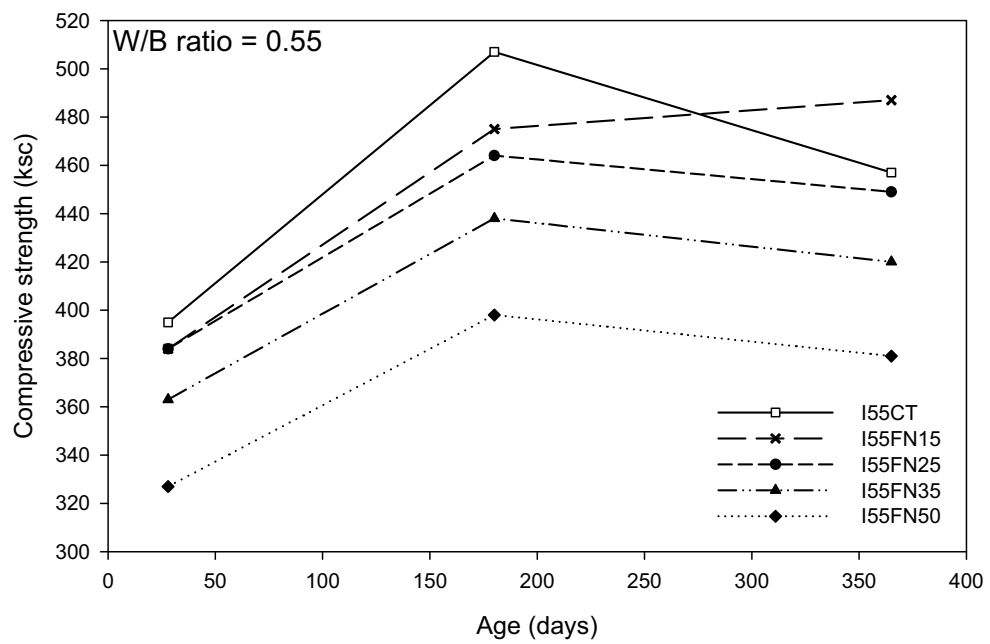
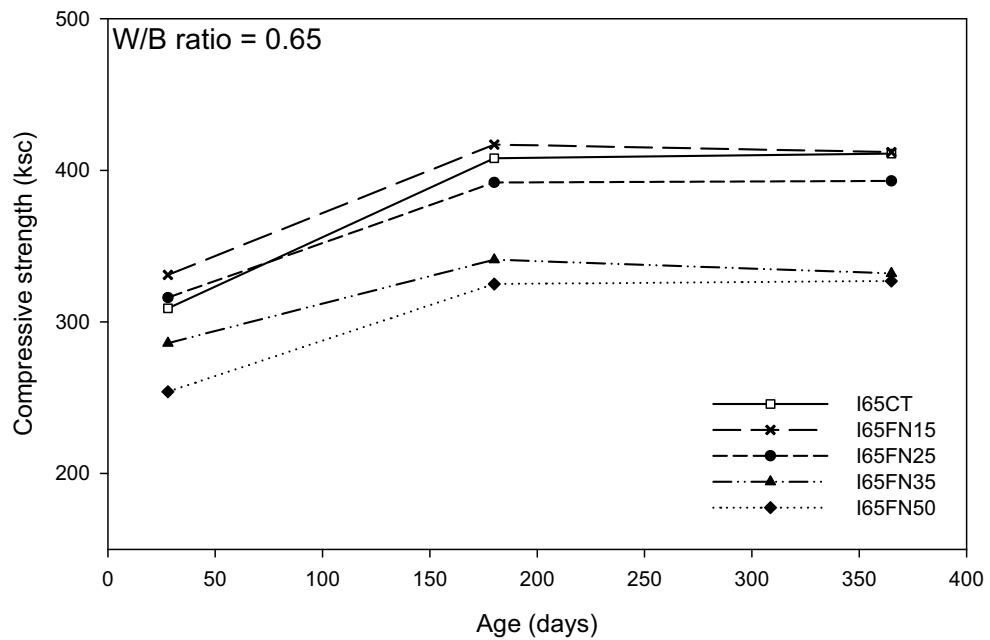


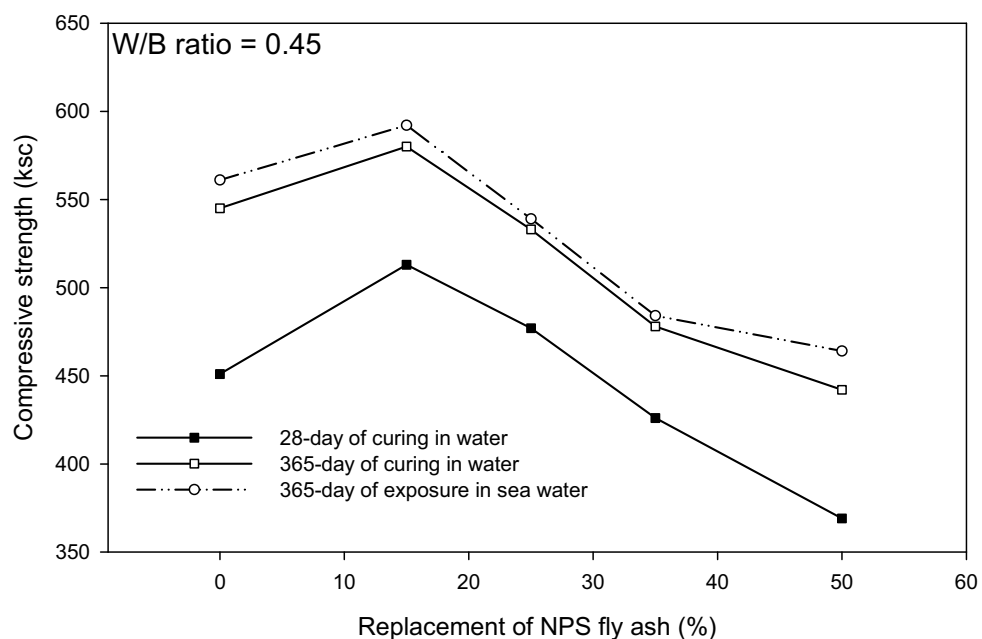


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล

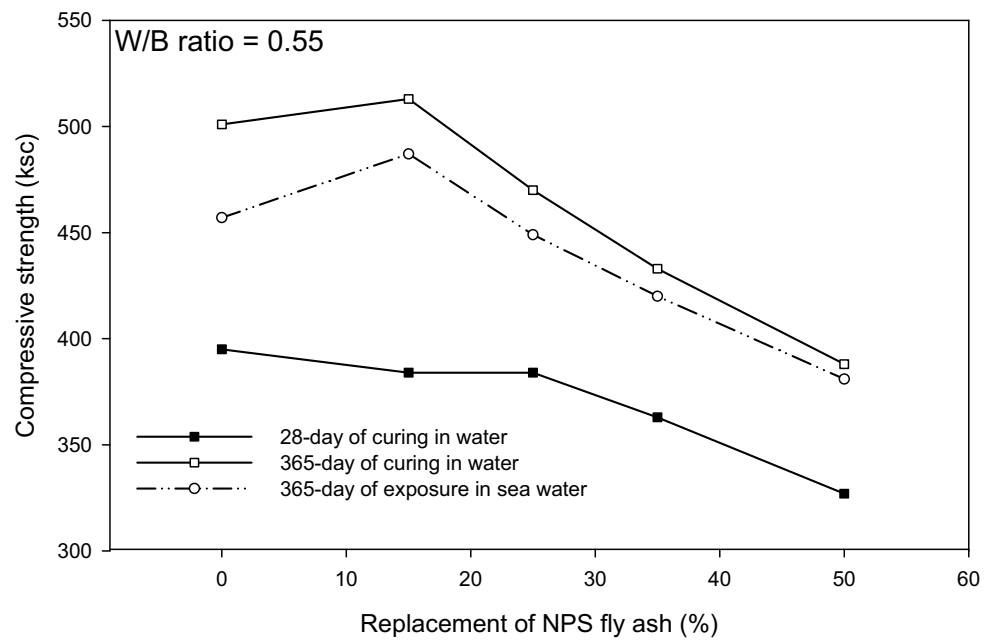


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งแช่ในน้ำทะเล

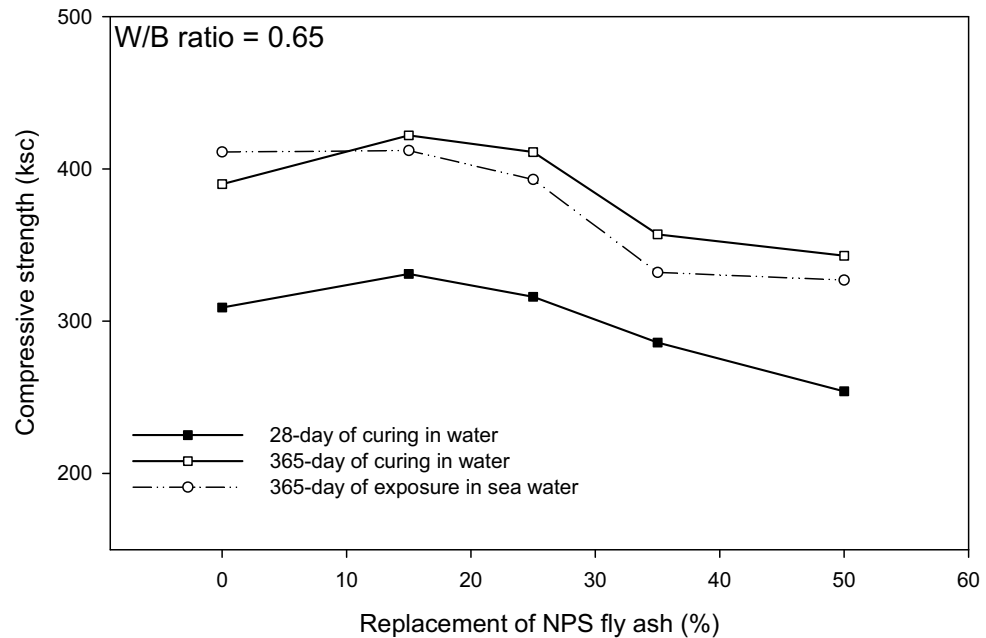
พิจารณารูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 365 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่ระยะเวลาเดียวกัน เนื่องจากคอนกรีตที่แช่น้ำประปา จะอยู่ในสภาวะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และต่อเนื่อง โดยไม่มีสิ่งใดมารบกวน ขณะที่คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลจะเกิดกระบวนการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพ อุณหภูมิ ความชื้น และสารเคมี โดยเฉพาะสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟต ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นแนวโน้มที่เกิดกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา เนื่องจากคอนกรีตมีความทึบน้ำค่อนข้างสูง ดังนั้นการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมทางทะเลในช่วง 365 วัน จึงไม่ค่อยมีผลต่อคอนกรีตมากนัก อีกทั้งยังได้รับปัจจัยเกื้อหนุนจาก Brucite และยิปซัม ซึ่งเป็นผลิตผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟต ($Mg(SO_4)$) กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ช่วยในการอุดโพรงหรือช่องว่างของคอนกรีต และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 ควบคู่ไปจะพบว่า เส้นกราฟของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลมีความใกล้เคียงกันมาก จนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
เอน. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
 เอน. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน
 เอน. พี. เอส. ในปูนซีเมนต์ ของคอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

4.5.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.5.2.1 กำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลถึง 5 ปี ของทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีกำลังอัดลดลงจากอายุ 28 วัน โดยแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 2 กลุ่มมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 3 ปี มีค่าลดลงจากกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่ในช่วงที่คอนกรีตแช่น้ำทะเลระหว่างอายุ 3 ถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเกือบถือได้ว่าสภาวะแวดล้อมทะเลไม่มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงในช่วงอายุที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี แต่ทั้งนี้การลดลงของกำลังอัดจาก 28 วัน มีผลมาจากลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแตกต่างกัน กล่าวคือการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. แต่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเมื่อนำคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้จากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ โดยตัวอย่างที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม.

4.5.2.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ตารางที่ 4.6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลถึงระยะเวลา 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกและไม่แยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน ถึงอายุที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยลักษณะของการพัฒนากำลังอัดแตกต่างจากคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน กล่าวคือ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วัน ถึง 3 ปี และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุแช่น้ำทะเล 5 ปี ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลงในช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุแช่น้ำทะเล 3 ปี แต่อย่างไรก็ตามลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และกลุ่มที่แช่น้ำทะเลแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในช่วงอายุที่แช่น้ำทะเล 3 ถึง 5 ปี ใช้ตัวอย่างที่ได้จากการเจาะเหมือนกัน ซึ่งพบว่ากำลังอัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุแช่น้ำทะเล 5 ปี โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินและคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินตามรูปที่ 4.17 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล ถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงหรือสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหิน โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งโดยภาพรวมแล้วอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Monteiro และ Kurtis, 2003) แม้ว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดที่ดี แต่พบว่ากำลังอัดที่แช่น้ำทะเล 5 ปี มีค่าต่ำที่สุดของแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจาก

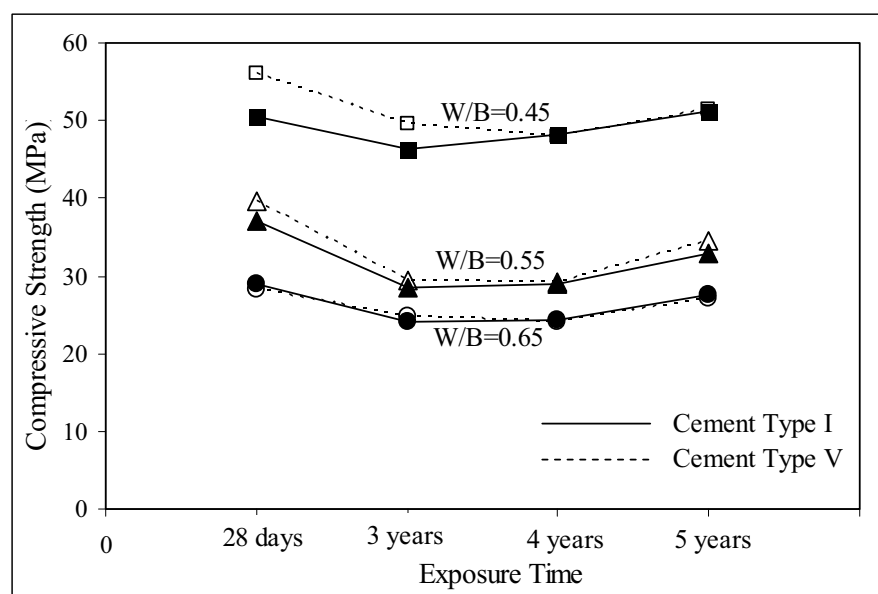
กำลังอัดเริ่มต้นมีค่าต่ำ และพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดถึงร้อยละ 50 แม้ว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มากที่อายุ 28 วัน แต่กำลังอัดระยะยาวที่อายุ 5 ปี ได้พัฒนาจนมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

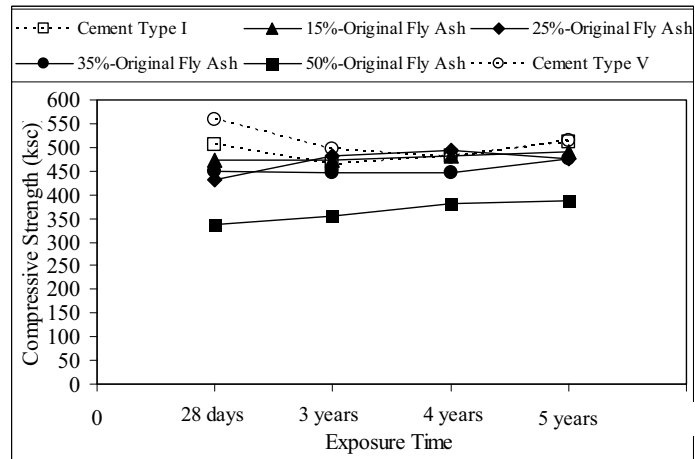
Mix	Compressive strength (ksc)				Mix	Compressive strength (ksc)			
	28-day curing	3-year exposure	4-year exposure	5-year exposure		28-day curing	3-year exposure	4-year exposure	5-year exposure
I45	504	463	483	511	I55O50	209	265	273	286
V45	560	496	469	514	I55F15	409	423	398	390
I45O15	474	473	482	491	I55F25	418	429	390	415
I45O25	432	482	493	476	I55F35	362	433	423	430
I45O35	450	447	446	476	I55F50	255	320	328	347
I45O50	338	355	362	387	I65	290	240	244	276
I45F15	482	550	504	506	V65	283	248	241	270
I45F25	434	513	502	506	I65O15	199	278	287	283
I45F35	461	532	507	539	I65O25	210	271	278	293
I45F50	374	431	442	482	I65O35	229	283	310	323
I55	370	284	273	330	I65O50	166	238	242	246
V55	395	294	273	345	I65F15	242	299	306	344
I55O15	321	342	347	374	I65F25	265	345	356	351
I55O25	303	325	335	347	I65F35	287	293	309	330
I55O35	327	331	340	331	I65F50	197	280	278	294

