

กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้งาย อัดแน่นด้วยตัวเองด้วยการใช้ระบบวัสดุประสานสามชนิดของเถ้าถ่านหิน

ขนาดเดิมและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด

Compressive Strength, Chloride Penetration and Corrosion of Self-Compacting Concrete using Ternary Blend System of Original Fly Ash and Ground Calcium Carbide Residue

สุพรรณ สะดวก (Suphan Saduak)* ดร.สำเริง รักษ์ซ้อน (Dr.Sumrerng Rukzon)^{1**}

ดร.ปริญญ์ จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasit)^{***}

(Received: August 10, 2020 Revised: October 7, 2020; Accepted: October 5, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการศึกษา กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้งายอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete : SCC) ผสมด้วยเถ้าถ่านหินขนาดเดิม (FA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CB) งานวิจัยนี้ใช้ CB, FA และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) ผสมรวมกันเป็นวัสดุประสานสามชนิดสำหรับผลิตคอนกรีตไหลเข้าแบบได้งายอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.48 ในระบบวัสดุประสานสามชนิด ค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตสูงเท่ากับร้อยละ 79-96 ของคอนกรีต CT ที่อายุ 28 วัน การแทรกซึมคลอไรด์และการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตที่ใช้ FA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 10, ใช้ FA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 15 และ ใช้ FA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าสูง เมื่อเทียบกับส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ FA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ABSTRACT

This paper presents a study of the compressive strength, chloride penetration and corrosion of self-compacting concrete (SCC) containing original fly ash (FA) and ground calcium carbide residue (CB). CB, FA and Portland cement type 1 (CT) were used as a ternary blends system in producing self-compacting concrete (SCC). Water to binder ratio (W/B) with constant of 0.48 was used in this work. In ternary blend system, strength activity index of concrete is high at 79-96% in comparison with the CT concrete at 28 days. The chloride penetration and corrosion of concrete with 15% of FA+10% of CB, 15% of FA+15% of CB and 15% of FA+20% of CB is high in comparison with the concrete mixes at 15% of FA by weight of cementitious materials.

คำสำคัญ: คลอไรด์ คอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง วัสดุประสานสามชนิด

Keywords: Chloride, Self-Compacting Concrete, Ternary blend system

¹Corresponding author: sumrerng.ruk@rmutr.ac.th

*นักศึกษาลัทธิธรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

***ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

การออกแบบส่วนผสมและการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตสดนั้น ต้องผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม กล่าวคือ มีการหาส่วนผสมที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการก่อนดำเนินการทดสอบ ส่วนงานภาคสนามนั้น ในบางครั้งต้องอาศัยประสบการณ์ ความชำนาญงาน และการควบคุมงานที่มีคุณภาพ จึงจะได้คอนกรีตที่มีสมบัติตามความต้องการในการใช้งาน เช่น การทำให้คอนกรีตมีความแน่นนั้นต้องอาศัย การกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตไหลเข้าแบบ การจี้คอนกรีตด้วยเครื่องจี้คอนกรีต การเขย่าและการสั่นคอนกรีตด้วยเครื่องสั่นคอนกรีต เป็นต้น วิธีการดังกล่าวต้องอาศัยการวางแผนงานเกี่ยวกับระยะเวลาการดำเนินงานและควบคุมงานที่ดี เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะรับกำลังได้ตามต้องการ โดยบางลักษณะงาน โครงสร้างอาจทำให้คอนกรีตสดแยกออกจากกันได้เนื่องจากการไหลของคอนกรีตที่ไม่คงที่และต่อเนื่อง เหล็กเสริมขัดข้องหนาแน่น พื้นที่ที่มีความแคบ และปัญหาระดับความสูงในการเท ทำให้ไม่สามารถเข้าปฏิบัติงานได้ รวมถึงโครงสร้างชนิดแบบบาง ซึ่งอาจมีผลทำให้การควบคุมคุณภาพของคอนกรีตหรือการ รับกำลังไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์

ปัจจุบันคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง หรือ Self-Compacting Concrete (SCC) ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการใช้งานในแบบรูปการ โครงสร้างที่สลับซับซ้อน มีเหล็กเสริมคอนกรีตที่ค่อนข้างหนาแน่น ขัดข้อง และพื้นที่ที่เข้าไปเทคอนกรีตยาก อีกทั้งในงานที่ไม่สามารถเข้าไปจี้คอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตแน่นได้ โดยทั่วไปคอนกรีต SCC มีความสามารถทำงานได้สูง เนื่องจากมีความสามารถในการเทได้ดี (การไหลตัว) อีกทั้งสามารถให้ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกหรือรับกำลังอัดได้ดีโดยไม่ต้องกระทุ้งหรือจี้เหมือนคอนกรีตทั่วไป ซึ่งสามารถใช้มาตรฐานการไหลแผ่หรือการควบคุมค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตเฉลี่ยวงกลมให้อยู่ในช่วง 650-800 มิลลิเมตร [1]

ที่ผ่านมามีการใช้เถ้าถ่านหินไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ เนื่องจากพบว่าเถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบหลักเคมีซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ [2-7] ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ปัจจุบันการใช้ก๊าซอะเซทิลีนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อาจส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเพิ่มมากขึ้น โรงงานแห่งนี้ที่ผลิตก๊าซอะเซทิลีนมีการทิ้งกากแคลเซียมได้สูงมากถึง 12,000 ตัน/ปี [8] ทั้งเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ คือ วัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมีจำนวนมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่อยู่อาศัยบริเวณข้างเคียง จึงควรจำเป็นต้องหาวิธีการกำจัดหรือพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ งานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้เถ้าถ่านหินหรือกากแคลเซียมคาร์ไบด์อย่างใดอย่างหนึ่งในการผลิตคอนกรีต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการมุ่งเน้นพัฒนาการใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงขนาดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน เพื่อศึกษากำลังอัด การต้านทานคลอไรด์และการต้านทานการกัดกร่อน ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) หากผลที่ได้เป็นไปในทิศทางที่ดี จะเป็นอีกทางเลือกในการลดปริมาณของเหลือใช้จากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม และเป็นข้อมูลเพื่อใช้ศึกษา พัฒนาใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งได้ต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมรวมกับเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน โดยศึกษากำลังอัด การต้านทานคลอไรด์ และการกัดกร่อนของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.14
- 1.2 เถ้าถ่านหินขนาดเดิม (FA) โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระดาษ ตำบลวังขนาย อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดกาญจนบุรี มีปริมาณสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก
- 1.3 กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CB) ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทีลีน จังหวัดสมุทรสาคร ของประเทศไทย โดยบดให้มีความละเอียดมีสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก
- 1.4 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำ มีขนาดความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.82 และความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.63 มีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 [9] และ ASTM C 136 [10]
- 1.5 มวลรวมหยาบ หรือหินใช้ขนาดโตสุดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร มีค่าความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 7.0 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 มีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 [9] และ ASTM C 136 [10]
- 1.6 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการไหลและความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมคอนกรีต
- 1.7 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต ในการศึกษานี้ใช้น้ำประปาในการผสมส่วนผสมของคอนกรีต

2. ส่วนผสมและการบ่มคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานคงที่ (W/B) เท่ากับ 0.48 โดยทุกส่วนผสมใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมความสามารถทำงานได้ การศึกษานี้ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด Viscocrete ของ ซิก้า (Sika) โดยใช้ในปริมาณตามคำแนะนำของผู้ผลิต

