

กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ
จากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้ากันภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

นำพล บุตรเชื้อไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2560


ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ นำพล บุตรเชื้อไทย ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

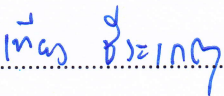
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

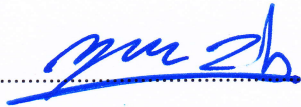

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. สำเริง รักซ้อน)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)


..... กรรมการ
(ดร. เทียง ชิวะเกตุ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ให้กับข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่มีส่วนช่วยเหลือในการจัดการปริญญาบัตรครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำปริญญาบัตร อีกทั้งขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อมาโนช คุณแม่พนอ บุตรเชื้อไทย และพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

นำพล บุตรเชื้อไทย

55910300: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: มวลรวมจากเศษคอนกรีต/ เถ้าถ่านหิน/ การแทรกซึมคลอไรด์/ การกัดกร่อนเหล็ก/
กำลังอัด/ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์/ สิ่งแวดล้อมทะเล/ โครงสร้างจุลภาค
นำพล บุตรเชื้อไทย: กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กใน
คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา
3 ปี (COMPRESSIVE STRENGTH, CHLORIDE PENETRATION AND STEEL CORROSION
OF RECYCLED COARSE AGGREGATE CONCRETE CONTAINING FLY ASH UNDER
3-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์:
วิเชียร ชาลี, ปร.ค., 112 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ สัมประสิทธิ์
การแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็ก กำลังอัดและ โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้
มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจาก
แม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนที่ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50
โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50 โดยหล่อ
ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม. และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. สำหรับทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดตามลำดับ
และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20,
50 และ 75 มม. บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่
ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี และเก็บตัวอย่างมาทดสอบหาปริมาณ
คลอไรด์ การเกิดสนิมของเหล็ก กำลังอัด และ โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต

จากผลการศึกษา พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน
เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตลง ส่งผลให้ลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ
คลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้
คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ
แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทาน
การแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปตามที่ ACI 201.2R ได้แนะนำไว้

55910300: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: RECYCLED COARSE AGGREGATE/ FLY ASH/ CHLORIDE PENETRATION/
STEEL CORROSION/ COMPRESSIVE STRENGTH/ MARINE ENVIRONMENT/
MICROSTRUCTURE

NUMPON BUTCHUEATHAI: COMPRESSIVE STRENGTH, CHLORIDE
PENETRATION AND STEEL CORROSION OF RECYCLED COARSE AGGREGATE
CONCRETE CONTAINING FLY ASH UNDER 3-YEAR EXPOSURE IN MARINE
ENVIRONMENT ADVISORY COMMITTEE: WICHIAN CHALEE, Ph.D., 112 P., 2017.

This research aims to study the effect of fly ash on chloride penetration, chloride diffusion coefficient, steel corrosion, compressive strength, and microstructures of concrete made of recycled coarse aggregate exposed to marine environment for 3-year. Mae Moh fly ash was used to replace Portland cement type I at the percentage by weight of 0, 15, 25, 35 and 50, respectively. The water to binder ratios of 0.40, 0.45 and 0.50 were used. Concrete cube specimens of $200 \times 200 \times 200$ mm and cylindrical specimens of $\phi 100 \times 200$ mm were casted for investigating chloride penetration and compressive strength of concrete, respectively. The round bars with diameter of 12 mm and length of 50 mm were embedded in the cube specimens at covering depth of 10, 20, 50 and 75 mm. All specimens were cured in tap water for 28 days before being exposed to marine environment. At the end of curing period, the specimens were placed in the tidal zone of marine environment for 3 years and then the specimens were collected from marine site to determinate chloride penetration, steel corrosion, compressive strength and microstructures.

Based on the experimental results, it was found that fly ash concrete with recycled coarse aggregate had significantly lower chloride diffusion coefficient than those of Portland cement concrete without fly ash. When the W/B ratio of concrete reduced, the decrease of chloride diffusion coefficient in concrete without fly ash was higher than that of fly ash concrete. Moreover, utilization of fly ash at the amount of 15% and 25% by weight of binder with W/B at 0.40 to replace Portland cement in concrete in recycled coarse aggregate was appropriate to use in marine environment, because their compressive strength and chloride penetration resistance were agreed with ACI 201.2R.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตของการศึกษา	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
การรีไซเคิลเศษปูนและกากคอนกรีต	4
คุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า	8
ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต.....	12
การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์.....	14
ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	17
ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	18
การป้องกันการกัดกร่อน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล...	21
การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสาเหตุทางชีวภาพ.....	22
ระยะคอนกรีตหุ้ม	23
การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	24
วัสดุปอชโซลาน	25
ปฏิกิริยาปอชโซลาน	26
เก้าถ่านหิน.....	27
โครงสร้างจุลภาค	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีการศึกษา.....	43
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	43
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	43
วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่างเมื่อ 3 ปีที่แล้ว	46
วิธีการศึกษา.....	51
การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1152.....	54
การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM C 1218.....	55
การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค	55
การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต.....	55
การทดสอบกำลังของคอนกรีต.....	57
4 ผลการทดลองและการอภิปราย	58
คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ...	58
คุณสมบัติของมวลรวม	61
คุณสมบัติของน้ำทะเล	62
กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเล เป็นเวลา 3 ปี	62
การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่ ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	66
การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต.....	73
สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D _c).....	76
ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต	82
โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี	85
5 สรุปผลการทดลอง	89

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	101
ประวัติย่อของผู้วิจัย	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา	9
2-2 การทดสอบหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ	10
3-1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	48
4-1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	60
4-2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน	61
4-3 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี	62
4-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี	62
4-5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	67
4-6 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3 ปี.....	74
4-7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Dc) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม จากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	78

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปจากคอนกรีตสดที่เหลือจากการผสม..... 5
2-2	การคัดแยกวัสดุบอกจากคอนกรีตสด 5
2-3	กระบวนการบดเศษคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว 6
2-4	ขนาดคอนกรีตที่ผ่านการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง 7
2-5	ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มาจากเศษคอนกรีตเหลือใช้ที่ใช้แทนวัสดุดิบ 7
2-6	ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล 13
2-7	การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต 15
2-8	แสดงการแตกร้าว หลุดร่อน ของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก 17
2-9	แผนภาพแสดงการดึงดูคแบบแคปิวลารี..... 19
2-10	แผนภาพแสดงการดึงดูคไอออนเข้าไปในคอนกรีต..... 20
2-11	Scanning Electron Microscope..... 35
2-12	Scanning Electron Microscope : SEM 36
2-13	ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว 37
3-1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 44
3-2	รูปแบบและตำแหน่งและขั้นตอนการฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต 50
3-3	สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 51
3-4	การเจาะตัวอย่างคอนกรีตให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 50 x 200 มม ² 52
3-5	ตัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกหนาชั้นละ 10 มม. 52
3-6	การบดตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์ 53
3-7	การวัดพื้นที่การเกิดสนิมในเหล็กโดยใช้กระดาษกราฟใส 56
3-8	วัดการสูญเสียน้ำหนักของสนิมในเหล็กเสริม 57
3-9	เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ยี่ห้อ ELE 57
4-1	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1..... 59
4-2	ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ..... 59
4-3	ขนาดผลของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ 61
4-4	ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี 65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เมื่อเทียบกับบ่มน้ำประปา ที่อายุ 28 วัน	65
4-6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี..	68
4-7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลใน สภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี.....	72
4-8 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3 ปี.....	75
4-9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Dc) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม จากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่น้ำสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	77
4-10 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์.....	80
4-11 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	82
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	83
4-13 การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ระดับ ความลึก 50 มม. หลังแช่น้ำในสภาวะแวดล้อมทะเล 3 ปี	84
4-14 ภาพขยาย Scanning Eletron Microscopy (SEM) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจาก เศษคอนกรีตที่มี W/B = 0.40 หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี.....	86

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เมื่อใช้งาน โครงสร้างไประยะหนึ่ง มักประสบปัญหาต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความทนทานของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในทะเลหรือบริเวณชายฝั่ง มักจะประสบ ปัญหาต่าง ๆ อย่างมากจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งการกัดกร่อนอย่างรุนแรงบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดสีของ กรวดหรือทราย ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตบางลง ส่งผลต่อเนื้อให้เกิดกระบวนการกัดกร่อน ทางเคมีได้ง่ายขึ้น เนื่องจากในน้ำทะเลประกอบด้วยคลอไรด์และซัลเฟต โดยการทำลายของ ซัลเฟตจะขึ้นกับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น หากมีปริมาณมากพอก็จะส่งผลให้คอนกรีต เกิดการขยายตัวและแตกร้าว ทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตลดลง ส่วนคลอไรด์ จะเข้าไปทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เกิดการขยายตัว และทำให้คอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมเกิด การแตกร้าว ยิ่งเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวก็จะส่งผลให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมากขึ้นอีก เนื่องจากสารต่าง ๆ สามารถเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ง่ายขึ้นตามรอยแยก จากสาเหตุที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตมีความสำคัญอย่างมากและ ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งถ้าละเลยก็จะส่งผล ตามมาในหลาย ๆ ด้าน ทั้งความสามารถในการใช้งาน อายุการใช้งานที่สั้นลง และยังก่อให้เกิด ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่สูง ซึ่งในบางครั้งอาจจะสูงมากกว่าการก่อสร้างโครงสร้างนั้นใหม่อีก ก็ได้

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะ ทรายจากแหล่งที่อยู่บริเวณใกล้ทะเล แต่ปัญหาที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งกลไกการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ที่ต้องคำนึงถึงหลายอย่าง เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดคาпилลารี (Capillary suction) และการซึมผ่าน (Permeability) เป็นต้น (ทวิชัย สํารายวานิช, 2552; วิเชียร ชาลี, 2552)

มวลรวมจากเศษคอนกรีต คือ การนำมวลรวมจากสิ่งปลูกสร้างที่ถูกรื้อถอนมาใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติ โดยนำเศษคอนกรีตที่แข็งตัวมาย่อยให้มีขนาดลดลง ซึ่งคุณสมบัติที่ได้จะดีกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมจากธรรมชาติ เช่น กำลังรับแรงอัด การต้านทานการซัดสี และการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น (Hansen, & Narud, 1983; Ravindrarajah, & Tam, 1985) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้คุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากธรรมชาติแต่เมื่อใช้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความทึบน้ำและมีความแข็งแรงก็สามารถพัฒนาคอนกรีตดังกล่าวให้สามารถใช้งานได้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้เพสต์จากเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีสามารถทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นในช่วงหลังได้ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยใช้เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินน่าจะเป็นแนวทางที่ดีและเหมาะสม เพราะเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมกับมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งเพื่อผลิตคอนกรีตใหม่ให้สามารถใช้งานได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงผลการใช้เถ้าถ่านหินต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเพื่อต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณเถ้าถ่านหินที่มีต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็กและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 3 ปี
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) จากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล 3 ปี
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 3 ปี

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ เพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45 และ 0.50 โดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. เพื่อทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริม การแทรกซึมของคลอไรด์ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์และโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล ตลอดจนหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100×200 มม² เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วย หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายหาดโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี เมื่อครบเวลาที่กำหนด จึงนำคอนกรีตมาทำการเจาะทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระ (ตามมาตรฐาน ASTM C 1218) และคลอไรด์ทั้งหมด (ตามมาตรฐาน ASTM C 1152) ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต สักรวจการกัดกร่อนของสนิมเหล็ก และทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อได้ทราบถึงผลของปริมาณเถ้านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ การเกิดสนิมเหล็กและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 3 ปี
2. เพื่อได้ทราบถึงผลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (Chloride binding capacity) จากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล 3 ปี
3. เพื่อได้ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึง การรีไซเคิล เศษปูนและกากคอนกรีต คุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า เช่น หน่วยน้ำหนัก อัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ และความต้านทาน การสึกกร่อน คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าเป็นมวลรวม ผลกระทบของ น้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีต เป็นสนิม การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน แก้วถ่านหิน การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สนับสนุนถึงการนำเอาเศษ คอนกรีตเก่าที่ได้จากการย่อยคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่

การรีไซเคิลเศษปูนและกากคอนกรีต

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตคอนกรีตมีจำนวนมาก กระจายตัวตามพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ ซึ่งต้องใช้วัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตสำเร็จเป็นจำนวนมาก เช่น หินกรวด ทราย ปูนซีเมนต์ การผลิตปูนซีเมนต์สำเร็จดังกล่าวได้มีการกำหนดปริมาณปูนสำเร็จมากกว่าปริมาณ ที่ออกแบบไว้ เพื่อเป็นการรองรับปัญหาที่จะเกิดขึ้นกรณีเมื่อปูนไม่พอกับแบบการก่อสร้าง ส่วนที่เหลือจากการผลิตปูนดังกล่าวผู้ประกอบการได้นำเศษปูนไปถมที่ ซึ่งยังไม่มีมูลค่าและยังไม่ เกิดประโยชน์เท่าที่ควร ดังนั้นการหาแนวทางในการเพิ่มมูลค่าจากเศษปูนที่เหลือจากการผลิตจึง เป็นทางออกที่ดีน่าจะเกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านการลดปริมาณของเสียและการลดปัญหาการใช้ ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง (ประจักษ์ เข็มบุบผา, 2548; ปกป้อง รัตนชู, 2551)

1. การเพิ่มมูลค่าเศษคอนกรีต

ในอดีต การจัดการเศษคอนกรีตที่เหลือจากกระบวนการผสมหรือก่อสร้าง ส่วนใหญ่ นำไปกำจัดด้วยวิธีการนำไปถมที่ แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเพิ่มมูลค่าของเศษ คอนกรีต โดยมีแนวทางดังนี้

1.1 การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีต (Concrete products)

การแปรรูปผลิตภัณฑ์คอนกรีตเป็นการนำคอนกรีตสดที่มีคุณสมบัติดีอยู่ผลิตเป็นคอนกรีตสำเร็จรูป (Concrete products) เช่น แผ่นคอนกรีตปูพื้นอิฐบล็อก (ภาพที่ 2-1)



ภาพที่ 2-1 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปจากคอนกรีตสดที่เหลือจากการผสม

1.2 การคัดแยกวัสดุบอกจากคอนกรีตสดเพื่อนำไปใช้งานใหม่ (Recycling aggregate)

การคัดแยกวัสดุบอกจากคอนกรีตสดเพื่อนำไปใช้งานใหม่เป็นการคัดแยกคอนกรีตสดที่เหลือจากการผลิตออกเป็นวัสดุบดที่สะอาด เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานใหม่ เช่น หิน ทราย และน้ำปูน เป็นเศษคอนกรีตสดที่ยังไม่แข็งตัวมาทำการล้างทำความสะอาด ทำการคัดแยก หินกรวดและทราย เพื่อนำมาเป็นวัสดุบดในการผสมคอนกรีตใหม่ ส่วนน้ำปูนที่เหลือจะนำมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตใหม่เช่นกัน (ภาพที่ 2-2 แสดงการคัดแยกวัสดุบดออกจากคอนกรีตสด)

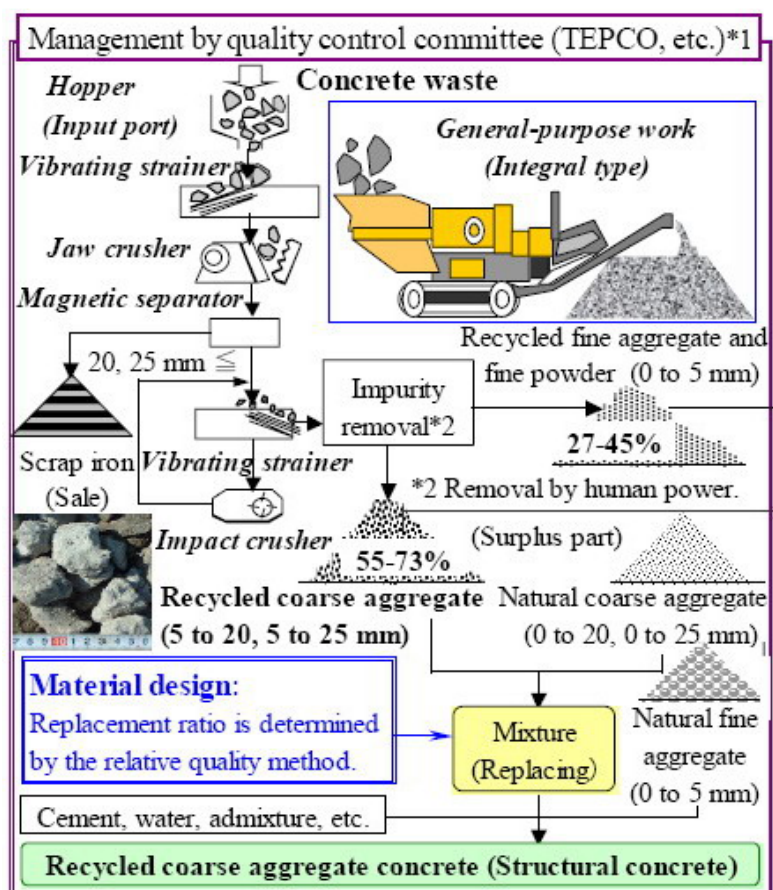


ภาพที่ 2-2 การคัดแยกวัสดุบดออกจากคอนกรีตสด

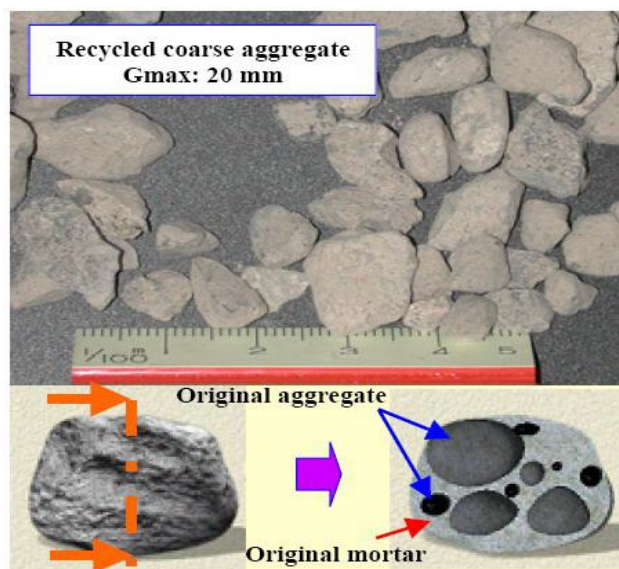
1.3 การใช้เศษคอนกรีตเป็นวัสดุถมมวลรวม (Recycling aggregate concrete)

(ประจักษ์ เข็มบุบผา, 2548)

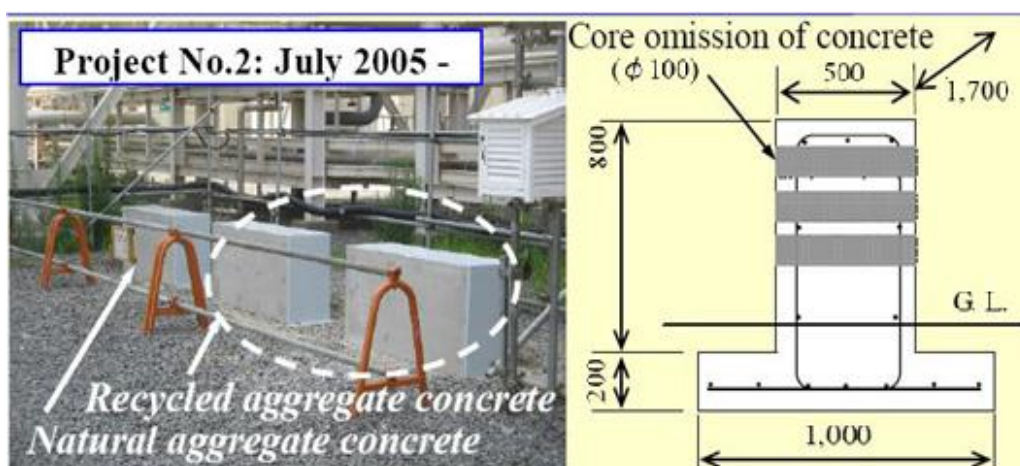
การใช้เศษคอนกรีตเป็นวัสดุถมมวลรวมเป็นการนำเศษคอนกรีตแข็งตัวแล้วมาเป็นมวลรวม (หิน ทราย) ทดแทนจากแหล่งธรรมชาติโดยนำคอนกรีตที่เหลือจากการผลิตที่แข็งตัวแล้วนำมาบดย่อยให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นวัสดุทดแทน หิน ทราย ที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยภาพที่ 2-3 แสดงกระบวนการบดเศษคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีขนาดเล็กลง ส่วนภาพที่ 2-4 แสดงขนาดคอนกรีตที่ผ่านการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง และภาพที่ 2-5 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มาจากเศษคอนกรีตเหลือใช้ที่ใช้แทนวัสดุถม



ภาพที่ 2-3 กระบวนการบดเศษคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (ประจักษ์ เข็มบุบผา, 2548)



ภาพที่ 2-4 ขนาดคอนกรีตที่ผ่านการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง (ประจักษ์ เข็มบุบผา, 2548)



ภาพที่ 2-5 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มาจากเศษคอนกรีตเหลือใช้ที่ใช้แทนวัสดุดิบ (ประจักษ์ เข็มบุบผา, 2548)

โดยสรุปแล้วแนวทางการเพิ่มมูลค่าของเศษคอนกรีตข้างต้นเป็นการหาแนวทางในการจัดการเศษคอนกรีตที่เหลือจากการก่อสร้าง เป็นการลดปริมาณการขออนุญาตทิ้งกากของเสียเหลือใช้และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรอีกทางหนึ่ง ซึ่งวิธีการจัดการเศษกากคอนกรีตมีหลากหลายวิธี โดยวิธีต่าง ๆ ดังกล่าว เป็นแนวทางที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาการกำจัดเศษกากคอนกรีตและการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง

คุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า

เศษคอนกรีตเก่าเป็นสิ่งที่ได้จากการทุบหรือระเบิดเพื่อทำลายอาคารและโครงสร้างต่าง ๆ โดยทั่วไปคอนกรีตที่ได้จากการทำลายอาคาร และ โครงสร้างต่าง ๆ จะมีสิ่งปนเปื้อน เช่น เหล็กเส้น เศษอิฐ ไม้พลาสติก และแก้ว ในบางกรณีอาจมีการปนเปื้อนของคลอไรด์และซัลเฟตด้วย ในปัจจุบันการใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมจากธรรมชาติมีปริมาณลดลง และการกำจัดคอนกรีตที่ได้จากการทำลายอาคารและ โครงสร้างต่าง ๆ ก็ทำได้ยาก ดังนั้นการนำเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติให้ได้ผลดี จึงต้องทำการศึกษาคูณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวม และความต้านทานการสึกกร่อน เป็นต้น

1. หน่วยน้ำหนัก

Hansen and Narud (1983) ได้หาความหนาแน่นของมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2,340-2,490 กก/ม³ โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเศษคอนกรีตเก่า นอกจากนี้ Hasaba, Kawamura and Toriik (1983) ทำการศึกษาเรื่องดังกล่าวและได้ผลเช่นเดียวกัน และยังพบว่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มม. ที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2,430 กก/ม³ และ 2,310 กก/ม³ ตามลำดับ ซึ่ง Narud (1981) พบว่า ความหนาแน่นของมวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2,279 กก/ม³ ในกรณีที่เศษคอนกรีตเก่าได้จากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.70

2. การดูดซึมน้ำ

โดยทั่วไปเศษคอนกรีตเก่าที่นำมาใช้แทนมวลรวมมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 3 ถึง 12 เท่า โดยขึ้นอยู่กับขนาดละเอียดของมวลรวมแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษา	การดูดซึมน้ำ (%)			
	มวลรวมจากเศษคอนกรีต		มวลรวมจากธรรมชาติ	
	Coarse	Fine	Coarse	Fine
Kikuchi et al. (1988)	4.0-5.7	7.3-10.0	0.5-1.6	1.2
Kakizaki et al. (1988)	3.5-6.3	9.4-11.8	1.4	3.3
Mukai (1978)	6.7	9.4	0.8	1
Ikeda et al. (1988)	5.7	11.1-11.7	0.9	1.4
Hansen & Marga (1983)	3.3-10.0	11.4-13.1	0.6-1.1	2.4
Yanagi (1988)	4.5-5.3	4.5-9.7	0.6	1.8
Ravindrajah & Tam (1985)	5.7	6.2	0.3	0.6
Hansen et al. (1983)	3.8-5.0	8.7	0.8-1.8	3.7
Hasaba et al. (1983)	7	11	-	-
B.C.S.J. (1978)	3.6-8.0	8.3-12.1	-	-