เมื่อพิจารณาร้อยละของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แทนที่เถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกและไม่แยกขนาดมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดไม่ต่างกันมากนัก ทั้งที่กลุ่มที่แทนที่เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดกว่าน่าจะมีร้อยละของกำลังอัดที่สูงกว่า แต่ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดมีกำลังอัดที่สูงอยู่แล้วที่อายุ 28 วัน ดังนั้นจึงทำให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 5 ปีไม่

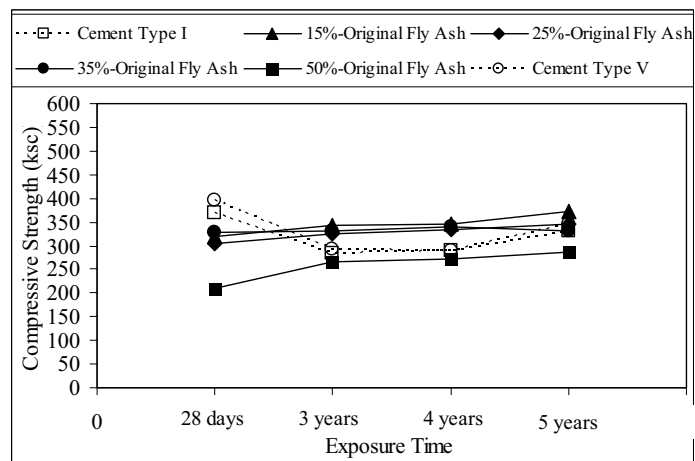
สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดค่อนข้างชัดเจน (ตามตารางที่ 4.6) ทั้งนี้เนื่องมาจากกำลังอัดเริ่มต้นที่สูงกว่า แต่การพัฒนากำลังในระยะยาวในสภาพแวดล้อมทะเลแทบไม่แตกต่างกัน การเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีการพัฒนากำลังอัดในระยะเวลาที่นานขึ้น ตลอดจนผลของเถ้าถ่านหินที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำลดการซึมผ่านของซัลเฟตเข้าไปในเนื้อคอนกรีต รวมทั้งเถ้าถ่านหินยังช่วยลดปริมาณสารตั้งต้น (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ในคอนกรีตที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับซัลเฟตและส่งผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีตลงได้ โดยทั่วไปแล้วสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเลจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite และแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้ส่งผลเสียต่อคอนกรีต โดยทำให้คอนกรีตขยายตัว เกิดการแตกร้าว และสูญเสียกำลังได้ น้ำทะเลที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี มีความเข้มข้นของสารประกอบซัลเฟตประมาณร้อยละ 0.22-0.26 ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณที่ใช้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ (ประมาณร้อยละ 2-5) (Monteiro และ Kurtis, 2003; Goktepe, et al., 2006) รวมทั้งบริเวณที่นำคอนกรีตไปแช่เป็นบริเวณชายฝั่งที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งตามลักษณะของการขึ้น-ลง ของน้ำ ดังนั้นผลกระทบของซัลเฟตที่มีในน้ำทะเลต่อกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงระยะเวลา 5 ปี จึงมีผลไม่มากนัก ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีแนวโน้มที่ดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเพราะเป็นการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่า อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น การเสียดสีของหินทราย แรงกระแทกของคลื่น ความชื้น อุณหภูมิ และอื่นๆ ล้วนมีผลต่อการทำลายคอนกรีตในสภาพแวดล้อมน้ำทะเลทั้งสิ้น



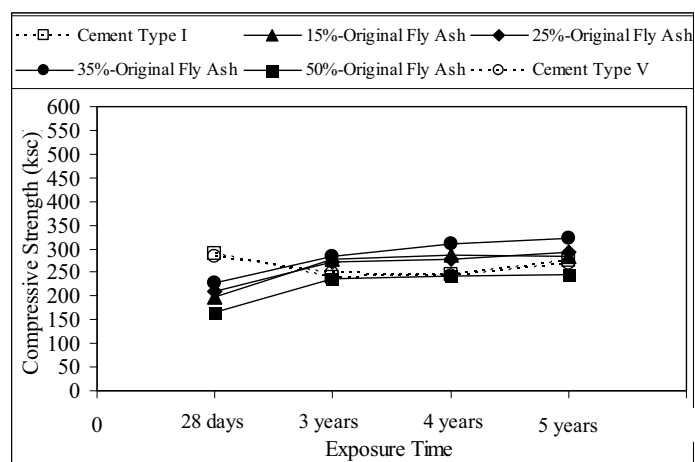
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45

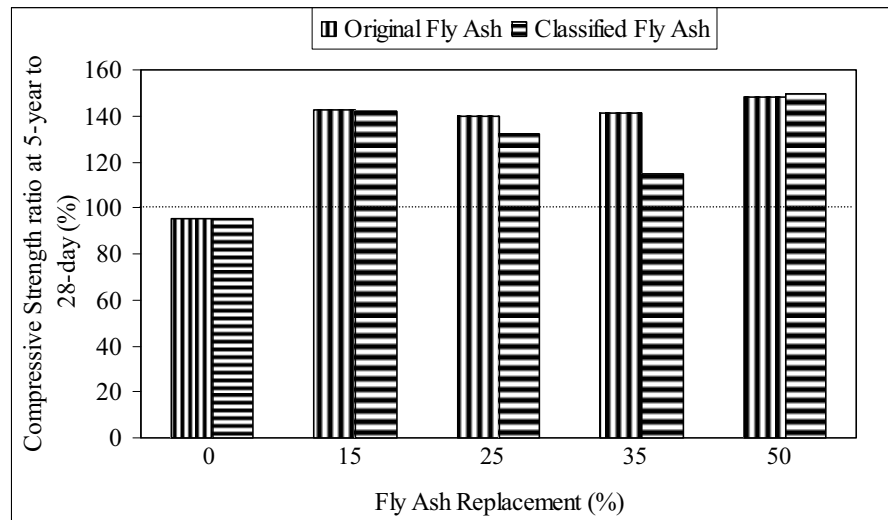


(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 3, 4 และ 5 ปี



รูปที่ 4.18 ร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

4.6 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีต

ขั้นตอนการทดสอบคลอไรด์เริ่มต้นจากการเจาะคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์บริเวณกึ่งกลางก้อน นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ตัดเป็นชิ้นๆ ละ 1 ซม. จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชิ้น จำนวนชิ้นที่ทำการตัด ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล หากคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในทะเลเป็นเวลานานก็ตัดแท่งคอนกรีตมากขึ้น เพื่อให้ข้อมูล Chloride penetration profile ที่มีความสมบูรณ์ จากนั้นนำคอนกรีตแต่ละชิ้นไปบดละเอียด เพื่อทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride)

4.6.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักถังบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ เมื่อพิจารณา คอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น มีการซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ย่อมมีความทึบน้ำและความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำกว่า คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ดังนั้นการซึมผ่านของคลอไรด์จึงมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง

ที่ระยะความลึก 5 มม. จากผิวหน้าของคอนกรีตทุกส่วนผสม พบปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างสูง และมีความแปรปรวนของข้อมูล อันเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งได้รับ

ผลกระทบทั้งทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลสูง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของคลอไรด์ที่ระยะความลึกดังกล่าวได้แม่นยำ แต่ที่ระยะความลึกที่มากขึ้นพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตมีความชัดเจนและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส.

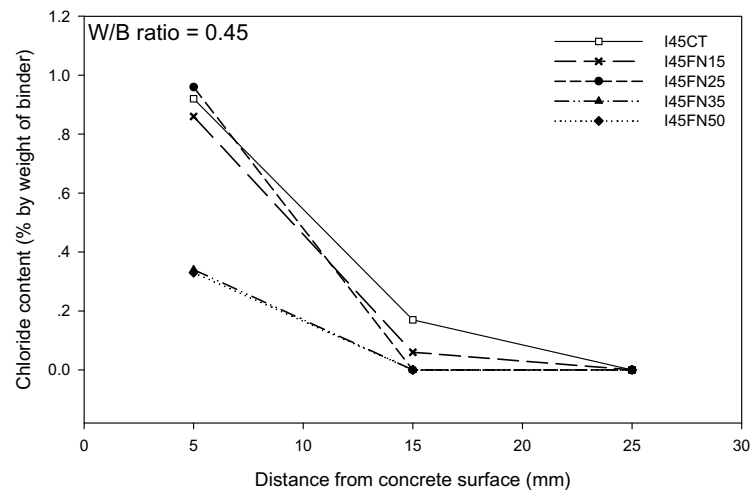
Type of concrete	Chloride content (% by weight of binder)					
	180-day			365-day		
	5 mm.	15 mm.	25 mm.	5 mm.	15 mm.	25 mm.
I45CT	0.92	0.17	0.00	4.35	1.03	0.11
I45FN15	0.86	0.06	0.00	3.38	0.29	0.00
I45FN25	0.96	0.00	0.00	3.06	0.06	0.00
I45FN35	0.34	0.00	0.00	3.33	0.06	0.00
I45FN50	0.33	0.00	0.00	2.78	0.06	0.00
I55CT	1.46	0.69	0.21	6.26	2.85	0.33
I55FN15	2.01	0.55	0.00	4.43	1.87	0.14
I55FN25	2.21	0.55	0.00	4.01	0.48	0.00
I55FN35	0.55	0.14	0.00	4.00	0.28	0.07
I55FN50	0.89	0.00	0.00	3.23	0.07	0.00
I65CT	1.96	1.23	0.41	8.53	5.66	1.39
I65FN15	2.29	0.25	0.08	5.96	3.51	0.41
I65FN25	1.06	0.08	0.00	6.29	2.12	0.33
I65FN35	1.86	0.08	0.00	5.05	0.90	0.08
I65FN50	0.48	0.00	0.00	4.09	0.32	0.00

คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ทุกระดับความลึก มีแนวโน้มน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินจะเข้ามาอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าลดลง เช่น เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

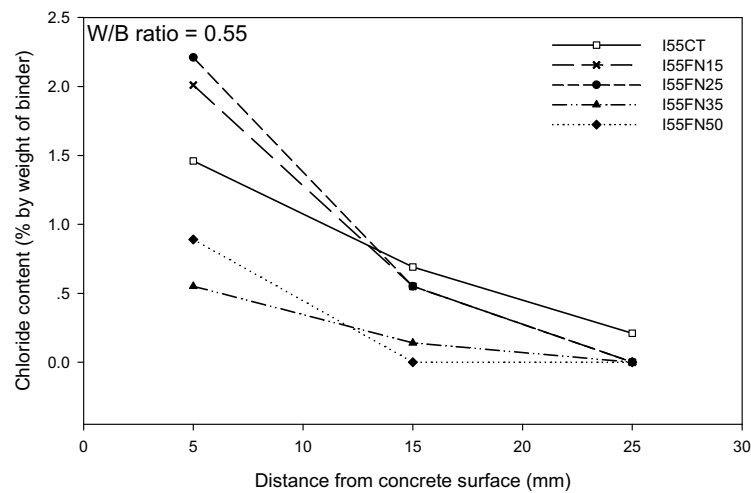
ประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน ที่ระดับความลึก 15 มม. คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0.25, 0.08, 0.08 และ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตควบคุม I65CT มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1.23 แสดงว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ได้ดีขึ้น ขณะที่ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ที่ระดับความลึก 15 มม. ปริมาณคลอไรด์มีค่าร้อยละ 5.66, 3.51, 2.12, 0.90 และ 0.32 สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 ตามลำดับ

ถ้าพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีต I65FN50 มีปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวที่ระยะความลึก 9.2 มม. จากผิวหน้าคอนกรีต ในขณะที่คอนกรีตควบคุม I65CT และ I45CT พบที่ระดับความลึก 22.4 และ 10.6 มม. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ในคอนกรีตสามารถทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ (Glass และ Buenfeld, 1997) ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดังกล่าว ต้องการระยะหุ้มของคอนกรีตควบคุม I65CT และ I45CT อย่างต่ำ 22.4 และ 10.6 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต I65FN50 ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ต้องการระยะหุ้มเพียง 9.2 มม. เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50 สามารถป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เปื้อนสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

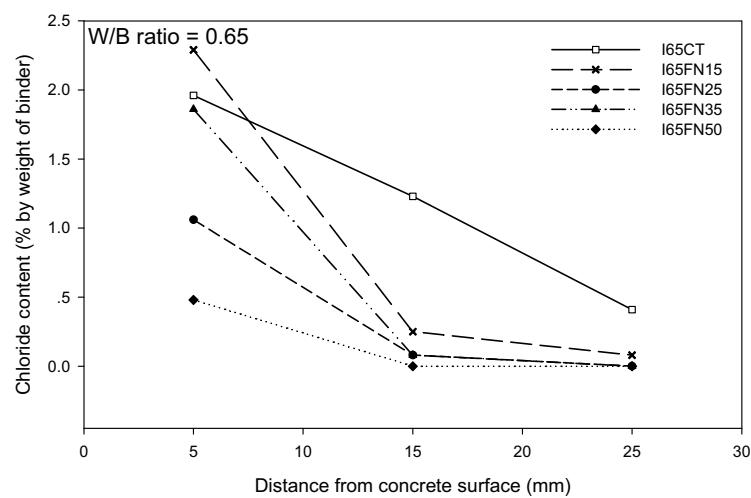
รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออายุการแช่น้ำทะเลเพิ่มขึ้นจาก 180 วัน เป็น 365 วัน คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีตมากยิ่งขึ้น และมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ถ้าพิจารณาคอนกรีต I65CT ที่ระยะความลึก 25 มม. ปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0.41 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถซึมเข้าคอนกรีตโดยใช้เวลา 180 วัน นั่นคือ เมื่อคอนกรีตแช่น้ำทะเลครบ 365 วัน ที่ระยะความลึกนี้ ต้องมีปริมาณคลอไรด์มากกว่าร้อยละ 0.41 เมื่อทำการทดสอบจึงพบว่า มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 1.39 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งปริมาณคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าของปริมาณคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการเก็บผลการทดสอบต่อเนื่องไปในระยะยาว เพื่อให้ข้อมูลการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45

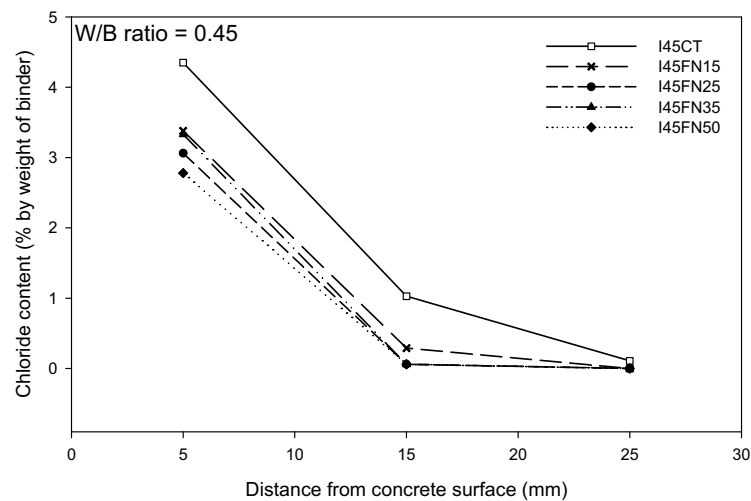


(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55

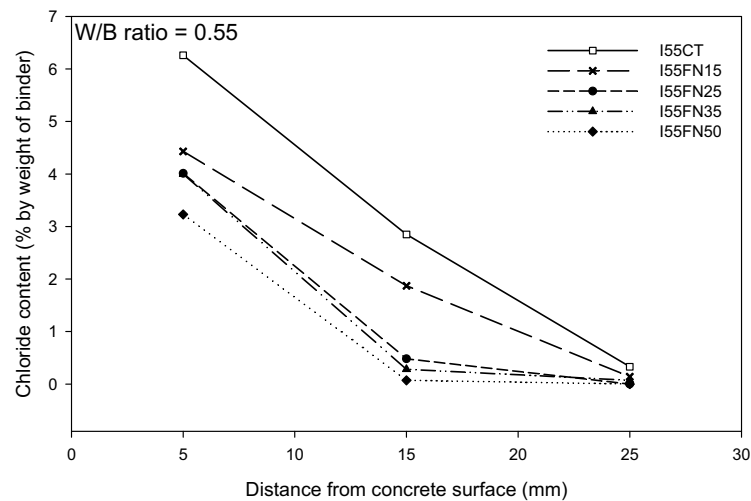


(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

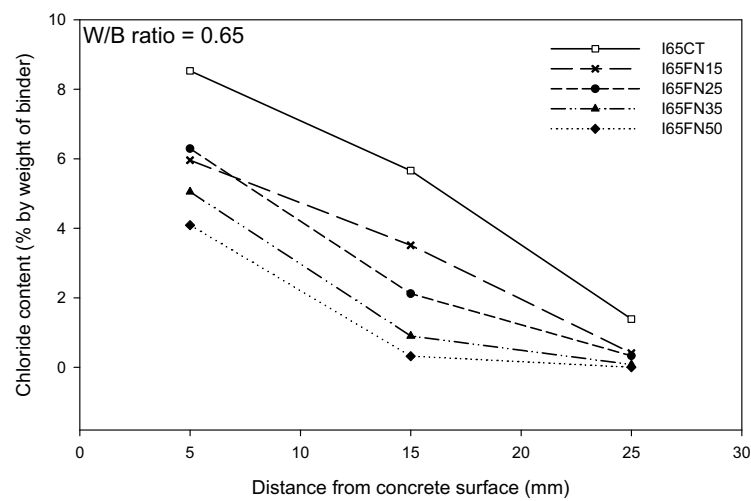
รูปที่ 4.19 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอิน. พี. เอส.
ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



