



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง

The innovation of low cost self compacting concrete using waste ash

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผศ.ทง ลานธารทอง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2556

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง

The innovation of low cost self compacting concrete using waste ash

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผศ.ทง ลานธารทอง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2556

บทคัดย่องานวิจัย

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง

(ภาษาอังกฤษ) The innovation of low cost self compacting concrete using waste ash

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปี 2556 จำนวนเงิน 411,800 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ กันยายน 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อผู้วิจัย

ผศ. ดร. สำเร็จ รักซ้อน¹

ผศ.ทง ลานธารทอง²

ศ. ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ³ (ที่ปรึกษาโครงการวิจัย)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลั้งอัด ความพรุน การแทรกซึมคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนชั้น และการกัดกร่อน ของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าหนัก มีศักยภาพในการเป็นวัสดุประสานได้ดี การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนโดยให้กำลั้งอัดสูงและความพรุนต่ำ วัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ได้ในปริมาณร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าหนัก 1_kki5 ใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายให้ค่ากำลั้งอัดและต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนได้ดี

คำสำคัญ: คอนกรีต, คาร์บอนชั้น, คลอไรด์, การกัดกร่อน, เถ้าหนัก, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

Abstract

This research presents a study of the compressive strength, porosity, chloride penetration, resistance to carbonation and corrosion of self-compacting concrete containing fly ash, ground rice husk-bark ash and ground bottom ash. Portland cement (CT) is partially replaced with pozzolans 0-40% by weight of the cementitious materials. Fly ash, ground rice husk-bark ash and ground bottom ash have a high potential to be used as a good cementitious material. The results show that the compressive strength and low porosity of self-compacting concrete improves substantially with partial replacement of Portland cement with fly ash. Self-compacting concrete mix cement containing 20-40% of pozzolans can be used to make cementitious materials. The use of fly ash, ground rice husk-bark ash and ground bottom ash produces concrete mix with good strength and resistance to chloride and corrosion.

Keywords: Concrete, Carbonation, Chloride, Corrosion, Bottom ash, Rice husk-bark ash

¹ ปริญาเอก วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

โทร. 0879454133 reng197@rmutp.ac.th, sumreng.r@rmutp.ac.th

² ปริญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประเทศไทย

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

³ ที่ปรึกษาโครงการ

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น โทร. 043 202 846

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อุดหนุนทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้อ่าน ให้ความรู้ แนวทางการเขียนโครงการ ตลอดจนการชี้แนะถึงวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในขณะเขียนโครงการวิจัย จนทำให้มีความรู้ประสบการณ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก และประสบความสำเร็จในระยะเวลาต่อมา คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความสะดวกและดูแลในด้านเอกสารของงานวิจัยทั้งหมดเป็นอย่างดี ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยอย่างเรียบร้อย ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการในการช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนวัสดุทดสอบ และสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอขอบคุณ คุณนัยนา เทียงภักดี ผู้ช่วยวิจัย ในการจัดเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบตั้งแต่ต้นจนแล้วเสร็จ

ผศ. ดร. สำเร็จ รักซ้อน

ผศ. ทง ลานธารทอง

หัวหน้าโครงการ

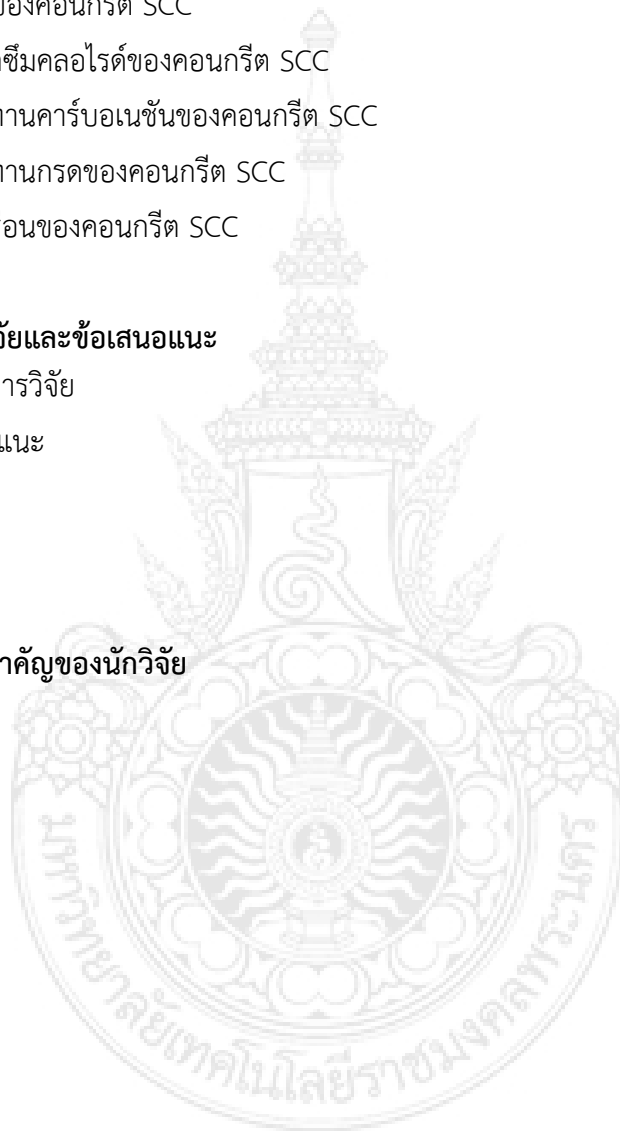
ผู้ร่วมวิจัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน	5
2.2 งานวิจัยด้าน SCC คอนกรีต	12
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	20
3.2 วิธีเก็บข้อมูล	27
3.3 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล	27
3.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	28
3.5 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)	29
3.6 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	31
4.1 กำลั้งอัดของคอนกรีต SCC	31
4.2 ความพรุนของคอนกรีต SCC	34
4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต SCC	35
4.4 การต้านทานคาร์บอนชั้นของคอนกรีต SCC	36
4.5 การต้านทานกรดของคอนกรีต SCC	37
4.6 การกัดกร่อนของคอนกรีต SCC	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	43
ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย	43



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าแกลบ-เปลือกไม้ (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552)	10
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าแกลบ-เปลือกไม้ (Sata et al 2007)	11
ตารางที่ 3 ส่วนผสมของ SCC คอนกรีต (Reianhardt and Stegmaier 2006)	18
ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีตและซีเมนต์เฟสท์ SCC ที่ใช้ศึกษา	24
ตารางที่ 5 การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตในพื้นฐานการคำนวณคูลอมบ์ มาตรฐาน ASTM C1202	24
ตารางที่ 6 แผนงานโครงการวิจัย (ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี หรือ 12 เดือน)	28



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต SCC (Brouwers and Radix 2005)	4
รูปที่ 2 การแทรกซึมคลอไรด์ของ ก) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาด และ ข) มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียด (Chindapasirt et al 2007a; Rukzon and Chindapasirt 2011)	6
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (Chindapasirt et al 2007a)	6
รูปที่ 4 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน (Chindapasirt et al 2007b)	7
รูปที่ 5 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบดที่ความละเอียดต่างกัน (Rukzon and Chindapasirt 2011)	8
รูปที่ 6 ภาพถ่านกำลังสูงของ เถ้าก้นเตา ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด (Sathonsaowapark et al 2009)	8
รูปที่ 7 XRD pattern ของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (Sathonsaowapark et al 2009)	9
รูปที่ 8 อิทธิพลของความละเอียดของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัด (Sathonsaowapark et al 2009)	9
รูปที่ 9 ผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการซึมผ่าน (Dinakar et al 2008)	12
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่าน (Dinakar et al 2008)	13
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละการแทนที่ และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรด (Dinakar et al 2008)	13
รูปที่ 12 การแทรกซึมคลอไรด์ของ SCC คอนกรีตและคอนกรีตทั่วไป (Dinakar et al 2008)	14
รูปที่ 13 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด (Siddique 2011)	15
รูปที่ 14 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ต่อการต้านทานคาร์บอนเนชั่น (Siddique 2011)	15
รูปที่ 15 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ต่อการต้านทานคลอไรด์ (Siddique 2011)	16

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 16 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ต่อกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 56 วัน (Khatib 2008)	16
รูปที่ 17 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารลดน้ำพิเศษ) ต่อกำลังอัด (Khatib 2008)	17
รูปที่ 18 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารลดน้ำพิเศษ) ต่อการดูดซึมน้ำ (Khatib 2008)	17
รูปที่ 19 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังอัดของ SCC คอนกรีต (Reianhardt and Stegmaier 2006)	18
รูปที่ 20 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อขนาดของโพรงใน SCC คอนกรีต K25 (Reianhardt and Stegmaier 2006)	19
รูปที่ 21 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อขนาดของโพรงใน SCC คอนกรีต K85 (Reianhardt and Stegmaier 2006)	19
รูปที่ 22 การตัดตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบความพรุน	21
รูปที่ 23 ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดไปทดสอบ	22
รูปที่ 24 อุปกรณ์การทำให้ตัวอย่างทดสอบอิมมัวด้วยน้ำ	22
รูปที่ 25 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ RCPT	23
รูปที่ 26 การเสียบเหล็กในตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการกัดกร่อน	26
รูปที่ 27 ตัวอย่างการติดตั้งการทดสอบ ก) ตามมาตรฐาน ASTM C876 ข) แบบเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้า	26
รูปที่ 28 กำลังอัดของคอนกรีต SCC ผสมวัสดุปอซโซลาน	32
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC	32
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBTA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC	33
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GRHBA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC	33
รูปที่ 32 ความพรุนของคอนกรีต SCC ผสมวัสดุปอซโซลาน	34
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีต SCC	35

ญ

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 34 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต SCC	36
รูปที่ 35 การต้านทานคาร์บอนชั้นของคอนกรีต SCC	36
รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและคาร์บอนชั้นของคอนกรีต SCC	37
รูปที่ 37 การต้านกรดของคอนกรีต SCC	37
รูปที่ 38 การกัดกร่อนของคอนกรีต SCC	38



คำอธิบายสัญลักษณ์

FA	=	เก้าถ่านหินแยกขนาด มีปริมาณร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
GRHBA	=	เก้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด มีปริมาณร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
GBTA	=	เก้าหนักขนาดบดละเอียด มีปริมาณร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
CT	=	คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ OPC ล้วน
20FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20GRHBA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30GRHBA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40GRHBA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20GBTA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30GBTA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40GBTA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
p	=	ความพรุนของตัวอย่างด้วย vacuum saturated (%)
W_a	=	น้ำหนักของตัวอย่างอิมมัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นกรัม (g)
W_d	=	น้ำหนักอบแห้งในตู้ควบคุมหลังจาก 24 ชั่วโมง ที่ 100 ± 5 องศาเซลเซียส หน่วยเป็นกรัม (g)
W_w	=	น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหน่วยเป็นกรัม (g)
Q	=	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ (Coulombs)
I_0	=	ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้า (Amperes)
I_t	=	ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างที่ระยะเวลา t นาที

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ทฤษฎี สมมติฐาน กรอบแนวความคิดของการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในการทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น ส่งผลให้การรับน้ำหนักดีหรือกำลังอัดสูงขึ้นและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี ในการทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นอาจทำได้หลายวิธี เช่น โดยการกระทุ้งลงในแบบ การใช้คอนกรีตด้วยเครื่องจักรคอนกรีต และการสั่นคอนกรีตด้วยเครื่องสั่น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การสั่นคอนกรีตด้วยเครื่องสั่นมากทำในห้องปฏิบัติการที่เป็นแบบหล่อขนาดเล็ก ในบางครั้งการเทคอนกรีตเข้าในแบบหล่อโครงสร้างของโครงการก่อสร้างต่างๆ ผู้ปฏิบัติงานอาจไม่สามารถเข้าไปจี้ด้วยการใช้เครื่องมือหรือด้วยคนได้ เนื่องจากแบบของโครงสร้างที่อาจมีพื้นที่แคบมาก ซับซ้อน มีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะเข้าไปได้ เช่น โครงสร้างเสา โครงสร้างกำแพงสูง โครงสร้างแผ่นบาง และงานโครงสร้างที่มีจำนวนเหล็กเสริมซับซ้อนและหนาแน่นมาก เป็นต้น ที่ผ่านมามีบริษัทผู้ผลิตคอนกรีตหรืออุตสาหกรรมคอนกรีตพยายามหาวิธีการผลิตหรือเทคอนกรีตเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะการพิจารณาให้คอนกรีตเทเข้าแบบได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องเขย่า กระทุ้ง หรือจี้ให้แน่น ซึ่งทำได้ด้วยการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตชนิดไหลเข้าแบบได้ง่ายและอัดแน่นด้วยตัวเอง หรือ self compacting concrete หรือ SCC คอนกรีต (Dinakar et al 2008; Siddique 2011; Vejmelkova et al 2011; Brouwers and Radix 2005) คอนกรีต SCC นี้สามารถเทและไหลเข้าแบบได้ง่ายและมีการรับน้ำหนักได้ตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตชนิดนี้มักใช้ปริมาณของวัสดุประสานที่มาก (วัสดุผง) และใช้สารลดน้ำพิเศษหรือสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต (Dinakar et al 2008) คอนกรีต SCC อาจพัฒนาด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานเข้ามาปรับปรุงคุณสมบัติให้ได้เหมาะสมตามต้องการเพื่อแก้ปัญหาคอนกรีตยาก ประหยัดต้นทุนการผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง วัสดุปอซโซลานที่รู้จักในประเทศไทยมีบางชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น

เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าชานอ้อย คือวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม และอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชนใกล้เคียง หากสามารถสร้างทางเลือกใหม่ที่จะนำเถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเหล่านี้มาใช้ประโยชน์หรือนำมาพัฒนาเป็นนวัตกรรมสู่เชิงพาณิชย์รวมทั้งได้องค์ความรู้ใหม่ จะเป็นการป้องกันและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือทิ้งได้เป็นอย่างดี

ที่ผ่านมา นักวิจัยพยายามนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวข้างต้นไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับใช้ในคอนกรีต และเรียกว่าวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา

(Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ (ปริญญา ประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2553) โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ) เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การนำปูนซีเมนต์ ผสมกับวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนที่เหมาะสม อาจทำให้สามารถผลิตคอนกรีตชนิด SCC ได้ดี และอาจมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของ คอนกรีตในด้านความสามารถในการเท ความทนทานและลดปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและลดพื้นที่การ ก่อจัดตั้งเขื่อนหรือวัสดุเหลือทิ้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนานวัตกรรมการผลิตคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ง่ายอัดแน่นด้วยตัวเองและ ต้นทุนต่ำด้วยการใช้เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีอยู่ในประเทศ โดยศึกษาความสามารถทำงาน ได้ของคอนกรีต การรับกำลังอัด ความพรุน การต้านทานคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนเนชัน การต้านทานกรด และการต้านทานการกัดกร่อน ของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย เถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้
- 2) การวิจัยนี้ใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า จังหวัดลำปาง ภาคเหนือของประเทศไทย ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ใช้จาก บริษัท ไทย เพาเวอร์ ซัพพลาย พนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ประเทศไทย ซึ่งใช้เถ้าถ่านที่ได้โดยตรงจากส่วนของเตาเผา
- 3) การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยนำเถ้าถ่านหินไป แยกขนาดให้เล็กลง ส่วนเถ้าก้นเตาและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดให้มีขนาดลดลง
- 4) สารเคมีที่ใช้ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลเวอร์ไนเตรท เป็นต้น
- 5) ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของคอนกรีต ไหลเข้าแบบได้ง่าย อัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC)
- 6) ศึกษาความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต กำลังอัด และความพรุน
- 7) ทำการศึกษาความทนทานของตัวอย่างคอนกรีต SCC โดยทดสอบคุณสมบัติการต้านทานการ ซึมผ่านคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนเนชัน การต้านทานกรด และต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากการซึมผ่านคลอไรด์
- 8) วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของงานวิจัย

คอนกรีตชนิดไหลเข้าแบบได้ง่ายและอัดแน่นด้วยตัวเองหรือ self compacting concrete (SCC) พัฒนามาจากคอนกรีต self consolidation concrete และ high performance concrete ซึ่งถูกนำไปใช้ในโครงสร้างอาคารโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในต่างประเทศ (Brouwers and Radix 2005) โดยคอนกรีตดังกล่าวนี้ไหลผ่านเข้าไปในแบบของโครงสร้างที่มีช่องว่างเล็กๆ ซับซ้อน และในระหว่างเหล็กเสริมที่ไม่สามารถเข้าไปจี้คอนกรีตได้ โดยเฉพาะในบริเวณมุมของแบบหล่อโครงสร้าง (Brouwers and Radix 2005) และเป็นที่ทราบทั่วกันว่า คอนกรีตโดยทั่วไปประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทรายและน้ำ หรืออาจมีสารผสมเพิ่มอื่นๆ ส่วนคอนกรีต SCC นี้ มีงานวิจัยที่ผ่านมามีขึ้นได้แนะนำไว้ว่า นอกจากส่วนผสมที่เป็นวัสดุประสานและควรมีวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียดในส่วนผสมคอนกรีต SCC อาจประกอบด้วยหินในปริมาณร้อยละ 50 ของหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (kg/m^3) และทรายปริมาณร้อยละ 50 ของหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (kg/m^3) ดังแสดงในรูปที่ 1 และปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุประสานสำหรับงานคอนกรีต SCC โดยเฉพาะวัสดุปอซโซลานบางชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้า blast furnace slag และดินขาวเผา เป็นต้น (Dinakar et al 2008; Siddique 2011; Vejmelkova et al 2011; Brouwers and Radix 2005)