จากการศึกษาของ สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B.S.C.J. (1978) พบว่า เศษคอนกรีตเก่าที่นำมาใช้ทดแทนมวลรวมควรมีอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 7 และ 13 ในกรณีเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ นอกจากนี้ Hansen and Marga (1983) ให้คำแนะนำว่าการทดสอบหาการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่าโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM C 128 ไม่เหมาะสมเพราะมีความคลาดเคลื่อนมากในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งเนื่องจากมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่ายึดเกาะกันแน่น

3. ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ

เศษคอนกรีตเก่าประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มวลรวมจากธรรมชาติและซีเมนต์เพสต์ที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม ซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมจะส่งผลต่อลักษณะของมวลรวมคือ ผิวของมวลรวมมีความพรุน จึงทำให้มีการดูดซึมน้ำสูง ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมโดยใช้วิธี Linear Transverse Method ตามมาตรฐาน ASTM C 457 หรือการแช่มวลรวมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อหาปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวม ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การทดสอบหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ

การศึกษา	ปริมาณซีเมนต์เพสต์ (%)	
	มวลรวมหยาบ จากเศษคอนกรีต	มวลรวมละเอียดจากเศษ คอนกรีต
Hansen and Narud (1983)	25-39	58-64
Ravindrajah and Tam (1985)	20	-
Kaga et al. (1988)	20-30	45-60
Sayamipak (1995)	40	-

โดย Hansen and Narud (1983) พบว่า ซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบมีปริมาณร้อยละ 25-39 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 16-32 มม. เศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 8-16 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 40 เศษคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 4-8 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 60 ส่วน Hasaba, Kawamura, and Toriik (1983) พบว่า ซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบมีปริมาณร้อยละ 35.5 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 5-25 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 24 เมกะปาสกาล ร้อยละ 36.7 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 41 เมกะปาสกาล และร้อยละ 38.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัด 51 เมกะปาสกาล และสมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B. S. C. J. (1977) พบว่า ปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าหาได้จากการนำมวลรวมหยาบแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะผิวของมวลรวมหยาบโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

4. ความต้านทานการสึกกร่อน

ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบลอสเองเจลิสเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของมวลรวมหยาบในการต้านทานการสึกกร่อนและการกระแทกจากมาตรฐาน ASTM C 33 มวลรวมหยาบที่ใช้งานคอนกรีตทั่วไปเมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่องลอสเองเจลิสแล้วจะต้องมีส่วนสึกกร่อนไปไม่เกินร้อยละ 50 และสำหรับงานถนนต้องไม่เกินร้อยละ 40 Hansen and Narud (1983) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสเองเจลิสมีค่าประมาณร้อยละ 22.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 16-32 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังสูง และร้อยละ 41 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 4-8 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ ขณะที่สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B. S. C. J. (1977) พบว่า การสึกกร่อน

ของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสเองเจลิสมี่ค่าร้อยละ 25.1 ถึง 35.1 ส่วน Yoshikane (1995) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสเองเจลิสมี่ค่าประมาณร้อยละ 20.4 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าขนาด 5-13 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังสูง และ ร้อยละ 28.7 สำหรับเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ และ Sayamipuk (1995) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าโดยทดสอบจากเครื่องทดสอบลอสเองเจลิสมี่ค่าร้อยละ 43.4

5. คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่า

5.1 กำลังอัดและการพัฒนากำลัง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Kashino and Takahashi (1988); Kawakami, Wada, and Sazukawa (1989); L. Ch. (1991) พบว่า การใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 จะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตใหม่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมโดยใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติและ Buck (1973) พบว่า การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังต่ำมาทำคอนกรีตไม่ส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากนักแต่การใช้สารลดน้ำเพื่อลดปริมาณความต้องการน้ำจะส่งผลต่อกำลังอัดมากกว่า โดยที่ Kasai and Fujii (1989); Ravindrarajah and Tam (1985) และ สมาคมผู้รับเหมาของญี่ปุ่น B. S. C. J. (1977) พบว่า กำลังของคอนกรีตที่นำมาทำเป็นมวลรวมจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตใหม่ ได้แก่ ความพรุนและความทนทาน การใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 20 ไม่ส่งผลต่อกำลังอัด การใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 100 จะทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 8-40 ขณะที่ Rasheeduzzafar and Khan (1984) ได้พยายามทำคอนกรีตกำลังสูงขนาด 40 เมกะปาสคาล โดยใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังอัดปานกลาง (23 เมกะปาสคาล) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากัน ส่วน Malhotra (1976); Soshiroda (1983) พบว่า การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าและทราย มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และสรุปว่าการใช้มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่าแทนที่ทรายจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง และมีการซึมผ่านเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีต

5.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต คือ กำลังอัด แต่ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต นอกจากกำลังอัดแล้วอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของมวลรวมหยาบ จากการทดลองของ Frondistou-Yannas (1977) พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าและทรายมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติประมาณร้อยละ 33 เช่นเดียวกับ Gerardu and Hendriks (1985) พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าและทรายมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติมากที่สุดไม่เกินร้อยละ 15 ในกรณีที่แทนที่ทรายด้วยมวลรวมละเอียดจากเศษหินจากเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติมากที่สุดไม่เกินร้อยละ 40 และ Kakizaki, Harada and Soshiroda (1988) พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติร้อยละ 25-40 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่น้อยที่สุดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่าคำนวณจากสมการที่ 2-1

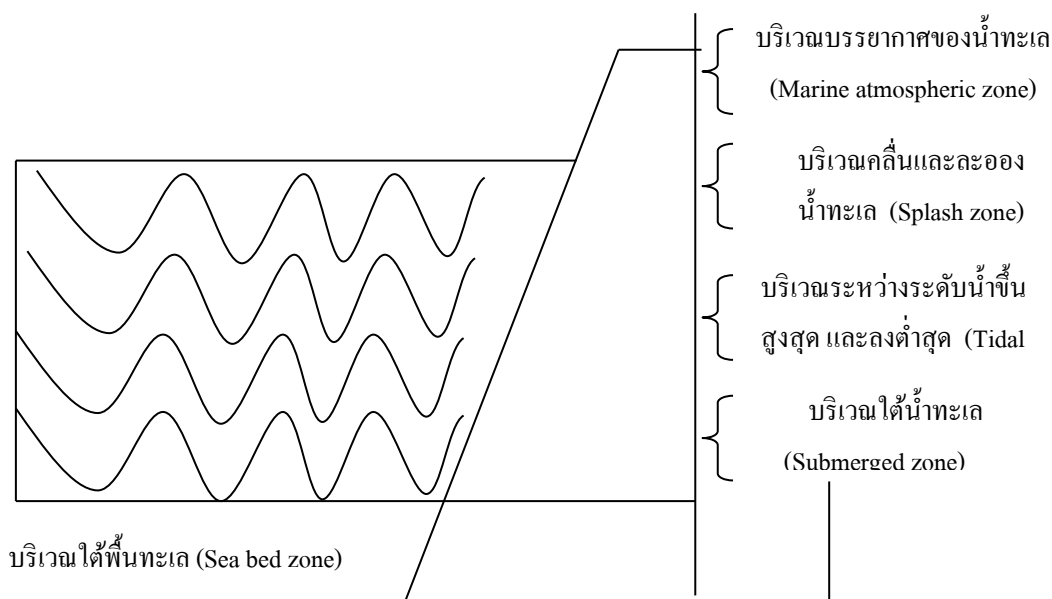
$$E_c = 2.1 \times 10^5 [W_c / 2.3]^{1.5} [f_c' / 200] \quad (2-1)$$

เมื่อ E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กก/ซม²
 f_c' = กำลังอัดของคอนกรีต กก/ซม²
 W_c = ความหนาแน่นของคอนกรีต ตัน/ม³

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพ โดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราย กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการซัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่าง ๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มียรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (วิเชียร ชาติ, 2552) (ภาพที่ 2-6)



ภาพที่ 2-6 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

1. บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2. บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าการเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ

3. บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลงคอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนของจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

4. บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

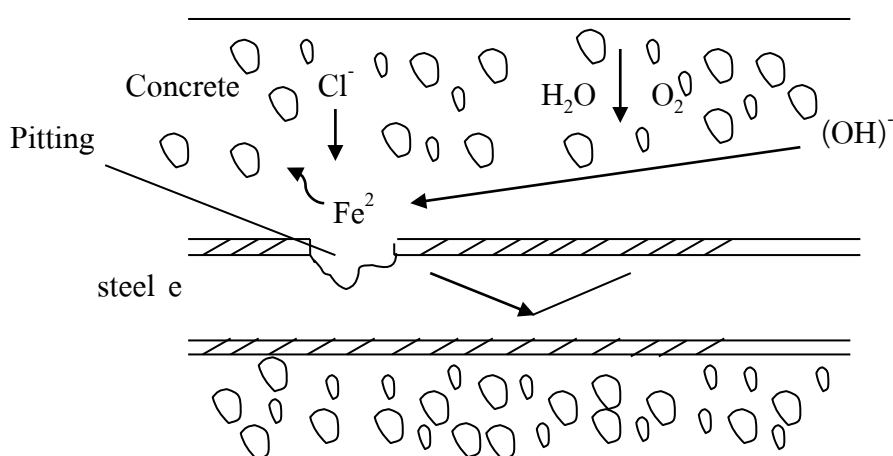
5. บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลกระทบต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 (Neville, 1996) การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ (Gjorv & Vennesland, 1976)

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์จะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีต

ไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกัน น้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามอิออนของ คลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มี ฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่เหล็กก็จะเป็นสนิม (ภาพที่ 2-7) (ทวีชัย สำราญวานิช, 2552; วิเชียร ชาลี, 2552)



ภาพที่ 2-7 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต

1. กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) สามารถ เกิดได้ซึ่งความเป็นต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นนั้น จะมีค่า PH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นต่าง ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลง ได้ด้วยหลายสาเหตุต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์ เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีคอนกรีตมีความพรุนมาก

1.2 มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อิออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สถานะสารละลายและ พอเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่ หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

1.3 มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้ว ออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริม โดยผ่าน ทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือ แพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่

ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นต่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น (ดังสมการที่ 2-2)



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic Process) ต่อจากนั้น 2e^- ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) (ดังสมการที่ 2-3)



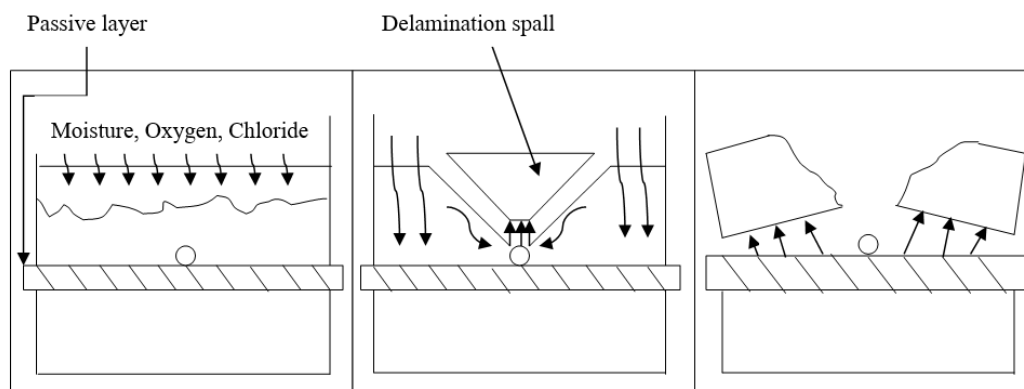
ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้น (ดังสมการที่ 2-4)



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยาข้างต้นนี้อาจเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งหมายความว่าสนิมอาจเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาณมากกว่าเนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่า (ทวิชัย สารานุกรม, 2552) และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (ภาพที่ 2-8) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรจนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็ก

อย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง อย่างเช่น น้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลกระทบต่อการใช้งานรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2-8 การแตกร้าว หลุดร่อน ของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก

ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทไอออน (Cation) และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น (วิเชียร ชาลี, 2552) โดยปริมาณ คลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์มี 2 ประเภท (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543) 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 ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

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

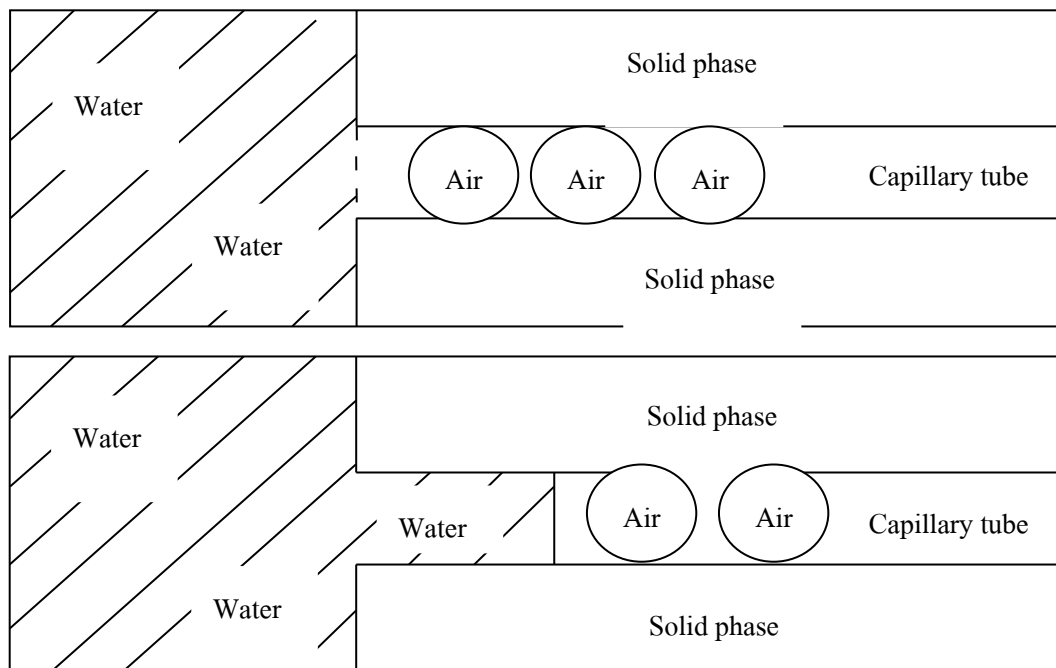
ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยอออนของคลอไรด์ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าว ในที่สุดคลอไรด์ของเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีต (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543) โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจาก คลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาวะแวดล้อมทะเลจากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตด้วยกระบวนการต่อไปนี้ (วิเชียร ชาลี, 2552)

การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอออน โดยคลอไรด์อออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อออนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อออนต่ำ

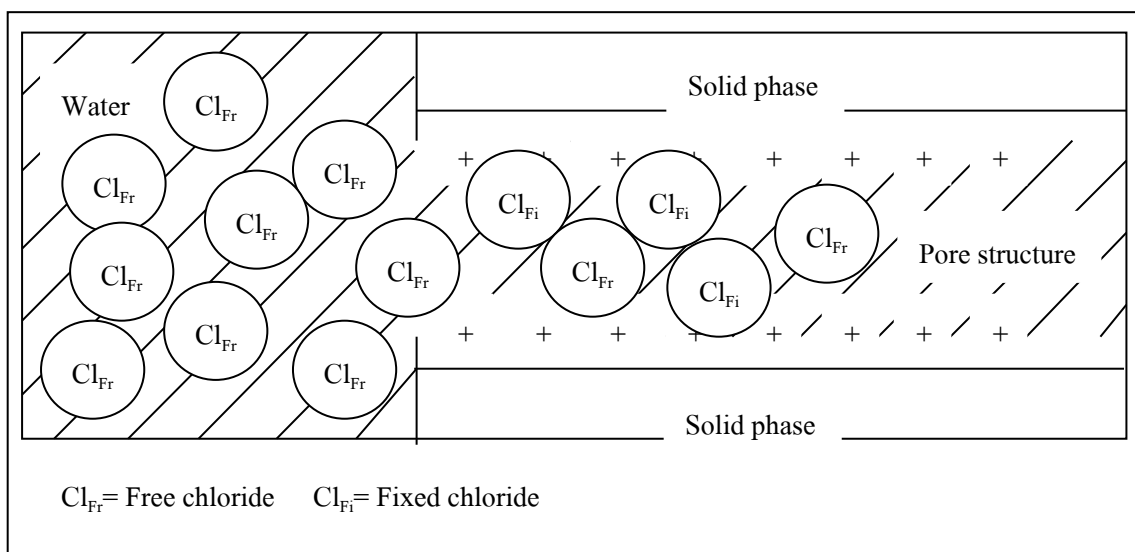
การดึงดูดแบบแคปิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบแคปิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต (ภาพที่ 2-9) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพ

แห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบแคปิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น



ภาพที่ 2-9 การดึงดูดแบบแคปิลลารี

การดึงดูดไอออน (Ion absorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์การนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออน ซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีต และสะสมอยู่ในบริเวณนั้น (ภาพที่ 2-10)



ภาพที่ 2-10 การดึงคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต

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

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้ง โดยการแพร่ หรือ การซึมผ่านจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้น ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีต และสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้ง โดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้ ไอออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่สัมผัสน้ำ

ทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่า คอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณไอออนของ คลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้น ถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ออกไปได้ และเป็นที่น่าทึ่งว่า การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทาน การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งไม่เหมาะกับงานคอนกรีตหนา และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมี สารละลายซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งที่สำคัญ ในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมี ความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะ ส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมี ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะ แวดล้อมทะเลควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์ และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้น ควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมผ่านคอนกรีต ต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B Ratio) ต่ำ มีอัตรา

ส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่า W/C Ratio อยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 ชม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต) การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์ อีพ็อกซี โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีหรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (ทวีชัย สำราญวานิช, 2552; วิเชียร ชาติ, 2552)

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรง อย่างเช่น สภาพแวดล้อมทะเล การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 บางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอีกทางหนึ่งที่สามารถทำให้คอนกรีตสามารถทนทานการกัดกร่อนต่อสภาพแวดล้อมทะเล

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสาเหตุทางชีวภาพ (Biological degradation)

1. คอนกรีตจะเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพมี 2 กรณี ดังต่อไปนี้
 - 1.1 การทำลายโดยตรงทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต เช่น รา ตะไคร่น้ำ รากพืช เป็นต้น
 - 1.2 การทำลายโดยอ้อมทางเคมีของสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย

ในกรณีหลังนั้นมักจะพบในระบบระบายน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากบ้านเรือน ซึ่งมักจะมีความรุนแรงในระบบที่มากกว่าระบบไหลเปิด (Open channel) โดยทั่วไป คอนกรีตมีความคงทนต่อความเสียหายทางชีวภาพเนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นด่าง

แต่อย่างไรก็ตาม ในสิ่งแวดล้อมแบบเขตร้อน สิ่งมีชีวิตพวก รา ตะไคร่น้ำ และ แบคทีเรียบางชนิด สามารถเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนในโตรเจนให้กลายเป็นกรด Nitric ซึ่งเป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ด้วย

กลไกของการทำลายโดยอ้อมทางเคมีของแบคทีเรีย

เนื่องจากน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากบ้านเรือนมักจะมีปริมาณของสารอินทรีย์สูง ขณะที่ในระบบระบายน้ำเสีย หรือน้ำเสียเองมักจะมีปริมาณออกซิเจนน้อย ในสภาวะที่ขาดออกซิเจนแบบนี้ จะมีแบคทีเรียชนิดที่สามารถย่อยสลายซัลเฟต ซึ่งจะเปลี่ยนซัลเฟตในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งจะละลายไปในความชื้นบนผิวของคอนกรีต กลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งกัดกร่อนคอนกรีตได้ ดังนั้นในสภาวะของระบบระบายน้ำเสียนี้ จะมีการทำลายคอนกรีตทั้ง โดยซัลเฟตซึ่งอยู่ในน้ำเสียเอง และโดยกรดซัลฟูริกที่จะรุนแรงบริเวณผิวเป็ยกขึ้นเหนือระดับน้ำเสีย (ทวิชัย สำราญวานิช, 2552; วิเชียร ชาลี, 2552)

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบแน่นของคอนกรีตและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจึงเป็นปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กขั้นต่ำ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

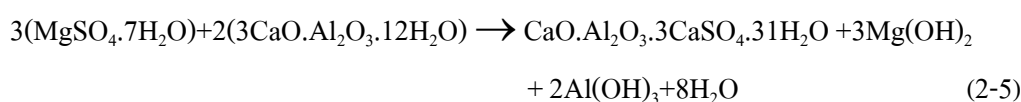
อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก อันดับแรก คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่าง ๆ สามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้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

การเลือกใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้าง อาจวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง

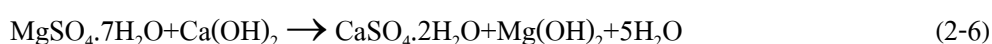
การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

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

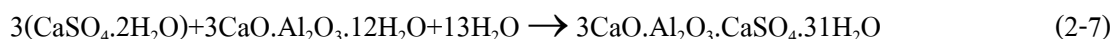
สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรง คือ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟตอื่น ๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ (Mather, 1966) แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2-5)



แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ (2-6)



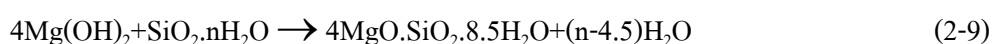
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ (2-7)



นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ (2-8)



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2-7 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต ดังสมการที่ 2-6 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ (2-9)



ยิปซัมที่เกิดตามสมการที่ (2-6) และ (2-8) และแคลเซียมซัลโฟลูมินตที่เกิดตามสมการที่ (2-5) และ (2-7) มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ (2-8) และ (2-9) เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไปตามสมการที่ (2-8) ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมินไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัมแคลเซียมซัลโฟลูมินต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟต ลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ (วิเชียร ชาลี, 2552)

วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ตามคำจำกัดความของ ASTM C618 หมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับค่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มี

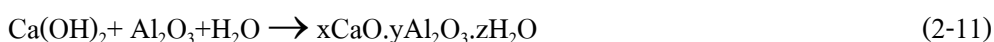
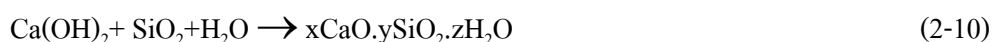
คุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์ม น้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้ (ทวีชัย สำราญวานิช, 2552; วิเชียร ชาลี, 2552)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากปฏิกิริยา 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)

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 (2-10) และ (2-11) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay, Bijen, & Haan, 1985) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1983)



เถ้าถ่านหิน (Fly ash)

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly Ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า ในบางกรณีที่เผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (ประมาณ 1,500 องศาเซลเซียสหรือ สูงกว่า) เถ้าถ่านหินจะหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash)

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินนี้ ประกอบด้วย เถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้นเตาอีกประมาณร้อยละ 20

เถ้าถ่านหินถือได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนผสมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้แต่เถ้าถ่านหินที่ใช้จะเป็นวัสดุปอซโซลาที่ดีมาน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินนั้น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

1. ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

- 1.1 แอนทราไซต์ (Anthracite)
- 1.2 บิทูมินัส (Bituminous)
- 1.3 ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous)
- 1.4 ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด ให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

2. การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

2.1 การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย และ

รวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน แก้วถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นแก้วก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง แก้วถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นแก้วลอยซึ่งในระบบการเผาไหม้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย แก้วถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous particle)

2.2 การเผาความร้อนปานกลาง

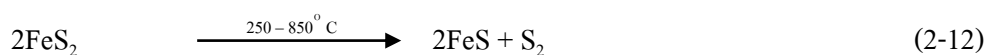
อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion) แก้วถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นแก้วลอย ที่เหลือจะเป็นแก้วหนักหรือแก้วก้นเตา แก้วลอยที่ได้จากการเผาไหม้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบซิลิเกต เป็นแก้วลอยที่เหมาะสมสำหรับแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

2.3 การเผาความร้อนต่ำ

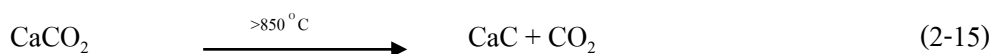
การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส แก้วถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากแก้วถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารประกอบซิลิเกตได้แต่ไม่ดีเท่าแก้วลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ ในกระบวนการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินที่ภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เคาลีนไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาร์คาไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

