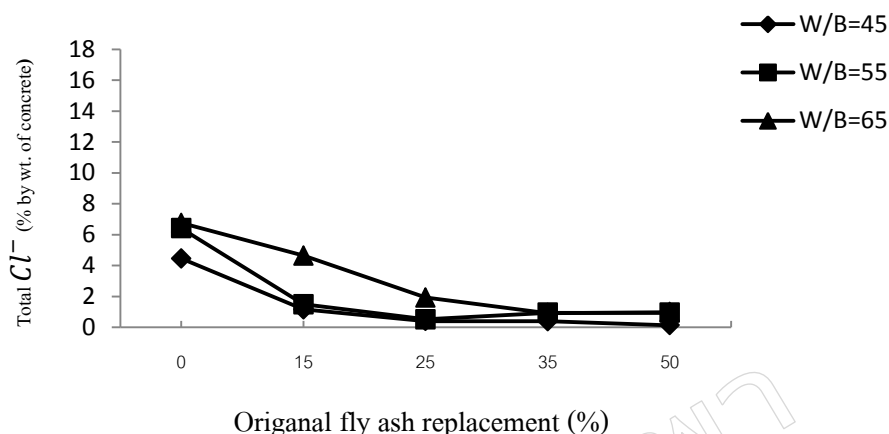
(ข) ความลึก 65 มม.



(ค) ความลึก 75 มม.



(ง) ความลึก 85 มม.



(ญ) ความลึก 95 มม.

รูปที่ 4.6 ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่ความลึกต่างๆในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

4.5 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

4.5.1 การหาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

โดยทั่วไป การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตคำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ ในการศึกษาครั้งนี้จะวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในรูปของร้อยละน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเทียบกับน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ดังตารางที่ 4.5

ตัวอย่างการคำนวณ (ตัวอย่างคอนกรีต I45)

1) หาปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ (ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ) ในแต่ละความลึก เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 ที่ระยะความลึก 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 และ 95 มีปริมาณการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 1.74, 0.36, 0.72, 0.75, 0.23, 0.28, 0.07, 0.38, 0.43 และ 0.43 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

2) หาค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บและค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บ เท่ากับร้อยละ 0.54 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับร้อยละ 7.15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3) หาค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยนำค่าเฉลี่ยของปริมาณการกักเก็บหารด้วยค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างคอนกรีต I45 มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ $(0.54/7.15) \times 100 = 7.54$ โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

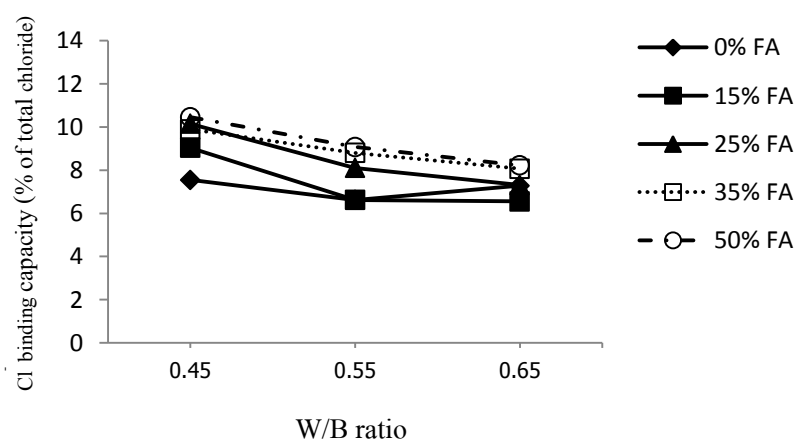
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินหลังแช่น้ำทะเล เป็นระยะเวลา 15 ปี

ส่วนผสม	ค่าเฉลี่ยการกักเก็บคลอไรด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ค่าเฉลี่ยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
I45	0.54	7.15	7.54
I45O15	0.49	5.46	9.04
I45O25	0.31	3.08	10.15
I45O35	0.28	2.82	9.89
I45O50	0.15	1.47	10.45
I55	0.48	7.24	6.62
I55O15	0.40	6.08	6.56
I55O25	0.35	4.27	8.10
I55O35	0.26	2.92	8.80
I55O50	0.18	2.04	9.08
I65	0.58	8.01	7.28
I65O15	0.48	7.04	6.88
I65O25	0.30	4.16	7.31
I65O35	0.20	2.52	8.07
I65O50	0.18	2.23	8.22

4.5.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณา การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 พบว่า มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ เท่ากับร้อยละ 10.15, 8.10 และ 7.31 โดยน้ำหนักของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในทุกอัตราการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีแนวโน้มต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง [9] ส่งผลให้ปริมาณ C_3A ที่เป็นตัวดักจับคลอไรด์ไอออนในรูปปฏิกิริยาเคมี ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงทำให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ไอออนในรูปของปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำจะมีผลของแข็งที่เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น สังเกตได้จากกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงจึงเป็นผลให้มีการดักจับคลอไรด์ทางกายภาพ โดยคลอไรด์ถูกดักจับที่ผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ได้มากขึ้นด้วย

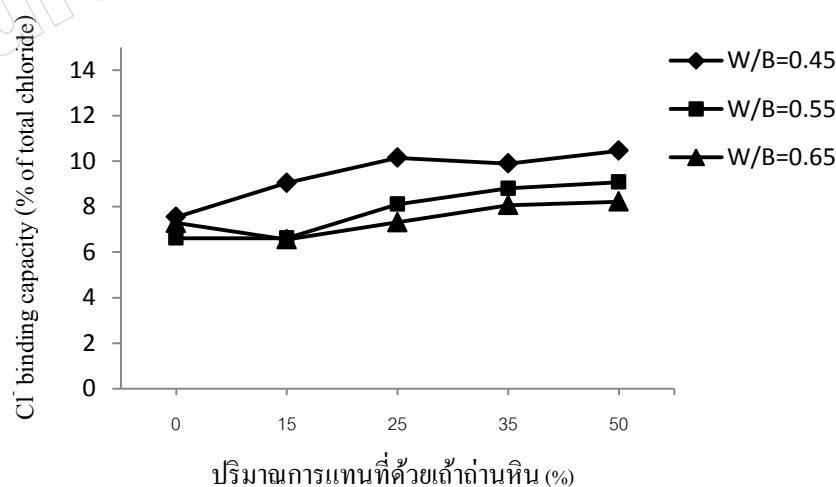


รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

4.5.3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น

จากรูปที่ 4.8 คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ร้อยละ 0.62, 0.62, 8.10, 8.80 และ 9.08 โดยน้ำหนักของคลอไรด์ทั้งหมด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจาก เถ้าถ่านหินมีปริมาณของสารประกอบอะลูมินตมาก (ร้อยละ 23.7) ซึ่งมากกว่าในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ในรูปของปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินมากขึ้น และที่ผิวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมินตไฮเดรต (C-A-H) ยังสามารถดักจับคลอไรด์ไอออนได้ ซึ่งเป็นการดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือ เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมอลูมินตไฮเดรต มากขึ้น การดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพก็มากขึ้น และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.8 ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1.1 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี มีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

5.1.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี มีแนวโน้มลดลงเมื่อการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงขึ้น

5.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี สูงขึ้น

5.1.4 การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และชัดเจนยิ่งขึ้น ควรจะศึกษาและเปรียบเทียบผลของความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่มีผลต่อการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่มีระยะเวลาการแช่ตัวอย่างในน้ำทะเลมากขึ้น เพื่อนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ได้รับความเชื่อถือ และ ใช้งานได้จริงยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ทวีชัย ส้าราญวานิช, (2552). *การอบรม“ คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดลอมทะเล(Marine Concrete)”*
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, (2552). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต
(CEMENT, POZZOLAN AND CONCRETE)*
- [3] ประหยัด เลี้ยวไพรัตน์และคณะ, (2551). *เอกสาร “คอนกรีตเทคโนโลยี”*,บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต
จำกัด
- [4] สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, (2008). *“คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดลอมทะเล (Marine
concrete)”*, *วารสารคอนกรีต*. ฉบับที่ 4, ประจำเดือนสิงหาคม
- [5] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2543). *ความคงทนของ
คอนกรีต*,พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท จุกทอง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 24-73.
- [6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543
- [7] ทวีชัย ส้าราญวานิช, (2552). *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย การทำนายการแทรกซึม
ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดลอมคลอไรด์*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [8] ชัย จาตุรพิทักษ์ และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร,(2553). หนังสือ *การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือ
ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [9] วิเชียร ชาลี. (2552). *เอกสารประกอบการสอนความคงทนคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [10] ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแมค(CPAC Academy), (2002). หนังสือวิชาการของซีแมค *“คอนกรีต
เทคโนโลยี (Concrete Technology)”*
- [11] Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.
- [12] Gjorv, O.E. and Vennesland, O., (1976). *“Sea Salt and Alkalinity of Concrete”*, *Journal of
the American Concrete Institute*, Vol. 73, No. 9, pp. 512-516.
- [13] Austin GT, 1985, Shreve’s chemical process industries, 5th edition, McGraw-Hill, Singapore.

