

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

Effects of Seawater on Chloride Penetration and Corrosion of Reinforcing Steel in Fly Ash Concretes

มณเฑียร จันทวาณิช, ประสิทธิ์ อุตสาห์พานิช, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ กรุงเทพมหานคร 10140

โทร. 0-2470-9131 โทรสาร 0-2427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลต่อปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และกำหนดให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ห่อคอนกรีตและฝังเหล็กเส้นกลมขนาด $\varnothing$ 12 มม. ยาว 50 มม. ให้มีระยะหุ้มคอนกรีตหนาเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มม. ภายหลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังอัด หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งและเก็บตัวอย่างมาทดสอบหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เจาะคอนกรีตเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 36 เดือน ผลการวิจัยพบว่าปริมาณการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับปริมาณของคลอไรด์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้นช่วยลดการเกิดสนิมเหล็กและการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแช่น้ำทะเลครบ 36 เดือน ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าลดลง

Abstract

In this study, effects of seawater on chloride penetration and corrosion of reinforcing steel in fly ash concretes were investigated. Portland cement type I and V were used to cast concrete. Original fly ash was used to replace Portland cement type I at the rate of 15, 25, 35 and 50 percent by weight of cementitious material. Water to cementitious material ratio was kept constant as 0.65. Concretes were cast and steel bars of $\varnothing$ 12 mm with 50 mm length were embedded with concrete cover thickness of 10, 20, 50, and 75 mm. After 28-day of curing in water, they were tested for compressive strength and also were placed on the seashore for wet-dry condition. Concretes were tested to determine the corrosion of the embedded steel, chloride concentration, and compressive strength after being exposed to seawater in the wet-dry condition for 36 months. The results showed that the corrosion of steel increased as the chloride concentration in concrete increased. The

chloride concentration and corrosion of steel embedded in concrete in marine environment were reduced as the increase of fly ash in concrete. In addition, the compressive strength of fly ash concretes increased after 36 months immersing in seawater while the compressive strength of concretes made from Portland cement type I and V were found to decrease.

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพแวดล้อมบริเวณชายฝั่งทะเลมักพบปัญหาความเสียหายของเหล็กเสริม เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือต่างๆ ละลายอยู่ ส่วนใหญ่ได้แก่เกลือคลอไรด์และซัลเฟต แต่คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ป้องกันปัญหานี้ เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติทำให้คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำลง Thomas และคณะ [1] ได้ทำการห่อคอนกรีตซึ่งฝังแท่งเหล็กไว้ภายใน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำทะเล ผลปรากฏว่าอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการสูญเสียเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นข้อมูลจากต่างประเทศ ยังขาดการศึกษาถึงผลของเถ้าถ่านหินต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาพแวดล้อมจริงในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการนำเถ้าถ่านหินแม่เมาะซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่ในประเทศมาศึกษา ตลอดจนศึกษาถึงการเกิดการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมจริงที่เกิดขึ้นในประเทศไทยซึ่งเป็นเขตร้อนชื้นที่แตกต่างจากงานวิจัยของต่างประเทศที่มักเป็นเขตอบอุ่นหรือหนาว

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 โดยใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ไม่มีการแทนที่เถ้าถ่านหิน ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 1 ห่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากถอดแบบออกและบ่มในน้ำประปาจนอายุครบ 28 วัน จึงนำไปแช่

RECEIVED 24 June, 2005

ACCEPTED 16 March, 2006

บริเวณชายหาดของโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี โดยให้คอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 24, 30 และ 36 เดือน จึงนำคอนกรีตมาทุบเพื่อดูการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็ก และได้ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตแบบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37.5 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกในช่วง 10-50 มม. ตาม ASTM C1152 และ ASTM C114 โดยใช้เครื่อง Potentionmetric Titration นอกจากนั้นได้ทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