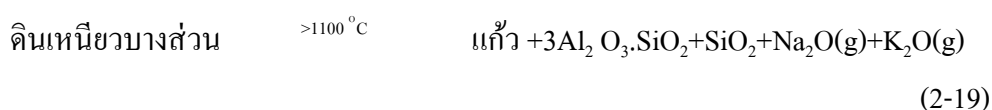
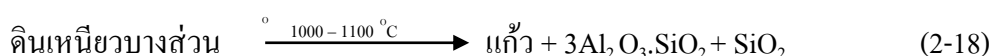
1. ไพไรต์และมาร์คาไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไทต์ ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของแก้วถ่านหิน ดังสมการ



2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO₄) ดังสมการ



3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (Mullite, 3Al₂O₃·SiO₂) และควอตซ์ (SiO₂) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ดังสมการ



4. ควอตซ์ (SiO₂) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว ดังสมการ



จะเห็นได้ว่าถ้าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาระบบนี้ถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO₄ สูงได้ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้ถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มุลไลต์ และควอตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่ การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกลวง (Cenosphere)

3. ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงาน

ความร้อนมาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) ได้แก่

3.1 ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) สูง

3.2 ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ต่ำทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ต่ำด้วย

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

4. รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy phase) เถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่าซิโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหิน

กลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็ก ๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass) เนื่องจากเถ้าถ่านหินกลวงเป็นเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิด ไดซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถ้าถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

5. ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.²/กรัม. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้อัตราที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.²/กรัม. โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 35,000 ซม.²/กรัม

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30

6. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าถ่านหินได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มาตรฐาน ASTM C188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหิน

ส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเม็ดถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเม็ดถ่านหินละเอียด

7. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเม็ดถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

8. การใช้เม็ดถ่านหินในงานคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญ ได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนชั่น ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเช่นกัน

8.1 การทำลายโดยสารซัลเฟต การใช้เม็ดถ่านหินจากแม่เมาะนอกจากจะมีคุณสมบัติของปอชโซลานแล้วยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี ACI 232.2R กล่าวว่า เม็ดถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเม็ดถ่านหิน Class F ซึ่งต้านทานได้ดีมากกว่าการใช้เม็ดถ่านหิน Class C การต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดหรือซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่ปฏิกิริยาปอชโซลานได้เปลี่ยนรูปของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากจะเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตแล้วยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูงกว่า $\text{Ca}(\text{OH})_2$ อย่างมาก

สารซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ทำให้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) หรือเอทริงไทต์ (Ettringite) และซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้ การใช้เม็ดถ่านหินทำให้การขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตลดลง การลดการทำลายของซัลเฟตยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดถ่านหินที่ลดปริมาณน้ำและเข้าไปแทรกทำให้เพสต์แน่นขึ้นจึงทำให้สารซัลเฟตซึมเข้าสู่เนื้อภายในได้ยากขึ้น

8.2 การทำลายโดยกรด คอนกรีตและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ไม่มากนัก เพราะมีความเป็นด่างสูงและถูกทำลายกรดได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ และ

ส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือของกรคนั้น ๆ ได้ น้ำหนักและกำลังรับแรงของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะลดลงจากการทำลายของกรดซัลฟูริก การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 10 ได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้านหิน

การใช้เถ้านหินหยาบในส่วนผสมมอร์ตาร์สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าการใช้เถ้านหินละเอียดในสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกร้อยละ 5 เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินหยาบทำให้ปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เพราะการใช้เถ้านหินหยาบมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้านหินละเอียดและปูนซีเมนต์ และจากการที่เถ้านหินหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดี

8.3 การซึมผ่านของคลอไรด์ การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นด่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบาง ๆ ของ $Y - Fe_2O_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้รอบนอกของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ คลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตและเมื่อมีปริมาณสูงกว่าระดับวิกฤต (Chloride Threshold Value) จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เถ้านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น

8.4 การเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) เป็นการศึกษาคาร์บอน ไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน การเพิ่มเถ้านหินจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น และการบ่มคอนกรีต 7 และ 28 วัน สามารถลดการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการบ่มเพียงวันเดียว การเลือกส่วนผสมที่มีเนื้อแน่น (Dense) จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนเนชั่นเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างประเภทนี้จึงไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดคาร์บอนเนชั่น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้านหินแม้ว่าจะลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ใช้น้ำมากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชั่นลดลง ดังนั้นการใช้เถ้านหินจึงมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นคอนกรีต

โดยสรุปแล้ว เถ้านหินนิยมนำไปใช้งานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่าเถ้านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก

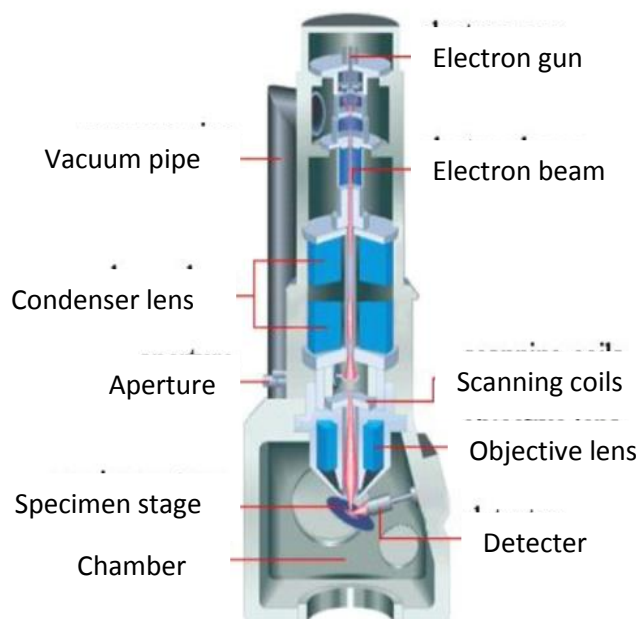
ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าถ่านหินจะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้นทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

โครงสร้างจุลภาค เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลลักษณะของวัสดุ ที่มุ่งศึกษาไปในด้านขนาดเม็ดเกรนของวัสดุ ระยะห่างหรือการจับกลุ่มเรียงตัวของเม็ดเกรน หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์พิเศษในการศึกษา เช่น กล้องไมโครสโคป (Microstructure) เพื่อส่องดูโครงสร้างของวัสดุแต่ละชนิด ที่ตัดมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขัดผิวจนมันเป็นเงา และนำไปทำการกัดกรวด (Etching) ให้ผิวหน้าเป็นหลุม ๆ เล็ก ๆ เพื่อให้แสงกระทบกับหลุมเล็ก ๆ และสะท้อนกลับให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

1. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่ กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่า ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



ภาพที่ 2-11 Scanning Electron Microscope (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสงโดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็กซึ่งอาศัยหลักการ การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า เลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอน แบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่กระเจิง

กลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็น องค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้ จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็น องค์ประกอบในชิ้นงาน

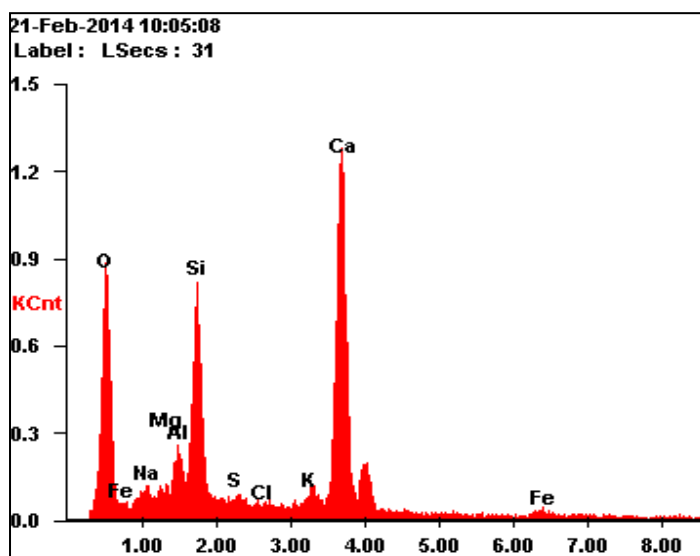
รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการ ที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้ว อิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไป วิเคราะห์หาองค์ประกอบ ของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดย ค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลข อะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) (ภาพที่ 2-12)



ภาพที่ 2-12 Scanning Electron Microscope: SEM

2. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค (Energy Dispersive Spectroscopy: EDX)

ชุดเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS, EDX หรือEDXRF) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของ ธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างการใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDX ทำให้การวิเคราะห์ ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น (ภาพที่ 2-13)



ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จาก EDX ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

Tarun, Shiw and Mohammad (1994) ได้ทำการศึกษาค่าการซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน Class C ในปริมาณมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบ พบว่าระยะต้นกำลังอัดมีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้น และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีค่าการซึมผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ให้ค่าการซึมผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดที่อายุ 90 วัน เนื่องจากเถ้านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงเข้าไปอุดแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าการซึมผ่านคอนกรีตจึงลดลง

Bai, Wild and Sabir (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยเพิ่มความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่ในน้ำทะเลนานขึ้น

Thomas and Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่ในน้ำทะเลอยู่ที่ สิ่งแวดล้อมทะเลในประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนขึ้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น โทมัส (Thomas) รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินและการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

Chindaprasirt, Rukzon and Sirivivatnanon (2008) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าถ่านหินแม่เมาะละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) ปรับให้อัตราไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยใช้มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม ผลการทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 1202 ตามลำดับพบว่าที่อายุ 90 วัน มอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

ประจักษ์ เข็มบุบผา (2548) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน โดยนำมวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบจากห้องทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัด 200, 400 และ $600 \pm 10\%$ กก/ชม² ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ของแต่ละกำลังอัดมาผสมกัน พบว่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ส่วนอัตราจากการดูดซึมน้ำและความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุลและบุรฉัตร ฉัตรวีระ (2542) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ ชนิดแคลเซียมออกไซด์ต่ำ และชนิดแคลเซียมออกไซด์สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30 และ 50 แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราค่า ๆ สามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ดีกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราสูง ๆ มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทุกระดับความเข้มข้น

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โชษฐ์ (2548) ได้ทำการหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ถึง 80 จากนั้นทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมการแทนที่เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้นเช่นกัน ด้านกำลังอัดพบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนอย่างละร้อยละ 20 (เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20) ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ

มนเทียร ทิฆวนิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2549) ได้ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมมีปัญหาการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาานาน

กิตติศักดิ์ คงชนเกษมพร และคณะ (2548) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าถ่านหิน ดินขาวเผา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 0.47 ทุกส่วนผสม จากการศึกษพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 และ

90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าก้นเตา และดินขาวเผา กำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทุกอายุของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะต้านทานได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จะต้านทานได้ดีที่สุด

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2549) ได้ทำการผสมคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย แม่เมาะขนาดต่าง ๆ กันโดยใช้ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 จากนั้นจึงแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 และทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 และ 6 เดือน คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่หยาบ และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

วิเชียร ชาลี และคณะ (2550) ได้หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะไม่แยกขนาด และแยกขนาดละเอียด ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่เผาที่อุณหภูมิสูง และมีคุณภาพดี ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และทำการฝังเหล็กเส้นกลมที่ระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 4 ปี พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด

รัชชัย สาสกุล (2550) ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 หลังจากนั้นจึงนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ (2550) ได้หล่อคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 นำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าผลการทดสอบให้ผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ รัชชัย สาสกุล (2550) และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ

ต่อวัสดุประสานต่ำ ($W/B = 0.45$) จะมีกำลังอัด ความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ($W/B = 0.65$)

วิเชียร ชาลี และคณะ (2550) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ช่วยป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 30 เมกะปาสคาล (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65) สามารถลดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลจาก 50 มม. เหลือ 30 มม. เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50

ปกป้อง รัตนชู (2551) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดและการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าขานอ้อย พบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 4-10 และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้

วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก และวัดพื้นที่สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นหลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็กกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้ ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีต มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น (โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ) และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเถาซานอ้อย แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน อัตราร้อยละ 20, 35, 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ในการปรับปรุง คุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม หยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้ เถาซานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานการใช้เถาซานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อย เศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต เก่าที่ไม่ใช้เถาซานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อม ทะเลของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ตลอดจนการพัฒนาการใช้มวลรวม จากเศษคอนกรีต เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลไม่พบการศึกษา ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงต้องการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหา ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำเถาถ่านหินที่มีมาก ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจาก เศษคอนกรีต ซึ่งเถาถ่านหินเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม ดังนั้น การศึกษา ปริมาณเถาถ่านหิน ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก กำลังอัดของคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์ที่ แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมและ โครงสร้างทางจุลภาค จึงเป็น ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพราะฉะนั้นผลการศึกษานี้จึงได้ศึกษาถึงตัวแปรดังกล่าวเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิกิริยาส่วนผสม คอนกรีตและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสม ตลอดจนเป็นแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริม เหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพและมีความทนทานยิ่งขึ้น โดยใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและเถาถ่านหินในการผลิตคอนกรีต

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุและการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตาม มอก.15-2532
2. ใ้ถ้ำ่านหิน โดยใช้ใ้ถ้ำ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. มวลรวมหยาบที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต
4. ทรายแม่น้ำหยาบ
5. น้ำประปา เพื่อใช้ในการผสมคอนกรีต
6. เหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ฟังไว้ในก้อนตัวอย่าง
7. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ มีโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) กรดไนตริก (HNO_3) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) (ภาพที่ 3-1 (ก))
2. เครื่องบดคอนกรีต (Grinding machine) (ภาพที่ 3-1 (ข))
3. แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 200 มม. (ภาพที่ 3-1 (ค))
4. แบบฟังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ง))
5. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ หิน ทราย
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
7. ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
8. ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
9. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (ภาพที่ 3-1 (จ))
10. เครื่องเจาะคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ฉ))

11. เครื่องตัดคอนกรีต (ภาพที่ 3-1 (ข))
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ภาพที่ 3-1 (ข))
13. เครื่องตัมสาร (ภาพที่ 3-1 (ฉ))
14. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาดต่างๆ (ภาพที่ 3-1 (ญ))
15. ขวดชมพู (ภาพที่ 3-1 (ญ))
16. กระดาษกรอง
17. ปิเปตต์ (pipette) (ภาพที่ 3-1 (ญ))
18. กระจกตวง (ภาพที่ 3-1 (ญ))
19. แท่งแก้ว ที่ตักสาร (ภาพที่ 3-1 (ญ))
20. ครกหิน (ภาพที่ 3-1 (ฉ))
21. บิวเรตต์ (ภาพที่ 3-1 (ฉ))
22. กรวยกรอง (ภาพที่ 3-1 (ฐ))
23. หลอดหยด (Dropper)
24. เครื่องดูดสูญญากาศ (ภาพที่ 3-1 (ฑ))
25. กราฟและปากกาเขียนพลาสติก



(ก) เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



(ข) เครื่องบดคอนกรีต

ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ



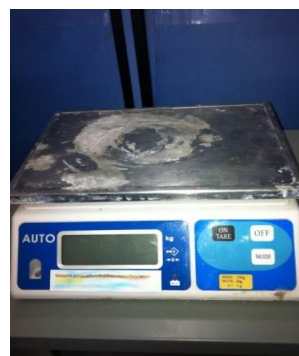
(ค) แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต (ง) แบบฝังเหล็กลงในคอนกรีต (จ) ตะแกรงร้อนมาตรฐาน



(ฉ) เครื่องเจาะคอนกรีต



(ช) เครื่องตัดคอนกรีต



(ซ) เครื่องชั่งน้ำหนัก



(ณ) เครื่องดัดสาร



(ญ) เครื่องแก้วที่ใช้ในการไทเทรต



(ฎ) ครกหิน

ภาพที่ 3-1 (ต่อ)



(ก) บิวเรตต์



(ข) กรวยกรอง



(ค) เครื่องดูดสุญญากาศ

ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

วิธีการทดสอบและเตรียมตัวอย่างเมื่อ 3 ปีที่แล้ว

1. การเตรียมวัสดุทดสอบ

ถ้ำถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

เหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่ใช้ในการทำโครงการนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. นำมาตัดให้มีความยาวท่อนละประมาณ 50 มม.

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของปูนซีเมนต์และถ้ำถ่านหิน

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้ำถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอร์ (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยปริมาตรของวัสดุที่ทำการทดสอบหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันถ้ำถ่านหิน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือถ้ำถ่านหิน ทำให้ปูนซีเมนต์หรือถ้ำถ่านหินแข็งตัวมีปริมาตรเปลี่ยนไป

ทดสอบความละเอียดของถ้ำถ่านหิน โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักวัสดุก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้ำถ่านหิน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแก้ถ่านหินวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลมาทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต

3. การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คืออัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเมื่อ 3 ปีที่แล้ว

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ออกแบบให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และในคอนกรีตใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มีคอนกรีตที่ทำการศึกษา 15 ส่วนผสม และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 50 ถึง 100 มม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมถ่านหินไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. (กก/ม ³)				
	วัสดุประสาน		ทราย	มวลรวมจากเศษคอนกรีต	น้ำ
	ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง	เถ้าถ่านหิน			
40FR00	477	0	767	935	190
40FR15	405	72	767	910	190
40FR25	358	119	767	894	190
40FR35	310	167	767	875	190
40FR50	239	239	767	850	190
45FR00	424	0	767	979	190
45FR15	360	64	767	957	190
45FR25	318	106	767	938	190
45FR35	276	148	767	925	190
45FR50	212	212	767	903	190
50FR00	385	0	767	1012	190
50FR15	327	58	767	990	190
50FR25	289	96	767	978	190
50FR35	250	135	767	964	190
50FR50	193	193	767	944	190

- หมายเหตุ: 1. คิดปริมาณน้ำที่อยู่ในสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษเท่ากับร้อยละ 50 ของน้ำหนัก
2. FR หมายถึง เถ้าถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. 40, 45, 50 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50
4. 15, 25, 35, 50 หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ตามลำดับ

ยกตัวอย่างเช่น สัญลักษณ์ 40FR15 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม³ เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. ดังนั้น จึงได้เตรียมแบบสำหรับฝังเหล็กเส้นกลมลงในคอนกรีต โดยแบบฝังเหล็กแบบนี้จะใช้หล่อคอนกรีตที่จะทำการเก็บข้อมูลในระยะยาวประมาณ 3 ปีขึ้นไป ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะนำแบบเหล็กดังกล่าวไปวางบนแบบหล่อ จากนั้นใช้เหล็กนำร่องเสียบเข้าไปในแบบฝังเหล็ก เพื่อเป็นการดันให้คอนกรีตเกิดช่องว่างสำหรับที่จะฝังเหล็ก แล้วจึงทำการหย่อนเหล็กเส้นกลมลงไป ในคอนกรีต โดยให้เหล็กอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีต (ภาพที่ 3-2) คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์นี้ใช้สำหรับการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และทดสอบความเป็นสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กที่ถูกฝังไว้ในคอนกรีต



(ก) วางแบบฝังกเหล็กบนแบบหล่อคอนกรีต



(ข) ใช้เหล็กนำร่องเพื่อดันคอนกรีตให้เกิดช่องว่าง



(ค) หย่อนเหล็กลงในคอนกรีต



(ง) ตรวจสอบว่าเหล็กที่ฝังอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



(จ) ใช้เกรียงเกลี่ยคอนกรีตสคให้เต็มแบบหล่อ



(ฉ) ตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ

ภาพที่ 3-2 รูปแบบและตำแหน่งและขั้นตอนการฝังเหล็กเสริมลงในคอนกรีต

หลังจากทำการถอดแบบคอนกรีตแล้วเสร็จ จะนำคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในน้ำประปาจนอายุคอนกรีตครบ 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามน้ำขึ้น-ลง (ภาพที่ 3-3) พร้อมทั้งทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เพื่อวิเคราะห์

คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคลอไรด์และซัลเฟต ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุการแช่น้ำทะเลครบ 3 ปี เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 และคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152 ในคอนกรีต ทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต และทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)



(ก) คอนกรีตในสภาพเปื่อยก



(ข) คอนกรีตในสภาพแห้ง

ภาพที่ 3-3 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา
อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

วิธีการศึกษา

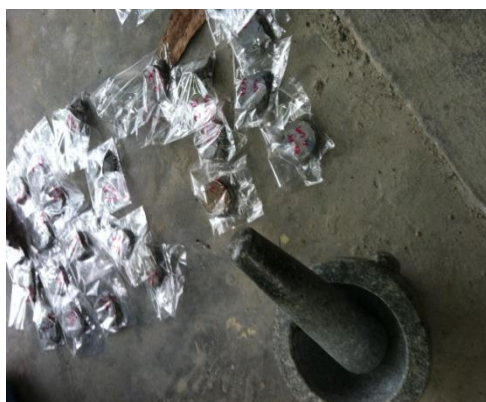
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์

1. เมื่อตัวอย่างมีอายุแช่น้ำทะเลครบ 3 ปี ทำการเจาะก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม.³ เพื่อทดสอบหาการซึมผ่านของคลอไรด์โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 200 มม. (ภาพที่ 3-4)



ภาพที่ 3-4 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 50 x 200 มม²

2. นำตัวอย่างทรงกระบอกมาทำการตัดตัวอย่างเป็นชั้น ๆ ชั้นละ 10 มม. (ภาพที่ 3-5)



ภาพที่ 3-5 ตัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกหนาชั้นละ 10 มม.

