



สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association

TCA e-magazine

วารสารคอนกรีต

ฉบับที่ 34 ประจำเดือน สิงหาคม 2018



ความสำคัญ(น้อย?)

ของส่วนผสม การทำงานและระดับกำลังต่อความคงทนของคอนกรีต

นันทวัฒน์ ขมหวาน¹ สุวิมล สัจจาณิษฐ์² ทักษิณัย เขียวอ่อน¹ พัทธภรณ์ ช่างน้ำ¹ ธนวรรธก์ มีศักดิ์³ พรศักดิ์ ปานย่อย⁴

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน

จ.นครปฐม 73140

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

³ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

⁴ การประปานครหลวง ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตกระทบต่อการใช้งานในระยะยาวของโครงสร้างในด้านความแข็งแรงทางโครงสร้าง การใช้งาน การเสียโอกาส ตลอดจนมีผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะการจัดตั้งงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาหรือในบางครั้งที่มีความเสียหายรุนแรงอาจต้องสร้างชิ้นใหม่เพื่อทดแทนซึ่งมักมีมูลค่าสูง ด้วยเหตุนี้โครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์เช่น ในสภาวะแวดล้อมทะเล หรือ โครงสร้างที่สัมผัสคลอไรด์ในรูปแบบต่างๆ และมีความชื้นสูง ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในลักษณะ chloride induced corrosion ค่อนข้างสูงเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้เอื้อให้เหล็กเกิดสนิมได้ง่าย ประเด็นปัญหานี้จึงมีความสำคัญมาก ดังนั้นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้จึงมีความสำคัญที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาทั้งทางด้านความปลอดภัยในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์และผลกระทบต่อผู้ใช้งานจำนวนมากในวงกว้างรวมถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

ในปัจจุบัน การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีหลายแนวทาง เช่น การใช้คอนกรีตคุณภาพดี การเคลือบผิว การป้องกันด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี หรือการเคลือบเหล็กเพื่อป้องกันหรือเลือกใช้วัสดุอื่นทดแทน เป็นต้น บทความสั้นๆนี้มีสาระเกี่ยวกับอิทธิพลจากคุณภาพคอนกรีต และการปรับปรุงคุณภาพต่อการเกิดสนิมของเหล็ก

เสริมในคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์โดยใช้เกลือลอย ซึ่งจะให้พื้นความรู้และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอันอาจเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน การประยุกต์ใช้ความรู้ ใช้เทคโนโลยีอย่างมีประสิทธิภาพและผสมผสานเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในราคาไม่สูงมาก

ขณะที่ช่องว่างในมวลรวมมีลักษณะคงที่และมักเป็นช่องว่างที่ไม่ต่อเนื่อง และสามารถคาดเดาถึงผลกระทบต่อสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตได้มากกว่าจึงมักไม่นำมาคิดถึงผลกระทบนี้ แต่ความพรุนหรือระบบช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ซึ่งเชื่อมประสานมวลรวมเข้าด้วยกันนั้นเป็นลักษณะธรรมชาติของคอนกรีต โดยเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค นอกจากนั้นการทำงานที่ด้อยคุณภาพก็อาจทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างขึ้นได้ ระบบช่องว่างนี้มีความสำคัญต่อกำลังและความคงทนของคอนกรีตอย่างมาก เนื่องจากช่องว่างเหล่านี้ อาจเป็นได้ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องและมีความผันแปรได้มาก ทั้งชนิด ปริมาณและขนาดตามเวลาและระดับการเกิดปฏิกิริยา จึงมีผลต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาวรวมถึงมีผลต่อพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมอย่างมาก โดยช่องว่างที่ต่อเนื่องเหล่านี้เป็นทางผ่านให้ความชื้นหรือสารละลายเป็นตัวกลางนำสิ่งต่างๆจากสภาวะแวดล้อม เคลื่อนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตภายใน หรือความชื้นอาจทำให้เกิดการชะสารองค์ประกอบจากภายในเคลื่อนออกสู่ภายนอกได้โดยการซึมผ่าน หรือแพร่ผ่านเป็นต้น และทำให้เกิดปัญหาตามมาโดย ลักษณะการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่มักพบเห็นจากกระบวนการเหล่านี้ได้แก่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการแตกหลุดร่อนของคอนกรีตที่ตามมา

ช่องว่างสองชนิดหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตในด้านความคงทนและการเสื่อมสภาพที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมได้แก่ ช่องว่างซึ่งมักเป็นผลจากความบกพร่องในการทำงาน ที่เรียกว่า Entrapped air ซึ่งอาจมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่(ไมโครเมตร-ซม) และช่องว่างซึ่งเป็นลักษณะตามธรรมชาติของการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำหรือ Capillary pore ซึ่งโดยมักมีขนาดตั้งแต่เล็กจนถึงใหญ่(เล็กกว่าชนิดแรก โดยอาจมีตั้งแต่ขนาดเป็น มม จนถึง ไมโครเมตรหรือนาโนเมตรและมักมีความต่อเนื่อง โดยช่องว่างแบบนี้อาจมีน้ำเต็ม หรือเหลือค้ำอยู่บ้างหรือแห้งเลยก็ได้

ปัญหาคอนกรีตจากคลอไรด์จากภายนอกนั้นอาจอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีคลอไรด์ไอออนสะสมอยู่ในโพรงคอนกรีตโดยเฉพาะคลอไรด์ที่ละลายปนอยู่ในสารละลายในโพรงช่องว่างหรือ Pore Solution จะเกิด

กระบวนการแพร่ต่อไปจนถึงผิวเหล็กและเมื่อมีความเข้มข้นของไอออนถึงระดับหนึ่ง ที่เรียกว่า threshold level ซึ่งเป็นระดับที่มีคลอไรด์ต่ำที่สุดที่จะทำให้ Passive layer เสียหาย เหล็กเสริมจะอยู่ในภาวะที่จะเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย หากมีปัจจัยที่จำเป็นครบ ได้แก่ความชื้น ออกซิเจนและกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ครบวงจร โดยคลอไรด์จะเข้าร่วมตัวกับไฮโดรเจน โดยเข้าแทนที่ Oxygen บางตัว และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งละลายออกสู่ภายนอก และคลอไรด์ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาโดยเข้าทำปฏิกิริยากับ Fe^{+2} เกิดเป็น $FeCl_2$ และ $FeCl_2$ ซึ่งจะปฏิกิริยาต่อกับ OH^- เกิดเป็น $Fe(OH)_2$ คลอไรด์ที่เหลือจะกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ได้อีก ทำให้ Passive layer เกิดความเสียหายต่อเนื่องและเหล็กเสริมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยง่ายและต่อเนื่องซึ่งเป็นกัดกร่อนแบบ pitting corrosion (Neville, 1996)

ดังนั้นการใช้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นจึงเป็นทางแก้ปัญหาที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก เนื่องจากความทึบแน่นของคอนกรีตจะทำให้คลอไรด์หรือสารอันตรายชนิดอื่นในรูปสารละลายเคลื่อนเข้าภายในคอนกรีตและทำอันตรายต่อเหล็กเสริมได้ยากขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปัจจัยหลายประการที่มีผลความทึบแน่นของคอนกรีตทำให้มีผลต่อการเกิดสนิมตลอดจนอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ตามมา มีดังนี้

ชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ชนิดของปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหนึ่งในหลายๆปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณคลอไรด์อิสระ นอกจากนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพียงพอมีความสำคัญต่อกำลังของคอนกรีต ตลอดจนช่องว่างที่จะเกิดขึ้นและความทึบแน่นของคอนกรีตที่ได้ แต่หากใช้ปูนซีเมนต์มากเกินไป อาจมีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตในด้านการคายความร้อน การหดตัว และการแตกร้าวได้

คุณภาพของคอนกรีต การเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมรวมถึงการทำงานที่มีการควบคุมคุณภาพที่ดี มีการอัดแน่นและการบ่มที่เหมาะสม เป็นผลให้ได้เนื้อคอนกรีตที่มีทึบแน่น มีช่องว่างน้อย มีการซึมผ่านของน้ำต่ำและทำให้เกิดสนิมได้ยากขึ้น คุณภาพของคอนกรีตและงานก่อสร้างคุณภาพต่ำมีผลต่อการเกิดสนิมและการเสื่อมสภาพอย่างชัดเจนและมักพบอยู่เสมอ ดังรายงานที่กล่าวมาแล้ว (Watanabe, & Koga, 2006) ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงว่ากำลังของคอนกรีต คุณภาพการทำงาน และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเกิดสนิมของคอนกรีตโครงสร้างได้แก่ กรณีศึกษาโครงสร้างคอนกรีตของอุโมงค์เรือในประเทศโปรตุเกส (Costa & Appleton, 1996) ซึ่งใช้คอนกรีตที่มีกำลังออกแบบ characteristic cube strength ค่อนข้างต่ำคือ 22.5 MPa (ประมาณ 220 กก/ซม²) ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพียง 300 กก/ม³ และยังใช้อัตราส่วน w/c ค่อนข้างสูงคือ 0.7 เมื่อก่อสร้าง

เสร็จและมีการตรวจสอบติดตามคุณภาพของน้ำในแม่น้ำในเวลา 1 ปี พบปริมาณสารที่จัดว่ามีผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพของคอนกรีตได้คือ มีปริมาณไอออนของคลอไรด์ 16-21 กรัม/ลิตร ซัลเฟต 2.1-2.9 กรัม/ลิตร แมกนีเซียม 1.1-1.6 กรัม/ลิตร และมีค่า pH 7.8-8 และภายหลังการเปิดใช้งานไปประมาณ 4-5 ปี มีการตรวจพบ รอยแตกร้าวและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากปัญหาการสัมผัสคลอไรด์ในสภาพแวดล้อม และจากความด้อย คุณภาพของการทำงาน และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างเพิ่มเมื่อมีอายุ 10 ปี การพบว่าการเกิดสนิมรุนแรงขึ้นมาก และตรวจพบค่า resistivity อยู่ในระดับต่ำ ระหว่าง 4 ถึง 8 kΩ.cm ซึ่งบ่งชี้ถึงอัตราการเกิดสนิมสูง (Broomfield, Rodríguez, Ortega, & García 1993; Langford & Broomfield, 1987) โครงสร้างมีลักษณะการ ใช้งานที่ทำให้มีช่วงเวลาที่กำพวด้านในเปียกและมีรอบช่วงเวลาการแห้งยาวนานประกอบกับคอนกรีตมีค่า W/C สูงทำให้ค่า capillary porosity สูง ทำให้กระบวนการดูดซึม (absorption) เป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลต่อการ เสื่อมสภาพรุนแรงของโครงสร้างกำพวด้านใน ในขณะที่โครงสร้างส่วนอื่นเช่นบริเวณต่ำกว่า (lower zone) มี รอบการเปียกถี่กว่าทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพชื้นอิมตัวสูงนานกว่า กระบวนการแพร่ผ่าน (diffusion) ของคลอไรด์ จึงเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบ chloride profiles พบว่าแม้ จะมีความรุนแรงที่อายุ 16 ปี แต่ยังมีปริมาณคลอไรด์ในระดับต่ำกว่าที่พบใน dock ที่อายุน้อยกว่าคือ 5 ปี และ คณะผู้วิจัยพบว่าโครงสร้าง lower zone ส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำมีการเข้าถึงออกซิเจนค่อนข้างจำกัด ทำให้เกิดการ กระเทาะหลุดร่อนรุนแรงน้อยกว่ามาก จากสภาพแวดล้อมของโครงสร้างที่ต่างกันของกำพวด้านเหนือซึ่งอยู่สูง กว่าและไกลออกไปทำให้มีลักษณะแห้งกว่า และมีอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยที่คณะผู้วิจัยอธิบายว่าทั้งโอกาส การเข้าถึงออกซิเจนที่มากกว่าและอุณหภูมิสูงกว่า เป็นสาเหตุที่โครงสร้างส่วนนี้มีการเสื่อมสภาพรุนแรงกว่าและมี อัตราการเกิดสนิมเฉลี่ย 200–400 μm/ปี และในบางจุดอาจพบอัตราการเกิดสนิมสูงถึง 600 μm/ปี

อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) มีผลต่อปริมาณช่องว่างและความพรุนของเนื้อคอนกรีตและ ความยากง่ายต่อการเกิดสนิม หากค่า W/C สูง ปริมาณของช่องว่างจะสูงขึ้นและช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ สารละลายหรือของเหลวจากภายนอกซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ง่ายทำให้เหล็กเสริมมีแนวโน้มในการเกิดสนิมสูง กว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (Kheaw-on *et al.*, 2018 และ Khomwan and Mungsantisuk, 2019) นอกจากนี้ ความหนาหรือระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มีความหนามากขึ้น จะทำให้ระยะเวลาในการซึม ผ่านของคลอไรด์นานขึ้น ช่วยให้สนิมในเหล็กเสริมเกิดขึ้นช้ากว่าคอนกรีตที่มีระยะหุ้มน้อยกว่า

การเลือกใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม หรือการใช้สารเชื่อมประสานชนิดอื่นร่วมด้วยทั้งในลักษณะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยเป็นส่วนใหญ่ หรือเติมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมเพิ่มจากซีเมนต์ การใช้สารปอซโซลานส่วนใหญ่จะมีผลดีต่อการเพิ่มความทึบแน่นของโครงสร้างภายในจากพฤติกรรมสามลักษณะคือ สารปอซโซลานบางชนิดเช่นเถ้าลอย มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดของปูนซีเมนต์ แต่มีรูปร่างกลม ทำให้ต้องการน้ำน้อยลงโดยยังคงความสามารถทำงานได้เหมือนเดิม จึงสามารถลดค่า W/B ลงได้ นอกจากนั้นเถ้าลอยหรือสารปอซโซลานอื่นยังช่วยแทรกเติมช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง ทำให้อ่างว่างมีขนาดเล็กลง นอกจากลักษณะทางกายภาพแล้ว เถ้าลอยยังสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 และให้ CSH เพิ่มขึ้นทำให้โครงข่ายภายในคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น และผลลัพท์สาร CSH ที่เพิ่มขึ้นนี้มักมีอัตราส่วน Ca/Si ต่ำลงทำให้สามารถจับยึดคลอไรด์ได้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ซึ่งรวมทั้งปริมาณปูนซีเมนต์และสารปอซโซลานที่ใช้ จึงมีผลต่อการพัฒนาความทนทานต่อการเกิดสนิมของเหล็ก คอนกรีตที่ใช้ค่า W/B ต่ำกว่ามีแนวโน้มทำให้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเกิดขึ้นช้ากว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/B ที่สูงกว่าดังที่เคยมีรายงานวิจัยมาแล้ว (Sujjavanich, Sida, & Suwanvitaya, 2005)

ในปัจจุบันมีการใช้สารปอซโซลานเหล่านี้แทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตเป็นปกติ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่นกำลังอัดในระยะต้นหรือระยะยาวดีขึ้น ความทนทานเพิ่มขึ้น ให้ผลดีในด้านการลดการเกิดสนิมหากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมมีการวิจัยทั้งในต่างประเทศและในประเทศที่แสดงผลดีเหล่านี้ การใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ซีเมนต์ทำให้ความชื้นได้ของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง ขณะเดียวกันยังมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดมากขึ้นในทุกปริมาณการใช้ (วิโรจน์, 2542) นอกจากนั้นการใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานในประเทศอีกชนิดหนึ่งก็มีการนำมาศึกษาและใช้งานไม่น้อย เช่น มนตรี (2542) ศึกษาการใช้เถ้าลอยร่วมกับคอนกรีตโดยผันแปร ความละเอียด ปริมาณและอุณหภูมิการบ่ม และพบว่า การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงแทนที่ซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับเถ้าลอยทุกชนิดและทุกอุณหภูมิการบ่ม และให้ผลใกล้เคียงกันสำหรับความละเอียดอื่นๆ รวมถึงความสัมพันธ์กับความชื้นได้ของคลอไรด์ในคอนกรีตซึ่งอยู่ในระดับต่ำถึงต่ำมาก (Nithikul, Sujjavanich, and Suwanvitaya, 1999) ขณะที่คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยมีค่าอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ทั้งนี้เป็นผลจากเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลาน มีผลทั้งในด้าน filling effect และ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยซึ่งช่วยแทรกช่องว่าง และมีผลต่อการลดขนาดของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตลงทำให้ความชื้นได้และอัตราการแพร่ของสารเคมีและความชื้นที่เป็นอันตรายเข้าไปในคอนกรีตมีค่า

ลดลง ทำให้ลดความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟต รวมทั้งลดโอกาสการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากความชื้นและปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (ACI-226, 36)

อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย ค่าระดับthreshold อาจต่างไปจากคอนกรีตปกติ เนื่องจากมีปัจจัยที่มีผลกระทบแตกต่างกันออกไป เช่นการเติมเถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ช่องว่าง capillary ที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งมีผลต่อการซึมหรือแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออนยากขึ้น คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำลงและลดการแพร่ผ่าน โดยมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของคลอไรด์ไอออนต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ที่ใช้งานชายทะเลประมาณ 3 เท่า คือ 14.7×10^{-9} ซม./วินาที เมื่อเทียบกับ 44.7×10^{-9} ซม./วินาที แต่อย่างไรก็ตาม มีรายงานบางชิ้นระบุว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์สูงเช่นเกิน 50% อาจไม่เกิดประโยชน์และเกิดผลเสียในระยะสั้น การใช้งานจึงต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ การใช้เถ้าลอยจากแหล่งในประเทศแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่ออัตราการชะลอการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในระดับต่างกัน การใช้เถ้าลอยปริมาณมาก ถึงร้อยละ 50-60 มีผลดีต่อการลดแนวโน้มการซึมผ่านของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ (Sujavanich, Sida, & Suwanvitaya, 2005) นอกเหนือจากการใช้สารปอซโซลานเชิงเดี่ยวที่อาจมีปัญหาบ้างในด้านการพัฒนากำลังในช่วงต้น การใช้สารปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดหรือใช้ร่วมกับสารอื่น เช่นผงฝุ่นหินปูนยังได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากมีรายงานที่แสดงถึงการแก้ปัญหาทั้งในด้านการพัฒนากำลังทั้งระยะต้น ระยะปลายตลอดจนพัฒนาความทึบแน่นของเนื้อคอนกรีตและความคงทนต่อสารเคมีหลายอย่าง (Weerd et al., 2011; Sujavanich et al., 2017)

ดังที่กล่าวมาแล้วถึงความสำคัญของปัญหาการเกิดสนิมเหล็กและการป้องกันหรือชะลอการเกิดปัญหา บทความนี้จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีที่สามารถบริหารจัดการได้ไม่ยากและมีราคาไม่สูงนักซึ่งได้แก่การเลือกใช้คอนกรีตที่เหมาะสม การใช้วัสดุเชื่อมประสานอื่นเข้าร่วมและการจัดการคุณภาพที่ดีซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของผลการวิจัยซึ่งได้รับการสนับสนุนจากการประปานครหลวงประจำปี 2561 ดังมีรายละเอียดสรุปดังต่อไปนี้ ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในบทความนี้มีกำลังอัดเป้าหมาย 250 และ 350 กก/ซม² (จากแท่งตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่ 28 วัน) โดยเป็นค่ากำลังที่ใช้งานกันในการออกแบบถังน้ำในอิตต(250กก/ซม²) และค่ากำลังที่สูงขึ้นซึ่งคาดว่าจะมีความเป็นไปได้มากในการใช้งานออกแบบใหม่(350 กก/ซม²) มีค่าการยุบตัว 12.5 ± 2.5 ซม โดยไม่ใช้สารผสมเพิ่มทางเคมีใดๆ และบางส่วนผสมใส่เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 15%และ 30% โดยมี

รายละเอียดดังนี้คือ 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15, 2. มวลรวม ใช้ทรายหยาบปกติ มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง 2.65, หินขนาด 3/4” มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง 2.7 3. ถ้ำลอยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.4

รายละเอียดสัดส่วนผสมต่อปริมาตร 1 ม³ เป็นดังนี้คือ ส่วนผสมทั้งสองควบคุมกำลังอัดใช้ หินขนาดใหญ่สุด 3/4" 1000 กก. ทราย 800 กก. ส่วนผสมควบคุมที่มีกำลังอัด 250 กก/ชม² ใช้ปูนซีเมนต์ 370 กก. น้ำ 230กก. ค่าW/B=0.62 ในกรณีส่วนผสมใส่ถ้ำลอยแทนที่ซีเมนต์ 15%และ 30% ใช้ปูนซีเมนต์ 332 กก.ถ้ำลอย 59 กก. W/B=0.58 และใช้ปูนซีเมนต์ 284 กก.ถ้ำลอย 122 กก. W/B=0.56 ตามลำดับ ขณะที่ ส่วนผสมควบคุมที่มีกำลังอัด 350 กก/ชม² ใช้ปูนซีเมนต์ 450 กก. น้ำ 230กก. ค่าW/B=0.53 ในกรณีส่วนผสมใส่ถ้ำลอยแทนที่ซีเมนต์ 15%และ 30% ใช้ปูนซีเมนต์ 417 กก.ถ้ำลอย 74 กก. W/B=0.48 และใช้ปูนซีเมนต์ 350 กก.ถ้ำลอย 150 กก. W/B=0.47 ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือเพื่อรายงานผลการศึกษาที่เป็นอิทธิพลจาก สัดส่วนผสม การบ่มโดยวิธีบ่มเปียกด้วยการรดน้ำ3ครั้งต่อวันตามที่จำเป็นต้องใช้ตามสภาวะจริง เทียบกับวิธีบ่มในน้ำที่กำหนดตามมาตรฐานและจากการผสมถ้ำลอย ในด้านกำลังอัด ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์และการซึมผ่านของน้ำ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ผลกระทบจากส่วนผสม: คอนกรีตควบคุม(กำลังอัด 250 กก/ชม²) ที่ใช้ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า (370 กก/ม²) ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเป็นร้อยละ 70 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ขณะที่คอนกรีตควบคุม(กำลังอัด 350 กก/ชม²) ที่ใช้ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าคือ 450 กก. /ม² มีการพัฒนา**กำลังอัดที่เร็วขึ้นมากคือที่อายุ 7 วัน มีค่าร้อยละ 82ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน** โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมทั้งสองกลุ่ม ทั้งสองอายุ มีการเกาะกลุ่มดี โดยมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ไม่เกินร้อยละ 5 อย่างไรก็ตาม นอกจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากหรือน้อยมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ค่าอัตรา ส่วน W/C ที่แตกต่างกันของส่วนผสมทั้งสองชุดยังมีผลต่อที่ว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ที่มีสำหรับการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคส่วนหนึ่งและช่องว่างที่เหลือตามเวลาซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดโดยตรง นอกจากนั้น แม้ค่า W/Cไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้น แต่ในช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดแล้ว ค่านี้มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก (Pang, 2015, October) ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ส่งผลกระทบต่อส่วนผสมที่มีค่า W/Cต่ำมากกว่าส่วนผสมที่มีค่าสูง ซึ่งผลการศึกษานี้ให้แนวโน้มสอดคล้องกันกับการศึกษาข้างต้น ผลกระทบจากการใช้ถ้ำลอยปริมาณน้อย15% ในส่วนผสมที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน(ปูนซีเมนต์ร่วมกับถ้ำลอย)ที่ต่ำกว่า (370 กก/ม²) ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเป็นร้อยละ 80 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ ปริมาณสารเชื่อมประสาน

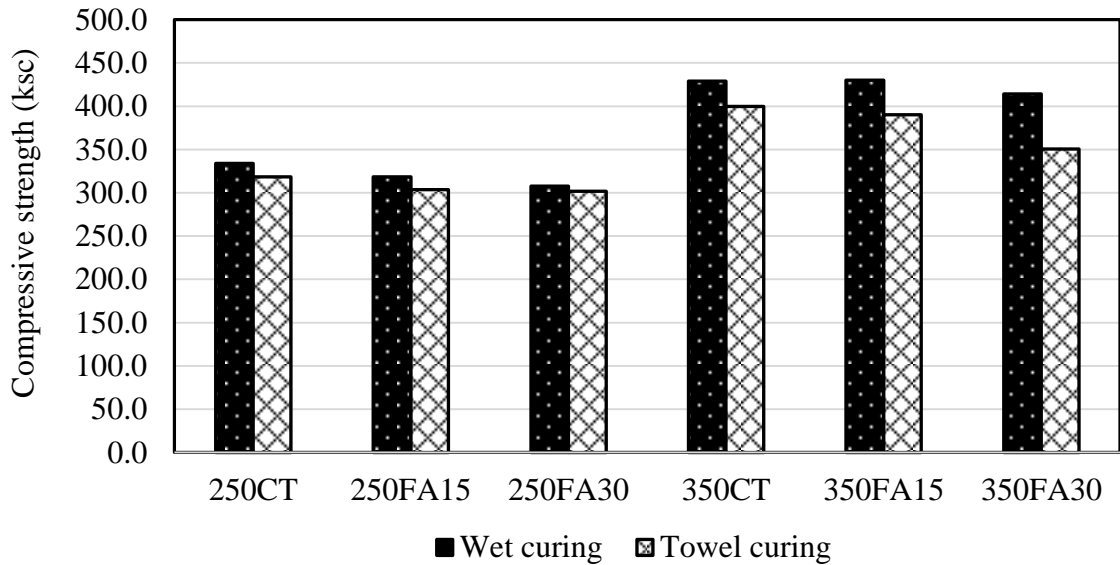
(ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย)ที่สูงกว่า (450 กก/ม²)ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเป็นร้อยละ 79 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วันซึ่งใกล้เคียงกัน แม้ว่าค่ากำลังที่แท้จริงของค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันและที่อายุ 28 วันมีค่าสูงกว่ามาก (342 กก/ชม² และ 430กก/ชม²) เมื่อเทียบกับชุดที่มีสารเชื่อมประสานต่ำกว่า (257กก/ชม² และ318 กก/ชม²) แสดงว่าผลกระทบจากปฏิกิริยา Pozzolanic ค่อนข้างน้อย การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดนั้นน่าจะมาจากเหตุผลสองประการ คือ filling effect ผลข้างเคียงของเถ้าลอยในการกระตุ้นให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นจากการเป็น nucleation site นอกเหนือจากการเกิดปฏิกิริยา Hydration ตามปกติ

แต่เมื่อพิจารณาการแทนที่เถ้าลอยด้วยปริมาณมากขึ้นคือ30% ส่วนผสมที่ใช้ ปริมาณสารเชื่อมประสานต่ำกว่า (370 กก/ม²) ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเป็นร้อยละ 73 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ใกล้เคียงกับ ส่วนผสมที่ใช้ ปริมาณสารเชื่อมประสาน (450 กก/ม²)ซึ่งมี ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเป็นร้อยละ 72 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วันโดยค่ากำลังที่แท้จริงของค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันและที่อายุ 28 วันมีค่าสูงกว่ามาก (300 กก/ชม² และ 414กก/ชม²) เมื่อเทียบกับชุดที่มีสารเชื่อมประสานต่ำกว่า (218กก/ชม² และ307 กก/ชม²) ซึ่งอธิบายได้จากเหตุผลเดียวกับกรณีการแทนที่ร้อยละ 15

ผลทดสอบจากการบ่ม ต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ในการศึกษานี้ได้จำลองการบ่มตามที่มีทำจริงในงานก่อสร้างโดยตัวอย่างส่วน บ่มด้วยผ้าขนหนูเปียกรดน้ำ3ครั้งต่อวัน โดยเทียบกับการแช่ตัวอย่างในน้ำ 28วัน ผลพบว่าการบ่มแบบแรกให้กำลังต่ำกว่าแบบหลังเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยความแตกต่างนี้ชัดเจนขึ้นที่อายุ 28วัน (กำลัง 250กก/ชม²:บ่มน้ำ ค่าเฉลี่ย240.9 กก/ชม² (7วัน) 333.96 กก/ชม²(28 วัน); บ่มเปียกสลับแห้ง ค่าเฉลี่ย238.5 กก/ชม² (7วัน) 318.35 กก/ชม²(28 วัน) ขณะที่เมื่อมีกำลังสูงขึ้น ค่าความแตกต่างนี้ชัดเจนมากขึ้น (กำลัง 350กก/ชม²:บ่มน้ำ ค่าเฉลี่ย 350.9 กก/ชม² (7วัน), 429.0 กก/ชม² (28 วัน); บ่มเปียกสลับแห้ง ค่าเฉลี่ย341.1 กก/ชม² (7วัน) 400.0 กก/ชม² (28 วัน)

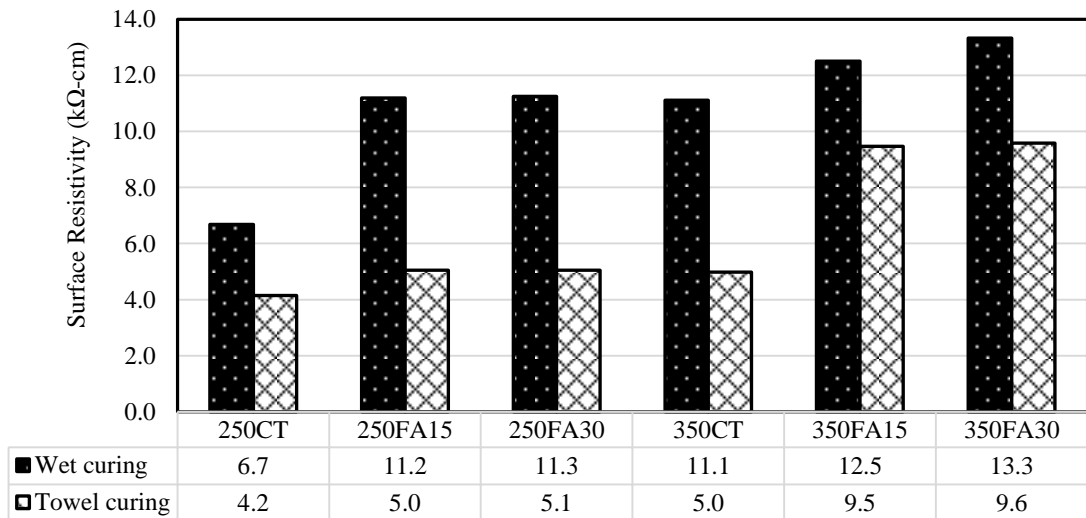
รายละเอียด แสดงในรูปที่ 1



ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตทุกกลุ่มที่อายุ 28 วัน (คอนกรีตควบคุม คอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% และ 30% ในสภาวะการบ่ม 2 แบบ)

ผลการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (Surface Resistivity Test) ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวอาจบ่งชี้ถึงอัตราการกัดกร่อนได้คร่าวๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 (Broomfield, 2007; AASHTO TP95-11) จากการศึกษาตัวอย่างคอนกรีตแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร เมื่อบ่มในสภาวะที่กำหนด 28 วัน ผลการวัดและพิจารณาตามข้อแนะนำข้างต้นพบว่า เมื่อพิจารณาตามขนาดจริงและใช้เกณฑ์ของ AASHTO TP 95-11 ผลที่ได้ต่างกันเล็กน้อย กลุ่มคอนกรีตควบคุมกำลังอัด 250 กก/ ซม² ในสภาวะบ่มเปียก และทุกกลุ่มที่บ่มด้วยผ้าขนหนูมีค่า chloride ion penetration ในระดับสูง (ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว <math>< 9.5 \text{ k}\Omega\text{-cm}</math>) และกลุ่มที่จัดว่ามีค่าปานกลางได้แก่ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่บ่มเปียกและคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยผ้าขนหนู (ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว 9.5-16.5 $\text{k}\Omega\text{cm}$) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าบ่มคอนกรีตด้วยผ้าขนหนูอย่างชัดเจน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งแสดงถึงการแทรกซึมคลอไรด์น้อยลงจากอันเป็นผล

จากการบ่มเปียก เนื่องจากความทึบแน่นของคอนกรีต รวมถึงปฏิกิริยาปอซโซลานิกบางส่วนของเถ้าลอยส่งผลให้ความพรุนในคอนกรีตลดลง มีการซึมผ่านคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลางถึงสูงดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 28 วัน

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเทียบกับอัตราการซึมผ่านคลอไรด์อออน (AASHTO TP95-11)

Chloride Ion Penetration	Surface Resistivity Test	
	100-by-200-mm (4-by-8-in.) Cylinder ($k\Omega$ -cm) a = 1.5	150-by-300-mm (6-by-12-in.) Cylinder ($k\Omega$ -cm) a = 1.5
High	<12	<9.5
Moderate	12–21	9.5–16.5
Low	21–37	16.5–29
Very low	37–254	29–199
Negligible	>254	>199

หมายเหตุ a = Wenner probe tip spacing

ผลการศึกษาความต้านทานความแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test