Type of Concrete	Mix Proportion of Concrete (kg/m ³)				
	Cement	Fly Ash	Sand	Coarse-Aggregate	Water
I	478	-	639	922	311
V	478	-	639	922	311
IO15	406	72	639	898	311
IO25	359	119	639	881	311
IO35	311	167	639	864	311
IO50	239	239	639	840	311

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 3.11 พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบรตเท่ากับ 3,250 และ 4,495 ซม²/ก และค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 25 และ 19.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.22 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบรตเท่ากับ 2,830 ซม²/ก และมีค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 30.6 ไมโครเมตร

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มี MgO, SO₃, LOI, C₃A และ C₄AF อยู่ในค่ามาตรฐานที่ขอมให้ของ ASTM C 150 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มี C₃A เท่ากับร้อยละ 1.8 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาผลรวมออกไซด์ของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ของเถ้าถ่านหินมีค่ารวมเท่ากับร้อยละ 79.45 ทำให้จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F

3.3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำทะเลช่วงปี พ.ศ. 2544-2547 บริเวณที่นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปแช่พบว่าน้ำทะเลมีลักษณะใส และผลวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์มีค่าระหว่าง 16,000-18,000 มก/ล ปริมาณซัลเฟตมีค่าระหว่าง 2,200-2,600 มก/ล และมีค่าความเป็นกรดค่า (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล [2]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical Composition	Sample		
	Cement I	Cement V	Fly Ash
Silicon Dioxide, SiO ₂	20.80	21.52	44.95
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	5.50	3.56	23.70
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	4.51	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	66.70	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	1.20	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.08	0.10	0.07
Potassium Oxide, K ₂ O	0.55	0.24	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.96	2.11	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	1.74	0.52
Tricalcium Silicate, C ₃ S	56.50	71.60	-
Dicalcium Silicate, C ₂ S	17.01	7.68	-
Tricalcium Aluminate, C ₃ A	9.23	1.80	-
Tetracalcium Aluminoferrite, C ₄ AF	9.62	13.72	-

3.4 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.4.1 กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 3 พบว่ากำลังอัดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มีค่าสูงกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ V เล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 290 และ 283 กก/ซม² ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหิน พบว่าทุกสัดส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] โดยคอนกรีต IO15, IO25, IO35 และ IO50 มีกำลังอัดเท่ากับ 199, 185, 182 และ 166 กก/ซม² ตามลำดับ

ตารางที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาที่อายุ 28 วัน และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 36 เดือน

Type of Concrete	Compressive Strength (ksc)	
	28-day	36-month
I	290	230
V	283	228
IO15	199	200
IO25	185	217
IO35	182	220
IO50	166	178

หมายเหตุ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทดสอบจากคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. ส่วนกำลังอัดที่อายุ 36 เดือน ทดสอบจากคอนกรีตที่ได้จากการเจาะขนาด 50x100 มม.

3.4.2 กำลังอัดคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 36 เดือน

ผลการเจาะคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลที่สภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 36 เดือน เพื่อทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่ากำลังอัดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยกำลังอัดคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่อายุ 28 วัน และ 36 เดือนหลังจากแช่น้ำทะเล เป็น 290, 283 และ 230, 228 กก/ซม² ตามลำดับ

ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน โดยเมื่อพิจารณาจากการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 35 พบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ส่วนที่การแทนที่ร้อยละ 50 มีกำลังอัดต่ำกว่าทุกสัดส่วนผสม แต่ยังมีค่าพัฒนาเพิ่มขึ้นจากอายุ 28 วัน และพบว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 25 และ 35 มีกำลังอัดสูงกว่าทุกกลุ่มการแทนที่ ตลอดจนมีการเพิ่มของกำลังอัดที่ชัดเจนกว่า โดยกำลังอัดคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่แช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 36 เดือน เท่ากับ 200, 217, 220 และ 178 กก/ซม² ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเทียบกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ที่อายุการแช่ 36 เดือน พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 ถึง 35 ให้ผลในด้านกำลังอัดดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยสังเกตจากค่ากำลังอัดที่อายุ 36 เดือน และการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดจากอายุ 28 วัน ซึ่งกำลังอัดที่อายุ 36 เดือน ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 ถึง 35 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V แต่การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดไปในทิศทางที่ดีกว่าคือมีค่าเพิ่มขึ้น