การควบคุมค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 650-800 มิลลิเมตร [1] การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดเดิม (FA) ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในระบบวัสดุประสานสามชนิด (Ternary bland system) กล่าวคือ ใช้ FA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CB) ในปริมาณร้อยละ 5 (15FA5CB), ใช้ FA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 10 (15FA10CB), ใช้ FA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 15 (15FA15CB) และใช้ FA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ CB ในปริมาณร้อยละ 20 (15FA20CB) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้ปริมาณของ FA คงที่ เพื่อผลของการเปรียบเทียบ กล่าวคือ นำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และ คอนกรีตที่ใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ภายหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อ นำตัวอย่างคอนกรีตทิ้งไว้ที่ห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุม อุณหภูมิห้องได้ที่ 25 ± 3 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และถอดแบบบ่มตัวอย่างคอนกรีตจนกระทั่งครบอายุการทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนของคอนกรีต ในตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของ ตัวอย่างคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิม (FA) ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน และส่วนผสมในระบบวัสดุประสานสามชนิด (Ternary bland system)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ง่ายและอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC)

Mix	W/B	Mix proportion (kg/m ³)						SP (kg)	Slump (mm)
		Cement	Materials			Coarse	Water		
		(CT)	(FA)	(CB)	aggregate	aggregate			
CT	0.48	650.0	-	-	840	900	312	2.0	660
15FA	0.48	522.5	97.5	-	840	900	312	2.1	665
15FA5CB	0.48	520.0	97.5	32.5	840	900	312	2.8	710
15FA10CB	0.48	487.5	97.5	65.0	840	900	312	4.5	730
15FA15CB	0.48	455.0	97.5	97.5	840	900	312	5.1	745
15FA20CB	0.48	422.5	97.5	130.0	840	900	312	6.5	760

สัญลักษณ์: CT, FA และ CB คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 เถ้าถ่านหินขนาดเดิม และ กากแคลเซียมคาร์ไบไบด์บดตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CT คือ คอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง (คอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ล้วน) สัญลักษณ์ 15FA คือ คอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง เป็นคอนกรีตควบคุมใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และ สัญลักษณ์ 15FAxxCB คือ คอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง เป็นคอนกรีตควบคุมใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 15 ร่วมกับ CB โดยที่ xx คือปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ และ SP คือ สารลดน้ำพิเศษ (SP ใช้ในปริมาณร้อยละของปูนซีเมนต์) CT หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

3. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้การเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐานของ British Standard Institute BS 1881 [11] กล่าวคือ ใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาดเท่ากับ 100×100×100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

4. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

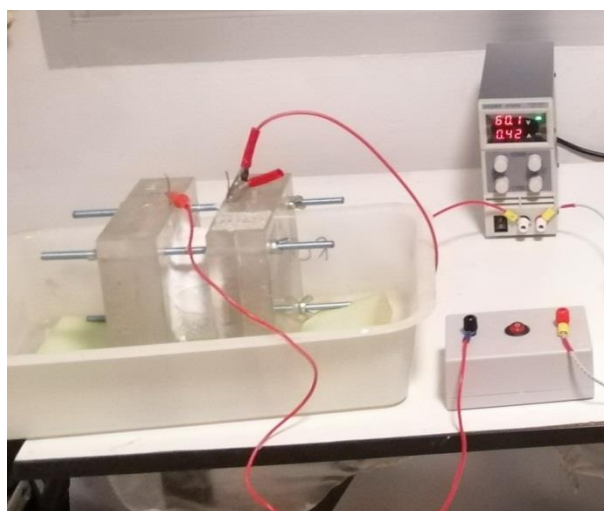
การทดสอบการต้านทานคลอไรด์ใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [12] ดังภาพที่ 4 ทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน การคำนวณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงไว้ในสมการที่ (1) ส่วนในตารางที่ 2 แสดงค่ามาตรฐานการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีต [12]

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

มาตรฐานของ ASTM C1202 [12] กำหนดให้ Q คือ ผลรวมของประจุกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต (Coulombs) I_0 คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้าหน่วยเป็นแอมป์ (Amperes) และ I_t คือ ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตระยะเวลา t นาที ส่วนตารางที่ 2 แสดงค่าเกณฑ์มาตรฐานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [12] การติดตั้งชุดทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ แสดงไว้ในภาพที่ 1

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [12]

ค่า charge passed ของกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลา (Coulombs)	ค่าการซึมผ่าน
มากกว่า 4,000	สูง
ระหว่าง 2,000–4,000	ปานกลาง
ระหว่าง 1,000–2,000	ต่ำ
ระหว่าง 100–1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่ซึมผ่าน



ภาพที่ 1 การติดตั้งชุดทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

5. การทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร การทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง ในงานนี้ใช้วิธีการทดสอบแบบเร่งผลการทดสอบ ซึ่งมีบางงานวิจัยได้ใช้วิธีแบบเร่งสำหรับการทดสอบการกัดกร่อน [1,13] โดยนำเหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มิลลิเมตร เสียบเข้าไปในบริเวณส่วนกลางหรือกึ่งกลางด้านบนของตัวอย่างคอนกรีต โดยพิจารณาระยะหุ้มคอนกรีตให้มวลรวมหยาบสามารถเทได้ ซึ่งวัดจากผิวล่างคอนกรีตถึงปลายล่างเหล็กเสริมเท่ากับประมาณ 2.5 เซนติเมตร หลังถอดแบบตัวอย่าง 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบหาค่าความต้านทานการกัดกร่อนจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ทดสอบการกัดกร่อนโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 12 VDC โดยให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นขั้วลบ และ เหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มิลลิเมตร เป็นขั้วบวก บันทึกผลการทดสอบด้วยการหาค่าระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งบันทึกค่าหน่วยเป็นชั่วโมง (Time of first crack) การทดสอบการกัดกร่อนแสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การติดตั้งชุดทดสอบการกัดกร่อน

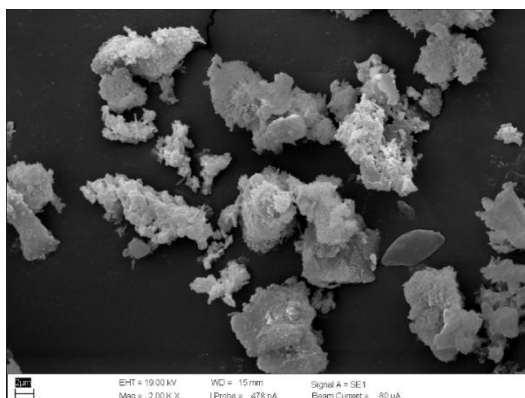
ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดหินขนาดเดิมและกากเคลือบคาร์ไบด์

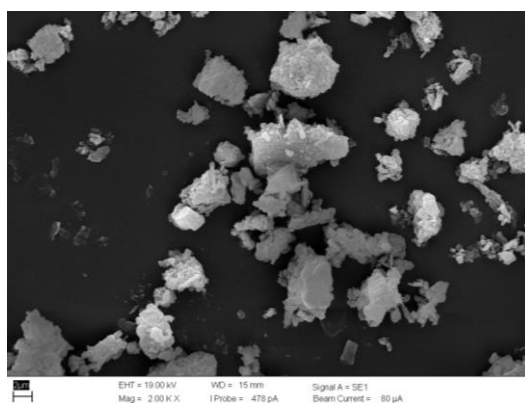
ตารางที่ 3 แสดงสมบัติพื้นฐานของเม็ดหินขนาดเดิมและกากเคลือบคาร์ไบด์ ผลการทดสอบพบว่า เม็ดหินและกากเคลือบคาร์ไบด์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 และ 2.38 และมีความละเอียดด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลนเท่ากับ 4,100 และ 3,850 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ส่วนภาพที่ 3 และ 4 แสดงภาพขยายกำลังสูง (SEM Photograph) ของเม็ดหินขนาดเดิมและกากเคลือบคาร์ไบด์ ซึ่งพบว่า เม็ดหินขนาดเดิมมีรูปร่างลักษณะไม่เท่ากัน เป็นเหลี่ยมเป็นมุมและมีผิวที่ขรุขระ (ภาพที่ 3) สำหรับกากเคลือบคาร์ไบด์ (ภาพที่ 4) มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับเม็ดหินขนาดเดิม กล่าวคือ มีรูปร่างลักษณะไม่เท่ากัน เป็นเหลี่ยมเป็นมุมและมีผิวที่ขรุขระ จะเห็นได้ว่าเมื่อวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะและรูปร่างคล้ายกันเมื่อนำมาผสมรวมกันจะได้ลักษณะและรูปร่างขนาดดังแสดงในภาพที่ 5 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การบดกากเคลือบคาร์ไบด์ ส่งผลให้สามารถลดขนาดของอนุภาคลงคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [2, 7-8]

