



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานคอนกรีตกำลังสูง

The Development of Rice Husk Ash and Fly Ash to Replace Portland cement
in High-Strength Concrete Work

คณะผู้วิจัย

สำเร็จ รักซ้อน

หัวหน้าโครงการวิจัย

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2558

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานคอนกรีตกำลังสูง

The Development of Rice Husk Ash and Fly Ash to Replace Portland cement
in High-Strength Concrete Work

คณะผู้วิจัย

สำเร็จ รักซ้อน

หัวหน้าโครงการวิจัย

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2558

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย มทร. พระนคร ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่องานวิจัย

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) การพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตกำลังสูง

(ภาษาอังกฤษ) The Development of Rice Husk Ash and Fly Ash to Replace Portland cement in High-Strength Concrete Work

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปี 2558 จำนวนเงิน 456,300 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ กันยายน 2557 ถึง กันยายน 2558

ชื่อผู้วิจัย

รศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน¹

ศ. ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ² (ที่ปรึกษาโครงการวิจัย)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดและเถ้าแกลบบดละเอียด เป็นวัสดุปอซโซลานในการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าถ่านหินแยกขนาดและเถ้าแกลบบดละเอียด ทำการทดสอบเพื่อศึกษา กำลังอัด ความพรุน และการแทรกซึมคลอไรด์ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าถ่านหินแยกขนาดและเถ้าแกลบบดละเอียด สามารถลดความพรุนของคอนกรีต ให้ค่ากำลังอัดสูงและสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดี

คำสำคัญ: กำลังอัด, เถ้าถ่านหิน, คอนกรีตกำลังสูง, เถ้าแกลบ

Abstract

This research presents a study of the use of classified fly ash and ground rice husk ash as a pozzolanic material in producing high-strength concrete. Portland cement (CT) is partially replaced with classified fly ash and ground rice husk ash by weight of the cementitious materials. Compressive strength, porosity and chloride penetration were investigated. The results show that the compressive strength, resistance to chloride and low porosity of high-strength concrete improves substantially with partial replacement of Portland cement with fly ash and rice husk ash.

Keywords: Compressive strength, Fly ash, High-strength concrete, Rice husk ash

¹ ปริญาเอก วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

โทร. 0879454133 renng197@rmutp.ac.th, sumrerng.r@rmutp.ac.th

² ที่ปรึกษาโครงการ

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น โทร. 043 202 846

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อุดหนุนทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้อ่าน ให้ความรู้ แนวทางการเขียนโครงการ ตลอดทั้งการชี้แนะถึงวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในขณะเขียนโครงการวิจัย จนทำให้มีความรู้ประสบการณ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก และประสบความสำเร็จในระยะเวลาต่อมา คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ให้ความสะดวกและดูแลในด้านเอกสารของงานวิจัยทั้งหมดเป็นอย่างดี ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยอย่างเรียบร้อย ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการในการช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนวัสดุทดสอบที่ปรากฏในวิธีการดำเนินการ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนวัสดุทดสอบ และสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอขอบคุณ คุณนัยนา เทียงภักดี ผู้ช่วยวิจัย และผู้ช่วยทุกท่าน ในการจัดเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบตั้งแต่ต้นจนแล้วเสร็จ

รศ. ดร. สำเร็จ รักซ้อน

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	6
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	8
2.1 องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน	8
2.2 การใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตกำลังสูง	9
2.3 การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตกำลังสูง	12
2.4 การใช้เถ้าแกลบในคอนกรีตกำลังสูง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	17
3.1.1 วิธีวิจัย	17
3.1.2 ส่วนผสมตัวอย่างและการเตรียมวัสดุ	18
3.1.3 การทดสอบตัวอย่าง	18
3.1.4 วิธีเก็บข้อมูล	18
3.1.5 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	20
3.3 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)	20
3.3.1 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัยที่มีอยู่	20
3.3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการซื้อ	21
3.4 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	23
4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ	23
4.2 คอนกรีตกำลังสูง CT และ FA	24
4.2.1 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง CT และ FA	24
4.2.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง CT และ FA	26
4.3 คอนกรีตกำลังสูง CT และ RHA	27
4.3.1 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง CT และ RHA	27
4.3.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT และ RHA	30
4.4 การกักร่อนคอนกรีตกำลังสูง	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	33
5.1 สรุปผลการวิจัย	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	37
ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัยและที่ปรึกษาโครงการวิจัย	37

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิไซลัน (Chindapasirt and Rukzon 2008)	5
ตารางที่ 1.2 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงซิลิกาฟูม (Mazloom et al 2004)	6
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม (Behnood and Ziari 2008; Mazloom et al 2004; Jaturapitakkul et al 2004)	10
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน (Chindapasirt and Rukzon 2008; Chindapasirt et al 2007; Yen et al 2007)	13
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (Rukzon and Chindapasirt 2008; Raman et al 2011)	16
ตารางที่ 3.1 แผนงานโครงการวิจัย (ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี หรือ 12 เดือน)	20
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ CT, FA และ RHA	23