3.5 ปริมาณสารประกอบคลอไรด์

เมื่อพิจารณาปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V ทุกระดับความลึก พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I มีปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ทุกอายุการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีปริมาณของ C_3A สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V ประมาณ 5 เท่า และ C_3A มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ ส่งผลให้เหลือปริมาณคลอไรด์อิสระที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมน้อยลง [4, 5] อย่างไรก็ตามการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง มีองค์ประกอบอื่นที่ส่งผลต่อการทดลอง ตลอดจนลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ด้วย ดังนั้นการศึกษานี้ในสภาพแวดล้อมจริงในระยะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีแนวโน้มชัดเจนขึ้นในเรื่องการแทรกซึมของคลอไรด์

เมื่อพิจารณาปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรงตามตารางที่ 4 พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ทุกระดับความลึก มีปริมาณน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น คลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าน้อยลง เช่น เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 36 เดือน ที่ระดับความลึก 20 มม. คอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 2.80, 2.10, 1.50 และ 0.30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 3.10 และ 3.35 ตามลำดับ และที่ระดับความลึกมากขึ้นมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ดีขึ้น และการแทนที่เถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเถ้าถ่านหินมีอนุภาคละเอียด จึงเข้าไปอุดช่องว่างของเนื้อคอนกรีตได้ดี ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้ เป็นผลให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำและสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้

3.6 ผลการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล

จากรูปที่ 1 และ 2 เห็นได้ว่าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลอายุ 36 เดือน ที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 10 มม. (รูปที่ 2(ก)) มีการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมอย่างมาก โดยคิดเป็นพื้นที่การเกิดสนิมร้อยละ 100 ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างระหว่างส่วนผสมต่างๆ ได้

