

กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน

Compressive Strength and Water Permeability of Concrete Made from Calcium Carbide Residue and Fly Ash as a Cementitious Material

สุทธินันท์ แอเดียว วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Suttinan Airdeaw Weerachart Tangchirapat and Chai Jaturapitakkul

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานชนิดใหม่ คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (CR) ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบด (FN) ในอัตราส่วน CR:FN เท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง ได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR-FN เป็นวัสดุประสานมีการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR-FN เป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์สูงขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR-FN เป็นวัสดุประสานพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.77×10^5 ถึง 3.83×10^5 กก/ซม² และมีค่าสูงขึ้นตามกำลังอัด ส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR-FN เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

Abstract

The objective of this research is to study concrete from a new binder, calcium carbide residue - fly ash mixtures. The ground calcium carbide residue (CR) was mixed with ground fly ash (FN) at a ratio of CR:FN of 30:70 by weight and Portland cement type I was used as a strength accelerator. Setting times, compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of the concretes were determined and

compared with conventional concrete (concrete made from Portland cement type I). The test results indicated that CR-FN concretes had longer in both initial and final setting times than that of conventional concrete. However, the setting time of concretes was the same as that of conventional concretes when 10% of Portland cement was added in the mixtures. For the compressive strength of CR-FN concretes, it was found that the higher was cement content in the mixture, the greater was the compressive strength of CR-FN concrete. The modulus of elasticity of CR-FN concretes ranged from 2.77×10^5 to 3.83×10^5 ksc and was higher as the increased of the compressive strength. Finally, CR-FN concretes had the most coefficient of water permeability lower than that of conventional concrete when the compressive strengths of both concretes were approximately the same.

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นประเด็นที่ทั่วโลกให้ความสนใจอย่างมาก อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหานี้ขึ้น เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณสูงเพื่อให้ความร้อนในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตเม็ดปูน (Clinker) ซึ่งมีการประมาณว่าการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน ต้องใช้น้ำมันเตาถึง 125 ลิตร และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่บรรยากาศในปริมาณ 1 ตัน [1] ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงถึง 35 ล้านตัน [2] เพราะอุตสาหกรรมก่อสร้างส่วนใหญ่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลักในคอนกรีต นอกจากนี้จำนวนประชากรและการเจริญเติบโตของการก่อสร้างในเมือง

ต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเพื่อสนองต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้าง

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) คือ วัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเชื่อมและตัดโลหะ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อให้ความร้อนในการบ่มผลไม้ ปัจจุบันพบว่าการใช้ก๊าซอะเซทิลีนมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ในปี พ.ศ. 2550 ปริมาณการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานแห่งหนึ่งสูงถึง 1,000 ตัน/เดือน ส่วนใหญ่กากแคลเซียมคาร์ไบด์จะถูกนำไปทิ้งหรือกองไว้ (รูปที่ 1) ก่อให้เกิดปัญหาและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ความเป็นด่างที่สูงของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้ดินบริเวณพื้นที่ทิ้งไม่สามารถใช้เป็นพื้นที่ทำการเกษตรได้



รูปที่ 1 บริเวณที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในการคอนกรีตได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาถึงการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และพบว่าเถ้าถ่านหินสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้ [3-5] ปัจจุบันมีการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามยังมีเถ้าถ่านหินอีกจำนวนมากที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ และส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการกำจัดและสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาที่ได้กล่าวมา ทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกับวัสดุปอชโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ เพื่อเป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์

ซึ่งพบว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ได้ [6-7] แต่มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ยิ่งกว่านั้นการศึกษาประโยชน์จากปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับวัสดุปอชโซลานไปใช้ในงานคอนกรีตมีน้อย และส่วนใหญ่เป็นการศึกษาหาปริมาณส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอชโซลาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินมาใช้ในการคอนกรีต และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสามารถบ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีตได้ เพราะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันสารละลายที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตไม่ให้ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต

กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินหากสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตได้ นอกจากจะเป็นทางเลือกในการนำวัสดุประสานชนิดใหม่นี้ไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์แล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เพราะคอนกรีตชนิดใหม่นี้ไม่มีปูนซีเมนต์หรือมีปูนซีเมนต์น้อยมากในส่วนผสม

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว กำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : ได้จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานมาตากแดดให้แห้งเพื่อลดความชื้น จากนั้นบดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ CR
เถ้าถ่านหิน : ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้ถ่านหินประเภทซบิบูมินัสเป็นเชื้อเพลิง มีระบบการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidize Bed Combustion) อุณหภูมิที่ใช้ในการ

เผาประมาณ 800 ถึง 900°C ปรับปรุงคุณภาพเถ้านหินด้วยการบดให้อนุภาคมีความละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ FN ปูนซีเมนต์ : ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
มวลรวม : ใช้ทรายแม่น้ำ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.04 และใช้หินปูนย่อยที่มีขนาดไม่เกิน 20 มม. สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 2.60 และ 2.67 ตามลำดับ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.94 และ 0.46 ตามลำดับ

3.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด เถ้านหินบด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ภาพถ่ายขยายอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมี

ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดกับเถ้านหินบดในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเรงกำลังแทนที่วัสดุประสานในอัตราร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตคอนกรีตที่มีส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินบดใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 450 กก/ม³ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม สูง 20 ซม เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบและนำไปบ่มน้ำเพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน ทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบผลทดสอบกับคอนกรีตธรรมดา (CON : คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน) ซึ่งออกแบบให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 กก/ซม² มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

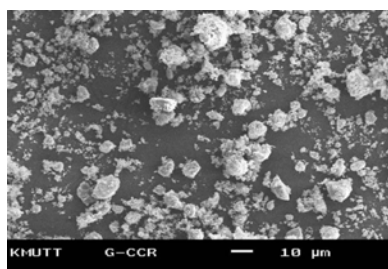
Mix	Mix Proportion (kg/m ³)							W/B	Slump (cm)
	CR	FA	Cement	Limestone	Sand	Water	SP		
CFC00	135	315	-	905	705	198	9.00	0.45	6.5
CFC05	128.25	299.25	22.50	910	710	198	9.00	0.45	5.0
CFC10	121.50	283.50	45	915	715	198	6.90	0.45	9.0
CFC15	114.75	267.75	67.50	915	715	198	6.50	0.45	7.0
CFC20	108	198	90	920	720	198	6.00	0.45	5.0
CON	-	-	300	1035	810	210	-	0.70	7.5

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

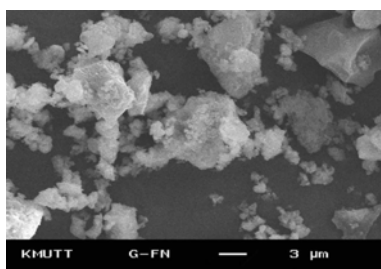
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหิน

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุ พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดและเถ้านหินบดมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และพื้นผิวขรุขระ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตารางที่ 2

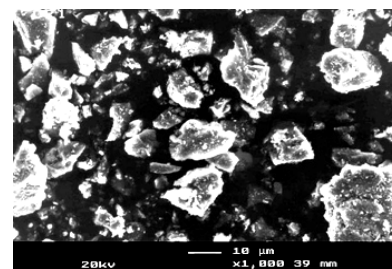
แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.7 ไมครอน ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินบดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.41 และ 2.39 ตามลำดับ มีปริมาณวัสดุข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 2.3 และ 2.6 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.4 และ 5.4 ไมครอน ตามลำดับ



ก. กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด



ข. เถ้าถ่านหินบดละเอียด



ค. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Physical Properties	CR	FN	Cement
Specific Gravity	2.41	2.39	3.15
Retained on a Sieve No. 325 (%)	2.3	2.6	N/A
Median Particle Size, d_{50} (μm)	4.4	5.4	14.7

N/A = Not Applied.