- [14] เสริมพันธ์ เอี่ยมจะบก และคณะ, (2539). “ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก”, โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(ก่อสร้าง) ม.ราชภัฏอุดรธานี
- [15] ผศ. ดร. วิเชียร ชาลี, 2555, เอกสารประกอบการสอน รายวิชา เทคโนโลยีคอนกรีต ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [16] รศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, ใ้ล้อยในงานคอนกรีต(ฉบับปรับปรุง) ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [17] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, V. Sata and T. Leekeeratikul, 2004, Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete, Cement and Concrete Research, 34, p. 549-555
- [18] P. Chindaprasirt, S. Ruangsiriyakul, HT. Cao, L. Bucea, 2001, Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics, strength and drying shrinkage development of blended cement mortars, The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore, 5-7 December 2001, Paper No.1191, p. 6.
- [19] ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ดร. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, 2556, การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [20] สมชัย กกกำแหง, การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, 2536, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 4-1 ถึง 4-23
- [21] สุรพล พุกขานุกุล, กรรมวิธีการผลิตและชนิดของเถ้าถ่านหินที่มีในประเทศไทย, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, 2546, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 19-29
- [22] รัฐพล สมณา, 2546, การศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 27-30
- [23] Swankit, S., Siripanichkorn, A., Jaturapitakkul, C., Woranisalakul, J., and Wecharatana, M., Corrosion Resistance of Fly Ash Concrete, Proceedings of the Annual Conference of the EIT, 1992, Bangkok, Thailand, 337-349.

- [24] Saadoun S.S, Rasheeduzzafar and Gahtani, A.S., (1993). “*Corrosion of reinforced steel in fly ash blended cement concrete*”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, No. 3, August, pp. 356 -371.
- [25] Thomas, M.D.A., Matthews, J.D. and Haynes, C.A., (1990). “*Chloride diffusion and corrosion in marine exposed concrete containing pulverized-fuel ash*”, Elsevier Applied Science, London/New York, pp. 198-212.
- [26] Tarun, R.N., Shiw, S.S. and Mohammad, M.H., (1994). “*Permeability of concrete containing large amounts of fly ash*”, Cement and Concrete Research, Vol. 24, pp. 913-922.
- [27] สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ, (1999). “*ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย*”, วิศวกรรมสาร, เมษายน, หน้า 62-66.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โช้ศรี, (2548). “*กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ*”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.
- [31] มณฑิธร ทีฆวานิช และคณะ, (2548). “*ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน*”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.
- [32] กิตติศักดิ์ คงธนเกษมพร และคณะ, (2005). “*กำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์*”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- [33] วิเชียร ชาลี และคณะ, (2007). “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลั้งอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, หน้า 153-166
- [34] ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, (2006). “การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยคัตขนาด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 2, เมษายน-มิถุนายน, หน้า 203-214
- [35] ธวัชชัย ศาสกุล, (2007). “ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อกำลั้งอัด และความต้านทาน การกัดกร่อนของมอร์ตาร์ ที่แช่ในน้ำเสียนุมน”, ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมระดับนานาชาติ
- [36] ปิยพงษ์ สุวรรณณิ โขติ, (2007). “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าถ่านหิน ระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.
- [37] ประจักษ์ เข็มบุบผา (2005) “การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลั้งอัดแตกต่างกัน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [38] ปกป้อง รัตนชู (2008). “กำลั้งอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าชานอ้อย”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [39] วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci. J. 16 (2011) 2, หน้า 51-62.
- [40] นุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ (2011) “พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอชโซลานในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟ”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน, หน้า 299-315.
- [41] ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ “ผลกระทบของความละเอียดเถ้าถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอชโซลานในเพสต์”
- [42] วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเปลือกไม้ ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน, หน้า 245-255.

- [43] American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.
- [44] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2540, ว.ศ.ท. 1014 “ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับ โครงสร้างคอนกรีต”, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 1
- [45] American Society for Testing and Materials, 2001, ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia.
- [46] American Society for Testing and Materials. (1997). ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Books of ASTM Standards.
- [47] American Society for Testing and Materials, ASTM C33. (1997). Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Books of ASTM Standards.
- [48] Thomas, H., Bozec, Y., Elkalay, K., de Baar, H.J.W., 2004. Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping. Science 304, 1005-1008
- [49] ปรีญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โชคดี, (2548). “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ภาคผนวก

ผลการทดลอง

ตาราง ก. ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ใช้กรวดที่ละเอียดกว่า 150 ไมครอน) ในคอนกรีตที่ผสมแก่ที่ผ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล 15 ปี

Mix	ระยะความลึกจากผิว (มิลลิเมตร)	น้ำหนักผงคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (โมล/ลิตร)	เจือจางตัวอย่าง (เท่า)	ตัวอย่างที่ใส่ไปหมด (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใส่ไปหมด (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช้เพื่อตกตะกอน (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ค่ามวล (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (โมล/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 100 g)
I45	1 -- 10	10.030	0.04824	10	10	1.050	0.115	0.935	0.04510	1.601	0.160	15.96
	11 -- 20	10.007	0.04824	10	10	0.850	0.115	0.735	0.03546	1.259	0.126	12.58
	21 -- 30	10.022	0.04824	10	10	0.650	0.115	0.535	0.02581	0.916	0.091	9.14
	31 -- 40	9.011	0.04824	10	10	0.500	0.115	0.385	0.01857	0.659	0.073	7.32
	41 -- 50	10.078	0.04824	10	10	0.400	0.115	0.285	0.01375	0.488	0.048	4.84
	51 -- 60	8.402	0.04824	10	10	0.325	0.115	0.210	0.01013	0.360	0.043	4.28
	61 -- 70	10.013	0.04824	10	10	0.350	0.115	0.235	0.01134	0.402	0.040	4.02
	71 -- 80	10.038	0.04824	10	10	0.375	0.115	0.260	0.01254	0.445	0.044	4.44
	81 -- 90	10.009	0.04824	10	10	0.375	0.115	0.260	0.01254	0.445	0.044	4.45
	91 -- 100	10.002	0.04824	10	10	0.375	0.115	0.260	0.01254	0.445	0.045	4.45
I45015	1 -- 10	10.004	0.04824	10	10	1.000	0.115	0.885	0.04269	1.516	0.151	15.15
	11 -- 20	10.000	0.04824	10	10	0.950	0.115	0.835	0.04028	1.430	0.143	14.30
	21 -- 30	10.003	0.04824	10	10	0.625	0.115	0.510	0.02460	0.873	0.087	8.73
	31 -- 40	10.005	0.04824	10	10	0.425	0.115	0.310	0.01495	0.531	0.053	5.31
	41 -- 50	10.004	0.04824	10	10	0.325	0.115	0.210	0.01013	0.360	0.036	3.59
	51 -- 60	10.005	0.04824	5	10	0.400	0.115	0.285	0.00687	0.244	0.024	2.44
	61 -- 70	10.004	0.04824	5	10	0.325	0.115	0.210	0.00507	0.180	0.018	1.80
	71 -- 80	10.004	0.04824	5	10	0.245	0.115	0.130	0.00314	0.111	0.011	1.11
	81 -- 90	10.000	0.04824	5	10	0.235	0.115	0.120	0.00289	0.103	0.010	1.03
	91 -- 100	10.000	0.04824	5	10	0.250	0.115	0.135	0.00326	0.116	0.012	1.16
I45025	1 -- 10	10.005	0.04824	5	10	1.125	0.115	1.010	0.02436	0.865	0.086	8.64
	11 -- 20	10.007	0.04824	5	10	1.050	0.115	0.935	0.02255	0.801	0.080	8.00
	21 -- 30	10.002	0.04824	5	10	0.750	0.115	0.635	0.01532	0.544	0.054	5.44
	31 -- 40	10.004	0.04824	5	10	0.500	0.115	0.385	0.00929	0.330	0.033	3.30
	41 -- 50	10.003	0.04824	5	10	0.275	0.115	0.160	0.00386	0.137	0.014	1.37
	51 -- 60	10.003	0.04824	5	10	0.325	0.115	0.210	0.00507	0.180	0.018	1.80
	61 -- 70	10.006	0.04824	5	10	0.225	0.115	0.110	0.00265	0.094	0.009	0.94
	71 -- 80	10.005	0.04824	5	10	0.175	0.115	0.060	0.00145	0.051	0.005	0.51
	81 -- 90	10.007	0.04824	5	10	0.165	0.115	0.050	0.00121	0.043	0.004	0.43
	91 -- 100	7.503	0.04824	5	10	0.150	0.115	0.035	0.00084	0.030	0.004	0.40

ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

Mix	ระยะจากผิวคอนกรีต (มิลลิเมตร)	น้ำหนักตวง คอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (โมล/ ลิตร)	ตัวอย่าง ตัวอย่าง (ท่า)	ตัวอย่างที่ ใช้ทดสอบ (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ ใช้ทดสอบ (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ ใช้ทดสอบ (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ ใช้ทดสอบ (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้น คลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น คลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น คลอไรด์ (กรัม/คอนกรีต 1 กรัม)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 100 g, (%)
I45O35	1 -- 10	10.017	0.04824	5	10	1.350	0.115	1.235	0.02979	1.057	0.106	10.56
	11 -- 20	10.006	0.04824	5	10	0.990	0.115	0.875	0.02111	0.749	0.075	7.49
	21 -- 30	10.009	0.04824	5	10	0.705	0.115	0.590	0.01423	0.505	0.050	5.05
	31 -- 40	9.900	0.04824	5	10	0.320	0.115	0.205	0.00494	0.176	0.018	1.77
	41 -- 50	9.477	0.04824	5	10	0.225	0.115	0.110	0.00265	0.094	0.010	0.99
	51 -- 60	10.072	0.04824	5	10	0.170	0.115	0.055	0.00133	0.047	0.005	0.47
	61 -- 70	10.026	0.04824	5	10	0.185	0.115	0.070	0.00169	0.060	0.006	0.60
	71 -- 80	10.013	0.04824	5	10	0.170	0.115	0.055	0.00133	0.047	0.005	0.47
	81 -- 90	10.001	0.04824	5	10	0.165	0.115	0.050	0.00121	0.043	0.004	0.43
	91 -- 100	10.007	0.04824	5	10	0.160	0.115	0.045	0.00109	0.039	0.004	0.39
I45O50	1 -- 10	10.014	0.04824	5	10	1.140	0.115	1.025	0.02472	0.878	0.088	8.76
	11 -- 20	10.010	0.04824	5	10	0.560	0.115	0.445	0.01073	0.381	0.038	3.81
	21 -- 30	10.001	0.04824	5	10	0.190	0.115	0.075	0.00181	0.064	0.006	0.64
	31 -- 40	9.001	0.04824	5	10	0.150	0.115	0.035	0.00084	0.030	0.003	0.33
	41 -- 50	10.009	0.04824	5	10	0.150	0.115	0.035	0.00084	0.030	0.003	0.30
	51 -- 60	10.049	0.04824	5	10	0.145	0.115	0.030	0.00072	0.026	0.003	0.26
	61 -- 70	10.044	0.04824	5	10	0.140	0.115	0.025	0.00060	0.021	0.002	0.21
	71 -- 80	10.000	0.04824	5	10	0.135	0.115	0.020	0.00048	0.017	0.002	0.17
	81 -- 90	10.009	0.04824	5	10	0.130	0.115	0.015	0.00036	0.013	0.001	0.13
	91 -- 100	10.002	0.04824	5	10	0.130	0.115	0.015	0.00036	0.013	0.001	0.13
I55	1 -- 10	10.004	0.04824	5	10	1.445	0.115	1.330	0.03208	1.139	0.114	11.38
	11 -- 20	10.020	0.04824	5	10	1.195	0.115	1.080	0.02605	0.925	0.092	9.23
	21 -- 30	10.007	0.04824	5	10	1.000	0.115	0.885	0.02135	0.758	0.076	7.57
	31 -- 40	10.005	0.04824	5	10	0.870	0.115	0.755	0.01821	0.646	0.065	6.46
	41 -- 50	10.008	0.04824	5	10	0.805	0.115	0.690	0.01664	0.591	0.059	5.90
	51 -- 60	10.003	0.04824	5	10	0.785	0.115	0.670	0.01616	0.574	0.057	5.74
	61 -- 70	10.006	0.04824	5	10	0.830	0.115	0.715	0.01725	0.612	0.061	6.12
	71 -- 80	10.006	0.04824	5	10	0.820	0.115	0.705	0.01700	0.604	0.060	6.03
	81 -- 90	8.050	0.04824	5	10	0.820	0.115	0.705	0.01700	0.604	0.075	7.50
	91 -- 100	10.009	0.04824	5	10	0.865	0.115	0.750	0.01809	0.642	0.064	6.42
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด												