การทดสอบหาความซึมได้ของคลอไรด์ตาม ASTM C1202 ซึ่งใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ตัดหนา 5 เซนติเมตร ที่ระยะห่างจากผิวด้านบนของตัวอย่าง 5 เซนติเมตร วัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นตัวอย่างในหน่วยคูลอมป์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานกำหนดตามตารางที่ 2 และพบว่าการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำมีอิทธิพลสูงต่อความทึบแน่นของคอนกรีต โดยมีการซึมผ่านคลอไรด์ต่ำกว่าบ่มคอนกรีตด้วยผ้าขนหนูอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องเมื่อเทียบกับผลทดสอบของ Kheaw-on *et al.* (2019) ที่การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำมีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อ่อนในระดับปานกลาง แต่การบ่มด้วยวิธีทิ้งไว้ในอากาศกลับมีค่าซึมผ่านในระดับสูงจากการทดสอบคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.62 ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตปริมาณปูนซีเมนต์สูงที่บ่มน้ำ มีการซึมผ่านคลอไรด์ในระดับปานกลาง ขณะที่คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่าบ่มน้ำและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำกว่าที่บ่มเปียกรวมถึงคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์สูงและบ่มเปียกมีการซึมผ่านคลอไรด์ในระดับสูง จากผลการศึกษาบ่งชี้ถึงอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมประสานและการบ่มอย่างชัดเจน

ตารางที่ 2 ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตและความต้านทานการแทรกซึมผ่านคลอไรด์อ่อน (ASTM C1202)

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very Low
<100	Negligible

ผลศึกษาการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หลังจากบ่มด้วยน้ำ 28 วัน แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตทุกชนิดอยู่ในระดับเดียวกัน (order) ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คอนกรีตกำลัง 250, คอนกรีตกำลัง 250 ผสมเถ้าลอย 15%, คอนกรีตกำลัง 250 ผสมเถ้าลอย 30%, คอนกรีต กำลัง 350, คอนกรีตกำลัง 350 ผสมเถ้าลอย

15%, คอนกรีตกำลัง 350 ผสมเถ้าลอย 30% มีค่า Coefficient of Permeability ($\times 10^{-12}$ m/s) คือ 9.08, 7.66, 6.83, 4.78, 4.54 และ 4.13 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของสารเชื่อมประสานและการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคที่ดีขึ้น โดยคอนกรีตกำลังสูงใช้สารเชื่อมประสานสูงและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทั้งสองระดับกำลังมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้สารเชื่อมประสานต่ำ

จากบทความนี้เป็นแนวทางให้วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องมองเห็นได้ว่า ส่วนผสม การทำงานและระดับกำลังมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับคลอไรด์อย่างไร

เอกสารอ้างอิง

มนตรี นิธิกุล. (2542) ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะกับคุณสมบัติที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท

วิโรจน์ คงแก้ว. (2542). ผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อคุณสมบัติของวิลิกาฟุ่มคอนกรีต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท

Broomfield, J. P., Rodriguez, J., Ortega, L. M., & Garcia, A. M. (1993). Corrosion rate measurement and life prediction for reinforced concrete structures. Proc. Structural Faults and Repair-93, University of Edinburgh, Scotland, 2, 155-164.

Costa, A., & Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration. Materials and Structures, 32(5), 354-359.

De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research, 41(3), 279-291.

Kheaw-on, T., N. Khomwan and S. Sujjavanich. (2018). The effect of crystalline coatings defects of steel-corrosion in reinforced concrete. Journal of Thailand Concrete Association 6 (2): 49-57.

Kheaw-on, T., N. Khomwan and S. Sujjavanich. (2019). Using crystalline coating materials for corrosion prevention of reinforced concrete and chloride resistance of concrete on curing condition, pp. MAT-011. In Annual concrete conference 14. 6-8 March 2019, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand.

Khomwan, N., and P. Mungsantisuk. (2019). Startup Thailand: A New Innovative Sacrificial Anode for Reinforced Concrete Structures. Engineering Journal 23 (4): 235-261. Broomfield, J. P.,

Langford, P., & Broomfield, J. (1987). Monitoring the corrosion of reinforcing steel. Construction Repair, 1(2).

Neville, A. M. (1996). Properties of Concrete (Fourth and Final Edition ed.). New York, USA.: John Wiley and Sons, Inc.

Nithikul, M., Sujjavanich, S., & Suwanvitaya, P. (1999). Effect of Fly Ash Size mid Curing on Concrete Strength. IABSE REPORTS, 151-156.

Pang, X. (2015, October). The effect of water-to-cement ratio on the hydration kinetics of Portland cement at different temperatures. In The 14th International Congress on the Chemistry of Cement, October (pp. 13-16).

Rodriguez, J., Ortega, L. M., & Garcia, A. M. (1993). Corrosion rate measurement and life prediction for reinforced concrete structures. Proc. Structural Faults and Repair-93, University of Edinburgh, Scotland, 2, 155-164.

Sujavanich, S., Sida, V., & Suwanvitaya, P. (2005). Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer. *ACI materials journal*, 102(3), 177.

Sujavanich, S., Suwanvitaya, P., Chaysuwan, D., & Heness, G. (2017). Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 830-837.

Watanabe, H., & Koga, H. (2006). General information on deterioration of existing concrete structures and recent research topics in PWRI. In *Proceedings of the International workshop on Life cycle management of coastal concrete structures*, Nagaoka, Japan (pp. 43-54).