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 65.4 และ 56.5 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO ถือเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุในการทำปฏิกิริยาให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีปริมาณ LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 36.1 ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ LOI มีค่าสูงประมาณ 950°C และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีองค์ประกอบของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์สลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไปในระหว่างการทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ $380\text{--}625^\circ\text{C}$ [7-8]

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินบด พบว่าผลรวมขององค์ประกอบเคมีหลัก ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) ของเถ้าถ่านหินบด FN มีค่าเท่ากับร้อยละ 71.7 มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 4.1 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 5.2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางด้านเคมี เถ้าถ่านหินบด FN สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ได้ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [9]

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

Chemical Compositions (%)	CR	FN	Cement
Silicon Dioxide (SiO_2)	4.3	47.8	20.9
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	0.4	17.7	4.8
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.9	6.2	3.4
Calcium Oxide (CaO)	56.5	21.9	65.4
Magnesium Oxide (MgO)	1.7	1.3	1.3
Sodium Oxide (Na_2O)	0.0	0.0	0.3
Potassium Oxide (K_2O)	0.0	0.0	0.4
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.1	4.1	2.7
Loss On Ignition (LOI)	36.1	5.2	1.0

4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสดแสดงในตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตธรรมดา CON มีการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง 42 นาที และการก่อตัวระยะปลายเท่ากับ 7 ชั่วโมง 24 นาที ส่วนคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียด (CR-FN) เป็นวัสดุประสานและไม่มีปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง (CFC00) มีการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตธรรมดา CON ก่อนข้างมากประมาณ 2-4 เท่า โดยมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเท่ากับ 11 ชั่วโมง 40 นาที และ 29 ชั่วโมง 40 นาที ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากคอนกรีต CFC00 ไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเลย ต้องอาศัยเฉพาะปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน [7] จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราเพียงร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายมีค่าลดลงมาก โดยการก่อตัวระยะต้นของคอนกรีต CFC05 มีค่าเท่ากับ 5 ชั่วโมง 36 นาที และการก่อตัวระยะปลายเท่ากับ 15 ชั่วโมง 12 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นอัตราร้อยละ 10 ทำให้คอนกรีตมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา CON ยิ่งกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้นเป็นร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเร็วกว่าคอนกรีตธรรมดา CON เล็กน้อย

จากผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียด (CR-FN) เป็นวัสดุประสานสามารถลดระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตได้ และการก่อตัวมีระยะเวลาดลดลงเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณ C_3A และ C_3S ซึ่งเป็นสารประกอบหลักของซีเมนต์ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว [11] จึงทำให้การก่อตัวของคอนกรีตมีระยะเวลาดลดลง

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

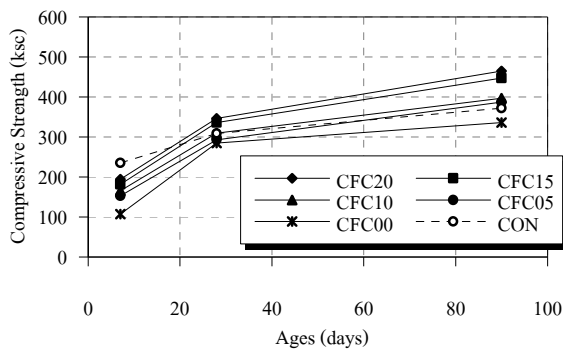
Sample	W/B	Initial Setting Time	Final Setting Time
CFC00	0.45	11 : 40	29 : 40
CFC05	0.45	5 : 36	15 : 12
CFC10	0.45	4 : 14	10 : 12
CFC15	0.45	3 : 44	7 : 32
CFC20	0.45	3 : 28	6 : 24
CON	0.70	4 : 42	7 : 24

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าคอนกรีต CFC00 ให้กำลังอัดที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน เท่ากับ 107, 285, และ 336 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 45, 92 และ 90 ของคอนกรีตธรรมดา CON ตามลำดับ สังเกตว่าอายุต้นของคอนกรีต CFC00 ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON

เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปมีการทำปฏิกิริยาช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นมีค่าต่ำ [6, 9] แต่เมื่อคอนกรีต CFC00 อายุมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน พัฒนากำลังอัดได้ถึงร้อยละ 92 ของคอนกรีตธรรมดา CON หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดเป็นไปอย่างช้าๆ จนอายุ 90 วัน ซึ่งลักษณะการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตธรรมดา CON นอกจากนี้คอนกรีต CFC00 ที่อายุ 90 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 336 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของคอนกรีตธรรมดา CON แม้ว่าไม่มีปูนซีเมนต์

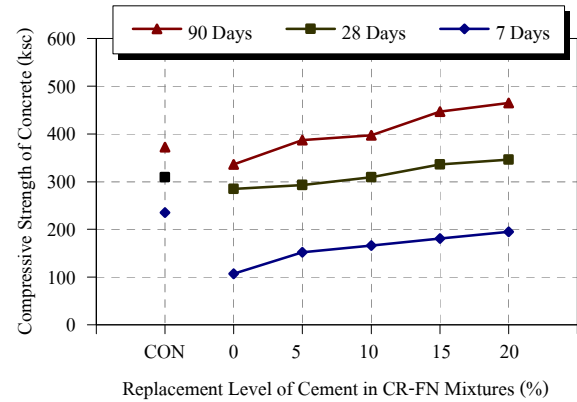
การใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ 22.5 กก/ม³) พบว่าคอนกรีต CFC05 สามารถพัฒนากำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีต CFC00 คือมีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 153 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 65 ของคอนกรีตธรรมดา CON และเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 และ 90 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 293 และ 387 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 95 และ 104 ของคอนกรีตธรรมดา CON ตามลำดับ เห็นได้ว่าคอนกรีต CFC05 สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา CON ได้ที่อายุ 90 วัน ยิ่งกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีต CFC10 (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม³) สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าเท่ากับคอนกรีตธรรมดา CON ได้ตั้งแต่อายุ 28 วัน และมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา CON ที่อายุ 90 วัน และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นอัตราร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีต CFC15 (ปูนซีเมนต์ 67.5 กก/ม³) มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 181, 336 และ 447 กก/ชม² ตามลำดับ และคอนกรีต CFC20 (ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม³) มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 195, 346 และ 465 กก/ชม² ตามลำดับ สังเกตว่าที่อายุ 7 วัน คอนกรีต CFC15 และ CFC20 ยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา CON ได้ถึงร้อยละ 8-12 และร้อยละ 20-25 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมและเถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นวัสดุประสานดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าที่อายุ 7 วัน การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังทุกอัตราส่วนผสม คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON อย่างไรก็ตามเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นมาก โดยมีค่ากำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตธรรมดา CON และ การใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา CON ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจำนวน 300 กก/ม³ แม้ว่ามีปูนซีเมนต์เพียง 45 กก/ม³ ในส่วนผสม และกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยที่การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 90 วัน ให้มีค่าสูงถึง 465 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 125 ของคอนกรีตธรรมดา CON ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นการเพิ่มปริมาณ C₃S และ C₂S ตลอดจน Ca(OH)₂ จึงส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

จากผลกำลังอัดของคอนกรีตแสดงให้เห็นได้ว่ากากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินบดมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ และ การใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมของกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินบดสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีทั้งอายุต้นและอายุปลาย และยังช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 70 โดยยังคงให้กำลังอัดของคอนกรีตไม่แตกต่างจากการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปูนซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีต

4.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสานแสดงในรูปที่ 5 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต CFC00 มีค่าเท่ากับ 2.77×10^5 กก/ชม² ที่อายุ 28 วัน และมีค่าสูงขึ้นตามอายุ โดยที่อายุ 90 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 3.36×10^5 กก/ชม² เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา CON ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 2.83×10^5 และ 3.55×10^5 กก/ชม² ตามลำดับ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานและไม่มีปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเช่นกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นอัตราร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 2.88×10^5 – 3.25×10^5 กก/ชม² และที่อายุ 90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 3.38×10^5 – 3.83×10^5 กก/ชม² ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต คล้ายกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าการใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินทั้งที่มีและไม่มีปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมที่ใช้มากกว่าเฟส [12]