ในประเทศไทยมีการใช้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และได้ส่วนที่เป็นผลพลอยได้ ซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์ คือ เถ้าถ่านหิน (fly ash) และเถ้าก้นเตา (bottom ash) นอกจากนี้ในประเทศไทยมีโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ด้วยการใช้แกลบผสมรวมกับเปลือกไม้ และได้ส่วนที่เหลือทิ้งจากผลผลิตคือแกลบ-เปลือกไม้ (rice husk-bark ash) ทั้งเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และแกลบ-เปลือกไม้สามารถใช้ในงานคอนกรีตได้เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง (ASTM C618 2001) โดยพิจารณาได้จากองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐานของ ASTM C618 (2001) กล่าวคือ มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ วัสดุทั้งสองมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันจึงอาจใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้เหมือนกัน

ที่ผ่านมา เริ่มมีการศึกษาและนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าก้นเตาและแกลบ-เปลือกไม้ เพื่อใช้ในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อย โดยเฉพาะงานวิจัยที่ใช้แกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ง่ายอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) ยังไม่มีการศึกษาวิจัย ดังนั้นการพัฒนาด้านวัสดุปอซโซลานสำหรับ SCC ต่อยอดจากเถ้าถ่านหินสำหรับงานคอนกรีต SCC โดยนำเถ้าก้นเตาและแกลบ-เปลือกไม้ ไปปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสม ด้วยการแยกขนาดหรืออบให้มีขนาดอนุภาคลดลงหรือเล็กลง เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และเมื่อทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับปูนซีเมนต์และวัสดุอื่น อาจทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีลักษณะเหมือนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวทั่วไป ลดต้นทุนการผลิต และหากศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม รวมทั้งการใช้สารผสมเพิ่มในส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพความสามารถในการเทเข้าแบบได้ง่าย เพิ่มความเชื่อมั่นให้อุตสาหกรรมก่อสร้างด้วยการศึกษาถึงความทนทานในสภาวะแวดล้อมต่างๆ (สารเคมีจากธรรมชาติ) จากนั้นจึงสามารถนำผลงานไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ดี

Concrete	Air	Air	Air	Air
	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate
	Mortar	Sand	Sand	Sand
		Paste	Powder	Cement
			Water	Filler
		SP	Water	
			SP	

รูปที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต SCC (Brouwers and Radix 2005)

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1) การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในการก่อสร้างทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ และต้นทุนผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมก่อสร้าง อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการกำจัดทิ้งของเสีย

2) คาดว่าจะนำผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยจดสิทธิบัตรเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่

3) นำผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติหรือระดับชาติ

4) ได้องค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาด้านวัสดุวิศวกรรมอย่างต่อเนื่อง การร่วมมือกันระหว่างนักวิจัยต่างสถาบันเพื่อแลกเปลี่ยนประสบการณ์ความรู้ด้านวิจัย สร้างเทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม ตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ

5) สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ให้มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นการพัฒนาศักยภาพและความสามารถเพื่อการพัฒนานวัตกรรมและบุคลากรทางการวิจัย ตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

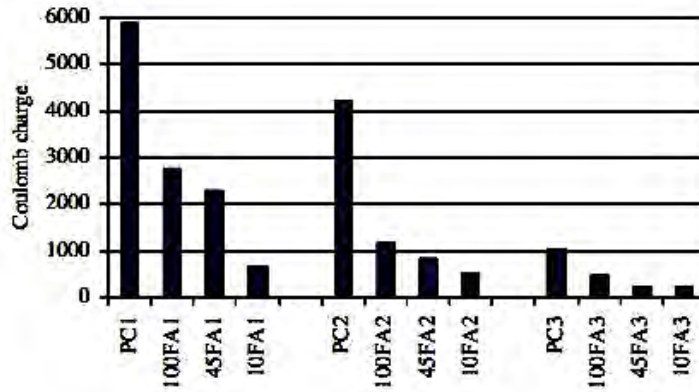
บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้ อธิบายเกี่ยวกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าหนัก (Bottom ash) เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice husk-bark ash) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน คอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (Self compacting concrete: SCC) คุณสมบัติทางกายภาพและกลสมบัตินด้านวิศวกรรมของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (SCC) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยด้านวัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างไทย

2.1 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

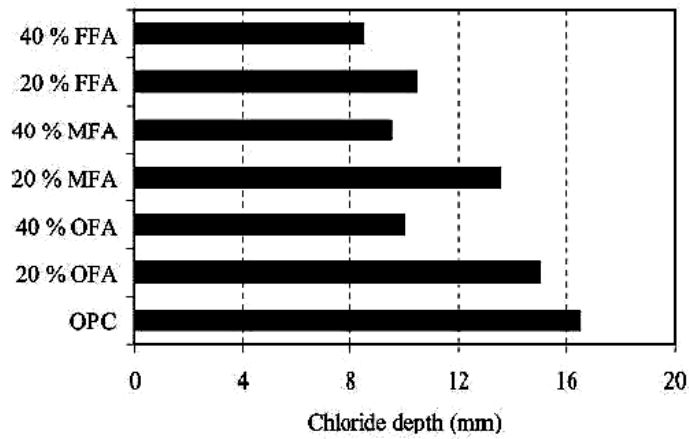
2.1.1 เถ้าถ่านหิน (fly ash)

เถ้าถ่านหิน (fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า มาตรฐาน ASTM C618 (2001) ได้แบ่งเถ้าถ่านหินโดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักในการแบ่ง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดย Class F ต้องมีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไป ส่วน Class C มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต่ำกว่าร้อยละ 70 แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของเถ้าถ่านหินทั้งสองประเภทต้องไม่เกิน ร้อยละ 6 โดย Class F ยอมให้มีค่า LOI ได้สูงถึงร้อยละ 12 ได้ แต่ต้องมีผลการทดสอบคุณภาพจากห้องทดลองในส่วน ของปริมาณ SO_3 กำหนดไว้ให้มีไม่เกินร้อยละ 5 เถ้าถ่านหิน Class F ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมักมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำกว่าร้อยละ 10 ส่วนเถ้าถ่านหิน Class C ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) และส่วนใหญ่จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10

งานวิจัยที่ผ่านมาของ [Chindaprasirt et al \(2007a\)](#) ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดให้มีความละเอียดเพื่อใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป โดยใช้เถ้าถ่านหินจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อปรับปรุงขนาดของเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ก) และ ข) ส่วนในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าเมื่อกำลังอัดสูงขึ้นส่งผลให้การต้านทานคลอไรด์ดีขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตและการต้านทานคลอไรด์มีความสัมพันธ์กัน โดยในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตควรคำนึงถึงปัจจัยหรือความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ด้วย

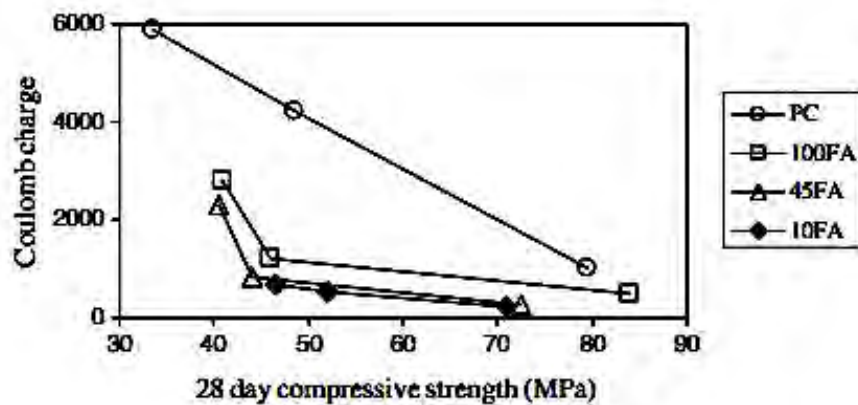


ก)



ข)

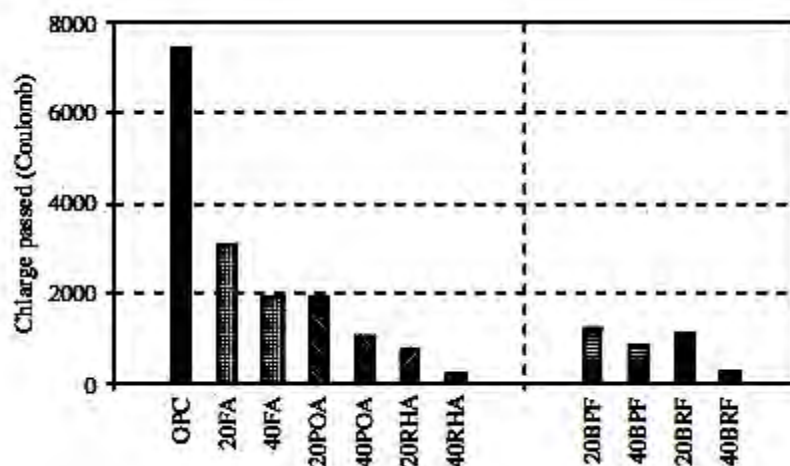
รูปที่ 2 การแทรกซึมคลอไรด์ของ ก) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดและ ข) มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบดละเอียด (Chindaprasirt et al 2007a; Rukzon and Chindaprasirt 2011)



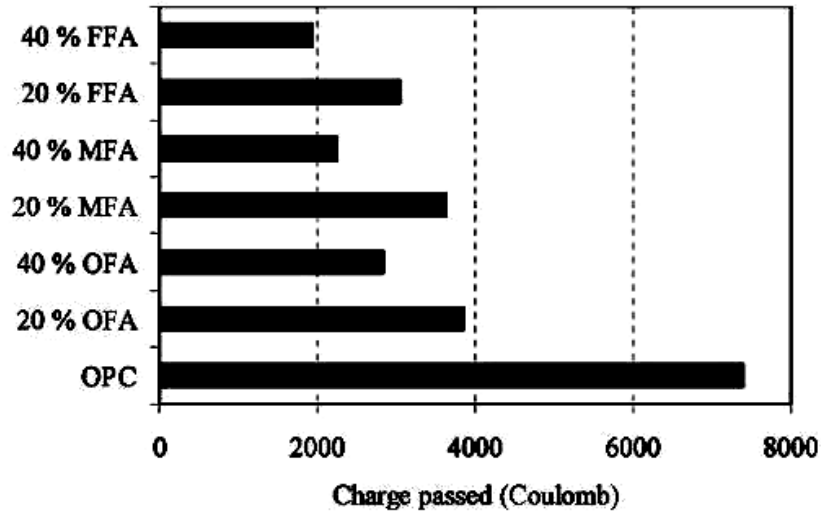
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (Chindaprasirt et al 2007a)

ในรูปที่ 4 แสดงงานวิจัยของ Chindaprasirt et al (2007b) ศึกษาการต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้วัสดุปอซโซลานดังกล่าวแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ด้วยวัสดุปอซโซลานในมอร์ตาร์ ต้านทานคลอไรด์ได้ดี การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต้านทานคลอไรด์ได้กว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์สามารถต้านทานคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีในวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ขนาดของอนุภาคของเถ้าถ่านหินสามารถแทรกตัวเข้าไปโพรงของมอร์ตาร์ผลผลิตดังกล่าวนี้จึงเพิ่มความทึบแน่นให้แก่ตัวอย่างมอร์ตาร์และลดการซึมผ่าน

ส่วนในรูปที่ 5 แสดงผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา (Rukzon and Chindaprasirt 2011) ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินปรับปรุงขนาดด้วยการบดละเอียดขนาดต่างกัน คือ เถ้าถ่านหินขนาดหยาบ (OFA) ขนาดละเอียดปานกลาง (MFA) และเถ้าถ่านหินขนาดละเอียดมาก (FFA) จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าเถ้าถ่านหินที่ละเอียดมาก (FFA) สามารถต้านทานคลอไรด์ได้กว่ามอร์ตาร์อื่นๆ (ดังแสดงในรูปที่ 5) เนื่องจากผลของความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่สามารถแทรกตัวเข้าไปโพรงของมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่น และองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าถ่านหินสามารถทำปฏิกิริยาต่อจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตของปูนซีเมนต์ กล่าวคือวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยที่ SiO_2 ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CHS) แทรกตัวในโพรงคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้นสามารถรับกำลังได้



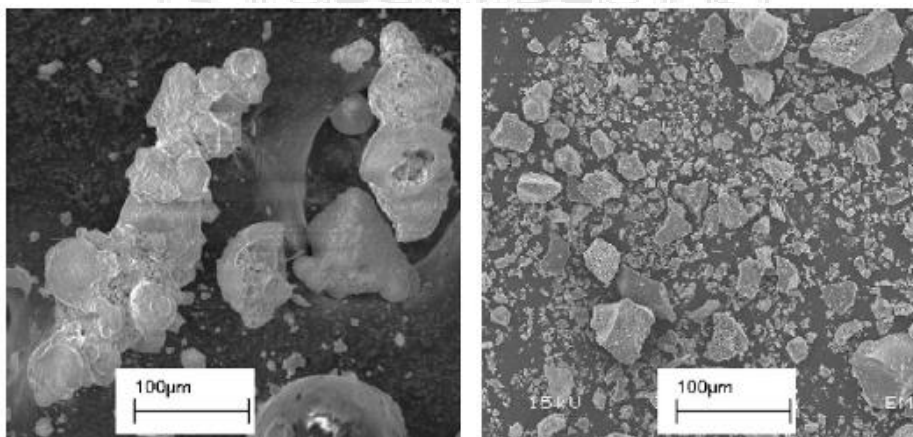
รูปที่ 4 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน (Chindaprasirt et al 2007b)



รูปที่ 5 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบดที่ความละเอียดต่างกัน
(Rukzon and Chindapasirt 2011)

2.1.2 เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

เถ้าก้นเตา (bottom ash) ได้จากการเผาเถ้าถ่านหิน จากนั้นเกิดการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว เถ้าก้นเตาโดยทั่วไปมีขนาดค่อนข้างใหญ่และความพรุนสูง รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน (Sathonsaowapark et al 2009; Kim et al 2010) ในรูปที่ 6 (Sathonsaowapark et al 2009) แสดงตัวอย่างภาพถ่ายกำลังสูงของเถ้าก้นเตาก่อนบด (รูปที่ 6 ก) และหลังบด (รูปที่ 6 ข) ที่ได้จากการเผา ถ่านหินใน อำเภอแม่เมาะ ภาคเหนือ ของประเทศไทย พบว่าเถ้าก้นเตาก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่และความพรุนสูง รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน เมื่อบดเถ้าก้นเตา ส่งผลให้อนุภาคเล็กลง และความพรุนลดลง

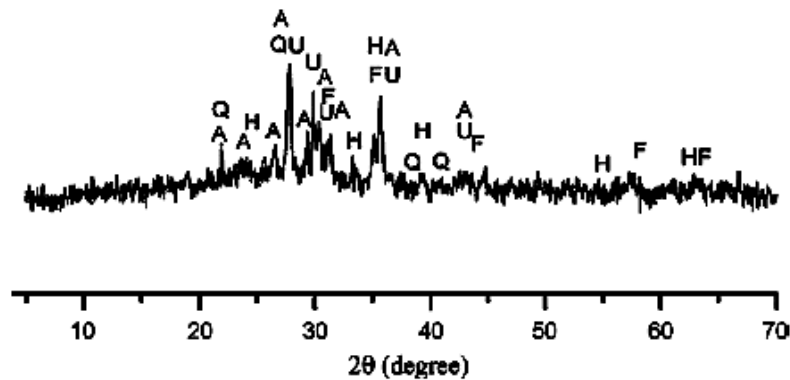


ก)

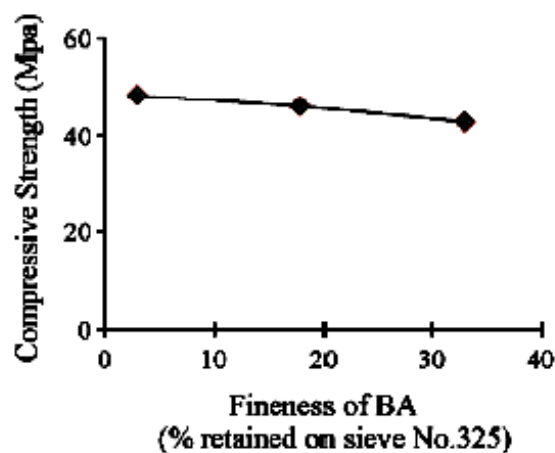
ข)

