

ผลกระทบของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวลต่อความต้านทานในการซึมผ่านของคลอไรด์ของซีเมนต์มอร์ตาร์: กรณีศึกษาของเถ้าแอนทราไซท์ บิทูมินัส แกลบ เปลือกยูคาลิปตัสแช่ในน้ำทะเลจำลอง

ปริญญาภัย จิตรดา^{1,2}, บุรฉัตร ฉัตรวีระ³

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

และ ณีฎฐ์ มากุล⁴

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 แจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาคความทนทานภายใต้การกระทำของคลอไรด์ในรูปของการซึมผ่านของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล (Combined Coal-Biomass Ash, CBA) จากโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของถ่านหินแอนทราไซท์ (Anthracite) : ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) : แกลบ (Rice husk) : เปลือกยูคาลิปตัส (Eucalyptus bark) โดยมวล ที่อัตราส่วนร้อยละ 50.9 : 36.8 : 7.4 : 4.9 (ชนิด A), 77 : 0 : 16.9 : 6.1 (ชนิด B) และ 0 : 0 : 60 : 40 (ชนิด C) นำเถ้าดังกล่าวมาผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลิสจนมีพื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดแบบเบลนเท่ากับ 6260, 6700 และ 6300 ซม.²/ก. ตามลำดับ และใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนร้อยละ 15, 30 และ 45 ศึกษาการกระทำของคลอไรด์คือ การแช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 0.45 โมลต่อลิตร (mol/L) และโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) เท่ากับ 0.03 โมลต่อลิตร (mol/L) โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p) ของมอร์ตาร์เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ทำการเปรียบเทียบการซึมผ่านกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์ จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้า CBA เพิ่มขึ้น โดยที่เถ้าชนิด C มีแนวโน้มปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์น้อยกว่าเถ้าชนิด A และ B ที่ทุกอัตราส่วนการแทนที่และที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้า CBA ร้อยละ 30 มีปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยกว่าอัตราส่วนการแทนที่อื่น

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน / เถ้าชีวมวล / ซีเมนต์มอร์ตาร์ / ความทนทาน / คลอไรด์และซัลเฟต / น้ำทะเลสังเคราะห์

* Corresponding author : E-mail : cburacha@engr.tu.ac.th

1 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 รองศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

4 อาจารย์ ดร. สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Effect of Combined Coal-Biomass Ash on the Chloride Penetration Resistance of Mortar Cement: A Case Study of Different Anthracite, Bituminous, Rice Husk and Eucalyptus Ash Exposed to Synthetic Seawater

Prinyamai Jidrada^{1,2}, Burachat Chatveera^{3*}

Thammasat University Rangsit Campus, Khlong 1, Khlong Luang, Prathum Thani, 12121

Mahanakorn University of Technology, Nong Chok, Bangkok, Thailand 10530

and Natt Makul⁴

Phranakhon Rajabhat University 9 Changwattana Road, Bangkok Bangkok 10220

Abstract

This article presents the study results of durability of chloride attack in chloride penetration of mortar mixed with (Combined Coal-Biomass Ash, CBA) obtaining from thermal power plants at which have been burnt with fuel with specific proportions of anthracite : bituminous : Rice husk : eucalyptus bark by mass percent as follows: 50.9 : 36.8 : 7.4 : 4.9 (assigned as Type A), 77 : 0 : 16.9 : 6.1 (assigned as Type B) and 0 : 0 : 60 : 40 (assigned as Type C). The as-received CBA was ground by a Los angles grinding machine until having specific surface areas in term of Blaine fineness equal to 6260, 6700 and 6300 cm²/g, respectively. It was then partially replaced by mass in Type 1 Portland cement at percentage replacements of 15%, 30% and 45%. A case study of chloride attack was the immersion in synthetic seawater prepared with a concentration of 0.45 mol/L chloride and a 0.03 mol/L sodium sulfate (Na₂SO₄). The water-powder by mass ratios (w/p) of 0.45, 0.55 and 0.65 were controlled and also compared to chloride-resistant Portland cement. Test results, it was indicated that the chloride penetration of mortars mixed with CBA tends decreasingly when increasing the amount of CBA. Mortars containing Type C ash has lower chloride penetration than those of types A and B ash mortars. Further at a 30% replacement of every ash, mortars have also lower than those of other replacements.

Keywords : Coal ash / Biomass ash / Mortar cement / Durability / Chloride / Synthetic seawater.

* Corresponding author : E-mail : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Doctoral candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

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

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

⁴ Lecturer, Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.

1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีของเหลือทิ้งประเภทเจ้าชีวมวล (Biomass) อาทิเช่น แกลบ เปลือกไม้ ปาล์ม และชานอ้อย ปริมาณมากในแต่ละปี เป็นผลให้มีการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานความร้อน นอกเหนือจากการนำของเหลือทิ้งกลับไปใช้ในการเกษตร ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลจึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาดเล็กและกลางซึ่งกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่เชื้อเพลิงดังกล่าวจัดเป็นเชื้อเพลิงสะอาด หาได้ง่ายและมีราคาถูกส่งผลให้บางช่วงฤดูกาลปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เพียงพอต่อความต้องการจึงมีราคาเพิ่มสูงขึ้น จากสาเหตุดังกล่าวทำให้โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาดกลางหลายแห่งต้องปรับเปลี่ยนสูตรเชื้อเพลิง โดยนำถ่านหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส จากต่างประเทศมาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับชีวมวลในประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาและรักษากำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าไว้ ถ้าจากการเผาไหม้ที่เกิดจากส่วนผสมของถ่านหิน-ถ่านชีวมวลรูปแบบใหม่ซึ่งในที่นี้จะถูกเรียกว่า ถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวล (Combined Coal-biomass Ashes, CBA)

ปัจจุบันถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวลมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี โดยจากข้อมูลจากการสำรวจของ [1-3] พบว่า โรงผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนใช้ระบบเผาไหม้แบบ Fluidized bed combustion (FBC) ที่อุณหภูมิเผาประมาณ 850 องศาเซลเซียส โดยใช้เชื้อเพลิงร่วม 4 ชนิดคือ ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) แกลบ (Rice Husk) และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark) โดยจะเกิดฝุ่นถ่านลอยปะปนไปกับไอความร้อน เมื่อผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิลงอย่างกะทันหันทำให้ถ่านที่ได้จับตัวรวมกัน จนมีขนาดประมาณ 1 - 150 ไมครอน แล้วถูกดักด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator, ESP) จากนั้นจึงรวบรวมเก็บในไซโลชั่วคราว โดยจากการสำรวจแหล่ง ถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวลที่เกิดขึ้นในปริมาณ 800 ตันต่อวัน จากนั้นจะถูกนำไปใช้ถมที่เพียงอย่างเดียว เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ในการใช้ถ่านดังกล่าวกับงานประเภท ดังนั้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาชุมชนข้างเคียงอันเนื่องมาจากการจัดเก็บในระยะ

ยาวจึงต้องสร้างองค์ความรู้ทางเลือกใหม่ซึ่งอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีศักยภาพในตัวเองในการใช้งานนี้ได้เป็นอย่างดี เช่น การใช้ถ่านหินลิกไนท์ หรือถ่านแกลบที่ปัจจุบันถูกนำไปใช้เป็นวัสดุปอชโซลานทดแทนปูนซีเมนต์มากขึ้น นอกจากจะเป็นการจัดการของเสียอย่างครบวงจร และมีความยั่งยืน (Sustainable Management) แล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตทั้งในการผลิตกระแสไฟฟ้า คอนกรีต และปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นตามไปด้วย เช่น เพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อม [4] ลดปัญหาการแตกร้าวและอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5-7] เป็นต้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาศักยภาพของถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปอชโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ในด้านของความทนทานภายใต้การกระทำของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ซึ่งโดยปกติโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเลมักเกิดการกัดกร่อนของคอนกรีตอันเนื่องมาจากซัลเฟตและโซเดียมคลอไรด์ เป็นผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างสั้นกว่าโครงสร้างทั่วไป ทั้งนี้สาเหตุหลักของการกระทำดังกล่าวมาจาก ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในคอนกรีต หากสามารถลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในคอนกรีตลงได้ส่งผลช่วยลดความรุนแรงลงได้ ซึ่งวิธีการลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ การใช้สารปอชโซลานจำพวกถ่านทดแทนที่ปูนซีเมนต์ อาทิเช่น ถ่านลอยและชีวมวลนั่นเอง [8,9]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

ถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวลมีด้วยกันสามชนิดได้จากวัตถุดิบซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นและความต่อเนื่องของการใช้งานดีในปัจจุบันมีความแตกต่างกันในอัตราส่วนของเชื้อเพลิง ดังแสดงได้ในตารางที่ 1 ถ่านร่วมถ่านหิน-ชีวมวลถูกนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบบอลสแอลล์เจลิสเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จนมีความละเอียดโดยค้ำตะแกรงร่อน (Sieve) เบอร์ 325 (0.045 มม) เท่ากับร้อยละ 19, 20 และ 22 หรือความละเอียดแบบเบลนเท่ากับ 6260, 6700 และ 6300 ซม.²/ก. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Type 1 PC) ที่ใช้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 [10] ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์ (Chloride-resistant Port-

land Cement, ChrPC) ในขณะที่ยาน้ำและน้ำที่ใช้เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33 [11] และ ASTM C94 [12] ตามลำดับ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงโดยมวล

เถ้าร่วนถ่าน หิน-ชีวมวล	ถ่านหิน		ชีวมวล		ชีวมวลต่อถ่านหิน
	แอนทราไซต์	บิทูมินัส	แกลบ	เปลือกยูคาลิปตัส	
A	50.9	36.3	7.40	4.9	7 : 1
B	77.0	0.0	16.9	6.1	15 : 1
C	0.0	0.0	60.0	40	100 : 0

2.2 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

สัญลักษณ์	ชนิดของ CBA	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p)	ปริมาณ CBA (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ (กก/ม ³)	CBA (กก/ม ³)	ทราย (กก/ม ³)	น้ำ (กก/ม ³)
Type 1 PC1_w/p0.45*	-	0.45	0	333	0	1946	150
Type 1 PC1_w/p0.55	-	0.55	0	364	0	1788	200
Type 1 PC1_w/p0.65	-	0.65	0	385	0	1637	250
ChrPC_w/p0.45**	-	0.45	0	333	0	1946	150
ChrPC_w/p0.55	-	0.55	0	364	0	1788	200
ChrPC_w/p0.65	-	0.65	0	385	0	1637	250
A15%_w/p0.45	A	0.45	15	283	50	1946	150
A30%_w/p0.45			30	233	100	1946	150
A45%_w/p0.45			45	183	150	1946	150
A15%_w/p0.55		0.55	15	309	55	1788	200
A30%_w/p0.55			30	255	109	1788	200
A45%_w/p0.55			45	200	164	1788	200
A15%_w/p0.65		0.65	15	327	58	1637	250
A30%_w/p0.65			30	270	116	1637	250
A45%_w/p0.65			45	212	173	1637	250
B15%_w/p0.45	B	0.45	15	283	50	1946	150
B30%_w/p0.45			30	233	100	1946	150
B45%_w/p0.45			45	183	150	1946	150
B15%_w/p0.55		0.55	15	309	55	1788	200
B30%_w/p0.55			30	255	109	1788	200
B45%_w/p0.55			45	200	164	1788	200
B15%_w/p0.65		0.65	15	327	58	1637	250
B30%_w/p0.65			30	270	116	1637	250
B45%_w/p0.65			45	212	173	1637	250
C15%_w/p0.45	C	0.45	15	283	50	1946	150
C30%_w/p0.45			30	233	100	1946	150
C45%_w/p0.45			45	183	150	1946	150
C15%_w/p0.55		0.55	15	309	55	1788	200
C30%_w/p0.55			30	255	109	1788	200
C45%_w/p0.55			45	200	164	1788	200
C15%_w/p0.65		0.65	15	327	58	1637	250
C30%_w/p0.65			30	270	116	1637	250
C45%_w/p0.65			45	212	173	1637	250

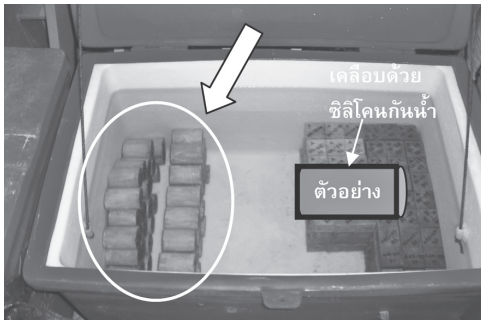
หมายเหตุ *Type 1 PC1_w/p0.45, Type 1 PC1_w/p0.55 และ Type 1 PC1_w/p0.65 คือมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนเป็นส่วนประกอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