3. ทำการบดตัวอย่างที่ตัดแต่ละชั้นให้ละเอียด โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เก็บส่วนตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป (ภาพที่ 3-6)



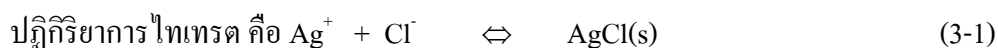
ภาพที่ 3-6 การบดตัวอย่างเพื่อทดสอบคลอไรด์

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. แล้วมาทำการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่างๆมาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต

ขั้นตอนการทดสอบปริมาณคลอไรด์

ใช้การไทเทรตด้วยซิลเวอร์ไอออนตามวิธีของมอร์ (Mohr's method) วิธีนี้จะเกิดตะกอนที่มีสีแดงของเกลือที่ไม่ละลาย ณ จุดยุติ นิยมใช้การไทเทรตหาคลอไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต โดยการเติมโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายที่เป็นกลางของสารละลายตัวอย่างคลอไรด์ เมื่อไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จะเกิดตะกอนสีขาว ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ก่อน ดังสมการ 3-1 เมื่อตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ตกสมบูรณ์แล้ว หยดต่อไปของซิลเวอร์ไนเตรตจะทำให้เกิดตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 ดังสมการ 3-2 ซึ่งละลายได้มากกว่าตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



ตะกอนขาว



ตะกอนแดง

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

1. นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งละเอียด 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
3. เติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1 : 1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
4. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกและคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที
5. นำไปต้มให้เดือดประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว
6. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
7. ปิเปตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
8. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จนเป็นสีส้ม
10. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ
11. เตรียมการไทเทรตแบลงค์ โดยใช้สารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร
 - 11.1 การเตรียมอุปกรณ์และวัสดุในการไทเทรตแบลงค์
 - 11.2 นำแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 0.2 กรัม ใส่บีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง
 - 11.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) 2% ลงไป 10 มิลลิลิตร
 - 11.4 เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร
12. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) จนเป็นสีส้ม
13. บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

1. นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยชั่งละเอียด 0.01 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
3. นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น
5. ปิเปตต์ ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดทดลองรูปชมพู่
6. เติมหาละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_4) 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
7. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ
8. เตรียมการไทเทรตแบลนด์ โดยใช้สารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 0.2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรสุดท้ายในการไทเทรตตัวอย่าง แล้วเติมหาละลายโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ลงไป 1 มิลลิลิตร
9. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) จนเป็นสีส้ม บันทึกปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณ

การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

ตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ ที่บริเวณ 5 ซม. โดยทำการบดคอนกรีตให้ละเอียด แล้วก็ส่งตัวอย่างทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การทดสอบความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

พื้นที่สนิมเหล็ก

หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม³ ที่ผ่านการเจาะด้วยหัวเจาะขนาด 50 มม. แล้วมาทำการทำลายโดยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machine) เพื่อเก็บเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะหุ้มต่าง ๆ มาสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต โดยทำการวัดพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใส่แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตารางขนาด 1x1 มม² มาทาครอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 3-7) และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของแท่งเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้ คือ

พื้นที่การกัดกร่อนของเหล็ก (ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เกิดสนิม) ดังสมการ 3-3 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูป สนิมเหล็กประกอบในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

$$C,(\%) = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3-3)$$

เมื่อ C คือ ร้อยละของพื้นที่ผิวแห่งเหล็กที่เกิดสนิม

RA คือ พื้นที่ผิวแห่งเหล็กที่เกิดสนิม (มม²)

SA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแห่งเหล็ก (มม²)



ภาพที่ 3-7 การวัดพื้นที่การเกิดสนิมในเหล็กโดยใช้กระดาษกราฟใส

การวัดการสูญเสียน้ำหนักของสนิมในเหล็กเสริม

หลังจากที่สำรวจพื้นที่ที่เกิดสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ในก้อนคอนกรีตแล้ว จากนั้นนำเหล็กเสริมที่ระยะต่างมาขัดเพื่อเอาสนิมที่ติดอยู่กับเหล็กออก เพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสนิมของเหล็ก โดยชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริมและทำการใช้กระดาษทรายขัดจนสนิมหลุดออกแล้วทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อดูการสูญเสียน้ำหนักของสนิมในเหล็กเสริม (ภาพที่ 3-8)



ภาพที่ 3-8 วัดการสูญเสียน้ำหนักของสนิมในเหล็กเสริม

การทดสอบกำลังของคอนกรีต

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งมีอายุครบ 3 ปี นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา (ภาพที่ 3-9)



ภาพที่ 3-9 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตยี่ห้อ ELE

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้กล่าวถึง คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตในการทดลอง คุณสมบัติของน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างคอนกรีต ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดลองคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังจากแช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี ในด้านกำลังอัดของคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ความคงทนของคอนกรีต และ โครงสร้างทางจุลภาค

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

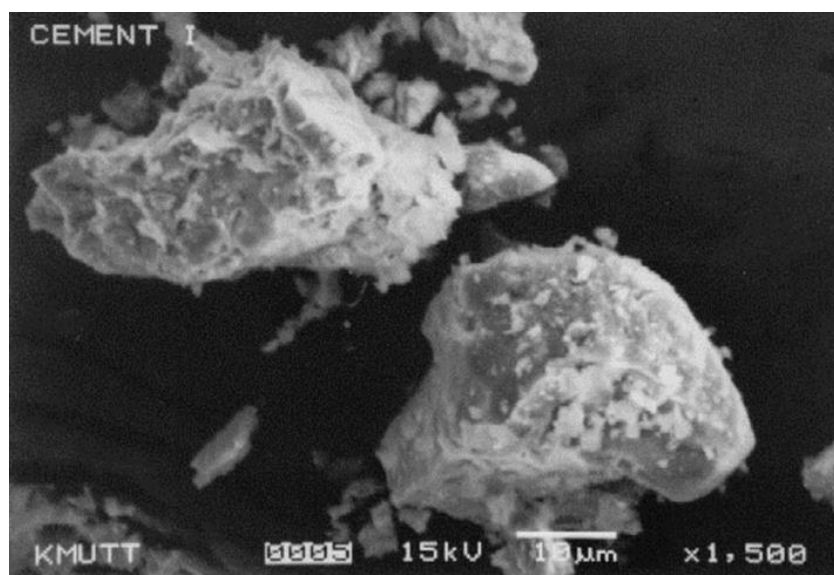
คุณสมบัติทางกายภาพ

1. ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

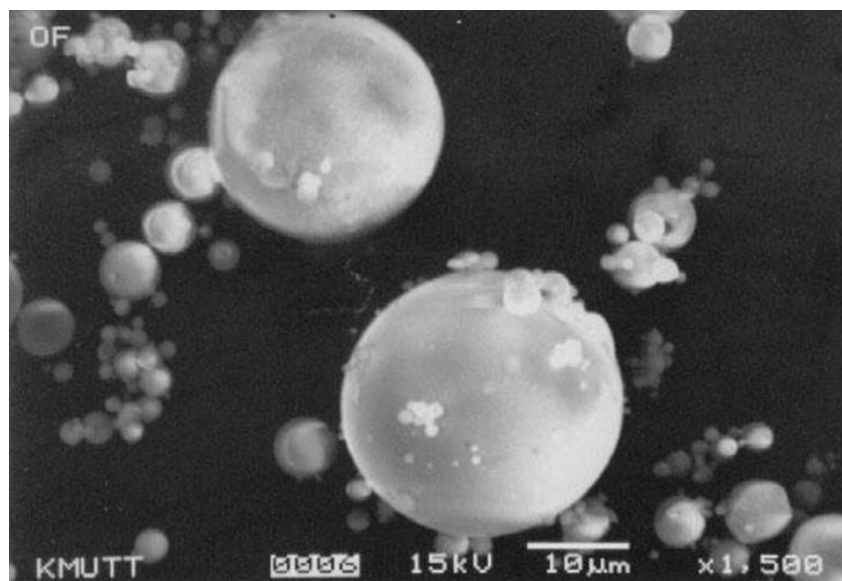
ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีสีเทา ส่วนลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่า มีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียด มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีสีน้ำตาลปนเทา

2. ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหิน จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ แต่ละอนุภาคมีลักษณะเหลี่ยมมุมที่ไม่เหมือนกัน และอนุภาคจะมีหลายขนาดปะปนกันแสดงดังภาพที่ 4-1 ส่วนเถ้าถ่านหินแม่เมาะพบว่า อนุภาคมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียสในการเผาไหม้ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน แสดงดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 4-2 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

3. ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่ค้ำบน

ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือ ไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งความละเอียดที่มากจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีการพัฒนากำลังอัดที่ดี และมีแนวโน้มในการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ดีขึ้น

องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 96.29 มาตรฐาน ASTM C150 กำหนดว่า ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 4.0 ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องไม่เกินร้อยละ 3.0 ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งก็นำมาใช้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของออกไซด์หลักของเถ้าถ่านหิน ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 สามารถจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

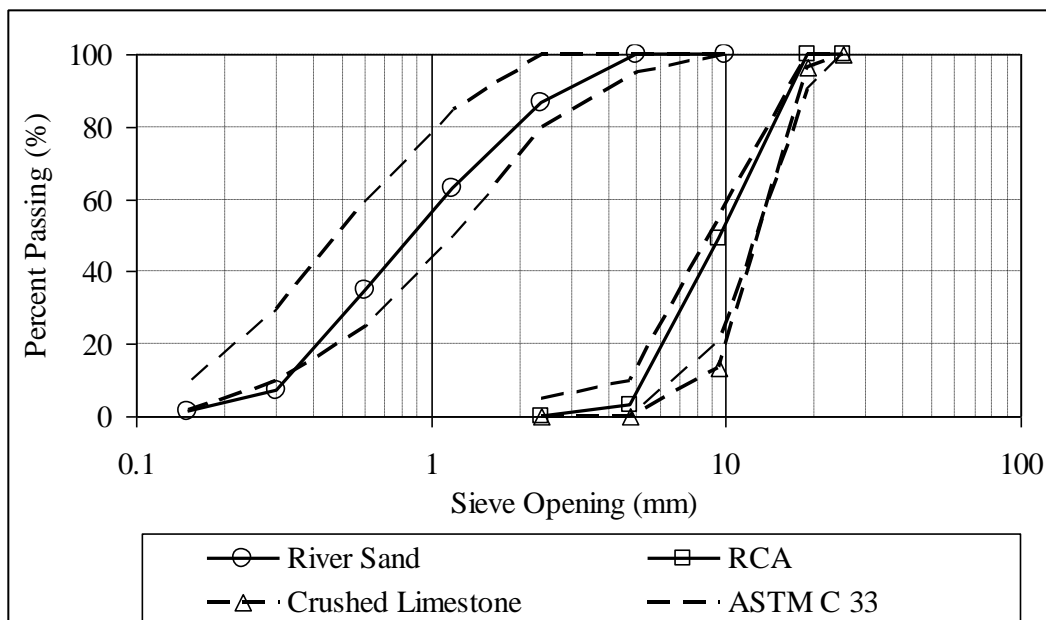
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO ₂	21.52	36.02
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	3.56	20.58
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	4.51	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.12	0.69
Potassium Oxide, K ₂ O	0.24	1.69
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.11	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.07

คุณสมบัติของมวลรวม

ตารางที่ 4-2 แสดงคุณสมบัติมวลรวมละเอียด โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.42 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44 ร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเท่ากับ 4.92 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติที่เป็นหินปูนประมาณ 5 เท่า

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ผสมแก้่านหิน

สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมจากเศษคอนกรีต
โมดูลัสความละเอียด	2.74	6.42
ความถ่วงจำเพาะ	2.63	2.44
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.91	4.92
ความหนาแน่น (กก/ ลบ.ม.)	1725	1476
ช่องว่าง (ร้อยละ)	33.9	39.1
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสี (ร้อยละ)	-	41



ภาพที่ 4-3 ขนาดคละของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ

คุณสมบัติของน้ำทะเล

คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000 ถึง 18,000 มก/ล ส่วนปริมาณซัลเฟตมีค่าอยู่ระหว่าง 2,200 ถึง 2,600 มก/ล โดยผลการทดสอบ คุณสมบัติของน้ำทะเลที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

Parameters	เมษายน	กุมภาพันธ์	พฤษภาคม	กันยายน พ.ศ.	เมษายน
	พ.ศ. 2547	พ.ศ. 2548	พ.ศ. 2549	2550	พ.ศ. 2551
ครอไรด์, Cl ⁻ (มก/ล)	16,000	18,000	17,500	18,120	18,910
ซัลเฟต, SO ₄ ²⁻ (มก/ล)	2,500	2,200	2,300	2,250	2,610
ค่า pH	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีแนวโน้มของกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้านหินเพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 25 ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีแนวโน้มของกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้านหิน ส่วนกลุ่มที่ใช้ปริมาณเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากกว่าร้อยละ 25 ถึงแม้จะมีกำลังอัดที่ต่ำ แต่ถือได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูงและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานน่าจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะยาวมีค่าสูงขึ้น

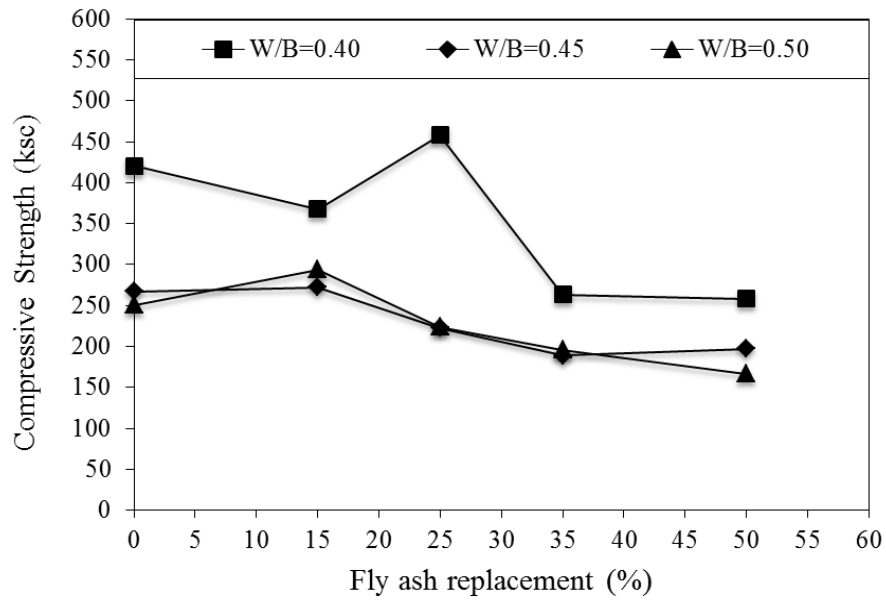
เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ดังแสดงในตารางที่ 4-4 โดยภาพที่ 4-4 แสดงผลของการแทนที่เถ้านหินต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่าการใช้ปริมาณเถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ลดลงอย่างชัดเจน เช่น คอนกรีตที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เท่ากับ ร้อยละ 0, 15, 25, 35, 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เท่ากับ 421, 368, 458, 263 และ 258 กก/ซม² ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่ผสมเถ้านหินสูงถึงร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหลังแช่น้ำทะเล 3 ปี อาจเกิดจากการใช้เถ้านหินผสมในอัตราส่วนร้อยละสูงเกินไป แม้ว่าอนุภาคที่เล็กของเถ้านหินจะสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น แต่การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ถือว่าค่อนข้างมาก ส่งผลให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันหายไป ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ซึ่งทำให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เพียงพอที่จะทดแทนกำลังอัดที่หายไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตลอดจนคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ จึงอาจมีผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนทางกายภาพ (การขัดสีของกรวด ทราาย คลื่นกระแทก การทำลายทางชีวภาพ) เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลลดลงได้ โดยทั่วไปความแข็งแรงของมวลรวมจะมีผลต่อการต้านทานการสึกกร่อนในคอนกรีตที่มีกำลังของเพสต์ที่ต่ำ มากกว่าในเพสต์ที่มีกำลังสูง ดังนั้นการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในเพสต์ที่ผสมเถ้านหินในปริมาณสูง (กำลังอัดต่ำ) จึงส่งผลให้การต้านทานการสึกกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลลดลงอย่างชัดเจน จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มนี้ลดลงอย่างมาก (Sravana, Sarika, Rao, Sekhar & Apparao, 2013; Rahmani, Shamsai, Saghafian & Peroti, 2012)

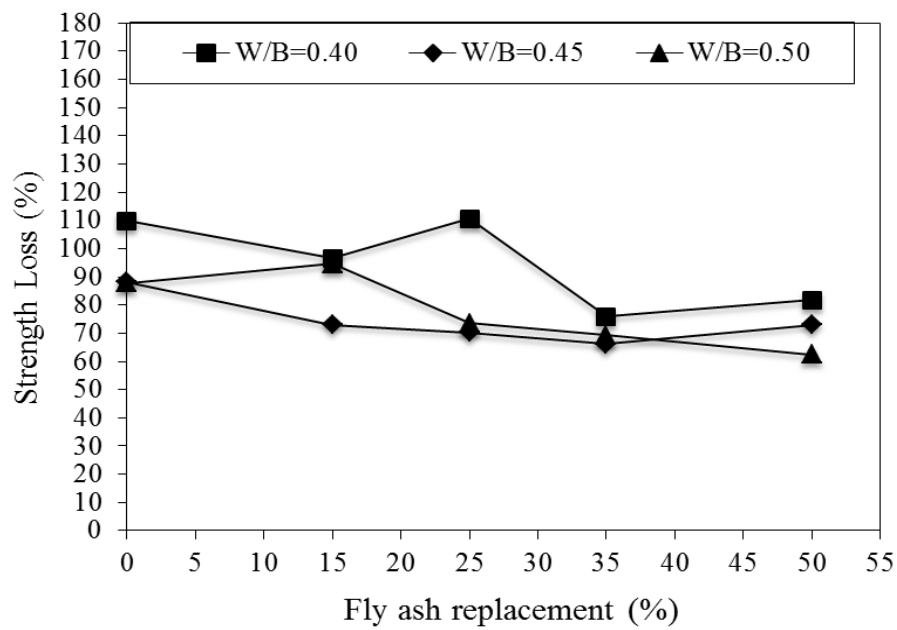
เมื่อพิจารณาการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ที่แสดงในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 3 ปีเทียบกับ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4-5 พบว่า แนวโน้มร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 3 ปีเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าลดลงเกือบทุกส่วนผสม อาจเกิดจากคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นร้อยละการดูดซึมน้ำ การสูญเสียขัดสี และช่องว่างของมวลรวม เป็นต้น ถึงแม้ว่าการแทนที่ด้วยเถ้านหินจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานก็ตาม แต่กำลังอัดไม่ได้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงอย่างเดียว คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำเมื่อแช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ตารางที่ 4-4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัดของคอนกรีต		ร้อยละกำลังอัดที่ 3 ปีเทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	แช่น้ำทะเล 3 ปี	
40FR00	383	421	110
40FR15	381	368	97
40FR25	414	458	111
40FR35	347	263	76
40FR50	316	258	82
45FR00	304	268	88
45FR15	373	273	73
45FR25	317	223	70
45FR35	285	189	66
45FR50	270	197	73
50FR00	285	250	88
50FR15	310	294	95
50FR25	305	224	74
50FR35	282	196	69
50FR50	267	167	62



ภาพที่ 4-4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี



ภาพที่ 4-5 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เมื่อเทียบกับบ่มน้ำประปาที่อายุ 28 วัน

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

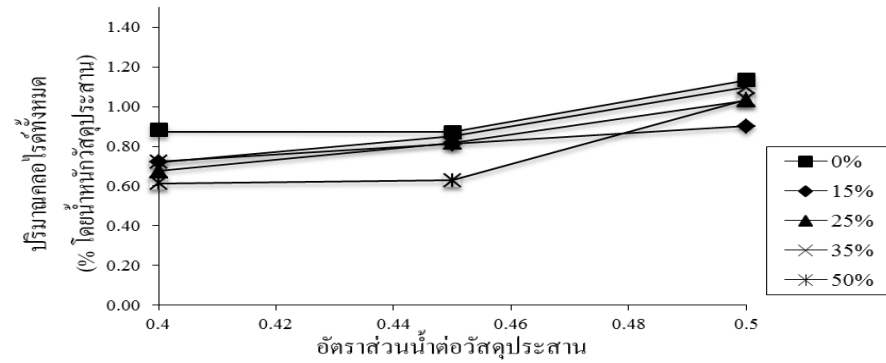
ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตดังตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-6 (ก), (ข), (ค), (ง), (จ), (ฉ), (ช), (ช) ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ที่ความลึก 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65 และ 75 ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความที่บวมมากขึ้นและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยสังเกตจาก การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.50 เป็น 0.45 ส่งผลให้ลดปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 0.17 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน (โดยลดลงจากร้อยละ 0.62 ในคอนกรีต 50FR00 เป็นร้อยละ 0.45 ในคอนกรีต 45FR00) ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีการลดปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึกดังกล่าว เพียงร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น โดยลดลงจากร้อยละ 0.27 ในคอนกรีต 50FR50 เป็นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีต 45FR50 และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกระดับความลึก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน อาจเป็นผลจากความที่บวมในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินความที่บวมไม่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ รวมถึงการอัดแน่นของอนุภาคเถ้าถ่านหิน (Filler effect) ด้วย โดยขนาดโพรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีผลจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับด่างในคอนกรีต และรูปร่างของเถ้าถ่านหินในการอุดตัวทางกายภาพในช่องว่างคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (วิเชียร ชาติ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) ที่พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีความที่บวมต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง อีกทั้งในคอนกรีตธรรมดาความที่บวมในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน นอกจากคุณสมบัติด้านกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

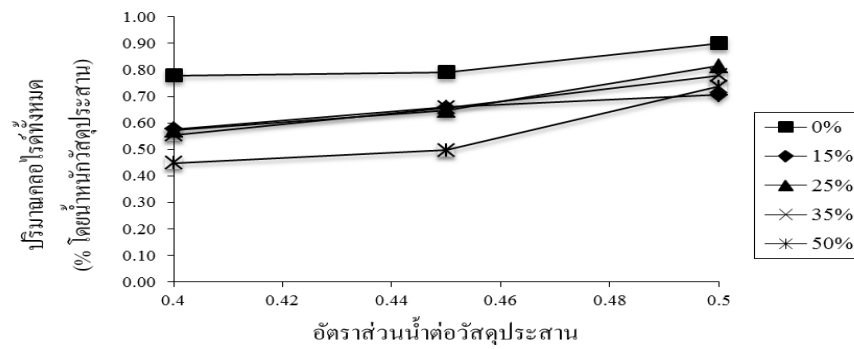
ประสานแล้ว คุณสมบัติด้านความทึบน้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลาน ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาปอชโซลานด้วย (วิเชียร ชาลี และคณะ, 2550)

ตารางที่ 4-5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมในเนื้อคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่แช่ใน สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

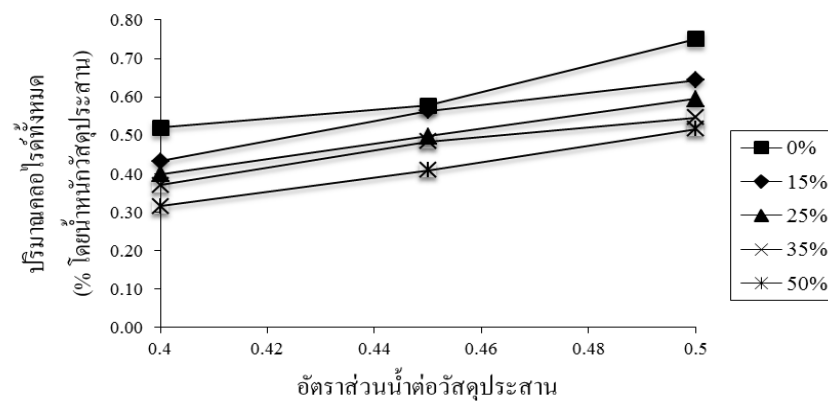
ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)							
	5 มม.	15 มม.	25 มม.	35 มม.	45 มม.	55 มม.	65 มม.	75 มม.
40FR00	0.88	0.78	0.52	0.38	0.20	0.11	0.09	0.06
40FR15	0.72	0.58	0.43	0.28	0.12	0.10	0.09	0.02
40FR25	0.68	0.57	0.40	0.27	0.11	0.10	0.07	0.02
40FR35	0.72	0.55	0.37	0.25	0.08	0.06	0.01	0.00
40FR50	0.61	0.45	0.32	0.18	0.06	0.05	0.00	0.00
45FR00	0.87	0.79	0.58	0.45	0.26	0.19	0.11	0.07
45FR15	0.81	0.66	0.56	0.35	0.22	0.19	0.10	0.05
45FR25	0.82	0.65	0.50	0.35	0.20	0.13	0.08	0.04
45FR35	0.85	0.66	0.48	0.31	0.17	0.11	0.04	0.01
45FR50	0.63	0.50	0.41	0.25	0.11	0.10	0.02	0.00
50FR00	1.13	0.90	0.75	0.62	0.59	0.40	0.26	0.17
50FR15	0.90	0.71	0.64	0.50	0.46	0.32	0.22	0.13
50FR25	1.03	0.81	0.59	0.48	0.39	0.22	0.19	0.09
50FR35	1.10	0.78	0.55	0.37	0.33	0.23	0.17	0.07
50FR50	1.04	0.74	0.52	0.27	0.24	0.20	0.11	0.03



(ก) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 5 มม.

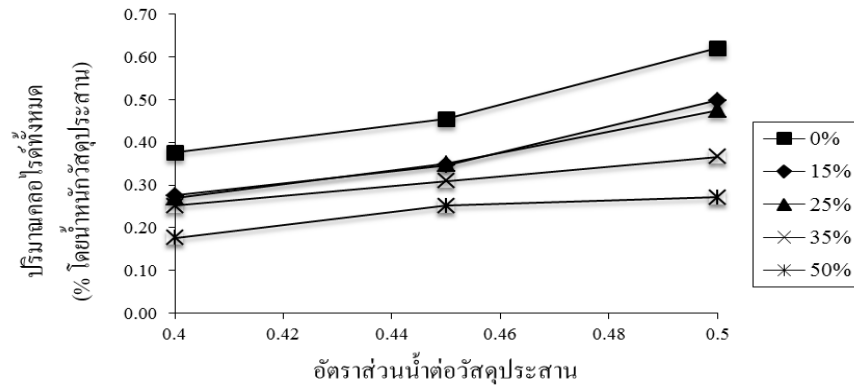


(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 15 มม.

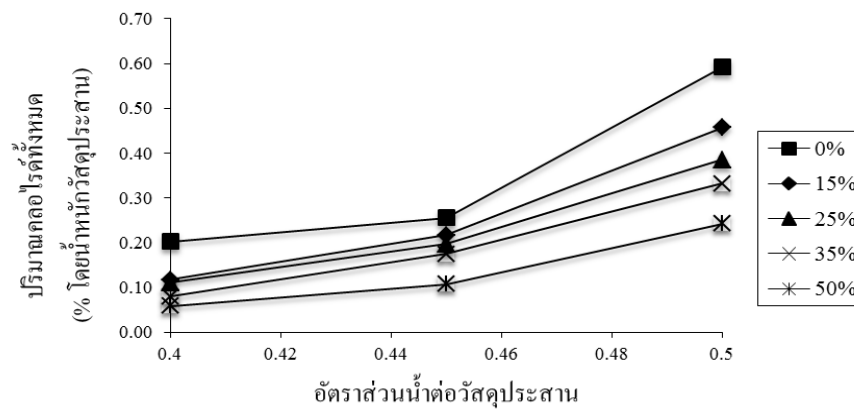


(ค) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 25 มม.