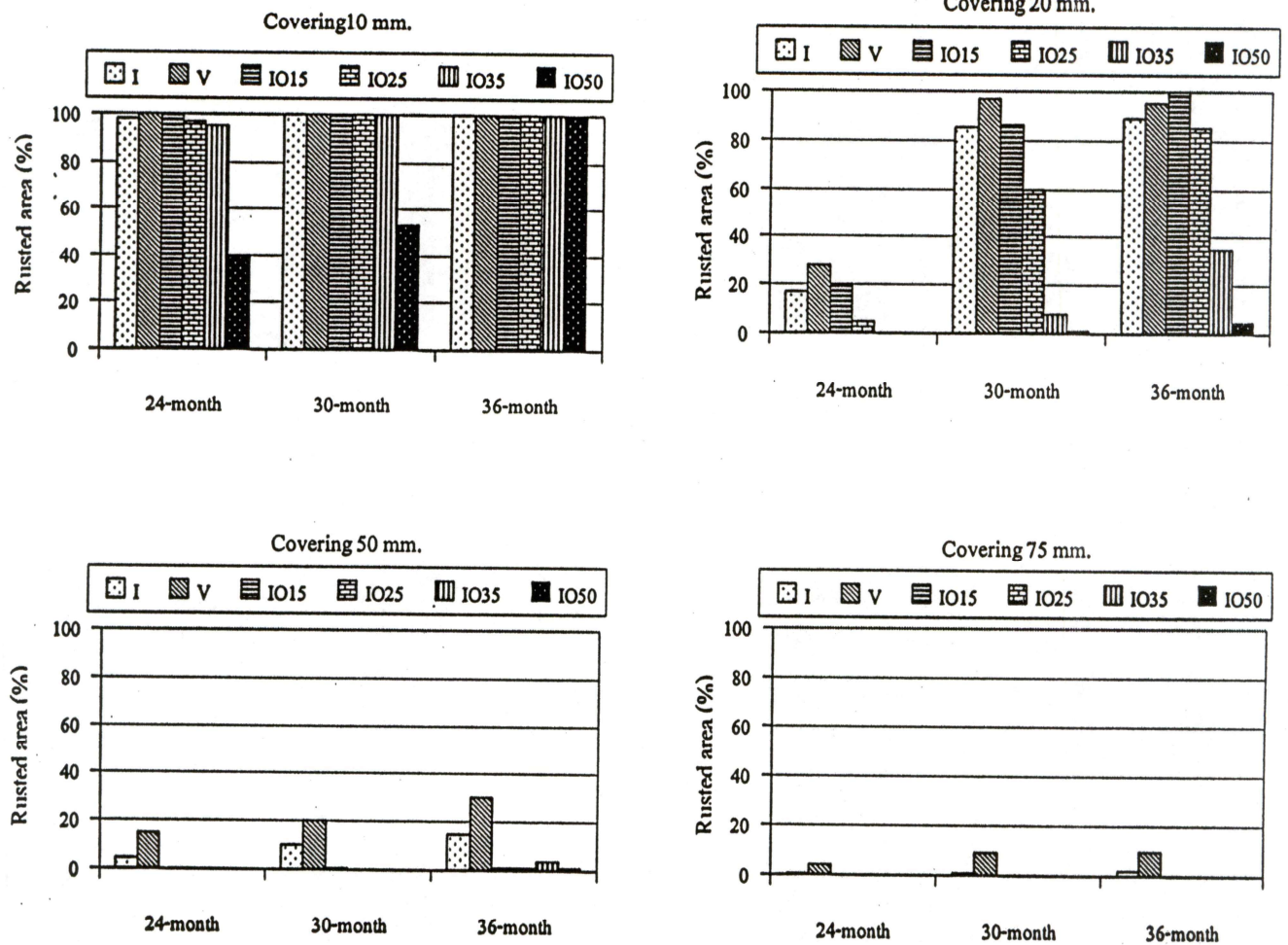
และเมื่อพิจารณาที่ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม. (รูปที่ 2(ข)) พบว่า คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I เกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ดังที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V มีมากกว่าจึงส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กมากกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกสัดส่วนผสมมีการเกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ I และ V โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละที่สูงขึ้น พบว่าการเกิดสนิมลดลงและสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ และเป็นที่น่าสังเกตว่าการผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตถึงร้อยละ 50 มีการเกิดสนิมเหล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่ระดับความลึกอื่นๆ ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มคอนกรีต 50 และ 75 มม. ที่อายุ 36 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 2(ค) และ 2(ง) ตามลำดับ พบว่ามีเพียงคอนกรีต I และ V ที่เกิดสนิม โดยการเกิดสนิมมีแนวโน้มเหมือนกับที่ระดับความลึก 20 มม. คือคอนกรีต I เกิดสนิมเหล็กน้อยกว่าคอนกรีต V ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกร้อยละการแทนที่ยังไม่เกิดสนิมเหล็กที่ระยะหุ้มคอนกรีต 50 และ 75 มม.

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 และรูปที่ 1 พบว่าที่ระดับความลึกจากผิวคอนกรีต 20 มม. คอนกรีต IO35 และ IO50 ที่อายุ 24 เดือน มีระดับปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัดกร่อนเท่ากับร้อยละ 0.60 และ 0.40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งระดับปริมาณคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวอย่างแช่ในน้ำทะเลที่อายุมากขึ้น ส่งผลให้การกัดกร่อนของเหล็กเสริมเกิดมากขึ้น