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของเม็ดหินขนาดเดิม และกากเคลือบคาร์ไบด์

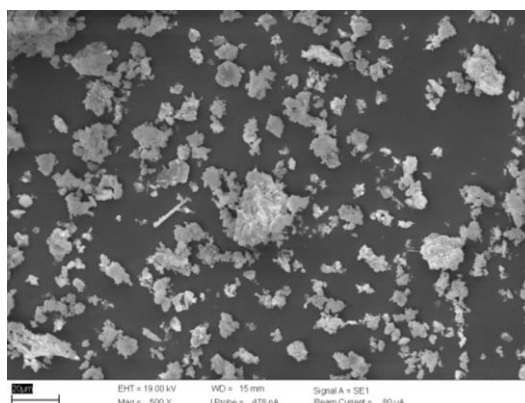
สมบัติทางกายภาพ	เม็ดหินขนาดเดิม (FA)	กากเคลือบคาร์ไบด์ (CB)
Retained on a sieve No. 325 (%)	10-15	10-15
Specific Gravity	2.33	2.38
Blaine Fineness (cm ² /gm) - ตาราง เซนติเมตรต่อกรัม	4,100	3,850



ภาพที่ 3 SEM photograph ของถั่วถ่านหิน FA



ภาพที่ 4 SEM photograph ของกากเคลเซียมคาร์ไบด์ CB



ภาพที่ 5 SEM photograph ของถั่วถ่านหิน FA ผสมรวมกับกากเคลเซียมคาร์ไบด์ CB

2. องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา พบว่า เถ้าถ่านหิน FA ที่มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 77.5 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 ถือว่าจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [14] ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์พบว่ามี CaO ร้อยละ 86.0 เป็นส่วนใหญ่ และผลการทดสอบพบว่า CT มี CaO เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีค่าร้อยละ 72.0 และมี SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 21.0, 1.8 และ 0.75 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของ CT, เถ้าถ่านหิน (FA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CB)

Oxides (%)	CT	FA	CB
SiO_2	21.0	51.0	6.5
Al_2O_3	1.8	24.0	1.6
Fe_2O_3	0.75	2.5	-
CaO	72.0	6.0	86.0
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	77.5	-

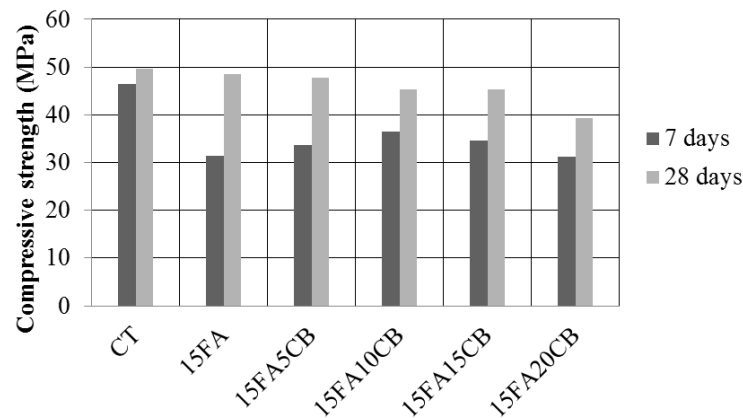
3. ความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

ในตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดส่วนผสมของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.48 และซึ่งใช้ปริมาณน้ำและมวลรวมคงที่ ผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต CT การเพิ่มปริมาณของ CB ในส่วนผสม พบว่า ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสม เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT และ 15FA เนื่องจากรูปร่างและขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความพรุนอยู่ในตัวของอนุภาค (ดูภาพที่ 4 และ 5) อีกทั้งรูปร่างของเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระดาษ ตำบลวังขนาย อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี พบว่า มีความพรุนอยู่ในตัวของอนุภาค (ดูภาพที่ 4) ยกตัวอย่าง เช่น ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด 15FA5CB, 15FA10CB, 15FA15CB และ 15FA20CB มีปริมาณสารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 2.8, 4.5, 5.1 และ 6.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวหรือคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต 15FA ต้องการสารลดน้ำพิเศษในปริมาณเท่ากับ 2.0 และ 2.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ส่งผลให้ค่าไหลแผ่ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด กล่าวคือ อยู่ในช่วง 650-800 มิลลิเมตร [1]

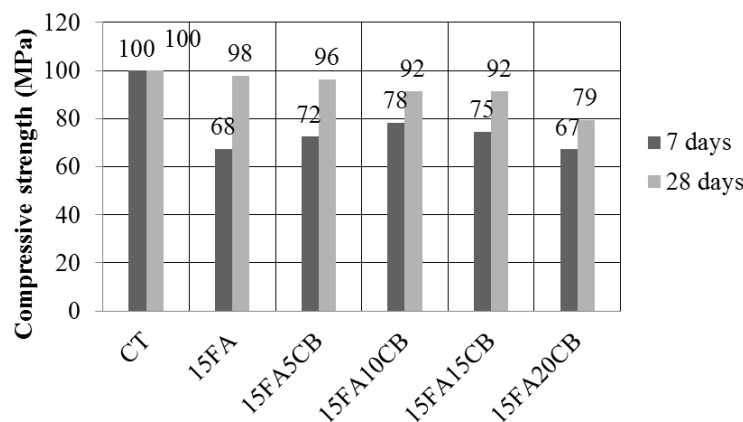
4. กำลังอัดของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

ในภาพที่ 6 และ 7 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง ที่อายุ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าถ่านหิน FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT เนื่องจากเถ้าถ่านหินชุดที่นำมาศึกษาครั้งนี้มีความพรุนในตัวดังแสดงในภาพที่ 3 จึงส่งผลให้ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มและคอนกรีตความพรุนสูงกำลังอัดจึงลดลง กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาตามอายุการทดสอบ กล่าวคือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่าที่อายุ 7 วัน ที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่า คอนกรีต 15FA5CB, 15FA10CB และ 15FA20CB มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า

คอนกรีต CT และ 15FA อย่างไรก็ดีตาม ที่อายุ 7 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และเถ้าถ่านหิน FA ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CB) ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อแทนที่ด้วย CB ถึงในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เนื่องจากผลของปริมาณ SiO_2 ที่มีอยู่ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์จำนวนหนึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [7,15-16] และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์และน้ำในส่วนผสม [7,15-16] ที่อายุ 7 วัน คอนกรีต 15FA มีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 68 ของคอนกรีต CT และคอนกรีต 15FA5CB, 15FA10CB และ 15FA20CB มีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 72, 78, 75 และ 67 ของคอนกรีต CT และคิดเป็นร้อยละ 109, 107, 112 และ 101 ของคอนกรีต 15FA ส่วนที่อายุการทดสอบที่ 28 วัน พบว่า คอนกรีตมีการพัฒนา กำลังอัดขึ้น อย่างไรก็ดีตาม กำลังอัดลดลงในทุกส่วนผสมเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT และ 15FA ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าร้อยละกำลังอัดที่ 79-98 ของคอนกรีต CT ส่วนคอนกรีต 15FA5CB, 15FA10CB และ 15FA20CB มีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 81-98 ของคอนกรีต 15FA



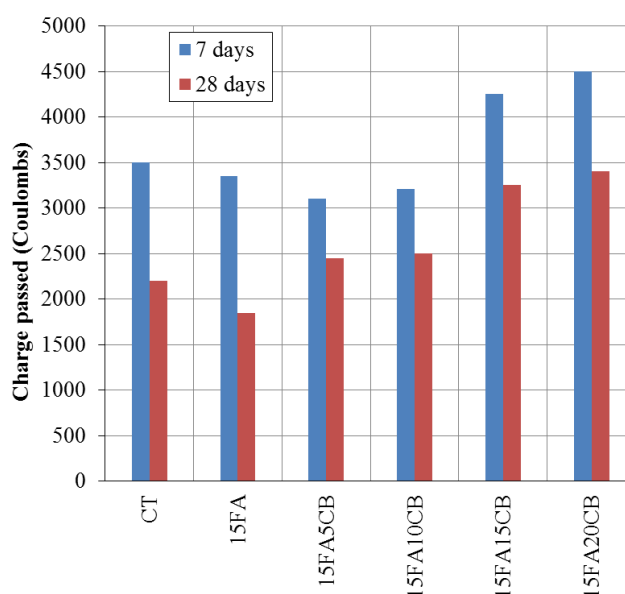
ภาพที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน



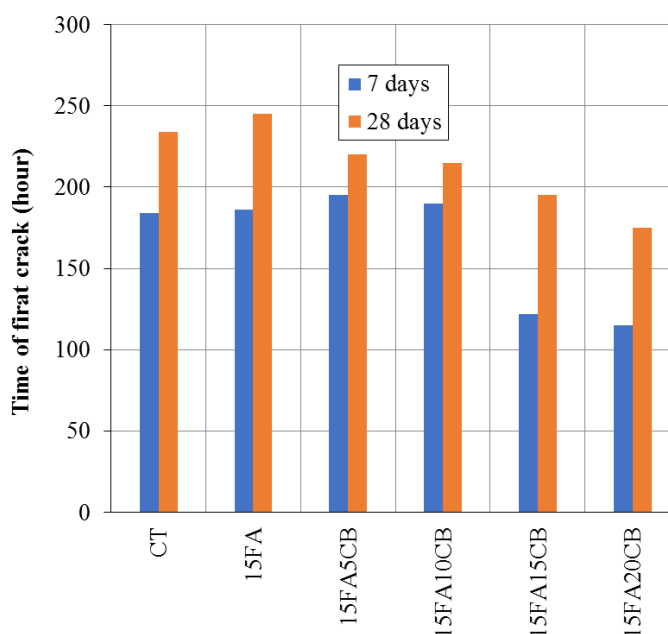
ภาพที่ 7 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน

5. การต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนของคอนกรีตของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง

ในภาพที่ 8 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า การเพิ่มอายุการทดสอบส่งผลให้ลดการแทรกซึมคลอไรด์ เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน [1, 7, 15-16] การใช้เถ้าถ่านหิน FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า ลดการแทรกซึมคลอไรด์เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นผลขององค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 ในเถ้าถ่านหินส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นและลดการแทรกซึมผ่านได้ [1, 15] ที่อายุ 7 วัน คอนกรีต 15FA, 15FA5CB และ 15FA10CB มีแนวโน้มลดการซึมผ่านคลอไรด์เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT ส่วนคอนกรีต 15FA5CB และ 15FA10CB ลดการซึมผ่านคลอไรด์เมื่อเทียบกับคอนกรีต 15FA การแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วย CB เนื่องจากผลของความพรุนของอนุภาคในกากแกลเลียมคาร์ไบด์ ส่วนที่อายุการทดสอบ 28 วัน พบว่า การใช้เถ้าถ่านหิน FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีต CT และการแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วย CB ส่วนในภาพที่ 9 แสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ที่อายุ 7 วัน คอนกรีต 15FA, 15FA5CB และ 15FA10CB มีแนวโน้มต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT อย่างไรก็ตาม การต้านทานการกัดกร่อนลดลงเมื่อใช้ CB ผสมรวมกับ FA ในปริมาณที่มากขึ้น คอนกรีต 15FA5CB และ 15FA10CB ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เมื่อเทียบกับคอนกรีต 15FA ส่วนที่อายุการทดสอบที่ 28 วัน คอนกรีต 15FA ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตในทุกส่วนผสม ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบคลอไรด์แตกต่างกันเพียงหน่วยการวัด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นผลขององค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 ในเถ้าถ่านหินส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นและลดการแทรกซึมผ่านได้