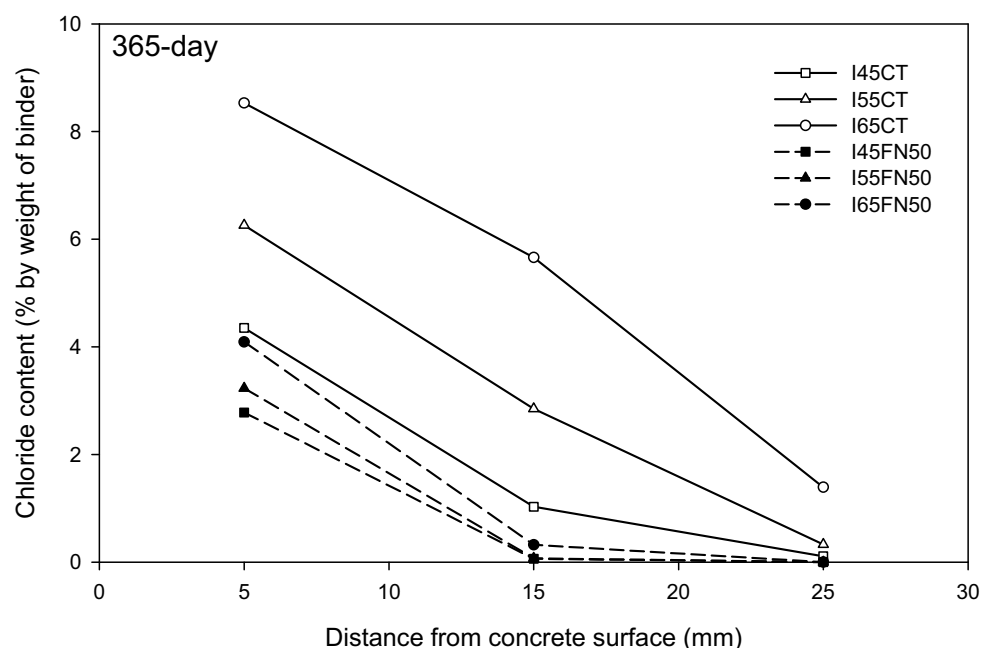
(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.20 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอน. พี. เอส. ซึ่งแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 365 วัน ที่ระยะความลึกต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของกำลังอัดและปริมาณเถ้าถ่านหินที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม I65CT, I55CT และ I45CT มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง และส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตลดลงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ซึ่งเห็นภาพได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.21 แต่เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า ปริมาณเถ้าถ่านหินมีอิทธิพลต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



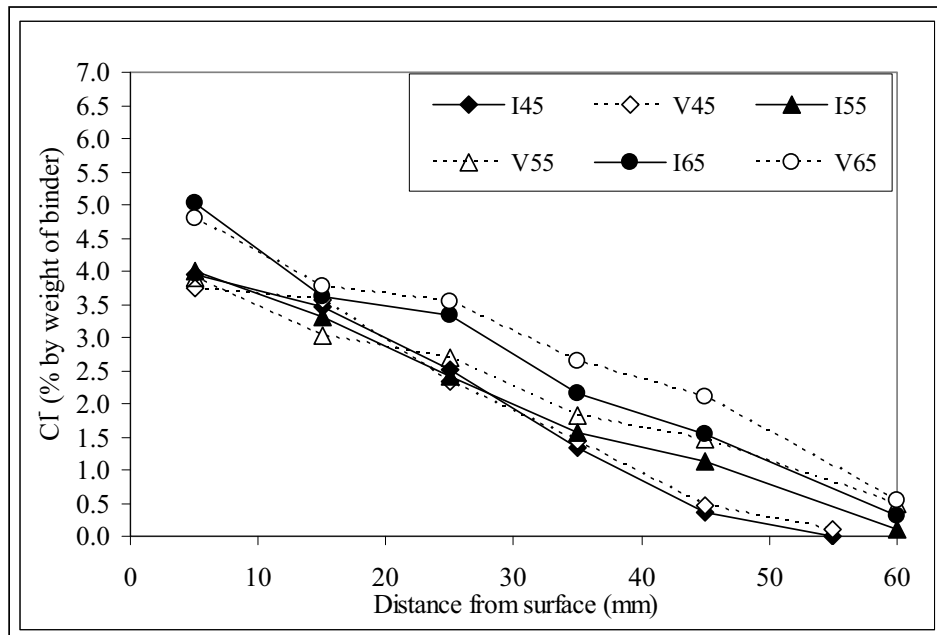
รูปที่ 4.21 ผลกระทบของกำลังอัดต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน เมื่อผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ร้อยละ 0 และ 50

4.6.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

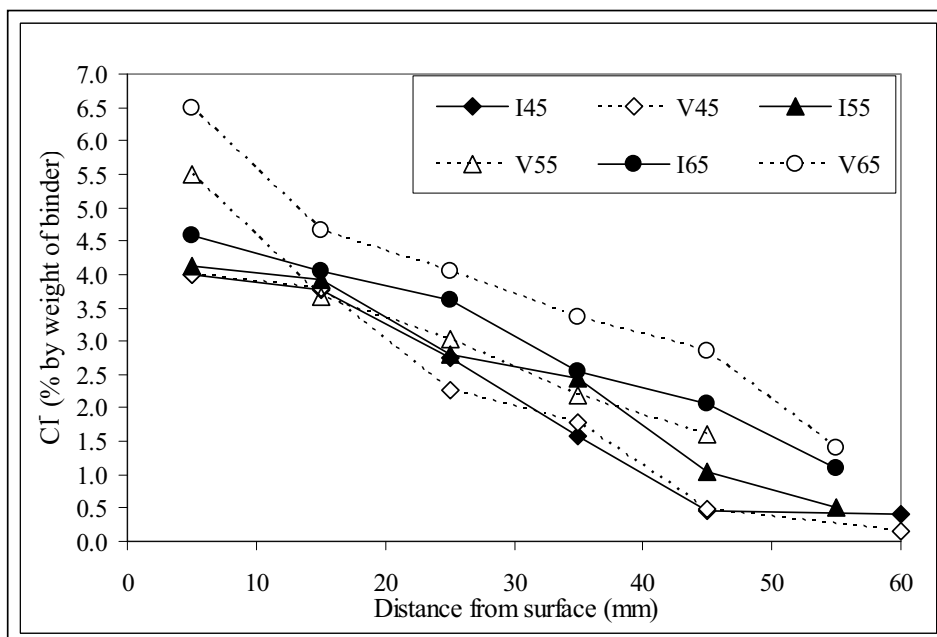
เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V ที่ระยะความลึกต่างๆจากผิวหน้าคอนกรีต ที่ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตลอดอายุการแช่คอนกรีต 4 และ 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า ที่อายุแช่น้ำทะเล 4 ปี คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีแนวโน้มของการซึมเข้าของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V แต่เมื่อแช่น้ำทะเลถึงอายุ 5 ปี คอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V มีปริมาณการซึมเข้าของคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่พบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I จะมีการซึมเข้าของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V เมื่อ

พิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณการซึมเข้าของคลอไรด์ พบว่าปริมาณคลอไรด์มีค่าต่ำลง เมื่อคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักความรู้โดยทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีตโดยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีกำลังอัดสูงขึ้น มีความทึบน้ำมากขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์มีค่าน้อยลง

ข้อมูลการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 4 และ 5 ปี มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การใช้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I สามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ โดยเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นจะลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคละเอียดเข้าไปอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีต ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดจำนวนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้ เป็นผลให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำจึงสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และคณะ, 2542; Chindaprasirt, et al., 2007) ทั้งนี้ถ้าพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลถึง 5 ปี พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดร้อยละ 50 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบปริมาณคลอไรด์ดังกล่าวที่ระยะความลึก 18 มม. จากผิว ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน พบที่ระดับความลึกจากผิว 40 และ 50 มม. ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตมีค่าสูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (Threshold Chloride) ที่แสดงไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee, et al., 2006; Thomas, 1996) นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ขนาดนี้สามารถทำให้เหล็กเริ่มเกิดสนิมได้ และการป้องกันการถูกทำลายดังกล่าวภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี ต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กสำหรับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 อย่างต่ำ 40 และ 50 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ร้อยละ 50 ต้องการระยะหุ้มเหล็กเพียง 18 มม. และถ้าใช้เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันต้องการระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพียง 13 มม. เท่านั้น

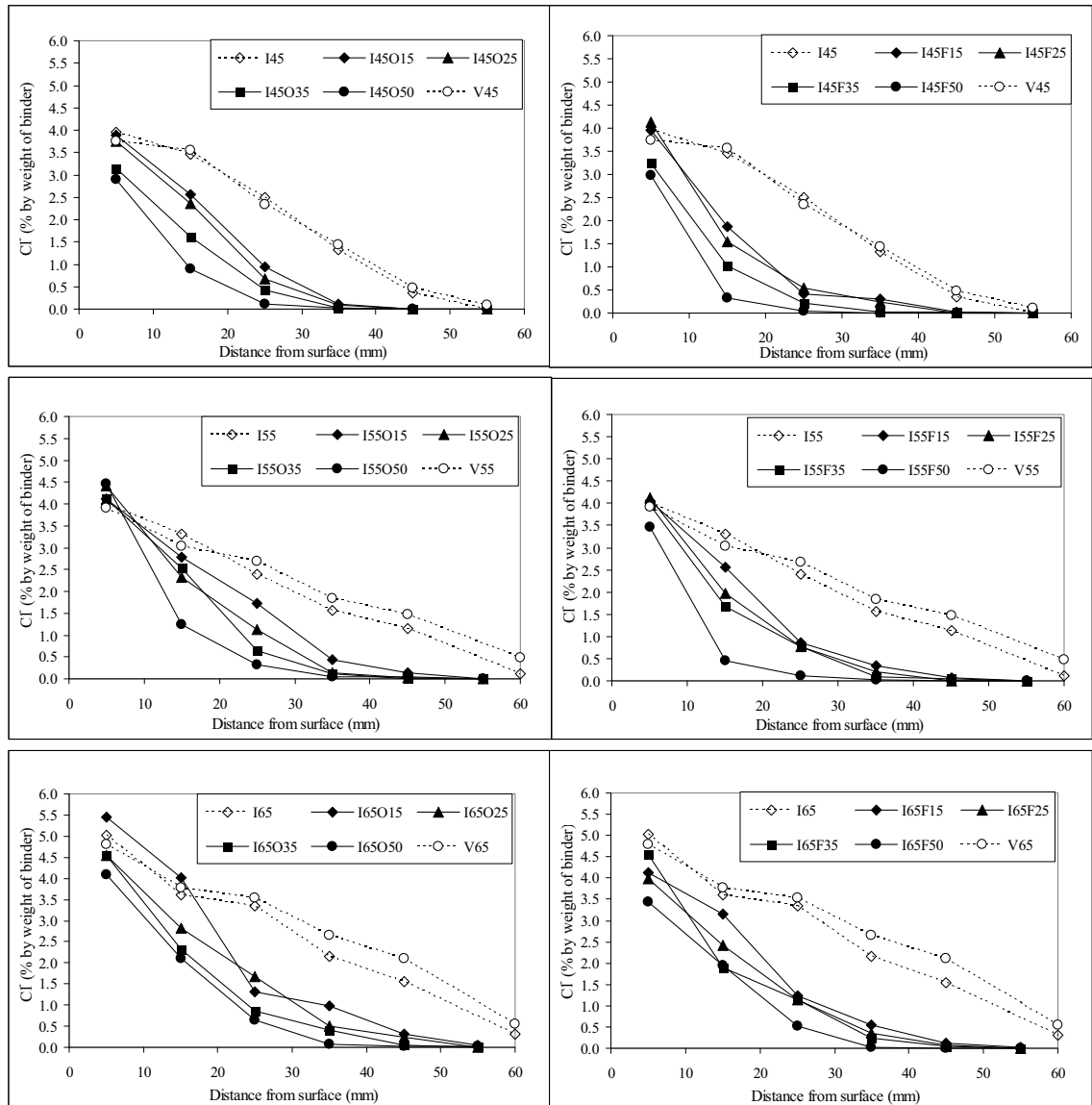


(ก) คอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเล 4 ปี

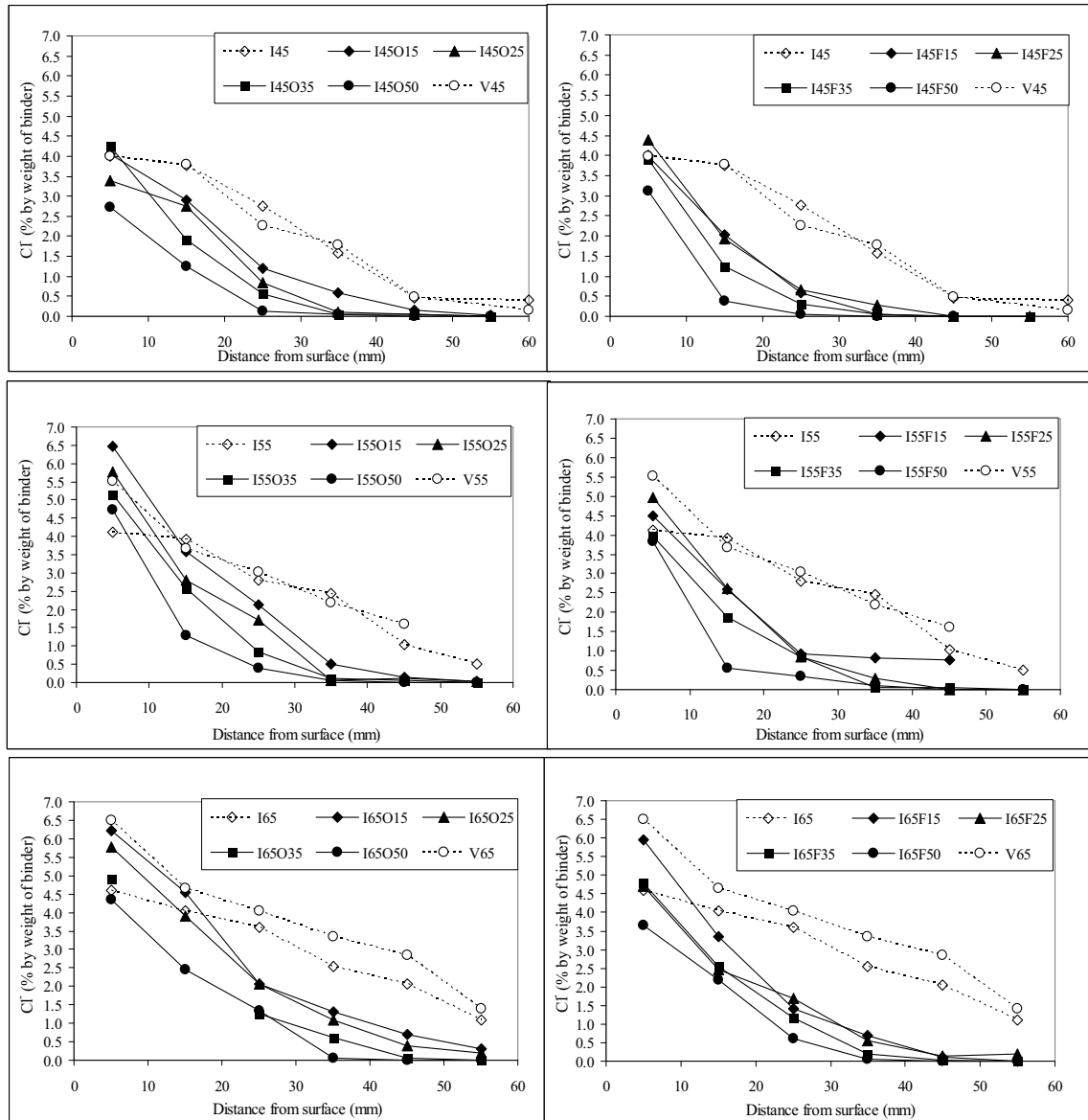


(ข) คอนกรีตที่มีอายุการแช่น้ำทะเล 5 ปี

รูปที่ 4.22 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในสถานะแวดล้อมทะเล

