สมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน

อัครเดช ศรีเสน[1*], วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[2] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[3]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน โดยนำเถ้าถ่านหินผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก จากนั้นบดจนมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย การสูญเสียค่ายุบตัว กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า และการต้านทานการขัดสี ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และมีการพัฒนากำลังอัดช่วงแรกช้ากว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงถึง 359 กก./ซม.^{2} โดยไม่มีปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : การต้านทานการขัดสี / กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / การต้านทานคลอไรด์ / เถ้าถ่านหิน / การสูญเสียค่ายุบตัว

---

* *Corresponding author : E-mail: akksrisen@gmail.com*

1 *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

3 *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Properties of Concrete Using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material

Akaradet Srisen[1*], Weerachart Tangchirapat[2] and Chai Jaturapitakkul[3]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

Abstract

This research aims to study the properties of concretes using fly ash and calcium carbide residue as a cementitious material. Fly ash was mixed with calcium carbide residue at a ratio of 70:30 by weight and then was interground until the amount of particles retained on a 45 - μm sieve (sieve No. 325) were less than 3% by weight. Slump loss, compressive strength, chloride penetration resistance, and abrasion resistance of concretes were investigated. The results showed that the slump loss of concrete using fly ash and calcium carbide residue as a cementitious material (FACR) was faster than control concrete. Strength development of FACR concrete at early age was slower than control concrete. However, the compressive strength of FACR concrete could be as high as 359 ksc without cement in the mixture. Morever, the chloride penetration resistance of FACR concrete was better than that of control concrete. Finally, FACR concrete had weight loss due to abrasion same as that of control concrete when both of the concretes had the same compressive strength.

Keywords : Abrasion Resistance / Calcium Carbide Residue / Chloride Resistance / Fly Ash / Slump Loss

* *Corresponding author : E-mail: akksrisen@gmail.com*

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

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

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

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพราะปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ ขณะที่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงมาก เริ่มตั้งแต่กระบวนการระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง ตลอดจนการเผา ในการเผาวัตถุดิบต้องใช้เชื้อเพลิงปริมาณมากโดยนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 - 1,600 องศาเซลเซียส แล้วนำเม็ดปูนมาบดตามความละเอียดที่ต้องการ ผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นประเด็นที่ทั่วโลกให้ความสำคัญอย่างมาก และในปัจจุบันมีสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรและการพัฒนาของประเทศ ทำให้ต้องผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ในขณะเดียวกันนักวิจัยได้ศึกษาหาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ มาประยุกต์ใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาดังกล่าวโดยยังคงสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ได้แก่

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งมี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ปัจจุบันมีการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ โดยโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จมีการใช้เถ้าถ่านหินประมาณปีละ 1.5 ล้านตัน อย่างไรก็ตามยังมีเถ้าถ่านหินอีกจำนวนมาก (ประมาณ 2 ล้านตันต่อปีจากกำลังการผลิตประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปี) ที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์และต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและพื้นที่ในการกำจัด Jaturapitakkul, Tangchirapat [1]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีนซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเชื่อมโลหะ การตัดโลหะ และใช้บ่มผลไม้ กากแคลเซียม-คาร์ไบด์จะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีความเป็นด่างสูง ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อพื้นที่ใกล้เคียงทำให้ไม่สามารถทำการเกษตรกรรมได้ ในปี พ.ศ. 2556 มีปริมาณการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทั่วประเทศไทยสูงถึง 21,500 ตัน/ปี Amnadnua, Tangchirapat, Jaturapitakkul [2] ปัจจุบันมีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย

ปัญหาดังกล่าว ทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่า การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ได้ แต่มีการพัฒนากำลังอัดที่ช้า Amnadnua, Krammart [3-4] เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ และงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาหาปริมาณอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับวัสดุปอซโซลาน ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงสุด เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก [4] หรือเน้นการศึกษาสมบัติทางกลเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาสมบัติอื่นๆของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานเกี่ยวกับด้านความทนทานยังมีน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาวัสดุประสานที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 300 กก./ซม.^{2} ศึกษาการสูญเสียค่ายุบตัว, การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต และการต้านทานการขัดสี เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้วัสดุประสานในงานคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการสูญเสียค่ายุบตัว กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า และการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานโดยมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 300 กก./ซม.^{2}

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร และเถ้าถ่านจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผู้วิจัยนำเถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาบดร่วมกันโดยใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อกากแคลเซียม-คาร์ไบด์ เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก (FACR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุด [4] บดจนมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก สมบัติทางกายภาพของวัสดุแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.66 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.91 มวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาดไม่เกิน 3/4 นิ้ว ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.47 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.90

นอกจากนี้ยังมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อเร่งกำลังอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีต ด้วยและใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) Type F : Polycarboxlate ether-base เพื่อปรับค่ายุบตัวในการผสมคอนกรีต

3.2 องค์ประกอบเคมี

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ บดร่วมในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก (FACR) จะใช้วัสดุ FACR ที่บดละเอียดแล้ว เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุด้วยการบดให้มีความละเอียดสูงขึ้นทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุก่อนและหลังทำการบดมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความละเอียดที่เปลี่ยนไปอย่างมาก Songpiriyakij, Mora [5-6] ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 65.4 และองค์ประกอบทางเคมีของ FACR มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีค่ารวมกันสูงถึงร้อยละ 61.6 ขององค์ประกอบเคมีทั้งหมด และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) เท่ากับร้อยละ 10.1 สาเหตุที่ทำให้ค่า LOI ของ FACR สูง เกิดจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบสูงประมาณ 750 องศาเซลเซียส ทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ใน FACR ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH_2)$ สลายตัวเป็น CaO และ H_2O ซึ่งกลายเป็นไอน้ำระเหยออกไป Jaturapitakkul, Roongreung [7] จึงทำให้น้ำหนักสูญหายไป ส่งผลให้ค่า LOI ของ FACR มีค่าสูง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Median Particle Size, d_{50} (micron)
Cement	3.14	N/A	14.7
FACR	2.66	2.31	3.04

หมายเหตุ : FACR คือ เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียดในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical Composition (%)		Cement Type I	FACR
Silicon Dioxide	(SiO_2)	20.9	29.0
Aluminium Oxide	(Al_2O_3)	4.8	13.6
Ferric Oxide	(Fe_2O_3)	3.4	7.6
Calcium Oxide	(CaO)	65.4	32.6
Magnesium Oxide	(MgO)	1.3	1.9
Loss On Ignition	(LOI)	2.9	10.1

3.3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ปริมาณวัสดุประสาน (FACR) เท่ากับ 450 กก./ม.^{3} เพื่อผสมคอนกรีต นอกจากนี้ยังใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเร่งกำลังอัด ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และค่ายุบตัวอยู่ในช่วง 10-15 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ในการปรับค่ายุบตัว ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mixes		CT	FACR	FACR 10
Mix Proportion (kg/m^3)	Cement	450	-	45
	FACR	-	450	405
	Fine Agg.	710	710	710
	Coarse Agg.	908	910	910
	Water	180	180	180
	W/B	0.40	0.40	0.40
	Super P.	0.95	1.80	1.94
Slump (cm)		13.00	13.00	12.50

หมายเหตุ

CT หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

FACR หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน

FACR10 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง อัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

Super P. หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) Type F : Polycarboxlate ether-base

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสด

เมื่อผสมคอนกรีตจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงวัดค่ายุบตัวเริ่มต้น จากนั้นทำการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตทุกๆ 15 นาที จนกระทั่งค่ายุบตัวเป็นศูนย์ และในระหว่างทดสอบจะเปิดเครื่องคอนกรีตเป็นเวลา 1 นาที ก่อนทำการทดสอบค่ายุบตัวและปิดฝาเครื่องผสมตลอดการทดสอบเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีตสด

3.4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

หล่อคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยเหล็กกลมปลายมนขนาด 16 มม. ภายหลังการหล่อ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกและนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำ ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง

3.4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [8] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ตัดให้ได้ความหนา 50 ± 2 มม. จากนั้นนำคอนกรีตซึ่งอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเคลือบผิวโดยรอบด้วยซิลิโคน (ยกเว้นผิวด้านหน้าทั้งสอง) แล้วประกอบเข้าเครื่องทดสอบดังรูปที่ 1 บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกๆ 30 นาที จนครบ 6 ชั่วโมง นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตจากสมการที่ 1 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง

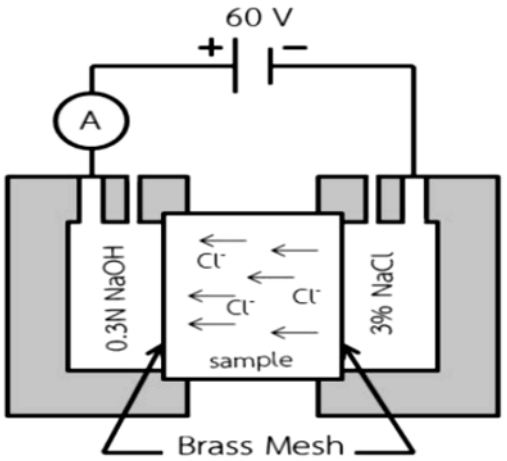
$$Q = 900(I0 + 2I30 + 2I60 + ... + 2I300 + 2I330 + I360) \quad \textbf{(1)}$$

โดยที่

Q คือ ประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (Coulomb)

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น (Ampere)

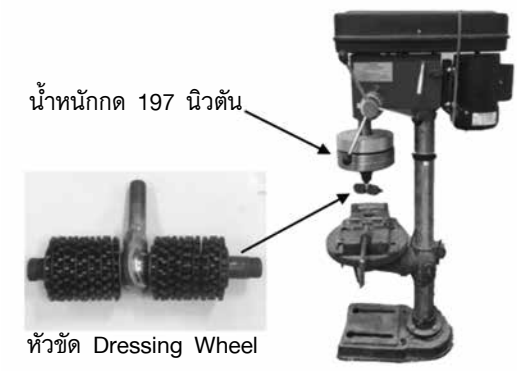
I_t คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที จากการทดสอบ (Ampere)



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้า

3.4.4 การต้านทานการขัดสี

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 944 [9] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. นำไปตัดให้ได้ความหนา 50 ± 2 มม. หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบด้วยวิธี Rotating-Cutter Method ซึ่งขัดด้วยหัวขัด Dressing Wheel ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ภายใต้น้ำหนักกด 197± 2 นิวตัน เป็นเวลา 14 นาที และบันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีทุกๆ 2 นาที โดยลักษณะของเครื่องทดสอบและหัวขัด Dressing Wheel แสดงดังรูปที่ 2 ทำการทดสอบการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง

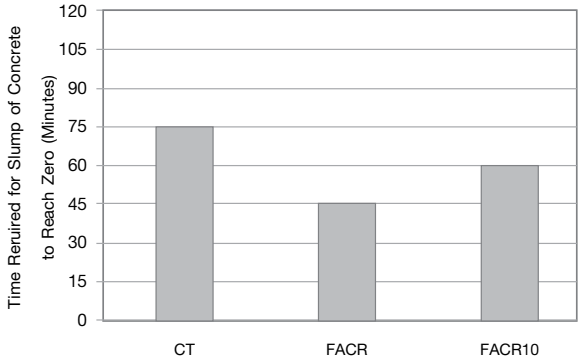


รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 การสูญเสียค่ายุบตัว

รูปที่ 3 แสดงเวลาที่คอนกรีตสดมีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียม-คาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน (FACR) มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ซึ่งเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) ประมาณ 30 นาที และเมื่อเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (FACR10) มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ซึ่งยืดระยะเวลาออกไป 15 นาที จากข้อมูลแสดงว่าคอนกรีต FACR และ FACR10 มีการสูญเสียค่ายุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีต CT ทั้งนี้อาจเพราะความละเอียดของเถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (3.04 ไมโครเมตร) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ (14.7 ไมโครเมตร) รวมถึงอนุภาคที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระ Chindaprasert, Jaturapitakkul [10] ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์จึงทำให้มีการสูญเสียค่ายุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีต CT นอกจากนี้คอนกรีต CT มีการใช้ยิปซั่มในการหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์จึงทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวของคอนกรีตยังมีสภาพเหลว ส่วนคอนกรีต FACR ไม่มีการใช้ยิปซั่มในการหน่วงการก่อตัว และยังพบว่าคอนกรีต FACR และ FACR10 มีความต้องการสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) มากกว่าคอนกรีตควบคุมเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามที่กำหนด



รูปที่ 3 เวลาที่คอนกรีตสดมีค่ายุบตัวเป็นศูนย์

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (FACR) และใช้ปูนซีเมนต์เร่งร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุ

ประสาน (FACR10) มีการพัฒนากำลังอัดที่ช้ามากที่อายุ 1 วัน ซึ่งมีค่า 38 และ 50 กก./ซม.^{2} คิดเป็นร้อยละ 13 และ 15 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งได้จากเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งโดยทั่วไปเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดในคอนกรีตควบคุม (CT) จึงทำให้คอนกรีต CT มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกที่มากกว่าอย่างชัดเจน ส่วนที่อายุ 7 วัน คอนกรีต FACR และ FACR10 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 175 และ 192 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จากข้อมูลแสดงว่าการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของวัสดุประสาน เป็นการเพิ่ม C_3S และ C_2S ตลอดจน $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นอีกส่วนหนึ่ง และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง

ตารางที่ 4 ค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีต

Mixes	FACR		FACR10		CT		*CT	
Age (Days)	Compressive Strength (ksc)	Normalized Compressive Strength at 28 days (%)	Compressive Strength (ksc)	Normalized Compressive Strength at 28 days (%)	Compressive Strength (ksc)	Normalized Compressive Strength at 28 days (%)	Compressive Strength (ksc)	Normalized Compressive Strength at 28 days (%)
1	38	13	50	15	260	58	-	-
7	175	61	192	59	409	91	235	76
28	289	100	326	100	448	100	309	100
90	359	124	402	123	532	119	362	117

หมายเหตุ : *CT คือ คอนกรีตปกติที่มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 235 - 362 กก./ซม.^{2} [11] เพื่อใช้เทียบกับคอนกรีต FACR ซึ่งมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตแต่ละชนิดที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต FACR, FACR10 และ *CT (คอนกรีตปกติมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 235 – 362 กก./ซม.^{2} จากงานวิจัยของ Laosamathikul [11]) คิดเป็นร้อยละ 61, 59 และ 76 จากข้อมูลแสดงได้ว่าคอนกรีต FACR และ FACR10 มีการพัฒนากำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตแต่ละชนิดที่อายุ 28 วัน ได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน ขณะที่อายุ 28 วัน คอนกรีต FACR และ FACR10 มีกำลังอัดเท่ากับ 289 และ 326 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

นอกจากนี้พบว่าที่อายุ 90 วัน คอนกรีต FACR, FACR10 และ *CT มีกำลังอัดเท่ากับ 359, 402 และ 362 กก./ซม.^{2} คิดเป็นร้อยละ 124, 123 และ 117 เมื่อเทียบกับคอนกรีตแต่ละชนิดที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดภายหลัง 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีการพัฒนาในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตควบคุม คือมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [3]

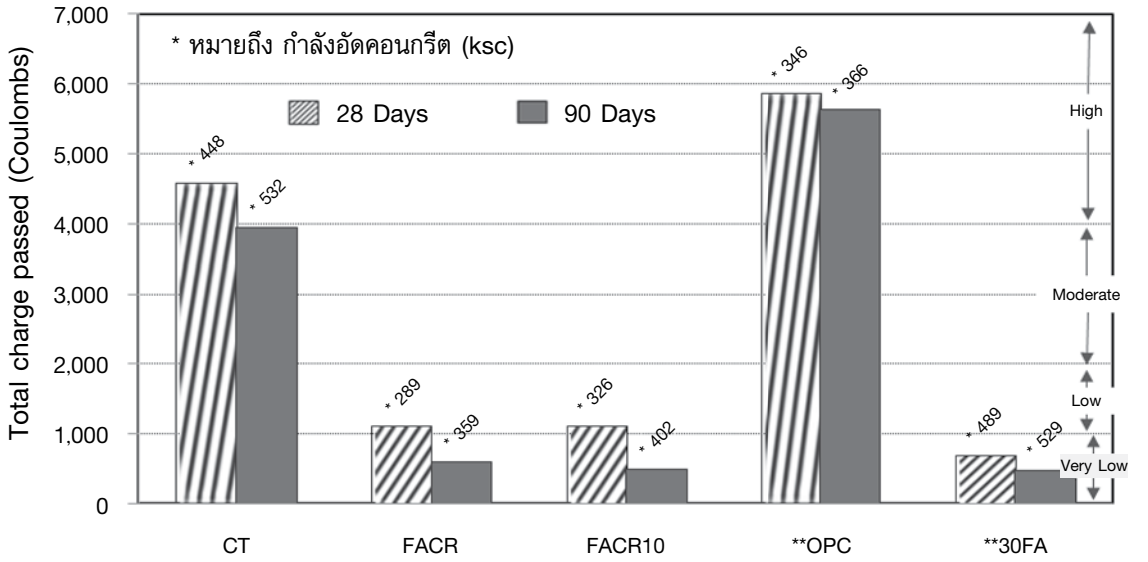
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน (FACR) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวเร่งร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (FACR10) มีการต้านทานการ

แทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม (CT) ซึ่งคอนกรีต FACR, FACR10 และ CT มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดเท่ากับ 1,112 1,115 และ 4,593 คูลอมบ์ ตามลำดับ

สำหรับที่อายุ 90 วัน ยังมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับอายุ 28 วัน คือ คอนกรีต FACR และ FACR10 มีการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้เกิดแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทำหน้าที่ยึดจับคลอไรด์อิออน Faguang, Naiqian, Xinying [12] ดังนั้นการแทรกซึมของคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยาก ทำให้ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotetanorm [13] ซึ่งทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต พบว่ามีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

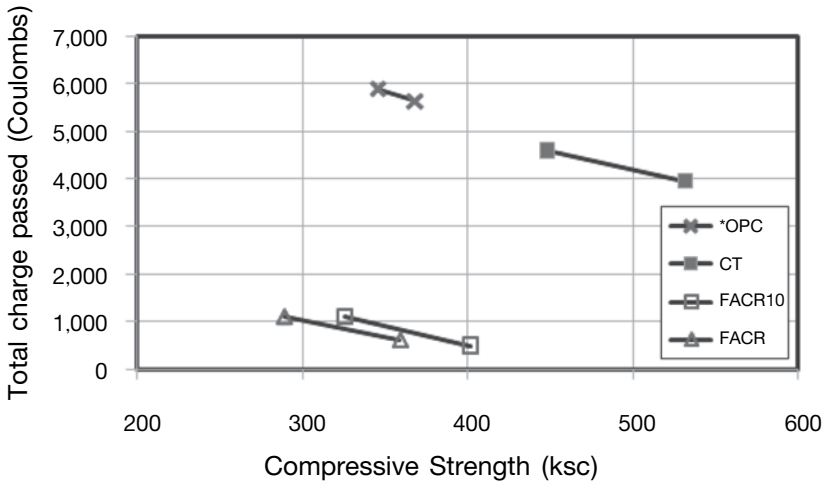
รูปที่ 5 แสดงค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 300 – 400 กก./ซม.^{2} พบว่าคอนกรีต **OPC และ FACR10 มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมากกว่าคอนกรีต FACR แสดงว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเพสต์จาก FACR นอกจากนี้พบว่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้นทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้นจึงส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanawung [14]



รูปที่ 4 ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

หมายเหตุ : **OPC คือ คอนกรีตควบคุมจาก [13]

***30FA คือ คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยวัสดุประสานจาก [13]

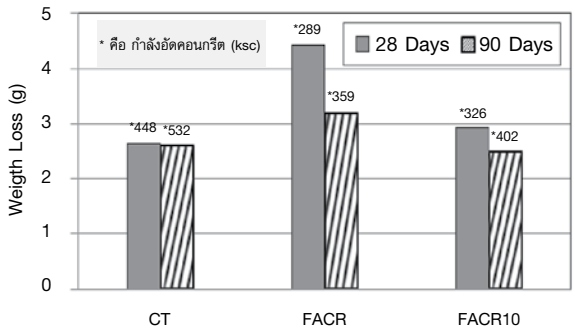


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตและกำลังอัดคอนกรีต

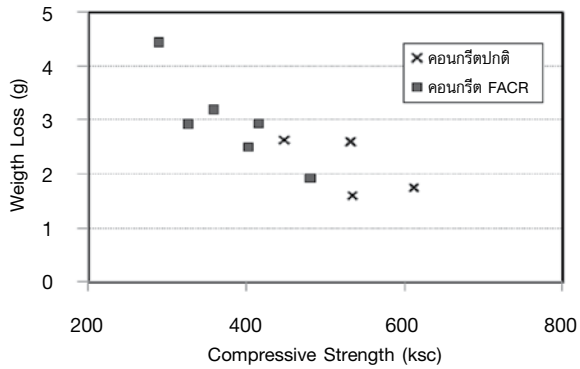
หมายเหตุ : **OPC คือ คอนกรีตปกติจาก [13]

4.4 การต้านทานการขัดสี

รูปที่ 6 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีต พบว่าที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีต FACR มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีมากกว่าคอนกรีต CT แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังอัดเท่ากันดังรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีต FACR และ CT มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีต่างกันไม่มาก ขณะที่คอนกรีต FACR10 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีใกล้เคียงกับคอนกรีต CT ซึ่งมีค่า เท่ากับ 2.63 และ 2.60 กรัม ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมาตรฐานการทดสอบไม่ได้กำหนดค่าที่ยอมให้ของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสี แต่จะใช้วิธีการเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มกำลังอัดเท่านั้นแต่ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตควบคุม กล่าวคือ มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากรูปที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Norrarat [15] ที่ศึกษาความคงทนต่อการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็กทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก



รูปที่ 6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้เวลาในการขัดนาน 14 นาที



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีเมื่อใช้เวลาในการขัดนาน 14 นาที กับกำลังอัดของคอนกรีต

5. สรุป

ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

5.1 การใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสานมีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

5.2 คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียม-คาร์ไบด์ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดที่อายุต้น (1-7 วัน) ช้ากว่าคอนกรีตควบคุม แต่สามารถพัฒนากำลังอัดที่ 90 วัน ได้สูงถึง 359 กก./ซม.^{2} โดยไม่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยเร่งกำลังอัดที่อายุต้นและเพิ่มกำลังอัดที่อายุปลายได้

5.3 คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียม-คาร์ไบด์ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสานมีการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แม้ว่าจะมีกำลังอัดของคอนกรีต ต่ำกว่า

5.4 คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียม-คาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีต่างจากคอนกรีตปกติไม่มากนัก เมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทมีกำลังอัดเท่ากัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการ “เมธีวิจัยอาวุโส สกว.” ประจำปี 2553 สัญญาเลขที่ RTA 5380002 และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มจธ.

7. เอกสารอ้างอิง

1. Jaturapitakkul, C. and Tangchirapat W., 2011, “Utilization of ashes and wastes from industries for use as concrete materials”, 3rd Ed.,The Thailand Research Fund, Thailand, pp. 2-3 (In Thai)

2. Amnadnua K., Tangchirapat W., Jaturapitakkul C., 2013, “Strength, Water Permeability, and Heat Evolution of High Strength Concrete Made from the Mixture of Calcium Carbide Residue and Fly Ash”, *Materials and Design*; Vol. 51: pp.894-901.

3. Amnadnua, K., 2010, “A Study on High-Strength Concrete Using Mixture of Calcium Carbide Residue and Fly Ash as a Cementitious Material”, *Master of Engineering Thesis*, King Mongkut’s University of Technology Thonburi;. (In Thai).

4. Krammart, P., Martputhorn, S., Jaturapitakkul, C. and Ngaopisadarn, V., 2002, “A Study of Compressive Strength of Mortar Made from Calcium Carbide Residue and Fly Ash”, *Proceeding of the 8th National Convention on Civil Engineering*; MAT pp. 178-183. (In Thai).

5. Songpiriyakij, S. and Jaturapitakkul C., 1995, “A Study of Ground Mea Moh Fly Ash as a Pokolan for Increasing Concrete Strength”, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 55-56. (In Thai)

6. Mora, E.P., Paya, J. and Monzo, J., 1993, “Influence of Different sized Fraction of a Fly Ash on Workability of Mortars”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 4, pp. 917-924.

7. Jaturapitakkul, C and Roongreung B., 2003, “Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp.470-475.

8. American Society of Testing and Materials. ASTM C 1202, 2001, “Standard test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04, No. 02, pp. 646-651.

9. American Society of Testing and Materials. ASTM C 994, 2001, “Standard Test Method for Abrasion Resistance of concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04, No. 02, pp.507-510.

10. Chindaprasert, P. and Jaturapitakkul, C., 2008, “*Cement Pozzolan and Concrete*”, Thailand

Concrete Association (TCA), pp. 197-198. (In Thai)

11. Laosamathikul, T., 2008, "A Study on Properties of Concrete Containing Calcium Carbide Residue Mixed with Fly Ash or Mixed with Rice Husk-Bark Ash as a Binder", *Master of Engineering Thesis*, King Mongkut' s University of Technology Thonburi. (In Thai)

12. Faguang, L., Naiqian, F. and Xinying, L., 2000, "An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 989-992.

13. Chotetanorm, C., Bubphachot, B. and Chindaprasirt, P., 2006, "A Study of Chloride Penetration of Concrete Containing Classified Fly Ash", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 2, pp. 203-214. (In Thai)

14. Sanawung, W., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash On Compressive Strength, Water Permeability and Chloride Penetration of Concrete", *Master of Engineering Thesis*, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (In Thai)

15. Norrarat, P., Songpiriyakij, S., Sukontasukkul, P., 2011, "Abrasion Resistance of High Volume Replacement of Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete", *Proceedings of the 15th National Convention on Civil Engineering*, MAT, pp. 163-172. (In Thai)