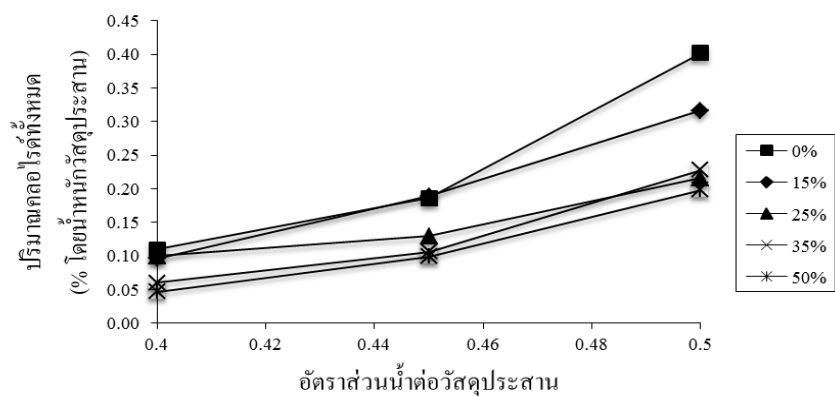
ภาพที่ 4-6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี



(ง) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 35 มม.

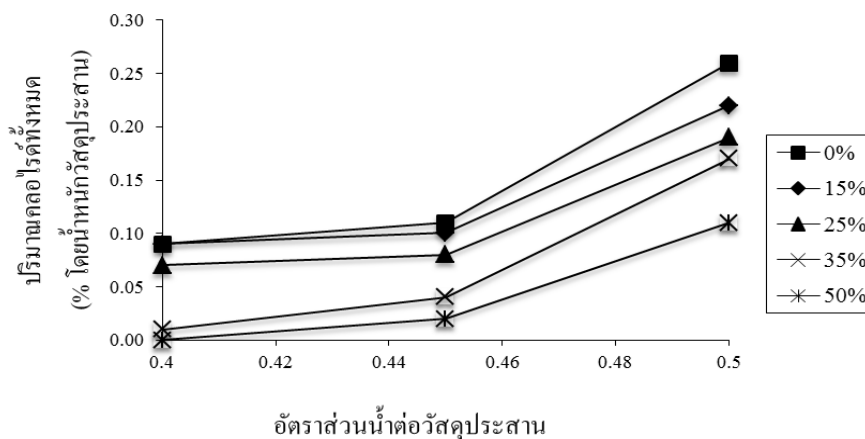


(จ) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 45 มม.

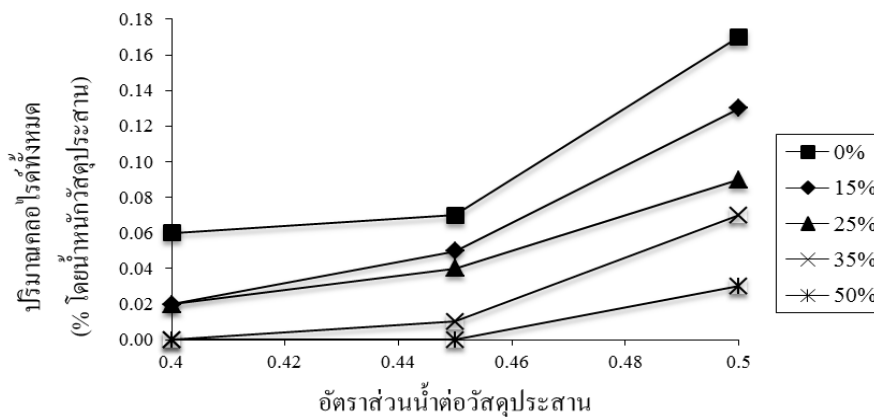


(ฉ) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 55 มม.

ภาพที่ 4-6 (ต่อ)



(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 65 มม.



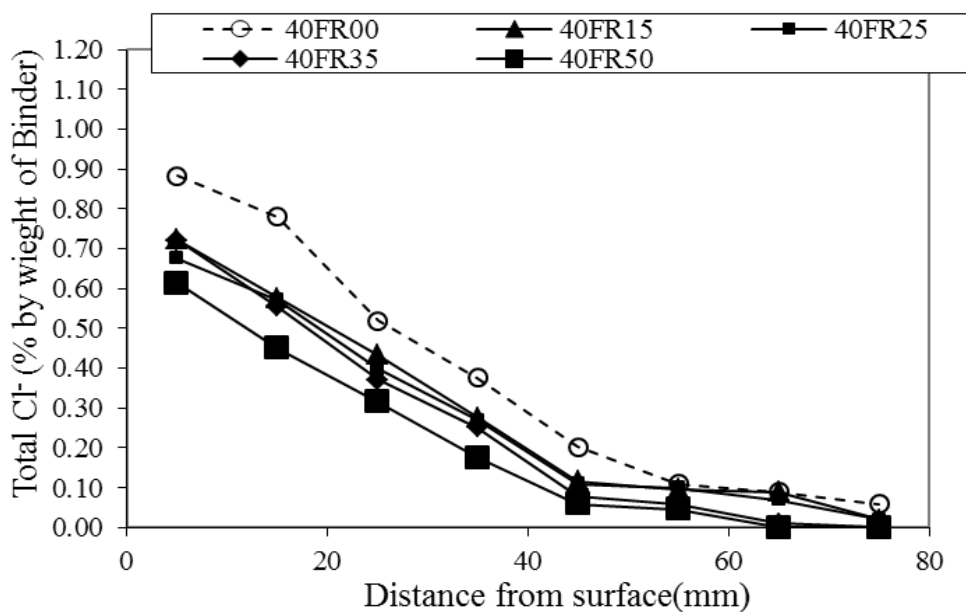
(ข) ความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 75 มม.

ภาพที่ 4-6 (ต่อ)

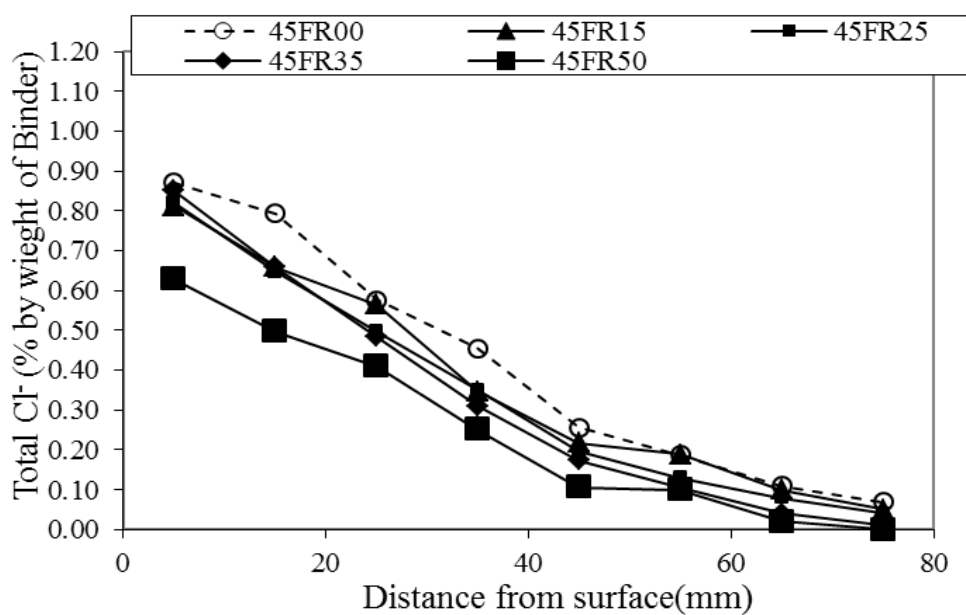
ผลของการแทนที่เถ้านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.45, และ 0.50 ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ดังภาพที่ 4-7 (ก), (ข), (ค) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้านหินในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้านหิน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมเถ้านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระดับความลึก 45 มม. เท่ากับ

ร้อยละ 0.20, 0.12, 0.11, 0.08, 0.06 และ 0.26, 0.22, 0.20, 0.17, 0.11 และ 0.59, 0.46, 0.39, 0.33, 0.24 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ สังเกตได้ว่าปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างซีเมนต์เฟสและมวลรวมจากเศษคอนกรีต รวมถึงอาจแทรกตัวเข้าไปอุดความพรุนของมวลรวมจากเศษคอนกรีตซึ่งมีความพรุนมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ ตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น มีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงได้ โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและแทนที่เถ้าถ่านหิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) ที่ได้ศึกษาการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่อใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม นอกจากนี้ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง จะให้ผลดีต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินด้วย

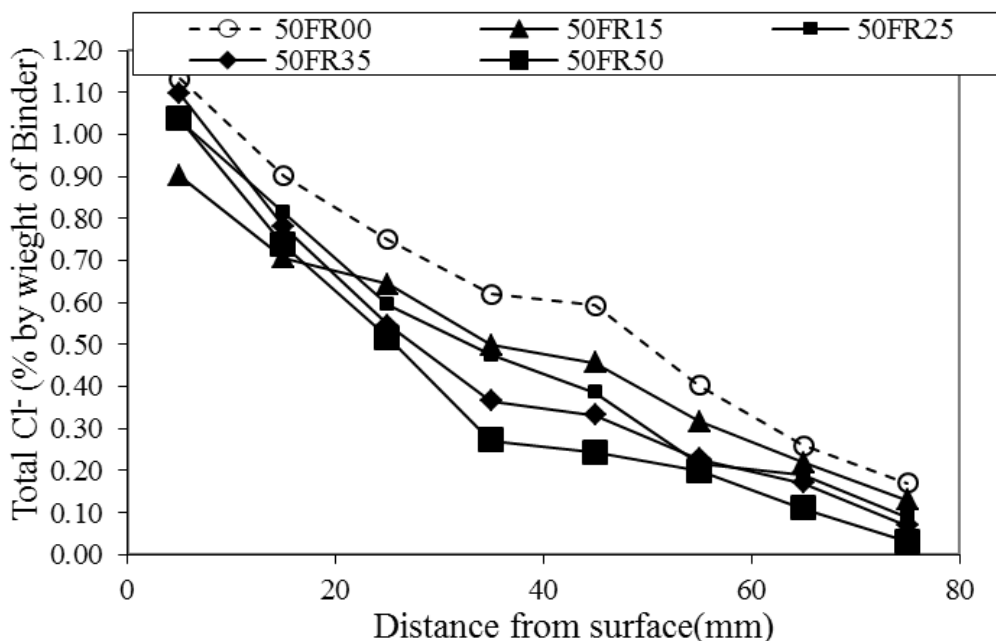


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ภาพที่ 4-7 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเข้าด้านหินหลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียก
สลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4-7 (ต่อ)

การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีต

โดยทั่วไป การกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตลบด้วยปริมาณคลอไรด์อิสระ ดังแสดงในสมการที่ 4-1

$$P_b = \frac{[Total(Cl^-) - Free(Cl^-)] \times 100}{Total(Cl^-)} \quad (4-1)$$

เมื่อแทนค่า Total (Cl⁻) และ Free (Cl⁻) ในสมการที่ 4-1 สามารถคำนวณค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ได้ เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ผสมแก้่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) กับ 13.68, 24.81, 29.95, 29.64, 16.85 และ 11.68, 18.09,

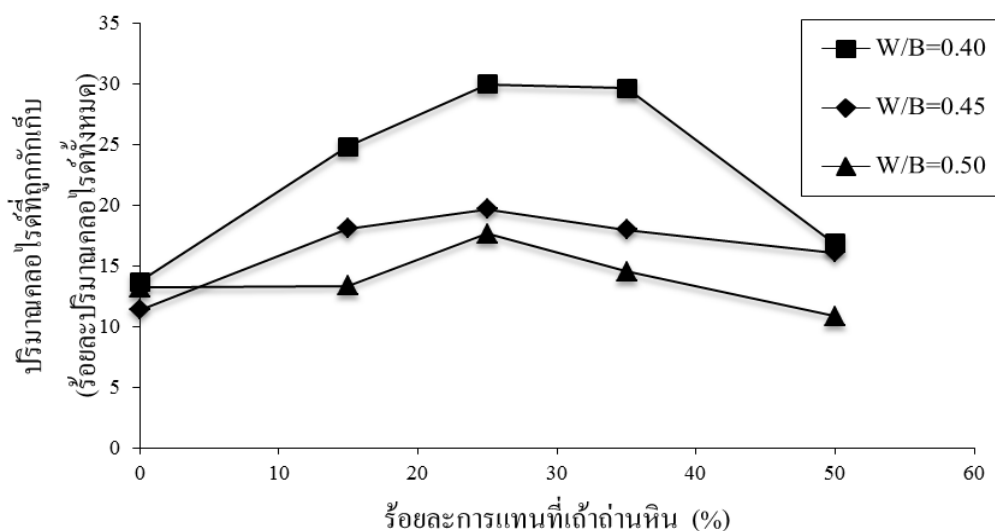
19.66, 17.99, 16.07 และ 13.19, 13.33, 17.65, 14.53, 10.86 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ
 ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของ
 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ส่วนผสม	การกักเก็บคลอไรด์ (P_b) ที่อายุ 3 ปี (ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด)
40FR00	13.68
40FR15	24.81
40FR25	29.95
40FR35	29.64
40FR50	16.85
45FR00	11.38
45FR15	18.09
45FR25	19.66
45FR35	17.99
45FR50	16.07
50FR00	13.19
50FR15	13.33
50FR25	17.65
50FR35	14.53
50FR50	10.86

จากตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-8 แสดงผลร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อ
 เทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะ
 แวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี พบว่า ค่าร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณ
 คลอไรด์ทั้งหมด (P_b) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ
 การแทนที่เถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้
 อาจเป็นผลเนื่องจากเถ้าถ่านหินมีปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 อยู่มากและมีความละเอียดของ

เถ้าถ่านหินสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี โดยสารตั้งต้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน (เถ้าถ่านหิน) ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้คอนกรีตได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่มากขึ้น เมื่อคลอไรด์แทรกซึมเข้าในคอนกรีตจะสามารถเกาะติดอยู่ที่ผิวของซีเมนต์เจลที่มากขึ้นด้วย ในกระบวนการนี้เรียกว่า การกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพ (วิเชียร ชาลี, 2552) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานก็ลดลงด้วย จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554) ที่พบว่า ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Pb) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เถ้าถ่านหินเปลือกไม้ในคอนกรีต และเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินเปลือกไม้ปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง



ภาพที่ 4-8 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำสมการกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ (4-2)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4-2)$$

เมื่อ D_c ในสมการที่ (4-2) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (4-2) แสดงดังสมการที่ (4-3)

$$C_{x,t} = C_0 [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (4-3)$$

โดยที่ $C_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระดับความลึก x และระยะเวลาในการแช่ t

x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

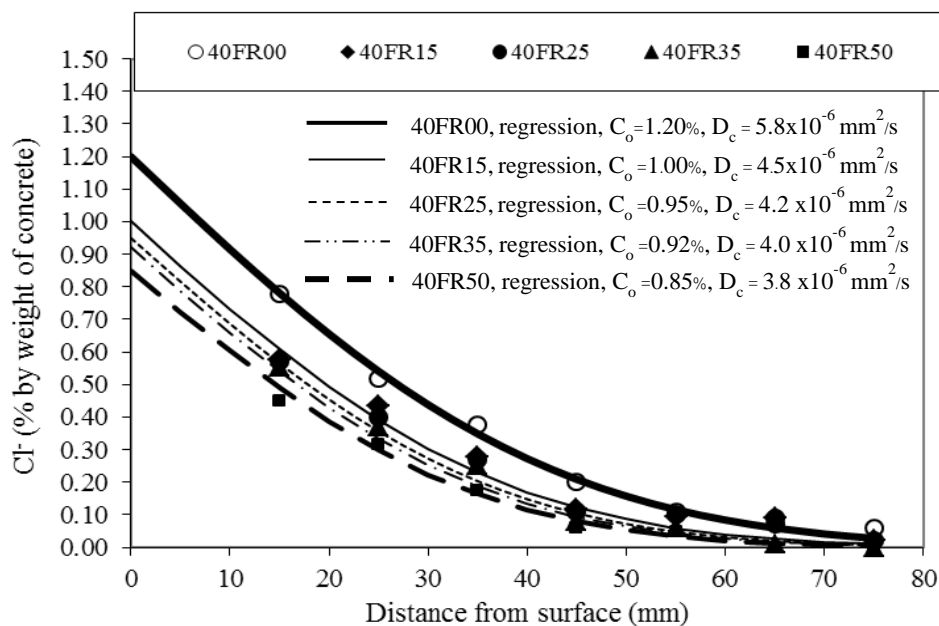
t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล t

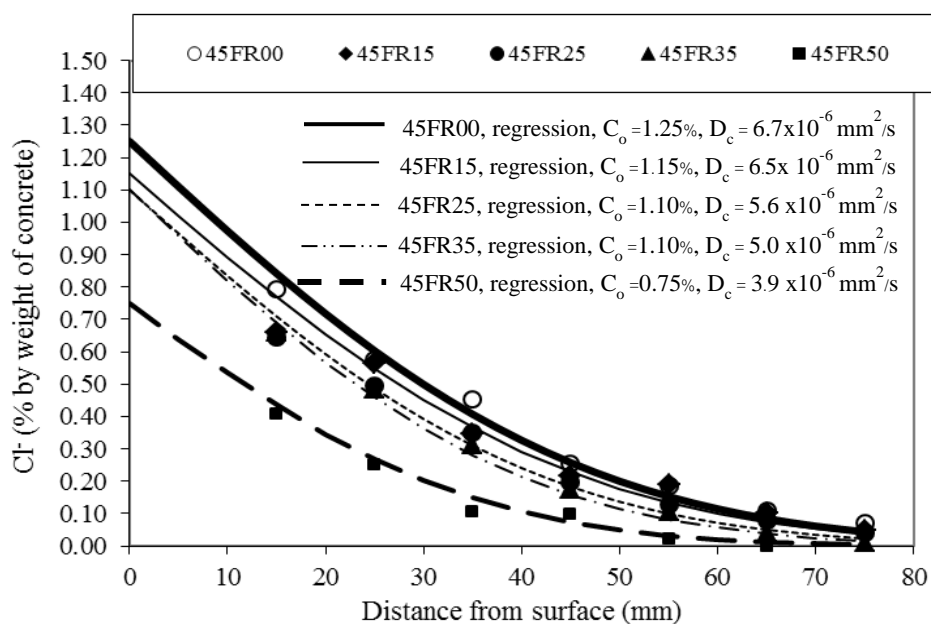
D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่ t (มม²/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

ปรับค่า D_c และ C_0 ในสมการที่ (4-3) เพื่อให้กราฟ สอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ก), (ข), และ (ค) ที่แสดงการหาค่า D_c โดยใช้สมการที่ (4-3) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและที่ผสมถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี แสดงดังตารางที่ 4-7

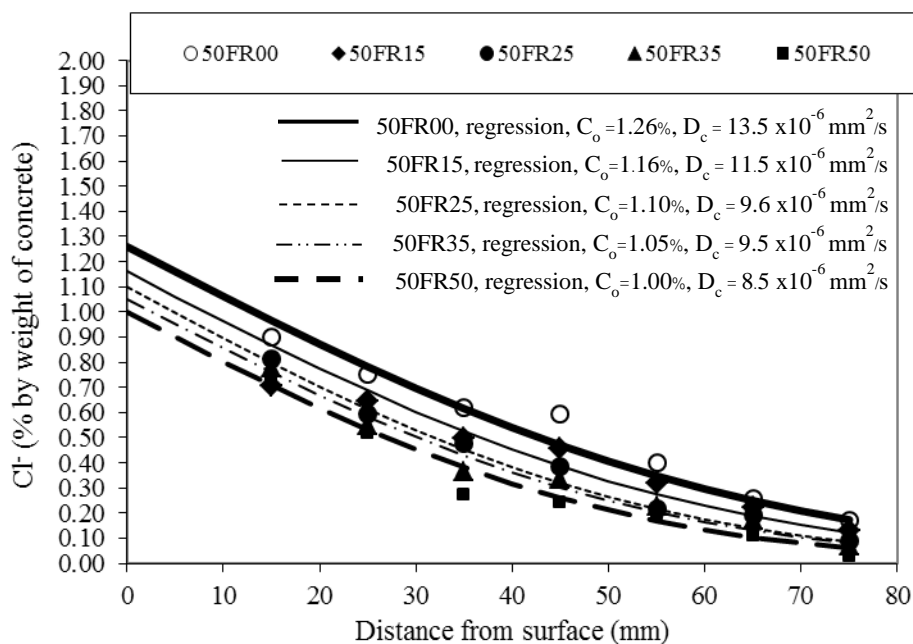


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ภาพที่ 4-9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจาก
เศษคอนกรีตที่ผสมแก้่านหินที่แช่ในน้ำสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ภาพที่ 4-9 (ต่อ)

ตารางที่ 4-7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินเมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

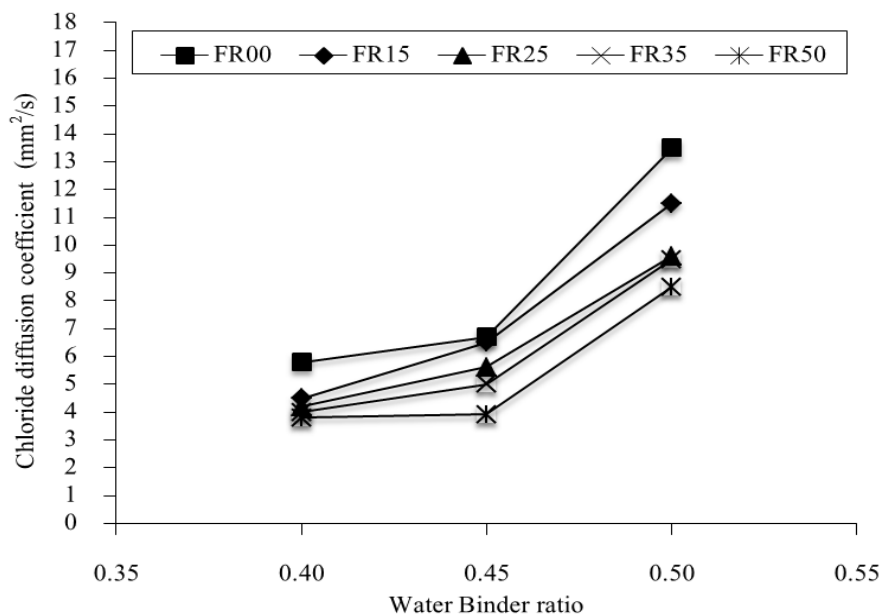
ส่วนผสม	C_o (%)	$D_c \times 10^{-6}$ (มม ² /วินาที)
40FR00	1.20	5.80
40FR15	1.00	4.50
40FR25	0.95	4.20
40FR35	0.92	4.00
40FR50	0.85	3.80
45FR00	1.25	6.70
45FR15	1.15	6.50
45FR25	1.10	5.60
45FR35	1.10	5.00

ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

ส่วนผสม	C _o (%)	D _c ×10 ⁻⁶ (มม ² / วินาที)
45FR50	0.75	3.90
50FR00	1.26	13.50
50FR15	1.16	11.50
50FR25	1.10	9.60
50FR35	1.05	9.50
50FR50	1.00	8.50

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 4-10 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง สามารถลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (Chalee & Jaturapitakkul, 2009) ผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง มีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น การใช้ W/B ที่ลดลงจาก 0.50 เป็น 0.40 มีผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเท่ากับ 7.7×10^{-6} มม²/วินาที (ลดลงจาก 13.5×10^{-6} ในคอนกรีต 50FR00 เป็น 5.8×10^{-6} ในคอนกรีต 40FR00) ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงแก่ 4.7×10^{-6} มม²/วินาที (ลดลงจาก 8.5×10^{-6} ในคอนกรีต 50FR50 เป็น 3.8×10^{-6} ในคอนกรีต 40FR50) ทั้งนี้อาจเกิดจากในคอนกรีตธรรมดา ความหิบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัด และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ส่วนในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานนอกจากคุณสมบัติด้านกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว คุณสมบัติด้านความหิบน้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย (Chalee, Jaturapitakkul & Chindaprasirt, 2009)