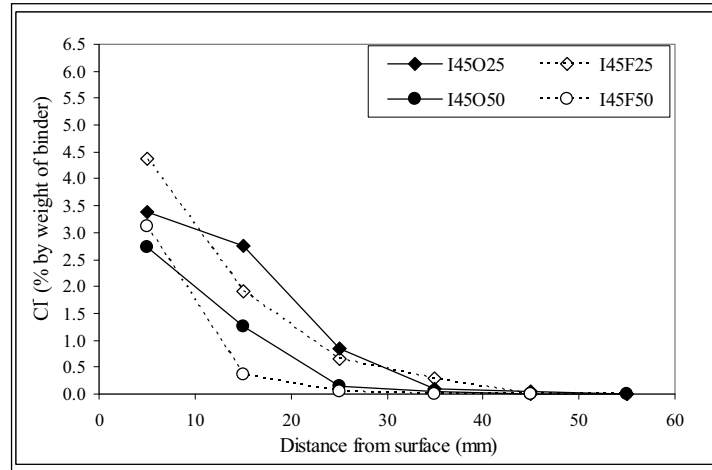


รูปที่ 4.23 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่ในน้ำทะเล 4 ปี

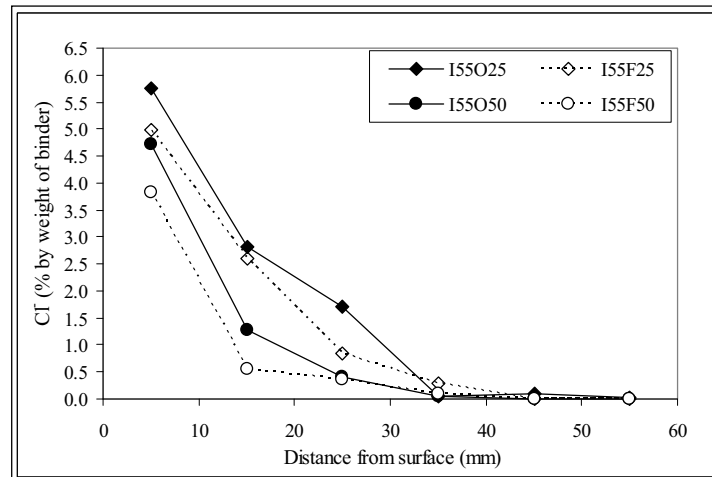


รูปที่ 4.24 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่น้ำทะเล 5 ปี

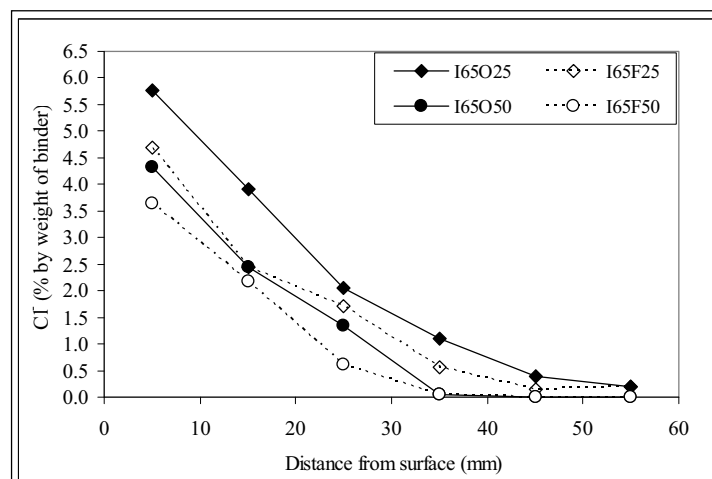
เมื่อพิจารณาการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่ได้แยกและแยกขนาดร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า แนวโน้มของการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ การใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดจะมีอนุภาคที่เล็กส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและการเข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตเป็นไปได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ถึงแม้จะนำมาใช้โดยตรง โดยไม่ผ่านการคัดแยกขนาดให้เล็กลง ก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาวะแวดล้อมทะเล และสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะมีลักษณะค่อนข้างดี กล่าวคือ มีรูปทรงที่กลมและตัน ตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินก่อนแยกขนาด และหลังผ่านการแยกขนาดไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องคัดแยกขนาดให้เล็กลง อย่างไรก็ตาม การคัดแยกขนาดให้เล็กลงทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงมากขึ้น และเพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีตได้เป็นอย่างดี



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55



(ค) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.65

รูปที่ 4.25 ผลของความละเอียดของเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดแม่เมาะต่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อแช่ในน้ำทะเล 5 ปี

4.7 การสำรวจความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

หลังจากทำการเจาะคอนกรีตเพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จึงนำคอนกรีตดังกล่าวมาทำการกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดให้วับัติ จากนั้นเก็บแท่งเหล็กที่ฝังตามตำแหน่งระยะหุ้มต่างๆ เพื่อนำมาสำรวจความเป็นสนิมโดยการวัดพื้นที่การเกิดสนิม

4.7.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักดั่งบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ความเป็นสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ที่ระยะหุ้มต่างๆ หลังจากคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน พบว่า ที่ระยะหุ้ม 1 ซม. เหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตส่วนใหญ่ยังไม่เกิดสนิม ส่วนเหล็กที่เกิดสนิมจะเป็นเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 ซึ่งมีพื้นที่การเกิดสนิมไม่เกินร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั้งหมด สำหรับที่ระยะหุ้ม 2 ซม. พบเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า สารละลายคลอไรด์หรือสารเคมีอื่นในน้ำทะเลยังซึมเข้าไปไม่ถึงเหล็กที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 5 และ 7.5 ซม.

เมื่อคอนกรีตมีอายุการแช่น้ำทะเลครบ 365 วัน พื้นที่ผิวของเหล็กเกิดสนิมมากกว่าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน ดังตารางที่ 4.8 โดยเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทุกสัดส่วนผสมเกิดสนิมที่ระยะหุ้ม 1 ซม. ส่วนที่ระยะหุ้ม 2 ซม. มีเพียงคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินเท่านั้นที่เหล็กเป็นสนิม สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 จะมีแนวโน้มการเกิดสนิมน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 นั่นคือ สนิมเหล็กจะเกิดกับเหล็กที่ฝังในคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณน้อย โดยภาพรวมของคอนกรีตที่อายุการแช่น้ำทะเล 365 วัน พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 ของพื้นที่ทั้งหมดของแท่งเหล็ก

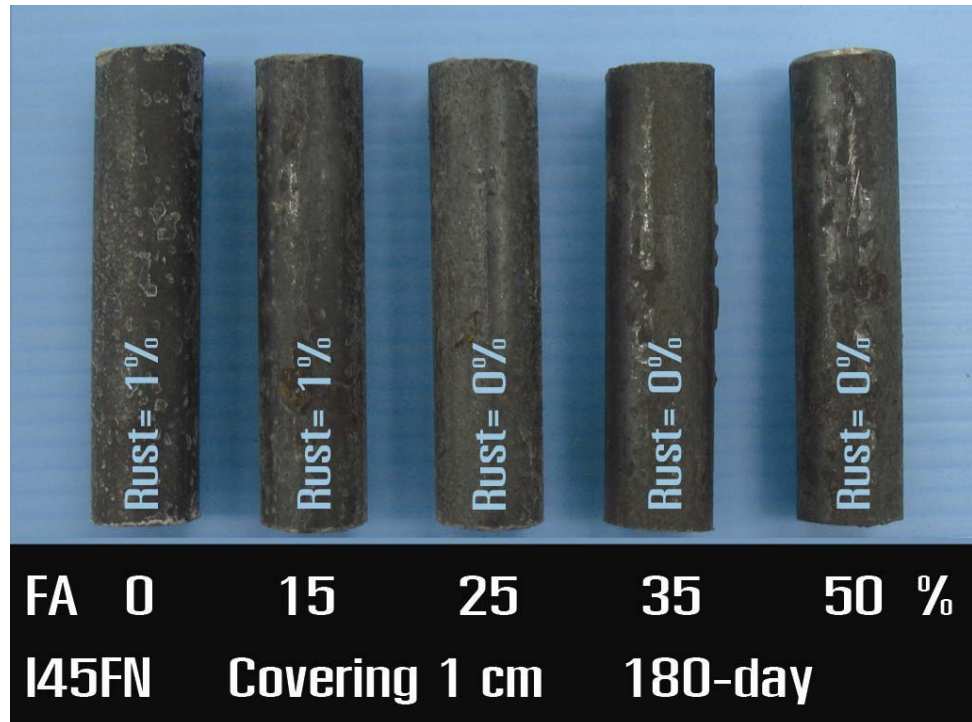
เมื่อนำแท่งเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคอนกรีตแช่น้ำทะเล 180 วันมาพิจารณา พบว่า สนิมเหล็กหรือออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นเป็นเพียงคราบสนิมที่ติดอยู่บนผิวเหล็กเท่านั้น เมื่อนำแปรงทองเหลืองขัดบริเวณที่เกิดสนิม ปรากฏว่า สนิมหลุดออกจากผิวเหล็กอย่างง่ายดาย โดยที่แท่งเหล็กยังไม่มีร่องรอยของความเสียหายเนื่องการกัดกร่อน ส่วนแท่งเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน ลักษณะของสนิมที่เกิดขึ้นเป็นสนิมขุม (Pitting) สีน้ำตาลแดง โดยสนิมเริ่มกัดกร่อนผิวโลหะจนลึกเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งสนิมที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาของเหล็กกับออกซิเจน โดยมีความชื้นและสารละลายคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะพื้นที่การเกิดสนิมบนแท่งเหล็กจะเกิดขึ้นเฉพาะจุด ไม่

เกิดแบบกระจายไปทั่วทั้งแท่งเหล็ก แสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลาการแช่น้ำทะเล 365 วัน สารละลายคลอไรด์เริ่มเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งที่เหล็กเกิดสนิมเท่านั้น ยังไม่ได้แพร่กระจายไปทั่วบริเวณระยะหุ้มดังกล่าว หากสารละลายคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไปแล้ว ลักษณะพื้นที่การเกิดสนิมบนแท่งเหล็กจะเกิดแบบกระจายทั่วทั้งแท่ง

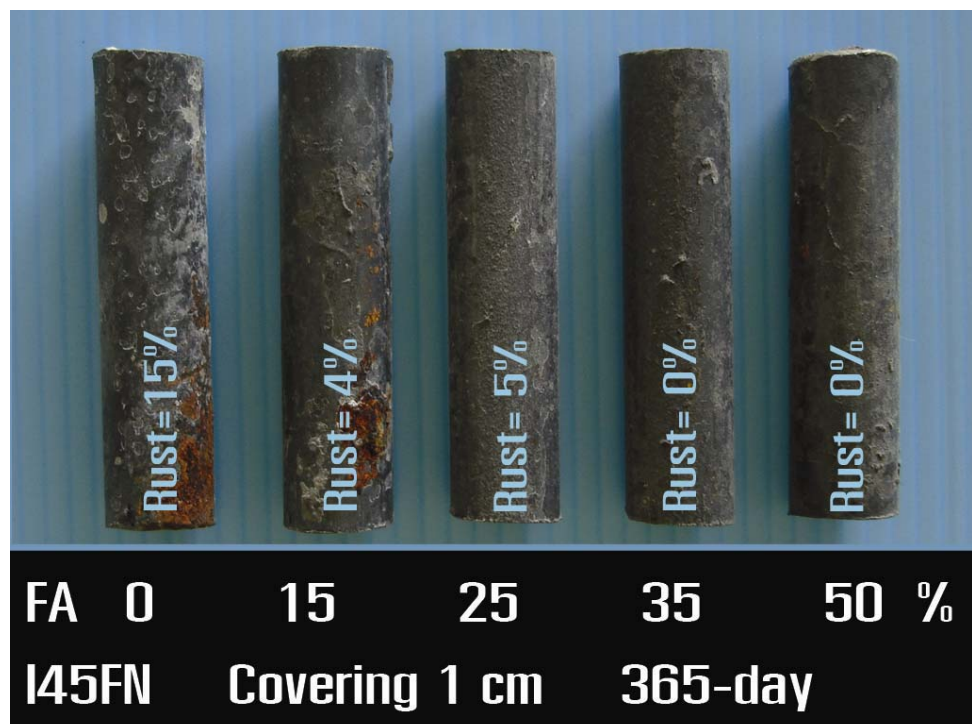
ตารางที่ 4.8 พื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส.

Type of concrete	Rusted area of the embedded steel (%)			
	180-day exposure		365-day exposure	
	10 mm	20 mm	10 mm	20 mm
I45CT	1	0	15	0
I45FN15	1	0	4	0
I45FN25	0	0	5	0
I45FN35	0	0	0	0
I45FN50	0	0	0	0
I55CT	6	0	17	3
I55FN15	0	0	0	0
I55FN25	0	0	0	0
I55FN35	0	0	0	0
I55FN50	0	0	0	0
I65CT	9	2	13	11
I65FN15	6	0	9	0
I65FN25	0	0	11	0
I65FN35	0	0	1	0
I65FN50	0	0	3	0

การเปรียบเทียบปริมาณสนิมเหล็กโดยการนับพื้นที่การเกิดสนิม และการใช้ภาพถ่ายของแท่งเหล็กที่เกิดสนิมเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ผล ทำให้เห็นแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการซึมผ่านของคลอไรด์ นั่นคือ สนิมจะเกิดขึ้นบนเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตควบคุมมากกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น ปริมาณสนิมก็มีแนวโน้มที่จะเกิดน้อยลง ซึ่งในขั้นตอนนี้ ข้อมูลการเกิดสนิมเหล็ก ยังไม่สามารถวิเคราะห์และเชื่อมโยงกับข้อมูลอื่นได้มากนัก จำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไป

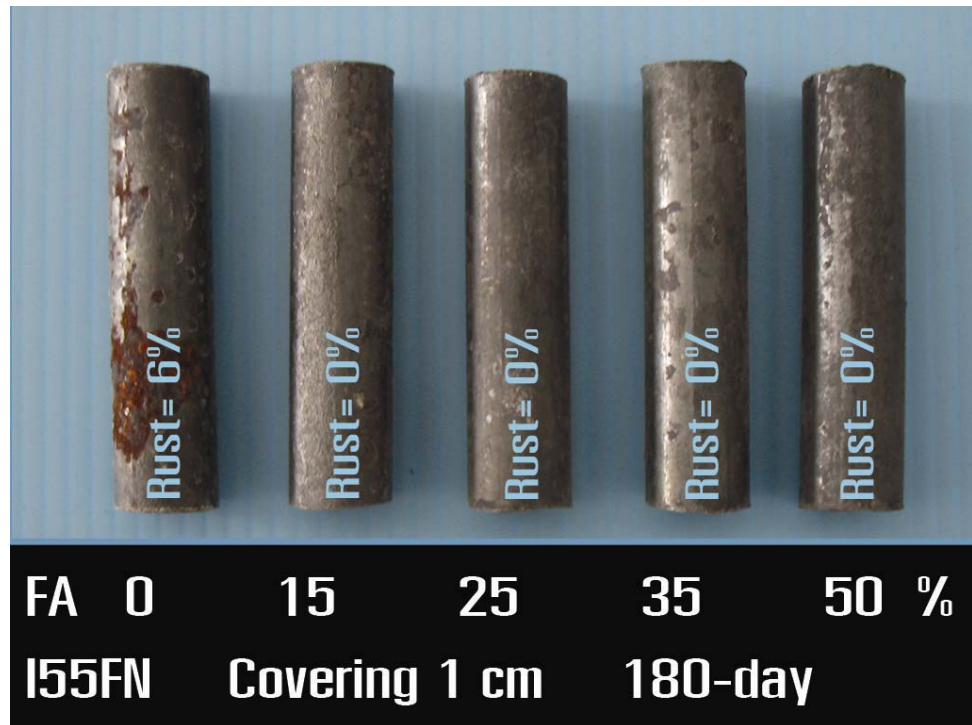


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

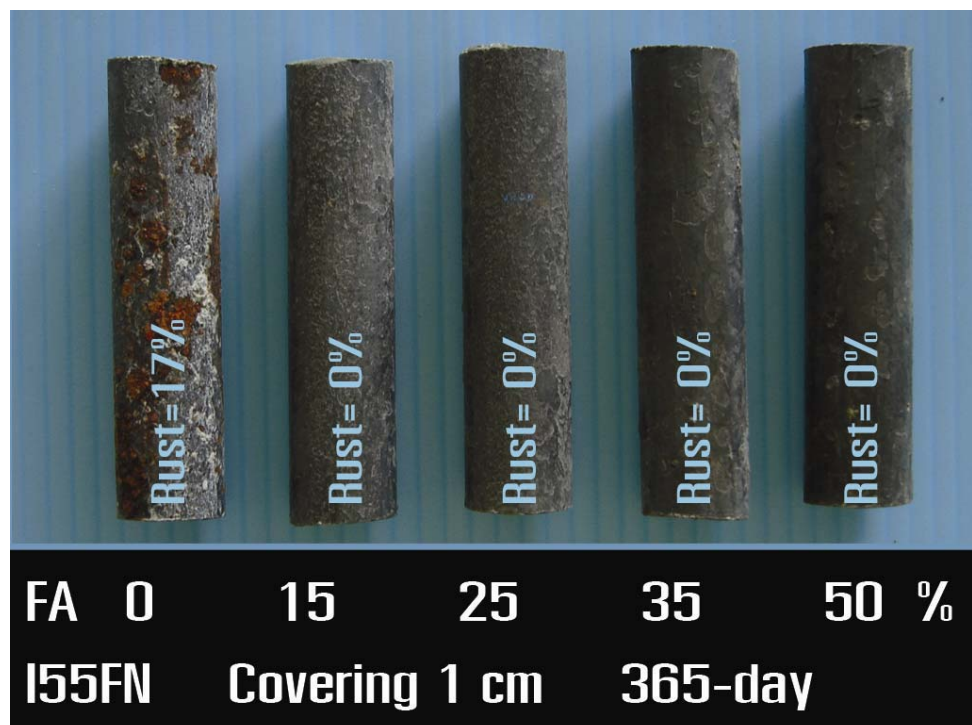


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.26 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.45 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