**ChrPC_w/p0.45, ChrPC_w/p0.55 และ ChrPC_w/p0.65 คือมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์เป็นส่วนประกอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

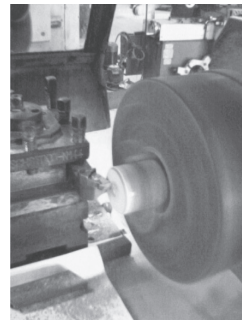
2.3 วิธีการศึกษา

ตัวอย่างมอร์ตาร์ด้าร์ควบคุมและมอร์ตาร์ด้าร์ผสมเถ้าร่วม ถ่านหิน-ชีวมวลหลังทำการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน ถูกนำมาแช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย น้ำประปา สารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.45 และ 0.03 โมลต่อลิตร (mol/L) ดังแสดงตัวอย่างที่แช่ในถังพลาสติกในรูปที่ 1(ก) ทั้งนี้ใน ส่วนของด้านข้างของทุกตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยซิลิโคน

กันน้ำเพื่อป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน ทำการ แช่จนกระทั่งเป็นระยะเวลา 30, 90, 180 และ 360 วัน ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดแล้ว นำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ด้าร์ ขึ้นจากถังและปล่อยให้แห้งให้ผิวแห้ง หลังจากนั้นทำการ สกัดเอาผงปูนโดยการกลึงเก็บชิ้นตัวอย่างที่ระยะความลึก เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 ซม. รูปที่ 1(ข) โดยเก็บผงปูน แต่ละชั้นความลึกเป็นปริมาณ 10 ก. จากนั้นนำผง ปูนที่ได้ไปทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ต่อไป



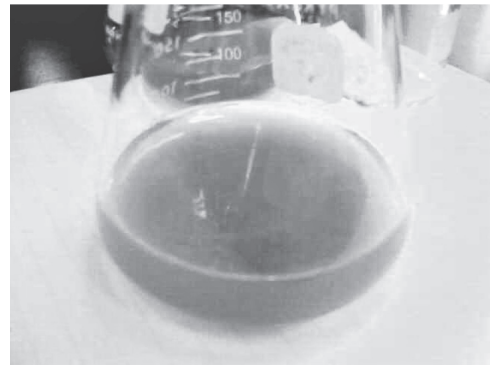
(ก) การแช่ตัวอย่างในสารละลาย



(ข) การกลึงเก็บผงตัวอย่าง



(ค) การไทเตรตน้ำตัวอย่าง



(ง) ตะกอนสีส้มแดงหลังไทเตรตน้ำตัวอย่างที่จุดยุติ

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ในมอร์ตาร์ด้าร์

การทดสอบหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ใน มอร์ตาร์ด้าร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C114 [13] ร่วมกับ ASTM C1152 [14] (Agentometric Metric Method) (มาตรฐาน 450-C1) โดยนำผงที่ได้ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 250 มล. จำนวน 2 บีกเกอร์ ซึ่งผงปูนซีเมนต์จำนวน 5 กรัม ลงในแต่ละบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาตร

100 มล. แล้วนำผงปูนผสมน้ำที่เตรียมไว้ไปต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่คาร์บอนเนต (CO_3^{2-}) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นเวลา 5 นาที หลังจากปล่อยให้แห้งให้เย็นแล้ว ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำน้ำที่ได้จากการ กรองมาทำการปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรด้วยน้ำ กลั่นบริสุทธิ์ให้ได้ 100 มล. แล้วนำน้ำตัวอย่างที่กรองได้

มาปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ให้มีค่าระหว่าง 7-10 จากนั้นจึงนำมาใส่ในขวดรูปชมพู่ โดยแบ่งเป็น 2 ขวดๆ ละ 50 มล. แล้วเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) จำนวน 1 มล. เพื่อกำจัดซิลิไฟด์หรือไฮโอซิลเฟตในน้ำตัวอย่างแล้วเขย่าให้เข้ากันทั้ง 2 ขวด จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต (K₂CrO₄) จำนวน 1 มล. แล้วเขย่าให้เข้ากัน ทำการไทเตรทน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้กับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO₃) จนถึงจุดยุติ ดังแสดงในรูปที่ 1(ค) ซึ่งจะสังเกตเห็นตะกอนสีส้มแดง (รูปที่ 1(ง)) และนำไปเปรียบเทียบกับขวดที่เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) ซึ่งสีที่ได้ต้องเหมือนกัน การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ (มก./ล.) แสดงในสมการที่ (1)

$$Cl^- \text{ (mg/l)} = \frac{[(A-B) \times 0.0141 \times 35450]}{\text{Weight of sample (mg)}} \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้ไทเตรทน้ำตัวอย่าง (ml)

B คือ ซิลเวอร์ไนเตรทที่ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) (ml)

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล

ดังแสดงในตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล พบว่า เถ้าเชื้อเพลิงชนิด A และ

B มีความใกล้เคียงกัน แต่เถ้าเชื้อเพลิงชนิด C มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) สูงกว่าเถ้าสองชนิดแรก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสัดส่วนของถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านหินบิทูมินัส แกลบ เปลือกยูคาลิปตัส ส่วนเถ้าชนิด C มีส่วนประกอบของเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวลที่มีซิลิคอนไดออกไซด์อยู่โดยธรรมชาติ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของชีวมวลต่อถ่านหินซึ่งเถ้าชนิด A และ B มีค่าเท่ากับ 7 : 1 และ 15 : 1 ตามลำดับ ทั้งองค์ประกอบเคมีหลัก (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากในองค์ประกอบของถ่านหินแอนทราไซต์มีองค์ประกอบเหล่านี้คล้ายกัน แต่มีเพียงค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผาไหม้ของเถ้าชนิด B ที่ต่ำกว่าชนิด A เล็กน้อย อันอาจเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิในการเผาประมาณ 850 องศาเซลเซียส ถ่านหินมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จึงเหลือถ่านหินบางส่วนที่ยังไม่เกิดการลุกไหม้