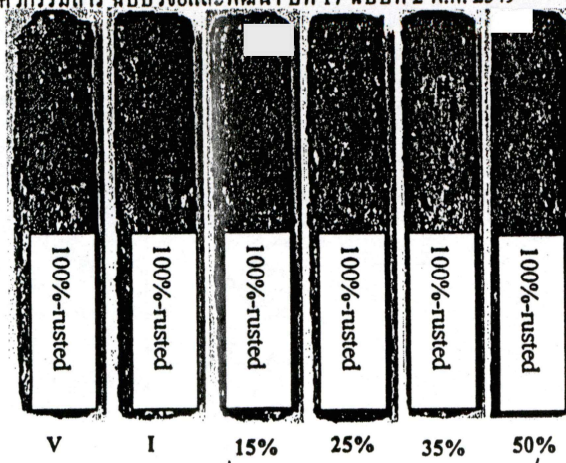
จากผลการศึกษาทางด้านกำลังอัด ปริมาณสารประกอบคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็ก แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินให้ผลในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V โดยเฉพาะคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 25 ถึง 35 มีกำลังอัดที่ยังคงพัฒนาเพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V แต่ปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กจะน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาที่การแทนที่ถึงร้อยละ 50 ให้ผลทางด้านการเกิดสนิม และปริมาณของคลอไรด์ที่ต่ำมากแต่กำลังอัดมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตาม ถ้าผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่านี้ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นและค่ากำลังสูงเพียงพอที่สามารถยอมรับให้มีการใช้งานได้ก็จะส่งผลดีต่อการใช้งานกับโครงสร้างในน้ำทะเล

ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 24, 30 และ 36 เดือน ที่ระยะความลึกต่างๆ

Type of Concrete	Chloride Content (% by Weight of Binder)														
	24-month				30-month				36-month						
	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm	45 mm
I	2.65	2.20	1.90	1.50	3.00	2.55	2.10	1.80	3.40	3.10	2.60	2.15	1.95	1.80	1.60
V	3.00	2.40	2.05	1.75	3.25	2.80	2.50	2.10	3.65	3.35	3.10	2.80	2.55	2.25	2.10
IO15	2.40	1.85	1.30	0.80	2.80	2.15	1.60	1.00	3.40	2.80	2.00	1.25	0.80	0.50	0.20
IO25	2.30	1.30	0.90	0.50	2.60	1.60	1.10	0.70	2.70	2.10	1.30	0.80	0.35	0.10	0.10
IO35	1.60	0.60	0.40	0.20	2.00	1.10	0.40	0.20	2.25	1.50	0.80	0.35	0.15	0.10	0.10
IO50	1.35	0.40	0.15	0.10	1.60	0.65	0.35	0.05	2.10	1.30	0.55	0.40	0.20	0.05	0.05

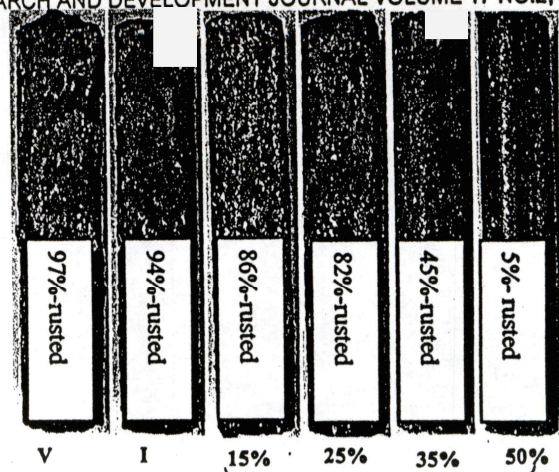


รูปที่ 1 ร้อยละพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมในคอนกรีตที่ระยะหุ้มคอนกรีตต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำทะเลสภาพเปิดกลับแห้ง