ภาพที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



ภาพที่ 9 การกักกร่อนของคอนกรีต (Time of first crack)

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองโดยใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมผสมรวมกับกากเคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า

ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์ การใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมผสมรวมกับกากเคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุ 28 วัน หรือมีค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 79-96 ของคอนกรีต CT และ ค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 81-98 ของคอนกรีต 15FA

การใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมผสมรวมกับกากเคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากผลของความพรุนของอนุภาคในกากเคลเซียมคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตาม ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงและการต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น เมื่อใช้เถ้าถ่านหิน FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในขณะที่ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำลงเมื่อเพิ่มอายุการทดสอบ ที่อายุ 7 วัน พบว่า ค่าการซึมผ่านคลอไรด์อยู่ในช่วง 3,100-4,500 คูลอมบ์ ซึ่งอยู่ในระดับการซึมผ่านปานกลางถึงสูง ส่วนที่อายุ 28 วัน พบว่า ค่าการซึมผ่านคลอไรด์อยู่ในช่วง 1,800-3,400 คูลอมบ์ ซึ่งอยู่ในระดับการซึมผ่านต่ำถึงปานกลาง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการวิจัยและดำเนินการทดสอบ ศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบ และบริษัท ชีก้า จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารลดน้ำพิเศษ

เอกสารอ้างอิง

1. Rukzon S, Chindaprasirt P. Strength, Chloride penetration and corrosion resistance of ternary blends of Portland Cement self-compacting concrete containing bagasse ash and rice husk-bark ash. *Chiang Mai Journal Science*. 20184; 5(4): 1863-1874.
2. Chindaprasirt P, Rukzon S. Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand. *Materials and Structures* 2015; 48(11): 3771-3777.
3. Chindaprasirt P, Sujumnongtokulb P, Posi P. Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 17: 1612-1626.
4. Chindaprasirt P, Kasemsiri P, Poomsrisa S, Posi P. Fluidized bed coalbark fly ash geopolymer with additives cured at ambient temperature. *International Journal of GEOMATE*. 2019; 16(54): 29-35.
5. Posi P, Kasemsiri P, Lertnimoolchai P, Chindaprasirt P. Effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strengths of high strength-high volume fly ash jointing mortar. *International Journal of GEOMATE*. 2019; 16(54): 36-41.
6. Chindaprasirt P, Chottitanorm C, Rukzon S. Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011; 23(4): 499-503.
7. Rukzon S, Chindaprasirt P, Mahachai R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2009; 16(2): 242-247.
8. Makaratat N, Jaturapitakkul C, Laosamathikul T. Effects of calcium carbide residue-fly ash binder on mechanical properties of concrete. *Journal of Material Civil Engineering*. 2010; 22(11): 1164-1170.
9. ASTM C33. Standard specification concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. 2005; 04.02: 10-20.
10. ASTM C136. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. 2005; 04.02: 88-92.
11. British Standard Institute BS 1881. Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, London. 1983.
12. ASTM C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standard*. 2001; 04.02: 646-651.
13. Chindaprasirt P, Chottitanorm C, Rukzon S. Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011; 23(4): 499-503.
14. ASTM C618, Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. *Annual Book of ASTM Standard*. 2005; 04.02; 323-325.
15. Neville AM. Properties of concrete. 4th and Final Edition, Malaysia: Longman Group Limited. 1995.
16. Rukzon S, Chindaprasirt P. Development of classified fly ash as a pozzolanic material. *Journal of Applied Sciences*. 2008; 1097-1102.