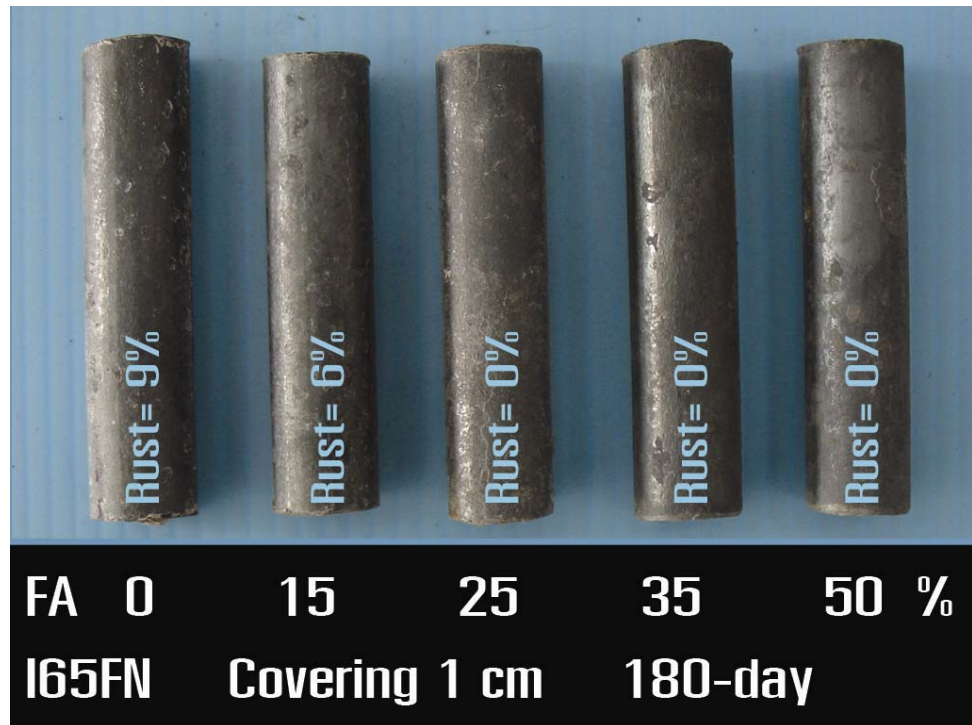


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

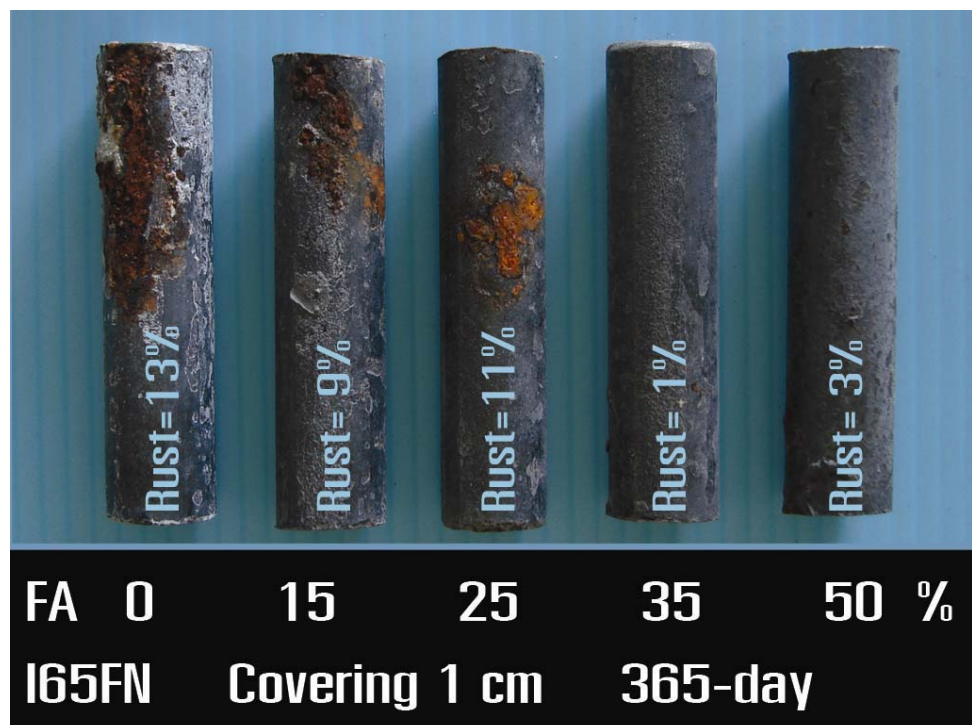


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.27 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

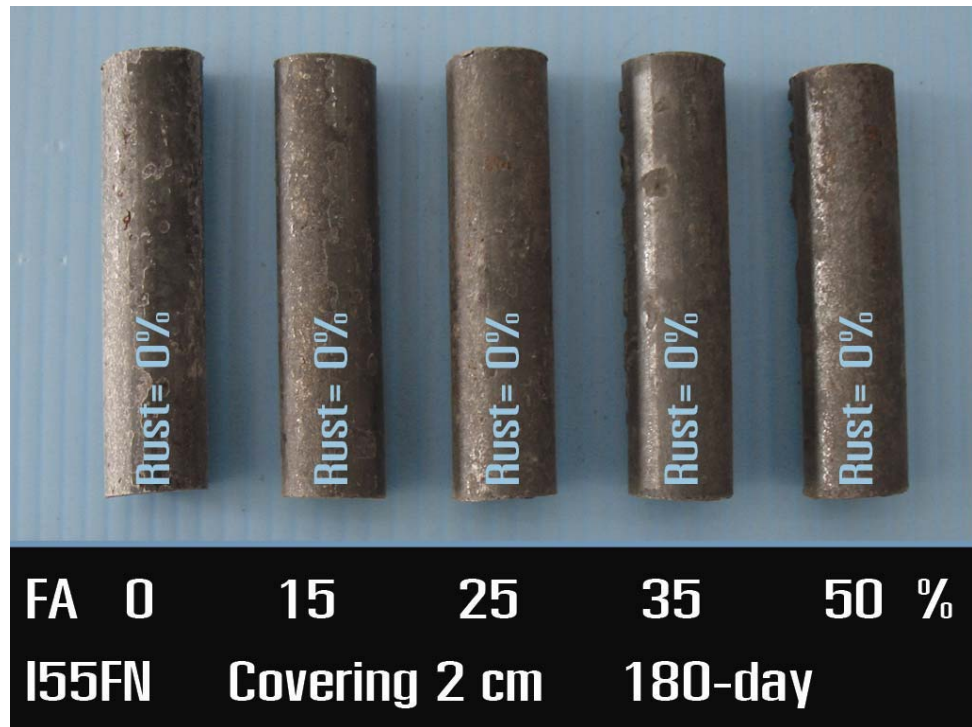


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

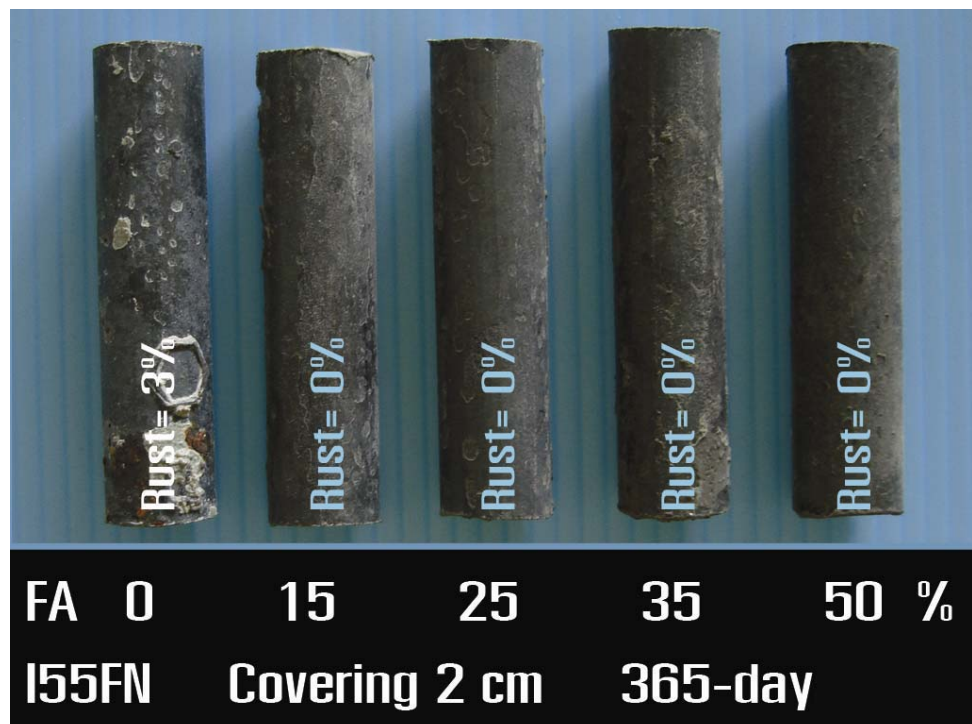


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.28 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 1 ซม.

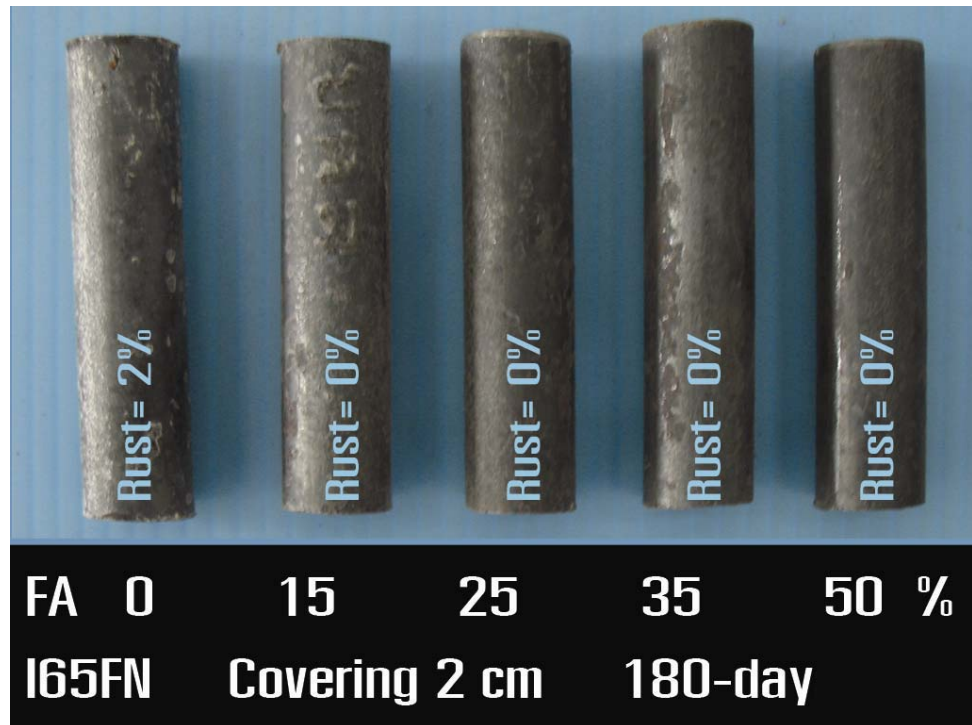


(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน

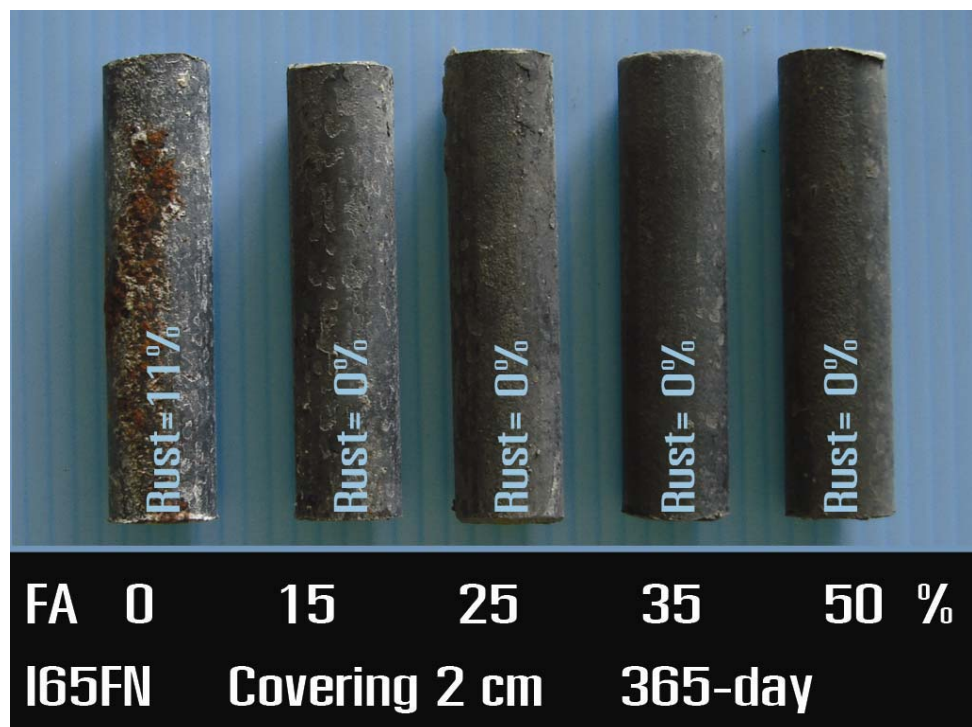


(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.29 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.



(ก) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 180 วัน



(ข) คอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

รูปที่ 4.30 ลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. W/B ratio = 0.65 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 2 ซม.

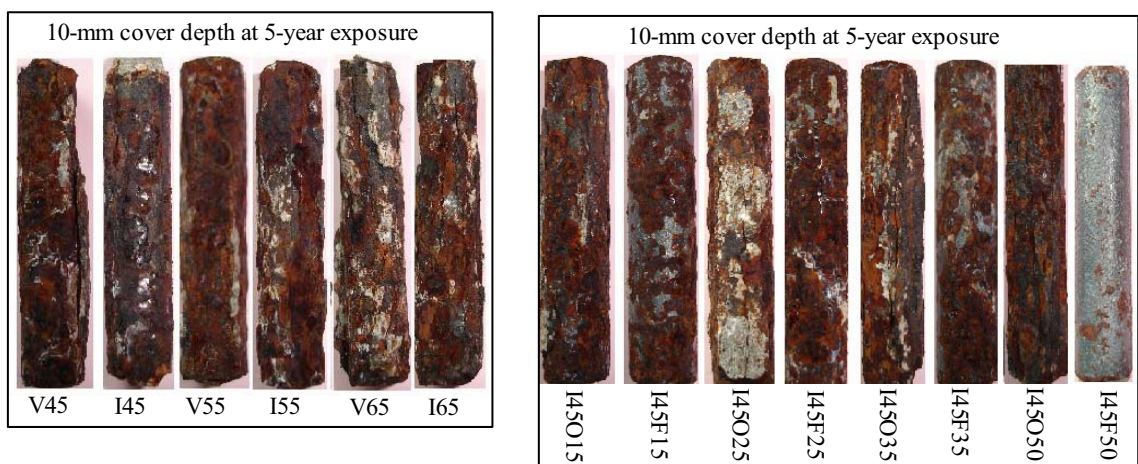
4.7.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละของพื้นที่ที่เกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมที่ระยะหุ้มต่างๆ ซึ่งเห็นได้ว่าแนวโน้มการเกิดสนิมเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณคลอไรด์ที่ได้วิเคราะห์ไปแล้ว กล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตในปริมาณการแทนที่สูงขึ้น และค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงสามารถลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างอายุ เช่นน้ำทะเล 4 ปี และ 5 ปี พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว สนิมเหล็กที่อายุ 5 ปี เกิดเพิ่มขึ้นจากอายุการแช่ 4 ปี ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในกลุ่มของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ 0.65 พบว่าการเกิดสนิมที่อายุ 5 ปี เข้าไปถึงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ค่อนข้างมาก ทั้งๆที่ที่อายุ 4 ปี คอนกรีตกลุ่มดังกล่าวนี้มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณร้อยละ 3-4) แต่พอระยะเวลาแช่เพิ่มขึ้นแค่ 1 ปี กลับพบว่าสนิมเหล็กเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง นั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีต เริ่มมีการเกิดสนิมถึงแม้เพียงเล็กน้อย แต่ใช้เวลาไม่นานมากนัก การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น คอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีปริมาณสนิมเหล็กที่ระยะหุ้มเหล็ก 75 มม. เท่ากับ ร้อยละ 60 (เพิ่มจากร้อยละ 4 ที่อายุ 4 ปี) แต่ทั้งนี้ในคอนกรีตกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหิน จะมีอัตราการเกิดสนิมเหล็กช้ากว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้เถ้าถ่านหินค่อนข้างชัดเจน เช่น ที่ระดับความลึก 50 มม. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีร้อยละของสนิมเหล็กเช่นน้ำทะเล 4 ปี เท่ากับ ร้อยละ 80 (เพิ่มจากร้อยละ 11 ที่อายุ 4 ปี) ในขณะที่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกับที่แทนที่เถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 มีการเกิดสนิมเหล็กเพียงร้อยละ 23, 4, 2 และ 0 ตามลำดับ และแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้พบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอื่นๆ ด้วย นอกจากนั้นยังพบว่าคอนกรีตทุกกลุ่มที่มีการใช้เถ้าถ่านหิน การเกิดสนิมเหล็กจะเข้าถึงเพียงเล็กน้อยที่ระดับ 50 มม. เท่านั้น ส่วนกลุ่มที่ไม่ได้แทนที่เถ้าถ่านหินทั้งในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่ความลึกดังกล่าว มีการเกิดสนิมเหล็กเกิดขึ้นเกือบร้อยละร้อย และการทำลายของคลอไรด์ ได้เข้าไปถึงที่ระดับความลึก 75 มม. ในขณะที่กลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินมีน้อยหรือยังไม่พบการทำลายเหล็กเสริมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม.