Mix	ระยะเวลาสังเกตตัว คอนกรีต(มิลิเมตร)	น้ำหนักตวง คอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (โมล/ ลิตร)	ตัวอย่าง ตัวอย่าง (ท่า)	ตัวอย่างที่ ใช้ (มิลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ ใช้ (มิลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ ใช้ (มิลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ ใช้ (มิลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ ใช้ (มิลิลิตร)	ความเข้มข้น คลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น คลอไรด์ (กรัม/คอนกรีต 1 กรัม)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 100 g), (%)
I55O15	1 -- 10	10.011	0.04824	5	10	1.565	0.115	1.450	0.03497	1.242	0.124	12.40
	11 -- 20	10.050	0.04824	5	10	1.420	0.115	1.305	0.03148	1.117	0.111	11.12
	21 -- 30	10.008	0.04824	5	10	1.125	0.115	1.010	0.02436	0.865	0.086	8.64
	31 -- 40	10.002	0.04824	5	10	0.960	0.115	0.845	0.02038	0.724	0.072	7.23
	41 -- 50	10.045	0.04824	5	10	0.850	0.115	0.735	0.01773	0.629	0.063	6.27
	51 -- 60	10.047	0.04824	5	10	0.700	0.115	0.585	0.01411	0.501	0.050	4.99
	61 -- 70	10.051	0.04824	5	10	0.520	0.115	0.405	0.00977	0.347	0.035	3.45
	71 -- 80	10.027	0.04824	5	10	0.425	0.115	0.310	0.00748	0.265	0.026	2.65
	81 -- 90	8.265	0.04824	5	10	0.360	0.115	0.245	0.00591	0.210	0.025	2.54
	91 -- 100	10.064	0.04824	5	10	0.290	0.115	0.175	0.00422	0.150	0.015	1.49
I55O25	1 -- 10	10.035	0.04824	5	10	1.685	0.115	1.570	0.03787	1.344	0.134	13.40
	11 -- 20	10.052	0.04824	5	10	1.270	0.115	1.155	0.02786	0.989	0.098	9.84
	21 -- 30	10.006	0.04824	5	10	0.855	0.115	0.740	0.01785	0.634	0.063	6.33
	31 -- 40	10.020	0.04824	5	10	0.665	0.115	0.550	0.01327	0.471	0.047	4.70
	41 -- 50	10.073	0.04824	5	10	0.395	0.115	0.280	0.00675	0.240	0.024	2.38
	51 -- 60	10.051	0.04824	5	10	0.375	0.115	0.260	0.00627	0.223	0.022	2.21
	61 -- 70	10.051	0.04824	5	10	0.350	0.115	0.235	0.00567	0.201	0.020	2.00
	71 -- 80	10.037	0.04824	5	10	0.215	0.115	0.100	0.00241	0.086	0.009	0.85
	81 -- 90	10.055	0.04824	5	10	0.175	0.115	0.060	0.00145	0.051	0.005	0.51
	91 -- 100	10.047	0.04824	5	10	0.175	0.115	0.060	0.00145	0.051	0.005	0.51
I55O35	1 -- 10	10.022	0.04824	5	10	0.985	0.115	0.870	0.02098	0.745	0.074	7.43
	11 -- 20	10.090	0.04824	5	10	0.885	0.115	0.770	0.01857	0.659	0.065	6.53
	21 -- 30	9.999	0.04824	5	10	0.735	0.115	0.620	0.01495	0.531	0.053	5.31
	31 -- 40	10.031	0.04824	5	10	0.450	0.115	0.335	0.00808	0.287	0.029	2.86
	41 -- 50	10.042	0.04824	5	10	0.270	0.115	0.155	0.00374	0.133	0.013	1.32
	51 -- 60	10.020	0.04824	5	10	0.265	0.115	0.150	0.00362	0.128	0.013	1.28
	61 -- 70	8.017	0.04824	5	10	0.245	0.115	0.130	0.00314	0.111	0.014	1.39
	71 -- 80	10.030	0.04824	5	10	0.240	0.115	0.125	0.00302	0.107	0.011	1.07
	81 -- 90	10.000	0.04824	5	10	0.235	0.115	0.120	0.00289	0.103	0.010	1.03
	91 -- 100	10.078	0.04824	5	10	0.225	0.115	0.110	0.00265	0.094	0.009	0.93
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด												

Mix	ระยะเวลาเล็จากตัวคอนกรีต(มิลิเมตร)	น้ำหนักตงคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO3 (โมล/ลิตร)	ตัวอย่าง (แท่ง)	ตัวอย่างที่ใส่ (มิลิลิตร)	AgNO3 ที่ใส่ (มิลิลิตร)	AgNO3 ที่ใส่ (มิลิลิตร)	AgNO3 ที่ใส่ (มิลิลิตร)	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้น (กรัม/คอนกรีต 1 กรัม)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 100 g), (%)
I55O50	1 -- 10	10.017	0.04824	5	10	0.935	0.115	0.820	0.01978	0.702	0.070	7.01
	11 -- 20	10.043	0.04824	5	10	0.625	0.115	0.510	0.01230	0.437	0.043	4.35
	21 -- 30	10.070	0.04824	5	10	0.295	0.115	0.180	0.00434	0.154	0.015	1.53
	31 -- 40	10.084	0.04824	5	10	0.255	0.115	0.140	0.00338	0.120	0.012	1.19
	41 -- 50	10.053	0.04824	5	10	0.250	0.115	0.135	0.00326	0.116	0.011	1.15
	51 -- 60	10.006	0.04824	5	10	0.255	0.115	0.140	0.00338	0.120	0.012	1.20
	61 -- 70	10.088	0.04824	5	10	0.230	0.115	0.115	0.00277	0.098	0.010	0.98
	71 -- 80	10.056	0.04824	5	10	0.245	0.115	0.130	0.00314	0.111	0.011	1.11
	81 -- 90	10.086	0.04824	5	10	0.225	0.115	0.110	0.00265	0.094	0.009	0.93
	91 -- 100	10.048	0.04824	5	10	0.225	0.115	0.110	0.00265	0.094	0.009	0.94
I65	1 -- 10	10.029	0.04824	5	10	1.350	0.115	1.235	0.02979	1.057	0.105	10.54
	11 -- 20	9.041	0.04824	5	10	1.190	0.115	1.075	0.02593	0.920	0.102	10.18
	21 -- 30	10.053	0.04824	5	10	1.160	0.115	1.045	0.02521	0.895	0.089	8.90
	31 -- 40	10.002	0.04824	5	10	1.060	0.115	0.945	0.02279	0.809	0.081	8.09
	41 -- 50	10.067	0.04824	5	10	1.005	0.115	0.890	0.02147	0.762	0.076	7.57
	51 -- 60	10.033	0.04824	5	10	0.995	0.115	0.880	0.02123	0.754	0.075	7.51
	61 -- 70	10.077	0.04824	5	10	0.920	0.115	0.805	0.01942	0.689	0.068	6.84
	71 -- 80	10.032	0.04824	5	10	0.945	0.115	0.830	0.02002	0.711	0.071	7.08
	81 -- 90	10.006	0.04824	5	10	0.890	0.115	0.775	0.01869	0.664	0.066	6.63
	91 -- 100	10.018	0.04824	5	10	0.905	0.115	0.790	0.01905	0.676	0.068	6.75
I65O15	1 -- 10	10.151	0.04824	5	10	1.450	0.115	1.335	0.03220	1.143	0.113	11.26
	11 -- 20	10.026	0.04824	5	10	1.365	0.115	1.250	0.03015	1.070	0.107	10.68
	21 -- 30	10.007	0.04824	5	10	1.265	0.115	1.150	0.02774	0.985	0.098	9.84
	31 -- 40	10.028	0.04824	5	10	1.045	0.115	0.930	0.02243	0.796	0.079	7.94
	41 -- 50	10.047	0.04824	5	10	0.905	0.115	0.790	0.01905	0.676	0.067	6.73
	51 -- 60	9.722	0.04824	5	10	0.685	0.115	0.570	0.01375	0.488	0.050	5.02
	61 -- 70	10.040	0.04824	5	10	0.680	0.115	0.565	0.01363	0.484	0.048	4.82
	71 -- 80	10.400	0.04824	5	10	0.685	0.115	0.570	0.01375	0.488	0.047	4.69
	81 -- 90	9.537	0.04824	5	10	0.650	0.115	0.535	0.01290	0.458	0.048	4.80
	91 -- 100	9.593	0.04824	5	10	0.635	0.115	0.520	0.01254	0.445	0.046	4.64
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอรีนทั้งหมด												