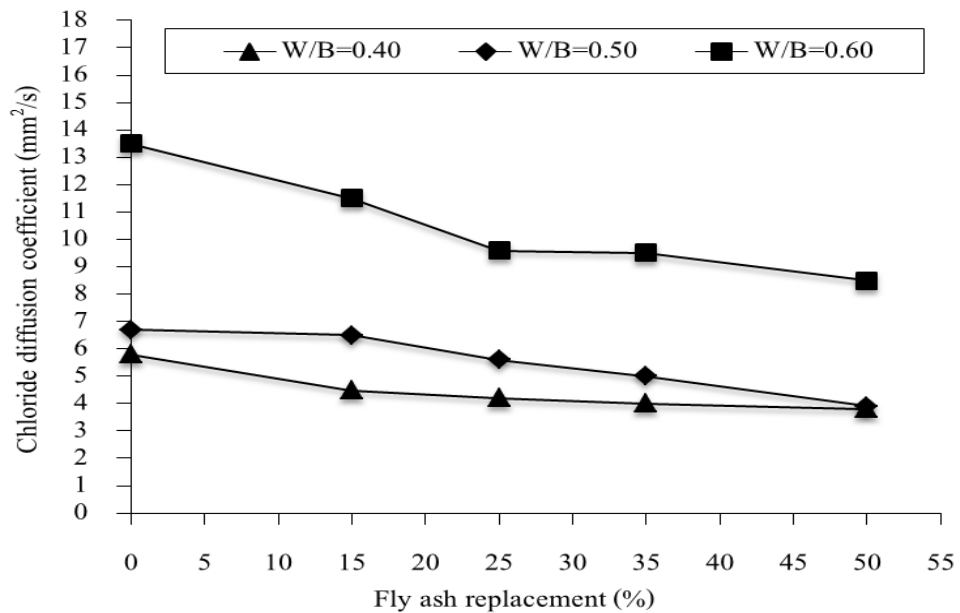
ภาพที่ 4-10 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

ผลของเส้นผ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Dc) ในคอนกรีตที่ใช้

มวลรวมจากเศษคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของเส้นผ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี ดังแสดงในภาพที่ 4-11 พบว่า การใช้เส้นผ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเส้นผ่านหินทุกส่วนผสมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นผ่านหิน อีกทั้งเมื่อผสมเส้นผ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม เช่น คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่า Dc เท่ากับ 5.8×10^{-6} , 4.5×10^{-6} , 4.2×10^{-6} , 4.0×10^{-6} และ 3.8×10^{-6} มม²/วินาที ตามลำดับ และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในคอนกรีตทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเส้นผ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเส้นผ่านหิน การศึกษาครั้งนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Somna,

Jaturapitakkul, Chalee & Rattanachu, 2012) ที่ใช้แก้ถ่านหินจากการเผาด้วยระบบฟลูอิดไดซ์เบด บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่พบว่า เมื่อแทนที่แก้ถ่านหินในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 และ 90 วัน มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต กลุ่มนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประเมินแนวโน้มของการต้านทานการแทรกซึมของ คลอไรด์ของคอนกรีต จากสภาพแวดล้อมทะเลได้ การศึกษาครั้งนี้ใช้แก้ถ่านหินจากแม่เมาะ โดยตรง โดยไม่ได้ผ่านการบดให้อนุภาคเล็กกลง ซึ่งแก้ถ่านหินดังกล่าวได้จากการเผาแบบ พูลเวอร์ไรซ์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้เผาสูงกว่าแก้ถ่านหินที่เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด แต่ให้ผลการศึกษา ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ และวิเชียร ชาลี, 2555; รัฐพล สมณา, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ที่พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแก้ถ่านหินส่งผลให้การแทรกซึม ของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จะมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมแก้ถ่านหินได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ช่วยลดช่องว่างระหว่างในคอนกรีตลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (Somna, Jaturapitakkul, Chalee & Rattanachu, 2012; Tangpagasit, Cheerarot, Jaturapitakkul & Kiattikomol, 2005) โดยผลการศึกษาที่ยังสอดคล้องกับ ผลการวิจัยที่ผ่านมา (กิริติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี, 2556) พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ที่อายุ 90 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ จะมีค่าลดลงเมื่อแทนที่แก้ถ่านหิน ในคอนกรีตปริมาณสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มส่งผลต่อคุณสมบัติ ด้านความคงทนอย่างชัดเจน

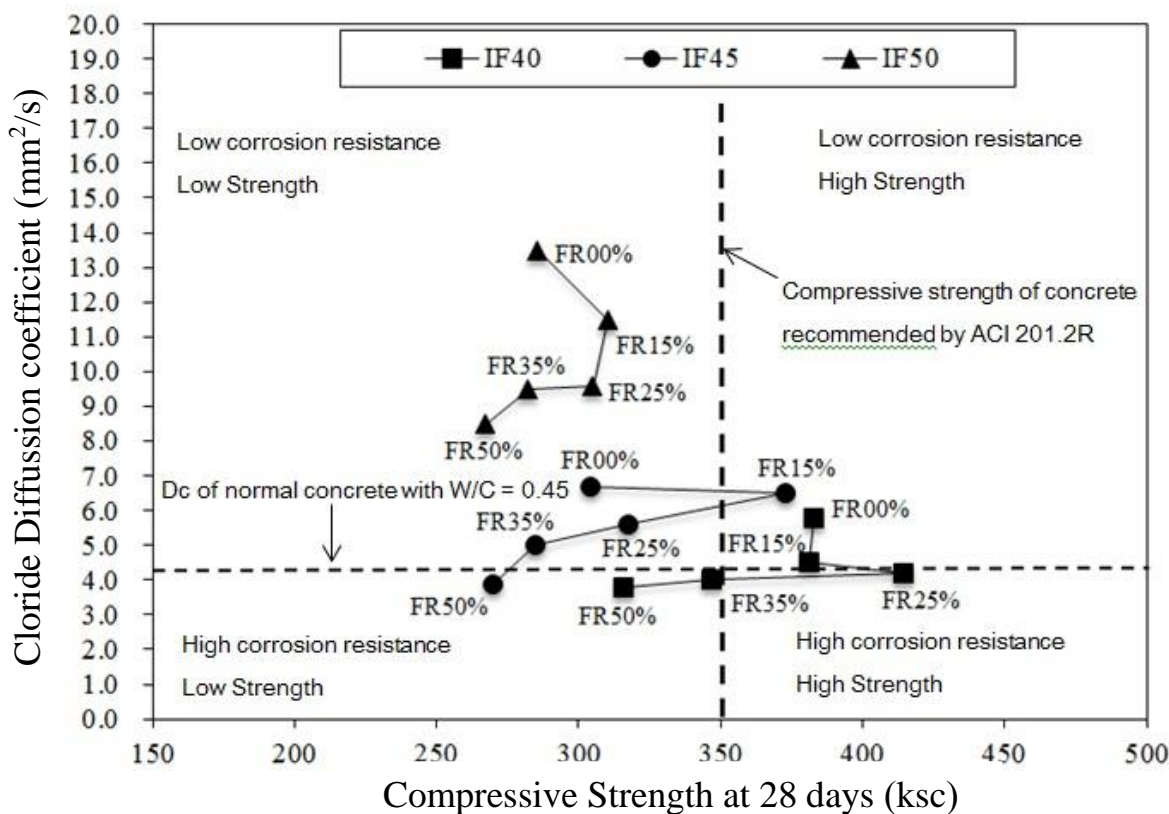


ภาพที่ 4-11 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

การพิจารณาคูณสมบัติของคอนกรีตที่จะใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลจะต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทนควบคู่กันไป ถึงแม้ว่าคอนกรีตที่จะใช้มีค่าการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูง แต่มีกำลังอัดที่ต่ำ ก็อาจส่งผลให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงอัดได้ ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวคลอไรด์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลก็สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ง่ายในการศึกษานี้ได้จำแนกคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตจากสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยแสดงในภาพที่ 4-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้แก่ กลุ่มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เนื่องจากให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 350 กก/ซม² ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดคอนกรีตอย่างต่ำที่เหมาะสมในการก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเลตามคำแนะนำของ ACI 201.2R นอกจากนั้น ACI 201.2R ได้แนะนำให้คอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกินกว่า 0.45 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา (Chalee & Jaturapitakul, 2009) พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เท่ากับ 4.3×10^{-6} มม²/วินาที ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นคอนกรีตที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่า 350 กก/ซม² และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 อีกทั้งยังมีพื้นที่รอยละการเกิดสนิมเหล็กเท่ากับ 3.40 และ 2.27 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-13



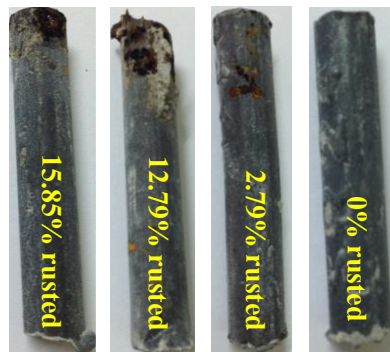
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

Low corrosion resistance

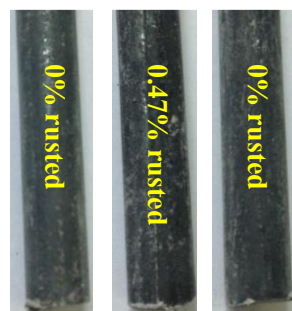
Low Strength



45FR00 45FR15 45FR25 45FR35 50FR00



50FR15 50FR25 50FR35 50FR50 th



45FR50 40FR35 40FR50

Low corrosion resistance

High Strength

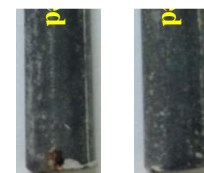


40FR00

High corrosion resistance, High Strength



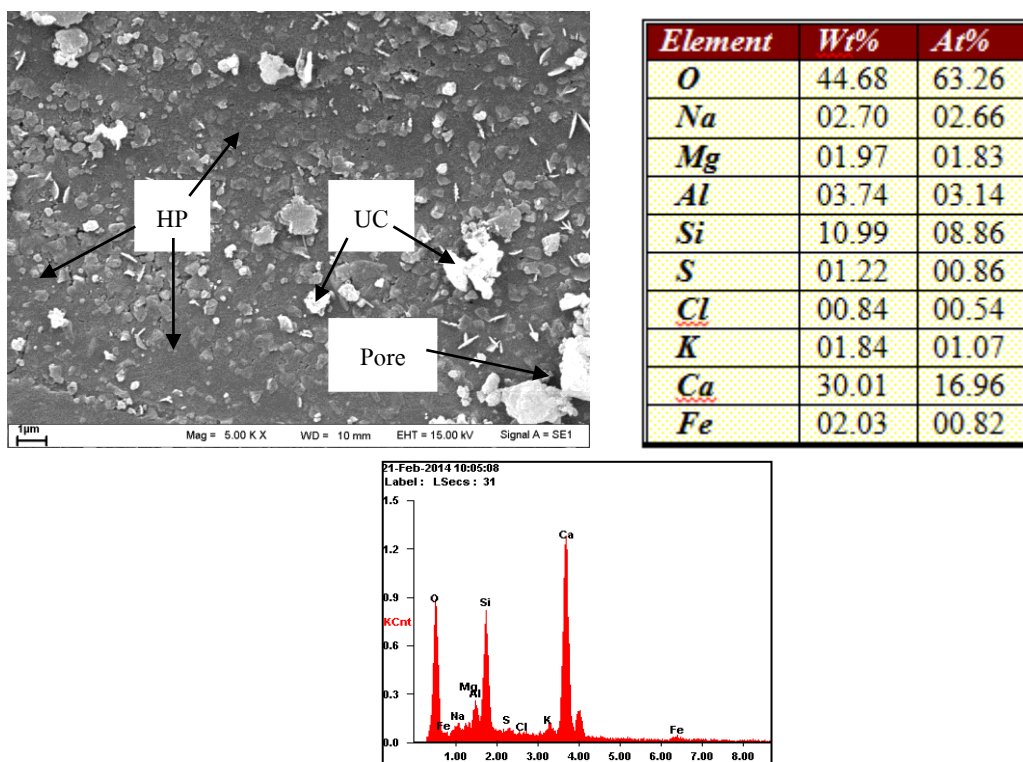
40FR15 40FR25



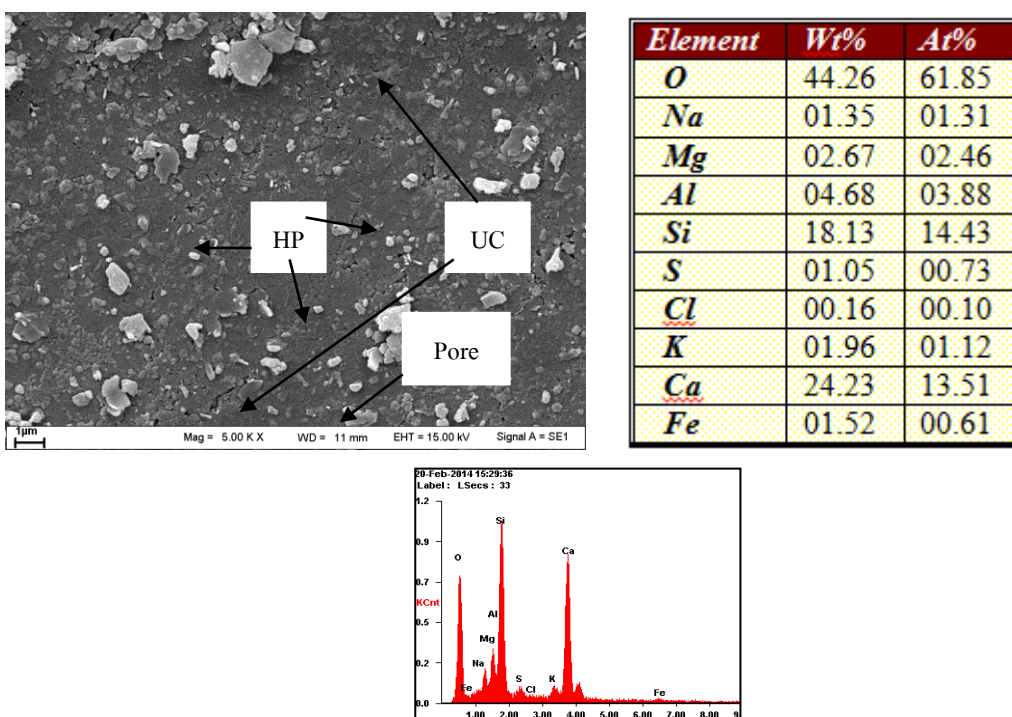
ภาพที่ 4-13 การเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ระดับความลึก 50 มม. หลังแช่น้ำในสภาวะแวดล้อมทะเล 3 ปี

โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4-14 แสดงภาพขยาย Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เมื่อผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ตามที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสม โครงสร้างของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตจะมีความพรุนลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35 และ 50 อาจเกิดจากเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (HP) คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้เกิดผลผลิตของปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ให้ความเหนียวและความแข็งแรงกับคอนกรีต (บริเวณสีดำที่ภาพที่ 4-14) ส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (UC) ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนสีขาว (บริเวณก้อนสีขาวภาพที่ 4-14) แต่เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามด้วย (วิเชียร ชาติ, 2552) นอกจากนี้ตารางแสดงปริมาณธาตุ (EDX) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตพบว่า ปริมาณซิลิกา (Si) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35, และ 50 มีค่าเท่ากับ 10.99, 18.13, 10.86, 14.65 และ 14.39 ตามลำดับ ปริมาณธาตุซิลิกา (Si) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 จะมีปริมาณมากที่สุด เมื่อปริมาณธาตุซิลิกา (Si) ในคอนกรีตมากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาและได้ผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มากด้วย

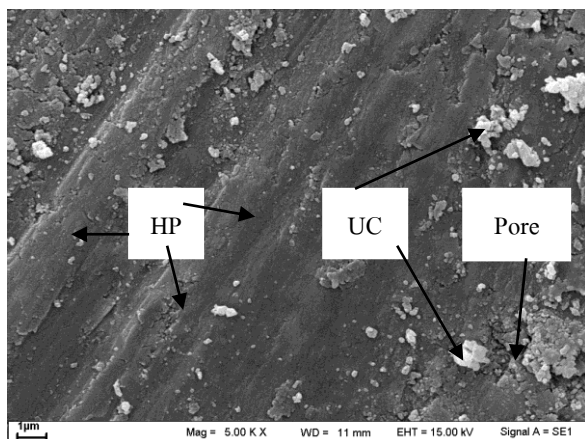


(ก) 40FR00

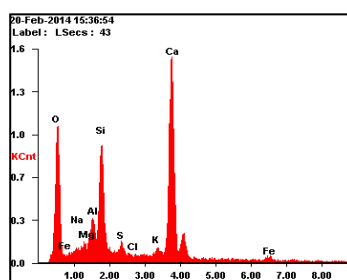


(ข) 40FR15

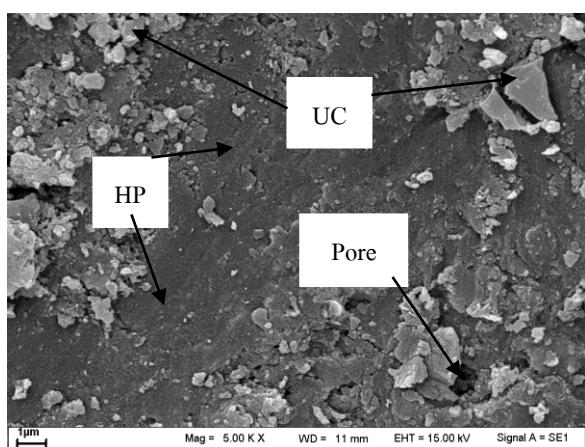
ภาพที่ 4-14 ภาพขยาย Scanning Eletron Microscopy (SEM) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี $W/B = 0.40$ หลังแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี



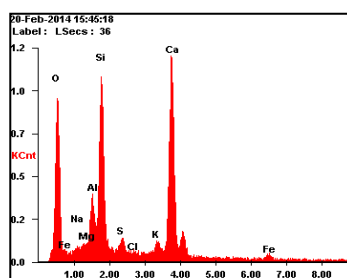
Element	Wt%	At%
<i>O</i>	46.02	64.87
<i>Na</i>	01.59	01.56
<i>Mg</i>	01.63	01.51
<i>Al</i>	03.95	03.30
<i>Si</i>	10.86	08.72
<i>S</i>	01.15	00.81
<i>Cl</i>	00.07	00.05
<i>K</i>	01.28	00.74
<i>Ca</i>	31.11	17.50
<i>Fe</i>	02.33	00.94



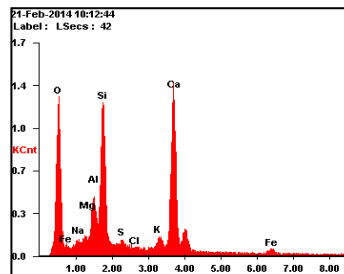
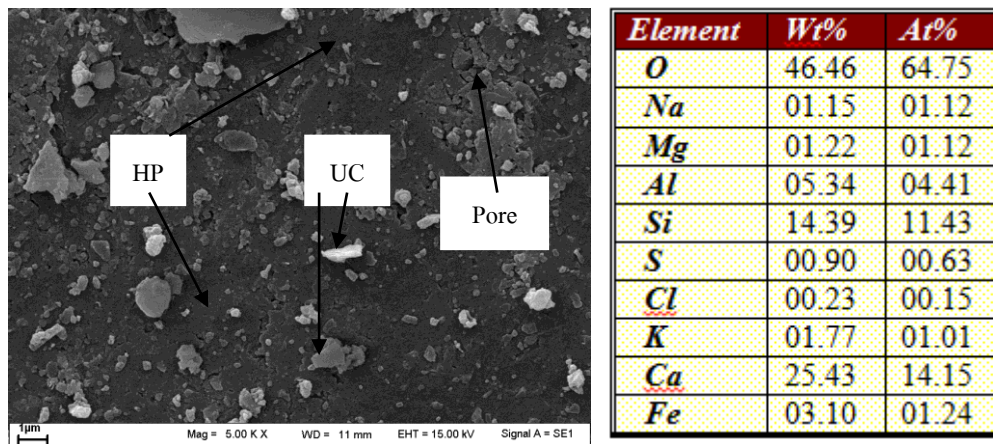
(ก) 40FR25



Element	Wt%	At%
<i>O</i>	46.37	64.83
<i>Na</i>	00.73	00.71
<i>Mg</i>	00.79	00.73
<i>Al</i>	04.86	04.03
<i>Si</i>	14.65	11.67
<i>S</i>	01.36	00.95
<i>Cl</i>	00.15	00.09
<i>K</i>	01.77	01.01
<i>Ca</i>	26.94	15.03
<i>Fe</i>	02.39	00.96



(ง) 40FR35



(จ) 40FR50

ภาพที่ 4-14 (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้
สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การแทนที่เถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตที่ค่อนข้างสูงขึ้น โดยเห็นผลได้อย่างชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40
2. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ ได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
3. การแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้
4. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
5. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ลดสัมประสิทธิ์ของคลอไรด์ลงได้
6. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงสามารถลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
7. การศึกษาครั้งนี้ พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นไปตามที่ ACI 201.2R ได้แนะนำไว้

บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ คงชนเกษมพร. (2548). *กำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์*.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กิตติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี. (2556). ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ*, 23(1), 29-41.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทน
ของคอนกรีต. กรุงเทพฯ: จุดทอง.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *การใช้ถ้ำลอยในงานคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2552). *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยการทำนายการแทรกซึม
ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์*. ชลบุรี: ภาควิชาวิศวกรรม
โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ทวีชัย สำราญวานิช. (2552). *เอกสารประกอบการสอนความคงทนคอนกรีต*. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ธวัชชัย สาสกุล. (2550). *ผลกระทบของเถาถ่านหินต่อกำลังอัด และความต้านทานการกัดกร่อน
ของมอร์ตาร์ ที่แช่ในน้ำเสียชุมชน*. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมระดับนานาชาติ.
- ปิยพงษ์ สุวรรณฉวีโชติ. (2550). *ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถาถ่านหิน ระบบฟลูอิดไดซ์เบด*. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*,
31(2), 351-370.
- ปิยพงษ์ สุวรรณฉวีโชติ และวิเชียร ชาลี. (2555). *การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อน
เหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถาถ่านหินที่ได้จากการเผา
แบบฟลูอิดไดซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล*. *วารสารวิชาการ
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 22(3), หน้า 1-13.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โป้ศรี. (2548). *กำลังรับแรงและความสามารถในการ
ต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถาถอยและเถาเกลบ*. เอกสาร
ประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548,
MAT 44-48.

- ปริญญา จินดาประเสริฐ ชัยชาญ, โชติถนอม, และ บพิช บุปไพโชติ. (2549). การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยคักขนาด. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* 2(2), 203-214.
- ประจักษ์ เข็มบุบผา. (2548). *การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน.* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปกป้อง รัตนชู. (2551). *กำลังอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าขานอ้อย.* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2549). ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, 17(2), 19-25.
- รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 34(4), 369-381.
- รัฐพล สมณา, วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต". การประชุมวิชาการคอนกรีตและซีไอโพลีเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 107-112.
- วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ทิฆมาณิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และประสิทธิ์ อุตสาหกรรม. (2550). ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* 30(1), 153-166.
- วิเชียร ชาลี. (2552). เอกสารประกอบการสอนความคงทนคอนกรีต. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 7(2), 17-28.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. (2558). *เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.* เข้าถึงได้จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic>.

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุลและบุรฉัตร ฉัตรวีระ. (2542). ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์
เพสต์ผสมถ้ำลอย. *วิศวกรรมวารสาร*, 52(4), 62-66.

ACI 201.2R-01, Guide to durable concrete. American Concrete Institute ACI Committee, 2003.

ACI 232.2R-03, Use of Fly Ash in Concrete. American Concrete Institute ACI Committee.

Ampadu, K.O., & Torii, K. (2002). Chloride Ingress and Steel Corrosion in Cement Mortars
Incorporating Low-Quality Fly Ashes, *Cement and Concrete Research*, 32(6),
893-901.

Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1995.

ASTM C127-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and
Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, American Society
for Testing and Materials, 1997.

ASTM C128-93. (1995). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine
Aggregate.

ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards,
American Society for Testing and Materials, 2008.

ASTM C1218, Standard Test Method for Water – Soluble Chloride in Motar and Concrete.
Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

ASTM C1152, Standard Test Method for acid – Soluble Chloride in Motar and Concrete.
Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

ASTM C188-95, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Annual Book of
ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2003.

ASTM C457-90, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the
Air-Void System in Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards, American
Society for Testing and Materials, 1995.