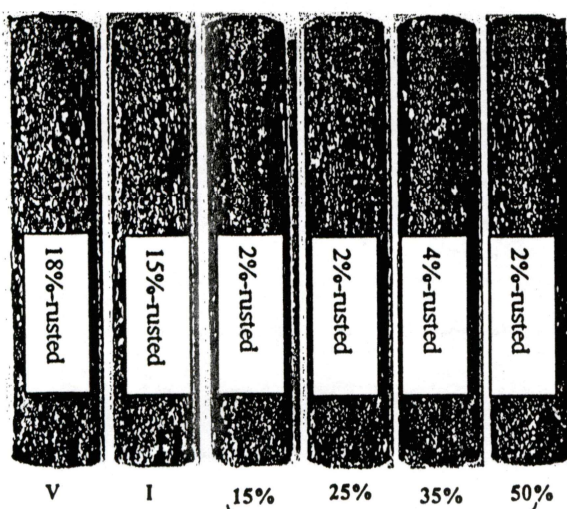
Fly Ash Concrete
10-mm covering depth

รูปที่ 2 (ก)



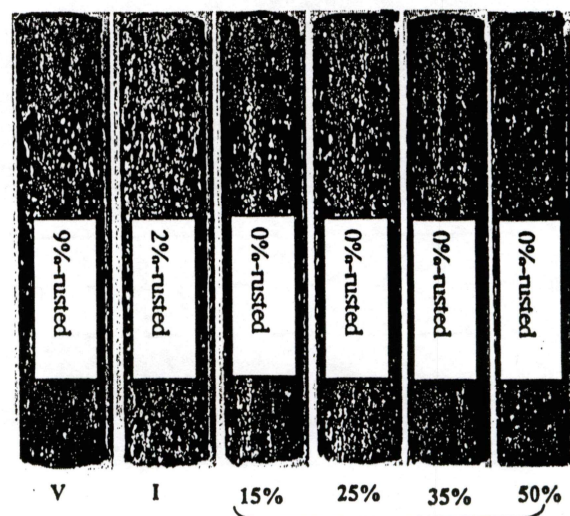
Fly Ash Concrete
20-mm covering depth

รูปที่ 2 (ข)



Fly Ash Concrete
50-mm covering depth

รูปที่ 2 (ค)



Fly Ash Concrete
75-mm covering depth

รูปที่ 2 (ง)

รูปที่ 2 สนิมในเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อแช่น้ำทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 36 เดือน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาที่ทำการแช่คอนกรีตที่มีค่า w/c เท่ากับ 0.65 ในน้ำทะเล (สภาพเปียกสลับแห้ง) เป็นเวลา 36 เดือน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I มีแนวโน้มเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตและมีปริมาณสารประกอบคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ V
2. คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าการเกิดสนิมในเหล็กและปริมาณของสารประกอบคลอไรด์ในคอนกรีตเนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงตามปริมาณการแทนที่
3. การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมช้ากว่า 24

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ V เพียงอย่างเดียว แต่การแทนที่เถ้าถ่านหินถึงร้อยละ 50 ส่งผลให้ค่าดังัดคอนกรีตมีค่าต่ำลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการทดสอบ ในช่วงเวลา 2 ปีแรกของการศึกษา และโรงพยาบาลสมเด็จพระเทพฯ ศรีราชา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการแช่ตัวอย่างคอนกรีต ขอขอบคุณ คณะกรรมการอุดมศึกษา ภาวได้โครงการพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาภายในประเทศ ตามความต้องการของมหาวิทยาลัยบูรพา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภาวได้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณ ภาววิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

และมหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและ
ห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, M.D.A., 1996, "Chloride Thresholds in Marine Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, pp. 513-519.
- [2] สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2537, "การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก," มิถุนายน 2537, หน้า 55.
- [3] Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. and Kunchong, T., 1999, "Strength Activity Index of Single Size Fly Ash Mixed with Portland Cement Type I and Type III," Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, August 27-28, 1999, Japan, pp. 1396-1401.
- [4] Verbeck, George J., 1975, Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete, Corrosion of Metals in Concrete, Publication SP-49 American Concrete Institute, pp. 21-38.
- [5] Rasheeduzzafar, P., 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. 779-794