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต(มิลลิเมตร)	น้ำหนักผงคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (มิลลิกรัม)	เจือจางตัวอย่าง (เท่า)	ตัวอย่างที่ชั่ง (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้ (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้ (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้ (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้นคลอรีน (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้นคลอรีน (กรัม/คอนกรีต 1g)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 100 g), (%)
I65O25	1 -- 10	10.057	0.04824	5	10	1.105	0.115	0.990	0.02388	0.848	8.43
	11 -- 20	10.179	0.04824	5	10	1.000	0.115	0.885	0.02135	0.758	7.44
	21 -- 30	10.045	0.04824	5	10	0.845	0.115	0.730	0.01761	0.625	6.22
	31 -- 40	10.081	0.04824	5	10	0.675	0.115	0.560	0.01351	0.480	4.76
	41 -- 50	10.004	0.04824	5	10	0.580	0.115	0.465	0.01122	0.398	3.98
	51 -- 60	10.015	0.04824	5	10	0.410	0.115	0.295	0.00712	0.253	2.52
	61 -- 70	10.079	0.04824	5	10	0.385	0.115	0.270	0.00651	0.231	2.29
	71 -- 80	10.073	0.04824	5	10	0.360	0.115	0.245	0.00591	0.210	2.08
	81 -- 90	10.013	0.04824	5	10	0.345	0.115	0.230	0.00555	0.197	1.97
	91 -- 100	10.040	0.04824	5	10	0.340	0.115	0.225	0.00543	0.193	1.92
I65O35	1 -- 10	10.053	0.04824	5	10	0.965	0.115	0.850	0.02050	0.728	7.24
	11 -- 20	10.029	0.04824	5	10	0.710	0.115	0.595	0.01435	0.509	5.08
	21 -- 30	10.052	0.04824	5	10	0.560	0.115	0.445	0.01073	0.381	3.79
	31 -- 40	10.023	0.04824	5	10	0.340	0.115	0.225	0.00543	0.193	1.92
	41 -- 50	10.015	0.04824	5	10	0.285	0.115	0.170	0.00410	0.146	1.45
	51 -- 60	10.045	0.04824	5	10	0.265	0.115	0.150	0.00362	0.128	1.28
	61 -- 70	10.000	0.04824	5	10	0.255	0.115	0.140	0.00338	0.120	1.20
	71 -- 80	10.049	0.04824	5	10	0.250	0.115	0.135	0.00326	0.116	1.15
	81 -- 90	10.089	0.04824	5	10	0.250	0.115	0.135	0.00326	0.116	1.15
	91 -- 100	7.451	0.04824	5	10	0.195	0.115	0.080	0.00193	0.069	0.92
I65O50	1 -- 10	10.094	0.04824	5	10	0.785	0.115	0.670	0.01616	0.574	5.68
	11 -- 20	10.093	0.04824	5	10	0.590	0.115	0.475	0.01146	0.407	4.03
	21 -- 30	10.049	0.04824	5	10	0.485	0.115	0.370	0.00892	0.317	3.15
	31 -- 40	10.024	0.04824	5	10	0.375	0.115	0.260	0.00627	0.223	2.22
	41 -- 50	10.007	0.04824	5	10	0.295	0.115	0.180	0.00434	0.154	1.54
	51 -- 60	10.019	0.04824	5	10	0.285	0.115	0.170	0.00410	0.146	1.45
	61 -- 70	10.042	0.04824	5	10	0.265	0.115	0.150	0.00362	0.128	1.28
	71 -- 80	10.000	0.04824	5	10	0.220	0.115	0.105	0.00253	0.090	0.90
	81 -- 90	10.009	0.04824	5	10	0.235	0.115	0.120	0.00289	0.103	1.03
	91 -- 100	10.094	0.04824	5	10	0.230	0.115	0.115	0.00277	0.098	0.98
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอรีนทั้งหมด											

ตาราง ข. ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีตที่ผสมเท่ากับหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล 15 ปี

Mix	ระยะความลึกจากผิว (มิลลิเมตร)	น้ำหนักผงคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (โมล/ลิตร)	ตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนัก (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้ไทเทรตแบบด่าง (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช้คำนวณ (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 1 g)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 100 g), (%)
I45	1 -- 10	10.008	0.04824	10	8.695	0.38	8.315	1.424	0.142	14.23
	11 -- 20	10.019	0.04824	5.8	4.525	0.38	4.145	1.224	0.122	12.22
	21 -- 30	10.038	0.04824	4.8	2.750	0.38	2.370	0.846	0.084	8.42
	31 -- 40	10.010	0.04824	7.6	3.295	0.38	2.915	0.657	0.066	6.56
	41 -- 50	10.021	0.04824	9.4	2.915	0.38	2.535	0.462	0.046	4.61
	51 -- 60	10.001	0.04824	3.4	1.175	0.38	0.795	0.400	0.040	4.00
	61 -- 70	9.999	0.04824	10	2.685	0.38	2.305	0.395	0.039	3.95
	71 -- 80	10.025	0.04824	10	2.755	0.38	2.375	0.407	0.041	4.06
	81 -- 90	10.009	0.04824	5.6	1.695	0.38	1.315	0.402	0.040	4.02
	91 -- 100	10.048	0.04824	6.8	1.985	0.38	1.605	0.404	0.040	4.02
I45O15	1 -- 10	10.053	0.04824	10	8.445	0.38	8.065	1.381	0.137	13.74
	11 -- 20	10.051	0.04824	6	4.745	0.38	4.365	1.246	0.124	12.40
	21 -- 30	10.038	0.04824	7.4	4.125	0.38	3.745	0.867	0.086	8.63
	31 -- 40	10.031	0.04824	10	3.025	0.38	2.645	0.453	0.045	4.52
	41 -- 50	10.048	0.04824	2.4	0.875	0.38	0.495	0.353	0.035	3.52
	51 -- 60	10.006	0.04824	6.2	1.235	0.38	0.855	0.236	0.024	2.36
	61 -- 70	10.043	0.04824	3.6	0.705	0.38	0.325	0.155	0.015	1.54
	71 -- 80	10.016	0.04824	2.4	0.525	0.38	0.145	0.103	0.010	1.03
	81 -- 90	10.024	0.04824	4.6	0.645	0.38	0.265	0.099	0.010	0.98
	91 -- 100	10.011	0.04824	5.6	0.695	0.38	0.315	0.096	0.010	0.96
I45O25	1 -- 10	10.044	0.04824	10	4.575	0.38	4.195	0.718	0.072	7.15
	11 -- 20	10.010	0.04824	10	4.465	0.38	4.085	0.700	0.070	6.99
	21 -- 30	10.079	0.04824	10	3.445	0.38	3.065	0.525	0.052	5.21
	31 -- 40	10.062	0.04824	10	2.190	0.38	1.810	0.310	0.031	3.08
	41 -- 50	10.004	0.04824	10	1.175	0.38	0.795	0.136	0.014	1.36
	51 -- 60	10.026	0.04824	10	1.395	0.38	1.015	0.174	0.017	1.73
	61 -- 70	10.003	0.04824	10	0.885	0.38	0.505	0.086	0.009	0.86
	71 -- 80	10.005	0.04824	10	0.670	0.38	0.290	0.050	0.005	0.50
	81 -- 90	10.007	0.04824	10	0.625	0.38	0.245	0.042	0.004	0.42
	91 -- 100	8.505	0.04824	10	0.575	0.38	0.195	0.033	0.004	0.39
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ										

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต(มิลลิเมตร)	น้ำหนักของคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (ไมโครลิตร)	ตัวอย่างที่ใช่ไพทเรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรตแมลง (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (ไมโครลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 1 g)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 100 g, %)
I45O35	1 -- 10	10.013	0.04824	10	6.150	0.38	5.770	0.02783	0.988	0.099	9.87
	11 -- 20	10.022	0.04824	10	4.250	0.38	3.870	0.01867	0.663	0.066	6.61
	21 -- 30	10.044	0.04824	10	3.045	0.38	2.665	0.01286	0.456	0.045	4.54
	31 -- 40	10.033	0.04824	10	1.275	0.38	0.895	0.00432	0.153	0.015	1.53
	41 -- 50	10.014	0.04824	10	0.895	0.38	0.515	0.00248	0.088	0.009	0.88
	51 -- 60	10.077	0.04824	10	0.625	0.38	0.245	0.00118	0.042	0.004	0.42
	61 -- 70	10.044	0.04824	10	0.615	0.38	0.235	0.00113	0.040	0.004	0.40
	71 -- 80	10.083	0.04824	10	0.635	0.38	0.255	0.00123	0.044	0.004	0.43
	81 -- 90	10.017	0.04824	10	0.615	0.38	0.235	0.00113	0.040	0.004	0.40
	91 -- 100	10.069	0.04824	10	0.575	0.38	0.195	0.00094	0.033	0.003	0.33
I45O50	1 -- 10	10.073	0.04824	10	5.135	0.38	4.755	0.02294	0.814	0.081	8.08
	11 -- 20	10.029	0.04824	10	2.250	0.38	1.870	0.00902	0.320	0.032	3.19
	21 -- 30	10.025	0.04824	10	0.715	0.38	0.335	0.00162	0.057	0.006	0.57
	31 -- 40	10.014	0.04824	10	0.560	0.38	0.180	0.00087	0.031	0.003	0.31
	41 -- 50	10.113	0.04824	10	0.535	0.38	0.155	0.00075	0.027	0.003	0.26
	51 -- 60	10.105	0.04824	10	0.505	0.38	0.125	0.00060	0.021	0.002	0.21
	61 -- 70	10.077	0.04824	10	0.495	0.38	0.115	0.00055	0.020	0.002	0.20
	71 -- 80	10.086	0.04824	10	0.465	0.38	0.085	0.00041	0.015	0.001	0.14
	81 -- 90	10.005	0.04824	10	0.450	0.38	0.070	0.00034	0.012	0.001	0.12
	91 -- 100	10.107	0.04824	10	0.445	0.38	0.065	0.00031	0.011	0.001	0.11
I55	1 -- 10	10.075	0.04824	10	6.875	0.38	6.495	0.03133	1.112	0.110	11.04
	11 -- 20	10.003	0.04824	10	5.655	0.38	5.275	0.02545	0.903	0.090	9.03
	21 -- 30	10.003	0.04824	10	4.275	0.38	3.895	0.01879	0.667	0.067	6.67
	31 -- 40	10.058	0.04824	10	4.015	0.38	3.635	0.01754	0.623	0.062	6.19
	41 -- 50	10.022	0.04824	10	3.725	0.38	3.345	0.01614	0.573	0.057	5.72
	51 -- 60	10.010	0.04824	10	3.725	0.38	3.345	0.01614	0.573	0.057	5.72
	61 -- 70	10.039	0.04824	10	3.825	0.38	3.445	0.01662	0.590	0.059	5.88
	71 -- 80	10.016	0.04824	10	3.635	0.38	3.255	0.01570	0.557	0.056	5.57
	81 -- 90	10.083	0.04824	10	3.840	0.38	3.460	0.01669	0.593	0.059	5.88
	91 -- 100	10.079	0.04824	10	3.840	0.38	3.460	0.01669	0.593	0.059	5.88
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอรีน											