ASTM C33-93, Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM
Standards American Society for Testing and Materials, 1995.

ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Fly Ash or Natural Pozzolan for use as a
Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards
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 Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1997.
- Bai, J., Wild, S., & 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*, 33(3), 353-362.
- B. S. C. J. (1977). Propose Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Building Contractors Society of Japan. Committee on Disposal and reuse of Construction Waste, 1977.
- B. S. C. J. (1978). Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and reuse of Construction Waste.
- Buck, A.D., (1973). Recycled Concrete. *Highway Research Record*, 430, 1-8.
- Chalee, W., & Jaturapitakkul, C. (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures*, 42(4), 505-515.
- Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures*, 22(3), 341–353.
- Chindapasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 22(5), 932-938,
- Dhir, R. K., El-Mohr, M. A. K., & Dyer T. D., (1997). Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA. *Cement and Concrete Research*, 27(11), 1633-1639.
- Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., & Haan, Y. M. D. (1985). The Reaction of Fly Ash in Concrete. A Critical Examination. *Cement and Concrete Research*, 19(2), 235-246.
- Frondistou-Yannas, S., (1977). Waste Concrete as Aggregate for New Concrete”. *ACI Journal*, 74(8), 373-376.
- Gerardu, J. J. A., & Hendriks, C. F., (1985). *Recycling of Road Pavement Materials in the Netherlands*. Netherlands: Rijkswaterstaat.
- Gjorv, O. E., & Vennesland, O. (1976). Sea Salt and Alkalinity of Concrete”, *Journal of the American Concrete Institute*, 73(9), 512-516.

- Hansen, T.C., & Narud, H. (1983). Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International -Design and Construction*, 5(1),79-83.
- Hasaba, S., Kawamura, M. & Toriik, K, (1983). Drying Shrinkage and Durability of Concrete Made of Recycled Concrete Aggregates. *Japan Concrete Institute*, 55-60.
- Hansen, T. C., & Marga, M., (1983). Strength of Recycled Concrete Made From Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate. *Ibid.* 135. 605-612.
- Hansen, T. C. (1983). Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes. *Cement and Concrete Research*, 20(2), 193-196.
- Ikeda, T., Yamane, S., & Sakamoto, A., (1988). Strength of Concrete Containing Recycled Aggregate. *Ibid.* 135, 585-594.
- Kakizaki, M., Harada, M., & Motoyasu, H. (1988). Manufacturing of Recovered Aggregate Through Disposal and Recovery of Demolished Concrete Structure. *Ibid*, 135, 699-708.
- Kaga, H., Kasai, Y., Takeda., K., & Kami, T., (1988). Properties of Recycled Aggregate from Concrete”, *Ibid*, 135, 690-698.
- Kashino, N., & Takahashi, Y. (1988). Experimental Studies on Placement of Recycled Aggregate Concrete, *Ibid.* 135, 557-564.
- Kawakami M., Wada S., & Sazukawa K. (1989). Effect of Chemical Admixtures on Colloidal Underwater Concrete. Superplasticizer-Third International Conference, Ottawa, Canada, SP-119, ACI, 493-516.
- Kasai, Y., & Fujii, T., (1989). Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. *Concrete International*, 11(3), 24-28.
- Kakizaki, M., Harada, M. & Soshiroda, (1988). Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete, *Ibid.* 135, 756-765.
- Kikuchi, M., Mukai, T. & Kozumi, H. (1988). Properties of Concrete Products Containing Recycled Aggregate, *Ibid.* 135, 595-604.
- L. Ch. (1991). Influence of Aggregate Content on Strengths and Workabilities of High-Strength Concrete, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Asian Institute of Technology,

- Mukai, T., Kikuchi, M., & Ishikawa, N. (1978). *Study on the Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate*. Cement Association of Japan, 32nd Review. 189-206.
- Malhotra, V.M., (1976). Use of Recycled Concrete as a New Aggregate,” Report 76-78, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Canada.
- Mather, B., (1966). Effect of Seawater on Concrete. *Highway Research Record*, 113, 33-42.
- Narud, H., (1981). Recycled Concrete in Low-Strength Concrete with Fly Ash, Technical Report 110/ 82, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby,
- Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575,
- Rahmani, K., Shamsai, A., Saghafian, B., & Peroti, S. (2012). Effect of Water and Cement Ratio on Compressive Strength and Abrasion of Microsilica Concrete. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 12(8), pp. 1056-1061
- Ravindrarajah, R.S. & Tam, T.C. (1985). Properties of Concrete Made with Crushed Concrete as Coarse Aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 383-392.
- Rasheeduzzafar, IB., & Khan, A. (1984). Recycled Concrete-a Source of New Aggregate. *Cement Concrete and Aggregates (ASTM)*, 6(1), 17-27.
- Saadoun S., Rasheeduzzafar, S., & Gahtani, A.S. (1993). Corrosion of reinforced steel in fly ash blended cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(3), 356 -371.
- Sayamipuk, S. (1995). Use of Rubbles as Coarse Aggregate in Concrete Containing fly Ash and Superplasticizer, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Asian Institute of Technology.
- Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., & Rattanachu, P. (2012). Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate. *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 16–22.
- Soshiroda, T. (1983). *Recycled Concrete*. Proceedings 9th Congress of CIB, Stockholm, 1983.
- Sravana, P., Sarika, P., Rao, S., Sekhar, S., & Apparao, G. (2013). Studies on Relationship Between Water/ Binder Ratio And Compressive Strength Of High Volume Fly Ash Concrete. *AJER American Journal of Engineering Research*, 2(8),115-122.
- Sujjavanich, S., Sida, V., & Suwanvitaya, P. (2005). Chloride Permeability and Corrosion Risk of High-Volume Fly Ash Concrete with Mid-Range Water Reducer, *ACI Materials Journal*, 102(3),177-182.

- Tangpagasit, T., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1145–1151.
- Tarun, R.N., Shiw, S.S., & Mohammad, M.H. (1994). Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 24, 913-922.
- Thomas, M. D. A., & Matthews, J. D. (2004). Performance of PFA Concrete in a Marine Environment 10-year Results, *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 5-20.
- Yanagi, K.(1988). Effect of Impurities in Recycled Coarse Aggregate upon a Few Properties of the Concrete Product with It. *Ibid*, 135, 613-620.
- Yoshikane, T. (1995). Present Status of Recycling Waste Cement Concrete in Japan. Private Communication Research Laboratory. Taiyu Kensetsu Co.Ltd., Japan.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบพื้นที่สนิมที่ผิวเหล็กเสริมและน้ำหนักรีดที่สูญหาย
เนื่องจากสนิมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่าง ๆ

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ผลการทดสอบพื้นที่สนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 3 ปี

Type of Concrete	Rusted area of embedded steel											
	Covering Depth : 10			Covering Depth : 20			Covering Depth : 50			Covering Depth : 75		
	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)	RA (mm ²)	SA (mm ²)	C (%)
40FR00	837	1500	55.80	414	1500	27.60	121	1500	8.07	57	1500	3.80
40FR15	827	1500	55.13	175	1500	11.67	51	1500	3.40	11	1500	0.73
40FR25	869	1500	57.93	276	1500	18.40	34	1500	2.27	14	1500	0.93
40FR35	206	1500	13.73	40	1500	2.67	7	1500	0.47	0	1500	0
40FR50	4	1500	0.27	0	1500	0	0	1500	0	0	1500	0
45FR00	469	1500	31.27	148	1500	9.87	52	1500	3.47	4	1500	0.27
45FR15	925	1500	61.67	395	1500	26.33	107	1500	7.13	28	1500	1.87
45FR25	44	1500	2.93	6	1500	0.40	0	1500	0	0	1500	0
45FR35	216	1500	14.40	77	1500	5.13	14	1500	0.93	6	1500	0.40
45FR50	40	1500	2.67	0	1500	0	0	1500	0	0	1500	0
50FR00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50FR15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50FR25	324	1650	19.64	276	1650	16.73	211	1650	12.79	47	1650	2.85
50FR35	375	1650	25.00	135	1650	8.18	46	1650	2.79	7	1500	0.47
50FR50	30	1200	2.50	5	1200	0.42	0	1200	0	0	1200	0

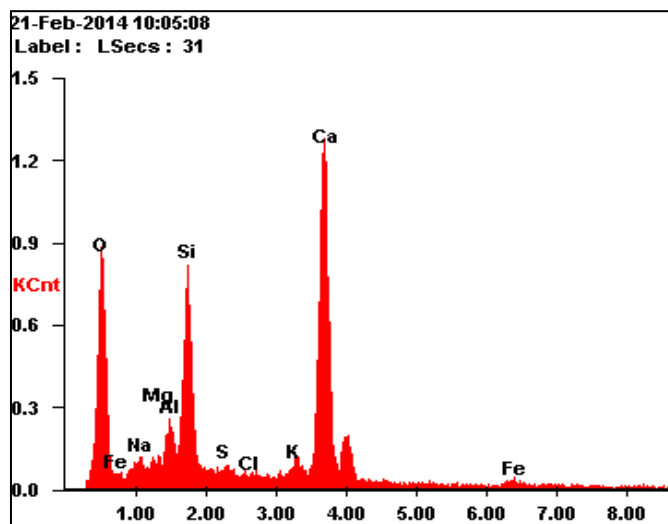
ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ผลการทดสอบน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล 3 ปี

Type of Concrete	Weight Loss of steel (%)											
	Covering Depth : 10			Covering Depth : 20			Covering Depth : 50			Covering Depth : 75		
	Before (g)	After (g)	Loss (%)	Before (g)	After (g)	Loss (%)	Before (g)	After (g)	Loss (%)	Before (g)	After (g)	Loss (%)
40FR00	24.784	24.692	0.3712	23.399	23.365	0.1453	25.095	25.072	0.0917	24.020	24.006	0.0583
40FR15	22.695	22.619	0.3349	24.640	24.619	0.3349	24.579	24.547	0.1302	24.824	24.810	0.0564
40FR25	22.843	22.743	0.4378	24.176	24.136	0.1655	24.087	24.060	0.1121	24.137	24.121	0.0663
40FR35	24.047	24.015	0.1331	24.608	24.577	0.1260	24.128	24.112	0.0663	24.809	24.809	0.0000
40FR50	23.858	23.850	0.0355	24.175	24.175	0.0000	24.065	24.065	0.0000	24.123	24.123	0.0000
45FR00	24.300	24.232	0.2798	23.827	23.789	0.1595	22.458	22.412	0.2048	24.972	24.964	0.0320
45FR15	24.016	23.918	0.4081	23.434	23.391	0.1835	23.314	23.293	0.0901	23.452	23.421	0.1322
45FR25	24.900	24.873	0.1084	24.906	24.891	0.0602	24.820	24.820	0.0000	24.380	24.380	0.0000
45FR35	25.177	25.095	0.3257	23.858	23.816	0.1760	24.900	24.881	0.0763	25.179	25.171	0.0318
45FR50	25.195	25.174	0.0833	22.917	22.917	0.0000	23.540	23.540	0.0000	24.385	24.385	0.0000
50FR00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50FR15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50FR25	26.888	26.758	0.4835	26.125	26.058	0.2565	26.006	25.968	0.1461	26.073	26.044	0.1112
50FR35	24.635	24.552	0.3369	26.761	26.701	0.2242	26.768	26.740	0.1046	22.990	22.974	0.0696
50FR50	19.958	19.932	0.1303	18.600	18.594	0.0323	17.584	17.584	0.0000	18.410	18.410	0.0000

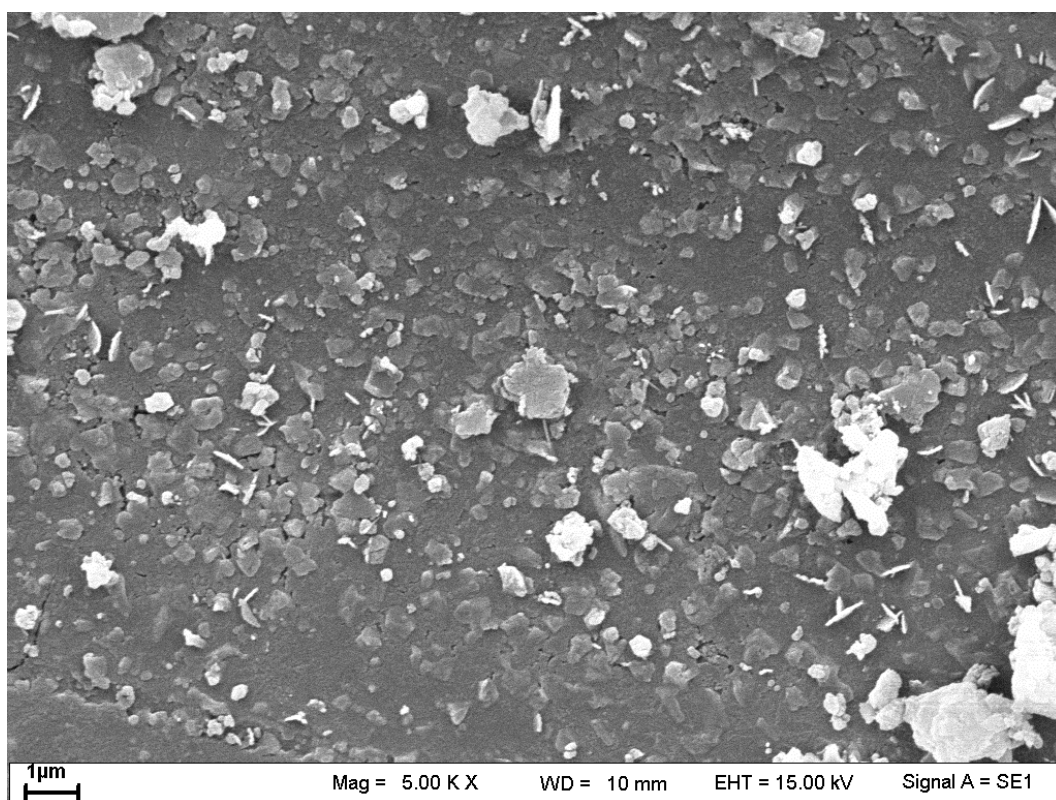
ภาคผนวก ข

ผลการส่องโครงสร้างจุลภาค (SEM) ของคอนกรีตใช้มวลรวม
จากเศษคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 3 ปี

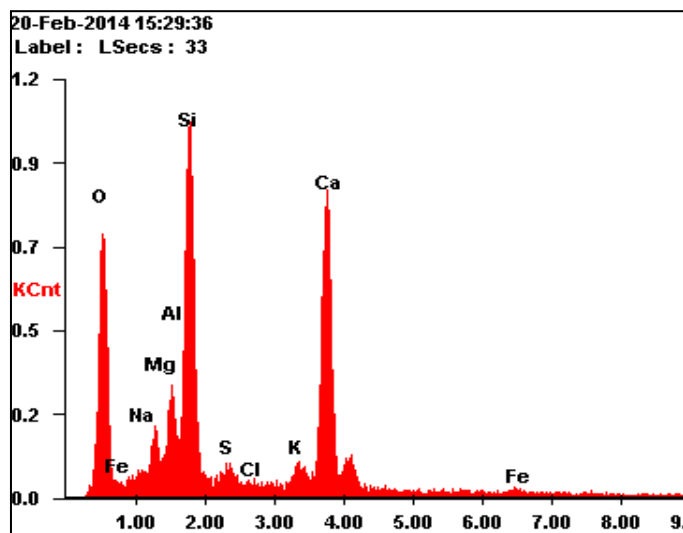
NO.16 (Mix 40FR00)



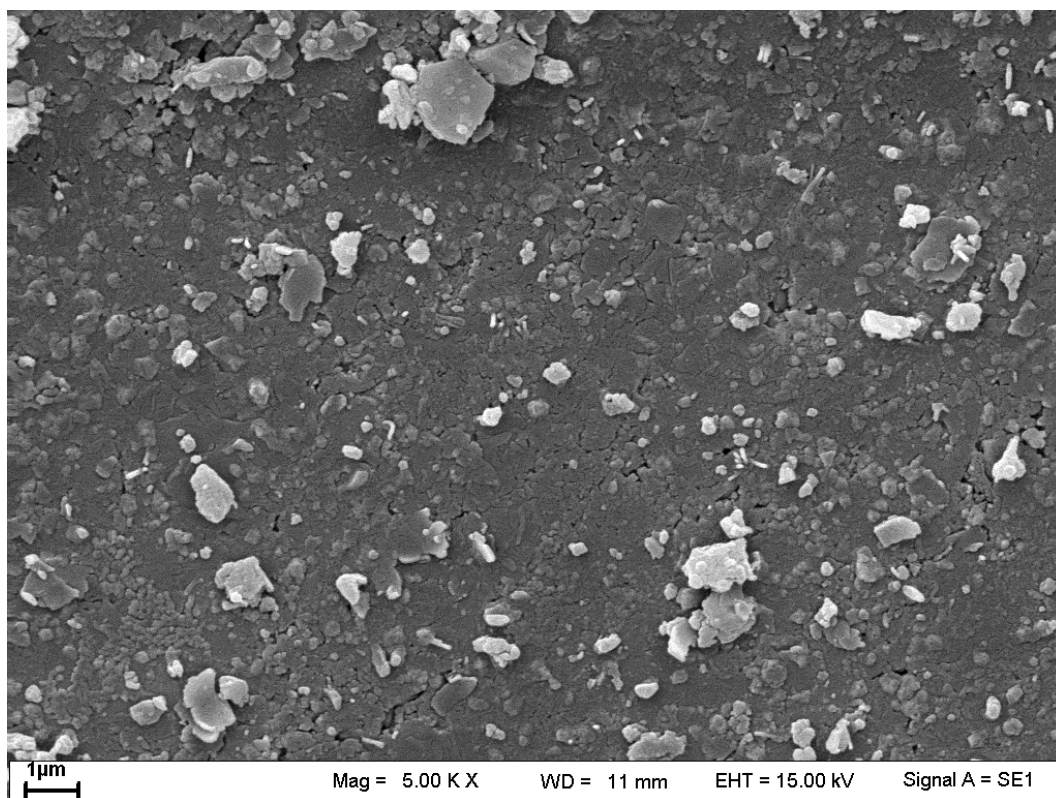
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	44.68	63.26
<i>Na</i>	02.70	02.66
<i>Mg</i>	01.97	01.83
<i>Al</i>	03.74	03.14
<i>Si</i>	10.99	08.86
<i>S</i>	01.22	00.86
<i>Cl</i>	00.84	00.54
<i>K</i>	01.84	01.07
<i>Ca</i>	30.01	16.96
<i>Fe</i>	02.03	00.82



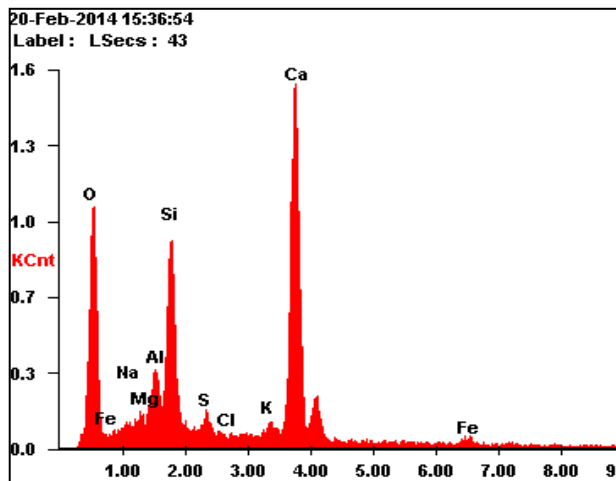
NO.17 (Mix 40FR15)



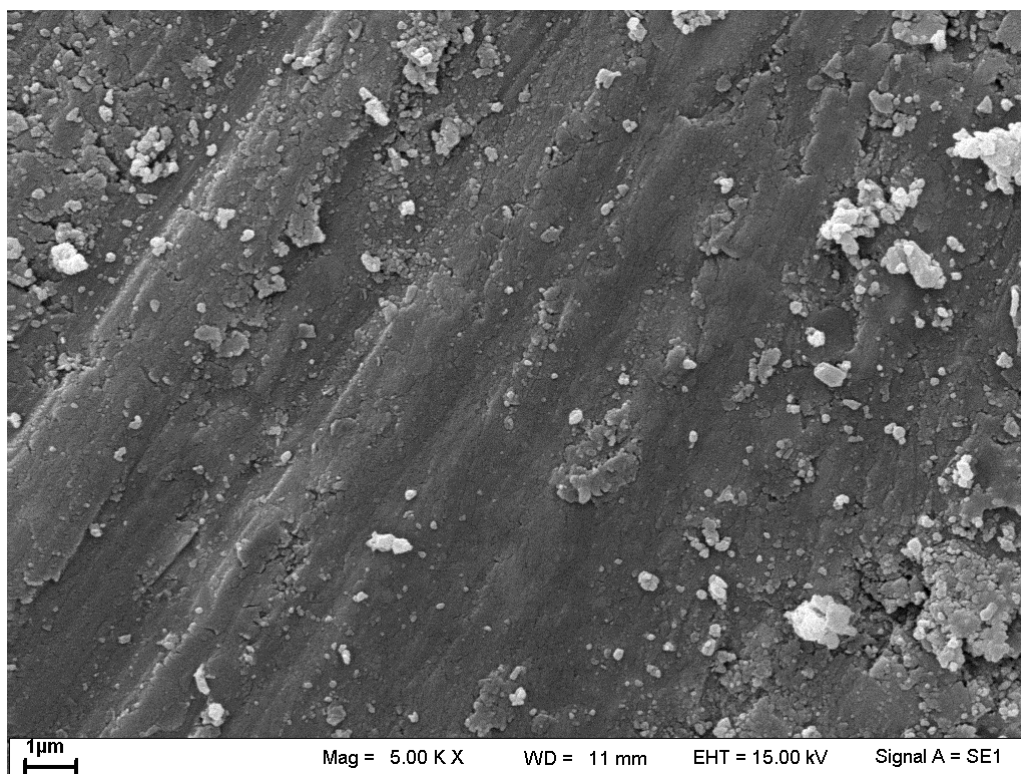
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	44.26	61.85
<i>Na</i>	01.35	01.31
<i>Mg</i>	02.67	02.46
<i>Al</i>	04.68	03.88
<i>Si</i>	18.13	14.43
<i>S</i>	01.05	00.73
<i>Cl</i>	00.16	00.10
<i>K</i>	01.96	01.12
<i>Ca</i>	24.23	13.51
<i>Fe</i>	01.52	00.61



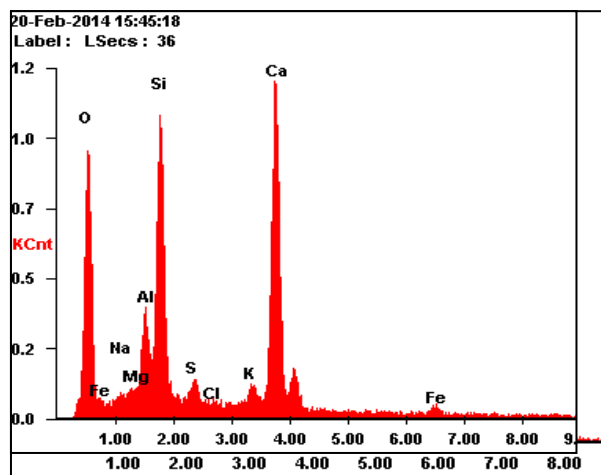
NO.18 (Mix 40FR25)



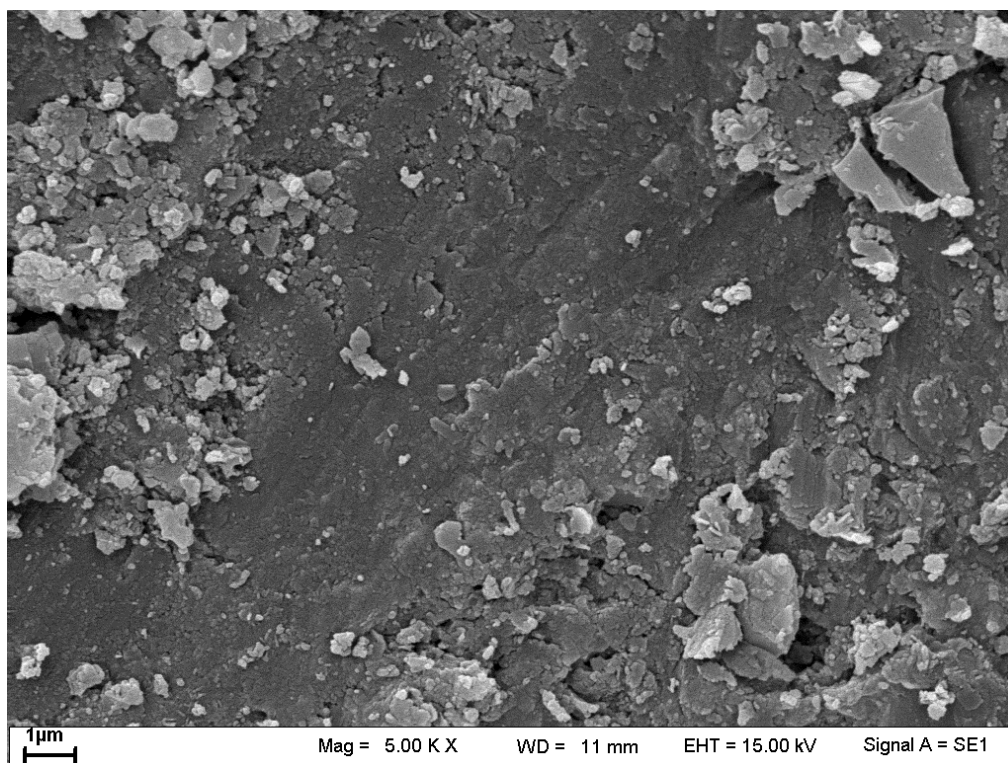
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	46.02	64.87
<i>Na</i>	01.59	01.56
<i>Mg</i>	01.63	01.51
<i>Al</i>	03.95	03.30
<i>Si</i>	10.86	08.72
<i>S</i>	01.15	00.81
<i>Cl</i>	00.07	00.05
<i>K</i>	01.28	00.74
<i>Ca</i>	31.11	17.50
<i>Fe</i>	02.33	00.94



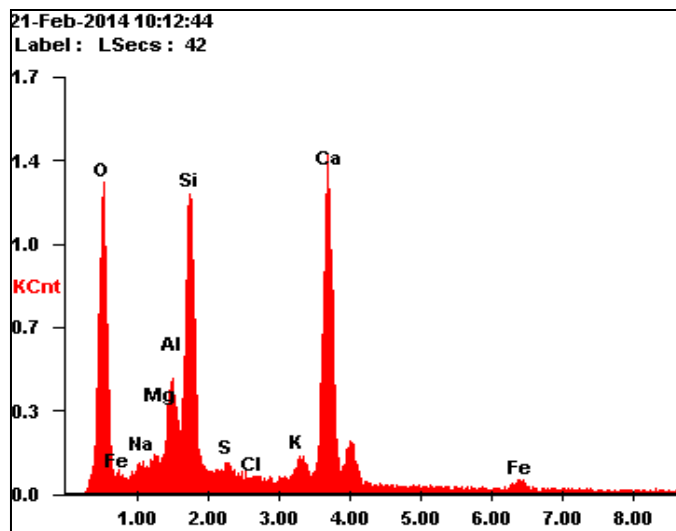
NO.19 (Mix 40FR35)



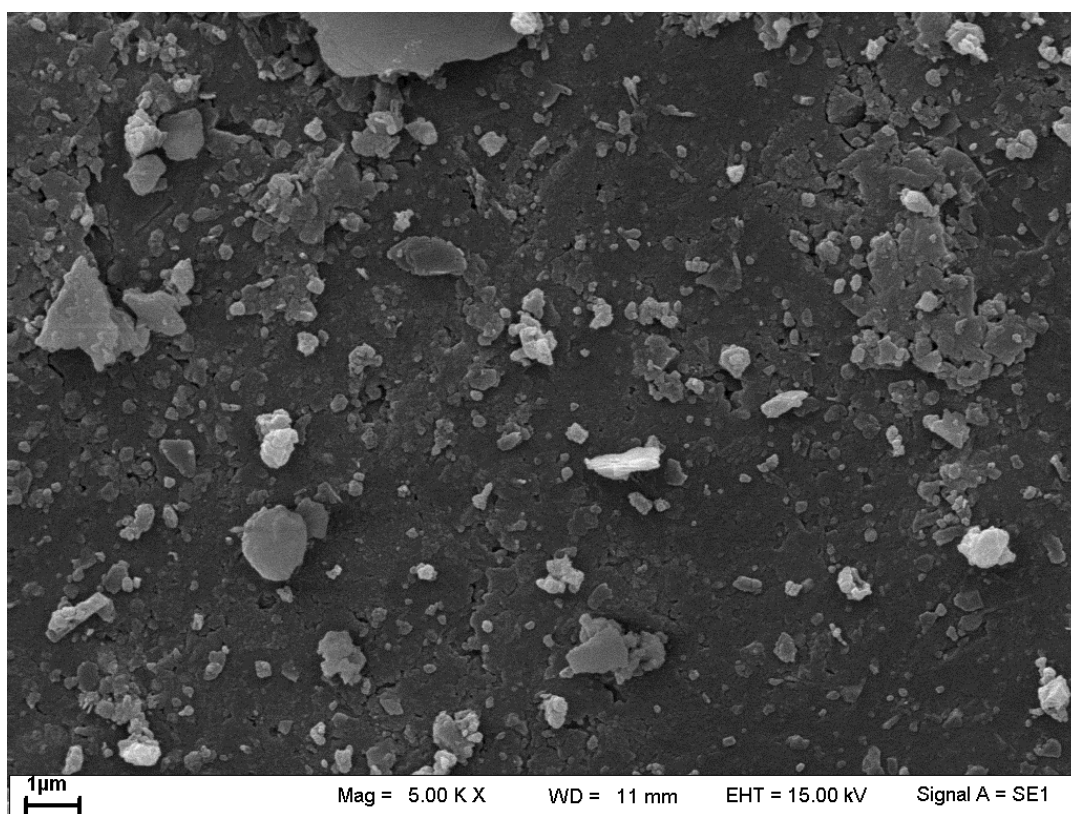
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	46.37	64.83
<i>Na</i>	00.73	00.71
<i>Mg</i>	00.79	00.73
<i>Al</i>	04.86	04.03
<i>Si</i>	14.65	11.67
<i>S</i>	01.36	00.95
<i>Cl</i>	00.15	00.09
<i>K</i>	01.77	01.01
<i>Ca</i>	26.94	15.03
<i>Fe</i>	02.39	00.96



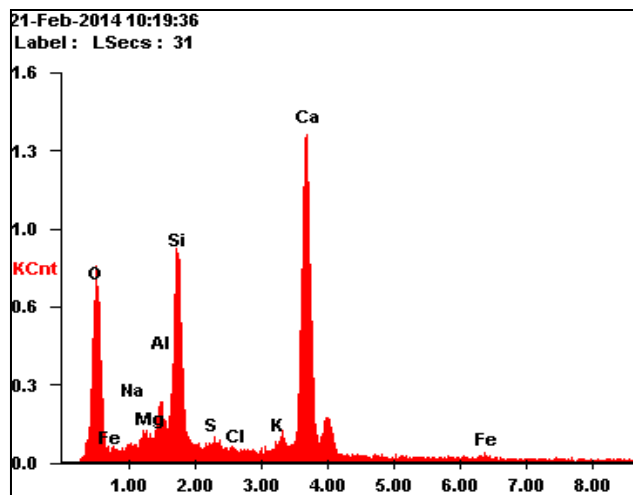
NO.20 (Mix 40FR50)



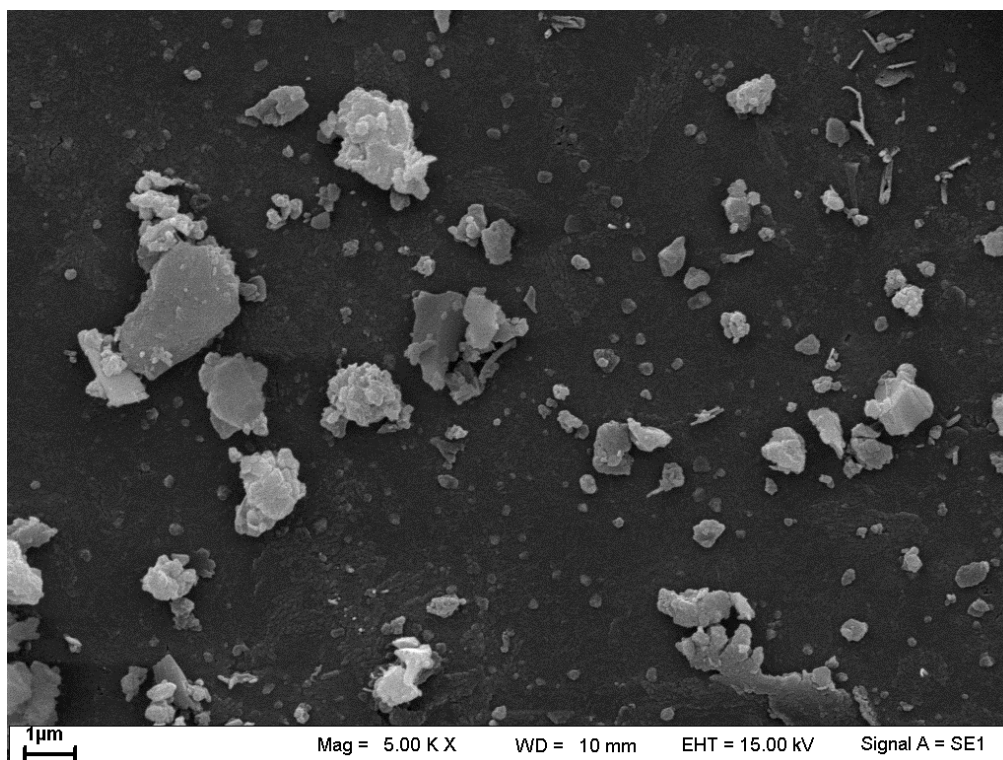
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	46.46	64.75
<i>Na</i>	01.15	01.12
<i>Mg</i>	01.22	01.12
<i>Al</i>	05.34	04.41
<i>Si</i>	14.39	11.43
<i>S</i>	00.90	00.63
<i>Cl</i>	00.23	00.15
<i>K</i>	01.77	01.01
<i>Ca</i>	25.43	14.15
<i>Fe</i>	03.10	01.24



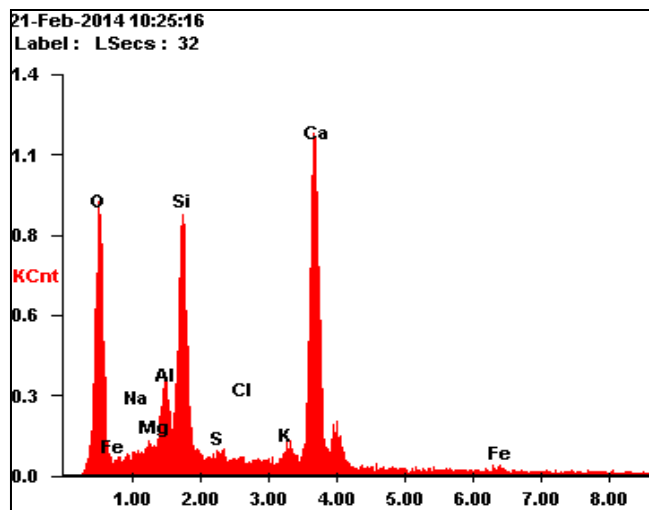
NO.21 (Mix 45FR00)



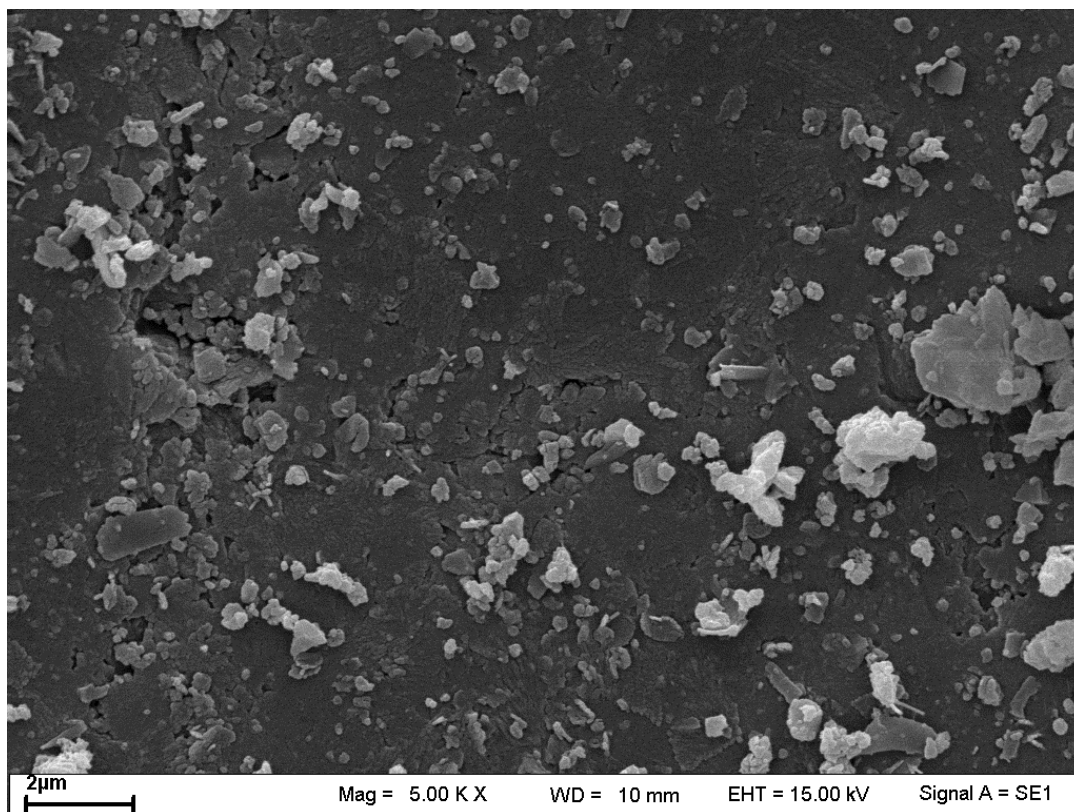
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	44.50	63.71
<i>Na</i>	00.71	00.71
<i>Mg</i>	01.35	01.27
<i>Al</i>	03.03	02.57
<i>Si</i>	12.51	10.20
<i>S</i>	00.78	00.56
<i>Cl</i>	00.12	00.08
<i>K</i>	01.59	00.93
<i>Ca</i>	33.75	19.29
<i>Fe</i>	01.66	00.68



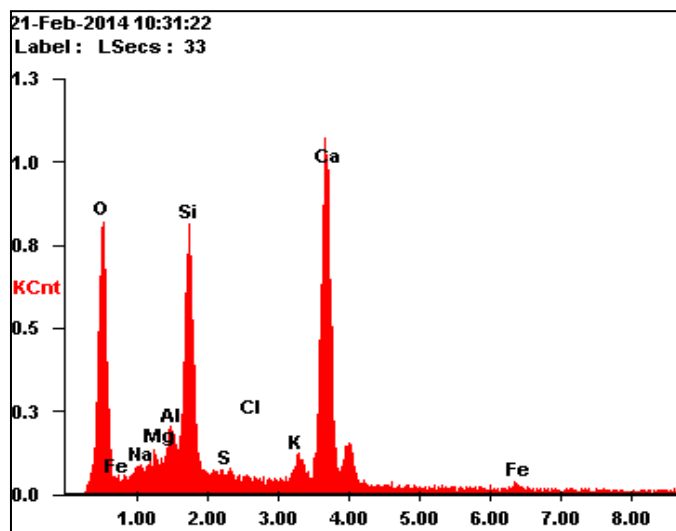
NO.22 (Mix 45FR15)



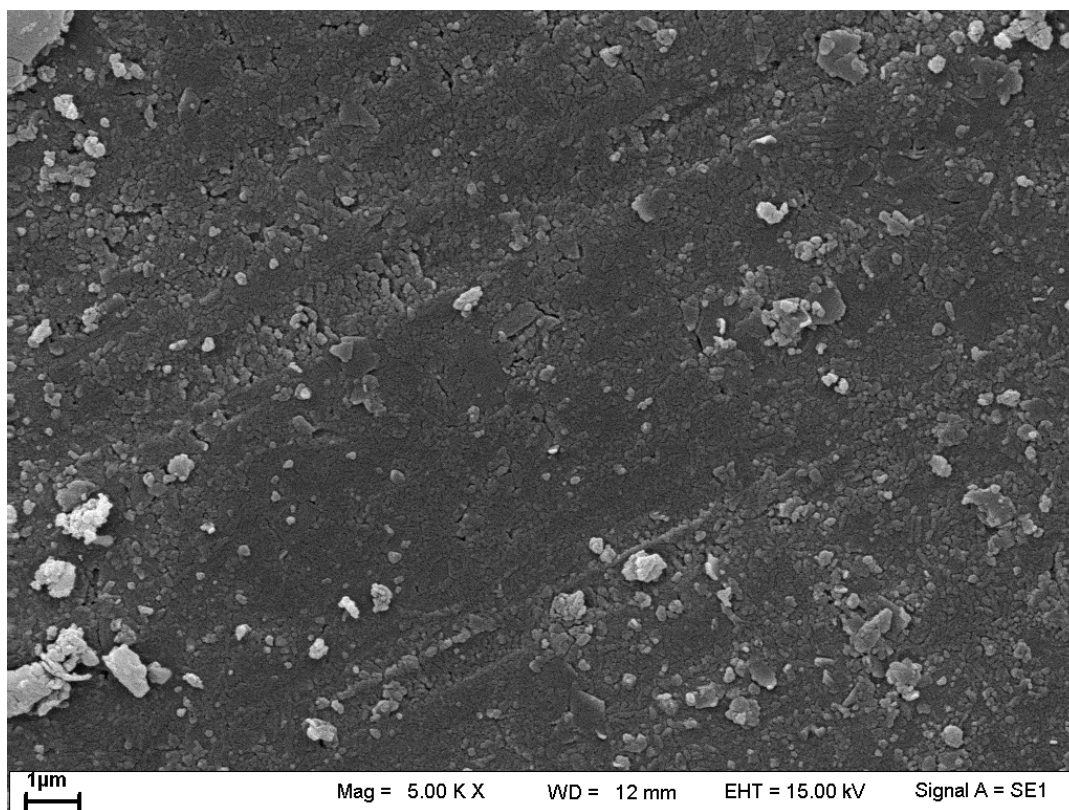
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	47.38	65.96
<i>Na</i>	00.66	00.64
<i>Mg</i>	00.97	00.89
<i>Al</i>	04.38	03.62
<i>Si</i>	13.13	10.41
<i>S</i>	00.78	00.54
<i>Cl</i>	00.29	00.18
<i>K</i>	01.64	00.94
<i>Ca</i>	29.05	16.14
<i>Fe</i>	01.71	00.68



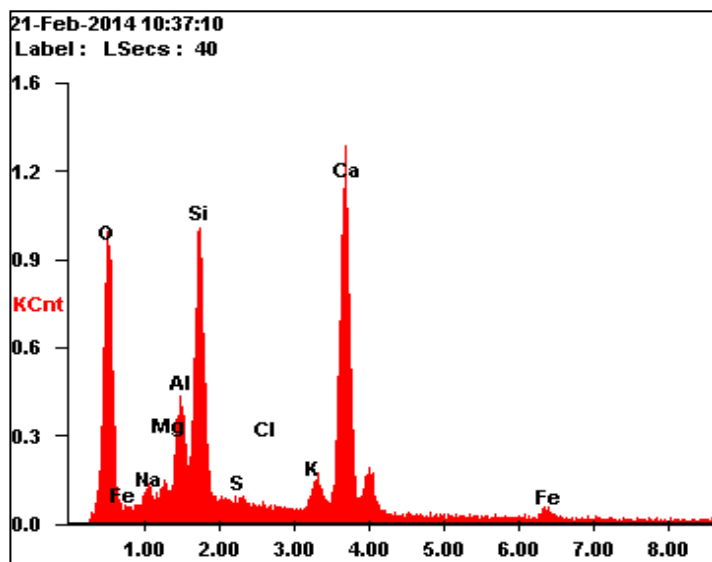
NO.23 (Mix 45FR25)



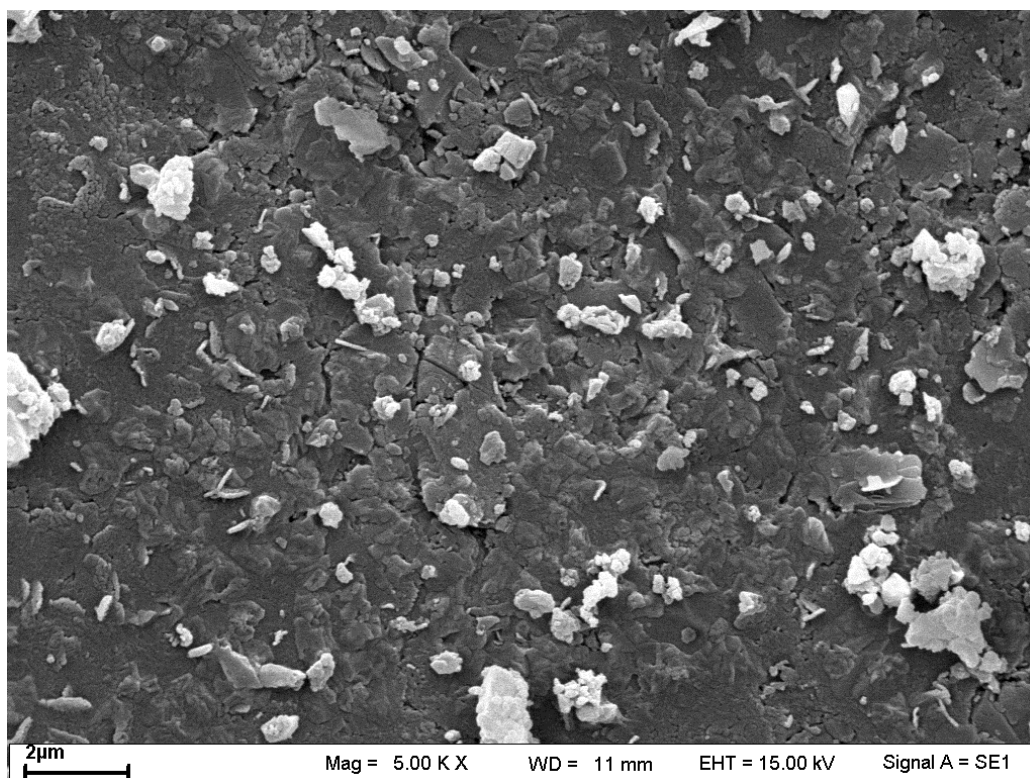
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	45.29	63.68
<i>Na</i>	02.22	02.17
<i>Mg</i>	02.29	02.12
<i>Al</i>	03.46	02.89
<i>Si</i>	12.43	09.96
<i>S</i>	01.11	00.78
<i>Cl</i>	00.72	00.46
<i>K</i>	02.32	01.33
<i>Ca</i>	28.19	15.82
<i>Fe</i>	01.98	00.80



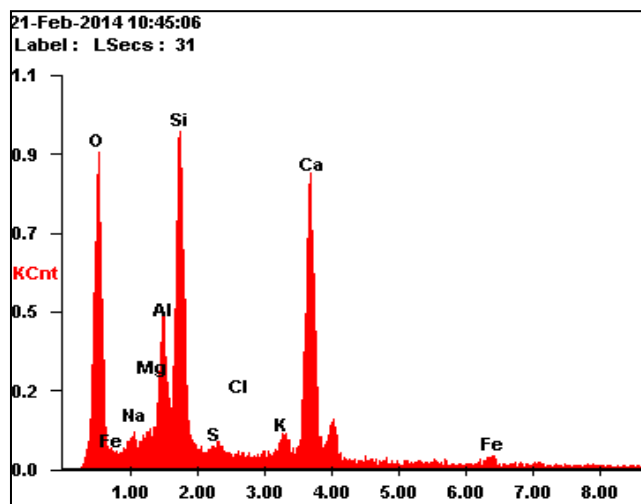
NO.24 (Mix 45FR35)



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	45.67	64.06
<i>Na</i>	01.62	01.58
<i>Mg</i>	01.13	01.04
<i>Al</i>	05.54	04.60
<i>Si</i>	13.47	10.76
<i>S</i>	00.72	00.50
<i>Cl</i>	00.29	00.18
<i>K</i>	02.19	01.26
<i>Ca</i>	26.65	14.92
<i>Fe</i>	02.72	01.09



NO.25 (Mix 45FR50)



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>O</i>	45.46	63.06
<i>Na</i>	02.21	02.14
<i>Mg</i>	01.65	01.51
<i>Al</i>	06.82	05.61
<i>Si</i>	15.75	12.45
<i>S</i>	00.63	00.44
<i>Cl</i>	00.06	00.04
<i>K</i>	01.88	01.07
<i>Ca</i>	22.67	12.56
<i>Fe</i>	02.86	01.14