ในการศึกษาครั้งนี้ ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. ทุกส่วนผสมมีการเกิดสนิมเหล็กถึงร้อยละร้อยเมื่อเช่นน้ำทะเลถึงอายุ 5 ปี ยกเว้นคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาด ร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.31 นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการเกิดสนิมเหล็กระหว่างส่วนผสมต่างๆได้ เมื่อพิจารณาลักษณะการเกิดสนิมเหล็กของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20, 50, และ 75 มม. ตามรูปที่ 4.32 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสาน 0.55 และ 0.65 มีสนิมเหล็กเกิดขึ้นค่อนข้างมาก และเข้าไปถึงที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 การเกิดสนิมยังเข้าไปไม่ถึงที่ระดับความลึก 75 มม. และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เกิดขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V

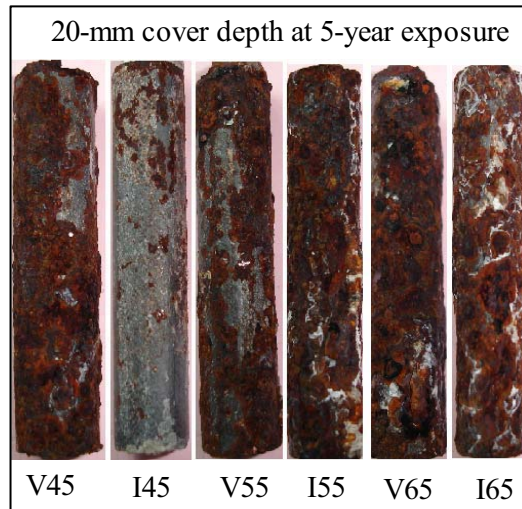
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะเหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่แยกขนาด ถึงแม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 ก็ยังส่งผลดีต่อการป้องกันการเกิดสนิมได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และเห็นผลชัดเจนที่ระยะความลึกจากผิวหน้าคอนกรีตมากขึ้น ส่วนรูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด กับเถ้าถ่านหินที่ผ่านการคัดแยกขนาดละเอียดต่อการเกิดสนิมเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 20 มม. เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดละเอียดให้ผลดีต่อการต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแตกต่างจากกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินโดยตรงไม่มากนัก นั่นแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้ โดยไม่จำเป็นต้องนำมาคัดแยกขนาดให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องดูคุณสมบัติด้านอื่นควบคู่ไปด้วย และขนาดกลางของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะเกิน 30 ไมโครเมตร



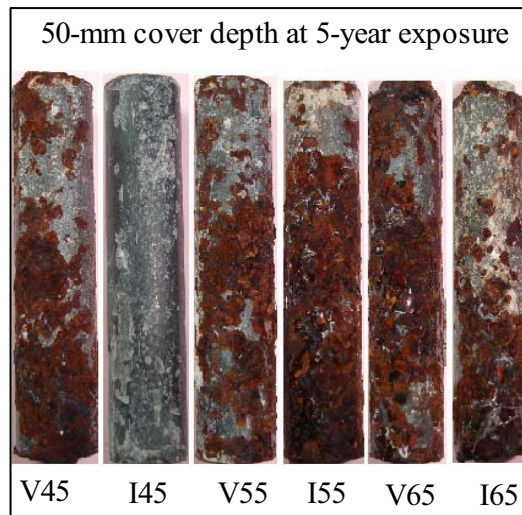
รูปที่ 4.31 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45 ที่ระยะหุ้ม 10 มม. เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ตารางที่ 4.9 พื้นที่ผิวเหล็กที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

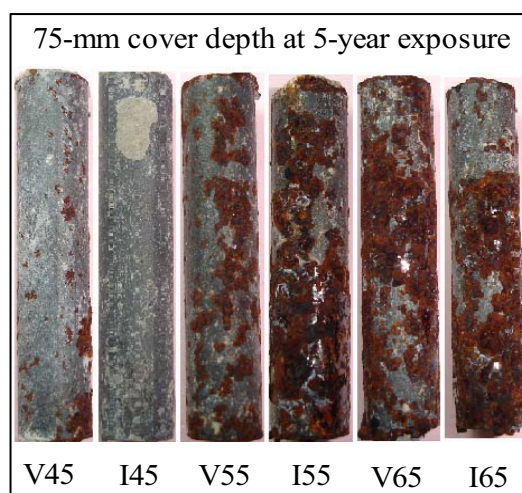
Type of concrete	Rusted area of the embedded steel (%)							
	4-year exposure				5-year exposure			
	10 mm	20 mm	50 mm	75 mm	10 mm	20 mm	50 mm	75 mm
I45	100	45	2	0	100	65	4	0
V45	78	49	2	0	100	90	45	7
I45O15	23	13	0	0	100	20	2	0
I45O25	35	5	0	0	100	30	2	0
I45O35	36	10	0	0	100	7	0	0
I45O50	56	4	0	0	100	5	0	0
I45F15	100	4	0	0	93	30	2	0
I45F25	90	1	0	0	100	35	0	0
I45F35	38	0	0	0	87	13	2	0
I45F50	0	0	0	0	7	2	0	0
I55	100	77	11	3	100	100	70	57
V55	100	50	13	2	100	95	73	48
I55O15	100	15	0	0	100	95	5	0
I55O25	100	10	0	0	100	100	7	0
I55O35	100	9	0	0	100	56	2	0
I55O50	100	13	0	0	100	14	2	0
I55F15	100	21	0	0	100	60	3	0
I55F25	88	4	0	0	100	100	15	5
I55F35	98	3	0	0	100	13	3	1
I55F50	3	0	0	0	100	10	2	0
I65	100	85	11	4	100	100	80	60
V65	100	96	19	6	100	100	85	73
I65O15	100	83	6	0	100	100	23	0
I65O25	100	87	0	0	100	95	4	0
I65O35	100	42	1	0	100	93	2	0
I65O50	88	8	0	0	100	25	0	0
I65F15	100	94	1	0	100	65	2	0
I65F25	98	30	0	0	100	84	5	2
I65F35	100	16	0	0	100	78	5	0
I65F50	21	1	0	0	100	15	0	0



(ก) ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.

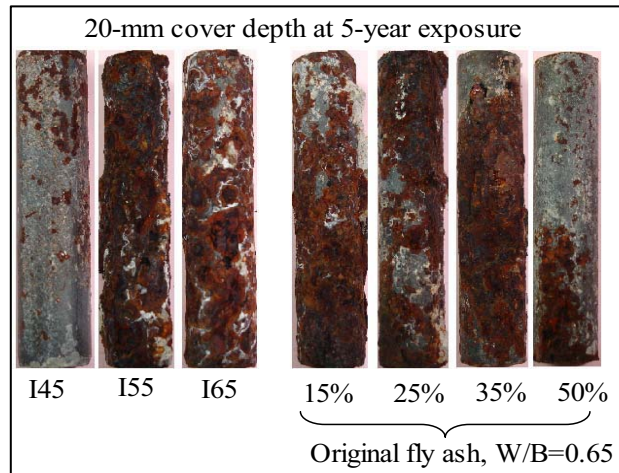


(ข) ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.

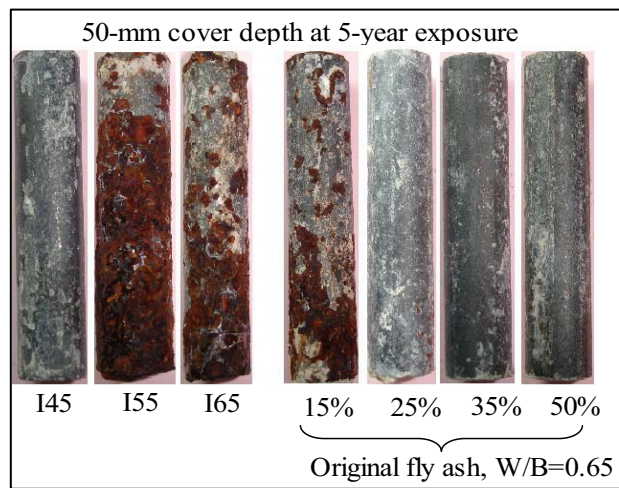


(ค) ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

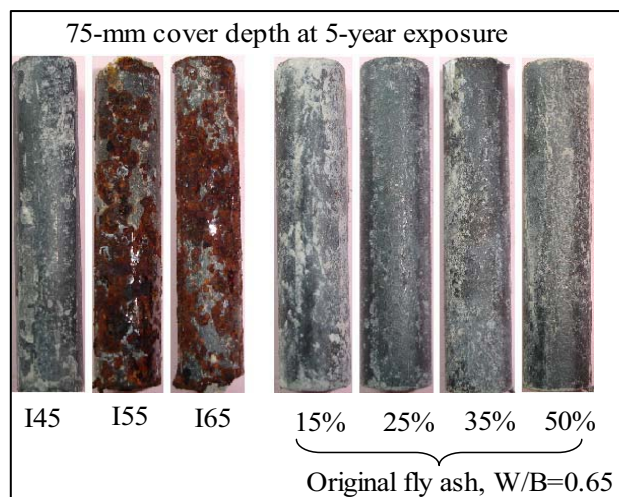
รูปที่ 4.32 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี



(ก) ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.

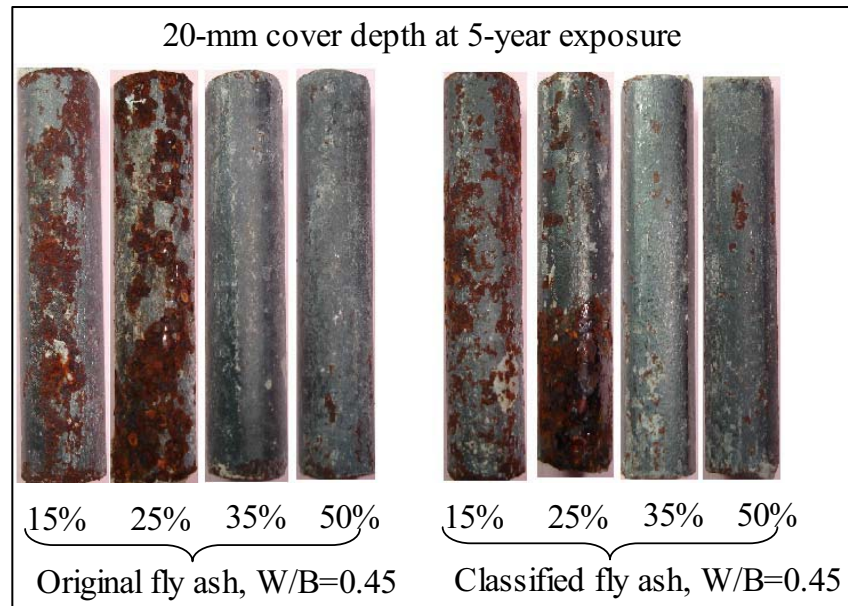


(ข) ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.

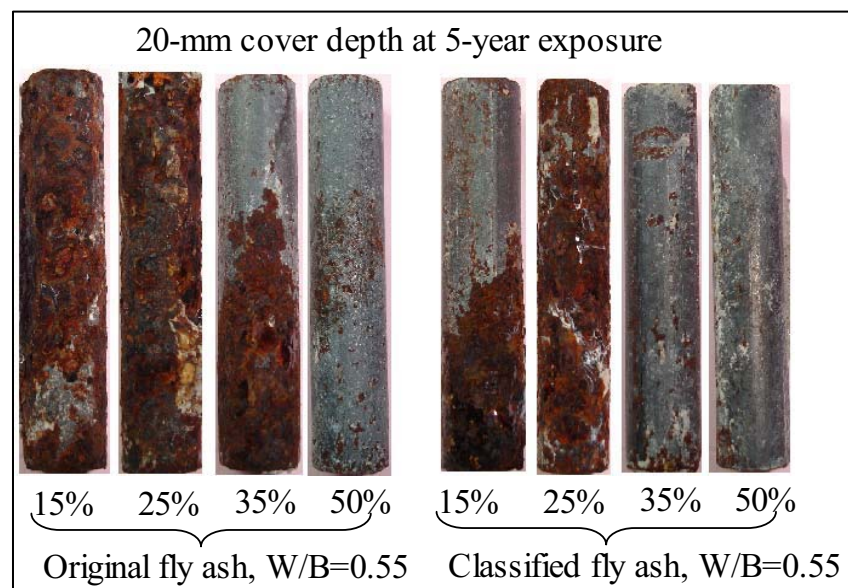


(ค) ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

รูปที่ 4.33 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มี W/B ratio เท่ากับ 0.65



(ก) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.45



(ข) คอนกรีตที่มี W/B ratio = 0.55

รูปที่ 4.34 เหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการคัดแยกขนาด และไม่ผ่านการคัดแยกขนาด เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

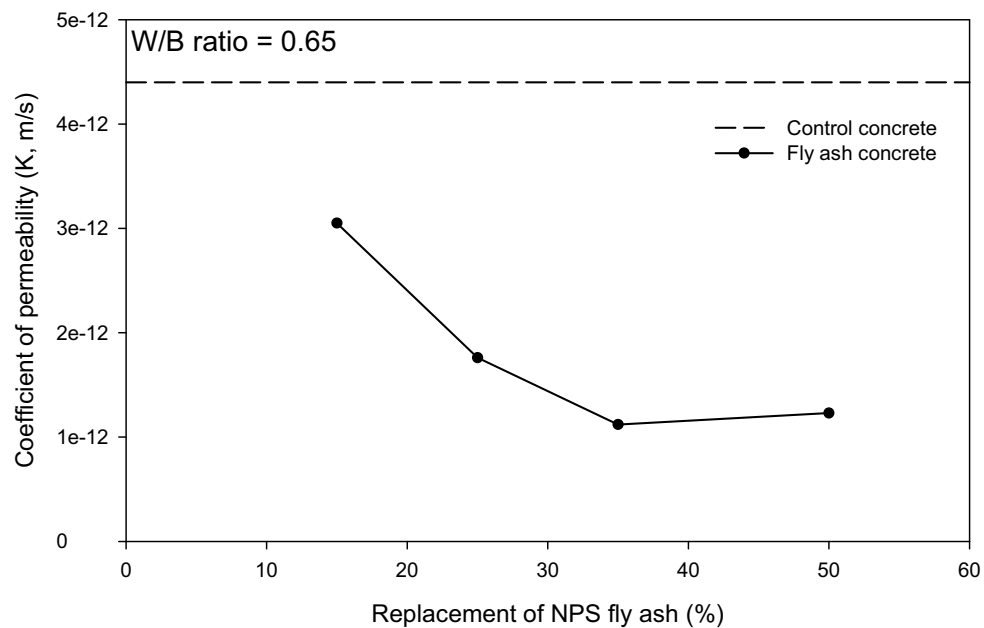
4.8 การทดสอบการซึมผ่านคอนกรีต

4.8.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ซึ่งมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 หลังจากแช่น้ำทะเล 365 วัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.35 ยกเว้นคอนกรีต I65FN50 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าคอนกรีต I65FN35 เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการซึมผ่านของคลอไรด์ แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินช่วยทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น เป็นผลให้สารเคมีต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก ขณะที่การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเลยังไม่ส่งผลต่อคอนกรีต ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไป เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อการซึมผ่านคอนกรีต