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต(มิลลิเมตร)	น้ำหนักของคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (มิลลิกรัม)	ตัวอย่างที่ใช่ไพทเรต (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรต (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรตเฉลี่ย (มิลลิกรัม)	AgNO ₃ ที่ใช่ (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้นคลอรีน (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้นคลอรีน (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 1 g)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 100 g, %)
I55O15	1 -- 10	10.023	0.04794	8	6.125	0.38	5.745	0.03443	1.222	0.122	12.19
	11 -- 20	10.027	0.04794	10	6.815	0.38	6.435	0.03085	1.095	0.109	10.92
	21 -- 30	10.019	0.04794	10	4.965	0.38	4.585	0.02198	0.780	0.078	7.79
	31 -- 40	10.085	0.04794	10	4.550	0.38	4.170	0.01999	0.710	0.070	7.04
	41 -- 50	10.009	0.04794	10	3.980	0.38	3.600	0.01726	0.613	0.061	6.12
	51 -- 60	10.014	0.04794	10	3.250	0.38	2.870	0.01376	0.488	0.049	4.88
	61 -- 70	10.026	0.04794	10	2.085	0.38	1.705	0.00817	0.290	0.029	2.89
	71 -- 80	10.001	0.04794	10	1.525	0.38	1.145	0.00549	0.195	0.019	1.95
	81 -- 90	9.403	0.04794	10	1.365	0.38	0.985	0.00472	0.168	0.018	1.78
	91 -- 100	10.002	0.04794	10	1.100	0.38	0.720	0.00345	0.123	0.012	1.23
I55O25	1 -- 10	10.072	0.04794	10	7.115	0.38	6.735	0.03229	1.146	0.114	11.38
	11 -- 20	10.008	0.04794	10	6.005	0.38	5.625	0.02697	0.957	0.096	9.56
	21 -- 30	10.014	0.04794	10	3.980	0.38	3.600	0.01726	0.613	0.061	6.12
	31 -- 40	10.024	0.04794	10	2.865	0.38	2.485	0.01191	0.423	0.042	4.22
	41 -- 50	10.140	0.04794	9	1.615	0.38	1.235	0.00658	0.234	0.023	2.30
	51 -- 60	9.999	0.04794	10	1.585	0.38	1.205	0.00578	0.205	0.021	2.05
	61 -- 70	10.033	0.04794	10	1.485	0.38	1.105	0.00530	0.188	0.019	1.87
	71 -- 80	9.986	0.04794	10	0.870	0.38	0.490	0.00235	0.083	0.008	0.84
	81 -- 90	10.060	0.04794	10	0.675	0.38	0.295	0.00141	0.050	0.005	0.50
	91 -- 100	10.014	0.04794	10	0.635	0.38	0.255	0.00122	0.043	0.004	0.43
I55O35	1 -- 10	10.068	0.04794	10	4.560	0.38	4.180	0.02004	0.711	0.071	7.07
	11 -- 20	10.012	0.04794	10	4.115	0.38	3.735	0.01790	0.636	0.063	6.35
	21 -- 30	10.087	0.04794	10	3.215	0.38	2.835	0.01359	0.482	0.048	4.78
	31 -- 40	10.043	0.04794	10	1.825	0.38	1.445	0.00693	0.246	0.024	2.45
	41 -- 50	10.051	0.04794	10	1.075	0.38	0.695	0.00333	0.118	0.012	1.18
	51 -- 60	10.008	0.04794	10	1.065	0.38	0.685	0.00328	0.117	0.012	1.16
	61 -- 70	8.460	0.04794	10	0.965	0.38	0.585	0.00280	0.100	0.012	1.18
	71 -- 80	7.283	0.04794	10	0.755	0.38	0.375	0.00180	0.064	0.009	0.88
	81 -- 90	10.092	0.04794	10	0.885	0.38	0.505	0.00242	0.086	0.009	0.85
	91 -- 100	10.089	0.04794	10	0.795	0.38	0.415	0.00199	0.071	0.007	0.70
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอรีนอิสระ											

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต(มิลลิเมตร)	น้ำหนักของคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (โมล/ลิตร)	ตัวอย่างที่ใช่ไพทเรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ไพทเรตแมลง (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช่ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (โมล/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 1 g)	ความเข้มข้นคลอรีน (g/concrete 100 g, %)
I55O50	1 -- 10	10.089	0.04794	10	4.405	0.38	4.025	0.01930	0.685	0.068	6.79
	11 -- 20	10.018	0.04794	10	2.735	0.38	2.355	0.01129	0.401	0.040	4.00
	21 -- 30	10.042	0.04794	10	1.175	0.38	0.795	0.00381	0.135	0.013	1.35
	31 -- 40	10.099	0.04794	10	0.965	0.38	0.585	0.00280	0.100	0.010	0.99
	41 -- 50	10.043	0.04794	10	0.945	0.38	0.565	0.00271	0.096	0.010	0.96
	51 -- 60	10.020	0.04794	10	0.925	0.38	0.545	0.00261	0.093	0.009	0.93
	61 -- 70	10.025	0.04794	10	0.925	0.38	0.545	0.00261	0.093	0.009	0.93
	71 -- 80	10.033	0.04794	10	0.915	0.38	0.535	0.00256	0.091	0.009	0.91
	81 -- 90	10.040	0.04794	10	0.885	0.38	0.505	0.00242	0.086	0.009	0.86
	91 -- 100	10.089	0.04794	10	0.875	0.38	0.495	0.00237	0.084	0.008	0.83
I65	1 -- 10	10.045	0.04794	10	6.550	0.38	6.170	0.02958	1.050	0.105	10.45
	11 -- 20	9.411	0.04794	10	5.485	0.38	5.105	0.02447	0.869	0.092	9.23
	21 -- 30	10.088	0.04794	10	5.185	0.38	4.805	0.02303	0.818	0.081	8.11
	31 -- 40	10.015	0.04794	10	4.595	0.38	4.215	0.02021	0.717	0.072	7.16
	41 -- 50	10.044	0.04794	10	4.465	0.38	4.085	0.01958	0.695	0.069	6.92
	51 -- 60	10.093	0.04794	10	4.365	0.38	3.985	0.01910	0.678	0.067	6.72
	61 -- 70	10.011	0.04794	10	4.195	0.38	3.815	0.01829	0.649	0.065	6.49
	71 -- 80	10.003	0.04794	10	4.185	0.38	3.805	0.01824	0.648	0.065	6.47
	81 -- 90	10.000	0.04794	10	4.250	0.38	3.870	0.01855	0.659	0.066	6.59
	91 -- 100	10.028	0.04794	10	3.995	0.38	3.615	0.01733	0.615	0.061	6.13
I65O15	1 -- 10	10.059	0.04794	10	6.875	0.38	6.495	0.03114	1.105	0.110	10.99
	11 -- 20	10.030	0.04794	4.8	3.195	0.38	2.815	0.02811	0.998	0.100	9.95
	21 -- 30	10.049	0.04794	10	5.625	0.38	5.245	0.02514	0.893	0.089	8.88
	31 -- 40	10.059	0.04794	10	4.800	0.38	4.420	0.02119	0.752	0.075	7.48
	41 -- 50	10.080	0.04794	9.6	4.085	0.38	3.705	0.01850	0.657	0.065	6.52
	51 -- 60	10.001	0.04794	10	3.115	0.38	2.735	0.01311	0.465	0.047	4.65
	61 -- 70	10.042	0.04794	10	2.965	0.38	2.585	0.01239	0.440	0.044	4.38
	71 -- 80	10.030	0.04794	10	2.895	0.38	2.515	0.01206	0.428	0.043	4.27
	81 -- 90	10.042	0.04794	10	3.000	0.38	2.620	0.01256	0.446	0.044	4.44
	91 -- 100	9.841	0.04794	10	2.706	0.38	2.326	0.01115	0.396	0.040	4.02
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอรีน											