เมื่อทำการเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์พบว่าเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวลทั้งสามชนิดมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่กลับมีค่าสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) ของเถ้าทั้งสามชนิดกลับมีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ และสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 (ไม่เกินร้อยละ 6.0) [15] อันอาจส่งผลต่อโครงสร้างภายในของมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้วที่มีโพรงคาบิลลารีที่มีทั้งขนาดและปริมาณที่ลดลงส่งผลให้ออกาสที่ไอออนของคลอไรด์ที่จะซึมผ่านเข้าสู่ภายในลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมี สารประกอบหลัก และสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ชนิดทนคลอไรด์ และเต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล

	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1		ปูนซีเมนต์เต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล		ปูนซีเมนต์ชนิดทนคลอไรด์	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์	ปูนซีเมนต์เต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล	ปูนซีเมนต์เต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล	ปูนซีเมนต์เต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล	ปูนซีเมนต์เต้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล): ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						
SiO ₂	20.86 ± 0.15	23.51 ± 0.11	50.39 ± 1.20	50.39 ± 1.86	50.39 ± 1.86	87.39 ± 4.54
Al ₂ O ₃	5.06 ± 0.04	9.24 ± 0.09	19.79 ± 0.08	19.69 ± 1.10	19.69 ± 1.10	1.19 ± 0.81
Fe ₂ O ₃	3.37 ± 0.06	6.11 ± 0.10	7.94 ± 0.02	7.34 ± 0.85	7.34 ± 0.85	2.64 ± 0.22
CaO	65.38 ± 0.20	53.14 ± 0.50	17.38 ± 0.07	17.28 ± 0.11	17.28 ± 0.11	5.48 ± 0.46
MgO	1.38 ± 0.02	1.62 ± 0.14	0.57 ± 0.06	0.87 ± 0.09	0.87 ± 0.09	0.47 ± 0.13
K ₂ O	0.35 ± 0.01	0.76 ± 0.11	2.92 ± 0.07	3.02 ± 0.08	3.02 ± 0.08	2.32 ± 0.99
Na ₂ O	0.03 ± 0.01	0.57 ± 0.09	0.22 ± 0.02	0.12 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.02 ± 0.01
SO ₃	2.48 ± 0.10	2.11 ± 0.06	0.99 ± 0.10	0.71 ± 0.20	0.71 ± 0.20	0.32 ± 0.10
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกาการเผาไหม้ (ร้อยละ) สารประกอบหลัก (ร้อยละ) ^a	0.09 ± 0.03	0.54 ± 0.08	14.42 ± 2.53	12.32 ± 3.14	12.32 ± 3.14	7.45 ± 1.02
C ₃ S	68.76 ± 0.45	-	-	-	-	-
C ₂ S	7.94 ± 0.69	-	-	-	-	-
C ₃ A	7.71 ± 0.01	-	-	-	-	-
C ₄ AF	10.26 ± 0.18	-	-	-	-	-
สมบัติทางกายภาพ						
ความกว้างจำเพาะ	3.10	2.92	2.39	2.35	2.35	2.19
ความละเอียดแบบเบน (ชม ² /ก)	3600	3270	6260	6700	6700	6300
ตั้งตะแกรงขนาด 45 ไมครอน (ร้อยละ)	3.80	1.10	14.0	11.7	11.7	6.40
ความตั้งการนำ (ร้อยละ)	0.49	0.49	0.53	0.54	0.54	0.50
ดัชนีกำลัง						
ที่ 7 วัน	100	100	86	79	79	78
ที่ 28 วัน	100	100	88	94	94	82

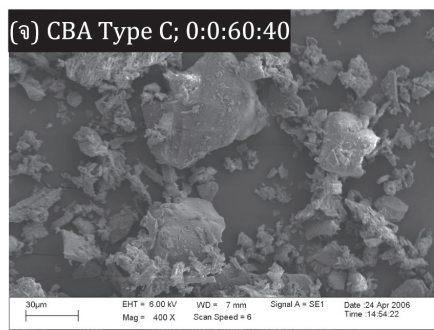
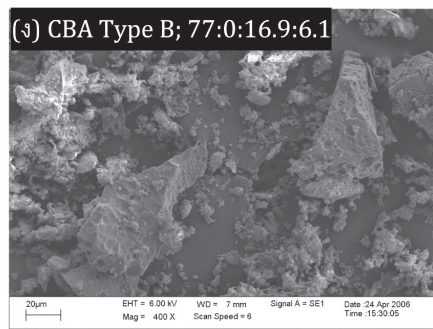
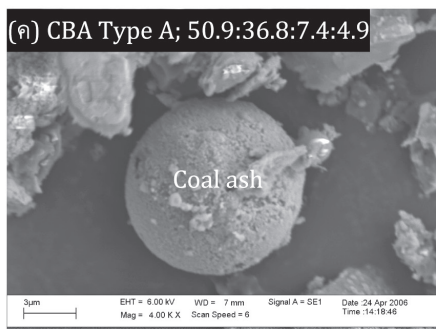
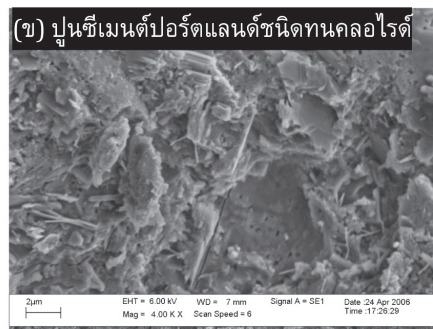
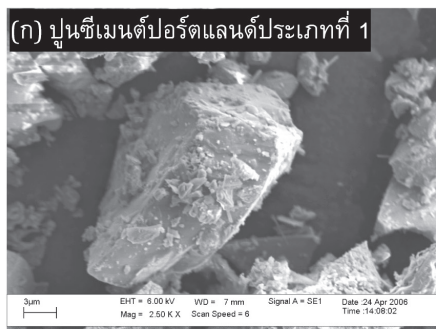
^a Major compound composition were calculated using the Bogue's compound as follows: C₃S = 4.07(CaO) - 7.60(SiO₂) - 6.72(Al₂O₃) - 1.43(Fe₂O₃) - 2.85(SO₃), C₂S = 2.87(SiO₂) - 0.75(C₃S), C₃A = 2.65(Al₂O₃) - 1.69(Fe₂O₃) and C₄AF = 3.04(Fe₂O₃); hereby (Only valid when Al₂O₃/ Fe₂O₃ ≥ 0.64)