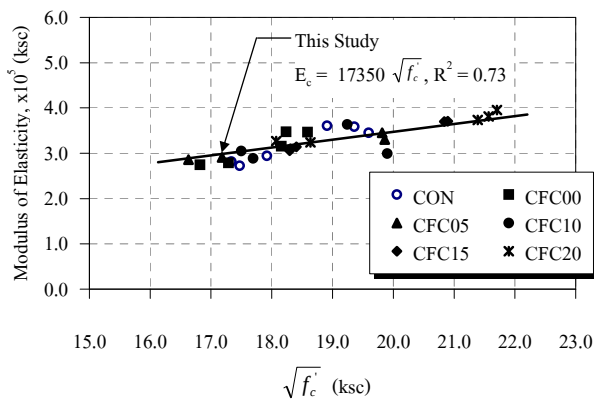
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสม

ร่วมกับเส้นกราฟเป็นวัสดุประสานแสดงในรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเส้นกราฟเป็นวัสดุประสานยังคงมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา CON สังเกตได้จากเส้นกราฟแนวโน้มที่มีทิศทางสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในงานวิจัยนี้แสดงในสมการที่ 1

$$E_c = 17350\sqrt{f'_c} \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ($\times 10^5$ กก/ชม²)

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ชม²)



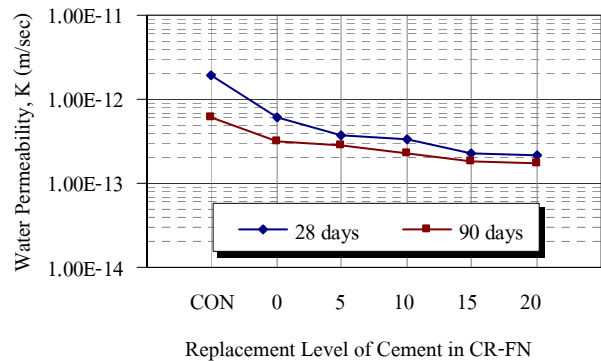
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีต

4.6 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นสารเร่งกำลังและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตธรรมดา CON มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 19.8×10^{-13} และ 6.0×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ คอนกรีต CFC00 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON แม้ว่าไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยมีค่าเท่ากับ 6.3×10^{-13} และ 3.2×10^{-13} เมตร/วินาที ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเส้นกราฟมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้เส้นกราฟสามารถแทรกในช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำ และจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chindaprasirt และคณะ [13] Bisailon และ Malhotra [14] พบว่าเพศที่ผสมเส้นกราฟความ

ละเอียดสูงมีขนาดของโพรงเฉลี่ยเล็กลง ซึ่งขนาดโพรงที่เล็กลงส่งผลให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงด้วย [15]

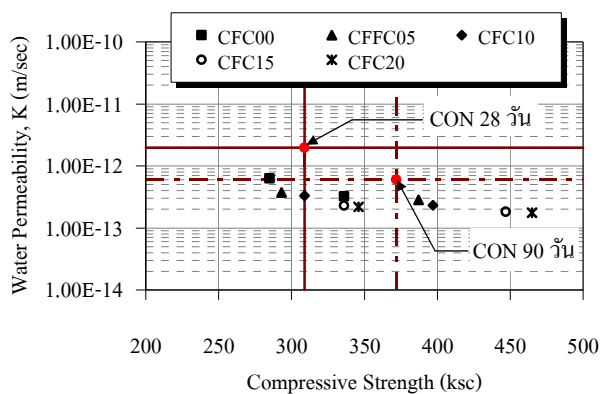
เมื่อพิจารณาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเส้นกราฟเป็นวัสดุประสานและร้อยละปริมาณปูนซีเมนต์ พบว่าทุกร้อยละการใช้ปูนซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเส้นกราฟเป็นวัสดุประสานมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อร้อยละการใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน คอนกรีต CFC05, CFC10, CFC15 และ CFC20 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3.7×10^{-13} , 3.3×10^{-13} , 2.3×10^{-13} และ 2.2×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน คือมีค่าเท่ากับ 2.8×10^{-13} , 2.3×10^{-13} , 1.8×10^{-13} และ 1.8×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปูนซีเมนต์และอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่าค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเส้นกราฟเป็นวัสดุประสานทั้งที่มีและไม่มีปูนซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าการซึมของน้ำผ่านของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเส้นกราฟและใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้ปูนซีเมนต์เพียง 45 และ 90 กก/ม³) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON แม้ว่าคอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา CON ตัวอย่างเช่น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต CFC005 มีค่าการซึมของน้ำ

ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.2×10^{-13} เมตร/วินาที มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 293 กก/ซม² ส่วนคอนกรีตธรรมดา CON มีการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 19.8×10^{-13} เมตร/วินาที มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 309 กก/ซม² ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดของกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์มาก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำของคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน รวมถึงปริมาณเพศ์ของคอนกรีตที่ใช้เคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 90 วัน

5. สรุป

ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลการใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุประสาน และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบด (CR-FN) มีระยะเวลาก่อตัวนานกว่าคอนกรีตธรรมดา CON อย่างไรก็ตามการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วขึ้นและการใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราสูงขึ้นไปทำให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วขึ้น

2. ส่วนผสมของกากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบด (CR-FN) สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตได้ โดยให้กำลังอัดเท่ากับ 285 กก/ซม² ที่อายุ 28 และเพิ่มขึ้นเป็น 336 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน แม้ว่าไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังเพียงร้อยละ 10 (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม³) คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28

วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น

3. คอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบด (CR-FN) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต และมีค่าไม่แตกต่างจากกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากัน

4. คอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบด (CR-FN) เป็นวัสดุประสานมีค่าการซึมของน้ำต่ำลงตามกำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แม้ว่าคอนกรีตที่ใช้ CR-FN เป็นวัสดุประสานให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ โครงการทุนวิจัย มจร. และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ “ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ประจำปี 2553” ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, “เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต”, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, 29 เมษายน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 1-18
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, สถิติอุตสาหกรรม : ซีเมนต์ ปี 2009 : http://www.oie.go.th/industry_stat/269410.html
- [3] Mehta P.K., 1985, “Influence of fly ash characteristics on the strength of Portland-fly ash mixture”, Cement and Concrete Research, Vol. 15, No. 4, pp. 669-674.
- [4] Yazici H., 2008, “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 22, No.4, pp. 456-462.
- [5] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, “การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุ

- ปอชโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต”, วารสารวิจัยและพัฒนา สจ.ธ., ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 51-76
- [6] ปิติสานต์ กร้ามาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวิมล เภฬิศดาร, 2539, “การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน”, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 65 – 75
- [7] Jaturapitukkul C., and Roongreung B., 2003, “Cement material from calcium carbide residue-rice husk ash”, Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 5, pp. 470-475.
- [8] Cardoso F.A., Fernandes H.C., Pileggi R.G., Cincotto M.A., and John V.M., 2009, “Carbide lime and industrial hydrated lime characterization”, Powder Technology, Vol. 195, No. 2, pp. 143-149.
- [9] ASTM C618, 2001, “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete”, Annual Book of ASTM Standards 04.02, pp. 310–313.
- [10] Kherd S.A. and Abou-Zeid M.N., 1994, “Characteristics of silica-fume concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 3, pp. 357-375.
- [11] Hewlett P.C. (Ed.), 1998, Lea’s Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed., Arnold/Wiley, New York, pp. 241-289.
- [12] Neville, A.M., 1997, “Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 71-74.
- [13] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Jaturapitakul, C., 2007, “Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash”, Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 1492-1499.
- [14] Bisailon, A. and Malhotra, V.M., 1988, Permeability of Concrete using a uniaxial Water-flow method, Edited by D. Whiting, and A. Walitt, American Concrete Institute, Detroit, MI, Special publication sp-108, pp.175-194.
- [15] Malhotra, V.M. and Mehta, P.K., 2002, High-performance, High-volume Fly Ash concrete, Marquardt printing Ltd., Ottawa, Canada, p. 50-53.