Mix	ระยะความลึกจากผิว คอนกรีต(มิลลิเมตร)	น้ำหนักแห้งคอนกรีต (กรัม)	ความเข้มข้น AgNO ₃ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ตัวอย่างที่ใช้ ไทเทรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช้ ไทเทรต (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช้ ไทเทรตเบส (มิลลิลิตร)	AgNO ₃ ที่ใช้ คำนวณ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ ไครด์ (โมล/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 1 g)	ความเข้มข้นคลอไรด์ (g/concrete 100 g), (%)
I65O25	1 -- 10	10.071	0.04794	10	5.165	0.38	4.785	0.02294	0.814	0.081	8.09
	11 -- 20	10.081	0.04794	10	4.465	0.38	4.085	0.01958	0.695	0.069	6.90
	21 -- 30	10.039	0.04794	10	3.915	0.38	3.535	0.01695	0.602	0.060	5.99
	31 -- 40	10.019	0.04794	10	3.005	0.38	2.625	0.01258	0.447	0.045	4.46
	41 -- 50	10.023	0.04794	10	2.415	0.38	2.035	0.00976	0.346	0.035	3.46
	51 -- 60	10.006	0.04794	10	1.765	0.38	1.385	0.00664	0.236	0.024	2.36
	61 -- 70	10.061	0.04794	10	1.585	0.38	1.205	0.00578	0.205	0.020	2.04
	71 -- 80	10.079	0.04794	10	1.475	0.38	1.095	0.00525	0.186	0.018	1.85
	81 -- 90	10.075	0.04794	10	1.415	0.38	1.035	0.00496	0.176	0.017	1.75
	91 -- 100	10.088	0.04794	10	1.385	0.38	1.005	0.00482	0.171	0.017	1.70
I65O35	1 -- 10	10.094	0.04824	10	4.605	0.38	4.225	0.02038	0.724	0.072	7.17
	11 -- 20	10.098	0.04824	8	2.365	0.38	1.985	0.01197	0.425	0.042	4.21
	21 -- 30	10.000	0.04824	10	2.340	0.38	1.960	0.00946	0.336	0.034	3.36
	31 -- 40	10.002	0.04824	10	1.435	0.38	1.055	0.00509	0.181	0.018	1.81
	41 -- 50	10.043	0.04824	4.6	0.735	0.38	0.355	0.00372	0.132	0.013	1.32
	51 -- 60	10.065	0.04824	10	1.105	0.38	0.725	0.00350	0.124	0.012	1.23
	61 -- 70	10.019	0.04824	6.8	0.795	0.38	0.415	0.00294	0.105	0.010	1.04
	71 -- 80	10.081	0.04824	6	0.775	0.38	0.395	0.00318	0.113	0.011	1.12
	81 -- 90	10.079	0.04824	5.4	0.715	0.38	0.335	0.00299	0.106	0.011	1.05
	91 -- 100	7.078	0.04824	9.6	0.715	0.38	0.335	0.00168	0.060	0.008	0.84
I65O50	1 -- 10	10.009	0.04824	10	3.570	0.38	3.190	0.01539	0.546	0.055	5.46
	11 -- 20	10.075	0.04824	7.4	2.075	0.38	1.695	0.01105	0.392	0.039	3.89
	21 -- 30	10.047	0.04824	6	1.435	0.38	1.055	0.00848	0.301	0.030	3.00
	31 -- 40	9.284	0.04824	10	1.570	0.38	1.190	0.00574	0.204	0.022	2.20
	41 -- 50	10.002	0.04824	10	1.125	0.38	0.745	0.00359	0.128	0.013	1.28
	51 -- 60	10.022	0.04824	10	1.115	0.38	0.735	0.00355	0.126	0.013	1.26
	61 -- 70	10.083	0.04824	10	1.000	0.38	0.620	0.00299	0.106	0.011	1.05
	71 -- 80	10.052	0.04824	10	0.875	0.38	0.495	0.00239	0.085	0.008	0.84
	81 -- 90	8.565	0.04824	10	0.765	0.38	0.385	0.00186	0.066	0.008	0.77
	91 -- 100	10.070	0.04824	10	0.785	0.38	0.405	0.00195	0.069	0.007	0.69
ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ											

ตาราง ค. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะ

แวดล้อมทะเล 15 ปี

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต (มม.)	Total Cl (%by Wt. of binder)	Free Cl (%by Wt. of binder)	Fixed Cl (%by Wt. of binder)	Average Cl binding (%by Wt. of binder)	Average total Cl (%by Wt. of binder)	Cl binding (% of total Cl)
I45	1 -- 10	15.96	14.23	1.74	0.54	7.15	7.54
	11 -- 20	12.58	12.22	0.36			
	21 -- 30	9.14	8.42	0.72			
	31 -- 40	7.32	6.56	0.75			
	41 -- 50	4.84	4.61	0.23			
	51 -- 60	4.28	4.00	0.28			
	61 -- 70	4.02	3.95	0.07			
	71 -- 80	4.44	4.06	0.38			
	81 -- 90	4.45	4.02	0.43			
91 -- 100	4.45	4.02	0.43				
I45O15	1 -- 10	15.15	13.74	1.41	0.49	5.46	9.04
	11 -- 20	14.30	12.40	1.90			
	21 -- 30	8.73	8.63	0.10			
	31 -- 40	5.31	4.52	0.79			
	41 -- 50	3.59	3.52	0.08			
	51 -- 60	2.44	2.36	0.08			
	61 -- 70	1.80	1.54	0.26			
	71 -- 80	1.11	1.03	0.08			
	81 -- 90	1.03	0.98	0.04			
91 -- 100	1.16	0.96	0.19				
I45O25	1 -- 10	8.64	7.15	1.49	0.31	3.08	10.15
	11 -- 20	8.00	6.99	1.01			
	21 -- 30	5.44	5.21	0.23			
	31 -- 40	3.30	3.08	0.21			
	41 -- 50	1.37	1.36	0.01			
	51 -- 60	1.80	1.73	0.06			
	61 -- 70	0.94	0.86	0.08			
	71 -- 80	0.51	0.50	0.02			
	81 -- 90	0.43	0.42	0.01			
91 -- 100	0.40	0.39	0.01				
I45O35	1 -- 10	10.56	9.87	0.69	0.28	2.82	9.89
	11 -- 20	7.49	6.61	0.87			
	21 -- 30	5.05	4.54	0.50			
	31 -- 40	1.77	1.53	0.25			
	41 -- 50	0.99	0.88	0.11			
	51 -- 60	0.47	0.42	0.05			
	61 -- 70	0.60	0.40	0.20			
	71 -- 80	0.47	0.43	0.04			
	81 -- 90	0.43	0.40	0.03			
91 -- 100	0.39	0.33	0.05				
I45O50	1 -- 10	8.76	8.08	0.68	0.15	1.47	10.45
	11 -- 20	3.81	3.19	0.61			
	21 -- 30	0.64	0.57	0.07			
	31 -- 40	0.33	0.31	0.03			
	41 -- 50	0.30	0.26	0.04			
	51 -- 60	0.26	0.21	0.04			
	61 -- 70	0.21	0.20	0.02			
	71 -- 80	0.17	0.14	0.03			
	81 -- 90	0.13	0.12	0.01			
91 -- 100	0.13	0.11	0.02				