รูปที่ 6 ภาพถ่านกำลังสูงของ เถ้าก้นเตา ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด (Sathonsaowapark et al 2009)

ในงานวิจัยของ Cheng (2011) ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมของมอร์ตาร์ พบว่า กำลังอัดลดลง หน่วยน้ำหนักลดลง และความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด (ทราย) และปูนซีเมนต์ งานวิจัยที่ผ่านมาของ Sathonsaowapark et al (2009) พบว่า เถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินในอำเภอแม่เมาะ ภาคเหนือ ของประเทศไทย องค์ประกอบหลักทางเคมีคือ SiO_2 โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์เถ้าก้นเตาด้วย XRD (ในรูปที่ 7) และในรูปที่ 8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความละเอียดของเถ้าก้นเตาที่บดให้มีสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 แตกต่างกัน 3 ขนาด กล่าวคือ ขนาดละเอียดที่สุดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยที่สุด โดยผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเถ้าก้นเตาบดให้มีความละเอียด ส่งผลให้กำลังที่สูงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น (Sathonsaowapark et al 2009) ที่ผ่านมาการศึกษา นำเถ้าก้นเตาไปใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปมีอยู่บ้าง แต่การศึกษานำเถ้าก้นเตาไปใช้ในคอนกรีตเทไหลเข้าแบบง่าย หรือ self compacting concrete มีอยู่น้อยมาก จึงควรศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติต่างๆ สำหรับเป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งนี้อย่างยั่งยืนต่อไป



รูปที่ 7 XRD pattern ของเถ้าก้นเตาบดละเอียด (Sathonsaowapark et al 2009)



รูปที่ 8 อิทธิพลของความละเอียดของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัด (Sathonsaowapark et al 2009)

2.1.3 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice husk-bark ash)

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการใช้ เถ้าแกลบ 2 ส่วน และเปลือกไม้ 1 ส่วน เป็นเชื้อเพลิงและเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 800-900 องศาเซลเซียส (Chindaprasirt et al 2007c) เถ้าทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแกลบและเปลือกไม้ดังกล่าวเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง โดยกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้างดงกล่าวได้ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ประมาณ 300,000 ตันต่อปี (Makaratat et al 2004) ซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์ กระทั่งเริ่มนำ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต ที่ผ่านมา ยังไม่พบการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติ และกลสมบัติเชิงกลในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ในงาน self compacting concrete (SCC)

ในตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จากงานวิจัยของสำเร็จ รักซ้อน และคณะ (2552) ในประเทศไทย เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่า เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 79.4 ส่วนปริมาณของ SO_3 อยู่ที่ร้อยละ 0.9 ต่ำกว่าร้อยละ 4 ส่วน LOI มีปริมาณร้อยละ 8.24 ซึ่งตามข้อกำหนดของ ASTM C618 (2001) ถือว่าเป็นเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2553) ส่วนใน ตารางที่ 2 เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในงานวิจัยของ Sata และคณะ (2007) ซึ่งพบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกาประมาณร้อยละ 74.8 หากพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แล้ว พบว่ามีองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO_2) อยู่ระหว่าง 74.8-79.4 (Sata et al 2007; สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552) อย่างไรก็ตาม เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในตารางที่ 1 และ 2 ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ได้เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณ SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 4 และมีค่า LOI ใกล้เคียงร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม ปริมาณของ LOI ไม่มีผลกระทบต่อการพัฒนา กำลังของคอนกรีตและมอร์ตาร์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2553)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552)

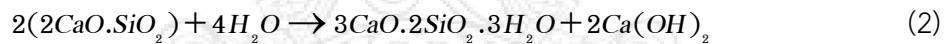
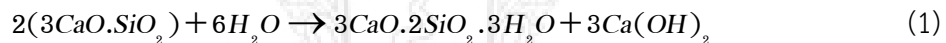
Composition	% of oxide of Rice husk-bark ash (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552)
SiO_2	76.3
Al_2O_3	1.6
Fe_2O_3	1.5
CaO	5.5
SO_3	0.9
LOI	8.24
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	79.4

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Sata et al 2007)

Composition	% of oxide of Rice husk-bark ash
SiO ₂ (%)	74.8
Al ₂ O ₃ (%)	0.2
Fe ₂ O ₃ (%)	0.8
SO ₃	0.5
LOI (%)	11.2
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	75.8

2.1.4 ปฏิกริยาปอซโซลาน

เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)



ปฏิกิริยาตามสมการที่ (1) และ (2) ยังไม่สิ้นสุด หากส่วนผสมของคอนกรีตมีวัสดุปอซโซลานผสมอยู่ นั่นคือองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ซึ่งมีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน จะเข้าทำปฏิกิริยากับต่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ดังสมการที่ (3) และ (4)



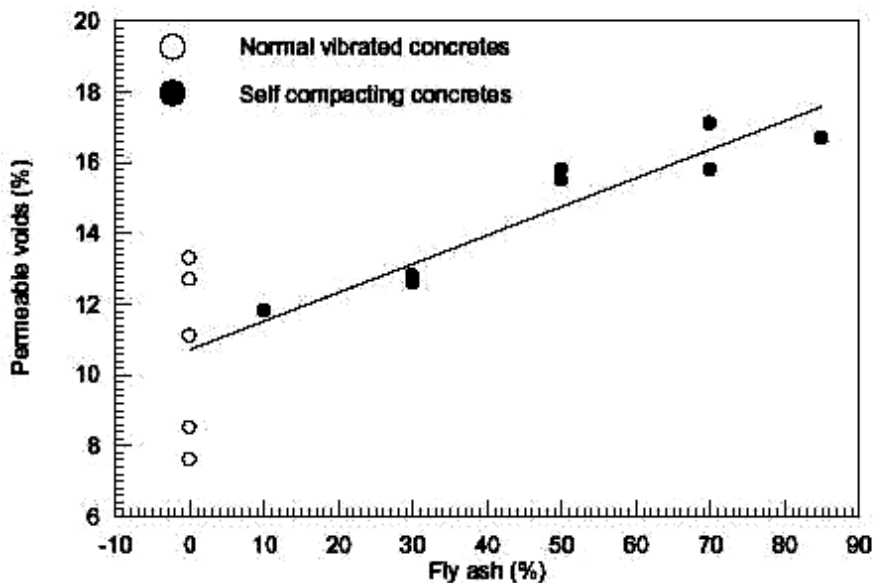
ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3) คือ xCaO.ySiO₂.zH₂O หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ค่า x, y และ z เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (4) คือ xCaO.yAl₂O₃.zH₂O หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยทั้ง CSH และ CAH จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

2.2 งานวิจัยด้าน SCC คอนกรีต

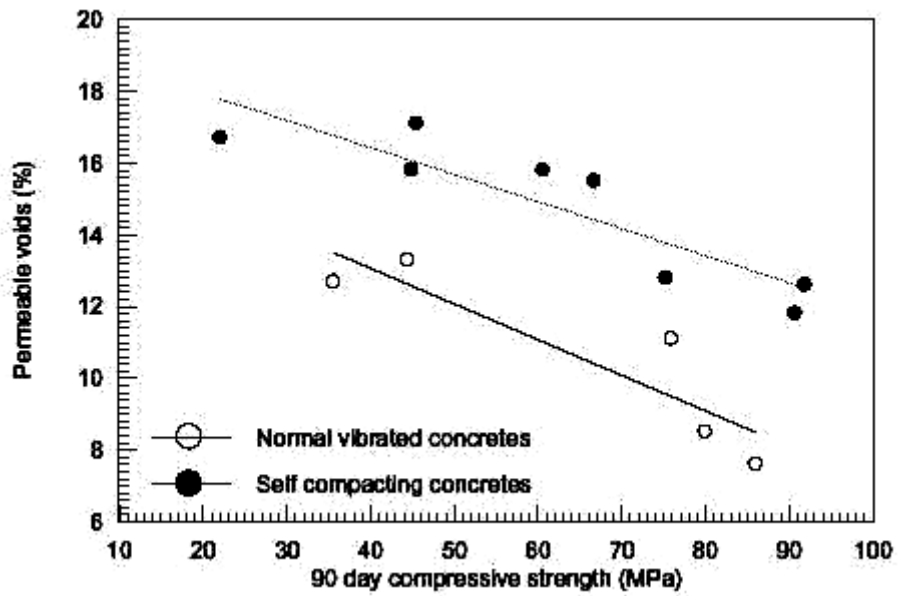
2.2.1 ผลกระทบของปริมาณวัสดุปอซโซลานต่อ SCC คอนกรีต

ดังได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้นว่า SCC คอนกรีตมีปริมาณของวัสดุผงที่มาก และมีการใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยปรับส่วนผสมคอนกรีตเพื่อความสามารถในการทำงานได้ ยกตัวอย่างเช่น มีงานวิจัยเกี่ยวกับ SCC บางชิ้น (Dinakar et al 2008) ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0-85 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการซึมผ่านมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 9 (Dinakar et al 2008) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าร้อยละการซึมผ่านของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีต SCC ซึ่งพบว่าแนวโน้มของกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อค่าร้อยละการซึมผ่านมีค่าน้อยลง และค่าร้อยละการซึมผ่านของคอนกรีต SCC สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป การที่คอนกรีต SCC มีค่ากำลังอัดที่สูงผลเนื่องจากเนื้อคอนกรีตมีความแน่นและช่องว่างในเนื้อคอนกรีตน้อยกว่า

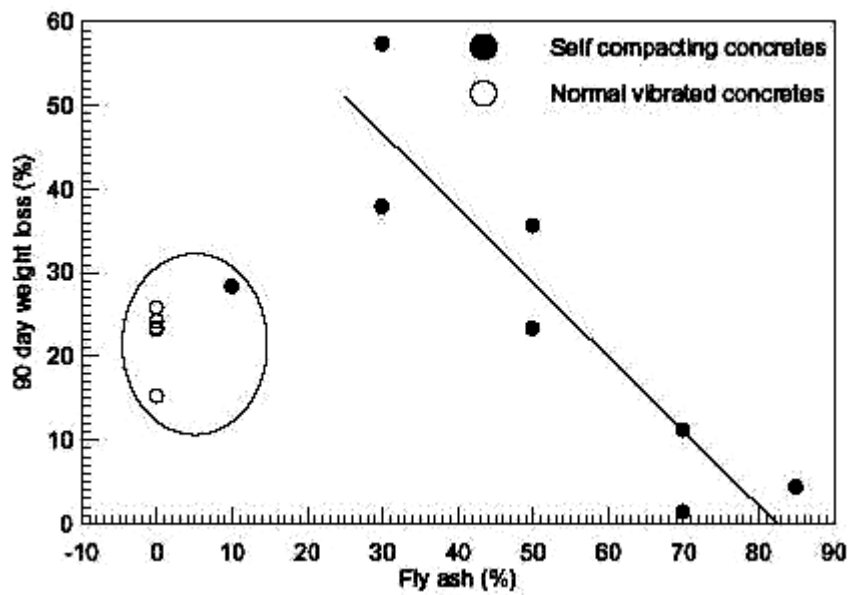
SCC คอนกรีตมีแนวโน้มต้านทานกรดได้ดีเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าถ่านหินมากขึ้น เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 11 ส่วนในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต SCC ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยมีค่าการซึมผ่านน้อยกว่า 1000 คุลอมบ์ ในงานวิจัยของ Dinakar และคณะ (2008) พบว่าคอนกรีต SCC กำลังอัดต่ำที่ 20-30 MPa สามารถใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณร้อยละ 70-85 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และคอนกรีต SCC กำลังอัดต่ำที่ 60-90 MPa สามารถใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณร้อยละ 30-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



รูปที่ 9 ผลกระทบของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการซึมผ่าน (Dinakar et al 2008)

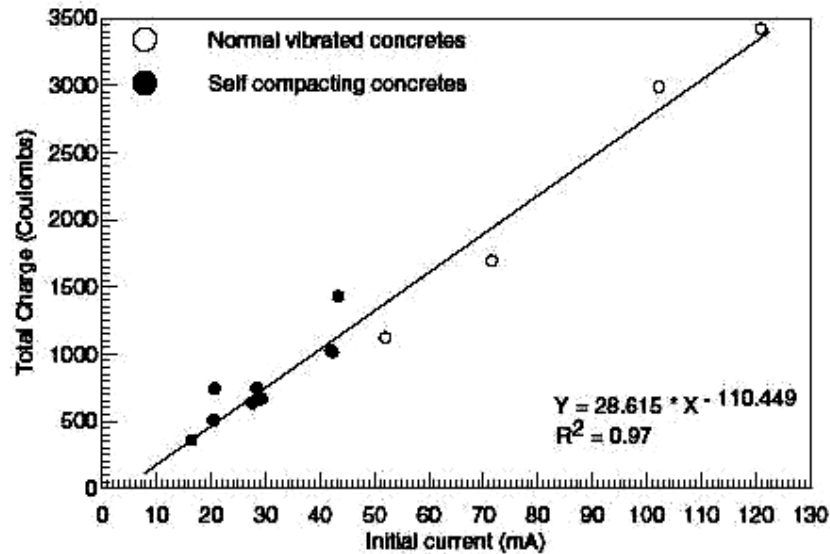


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่าน (Dinakar et al 2008)



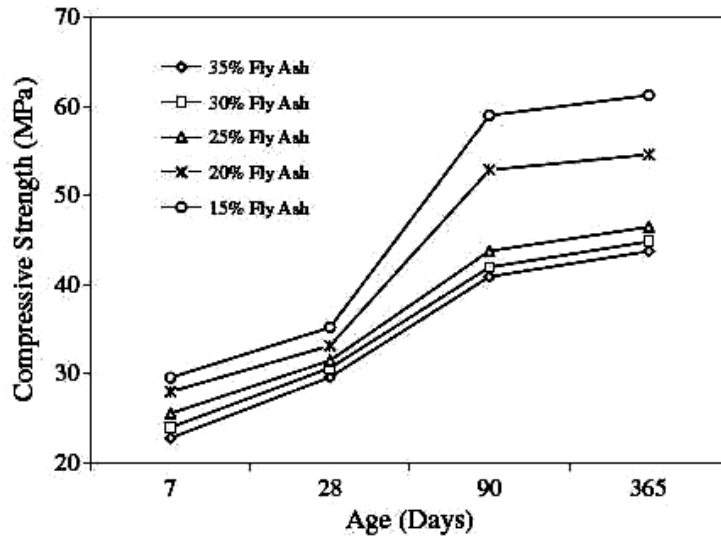
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละการแทนที่และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรด

(Dinakar et al 2008)

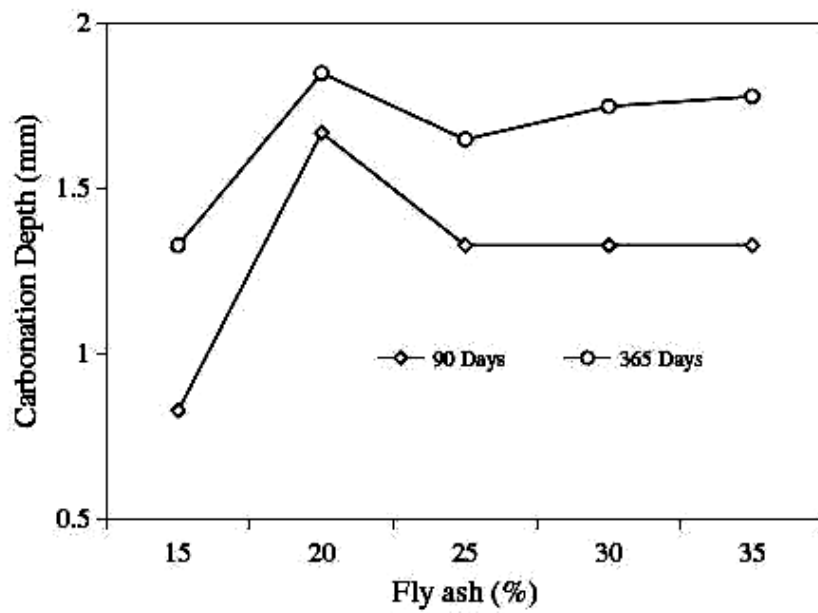


รูปที่ 12 การแทรกซึมคลอไรด์ของ SCC คอนกรีตและคอนกรีตทั่วไป (Dinakar et al 2008)

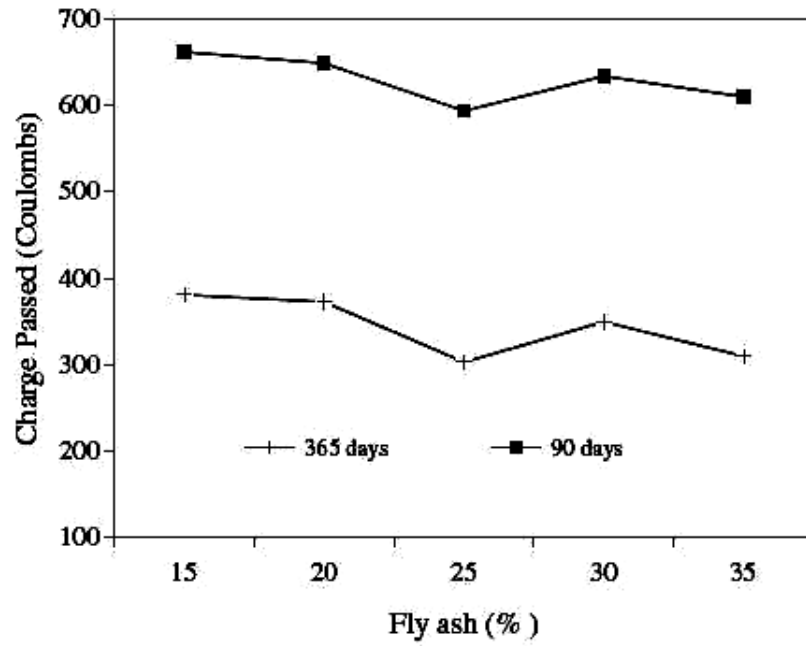
ในรูปที่ 13 แสดงผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหินร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Siddique 2011) ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 90 และ 365 วัน ตามลำดับ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหินปริมาณร้อยละ 15 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ตามด้วยการแทนที่ปริมาณร้อยละ 20, 25, 30 และ 35 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต SCC คอนกรีตสามารถต้านทานคาร์บอนเนชันได้ดี เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหินในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งการทดสอบที่อายุ 90 และ 365 วัน ดังแสดงในรูปที่ 14 อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหินถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดี (รูปที่ 15) ส่วนในรูปที่ 16 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในทุกอายุการทดสอบ (Khatib 2008)



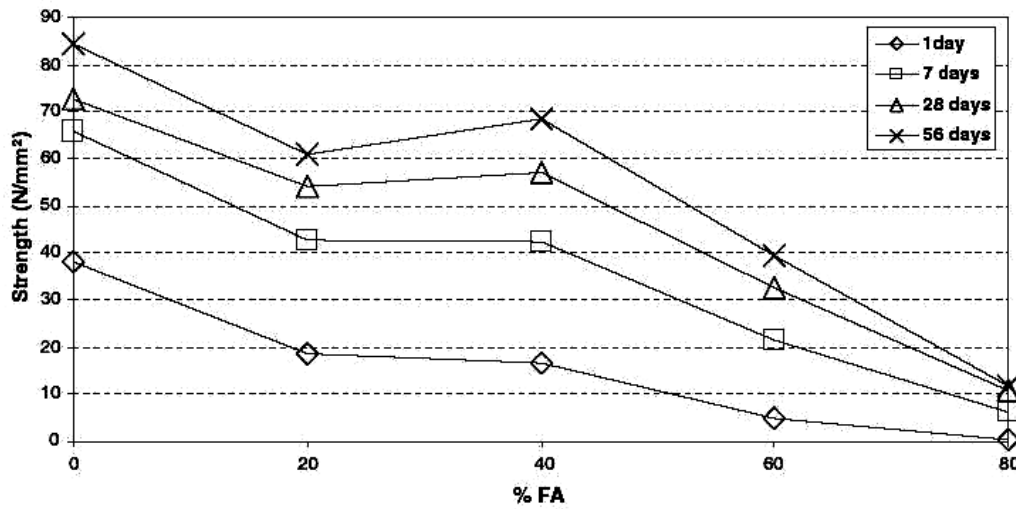
รูปที่ 13 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด (Siddique 2011)



รูปที่ 14 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินต่อการต้านทานคาร์บอนชั่น (Siddique 2011)



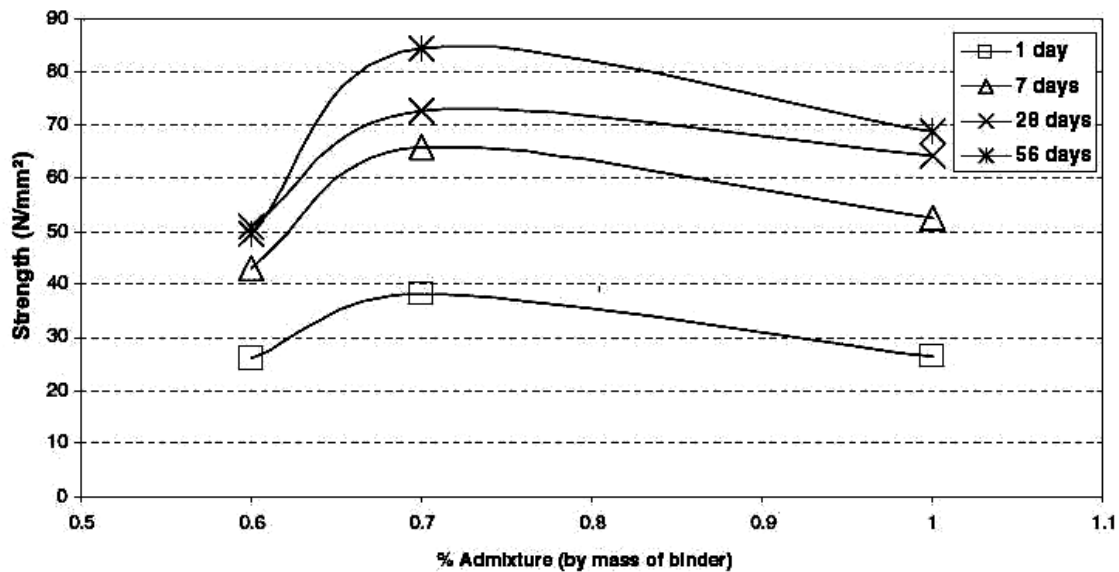
รูปที่ 15 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินต่อการต้านทานคลอไรด์ (Siddique 2011)



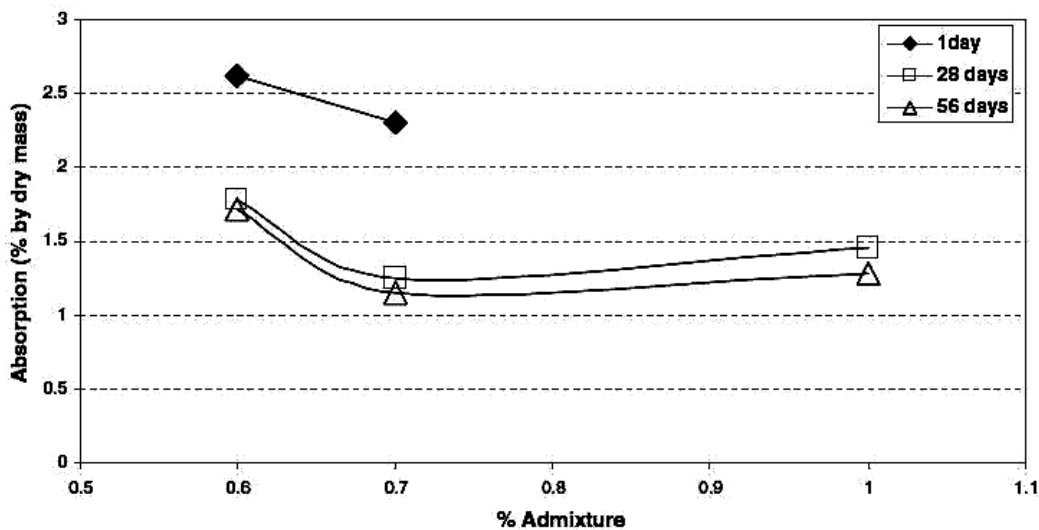
รูปที่ 16 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 56 วัน (Khatib 2008)

2.2.2 ผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อ SCC คอนกรีต

วัตถุประสงค์อย่างหนึ่งในการผลิตคอนกรีต SCC เนื่องจากต้องการแก้ปัญหาการเทคอนกรีต ในที่ซึ่งมีข้อจำกัดในการทำคอนกรีตให้แน่นด้วยการกระทุ้งหรือการจี้ ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต โดยทั่วไปอาจใช้สารผสมเพิ่มหรือสารลดน้ำพิเศษ ในรูปที่ 17 (Khatib 2008) กำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาเมื่อใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 0.6-0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ส่วนในรูปที่ 18 พบว่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยเมื่อใช้ปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 6 และ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



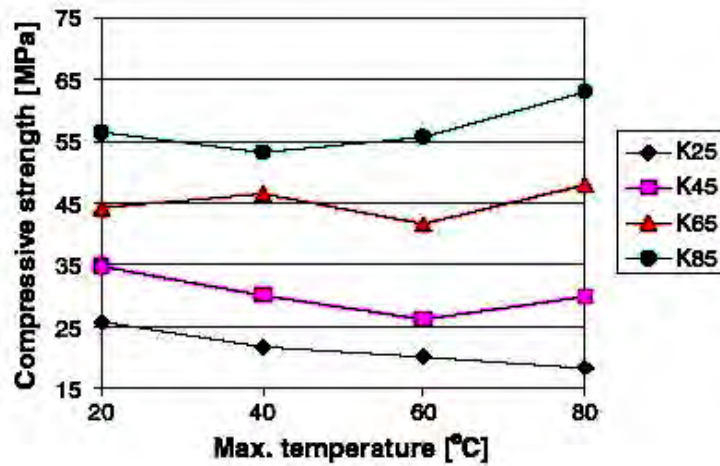
รูปที่ 17 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารลดน้ำพิเศษ) ต่อกำลังอัด (Khatib 2008)



รูปที่ 18 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารลดน้ำพิเศษ) ต่อการดูดซึมน้ำ (Khatib 2008)

2.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มต่อ SCC คอนกรีต

การบ่มคอนกรีตโดยทั่วไปอาจบ่ม ณ อุณหภูมิห้องคือ 23 ± 2 °C ส่วนในคอนกรีต SCC เราทราบถึงผลกระทบหรืออิทธิพลต่างๆ ต่อคุณสมบัติบางส่วนไปบ้างแล้ว อย่างไรก็ตาม การบ่มร้อน SCC คอนกรีตด้วยอุณหภูมิที่ต่างกันอาจยังมีไม่มาก ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจกลสมบัติของคอนกรีต SCC เพิ่มเติม ในรูปที่ 19 กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40-60 °C และกำลังอัดเริ่มเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 °C อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคอนกรีต SCC ในรูปที่ 19 ยังให้ผลที่ไม่ชัดเจนมากนัก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80 °C คอนกรีต K85 และ K65 มีค่ากำลังอัดที่สูงประมาณ 64 และ 42 MPa ตามลำดับ เนื่องจากผลของส่วนผสมที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 การบ่มร้อนด้วยอุณหภูมิของ SCC คอนกรีตส่งผลกระทบต่อขนาดการกระจายตัวของโพรงขนาดใหญ่ แต่ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาตรของโพรงทั้งหมดของคอนกรีต (Reianhardt and Stegmaier 2006) ดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21



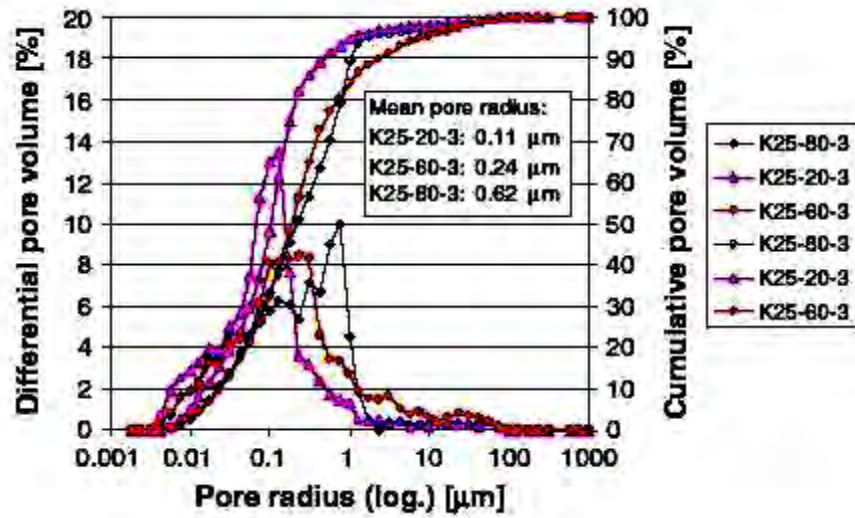
รูปที่ 19 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังอัดของ SCC คอนกรีต (Reianhardt and Stegmaier 2006)

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของ SCC คอนกรีต (Reianhardt and Stegmaier 2006)

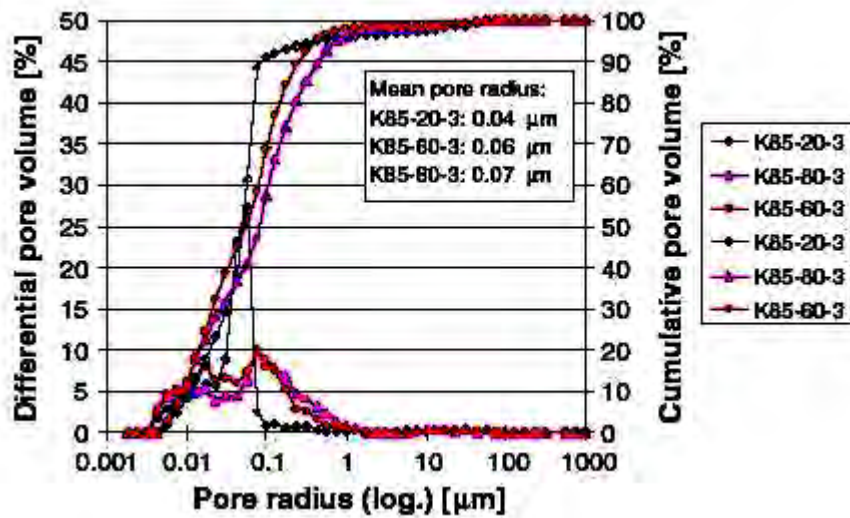
Component		K25	K45	K65	K85
Cement type ^a		CEM II/ A-LL 32.5R	CEM II/ A-LL 32.5R	CEM II/ A-LL 42.5R	CEM II/ A-LL 42.5R
Cement content	[kg/m ³]	240	300	350	500
Water	[kg/m ³]	170	166	170	185
Limestone powder	[kg/m ³]	316	104	79	0
Flyash	[kg/m ³]	0	99	119	129
Sand 0/4 mm	[kg/m ³]	746	775	751	705
Gravel 4/16 mm	[kg/m ³]	878	900	873	819
Powder content ^b	[kg/m ³]	569	516	560	643
Superplasticizer content	[mass% of cement]	1.25	1.35	1.35	1.60
Viscosity agent content	[mass% of cement]	0.20	0.10	0.10	0.10
(w/c) _{eq}	[-]	0.71	0.49	0.43	0.34

^a Powder is equal to the sum of cement, limestone powder, fly-ash, and particles ≤ 0.125 mm of aggregates.

^b According to EN 197-1.



รูปที่ 20 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อขนาดของโพรงใน SCC คอนกรีต K25
(Reianhardt and Stegmaier 2006)



รูปที่ 21 อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มต่อขนาดของโพรงใน SCC คอนกรีต K85
(Reianhardt and Stegmaier 2006)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์ตลอดจนวัสดุปอซโซลาน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบหาค่าความพรุน หรือ ปริมาณโพรง การทดสอบกำลังอัด การทดสอบการต้านทานสารเคมี

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วิธีวิจัย

วิธีวิจัย มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดแหล่งเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่จะใช้ในการวิจัย
- 2) เก็บตัวอย่างเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยดำเนินการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเถ้าทั้งดังกล่าว
- 3) ดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยนำวัสดุทั้งสองไปแยกขนาดหรือบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดวัสดุซีเมนต์ ก่อนนำมาศึกษา
- 4) ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ประกอบด้วย, ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ, ทดสอบหาปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430, ทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน ตามมาตรฐาน ASTM C 204
- 5) ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลในด้านกำลังอัด การต้านทานคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนขึ้น การต้านทานกรด และการต้านทานการกัดกร่อน ของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ปัจจัยที่ศึกษา คือ อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสานและการบ่ม และอื่นๆ ที่จำเป็นขณะศึกษา

3.2 การศึกษากำลังอัด

- 1) ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 ของคอนกรีต SCC จากเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4 ออกแบบส่วนผสม SCC ให้ได้การไหลแผ่ตามมาตรฐานสากลที่ยอมรับได้
- 2) ภายหลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงได้มีการถอดแบบบ่มในน้ำสะอาด จากนั้นนำมาทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ การทดสอบใช้ตัวอย่างทดสอบชนิดละ 3 ก้อน ตัวอย่างทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด

3.3 การทดสอบความพรุน

ทำการทดสอบความพรุน ตามมาตรฐาน ASTM C642 หรือ ASTM C1202 ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น ตามมาตรฐาน ACI หรือมาตรฐานอื่นๆ และคุณสมบัติทางกล ของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมด้วยเถ้าถ่านหิน เถ้ากำรเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ การทดสอบหาค่าความพรุนประยุกต์การทดสอบวิธีการใช้ Vacuum pump ซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมาใช้วิธีทดสอบนี้ ส่วนผสมของคอนกรีตใช้เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดและได้ให้ไว้ในตารางที่ 4 ออกแบบส่วนผสม SCC ให้ได้การไหลแผ่ตามมาตรฐานสากลที่ยอมรับได้ ซึ่งการทดสอบได้ มีรายละเอียด ดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C39

2) ภายหลังก่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงได้มีการถอดแบบบ่มในน้ำสะอาด จากนั้นนำมาทดสอบหาความพรุนที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุทดสอบ ตัดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางคือประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยให้มีความหนาประมาณด้านละ 50 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่าง 2 ชิ้น กลางเพื่อนำไปทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 22

3) นำตัวอย่างคอนกรีตวางใน Desiccators ภายใต Vacuum เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ระบบโพรงเป็นช่องว่างของอากาศและเติมน้ำกลั่น จากนั้นวัดปริมาณโพรงหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาตรโพรงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$p = \frac{(W_a - W_d)}{(W_a - W_w)} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ p คือ ความพรุนของตัวอย่างด้วย vacuum saturated หน่วยเป็นร้อยละ (%), W_a คือ น้ำหนักของตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นกรัม (g), W_d คือ น้ำหนักอบแห้งในตู้ควบคุมหลังจาก 24 ชั่วโมงที่ 100 ± 5 องศาเซลเซียส หน่วยเป็นกรัม (g) และ W_w คือ น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหน่วยเป็นกรัม (g)



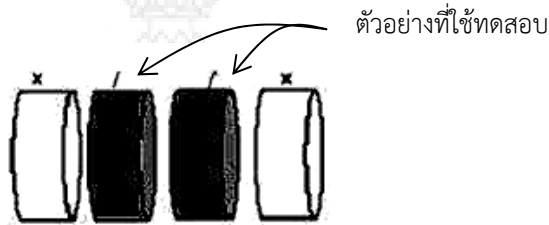
รูปที่ 22 การตัดตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบความพรุน

3.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

ทำการทดสอบการต้านทานกรดและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต SCC แก้วกันหิน และแก้วเคลือบ-เปลือกไม้ ตามมาตรฐาน ASTM C1202 จากนั้นประมวลผล วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ ในรายละเอียดเชิงลึกของผลการทดสอบ เพื่ออธิบายคุณสมบัติความทนทานของคอนกรีต SCC

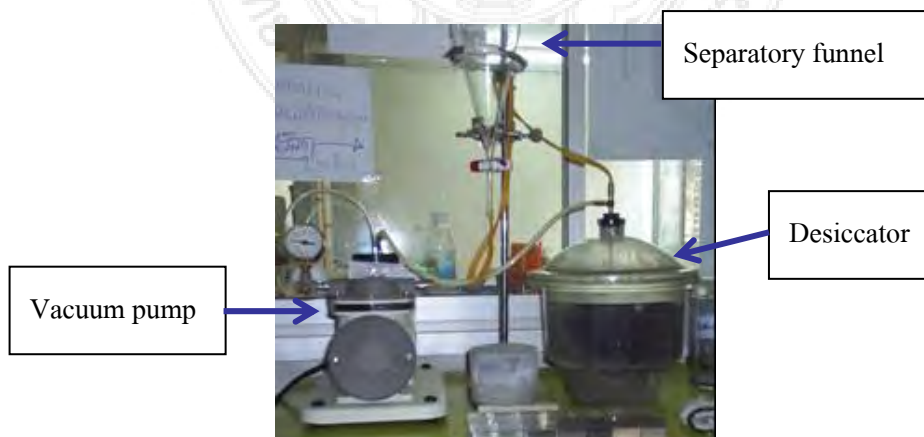
1) เตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ออกแบบไว้ในส่วนผสมต่างๆ เช่นเดียวกับตารางที่ 4 โดยออกแบบส่วนผสม SCC ให้ได้การไหลแผ่ตามมาตรฐานสากลที่ยอมรับได้

2) เตรียมตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 ภายหลังจากคอนกรีต 24 ชั่วโมง ถอดแบบและบ่มในน้ำสะอาด เมื่อครบอายุทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน จากนั้นนำมาทดสอบคลอไรด์ โดยตัดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางคือประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยให้ความหนาประมาณด้านละ 50 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่าง 2 ชิ้นเพื่อนำไปทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 23 โดยใช้ส่วนที่แรงงาไปทดสอบ



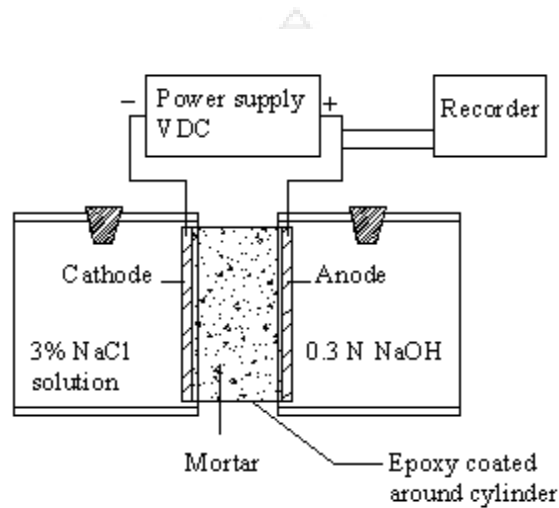
รูปที่ 23 ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดไปทดสอบ

3) หลังเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบโดยรอบด้วยอีพอกซี 1 วัน นำตัวอย่างทดสอบวางในโถแก้ว (Desiccator) จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในกรวยแก้ว (Separatory funnel) เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อให้ระบบโพรงของตัวอย่างทดสอบมีเฉพาะอากาศ จนครบเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเปิดวาล์วทางเดินน้ำกลั่นจากกรวยแก้วลงโถแก้ว และเดินเครื่องปั๊มสุญญากาศต่อไปอีก 1 ชั่วโมง แล้วปิดเครื่องและแช่ตัวอย่างทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 16 ถึง 20 ชั่วโมง ชุดทดสอบการอิมมิตด้วยน้ำแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 อุปกรณ์การทำให้ตัวอย่างทดสอบอิมมิตด้วยน้ำ

4) นำตัวอย่างขึ้นจากการแช่น้ำกลั่นใน Desiccator ข้างต้น จากนั้นนำตัวอย่างใส่ในเซลล์ทดสอบจากนั้นประกอบเซลล์ทั้งคู่และตัวอย่างทดสอบเข้าด้วยกัน ต่อจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (3% NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.3 N (0.3 N NaOH) ลงในเซลล์ขั้วลบและขั้วบวก ตามลำดับ จากนั้นประกอบชุดการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ RCPT

ทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต โดยอ้างอิงปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต ทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ของคอนกรีตโดยใช้แรงดันในการทดสอบเท่ากับ 60 โวลต์ ระยะเวลาในการทดสอบ 6 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C1202 และใช้สมการคำนวณดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (6)

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้

Q = กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบหรือ Charge passed (Coulombs)

I_0 = ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้า (Amperes)

I_t = ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างที่ระยะเวลา t นาที

ในตารางที่ 5 เป็นค่าการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตซึ่งวัดด้วยผลรวมของประจุไฟฟ้า (Coulombs) จากมาตรฐานของ ASTM C1202 ยกตัวอย่าง เช่น หากค่าของ Charge passed มีค่ามากกว่า 4000 Coulombs คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์ที่สูง และหากค่าของ Charge passed มีค่าเท่ากับ 100-1000 Coulombs คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยมาก เป็นต้น

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีตและซีเมนต์เพสต์ SCC ที่ใช้ศึกษา

Mix	Mix Proportions			
	OPC	Fly Ash	Ground rice husk-bark ash	Ground bottom ash
		FA	GRHBA	GBTA
OPC	100	-	-	-
20FA	80	20	-	-
30FA	70	30	-	-
40FA	60	40	-	-
20GRHBA	80	-	20	-
30GRHBA	70	-	30	-
40GRHBA	60	-	40	-
20GBTA	80	-	-	20
30GBTA	70	-	-	30
40GBTA	60	-	-	40

หมายเหตุ: จากตารางที่ 4 ในส่วนของปริมาณน้ำ สารลดน้ำพิเศษ ทรายและหิน จะคำนวณออกแบบขณะทดสอบ

ตารางที่ 5 การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตในพื้นที่ฐานการคำนวณคูลอมบ์ มาตรฐาน ASTM C1202

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion permeability
> 4000	High
2000–4000	Moderate
1000–2000	Low
100–1000	Very low
<100	Negligible

3.5 การทดสอบการต้านทานคาร์บอนเข็น

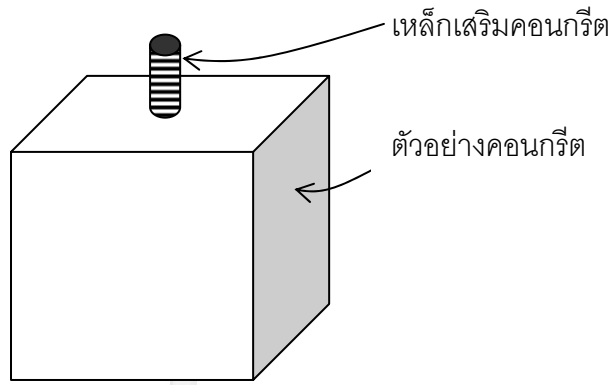
การทดสอบคาร์บอนเข็นใช้ตามมาตรฐาน ASTM C348 โดยใช้วิธีการเร่งการทดสอบ ใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 5 ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50 ในอุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 23.2°C ความลึกคาร์บอนเข็นวัดด้วยการใช้สารละลายฟีนอลปรอรีนร้อยละ 1 ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 70 คอนกรีตตัวอย่างบ่มที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน จากนั้นนำไปทดสอบในตู้ควบคุมคาร์บอนเข็นแบบเร่งระยะเวลาทดสอบ 30 วัน

3.6 การทดสอบการต้านทานกรด

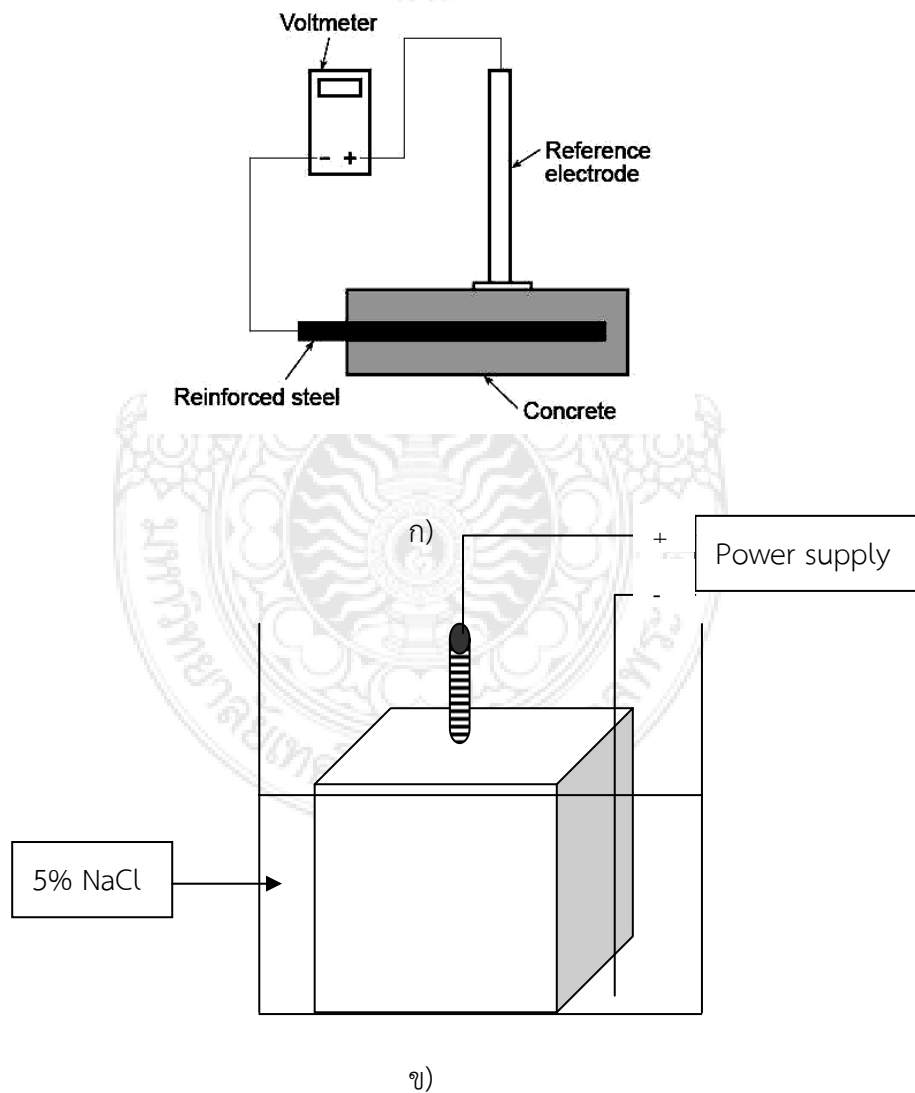
ทดสอบโดยนำตัวอย่างคอนกรีต SCC แซในสารละลายกรดซัลฟูริก และวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอนกรีตกำลังสูงเมื่อแซในสารละลายกรดซัลฟูริก ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ถึง 200 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ใช้ หลังจากเทหล่อตัวอย่างเสร็จ 24 ชั่วโมง และแกะตัวอย่างออกจากแบบ ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน นำตัวอย่างไปแช่สารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 0.5 ภาชนะใส่สารละลายกรดซัลฟูริกจะหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อไม่ให้ไอระเหย แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างมีอายุภายหลังการแช่ครบ 180 วัน ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยทำความสะอาดและเช็ดผิวให้แห้ง วัดน้ำหนักของตัวอย่าง ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้เท่ากับ 4 เท่าของปริมาตรตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง และเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 1 สัปดาห์

3.7 การทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ใช้คอนกรีตขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม.³ ด้วยการเสริมเหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ในบริเวณส่วนกลางของตัวอย่างคอนกรีต (ดังแสดงในรูปที่ 26) หลังถอดแบบตัวอย่าง 1 วัน (24 ชั่วโมง) นำตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบโดยนำไปทดสอบด้วยแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (3% NaCl) เมื่อครบอายุการทดสอบทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์การกัดกร่อนตามมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ASTM C876 ดังแสดงในรูปที่ 27 ก) หรือหากพบข้อจำกัดในการทดสอบในครั้งนี้ อีกทั้งเพื่อให้ได้งานทดสอบที่มีประสิทธิภาพ และศึกษาด้านการกัดกร่อนได้ดี อาจทดสอบแบบเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 27 ข) โดยใช้คอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มิลลิเมตร เสริมด้วยเหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ตามขนาดแสดงในรูปที่ 27 หลังถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบโดยนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 ตามรูปที่ 27 โดยให้ส่วนที่เป็นสารละลายเป็นขั้ว Cathode และเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นขั้ว Anode ระหว่างทั้งสองขั้วให้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ดี ซี (12 volt DC) พิจารณาการวิบัติหรือรอยแตกเริ่มแรกที่มองเห็นบันทึกค่าระยะเวลาที่มอร์ตาร์เริ่มแตก ส่วนผสมคอนกรีตในตามตารางที่ 4 ออกแบบส่วนผสม SCC ให้ได้การไหลแผ่ตามมาตรฐานสากลที่ยอมรับได้



รูปที่ 26 การเสียบเหล็กในตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 27 ตัวอย่างการติดตั้งการทดสอบ ก) ตามมาตรฐาน ASTM C876 ข) แบบเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้า

3.2 วิธีเก็บข้อมูล

การศึกษาการผลิตคอนกรีตเทไหลเข้าแบบได้ง่ายและต้นทุนต่ำด้วยการใช้เถ้าทิ้งผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีวิธีการเก็บและรวบรวมแหล่งข้อมูลใช้งานวิจัย ดังนี้

1) ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าทิ้งดังกล่าว ทำการศึกษาข้อมูลย้อนหลังจนถึงปัจจุบันขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และรวบรวมเก็บข้อมูลประวัติการกองทิ้งเถ้าทิ้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลคัดเลือกเก็บตัวอย่าง

2) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จะมีวิธีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ทดสอบ ณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบันทึกผลการทดสอบตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยขอนแก่นและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3) ทำการบันทึกผลการทดสอบของชุดทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ตามเงื่อนไขของตัวแปรที่ศึกษา โดยใช้เครื่องกดทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

4) ทำการบันทึกผลทดสอบหาคูณสมบัติพื้นฐาน ของตัวอย่างคอนกรีต ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

5) ทำการบันทึกผลทดสอบกำลังอัด โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

6) ทำการบันทึกผลทดสอบความพรุน โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

7) ทำการบันทึกผลทดสอบการต้านทานคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนเนชั่น การต้านทานกรด และการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

3.3 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล

1) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุปอซโซลานและปูนซีเมนต์

2) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัด เมื่อมีตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนผสมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

3) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบความพรุน เพื่อหาอัตราส่วนผสมและปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

4) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์ผลการทดสอบการต้านทานคลอไรด์ การต้านทานคาร์บอนเนชัน การต้านทานกรด และการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต SCC เมื่อมีตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนผสมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา และเถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียด

5) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์รายละเอียดเชิงลึกของผลการทดสอบ

3.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

แผนการดำเนินงานแสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แผนงานโครงการวิจัย (ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี หรือ 12 เดือน)

ลำดับ	แผนการดำเนินงาน	เดือนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	วางแผนการทดสอบ	↔											
2	การเตรียมวัสดุตัวอย่างทดสอบ	↔											
3	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุ		↔										
4	วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุ			↔									
5	ออกแบบส่วนผสมตัวอย่างทดสอบ			↔									
6	ใช้ตัวอย่างทดสอบที่ออกแบบไว้			↔									
7	ดำเนินการทดสอบ			←								→	
8	สรุปผลวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนที่แล้วเสร็จ					←						→	
9	จัดทำรายงาน ถ่ายทอดเทคโนโลยีและเผยแพร่ผลงาน								←				→

3.5 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)

14.1. ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัยที่มีอยู่

1. Compressive machine
2. Sieve analysis
3. Mold cube และ cylinder
4. เครื่องผสมคอนกรีต

14.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการซื้อ

1. อุปกรณ์ชุดบดวัสดุ
2. เครื่องแก้ว
3. สารเคมี HCl-AgNO₃- Superplasticizer-NaOH- BufferpH- NaCl
4. แผ่นทองเหลืองขนาดหนา 0.5-1.0 มิลลิเมตร
5. หม้อผสมเพสต์
6. ใบบายผสมเพสต์
7. ถูมมือกันสารเคมี
8. แวนตอกันสารเคมี
9. Epoxy
10. ซิลิโคน
11. น้ำกลั่น
12. ทรายและหิน
13. วัสดุปอซโซลาน
14. ปูนซีเมนต์
15. เหล็กเสริมคอนกรีต
16. บีกเกอร์ขนาด 1000 ml
17. ขวดสีชาสำหรับ AgNO₃
18. ใบบิดตัดคอนกรีต

3.6 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

FA = ถ้ำถ่านหินแยกขนาด มีปริมาณร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

GRHBA = ถ้ำแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด มีปริมาณร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

GBTA = ถ้ำหนักขนาดบดละเอียด มีปริมาณร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

CT = คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ OPC ล้วน

20FA = คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30FA = คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40FA = คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GRHBA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GRHBA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GRHBA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GRHBA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBTA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBTA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBTA = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBTA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต SCC ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและนำมาวิเคราะห์ผลในด้านของกำลังอัด ความพรุน การต้านทานคลอไรด์ คาร์บอนเนชัน การกัดกร่อนด้วยการใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 กำลังอัดของคอนกรีต SCC

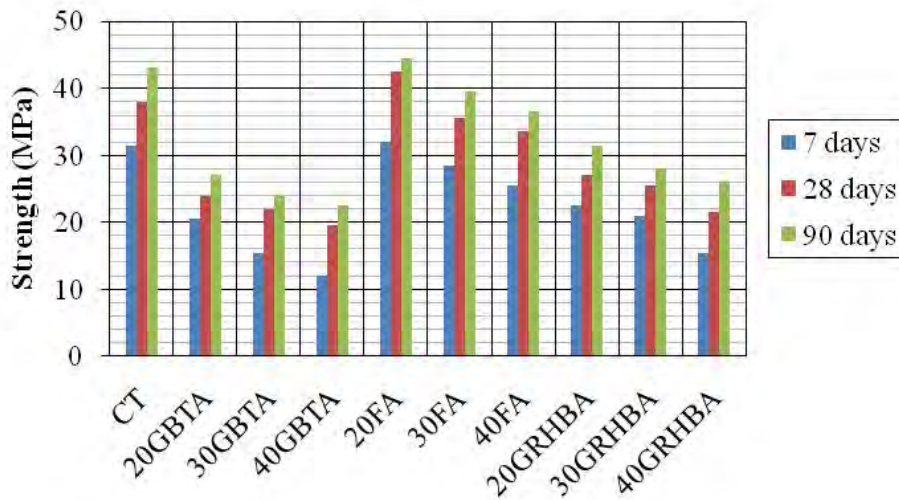
ในรูปที่ 28-31 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต SCC และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานกับกำลังอัดของคอนกรีต SCC ซึ่งวัสดุปอซโซลานประกอบด้วย FA, GBTA และ GRHBA โดยกำหนดให้คอนกรีต CT คือคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมล้วนสำหรับใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบ ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีต CT ยกเว้นคอนกรีต 20FA ที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT เล็กน้อย นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังพบอีกว่า ที่อายุ 28 และ 90 วัน กำลังอัดของ SCC คอนกรีต มีแนวโน้มคล้ายกันกับที่อายุ 7 วัน กล่าวคือ กำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีต CT โดยที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีต 20FA มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT เล็กน้อยเช่นเดียวกับที่อายุ 7 วัน

การใช้ GBTA แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต SCC คอนกรีตของงานวิจัยนี้ ให้ค่ากำลังอัดต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT, FA และ GRHBA ในทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงการนำไปใช้ในงานภาคสนามที่ต้องการกำลังอัดอยู่ในช่วง 22-24 MPa หรือประมาณ 220-240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ก็สามารถนำไปผลิตเป็นคอนกรีต SCC ได้เช่นเดียวกัน

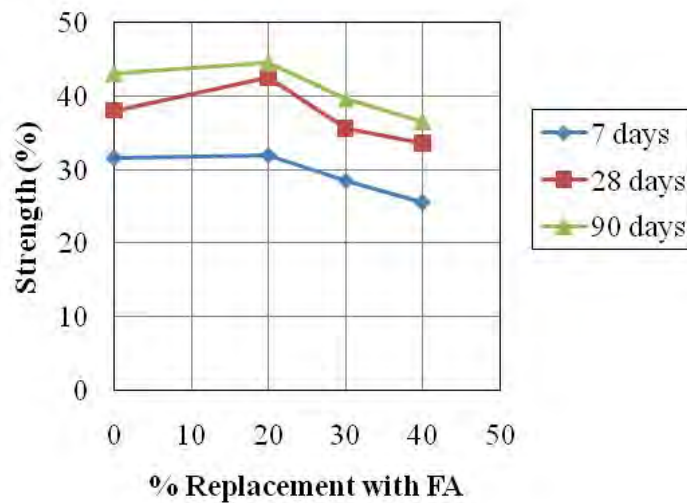
คอนกรีต FA มีค่ากำลังอัดสูงสุดตามด้วย คอนกรีต GRHBA และ GBTA ตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก และกลมตันของ FA ช่วยอุดช่องว่างภายในโพรงเพสต์ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยา ปอซโซลายได้ดี (Chindaprasirt et al 2005; Chindaprasirt et al 2007b) การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วย GBTA และ GRHBA มีแนวโน้มส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต SCC มีค่าต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 30-31 อย่างไรก็ตาม การใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของ SCC สูงขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุปอซโซลานอื่น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 29-31) อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการใช้งานจริงในภาคสนาม พบว่า ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 24-42.5 MPa คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 22-39.5 MPa ส่วนคอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 40

โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 19.5-33.5 MPa ดังนั้นสามารถนำส่วนผสมของ SCC ไปใช้ประยุกต์ใช้งานจริงได้เมื่อต้องการกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 19.5-42.5 MPa หรือประมาณ 195-425 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

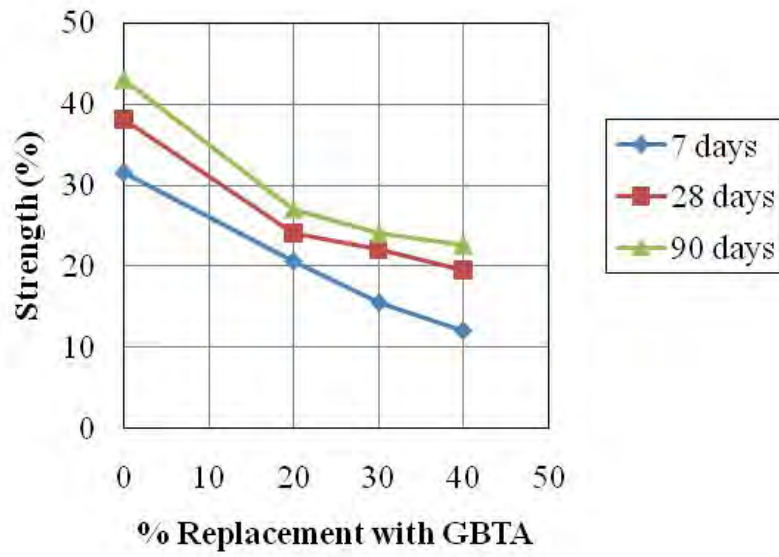
ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย GRHBA ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 21-27 MPa หรือประมาณ 210-270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ GRHBA ที่มีค่าสูงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดละเอียดให้เล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วเพิ่มการยึดเกาะระหว่างมวลรวมและเพสต์จึงทำให้กำลังอัดสูงขึ้น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของ GRHBA ที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างต่างๆ ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น (Mrtha 1987; Chindaprasirt et al 2008; Rukzon and Chindaprasirt 2010)



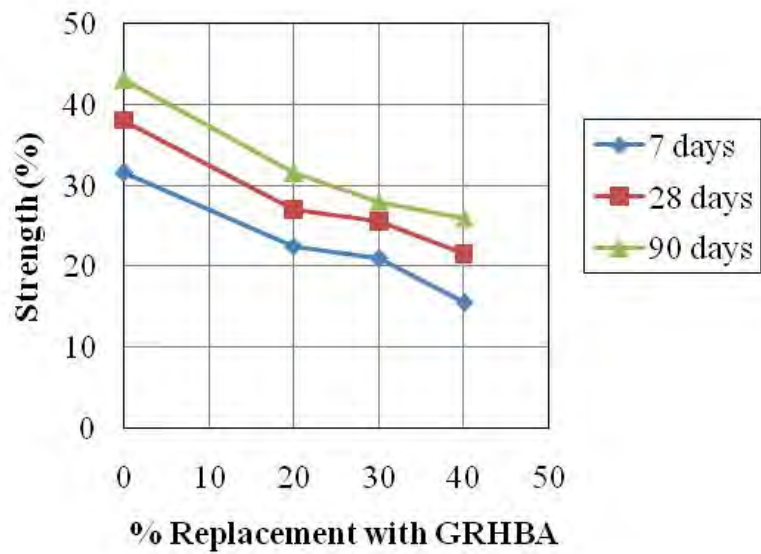
รูปที่ 28 กำลังอัดของคอนกรีต SCC ผสมวัสดุปอซโซลาน



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBTA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC



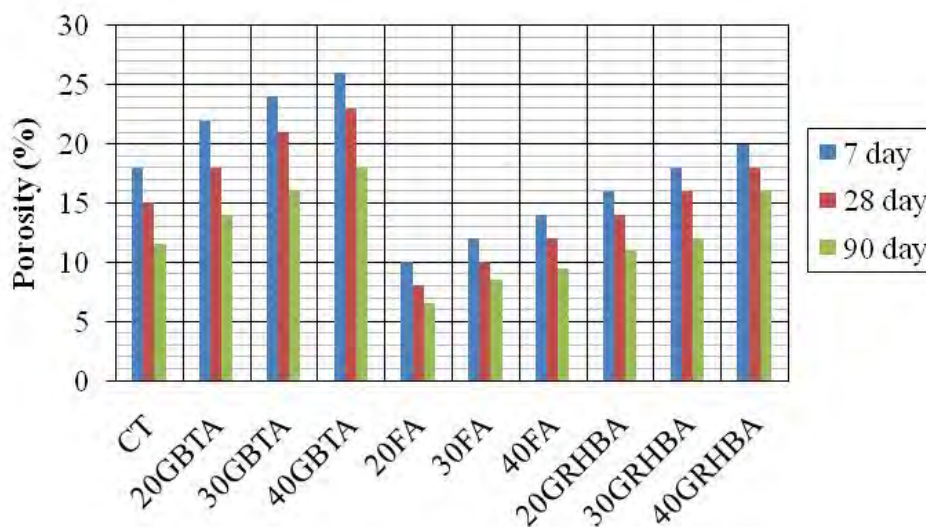
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GRHBA และกำลังอัดของคอนกรีต SCC

4.2 ความพรุนของคอนกรีต SCC

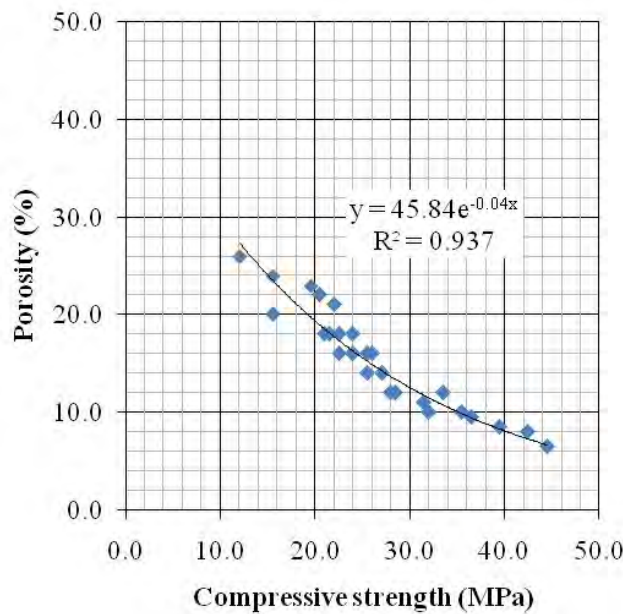
ในรูปที่ 32 แสดงผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีต SCC ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีต FA มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT, GBTA และ GRHBA เนื่องจากการใช้ FA สามารถเข้าไปปรับปรุงขนาดของโพรงและลดความพรุนของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น (Rukzon and Chondaprasirt 2006; Rukzon and Chindaprasirt 2010; Rukzon and Chindaprasirt 2011) เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA ส่งผลให้ร้อยละความพรุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต นอกจากนี้ ผลการทดสอบพบว่าความพรุนของคอนกรีต SCC ทั้งหมดลดลงเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น

SCC คอนกรีตที่ผสมด้วย GRHBA ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน มีค่าความพรุนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT เนื่องจากอนุภาคที่เล็กของ GRHBA เข้าไปอุดและแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของโพรงและพื้นที่ผิวที่สูงของ GRHBA เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เฟสได้เร็ว (Leng et al 2000; Neville 1995; Rukzon and Chindaprasirt 2011) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ GRHBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ พบว่าความพรุนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากความพรุนในตัวของ GRHBA ยังคงมีอยู่ (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2553; สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552) การเพิ่มค่าร้อยละของความพรุน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของวัสดุปอซโซลาน จึงต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยที่อายุต้น ด้วยเหตุผลนี้แม้ว่าความพรุนเพิ่มขึ้น แต่มีผลทางที่ดีในด้านการจัดเรียงหรือปรับปรุงขนาดของโพรงในคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุปอซโซลาน เนื่องจากการเพิ่มของปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยวัสดุประสาน การเพิ่มอายุการบ่มส่งผลให้ความพรุนลดลง (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2553; สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552)

การใช้ GBTA ส่งผลให้ร้อยละความพรุนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับในทุกส่วนผสม และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น ส่วนในรูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีต SCC ซึ่งพบว่าเมื่อความพรุนลดลงส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น



รูปที่ 32 ความพรุนของคอนกรีต SCC ผสมวัสดุปอซโซลาน

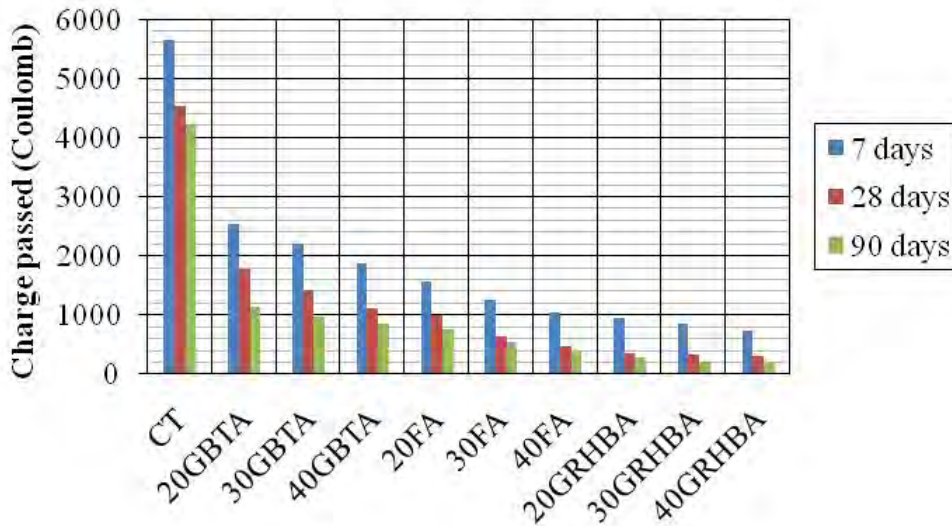


รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีต SCC

4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต SCC

ในรูปที่ 34 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของ SCC คอนกรีต ที่อายุการทดสอบ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต SCC ลดลง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น (Chindaprasirt et al 2007a; Chindaprasirt et al 2007b; Rukzon and Chindaprasirt 2011) เนื่องจากปริมาณที่สูงกว่าของ Al_2O_3 ใน FA สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กลายเป็นแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) จากนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนคลอไรด์กลายเป็นผลึกเกลือฟิเดล ดังนั้นจึงลดการซึมผ่านได้ (Leng et al 2000; He et al 2001) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ SCC คอนกรีตลดค่าปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า SCC คอนกรีตผสมด้วย FA ด้านทานคลอไรด์ได้ดี

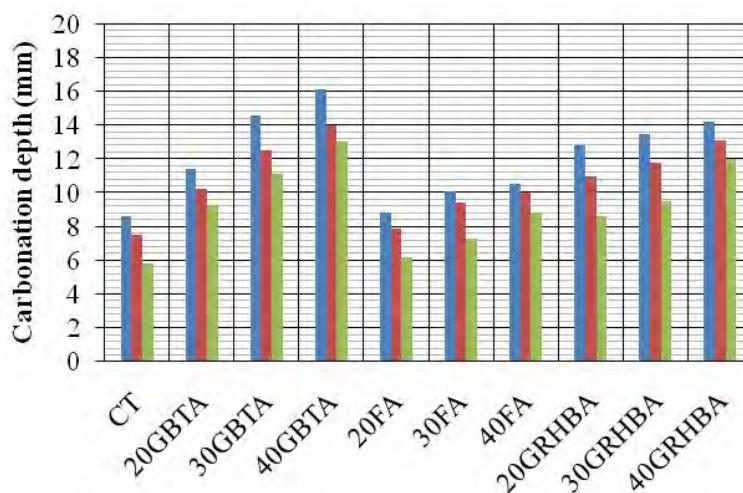
ในรูปที่ 34 พบว่า การใช้ GBTA ด้านทานคลอไรด์ได้ดี เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม GRHBA ด้านทานคลอไรด์ดีที่สุด ตามด้วย FA และ GBTA ปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีต GRHBA ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต CT เนื่องจาก GRHBA มีองค์ประกอบเคมีหลักคือซิลิกา หรือ SiO_2 (Ganesan et al 2007; Chindaprasirt et al 2007c) ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับ SiO_2 คือ CHS (Neville 1995) ซึ่งเพิ่มทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น การทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GRHBA พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง เนื่องจากเมื่อเติม GRHBA ให้มีความละเอียด ส่งผลให้มีอนุภาคมีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างหรือในโพรงในคอนกรีตและขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี (Mrtha 1987; Chindaprasirt et al 2008; Rukzon and Chindaprasirt 2011)



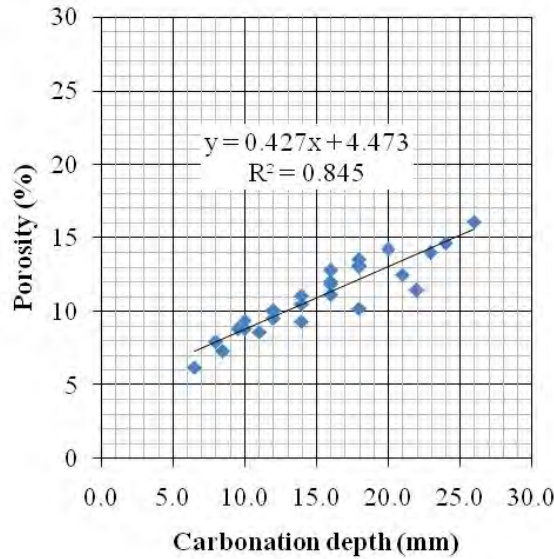
รูปที่ 34 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต SCC

4.4 การต้านทานคาร์บอนเนชันของคอนกรีต SCC

ในรูปที่ 35 แสดงผลการทดสอบคาร์บอนเนชันของ SCC คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน พบว่ามีค่าความลึกของคาร์บอนเนชันสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน (CT) ในทุกส่วนผสม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้ความลึกคาร์บอนเนชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง หากต้องใช้วัสดุปอซโซลานในคอนกรีตสำหรับต้านทานคาร์บอนเนชัน ควรปรับปรุงให้มีความละเอียดมากขึ้น (Rukzon and Chindaprasirt 2010) ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและคาร์บอนเนชันของคอนกรีต SCC แสดงในรูปที่ 36 พบว่า เมื่อความพรุนต่ำ ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าลดลง



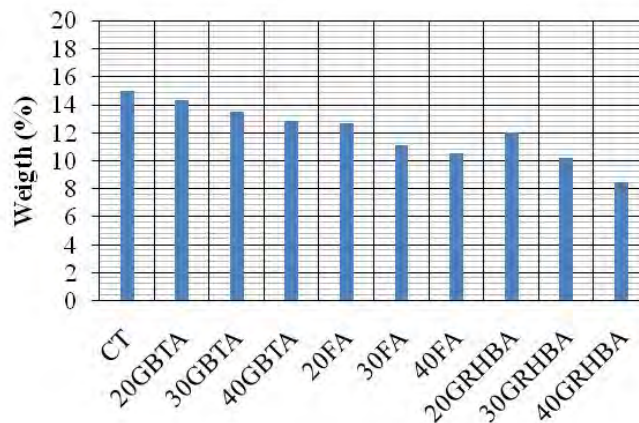
รูปที่ 35 การต้านทานคาร์บอนเนชันของคอนกรีต SCC



รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและคาร์บอนเนชันของคอนกรีต SCC

4.5 การต้านทานกรดของคอนกรีต SCC

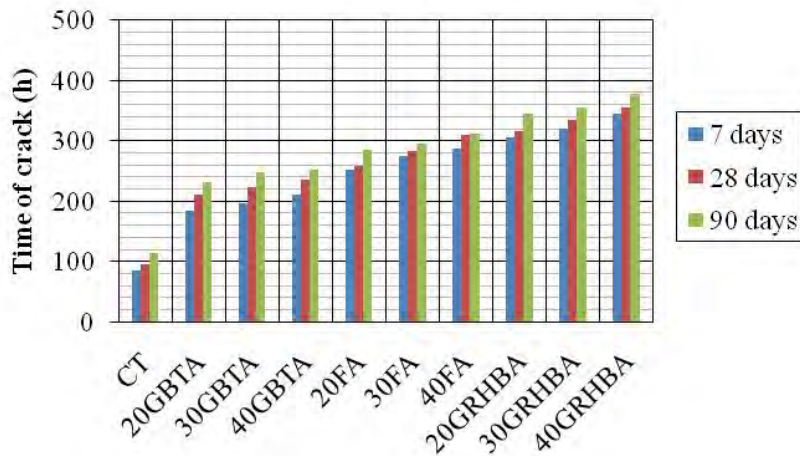
ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ SCC คอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก แสดงในรูปที่ 37 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่ออายุทดสอบเพิ่ม เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมสามารถต้านทานกรดได้ดีกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนหรือคอนกรีตปกติ การที่คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนจากกรดไม่ด่าง เนื่องจากมีความเป็นด่างสูงคอนกรีตจึงถูกทำลายจากกรดได้ง่าย (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2553) ผลการทดสอบครั้งนี้มีแนวโน้มว่า GRHBA ต้านทานกรดได้ดี ตามด้วย FA และ GBTA เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมีหลักที่สามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ต่ำลง ซึ่งการกัดกร่อนจากกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนั้น ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดน้อยลง



รูปที่ 37 การต้านทานกรดของคอนกรีต SCC

4.6 การกักร่อนของคอนกรีต SCC

ผลการทดสอบการกักร่อนแบบแรงแสดงไว้ในรูปที่ 38 พบว่า Time of first crack ของคอนกรีต CT มีระยะเวลาการวิบัติที่น้อยกว่าคอนกรีตในทุกส่วนผสม ส่วนคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมมีระยะเวลาการวิบัติมีค่าสูงขึ้น ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุปอซโซลานใน SCC คอนกรีตสามารถต้านทานการกักร่อนได้ดี เนื่องจากใช้ระยะเวลาการวิบัติที่นานกว่าคอนกรีตปกติ และเมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับ การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์พบว่าผลการทดสอบการกักร่อนแบบแรงนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ แตกต่างกันเพียงหน่วยของการวัดเท่านั้น ในการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการวิบัติของ SCC คอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งผลการทดสอบคล้ายงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น (สำเร็จ รักซ้อน และคณะ 2552; สำเร็จ รักซ้อน 2550; Chindaprasirt and Rukzon 2008) การใช้วัสดุปอซโซลานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วและลดปริมาณทรานสปอร์ในเพสต์ (Zhang and Malhotra 1996)



รูปที่ 38 การกักร่อนของคอนกรีต SCC

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และแนวทางต่อการวิจัยอย่างต่อเนื่องในการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนสำหรับใช้ในงาน SCC คอนกรีต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนในการผลิต SCC คอนกรีต สามารถสรุปได้ ดังนี้

1) เถ้าถ่านหิน (FA) เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (GRHBA) และเถ้าหนัก (GBTA) เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถใช้ในการผลิตคอนกรีต SCC ได้ โดยให้ค่ากำลังอัดที่ดี ต้านทานคลอไรด์ และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

2) เถ้าถ่านหิน (FA) เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (GRHBA) และเถ้าหนัก (GBTA) สามารถใช้ผลิตเป็นคอนกรีต SCC ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ตามความเหมาะสม หากพิจารณาปริมาณการแทนที่เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สามารถเลือกใช้กับงานจริงได้ดังนี้

2.1) คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 24-42.5 MPa

2.2) คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 22-39.5 MPa

2.3) คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 19.5-33.5 MPa

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงการใช้เถ้าถ่านหิน (FA) เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (GRHBA) และเถ้าหนัก (GBTA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้ผลทดสอบในทางที่ดี อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยังต้องการศึกษาและควรทดสอบคุณสมบัติอื่นเพิ่มเติม ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในกระบวนการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจากเถ้าทิ้ง เพื่อที่จะสร้างช่องทางจำหน่ายเถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมได้อีกหนึ่งช่องทาง ซึ่งเป็นการพัฒนาเถ้าทิ้งดังกล่าวนี้ให้เกิดประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าหรือเปลี่ยนจากของไม่มีมูลค่าให้มีมูลค่าขึ้น ข้อควรระวังในการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้ต้องพิจารณาผลของมวลละเอียดยิ่ง เนื่องจากการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนบางชนิดมาใช้หากมีขนาดใหญ่และความพรุนสูงอาจส่งผลให้การรับกำลังอัดลดลง

เอกสารอ้างอิง

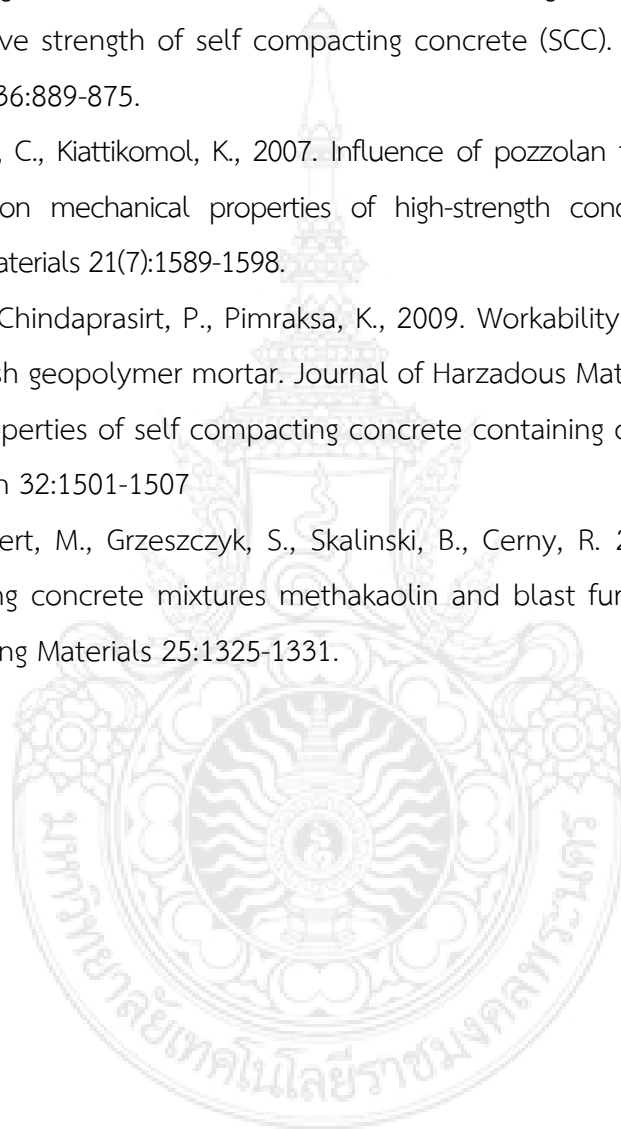
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2553. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต พิมพ์ครั้งที่ 6 : กรุงเทพฯ, สมาคมคอนกรีตไทย 1-381.
- สำเร็จ รักซ้อน, ฉัตรชัย เขียวทรัพย์, นิโรจน์ เงินพรหม. 2552. การใช้เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 1-118.
- สำเร็จ รักซ้อน. 2550. คาร์บอนชั้นและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมวัสดุปอซโซลาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- 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 Standard 04.02:310-313.
- Brouwers, H.J.H., Radix, H.J. 2005. Self compacting concrete: Theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research 35:2116-2136.
- Cheng, A. 2011. Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. Materials and Design doi:10.1016/j.matdes.2011.05.003
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T. 2005. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement and Concrete Composites 27(4), 425-428.
- Chindaprasirt, P., Chotitanorm, C., Cao, HT., Sirivivatnanon, V., 2007a. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. Construction and Building Materials 21:356-361.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V., 2007b. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. Construction and Building Materials 22:932-938.
- Chindaprasirt, P., Homwuttivong, D., Jaturapitakkul, C. 2007c. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. Construction and Building Materials 21:1492-1499.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V. 2008. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. Constr Build Mater 22(8), 1701-1707.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., 2008, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601-1606.
- Dinakar, P., Babu, K.G., Santhanam, M. 2008. Durability properties of high volume fly ash self compacting concrete. *Cement and Concrete Composites* 30:880-886.
- He, X., Chen, Y., Ma B., Li Y., Zhang, H., Zhang, W. 2001. Studies on small ionic diffusivity concrete. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology* 319-331.
- Khatib, J.M. 2008. Performance of self compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials* 22:1963-1971.
- Kim, H.K., Lee, H.K., 2010. Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, Article inpress.
- Leng, F., Feng, N., Lu, X. 2000. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research* 30(6), 989-992.
- Makaratat, N., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. 2004. Utilization of rice husk-bark ash as a cement replacement. In: *Proceedings of the first international conference of Asian concrete federation*, Thailand: 650-659.
- Mehta, PK., 1987. Studies on the mechanisms by which condensed silica fume improves the properties of concrete: durability aspects. [In] *Proceedings of International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete*, Ottawa 17.
- Neville, AM. 1995. *Properties of concrete*. 4th and Final Edition. Malaysia: Longman Group Limited.
- Rukzon, S., Chindaprasirt, P. 2006. Strength of ternary blended cement mortar containing Portland cement, rice husk ash and fly ash. *Journal of Engineering Institute of Thailand* 17(2), 33-38.
- Rukzon, S., Chindaprasirt, P. 2010. Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(3), 253-259.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Rukzon, S., Chindaprasirt, P. 2011. Chloride penetration and corrosion resistance of ground fly ash blended cement mortar. *International of Materials Research* 102(3):335-339.
- Reianhardt, H-W., Stegmaier, M. 2006. Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self compacting concrete (SCC). *Cement and Concrete Research* 36:889-875.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2007. Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials* 21(7):1589-1598.
- Sathonsaowapark, A, Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of Harzadous Materials* 168:44-50.
- Siddique, R. 2011. Properties of self compacting concrete containing class F fly ash. *Materials and Design* 32:1501-1507
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skalinski, B., Cerny, R. 2011. Properties of self compacting concrete mixtures methakaolin and blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 25:1325-1331.



ภาคผนวก

ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย

1. ชื่อ หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน (Asst. Prof. Dr. Sumrerng Rukzon)
2. รหัสประจำตัว 3180500327908
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ถนนพิบูลสงคราม
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ +6602282 9009-15 ต่อ 6176
โทรสาร +6602 628 9191-3 ต่อ 412 มือถือ 0879454133
E-mail: rerng197@rmutp.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปี พ. ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2537-2539	ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เทเวศร์ ประเทศไทย
2543-2545	ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศไทย
2547-2550	ปริญญาเอก	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

โครงสร้างเชิงประกอบ คอนกรีต วิศวกรรมกลศาสตร์คำนวณ สิ่งประดิษฐ์และจีโอโพลิเมอร์

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้วและทุนที่ได้รับ

- 1) 2008. Received research funding from the Commission on Higher Education. 300,000 baht. Research completed.
- 2) 2008. Received research grants from Office of the National Research Council of Thailand. 800,000 baht. Research completed.
- 3) 2010. Received research grants from Office of the National Research Council of Thailand. 842,000 baht. Research completed.
- 4) 2010. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 605,000 baht. Research completed.
- 5) 2011. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 450,000 baht. Research completed.

6) 2012. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 350,000 baht.

7) 2012-2013. Received research grants from the Thailand Research Fund (TRF). 480,000 baht.

8) 2013. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 411,800 baht.

9) 2014. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. ~1,000,000 baht (2 project).

(งานวิจัยดำเนินการในประเทศไทยทั้งหมด)

7.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่

7.2.1 Publications in International Journals

1. Chindapasirt, P., **Rukzon, S.**, Sirivivatnanon, V., 2008, Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, *Construction and Building Materials*, 22(5), 932-938.
2. Chindapasirt, P., **Rukzon, S.**, Sirivivatnanon, V., 2008, Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1701-1707.
3. Chindapasirt, P., **Rukzon, S.**, 2008, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601-1606.
4. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2008, Development of classified fly ash as a pozzolanic material, *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 1097-1102.
5. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2008, Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar, *Computers and Concrete*, 5(1), 75-88.
6. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2008, Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 5(1), 75-88.
7. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., Mahachai, R., 2008, Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formally Journal of University of Science and Technology Beijing)*, 5(1), 75-88.

8. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2009, Use of disposed waste ash from landfills to replace Portland cement, *Waste Management and Research*, 27(6), 588-594.
9. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2009, Pore structure changes of blended cement paste containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation, *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 21(11), 666-671.
10. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2009, An experimental investigation of carbonation of blended Portland cement palm oil fuel ash mortar in indoor environment, *Indoor and Built Environment*, 18(4), 131-138.
11. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2009, Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formally Journal of University of Science and Technology Beijing)*, 16(4), 475-481.
12. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2009, Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and ground river sand, *Computers and Concrete*, 6(5), 391-401.
13. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2010, Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 253-259.
14. Chindapasirt, P., Chottitanorm C, **Rukzon, S.**, 2011, 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 (ASCE)*, 23(4), 499-503.
15. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2011, Chloride penetration and corrosion resistance of ground fly ash blended cement mortar, *International Journal of Materials and Research*, 102(3), 335-339.
16. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2012, Use of bagasse ash in high-strength concrete, *Materials and Design*, 34, 45-50.
17. Chindapasirt, P., **Rukzon, S.**, 2013, Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand, Sent to Journal.
18. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2013, Strength, porosity and chloride penetration of geopolymer mortar made with bagasse ash. Has been sent to Journal.
19. **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2013, Use of ternary blend of Portland cement and two pozzolans to improve durability of high-strength concrete. *KSCE Journal of in Civil Engineering*, Has been revised

20. Chindaprasirt, P., Chottitanorm, C, Sata, V., **Rukzon, S.**, 2013, SathonsaowapHark, A., High calcium bottom ash geopolymers : sorptivity, pore size and resistance to sodium sulfate attack, Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), Has been accepted.
21. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2013, Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Has been accepted 20(8) August.

11.2 ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2006, Strength of ternary blended cement mortar containing Portland cement, rice husk ash and fly ash, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, 17(2), 30-38.
2. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2007, Compressive strength of mixture proportioning in ternary cementitious system, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, 18(4): 32-38
3. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2008, Strength and chloride penetration of mortar with mixture proportioning in ternary cementitious system, KMUTT Research and Development Journal, 31(4), 859-869.
4. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2008, Use of ternary cementitious system in concrete work, Civil Engineering Magazine, 20(5), 70-76.
5. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2009, Corrosion of reinforcement in concrete, Civil Engineering Magazine, 21(2), 41-46.

11.3 การประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ

1. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2006, Strength of ternary blended Portland cement rice husk ash and fly ash cement mortar, Proceeding of Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, Khon Kaen University, Khon Kaen, January 25-26, 105.
2. **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2006, Strength and carbonation of ternary blended Portland cement rice husk ash and fly ash cement mortar, Proceedings of the Eighth International Symposium and workshop on Ferro cement and thin reinforced cement composites, Bangkok, February 6-8, 525-533.

11.4 การประชุมวิชาการระดับชาติ

1. **Rukzon, S.,** Chindaprasirt, P., 2005, Strength and carbonation of Portland cement rice husk ash, Proceedings of 1st National Conference of Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, October 31, 98-105.
2. **Rukzon, S.,** Chindaprasirt, P., 2006, Effect of the fly ash fineness on carbonation. Proceeding of the 6th National Graduate Research Conference, Chulalongkorn University, Bangkok, October 13-14, 98-105.
3. **Rukzon, S.,** 2005, Use of ground fly ash fineness in concrete work, Proceeding of The 10th National Convention on Civil Engineering (NCCE), Chonburi, May 2-4.
4. **Rukzon, S.,** Chindaprasirt, P., 2008, A modification of ASTM C1202 for rapid test for sulfate ingress, Proceedings of 2nd National Conference of Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, September 25-26, 98-105.
5. ชัยชาญ โชติถนอม, ปริญญา จินดาประเสริฐ, **สำเร็จ รักซ้อน**, วันชัย สะตะ, อาภา สธนเสาวภาคย์, 2555, ความสามารถต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังไว้ในจีโอโพลีเมอร์แก้หนัก, งานประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 8, ชลบุรี, 22-24 ตุลาคม 2555.
6. ชัยชาญ โชติถนอม, ปริญญา จินดาประเสริฐ, **สำเร็จ รักซ้อน**, วันชัย สะตะ, อาภา สธนเสาวภาคย์, 2555, ความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าจีโอโพลีเมอร์แก้หนักงาน, ประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 8, ชลบุรี, 22-24 ตุลาคม 2555.

7.2.5 Book

1. **Rukzon, S.,** 2010, Reinforced Concrete Structure Design: Strength and Working Design Method, 4th edition (reversion), Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 426 pages.
2. **Rukzon, S.,** 2009, Timber and Steel Structure Design, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.
3. **Rukzon, S.,** 2009, Theory and Testing Concrete Technology, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.
4. **Rukzon, S.,** 2011, Strength of materials, 1st edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 155 pages.
5. **Rukzon, S.,** 2011, Handbook of Reinforced Concrete Structure Design, 1st edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 244 pages.
6. **Rukzon, S.,** Chindaprasirt, P., 2012, Theory and Testing Concrete Technology, 4th edition, Nonthaburi: Angles of Sci, Chulalongkorn University Printing House, 219 page

7.3 อื่นๆ ที่สำคัญ

ผลงานอื่นๆ

- 1) นักวิจัยศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- 2) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
- 3) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติของ Asia Pacific Journal of Chemical Engineering
- 4) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ
- 5) สมาชิกระดับวุฒิสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.)
- 6) ใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรม (ก.ว.) ระดับสามัญวิศวกรโยธา
- 7) สมาชิกเครือข่ายจีโอโพลิเมอร์ไทย
- 8) เป็นกรรมการพิจารณาร่างหลักสูตรปริญญาโท มทร.ตะวันออก และหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
- 9) เป็นกรรมการ/ประธานกรรมการสอบนักศึกษาระดับปริญญาโท/เอก

7.4 ลิขสิทธิ์ / อนุสิทธิบัตร

1. Jaturapitukkul, C., Chucheeesakul, S., **Rukzon, S.**, 2006, Conservative Energy of Grinding Machine for Pozzolanic Materials, Petty Patent No. 3674.
2. **Rukzon, S.** Teinhiran, C., Ngermprom, N., 2008, Grinding Machine of Cementitious for waste ash, Petty Patent No. 5440. (ได้รับทุนวิจัย วช.)
3. **Rukzon, S.** Teinhiran, C., Ngermprom, N., 2008, วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ที่มีเถ้าถ่านหินแยกขนาดผสมร่วมกับเถ้าขานอ้อยบด เลขที่คำขอ 0903001014 (ได้รับทุนวิจัย วช.)
4. **Rukzon, S.** Teinhiran, C., Ngermprom, N., 2008, วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ที่มีเถ้าถ่านหินแยกขนาดผสมร่วมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เลขที่คำขอ 0903001015 (ได้รับทุนวิจัย วช.)

7.5 ทุนวิจัย / รางวัล

รางวัลที่เคยได้รับ

1. รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท
2. รางวัลนักวิจัยดีเด่นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
3. รางวัลวิทยานิพนธ์ดีของมหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานวิจัยดีเด่นและดีเยี่ยม ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ ผศ.ทง ลานธารทอง
(Asst. Prof. Thong Lantharthong)
2. ตำแหน่งปัจจุบัน รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
3. หน่วยงานที่ติดต่อ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ถนนพิบูลสงคราม
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 02 9132424
โทรสาร 02 9132424 มือถือ 0895306092

4. ประวัติการศึกษา

ปี พ. ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2523	ปริญญาตรี	วิศวกรรมไฟฟ้า	วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา ประเทศไทย
2534	ปริญญาโท	ไฟฟ้ากำลัง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย
2553	ปริญญาโท	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประเทศไทย

5. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

วิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องมือไฟฟ้า

6. ประสบการณ์ในงานวิจัย

6.1 ผลงานทางวิชาการ

ชื่อบทความ Optimal Operation for Active Management of Distribution System with Distributed Generation ณ ประเทศอิตาลี

6.2 การศึกษาดูงาน

โครงการพัฒนาการจัดการศึกษาตามยุทธศาสตร์การพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโครงการพัฒนาทักษะด้านเครื่องกล ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ณ ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ระหว่างวันที่ 9-16 สิงหาคม 2553

โครงการพัฒนาการจัดการศึกษาตามยุทธศาสตร์การพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโครงการพัฒนาทักษะด้านเครื่องกล ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ณ ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเกาหลี ระหว่างวันที่ 23-16 เมษายน 2554

ที่ปรึกษาโครงการ

1. ชื่อ ศ. ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ
(Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt)
2. รหัสประจำตัว 3409900531567
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ศาสตราจารย์ ระดับ 11
รองประธานสมาคมคอนกรีตไทย
ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนมหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประธานเครือข่ายจีโอโพลีเมอร์ไทย
โทรศัพท์ +66043 202 846 โทรสาร +66043 202 846 x102
E-mail: prinya@kku.ac.th
4. หน่วยงานที่ติดต่อ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

5. ประวัติการศึกษา

ปี พ. ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2517	ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	University of Tasmania
2520	ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	University of New South Wales
2523	ปริญญาเอก	วิศวกรรมโยธา	University of New South Wales

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

โครงสร้างเชิงประกอบ คอนกรีต วิศวกรรมกลศาสตร์คำนวณ และจีโอโพลีเมอร์

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 ทุนการศึกษา/ รางวัลเกียรติคุณ/ เครื่องราชย์

Colombo Plan Scholarship พ.ศ. 2512 – 2523

เหรียญทองการพัฒนาแหล่งน้ำดีเด่น กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2534

เครื่องราชอิสริยาภรณ์มหาวชิรมงกุฎ

นักเทคโนโลยีดีเด่น ปี 2545 เรื่องการพัฒนาการใช้เก้าอี้กันหินลิกไนต์ไทย จากมูลนิธิส่งเสริม

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์

รางวัลข้าราชการดีเด่นศรีมอดินแดง รับพระราชทานจากสมเด็จพระเทพฯ พ.ศ.2546

7.2 ประสบการณ์ทำงานและการดำรงตำแหน่งบริหารที่สำคัญ

สมาชิกวุฒิสภา พ.ศ.2539-43

เลขาธิการคณะกรรมการการการวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและพลังงาน วุฒิสภา พ.ศ.2539-43

อธิการบดีมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2538-41, 2542-46

รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา พ.ศ. 2535-38

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ พ.ศ. 2528-32, 2532-35

7.3 ตำแหน่งอื่นๆ ที่สำคัญ

คณะกรรมการข้าราชการพลเรือนในสถาบันอุดมศึกษา (กพอ.) พ.ศ.2548 - ปัจจุบัน

ประธานกรรมการรถไฟ พ.ศ.2546-48

คณะกรรมการข้าราชการพลเรือนในมหาวิทยาลัย (กม.) พ.ศ.2545 - 2548

รองประธานสมาคมคอนกรีตไทย พ.ศ.2547- ปัจจุบัน

คณะกรรมการกองทุนบำเหน็จบำนาญข้าราชการ (กบข.) พ.ศ.2545-46

กรรมการสรรหาคณะกรรมการ ป.ป.ช. พ.ศ. 2544

กรรมการสรรหาผู้ตรวจการรัฐสภา พ.ศ. 2544

กรรมการสภาสถาบันราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ. 2535-41, 44-47

ผู้ประเมิน ผศ. และ รศ. ของ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ขอนแก่น, สงขลานครินทร์, ธรรมศาสตร์ เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ราชวมงคล

ผู้ประเมินบทความสำหรับลงในวารสารทางวิชาการของ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น, สงขลานครินทร์, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, เทคโนโลยีสุรนารี, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, Journal of Computers and Concrete, Journal of Environmental Management และ Journal of Cement and Concrete Composites

ผู้ประเมินบทความในการประชุมวิชาการด้านคอนกรีตและวัสดุ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ปริญญาโทและเอก มหาวิทยาลัย ขอนแก่น, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ เชียงใหม่

ที่ปรึกษาคณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา ว.ส.ท.

ที่ปรึกษาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย สาขาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

อาจารย์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2549

7.4 สิ่งตีพิมพ์

จำนวน 120 ชิ้น ด้านคอนกรีตและวัสดุ และการพัฒนาแหล่งน้ำ

จำนวน 7 ชิ้นด้านคอนกรีต ลงใน International journals

จำนวน 1 ชิ้น บทความรับเชิญองค์ปาฐกในการประชุมวิชาการ

7.5 ตำรา

“เค้าถ่านหินในงานคอนกรีต” พิมพ์โดยสมาคมคอนกรีตไทย พ.ศ. 2547, 2548

“ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต” พิมพ์โดยสมาคมคอนกรีตไทย พ.ศ. 2547, 2548

“ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต” พิมพ์โดยปูนซีเมนต์ไทย พ.ศ. 2549

7.6 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่

วารสารระดับนานาชาติ (ตัวอย่างบางส่วนจากประมาณ 60 บทความระดับนานาชาติ)

1. Chindaprasirt P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2008 22(5): 932-938.
2. Chindaprasirt P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2008 22(8): 1701-1707.
3. Chindaprasirt P, Rukzon S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Construction and Building Materials*. 2008 22(8): 1601-1606.
4. Rukzon S, Chindaprasirt P. Development of classified fly ash as a pozzolanic material. *Journal of Applied Sciences*. 2008 8(6): 1097-1102.
5. Rukzon S, Chindaprasirt P. Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar. *Computers and Concrete*. 2008 5(1): 75-88.
6. Rukzon S, Chindaprasirt P. Use of disposed waste ash from landfills to replace Portland cement. *Waste Management and Research*. 2009 27(6): 588-594.
7. Rukzon S, Chindaprasirt P. Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar. *Journal of the Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2008 5(1): 75-88.
8. 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*. 2008 5(1): 75-88.
9. Rukzon S, Chindaprasirt P. Pore structure changes of blended cement paste containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation. *Journal of ASCE. Materials in Civil Engineering*. 2009 21(11): 666-671.
10. Rukzon S, Chindaprasirt P. An experimental investigation of carbonation of blended Portland cement palm oil fuel ash mortar in indoor environment. *Indoor and Built Environment*. 2009 18(4): 131-138.
11. 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 ASCE. Materials in Civil Engineering*. 2011 23(4): 499-503.

12. Rukzon S, Chindapasirt P. Chloride penetration and corrosion resistance of ground fly ash blended cement mortar. *International Journal of Materials and Research*. 2011 102(3): 335-339.
13. Rukzon S, Chindapasirt P. Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel as and fly ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2009.16(4): 475-481.
14. Rukzon S, Chindapasirt P. Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel as and ground river sand. *Computers and Concrete*. 2009 6(5): 391-401.
15. Rukzon S, Chindapasirt P. Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. *Journal of ASCE. Materials in Civil Engineering*. 2010 22(3): 253-259.
16. **Chindapasirt P**, Chotithanorm C, Cao H.T, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*. 2007 21:356-361.
17. **Chindapasirt P**, Kanchanda P, Sathonsaowaphak A and Cao H.T. Sulfate Resistance of Blended Cements Containing Fly Ash and Rice Husk Ash. *Construction and Building Materials*. 2007 21:1356-1361