จากตารางที่ 2 ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุผลที่ใช้ในการศึกษา พบว่า ขนาดของเถ้าร่วม ถ่านหิน-ชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาจากร้อยละ ค้างตะแกรงเบอร์ 325 หรือขนาด 0.045 มม. มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (รูปที่ 2(ก)) ถึงแม้ว่าค่าความละเอียดโดยวิธีแบบเบลนมีค่าที่สูงกว่า ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงระดับความพรุนที่มีมากในเถ้าทั้งสามชนิด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการบดเถ้าด้วยเครื่องลอสเอลเจลลิสตามมาตรฐาน ASTM C131 [16] เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ทำให้เถ้ามีทั้งความละเอียดที่เพิ่มขึ้นและเถ้ามีขนาดเล็กลงตามลำดับ โดยในการศึกษานี้ได้นำเถ้าที่มีความละเอียดจากการบดเป็น 3 ชั่วโมง มาทำการศึกษา อีกทั้งจากผลดังกล่าวทำให้ความสามารถในการ

พัฒนากำลังอัดในรูปของดัชนีกำลังสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 (สูงกว่าร้อยละ 75 ทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน) [15]

โดยการพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะพบว่า เถ้าทั้งสามชนิดมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภท โดยเถ้าชนิด C มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากที่สุด

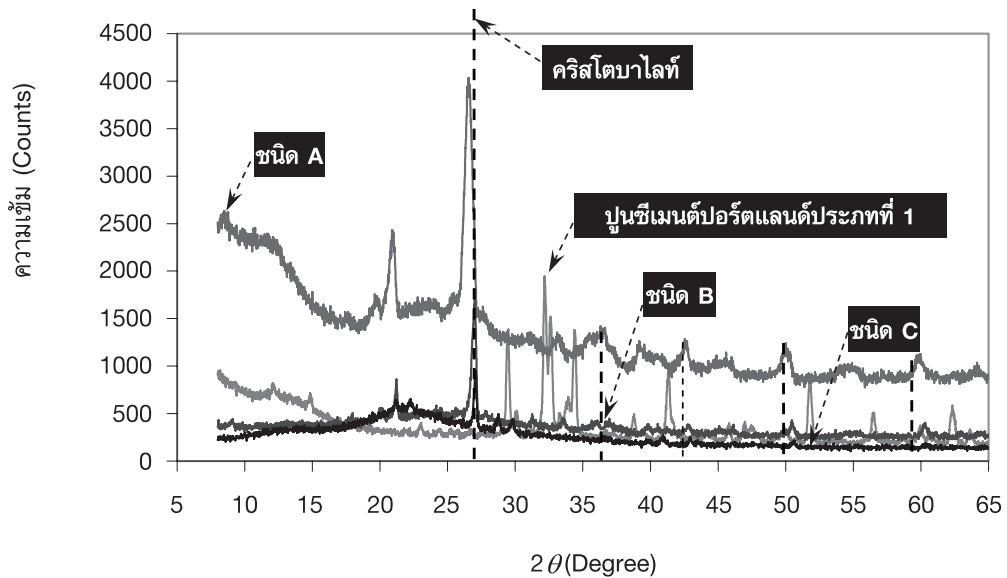
จากรูปแสดงลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล (รูปที่ 2) พบว่า เถ้าทั้งสามชนิดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุมและมีผิวขรุขระ มีเพียงบางส่วนในเถ้าชนิด A เท่านั้นที่ยังคงปรากฏอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม



รูปที่ 2 อนุภาคปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล

รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของผลึกจากการทดสอบ X-ray Diffraction ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ เถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล พบว่า เถ้าทั้งสามชนิดมีรูปแบบแสดงความเข้มในมุมหลักหรือในมุมที่ปรากฏความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับคล้ายคลึงกัน และเมื่อทำการให้

ดัชนีระบุชนิดผลึก (Phase Identification) ได้ผลคือ เฟสหลักยังเป็นคริสโตไบไลท์ (Cristobalite) แต่อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวมีความแตกต่างกันกับเฟสส่วนประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มุมที่ระดับความเข้มสูงสุดและระดับรองลงมาระบุได้ว่าเป็นแคลเซียมซิลิเกต ($C_{(2,3)}S$)



รูปที่ 3 รูปแบบของผลึกจากการทดสอบ X-ray diffraction ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ เถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล

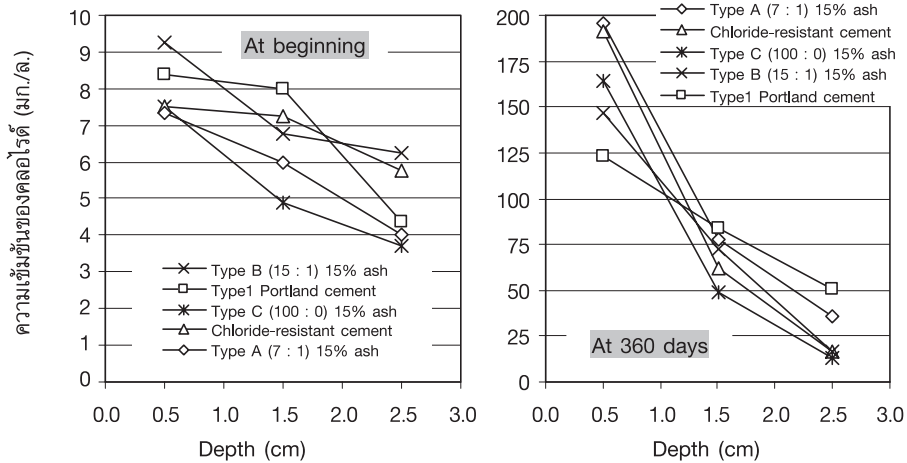
3.2 ความทนทานต่อการกระทำของคลอไรด์ร่วมกับซัลเฟต