Mix	ระยะความถี่จาก ผิวคอนกรีต (mm.)	Total CI (%by Wt. of binder)	Free CI (%by Wt. of binder)	Fixed CI (%by Wt. of binder)	Average CI binding (%by Wt. of binder)	Average total CI (%by Wt. of binder)	CI binding (% of total CI)
I55	1 -- 10	11.38	11.04	0.34	0.48	7.24	6.62
	11 -- 20	9.23	9.03	0.20			
	21 -- 30	7.57	6.67	0.90			
	31 -- 40	6.46	6.19	0.27			
	41 -- 50	5.90	5.72	0.19			
	51 -- 60	5.74	5.72	0.01			
	61 -- 70	6.12	5.88	0.24			
	71 -- 80	6.03	5.57	0.47			
	81 -- 90	7.50	5.88	1.62			
	91 -- 100	6.42	5.88	0.54			
I55015	1 -- 10	12.40	12.19	0.21	0.40	6.08	6.56
	11 -- 20	11.12	10.92	0.20			
	21 -- 30	8.64	7.79	0.85			
	31 -- 40	7.23	7.04	0.20			
	41 -- 50	6.27	6.12	0.14			
	51 -- 60	4.99	4.88	0.11			
	61 -- 70	3.45	2.89	0.56			
	71 -- 80	2.65	1.95	0.70			
	81 -- 90	2.54	1.78	0.76			
	91 -- 100	1.49	1.23	0.26			
I55025	1 -- 10	13.40	11.38	2.02	0.35	4.27	8.10
	11 -- 20	9.84	9.56	0.27			
	21 -- 30	6.33	6.12	0.21			
	31 -- 40	4.70	4.22	0.48			
	41 -- 50	2.38	2.30	0.08			
	51 -- 60	2.21	2.05	0.16			
	61 -- 70	2.00	1.87	0.13			
	71 -- 80	0.85	0.84	0.02			
	81 -- 90	0.51	0.50	0.01			
	91 -- 100	0.51	0.43	0.08			
I55035	1 -- 10	7.43	7.07	0.37	0.26	2.92	8.80
	11 -- 20	6.53	6.35	0.19			
	21 -- 30	5.31	4.78	0.53			
	31 -- 40	2.86	2.45	0.41			
	41 -- 50	1.32	1.18	0.14			
	51 -- 60	1.28	1.16	0.12			
	61 -- 70	1.39	1.18	0.21			
	71 -- 80	1.07	0.88	0.19			
	81 -- 90	1.03	0.85	0.18			
	91 -- 100	0.93	0.70	0.23			
I55050	1 -- 10	7.01	6.79	0.22	0.18	2.04	9.08
	11 -- 20	4.35	4.00	0.35			
	21 -- 30	1.53	1.35	0.18			
	31 -- 40	1.19	0.99	0.20			
	41 -- 50	1.15	0.96	0.19			
	51 -- 60	1.20	0.93	0.27			
	61 -- 70	0.98	0.93	0.05			
	71 -- 80	1.11	0.91	0.20			
	81 -- 90	0.93	0.86	0.08			
	91 -- 100	0.94	0.83	0.10			

Mix	ระยะความลึกจากผิวคอนกรีต (มม.)	Total CI (%by Wt. of binder)	Free CI (%by Wt. of binder)	Fixed CI (%by Wt. of binder)	Average CI binding (%by Wt. of binder)	Average total CI (%by Wt. of binder)	CI binding (% of total CI)
I65	1 -- 10	10.54	10.45	0.09	0.58	8.01	7.28
	11 -- 20	10.18	9.23	0.95			
	21 -- 30	8.90	8.11	0.79			
	31 -- 40	8.09	7.16	0.93			
	41 -- 50	7.57	6.92	0.65			
	51 -- 60	7.51	6.72	0.79			
	61 -- 70	6.84	6.49	0.35			
	71 -- 80	7.08	6.47	0.61			
	81 -- 90	6.63	6.59	0.05			
	91 -- 100	6.75	6.13	0.62			
I65015	1 -- 10	11.26	10.99	0.27	0.48	7.04	6.88
	11 -- 20	10.68	9.95	0.73			
	21 -- 30	9.84	8.88	0.96			
	31 -- 40	7.94	7.48	0.46			
	41 -- 50	6.73	6.52	0.22			
	51 -- 60	5.02	4.65	0.37			
	61 -- 70	4.82	4.38	0.44			
	71 -- 80	4.69	4.27	0.43			
	81 -- 90	4.80	4.44	0.36			
	91 -- 100	4.64	4.02	0.62			
I65025	1 -- 10	8.43	8.09	0.34	0.30	4.16	7.31
	11 -- 20	7.44	6.90	0.55			
	21 -- 30	6.22	5.99	0.23			
	31 -- 40	4.76	4.46	0.30			
	41 -- 50	3.98	3.46	0.52			
	51 -- 60	2.52	2.36	0.17			
	61 -- 70	2.29	2.04	0.26			
	71 -- 80	2.08	1.85	0.23			
	81 -- 90	1.97	1.75	0.22			
	91 -- 100	1.92	1.70	0.22			
I65035	1 -- 10	7.24	7.17	0.07	0.20	2.52	8.07
	11 -- 20	5.08	4.21	0.87			
	21 -- 30	3.79	3.36	0.43			
	31 -- 40	1.92	1.81	0.12			
	41 -- 50	1.45	1.32	0.14			
	51 -- 60	1.28	1.23	0.05			
	61 -- 70	1.20	1.04	0.16			
	71 -- 80	1.15	1.12	0.03			
	81 -- 90	1.15	1.05	0.09			
	91 -- 100	0.92	0.84	0.08			
I65050	1 -- 10	5.68	5.46	0.23	0.18	2.23	8.22
	11 -- 20	4.03	3.89	0.14			
	21 -- 30	3.15	3.00	0.16			
	31 -- 40	2.22	2.20	0.03			
	41 -- 50	1.54	1.28	0.26			
	51 -- 60	1.45	1.26	0.20			
	61 -- 70	1.28	1.05	0.23			
	71 -- 80	0.90	0.84	0.06			
	81 -- 90	1.03	0.77	0.26			
	91 -- 100	0.98	0.69	0.29			

ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายอภิเดช รัตนดิถก ณ ภูเก็ต
วัน เดือน ปีเกิด 6 มกราคม พ.ศ. 2534
ประวัติการศึกษา - ระดับประถมศึกษา
 โรงเรียนจินตรังษี จ.ตรัง
 - ระดับมัธยมศึกษา
 โรงเรียนจุฬาราชวิทยาลัย ตรัง จ.ตรัง
 การศึกษาปัจจุบัน นิสิตชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อ-สกุล นางสาวนันทรัตน์ โยคะวัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด 12 มีนาคม พ.ศ. 2533
ประวัติการศึกษา - ระดับประถมศึกษา
 โรงเรียนอนุบาลวังน้ำเย็น จ.สระแก้ว
 - ระดับมัธยมศึกษา
 โรงเรียนสตรีประเสริฐศิลป์ จ.ตราด
 การศึกษาปัจจุบัน นิสิตชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยบูรพา