

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ¹ ธวัชชัย สาสกุล¹ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

และ วิเชียร ชาติ²

มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อดำเนินการกักกรองเนื่องจากน้ำทะเล โดยศึกษากำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต การศึกษาทำการหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดจนมีอนุภาคต่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 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 27 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง และเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และวัดพื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่อายุ 1 ปี

หลังจากแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเล็กน้อย คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากขึ้น ช่วยให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น นอกจากนี้ การใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมช่วยลดการกักกรองของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท พบว่า คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย ส่วนการเกิดสนิมของแท่งเหล็กยังไม่เห็นความแตกต่างของการกักกรองที่เกิดขึ้น

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Effect of Sea Water on Portland Cement Type I and V Concretes Containing Fly Ash from Fluidized Bed Combustion

Piyapong Suwanmaneechot ¹, Thawatchai Sasakul ¹, Chai Jaturapitakkul ³,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140
and Wichian Chalee ²

Burapha University, Muang, Chonburi 20131

Abstract

This research aimed to study the effect of cement type I and V blended fly ash from fluidized bed combustion on compressive strength, chloride penetration, and corrosion of steel in concrete under marine exposure. Portland cement type I and V were used to cast concrete. Water to binder ratio was kept constant at 0.65. Fly ash was ground to have particles as retained on a sieve No. 325 of 2% by weight and then was used as a partial replacement of Portland cement type I and V at 0, 15, 25, 35 and 50% by weight of binder. The 200-mm concrete cube specimens with steel bar of 12-mm in diameter and 50-mm in length embedded at the cover depth of 20 and 50 mm were cast. Concrete specimens were cured in fresh water for 27 days, and then were placed to expose tidal zone of sea water at wet-dry condition. Compressive strength, chloride penetration, and rusted area of steel in concrete at the age of 1 year of exposure in sea water were investigated.

The results illustrated that the compressive strength of exposed concrete in sea water was slightly lower than that of concrete cured in fresh water. Fly ash concrete provided better resistance of chloride ingress than the one without fly ash. The increase in fly ash replacement in both of Portland cement type I and V concretes could reduce the chloride ingress and steel corrosion. In addition, Portland cement type I concrete containing fly ash had slightly higher chloride ingress than Portland cement type V concrete containing fly ash. However, the results of corrosion of steel bars were not different from both concretes.

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม หรือค่าก่อสร้างองค์อาคารขึ้นมาใหม่ เพื่อทดแทนสิ่งปลูกสร้างเดิมที่วิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม จนสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำให้เกิดความไม่คุ้มค่าในเชิงการลงทุนและการใช้งาน ดังนั้น การเลือกวิธีป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องพิจารณาให้รอบด้าน ทั้งข้อมูลการกัดกร่อน สภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหาย วัสดุที่สามารถนำมาใช้ป้องกัน ฯลฯ แนวความคิดในการใช้ถ้ำถ่านหินเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ดีขึ้น [1] จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสม และเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาสร้างประโยชน์อย่างสูงสุด

จากข้อกำหนดของ ACI 318-05 ที่ระบุว่า คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลซึ่งมีซัลเฟต ละลายอยู่ในปริมาณสูง ควรใช้คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดี แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านการป้องกันเหล็กเสริมเป็นสนิม พบว่า มีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ขณะที่การใช้ถ้ำถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ช่วยทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี เช่น งานวิจัยของ Thomas และ Matthews [2] ได้ทดลองหล่อแท่งคอนกรีตที่ฝังเหล็กเส้นไว้ในคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้ำถ่านหินเป็นวัสดุประสาน แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในประเทศอังกฤษเป็นเวลา 10 ปี พบว่า คอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมถ้ำถ่านหิน อีกทั้งคอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังอยู่ภายในคอนกรีตได้ดีที่สุด นอกจากนี้ Bai และคณะ [3] ได้ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยนำคอนกรีตแช่น้ำทะเลสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 18 เดือน ซึ่งคอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระยะความ

ลึกต่างๆ น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 10 และคอนกรีตควบคุม รวมไปถึงงานวิจัยอีกหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่า ถ้ำถ่านหินมีคุณสมบัติในการลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิมได้ดี [4-7]

งานวิจัยในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทางทะเลจริง เริ่มมีการทำวิจัยและเก็บข้อมูลไปบ้างแล้ว เช่น งานวิจัยของวิเชียร ชาลี และคณะ [8] ซึ่งใช้ถ้ำถ่านหินแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน เพื่อลดการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล ถ้ำถ่านหินแม่เมาะได้จากการเผาถ้ำถ่านหินลิกไนต์แบบ Pulverized Coal Combustion ทำให้ถ้ำถ่านหินมีเม็ดกลม และทำให้คอนกรีตมีการต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำทะเลได้ดีขึ้น ดังนั้น การศึกษาชนิดของถ้ำถ่านหินและรูปแบบการเผาไหม้ที่แตกต่างกันออกไป จะทำให้ประเทศไทยมีฐานข้อมูลการเลือกใช้วัสดุปอชโซลานที่หลากหลายขึ้น ในขณะที่ถ้ำถ่านหินจากจังหวัดปราจีนบุรีเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ้ำถ่านหินประเภทปิทุมินัสและแอนทราไซต์ในระบบการเผาไหม้แบบ Fluidized Bed Combustion ซึ่งมีอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 800-900 °C อีกทั้งเป็นแหล่งถ้ำถ่านหินที่มีปริมาณสูง (ประมาณ 200,000 ตันต่อปี) และตั้งอยู่ใกล้กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ การทดลองใช้ถ้ำถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ้ำถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะสามารถเห็นความแตกต่างของผลกระทบของการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทต่อการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และถ้ำถ่านหินจากจังหวัดปราจีนบุรี เนื่องจากถ้ำถ่านหินจากจังหวัดปราจีนบุรีเป็นถ้ำถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ (ขนาดเฉลี่ย 31 ไมครอน) จึงนำถ้ำถ่านหินมาปรับปรุง

คุณภาพด้วยการบดละเอียด ให้มีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำสะอาด มวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อย ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เท่ากับร้อยละ 9.23 และ 1.80 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ตาม ASTM C 150 กำหนดไว้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่า ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 65.46 ซึ่งปริมาณออกไซด์ดังกล่าวมีค่าระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 แต่ค่า LOI มีค่าสูงถึงร้อยละ 25 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 6 ค่อนข้างมาก จึงไม่อาจจัดเถ้าถ่านหินจากจังหวัดปราจีนบุรีอยู่ใน Class C ได้ตามหลักการของการจำแนกเถ้าถ่านหินตามองค์ประกอบทางเคมี

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าถ่านหินปราจีนบุรีที่บดละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2 พบว่า ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าถ่านหินปราจีนบุรีที่อายุ 7 และ 28

วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 99 และ 103 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานล้วน แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินปราจีนบุรีเมื่อบดให้มีความละเอียดสูงขึ้น มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและน่าจะสามารถใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตได้ อีกทั้งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตอากาศร้อน การใช้เถ้าถ่านหินที่มี LOI สูงผสมคอนกรีต จึงไม่มีปัญหาเรื่องการแข็งตัวและละลายของน้ำสลักกันคอนกรีตเกิดขึ้น

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานของ ACI 211.1-91 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 นำเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. หากการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2 หล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม. เพื่อฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ตำแหน่งระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 20 และ 50 มม.

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5	เถ้าถ่านหิน
ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2)	20.80	21.52	46.70
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	5.50	3.56	12.85
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.16	4.51	5.91
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.97	66.70	4.17
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.06	1.20	-
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.08	0.10	0.14
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.55	0.24	1.07
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.96	2.11	0.77
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.89	1.74	25.06
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	3.17	2.35
ปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325	N/A	N/A	2
สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์			
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)	56.50	71.60	-
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	17.01	7.68	-
ไตรแคลเซียมอลูมินา (C_3A)	9.23	1.80	-
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)	9.62	13.72	-

ทำการถอดแบบหล่อคอนกรีตหลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง และนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 27 วัน จากนั้นนำคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลด้านหลังโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยคอนกรีตจะสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง ตามระดับน้ำขึ้น-ลง (ดังรูปที่ 1) ซึ่งภายในหนึ่งวัน น้ำทะเลขึ้นและลง 2 รอบ น้ำทะเลบริเวณดังกล่าวมีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่า pH

ประมาณ 8.2 แสดงว่ามีความเป็นด่างอ่อนๆ ส่วนสารประกอบที่ปะปนในน้ำทะเล (แสดงดังตารางที่ 3) พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ 16,000 ถึง 18,000 มก./ล. ปริมาณซัลเฟต 2,240 ถึง 2,500 มก./ล. ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำทะเลโดยทั่วไป [2, 9] และเมื่อพิจารณาตาม ACI 318-05 ซึ่งกล่าวว่าคอนกรีต ที่อยู่ในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในปริมาณ 2,200 ถึง 2,500 มก./ล. อาจเกิดการกัดกร่อนเนื่องมาจากซัลเฟตในชั้นรุนแรงได้

ตารางที่ 2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีต	ปริมาณ เถ้าถ่านหิน (%)	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)						ค่ายุบตัว (ซม.)
		ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	หิน	ทราย	น้ำ	สารผสมเพิ่ม	
I65CT	0	295	-	1,039	814	192	-	9
I65FN15	15	251	44	1,028	814	192	0.59	8
I65FN25	25	221	74	1,023	814	192	0.89	9
I65FN35	35	192	103	1,012	814	192	1.18	9
I65FN50	50	148	148	998	814	192	1.77	8
V65CT	0	295	-	1,039	814	192	-	8
V65FN15	15	251	44	1,025	814	192	0.59	8
V65FN25	25	221	74	1,017	814	192	0.89	7
V65FN35	35	192	103	1,009	814	192	1.18	7
V65FN50	50	148	148	996	814	192	1.77	5

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำทะเล

ตัวแปร	เมษายน 2547	กุมภาพันธ์ 2548
ลักษณะของน้ำทะเล	ใส ไม่มีสี	ใส ไม่มีสี
pH	8.2	8.2
คลอไรด์ (มล./ล.)	16,210	18,035
ซัลเฟต (มล./ล.)	2,500	2,240



(ก) คอนกรีตในสภาพเปื่อยก



(ข) คอนกรีตในสภาพแห้ง

รูปที่ 1 สถานที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตบริเวณชายหาดที่โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา

2.3 การทดสอบคอนกรีต

ทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน และ 1 ปี ซึ่งบ่มในน้ำประปา สำหรับคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลจนมีอายุครบ 1 ปี จะนำคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาทดสอบกำลังอัด และเจาะคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ตรงบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. ทำการปาดผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะทิ้งประมาณ 1 มม. เพื่อลดความแปรปรวนของปริมาณคลอไรด์ที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าคอนกรีต จากนั้นทำการตัดแท่งคอนกรีตที่เจาะตามขวางให้มีความหนา 1 ซม. จำนวน 3 ชิ้น นำตัวอย่างที่ได้มาทำการบดจนละเอียด และนำส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ระยະความถี่ต่างๆ ไปทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 114 และ C 1152/C 1152M และกัดอัดคอนกรีตที่ฝังแท่งเหล็กให้แตกออก เพื่อนำเหล็กที่ฝังตามระยะหุ้มต่างๆ มาตรวจสอบความเป็นสนิมด้วยการวัดพื้นที่ผิวที่เกิดสนิมเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมด

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่าที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 309 กก./ชม.² และเพิ่มขึ้นเป็น 390 กก./ชม.² ที่อายุ 1 ปี หรือคิดเป็นร้อยละ 126 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 333 กก./ชม.² ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 441 กก./ชม.² ที่อายุ 1 ปี หรือคิดเป็นร้อยละ 132 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งจะเห็นว่า การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เร็วกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงมีพื้นที่ผิวมาก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และมีอัตราการเพิ่มของกำลังเร็วขึ้น เป็น

ผลให้คอนกรีตที่หล่อจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีกำลังอัดสูงกว่า เมื่อผสมเถ้านหินในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้านหิน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย

เถ้านหินเท่ากัน ขณะที่การผสมเถ้านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อผสมเถ้านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50 กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำที่สุด แสดงให้เห็นถึงขีดความเหมาะสมของการใช้เถ้านหินจากจังหวัดปราจีนบุรีในการแทนที่ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4 กำลังอัดคอนกรีต ซึ่งบ่มน้ำประปา 28 วัน และ 1 ปี และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี

คอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม. ²)			กำลังอัดคอนกรีตที่บ่ม ในน้ำประปา 1 ปี / 28 วัน	กำลังอัดคอนกรีต 1 ปี ในน้ำทะเล / 1 ปี ในน้ำประปา
	บ่มน้ำประปา		แช่น้ำทะเล		
	28 วัน	1 ปี	1 ปี		
I65CT	309	390	411	126	105
I65FN15	331	422	412	127	98
I65FN25	316	411	393	130	96
I65FN35	286	357	322	125	90
I65FN50	254	343	327	135	95
V65CT	333	441	441	132	100
V65FN15	342	477	448	139	94
V65FN25	354	425	397	123	93
V65FN35	327	409	399	125	98
V65FN50	219	372	346	170	93

คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่ 28 วันค่อนข้างมาก และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 1 ปี พบว่า คอนกรีตที่แช่น้ำทะเลมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1 ปี เริ่มมีการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เพื่อต้านทาน

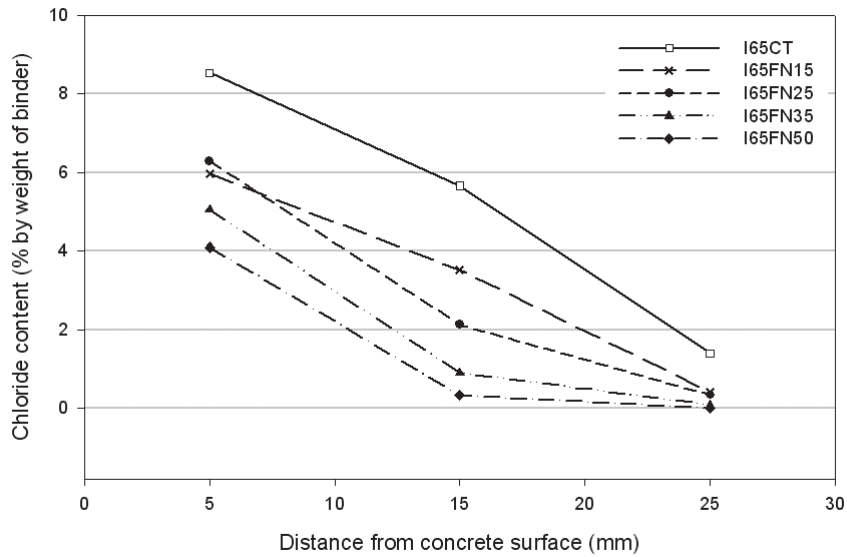
การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเล ในด้านกำลังอัดพบว่า ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 ปีในน้ำทะเลต่อกำลังอัดในน้ำประปา ของคอนกรีตทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่เห็นถึงความแตกต่าง และการแช่น้ำทะเล 1 ปี เป็นช่วงเวลานานๆ เมื่อเทียบกับอายุการใช้งานคอนกรีตที่ก่อสร้างจริง ดังนั้น การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจึงมีผลกระทบต่อคอนกรีตน้อยมาก และจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลในระยะยาวเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนต่อไป

3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์

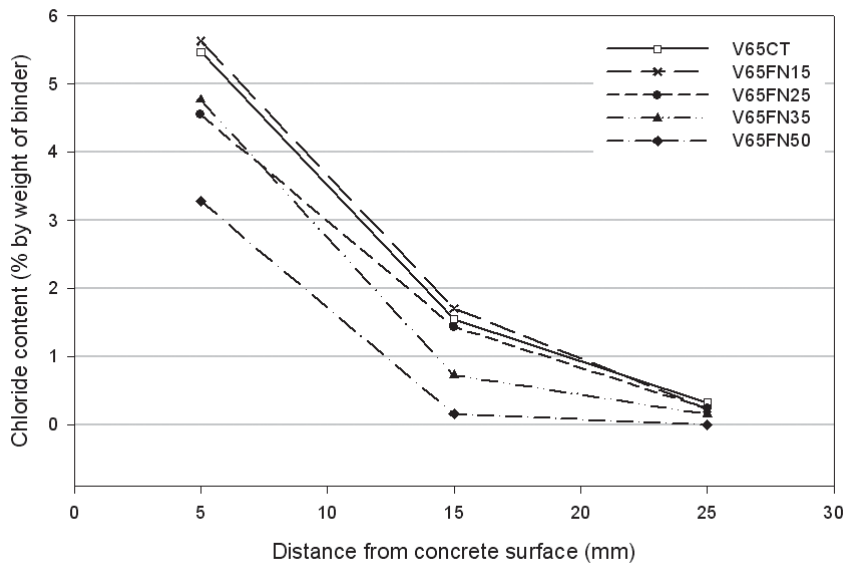
รูปที่ 2 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า ที่ระดับความลึก 5 มม. จากผิวหน้าคอนกรีตทุกส่วนผสม พบปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างสูง และมีความแปรปรวนของข้อมูล อันเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตซึ่งได้รับผลกระทบทั้งทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลสูง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของสารประกอบคลอไรด์ที่ระดับความลึกดังกล่าวได้ชัดเจน แต่ที่ระดับความลึกที่มากขึ้นพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความชัดเจนและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตทุกระดับความลึกมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งมีผลการศึกษาล้ำกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2-4, 10] ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินเข้ามาอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าลดลง เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน

ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 3.51, 2.12, 0.90 และ 0.32 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตควบคุม I65CT มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 5.66 แสดงว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น ขณะที่ผลการทดสอบคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ มีปริมาณคลอไรด์ต่ำลงตามการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น

สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แสดงผลการทดสอบคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 3 ที่ระดับความลึก 15 มม. คอนกรีตควบคุม V65CT มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 1.55 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 มีแนวโน้มของการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกับกลุ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ มีปริมาณคลอไรด์ลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.71, 1.44, 0.73 และ 0.16 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหิน มีอิทธิพลต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในการช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ซึ่งศักยภาพดังกล่าวจะเด่นชัดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)



รูปที่ 2 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะความลึกต่างๆ



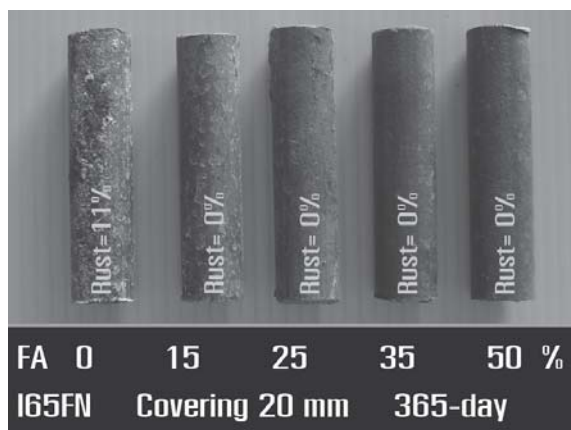
รูปที่ 3 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ระยะความลึกต่างๆ

3.3 การเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต

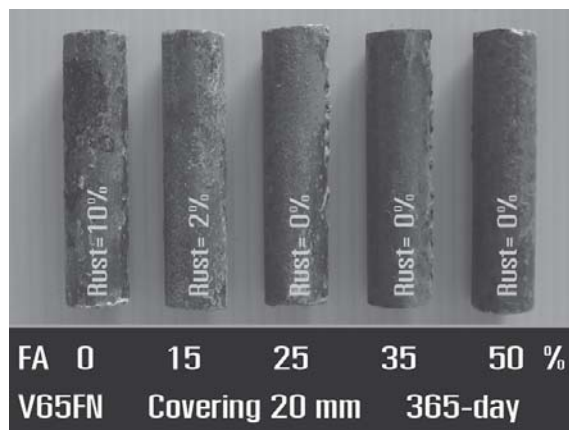
รูปที่ 4 แสดงลักษณะการเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 20 มม. โดยตัวเลขที่แสดงบนแท่งเหล็ก หมายถึง ร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมต่อพื้นที่ทั้งหมดของแท่งเหล็ก แท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตควบคุม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน (I65CT) มีพื้นที่การเกิดสนิมร้อยละ 11 ของพื้นที่ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตควบคุมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 1 ปี เริ่มมีการกัดกร่อนแท่งเหล็กเกิดขึ้น ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 15 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ไม่พบการเกิดสนิมที่ตำแหน่งระยะหุ้มนี้ ทำให้มั่นใจได้ว่าเถ้าถ่านหินมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำทะเลได้ดีขึ้น สำหรับคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน (V65CT) มีพื้นที่การเกิดสนิม

เท่ากับร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั้งหมด และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีพื้นที่การเกิดสนิมเท่ากับร้อยละ 2 ส่วนแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 15 ไม่มีการเกิดสนิม

มาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 ถึง 60 มม. เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งจากผลการทดสอบนี้ แท่งเหล็กที่ฝังที่ระยะหุ้ม 50 มม. (ดังรูปที่ 5) ในคอนกรีตทุกส่วนผสม ยังไม่มีการเกิดสนิม นั้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี ยังไม่ปรากฏการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เมื่อกำหนดระยะหุ้มเหล็กอย่างต่ำตาม ACI 201.2R

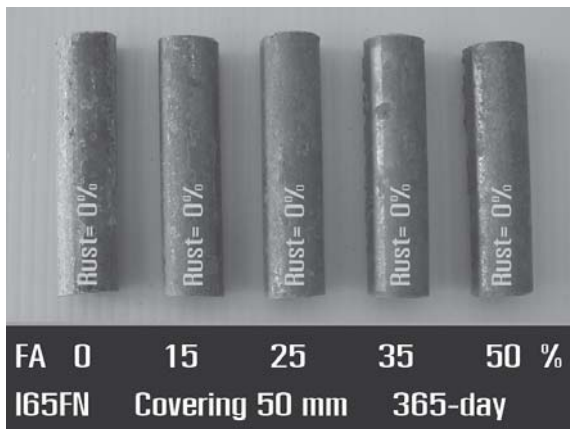


(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

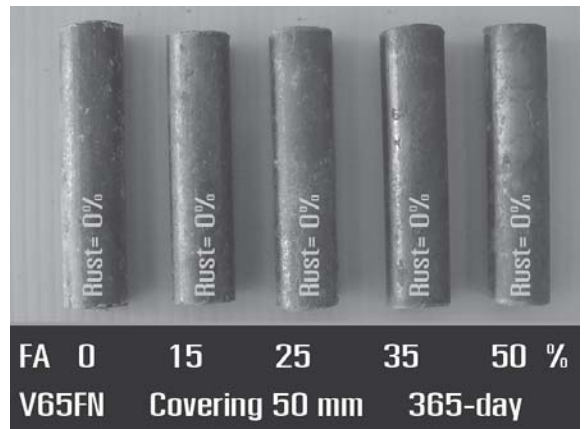


(ข) คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้ม 20 มม. แช่น้ำทะเล 1 ปี



(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 5 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะหุ้ม 50 มม. แช่น้ำทะเล 1 ปี

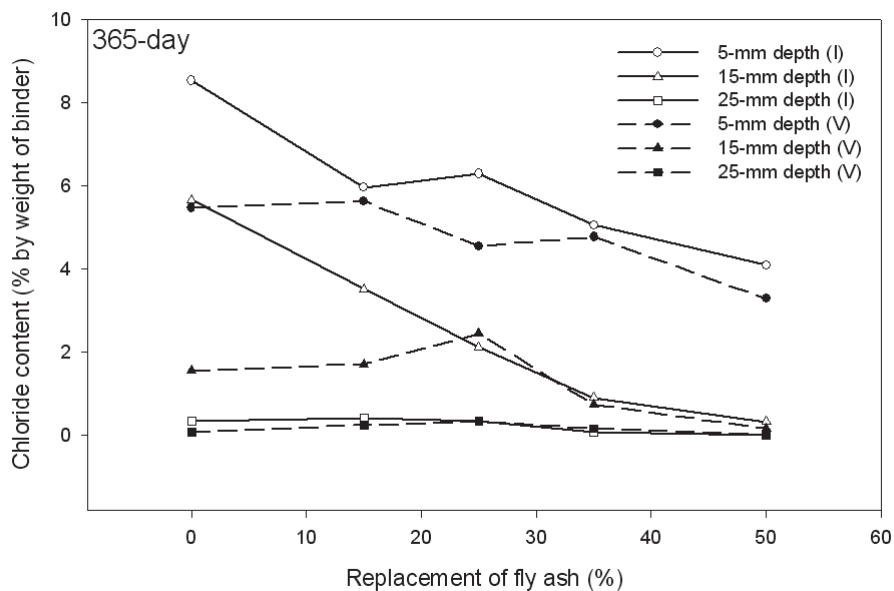
3.4 ความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด และการแทรกซึมของคลอไรด์