3.2.1 ผลของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล

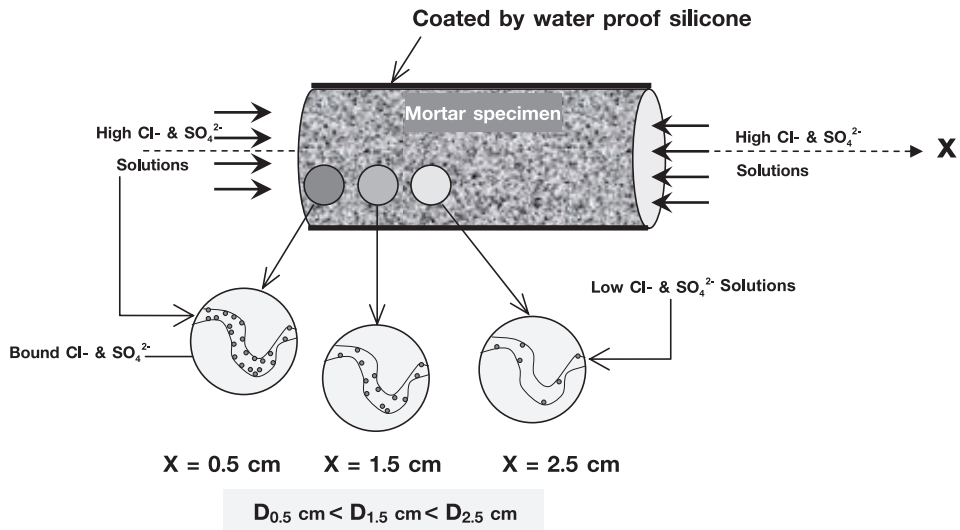
ความทนทานต่อการกระทำของคลอไรด์ร่วมกับซัลเฟตในรูปของปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นที่อายุ 360 วัน เปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่เดิมหลังจากทำการบ่มมอร์ตาร์ด้วยน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยปริมาณดังกล่าวทำการทดสอบที่ระดับความลึกจากผิวหน้าที่ระยะ 0.5, 1.5 และ 2.5 ซม. ตามลำดับแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ที่ระดับความลึกนับจากผิวหน้ามอร์ตาร์ซึ่งสัมผัสกับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้น มอร์ตาร์ทั้งที่ปูนซีเมนต์ล้วนและผสมเถ้าทั้งสามชนิดมีปริมาณการเพิ่มขึ้นของคลอไรด์ลดลงตามความทึบ

น้ำของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ดังเช่น ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ผสมเชื้อเพลิงร่วมชนิด A ที่อายุ 360 วัน มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 198, 83 และ 39 มก./ล. ที่ระดับความลึก 0.5, 1.5 และ 2.5 ซม. ตามลำดับ โดยมีปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคลอไรด์สูงที่บริเวณผิวหน้าตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Darcy [17,18] ดังสมการที่ (2) และรูปที่ 5 โดยปริมาณของคลอไรด์ (Q) ที่เคลื่อนที่จากบริเวณความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ ($P_b - P_a$) จะแปรผกผันกับระยะทางของการเคลื่อนที่ (L)

$$Q = -kA \frac{(P_b - P_a)}{L} \quad (2)$$



รูปที่ 4 ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ระดับความลึก 0.5, 1.5 และ 2.5 ซม. จากผิวหน้า โดยมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p) เท่ากับ 0.55 และมีอัตราส่วน การแทนที่ของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวลในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยมวล ที่อายุ 360 วัน เปรียบเทียบเวลาที่เริ่มแช่



รูปที่ 5 ไดอะแกรมแสดงความเข้มข้นของคลอไรด์และซัลเฟตไอออน โดยความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าลดลงตามระยะความลึกของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น

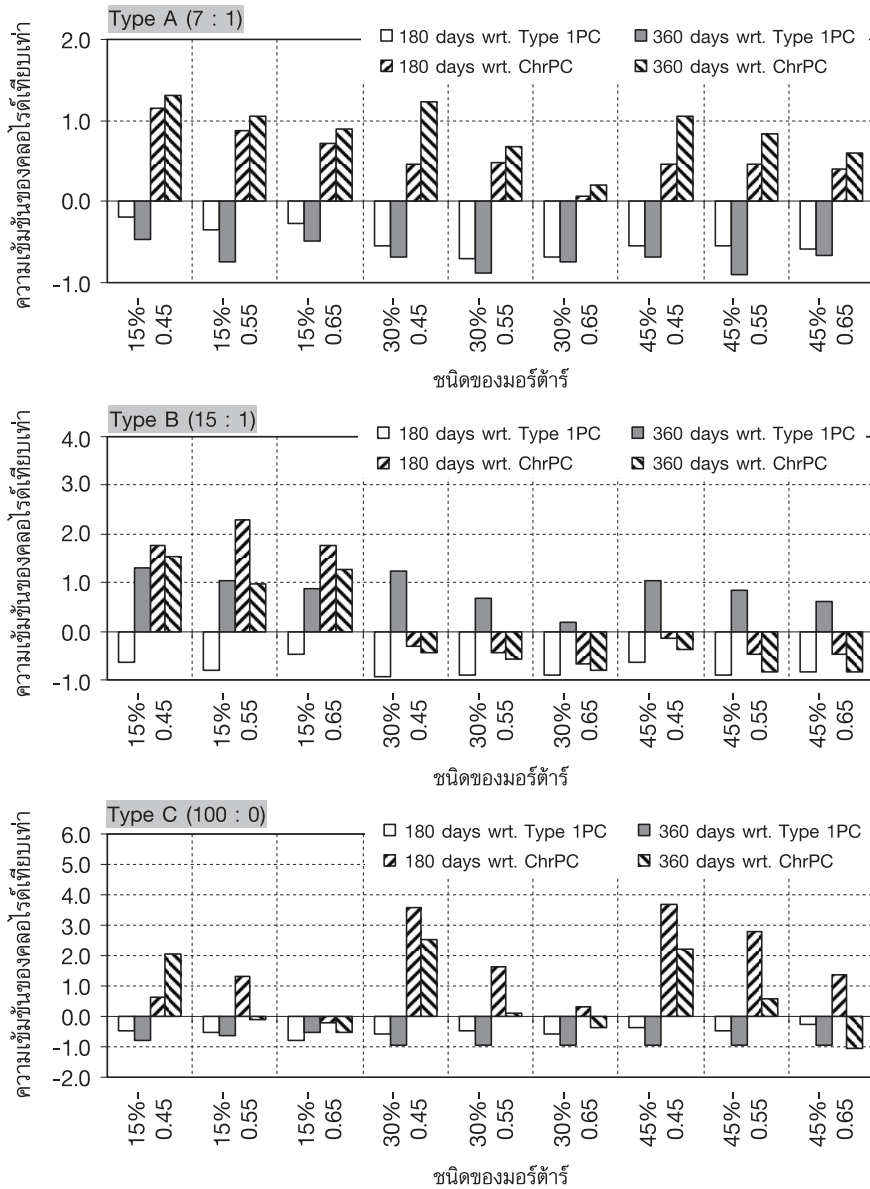
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเข้าชีวมวลทั้งสามชนิดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 แซ่ในน้ำทะเลสังเคราะห์ พบว่าการใช้เข้าชีวมวลร่วมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่หลังจากทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเข้าชนิด C มีค่าต่ำสุดที่ทุกระยะความลึกของตัวอย่าง (รูปที่ 5) ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเข้าชีวมวลร่วมชนิด A มีค่าสูงสุด และสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภททนคลอไรด์ ทั้งนี้เนื่องมาจากเข้าชนิด C ที่ได้รับการเผาวัตถุดิบประเภทแกลบ และ เปลือกยูคาลิปตัส โดยมีอัตราส่วนของแกลบต่อเปลือกยูคาลิปตัสที่ร้อยละ 60 : 40 โดยมวล เมื่อผ่านการบด เมื่อเพิ่มความละเอียดสามารถให้ผลสองประการคือ ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น [19] ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นหรือโพรงคาพิวลารีที่มีปริมาณและขนาดที่ลดลงตามไปด้วย ดังแสดงจากอัตราการเพิ่มขึ้นของคลอไรด์เทียบเท่าของมอร์ตาร์ที่อายุ 180 และ 360 วัน ในรูปที่ 6 จากผลดังกล่าวทำให้ไอออนของคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่ภายในได้น้อยลงตามลำดับ ผลลัพธ์ในส่วนนี้ให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์ผสมเข้าชนิด A และ B แต่ประเด็นที่ช่วยทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ผสมเข้าชนิด C มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับไอออนของคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ที่แพร่จากภายนอกเข้ามาภายในเนื้อมอร์ตาร์ที่ผิวของเข้าชีวมวลล้วนประเภทแกลบ โดยลักษณะเฉพาะเชิงพื้นผิวซิลิกาของเข้าแกลบทำให้เกิดกลไกการดูดซับทางกายภาพ (Physical Chloride Binding) [20,21] ที่มีมากกว่าเข้าสองชนิดแรก

3.2.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p)

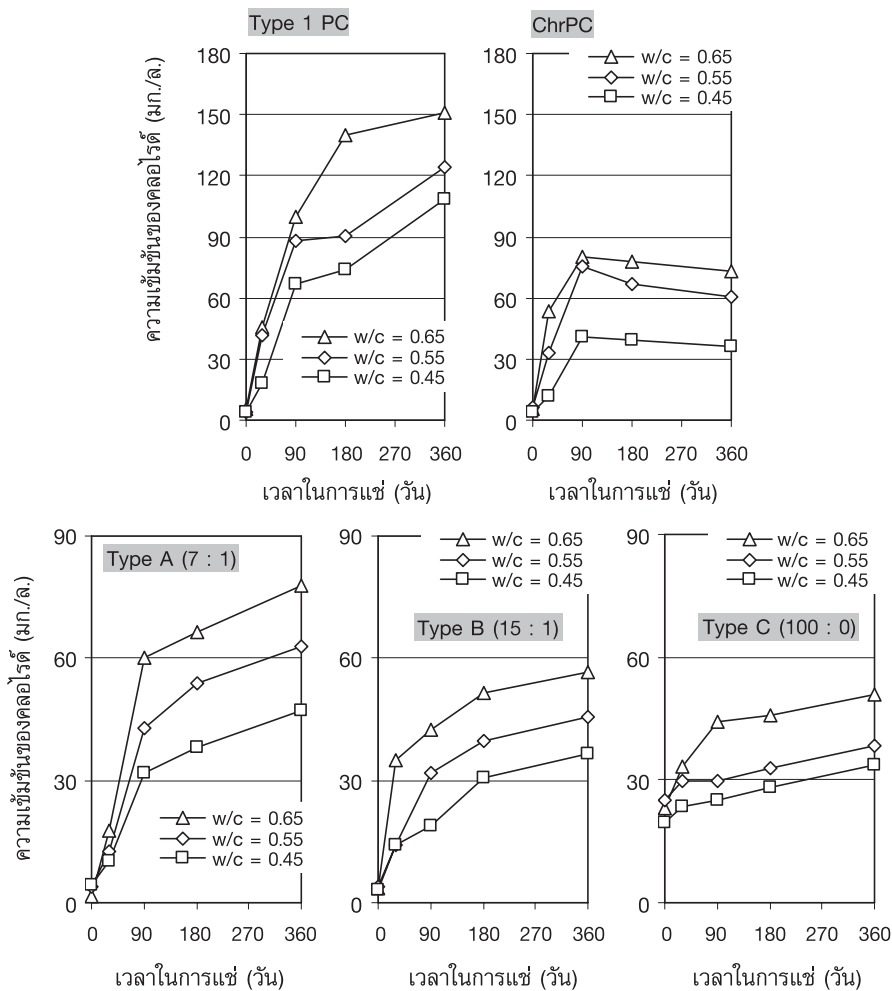
รูปที่ 7 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ที่ระดับความลึก

จากผิวหน้าเท่ากับ 1.5 ซม. และมีอัตราส่วนการแทนที่ของเข้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวลในปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยมวล ที่อายุ 360 วัน พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นทั้งที่เกิดขึ้นในมอร์ตาร์ควบคุมและที่ผสมเข้าทั้งสามชนิดมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ ปริมาณคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p) เพิ่มขึ้นตลอดอายุของการแช่ โดยภาพรวมมอร์ตาร์ควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วน w/p เท่ากับ 0.65 มีค่าสูงกว่าที่ 0.45 และ 0.55 มาก ซึ่งเป็นผลมาจากระดับความพรุนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่มีมากขึ้นในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดทนคลอไรด์กลับให้ความทนทานที่ดีขึ้น โดยเฉลี่ยปริมาณคลอไรด์คงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 33, 48 และ 49 ที่อัตราส่วน w/p เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ที่อายุ 360 วัน ตามความพรุนของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งปริมาณที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและแพร่เข้าสู่ภายในโครงสร้างผ่านโพรงคาพิวลารี

เมื่อพิจารณาในส่วนของมอร์ตาร์ผสมเข้าทั้งสามชนิดพบว่า เข้าชนิด C มีการเพิ่มขึ้นของคลอไรด์ต่ำที่สุดตลอดอายุของการแช่ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น แต่จะสังเกตได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของเข้าชนิด A และ B มีค่าสูงในช่วง 90 วันแรกของการแช่ และมีค่าลดลงตามเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากระดับความหนาแน่นของโครงสร้างและปริมาณความชื้นภายในโพรงคาพิวลารีที่ลดลง แต่เข้าชนิด C มีประสิทธิภาพการกักเก็บคลอไรด์ที่ดีกว่าแม้ว่าในช่วงแรกปริมาณคลอไรด์มีค่าสูงกว่า เนื่องจากระดับความพรุนที่สูงของเข้าชีวมวลล้วนแต่ด้วยการดูดซับทางกายภาพที่สูงกว่าทำให้ในระยะยาวปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้สูงขึ้นในอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับเริ่มต้น โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 72, 54 และ 121 ที่อัตราส่วน w/p เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ที่อายุ 360 วัน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของคลอเลสเตอรอลของคอเลสเตอรอลชนิดต่างๆ ที่อายุ 180 และ 360 วัน ตามชนิดของถักร่วมถั่วเหลือง-ข้าวสาลี



รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ระดับความลึก 1.5 ซม. โดยมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/p) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และมีอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวลในปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยมวล ที่อายุ 360 วัน

4. สรุปผลการศึกษา

4.1 เถ้าเชื้อเพลิงชนิด A ที่มีอัตราส่วนของแอนทราไซท์ (Anthracite) : บิทูมินัส (Bituminous) : แกลบ (Rice Husk) : เปลือกยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark) โดยมวลที่ร้อยละ 50.9:36.8:7.4:4.9 และ B (77:0:16.9:6.1) มีองค์ประกอบเคมีใกล้เคียงกัน แต่เถ้าชนิด C (0:0:60:40) มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงกว่าสองชนิดแรก

4.2 เมื่อนำร่วมถ่านหิน-ชีวมวล ทั้งสามชนิดมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ข้อสรุปคือ

4.2.1 การแช่ในน้ำทะเลจำลอง มอร์ตาร์มีปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคลอไรด์ลดลงเมื่อระดับความลึกนับจากผิวหน้ามอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และระยะเวลาของการแช่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้น

4.2.2 ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชนิด C ที่ทุกอายุการทดสอบมีค่าต่ำสุด ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าชนิด A มีค่าสูงสุด

4.2.3 อัตราส่วนการแทนที่เถ้าเชื้อเพลิงร้อยละ

30 มีปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยกว่าอัตราส่วนการแทนที่อื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนการทดสอบองค์ประกอบเคมีของเถ้าร่วมถ่านหิน-ชีวมวล จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Tangpagasit, J., Songmue, S., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2005, "A Study of Strength Activity Index of Mortar Due to Hydration Reaction, Packing Effect, and Pozzolanic Reaction of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 28 No. 4, pp. 465-476. (In Thai)

2. Shuangzhen W. and Larry B., 2007, "Comprehensive Study of Biomass Fly ash in Concrete: Strength, Microscopy, Kinetics and Durability", *Fuel Processing Technology*, Vol. 88, Issues 11-12, pp. 1165-1170.

3. Stefano Maschio, Gabriele Tonello, Luciano Piani, Erika Furlani, 2011, "Fly and Bottom Ashes from Biomass Combustion as Cement Replacing Components in Mortars Production: Rheological Behavior of the Pastes and Materials and Compression Strength", *Chemosphere*, Vol. 85 No. 4, pp. 666-671.

4. Chalee, W. and Jaturapitakkul, C., 2008, "Threshold Chloride Content of Fly ash Concrete under Marine Environment", *The Journal of Industrial Technology*, Vol. 7, pp. 21-28. (In Thai)

5. Cook, D. J., Pama, R. P., Damer, S. A., 1976, "The Behavior of Concrete and Cement Paste containing Rice Husk Ash", *Proc. Conference on Hydraulic Cement Paste*, University of Sheffield, 268-283.

6. Sugita, S., Shoya, M. and Tokuda, H., 1992, "Evaluation of Pozzolanic Activity of Rice Husk Ash", *Proceedings of the Fourth International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete*, 1, 513-531.

7. Chatveera, B. and Makul, N. 2004, "Effect of Curing Temperature on Mechanical Properties of Cement Mixed with White Rice Husk Ash Paste", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 27, pp. 49-61. (In Thai)

8. Shuangzhen Wang, Emilio Llamazos, Larry Baxter, Fernando Fonseca, 2008, "Durability of Biomass Fly Ash Concrete: Freezing and Thawing and Rapid Chloride Permeability tests", *Fuel*, Vol. 87 No. 3, pp. 359-364.

9. Mehta, P. K., Folliard, K. J., 1995, "Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspects", in: *SP-154*, American Concrete Institute, Detroit, pp. 531-541.

10. American Society for Testing and Materials, 2011, ASTM C150/C150M - 11 Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.01 Cement, Lime, Gypsum.

11. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

12. American Society for Testing and Materials, 2012, ASTM C94/C94M - 12 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

13. American Society for Testing and Materials, 2011, ASTM C114-11b Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, *Annual*

Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.01 Cement, Lime, Gypsum.

14. American Society for Testing and Materials, 2011, ASTM C1152/C1152M - 04e1 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.01 Cement, Lime, Gypsum.

15. American Society for Testing and Materials, 2008, ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

16. American Society for Testing and Materials, 2006, ASTM C131 - 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

17. Yung-Ming S., Ming-Te L. and Ta-Peng C., 2012, "Time/depth Dependent Diffusion and Chemical Reaction Model of Chloride Transportation in Concrete", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, Issue 3, pp. 1114-1122.

18. Erik P. N., Mette R. G., 2003, "Chloride Diffusion in Partially Saturated Cementitious Material", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 1, pp.133-138.

19. Neville, A. M., 1995, *Properties of Concrete*, 4th Ed. English Longman Group, London.

20. Rejini Rajamma, Richard J. Ball, Luís A.C. Tarelho, Geoff C. Allen, João A. Labrincha, and Victor M. Ferreira, 2009, "Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-based Materials", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172, Issues 2-3, pp. 1049-1060.

21. Shuangzhen, W., Larry B. and Fernando F., 2008, "Biomass Fly ash in Concrete: SEM, EDX and ESEM Analysis", *Fuel*, Vol. 87, Issue 3, pp. 372-379.