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

Type of concrete	Coefficient of permeability (K, m/s)
I65CT	4.40×10^{-12}
I65FN15	3.05×10^{-12}
I65FN25	1.76×10^{-12}
I65FN35	1.12×10^{-12}
I65FN50	1.23×10^{-12}



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเอ็น. พี. เอส. ที่แช่น้ำทะเล 365 วัน

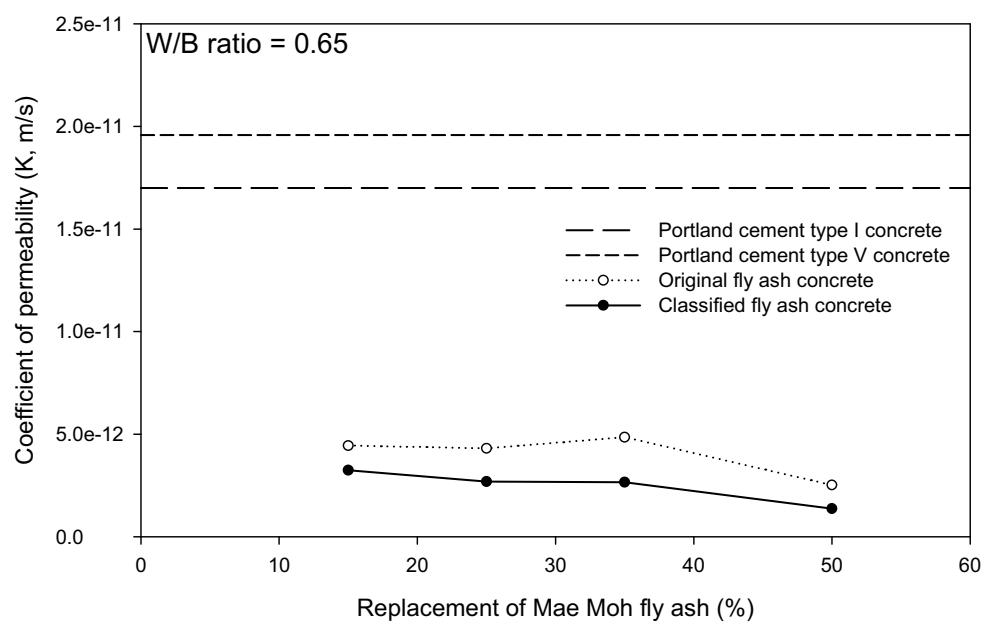
4.8.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ผ่านการแยกขนาดละเอียด และไม่แยกขนาด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี แสดงผลดังตารางที่ 4.11 พบว่าโดยภาพรวมแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการซึมผ่านของคลอไรด์ กล่าวคือ คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งที่แยกขนาดและไม่แยกขนาดให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นและละเอียดขึ้นสามารถลดการซึมผ่านของน้ำลงได้ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 1.70×10^{-11} และ 1.96×10^{-11} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ค่าการซึมผ่านคอนกรีตธรรมดาจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีค่าการซึมผ่านลดลงเนื่องจากคอนกรีตที่บด ทำให้ น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มแบบนี้จะใช้ไม่ได้กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานและการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และลดการซึมผ่านลงได้ ดังนั้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินถึงแม้กำลังอัดจะสูงไม่ได้หมายถึงคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านคอนกรีตจะดีไปด้วย รูปที่ 4.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะทั้งที่แยก และไม่ได้ออกขนาด จะเห็นว่า ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่อนข้างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินละเอียดกว่าจะมีการซึมน้ำผ่านยากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี

Type of concrete	Coefficient of permeability (K, m/s)
I65	17.00×10^{-12}
V65	19.58×10^{-12}
I65O15	4.44×10^{-12}
I65O25	4.31×10^{-12}
I65O35	4.85×10^{-12}
I65O50	2.52×10^{-12}
I65F15	3.24×10^{-12}
I65F25	2.69×10^{-12}
I65F35	2.66×10^{-12}
I65F50	1.37×10^{-12}



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่แช่น้ำทะเล 5 ปี

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาตลอดงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น. พี. เอส. ที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักด่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.0

5.1.1.1 คอนกรีตทุกส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน ได้ดี แม้จะแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 180 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่

5.1.1.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ช่วยให้สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น

5.1.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มคอนกรีตยังคงเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีระยะหุ้มคอนกรีตที่มากพอ สามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดี

5.1.1.4 ปริมาณเถ้าถ่านหินที่ผสมในคอนกรีตมีอิทธิพลต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าค่ากำลังอัดที่ใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

5.1.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

5.1.2.1 คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน ถึง 5 ปี ที่แช่น้ำทะเล ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเล็กน้อย

5.1.2.2 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีแนวโน้มต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อทดสอบจนถึงอายุการแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

- 5.1.2.3** คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V และการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นพบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเลจะลดลง
- 5.1.2.4** ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินที่เท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากกว่ามีกำลังอัดสูงกว่า และสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเลได้ดีกว่า และเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรง
- 5.1.2.5** เมื่อแช่ในน้ำทะเล 5 ปี คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีตที่ระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 75 มม. น้อยมากหรือแทบไม่มีเลย ในขณะที่คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ระดับนี้ชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1** ควรดำเนินการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเล ให้ได้ตามแผนงานที่วางไว้ในระยะยาว ซึ่งต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์ และสามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลที่ใช้งานได้จริง
- 5.2.2** คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยเลือกใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดสูง นอกจากนี้ คอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและมีระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ
- 5.2.3** เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลได้ครบถ้วน ควรทำการเปรียบเทียบเถ้าถ่านหินจากทั้งสองแหล่งผลิตที่ส่งผลต่อการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล
- 5.2.4** ควรเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากชายฝั่งทะเลอันดามัน และพื้นที่ชายฝั่งทะเลอื่นๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับน้ำทะเลชายฝั่งอ่าวไทย ที่ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในงานวิจัยนี้
- 5.2.5** ควรมีการศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาใช้ในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ, 2539, “การคัดเลือกเถาถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต”, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 15-18 สิงหาคม, กรุงเทพมหานคร, หน้า 257-269.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545, การกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่อมอร์ตาร์ และผลกระทบของน้ำทะเลต่อระยะหุ้มคอนกรีตที่ผสมเถ้าลิกไนต์แม่เมาะ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 52-73, 75.

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่วง และคณะ, 2542, “บทบาทของเถาถ่านหินที่แยกละเอียด 5 ชนิด ต่อกำลังอัดของคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 24-26 มีนาคม, ชลบุรี, หน้า 108-115.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ ไชศรี, 2548, “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 44-48.

มณฑะเกียรติ ชินวาทิช และคณะ, 2548, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.

เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, “การพัฒนาเถาถ่านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 10-21.

วัชรระ เพิ่มชาติ และสมพร ธเนศวรวิชย์, 2544, “การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด”, วารสารประสิทธิภาพพลังงาน, ปีที่ 11, ฉบับที่ 55, หน้า 32-34.

วิเชียร ชาติ, 2546, กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อแช่ในน้ำทะเลและน้ำเสียชุมชน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 46-50.

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2537, การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเล ตะวันออก, มิถุนายน, หน้า 55.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ, 2538, ผลกระทบของความละเอียดจากการบดและการแยกแ้วผ่านหินแม่มาต่อ คุณสมบัติของมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 22-74.

สุรพล พฤษานุกูล, 2546, “กรรมวิธีการผลิตและชนิดของแ้วผ่านหินที่มีในประเทศไทย”, เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการเรื่องการนำแ้วผ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต, 29 เมษายน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 19-29.

Al-Amoudi, O.S.B., et al., 1993, “Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes”, **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 90, No. 6, pp. 564-571.

Al-Hussaini, M.J., et al., 1990, “The effect of chloride ion source on the free chloride ion percentages of OPC mortars”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, No. 5, pp. 739-745.

Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B., 2003, “Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.

Bakker, R.F.M., 1988, **Corrosion of Steel in Concrete**, Chapman and Hall, London, pp. 22-55.

Byfors, K., 1987, “Influence of silica fume and fly ash on chloride diffusion and pH values in cement paste”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 17, No. 1, pp. 115-130.

Chalee, W., et al., 2006, “Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment”, **Construction and Building Materials**, Vol. 21, No. 5, pp. 965-971.

Chindaprasirt, P., et al., 2007, “Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete”, **Construction and Building Materials**, Vol. 21, No. 2, pp. 356-361.

Comite Euro-International Du Beton (CEB), 1992, **Durable Concrete Structures** (Design Guide), Thomas Telford Ltd., Great Britain, pp. 79-83.

Detwiler, R.J., Kjellsen, K.O. and Gjorv, O.E., 1991, "Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures", **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 88, No. 1, pp. 19-24.

Ellis, W.E., Jr., Rigg, E.H. and Butler, W.B., 1991, "Comparative results of utilization of fly ash, silica fume and GGBFS in reducing the chloride permeability of concrete", **The 2nd International Conference of Durability of Concrete**, August 4-9, Montreal, Canada, pp. 443-458.

Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D., 1989, "The reaction of fly ash in concrete. A critical examination", **Cement and Concrete Research**, Vol. 19, No. 2, pp. 235-246.

Gjorv, O.E. and Vennesland, O., 1976, "Sea salt and alkalinity of concrete", **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 73, No. 9, pp. 512-516.

Glass, G.K. and Buenfeld, N.R., 1997, "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", **Corrosion Science**, Vol. 39, No. 5, pp. 1001-1013.

Goktepe, A.B., et al., 2006, "Estimation of sulfate expansion level of PC mortar using statistical and neural approaches", **Construction and Building Materials**, Vol. 20, No. 7, pp. 441-449.

Hansen, T.C., 1990, "Long-term strength of high fly ash concretes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, No. 2, pp. 193-196.

Harrison, W.H., 1990, "Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete", **Magazine of Concrete Research**, Vol. 42, No. 152, pp. 113-126.

Hewlett, P.C., 1998, **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th ed., Arnold, New York, p. 584.

Hoff, G.C., 1991, "Durability of offshore and marine concrete structures", **The 2nd International Conference of Durability of Concrete**, August 4-9, Montreal, Canada, pp. 33-64.

Lambert, P., Page, C.L. and Vassie, P.R.W., 1991, "Investigations of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete", **Materials and Structures**, Vol. 24, No. 143, pp. 351-358.

Lea, F.M., 1970, **The Chemistry of Cement and Concrete**, Great Britain, Edward Arnold, pp. 361-371.

Mather, B., 1966, "Effect of Seawater on concrete", **Highway Research Record**, No. 113, pp. 33-42.

Monteiro, P.J.M. and Kurtis, K.E., 2003, "Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 7, pp. 987-993.

Mora, E.P., Paya, J. and Monzo, J., 1993, "Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, No. 4, pp. 917-924.

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

Nireki, T. and Kabeya, H., 1987, "Monitoring and analysis of seawater salt content", **The 4th International Conference on Durability of Building Materials and Structures**, November 4-6, Singapore, pp.531-536.

Rasheeduzzafar, Ehtesham Hussain, S. and Al-Saadoun, S.S., 1991, "Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol.21, No. 5, pp. 777-794.

Santhanam, M., Cohen, M.D. and Olek, J., 2003, "Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 3, pp. 341-346.

Schiessl, P. and Raupach, N., 1989, "Influence of blending agents on the rate of corrosion of steel in concrete", **Durability of Concrete : Aspects of Admixtures and Industrial By-products**, The 2nd International Seminar, June, Swedish Council for Building Research, pp. 205-214.

Tang, L. and Nilsson, L.-O., 1993, "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, No. 2, pp. 247-253.

Thomas, M., 1996, "Chloride thresholds in marine concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, No. 4, pp. 513-519.

Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, "Performance of pfa concrete in a marine environment – 10-year results", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.

Tritthart, J., 1989, "Concrete binding in cement. II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding", **Cement and Concrete Research**, Vol. 19, No. 5, pp. 683-691.

Virmani, Y.P., 1982, "Cost effective rigid concrete construction and rehabilitation in adverse environments", **Annual Progress Report**, U.S. Federal Highway Administration, p. 68.

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

MATERIALS, EXPERIMENTATION, MAINTENANCE AND REHABILITATION

PROCEEDINGS OF

**The Tenth East Asia-Pacific Conference
on Structural Engineering & Construction
(EASEC-10)**

Bangkok, Thailand

Edited by

Worsak Kanok-Nukulchai

Sunil Munasinghe

Naveed Anwar

CHLORIDE PENETRATION PROFILE AND STEEL CORROSION IN FLY ASH CONCRETE UNDER 4-YEAR EXPOSURE IN MARINE ENVIRONMENT OF THAILAND

Wichian Chalee¹, Monthien Teekavanit² and Chai Jaturapitakkul³

ABSTRACT : In this study, chloride penetration profile and steel corrosion of fly ash concrete with various covering depths under marine environment are investigated. Control concretes were designed by using Portland cement type I and V with W/B ratios of 0.65, 0.55, and 0.45. Fly ash concretes with W/B ratio of 0.65 were cast by using original and classified fly ashes to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50% by weight of cementitious material. Concrete specimens with steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm were cast. The specimens were cured in fresh water for 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment in the gulf of Thailand. The specimens were tested for the chloride penetration profile and corrosion of embedded steel after being exposed to tidal zone for 4 years. The results showed that concretes mixed with Portland cement type I tend to have lower chloride penetration profile than those of Portland cement type V. The increase of fly ash replacement in concrete reduced the chloride penetration profile. The concrete with classified fly ash gave a good result in lowering chloride penetration profile when comparing to concrete with original fly ash. Interestingly, the steel bar with 20-mm covering depth and 50% of classified fly ash concrete had less corrosion than that of 75-mm covering depth of concretes mixed with Portland cement type I and V. This result suggested that the use of fly ash in concrete up to 50% could reduce the concrete covering from 75 mm to 20 mm for protecting steel bar in marine environment at 4-year exposure.

KEYWORDS: Fly Ash, Marine environment, Chloride penetration, Corrosion, Covering depth.

1 INTRODUCTION

At present, concrete is widely used in marine structure and acknowledged that the destroying of concrete structure is mainly due to sulfate attack and the corrosion of steel under chloride attack. However, all of these mechanisms are combination of many influences, such as moisture, temperature, impacted force, abrasion by sand in seawater and so on [1]. There are various methods to prevent or reduce concrete from the attack of marine environment, each method has applied differently depending on economy and environment exposure. The prevention of seawater attack can perform by using fly ash to partly replace cement and leads to protect or reduce chloride ingress. Several studies had been reported that fly ash in concrete had achievable improvement in pore structure, permeability and strength, which clearly showed at increasing concrete durability [2-4]. However, concrete in marine environment needs to be studied chloride penetration profile and steel corroded in together leading to serve the serviceability life of building. Presently, many researchers have obtained the durability data of marine structure concrete in long term exposure [5-7]. However, less research studied in corrosion of fly ash concrete relating to fly

¹ Ph.D. Candidate, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

² Graduate Student, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

³ Associate Professor, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

ash fineness, various coverings, corrosion of steel, and chloride penetration profile. Throughout, it has not been found the long term data on marine environment of South East Asia which is in a hot and high humidity climate. Therefore, the aim of this work is to present the effect of marine environment on original and classified fly ash concretes. Variables in this study include W/B ratio, fly ash fineness, fly ash content, and covering depth of concrete. Corrosion of embedded steel and chloride penetration profile of concretes were investigated at 4-year exposure. The objectives of this study were to investigate the amounts of fly ash replacement and the effects of original and classified fly ash on durability of concrete in marine environment.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 MATERIALS

Portland cement type I and V, fly ash obtained from Mae Moh power plant in Thailand, graded sand and crushed limestone with maximum size of 3/4" were used in this study. The original fly ash had the median particle size of 30.6 μm , and was then classified to have 9.7 μm median particle size by using air classifier. Portland cement type I and V had the median particle size of 25 and 19.2 μm , respectively. For chemical compositions, the sums of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 in original and classified fly ashes were 79.45 and 78.47%, respectively indicating the class F fly ash in accordance with ASTM C 618. It was also concluded that the chemical compositions of classified fly ash were not different from those of the original fly ash. In addition, Portland cement type I and V had C_3A content of 9.23 and 1.80%, respectively. It is noted that C_3A content of Portland cement type V are less than 5% as specified by ASTM C 150.