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในด้านกำลังอัด พบว่า คอนกรีตที่หล่อจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเมื่อพิจารณาผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน พบว่า การเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกันมาก จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีค่าสูงกว่าการณิของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อมีอัตราส่วนการแทนที่เท่ากัน สำหรับระยะเวลา 1 ปีที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่า คลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเลไม่มีผลต่อกำลังอัดมากนัก

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึกต่างๆ กับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา [4, 11-12] ที่พบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ C_3A สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พอสมควร จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล 1 ปี มีค่าต่ำกว่าการณิของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้น เพื่อความชัดเจนของการศึกษาจึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในระยะยาวต่อไป

สำหรับความแตกต่างของการกัดกร่อนของแท่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภท ซึ่งไม่ใส่เถ้าถ่านหิน พบว่า พื้นที่การเกิดสนิมของแท่งเหล็กที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 20 และ 50 มม. ยังไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม การแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภทด้วยเถ้าถ่านหิน สามารถช่วยลดการเกิดสนิมของแท่งเหล็กได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสม



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก 5, 15 และ 25 มม. จากผิวหน้าคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

4. สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อคอนกรีตแช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่า การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเล มีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินน้อยมาก

2. คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ช่วยให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น

3. เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภท สามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณกองทุนพัฒนาบุคลากร มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตสารสนเทศพะเยา สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา รวมไปถึงมหาวิทยาลัยบูรพาที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเล

6. เอกสารอ้างอิง

1. ชัย จาตุรพิทักษกุล, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และ เอนก ศิริพานิชกร, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การศึกษาศักยภาพเถ้าถ่านหินในประเทศไทยเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 158-159.

2. 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.
3. 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.
4. Al-Saadoun, S.S., Rasheeduzzafar, and Al-Gahtani, A.S., 1993, "Corrosion of Reinforcing Steel in Fly Ash Blended Cement Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 356-371.
5. Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K., and Dyer T.D., 1997, "Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 11, pp. 1633-1639.
6. Ampadu, K.O. and Torii, K., 2002, "Chloride Ingress and Steel Corrosion in Cement Mortars Incorporating Low-Quality Fly Ashes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 6, pp. 893-901.
7. Sujjavanich, S., Sida, V., and Suwanvitaya, P., 2005, "Chloride Permeability and Corrosion Risk of High-Volume Fly Ash Concrete with Mid-Range Water Reducer", *ACI Materials Journal*, Vol. 102, No. 3, pp. 177-182.
8. วิเชียร ชาลี, มณฑิร ทิมวาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
9. Mohammed, T.U., Hamada, H., and Yamaji, T., 2004, "Performance of Seawater-Mixed Concrete in the Tidal Environment", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 593-601.
10. Chindaprasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H.T., and Sirivivatnanon, V., 2007, "Influence of Fly Ash Fineness on the Chloride Penetration of Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 356-361.
11. Sakr, K., 2005, "Effect of Cement Type on the Corrosion of Reinforcing Steel Bars Exposed to Acidic Media Using Electrochemical Techniques", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1820-1826.
12. Chalee, W., Teekavanit, M., and Jaturapitakkul, C., 2006, "Chloride Penetration Profile and Steel Corrosion in Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Marine Environment of Thailand", *The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, August 3-5, pp. 359-364.