2.2 SPECIMENS AND TEST PROGRAM

In this study, 200-mm concrete cube specimens and 12-mm in diameter steel bar with 50-mm in length were prepared. Steel bars were embedded in concrete with coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Control concretes were designed by using Portland cement type I and V to have compressive strength about 30.0, 40.0 and 50.0 MPa or had W/B ratios of 0.65, 0.55, and 0.45, respectively. Fly ash concretes were cast by using original or classified fly ash to replace Portland cement type I at percentages of 15, 25, 35, and 50 by weight of binder for concrete with W/B of 0.65. A total of 14 mixture proportions of concretes are shown in Table 1. The concrete specimens were removed from the molds after casting for 1 day and then were cured in water for 27 days. After that, the specimens were transferred to the tidal zone of the marine site in Chonburi Province, Thailand. The range of annual temperature at this site is between 26 and 30°C, and the chemical analysis of seawater, chloride and sulfate compositions are ranging from 16,000 to 18,000 and 2,200 to 2,600 mg/l, respectively. Concretes were tested to determine the chloride penetration profile and corrosion of the embedded steel after being exposed to seawater in the wet-dry condition for 4 years.

2.3 DETERMINATION OF CHLORIDE PENETRATION PROFILE

Chloride tests were conducted to measure the chloride ingress at any depth of concrete. Concretes were dry-cored to obtain 50-mm diameter cylinders. The core sample was dry-cut from surface having 10-mm thickness, and then was ground into fine powder. Concrete powder of 10 g was needed for chloride tests by acid-soluble chloride method, resulted in the total chloride content in concrete, accordance to ASTM C1152 [8]. In addition, the chloride contents at the position of the embedded steel were also determined.

2.4 DETERMINATION OF CORROSION OF EMBEDDED STEEL BAR

After coring, the concrete was broken and the steel bars were removed from the concrete cube, and then were cleaned by brush. The corrosion of embedded steel bar were measured in term of the percentage of rusted area and image recording.

Table 1. Mixture proportions of concrete

Mix	Mixture Proportion of Concrete (kg/m ³)						
	Cement	Original Fly Ash (F)	Classified Fly Ash (F)	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	W/B
I45	478	-	-	639	1024	215	0.45
I55	478	-	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	-	639	922	311	0.65
V45	478	-	-	639	1024	215	0.45
V55	478	-	-	639	971	262	0.55
V65	478	-	-	639	922	311	0.65
I65O1	406	72	-	639	898	311	0.65
I65O2	359	119	-	639	881	311	0.65
I65O3	311	167	-	639	864	311	0.65
I65O5	239	239	-	639	840	311	0.65
I65F1	406	-	72	639	898	311	0.65
I65F2	359	-	119	639	881	311	0.65
I65F3	311	-	167	639	864	311	0.65
I65F5	239	-	239	639	840	311	0.65

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 CHLORIDE PENETRATION PROFILE

Figures 1 to 3 show chloride penetration profiles for concrete mixtures. The chloride contents were reported in the percentage of binder (by weight). In Figure 1, for control concretes I and V at W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65, the results indicated that there was a substantial variation in chloride content at a depth less than 15 mm from the surface. However, beyond 15 mm depth, concretes I and V with lower W/B ratio tended to have lower chloride content (chloride penetration profile) than that with higher W/B ratio. These results clearly supported the general knowledge that concrete with lower W/B ratio gave higher strength and lower water permeability, resulted in lower chloride ingress. Owing to these results, concrete with high compressive strength could produce a good result on durability of concrete in marine environment. In addition, at the same W/B ratio, concrete from Portland cement type I gave a better chloride resistance than concrete from Portland cement type V, since it was distinctly presented at more depth of chloride content in concrete cores. It could also be explained that chloride was more bound when C₃A content of the cement was higher. Since Portland cement type I used in this study had higher C₃A content than type V for 5 times, approximately, and consequently had less chloride content than of concrete type V. This result was also confirmed by other research [9]. Figure 2 shows chloride penetration profiles of control concretes using Portland cement type I comparing to original and classified fly ash concretes. The result showed that the original and classified fly ash concretes provided the lower chloride content than concretes without fly ash at the same W/B ratio. This result is confirmed by several researches [10-11] that the pozzolanic reaction of fly ash in concrete performs lower permeability, thus leads to lower chloride ingress than normal concrete. It can also be seen that fly ash concrete with W/B ratio of 0.65 provides a better resistance of chloride ingress than the normal concrete with W/B ratio of 0.45. Evidence is clearly shown in Figure. 2. Focusing on 1% chloride content which was detected at 35, 45, and 50-mm covering depths of control concrete I with W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65 respectively, while the same amount of chloride content was found at 22, 25, 32, and 33-mm depths of original fly ash concretes containing 50, 35, 25, and 15% (by weight) of fly ash, respectively. This implies that, if concrete I with W/B ratio of 0.45 is used in marine environment and is destroyed by 1% of chloride content, it will need 35-mm covering depth to prevent the destruction. However, only 22-mm covering depth of the 50% original fly ash concrete with W/B ratio 0.65 is sufficient to protect this damage. Figure 3 shows the effect of addition of original and classified fly ashes on chloride content of fly ash concretes with W/B ratio 0.65 at 4-year exposure. The results showed the similar trend of chloride

content at any covering depth, and the increase of fly ash replacement reduced the chloride penetration profile. The concrete with classified fly ash gave a good result in lower chloride penetration profile comparing to concrete with original fly ash. In addition, concrete with original or classified fly ashes up to 35% by weight of binder did not show any chloride content at 50-mm covering depth, while 1.2% of chloride content was found in concrete without fly ash.

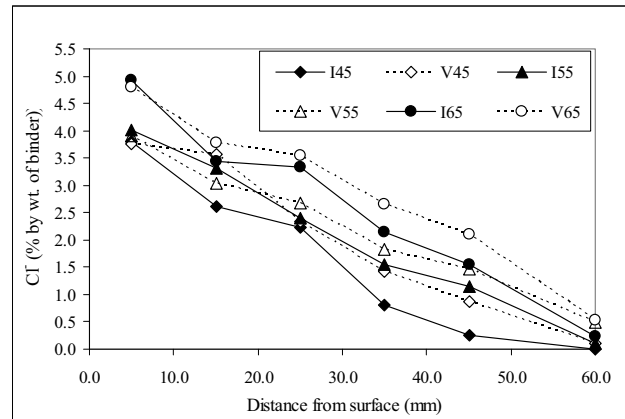


Figure 1. Effect of W/B ratio on chloride penetration profile of Portland cement type I and V concretes at 4-year exposure.

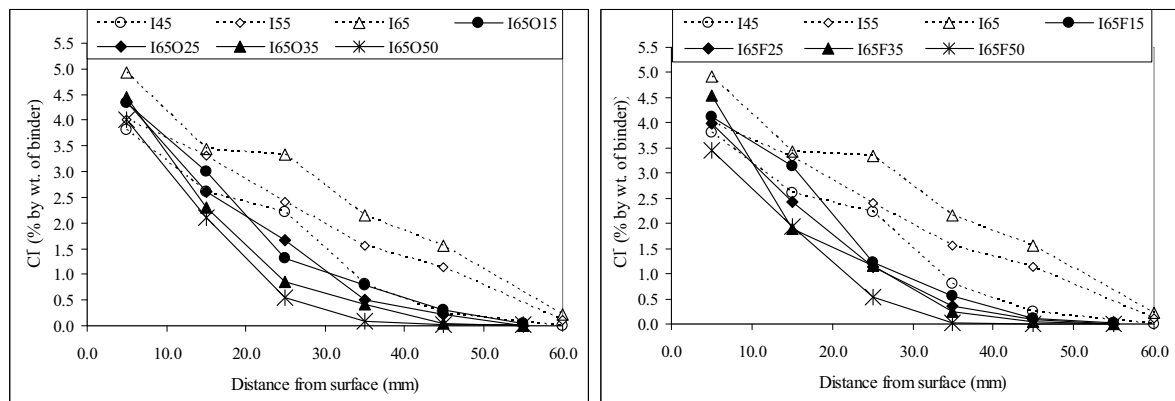


Figure 2. Chloride penetration profile of original and classified fly ash concretes compare to Portland cement type I concrete at 4-year exposure.

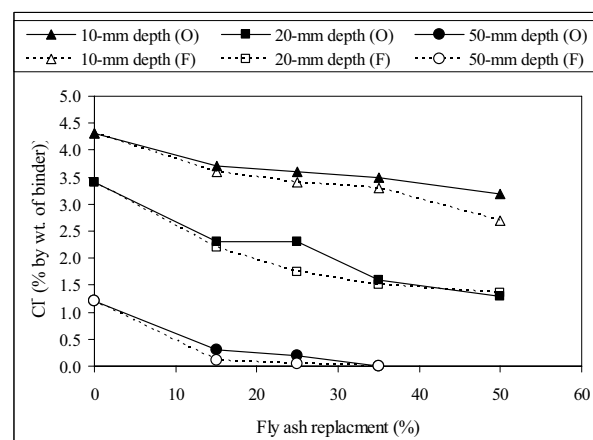
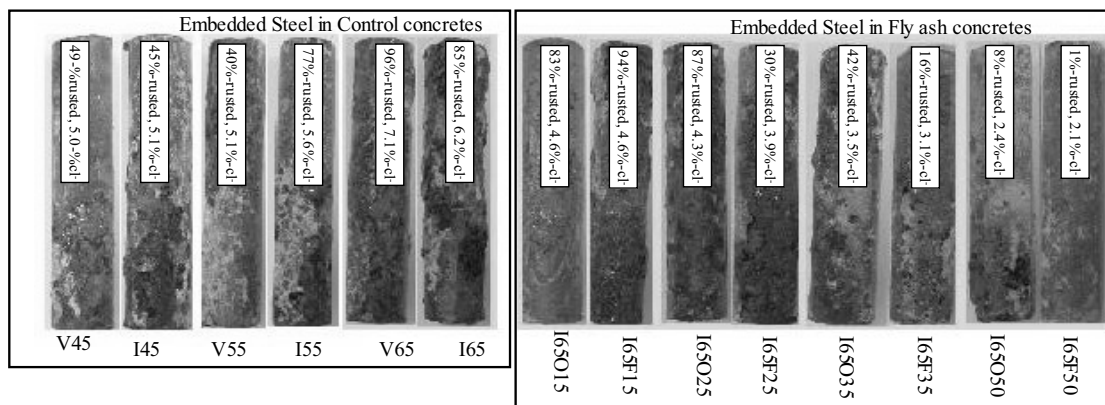


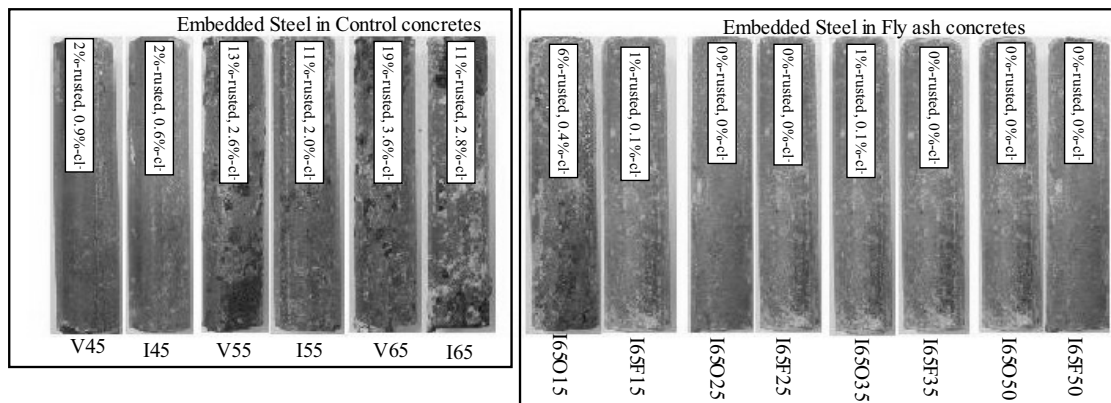
Figure 3. Effect of original and classified fly ashes on chloride content at concrete covering depth of 10, 20, and 50 mm for 4-year exposure.

3.2 CORROSION OF THE EMBEDDED STEEL

Figure 4 shows the percentages of rusted area relating to chloride content at the position of the embedded steel in concrete at 4-year exposure. The results indicated that the higher is the chloride content in concrete, the higher is the corroded steel. The corrosion of embedded steel with 10-mm covering depth was extremely rusted in all specimens and could not recognize what concrete mixture provided the best result. Figure 4(a) shows the embedded steel with 20-mm covering depth of all concretes. It was found that W/B ratio had affected on the corrosion of embedded steel of the control concretes. The corrosion was reduced with the decrease in W/B ratio. For example, concretes I45, I55, and I65 had percentages of rusted area at 20-mm depth of 45, 77, and 85%, respectively. Comparison of corroded embedded steel between concrete I and V, it was found that embedded steel in concrete V had more corrosion than that of concrete I. The use of fly ash affected on the reducing of corrosion of embedded steel. The embedded steel with 50-mm covering depth was rustless in all fly ash concretes, however, slightly rusty steel could be seen in concrete I and V with W/B ratios of 0.55 and 0.65 as shown in Figure 4(b). Interestingly, concretes with the replacement of both original and classified fly ashes at the percentage between 15 and 50 did not have or have little corrosion of steel at 50-mm covering depth of 4-year exposure in marine environment.



(a) Embedded steels extracted from 20-mm covering depth of control concretes and fly ash concretes.



(b) Embedded steels extracted from 50-mm covering depth of control concretes and fly ash concretes.

Figure 4. Chloride content at the position of the embedded steel related to the percentages rusted area of embedded steel which was removed from concretes at 4-year exposure.

4. CONCLUSION

Based on the experimental investigation reported in this paper, the following conclusions are drawn:

1. Concretes from Portland cement type I gave chloride penetration profile lower than that of concretes from Portland cement type V.
2. Fly ash concretes had chloride penetration profile lower than that of concretes without fly ash. The increase of fly ash replacement in concrete could reduce the ingress of chloride in concrete.
3. The 50% replacement of classified fly ash in concrete produced the lowest chloride penetration profile.
4. Fly ash concretes at 4-year exposure in marine environment had a little or no corrosion of steel when 50- mm covering depth of concrete was used.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial supports from the Thailand Research Fund (TRF) who sponsored the research under the Royal Golden Jubilee Ph.D. program, the Commission on Higher Education of Thailand under the Staff Development Project, the Electricity Generating Authority of Thailand for the first two-year research, and the Siam City Cement Plc., in cooperation with Thailand Research Fund. Thanks are also to the departments of civil engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok and Burapha University, Thailand for providing their facilities and equipments.

6. REFERENCES

1. Castro, P., De Rincon, OT. and Pazini, EJ., "Interpretation of chloride penetration profiles from concrete exposed to tropical marine environments". *Cement and Concrete Research*; Vol. 31, 2001, pp. 529-537.
2. Lee, CY., Lee, HK. and Lee, KM., "Strength and micro structural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems". *Cement and Concrete Research*; Vol. 33, 2003, pp. 425-431.
3. Wang, A., Zhang, C. and Sun, W., "Fly ash effects III the micro aggregate effect of fly ash". *Cement and Concrete Research*; Vol. 34, 2004, pp. 2061-2066.
4. Gengying, Li., "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂". *Cement and Concrete Research*; Vol. 33, 2004, pp. 425-431.
5. Troconis de Rincon, O., Castro, P., Moreno, EI., Torres-Acosta, AA., Moron de Bravo, O., Arrieta, I., Garcia, C., Garcia, D. and Martinez-Madrid, M., "Chloride penetration profile in two marine structures-meaning and some predictions". *Building and Environment*; Vol. 39, 2004, pp. 1065-1070.
6. Morris, W., Vico, A., Vazquez, M. and Sanchez, SR., "Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements". *Corrosion Science*; Vol. 44, 2002, pp. 81-99.
7. Dehwah, HAF., Maslehuddin, M. and Austin, SA., "Long-term effect of sulfate ions and associated cat ion type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes". *Cement and Concrete Composites*; Vol. 24, 2002, pp. 17-25.
8. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C1152 : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete". In *Annual Books of ASTM Standards*; Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, 1997, pp. 627-629.
9. Sakr, K., "Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques". *Cement and Concrete Research*; Vol. 35, 2005, pp. 1820-1826.
10. Chindaprasit, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste". *Cement and Concrete Composite*; Vol. 27, 2005, pp. 425-28.
11. Arya, C. and Xu, Y., "Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete". *Cement and Concrete Research*; Vol. 25, 1995, pp. 893-902.

บทคัดย่อของบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณา

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อนกริตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ปิยพงษ์ สุวรรณเมณีโชติ¹ ธวัชชัย สาสกุล¹ วิเชียร ชาลี² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล¹

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

²มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อดำเนินการกักกรองเนื่องจากน้ำทะเล โดยศึกษากำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต การศึกษาทำการหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ในคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. ให้มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 20 และ 50 มม. บ่มคอนกรีตในน้ำประปา 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลบแห้ง และเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และวัดพื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่อายุ 1 ปี

หลังจากคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเล็กน้อย คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น ช่วยให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น นอกจากนั้น การใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมช่วยลดการกักกรองของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท พบว่า คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย ส่วนการเกิดสนิมของแท่งเหล็กยังไม่เห็นความแตกต่างของการกักกรองที่เกิดขึ้น