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟูมงานวิจัยของ Megat et al (2011)	10
รูปที่ 2.2 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟูม งานวิจัยของ Jaturapitakkul et al (2004)	11
รูปที่ 2.3 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหินของ Sata et al (2007)	15
รูปที่ 2.4 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหินของ Megat Johari et al (2011)	15
รูปที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีต FA	25
รูปที่ 4.2 ความพรุนของคอนกรีต FA	25
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังอัดของคอนกรีต FA	26
รูปที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต FA	27
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ ของคอนกรีตกำลังสูง FA	27
รูปที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีต RHA	29
รูปที่ 4.7 ความพรุนของคอนกรีต RHA	29
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังอัดของคอนกรีต RHA	30
รูปที่ 4.9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RHA	31
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ ของคอนกรีตกำลังสูง RHA	31
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน	32

คำอธิบายสัญลักษณ์

FA	=	เก้าถ่านหินขนาดละเอียดปริมาณสัดส่วนร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
RHA	=	เก้าเกลบบละเอียดปริมาณสัดส่วนร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
CT	=	คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน
5FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
10FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
15FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
25FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
35FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
5RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
10RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
15RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
25RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
35RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ทฤษฎี สมมติฐาน กรอบแนวความคิดของการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

โครงสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ประกอบด้วยวัสดุก่อสร้างที่นำมาประกอบเป็นชิ้นส่วนของอาคาร เช่น ไม้ เหล็ก และคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นกับความเหมาะสมในการใช้งาน ในส่วนของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมก่อสร้างเพื่อใช้ประโยชน์ประกอบกิจการต่างๆ มากมาย ซึ่งใช้คอนกรีตผสมกับเหล็กเสริมเพื่อรับกำลังหรือรับน้ำหนักบรรทุก โดยทั่วไปความหมายของคอนกรีต คือ การนำปูนซีเมนต์ ทราย หิน น้ำ และสารผสมเพิ่ม (Admixture) มาผสมรวมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นเกิดการแข็งตัว ให้ค่ากำลัง มีความแข็งแรงซึ่งสามารถรับแรงต่างๆ หรือมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะสำหรับการใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างอาคาร วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตส่วนใหญ่ได้จากแหล่งธรรมชาติ ซึ่งหากมีการใช้อย่างไม่ระมัดระวังอาจสิ้นเปลืองและอาจหมดไปจากธรรมชาติได้ในไม่ช้า อย่างไรก็ตาม การเติบโตทางด้านเศรษฐกิจของชาติซึ่งพัฒนาอย่างต่อเนื่องไม่หยุดยั้งส่งผลให้ทิศทางการก่อสร้างเติบโตตามไปด้วย มีการก่อสร้างอาคารต่างๆ อย่างไม่หยุดยั้งสำหรับใช้งาน เช่น ที่อยู่อาศัย อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน อาคารโรงงานอุตสาหกรรม สะพาน ถนนคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่หรือสำหรับใช้ทดแทน โดยเฉพาะการนำของเสียจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ วัสดุเหล่านั้นเรียกว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางด้านเคมี คือ ซิลิกา และอลูมินา ปนอยู่ (Ruzon and Chindaprasirt 2013; Ruzon and Chindaprasirt 2012) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 (2005) ระบุว่า วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีต ต้องมีองค์ประกอบหลักทางด้านเคมี คือ ซิลิกาและอลูมินา ปนอยู่ สำหรับวัสดุปอซโซลานที่รู้จักและมีอยู่ในประเทศไทยบางชนิด ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่เป็นกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งใหญ่ของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยอยู่ทางภาคเหนือของอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้างดักถ่านหินได้นำเอาถ่านหินลิกไนต์มาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากนั้นได้ส่วน

ที่เหลือเป็นเก้าอี้ที่ได้ไม่ได้ประโยชน์อีกทั้งอาจสิ้นเปลืองพื้นที่กำจัดเก้าอี้ และอาจเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียงได้ ดังนั้น ที่ผ่านมามีการศึกษาเพื่อที่จะนำเก้าอี้เหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยตรง โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตและปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีต (Ruzon and Chindapasirt 2013; Ruzon and Chindapasirt 2011) ดังนั้น นักวิจัยจึงควรศึกษาเพิ่มเติม ทั้งนี้เพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่อุตสาหกรรมก่อสร้างสำหรับการเลือกใช้วัสดุชนิดใหม่ในงานก่อสร้างและลดพื้นที่การกำจัดทิ้งของเสีย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เช่น ปลูกข้าว จากนั้นได้ผลพลอยได้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นแกลบ หากเผาแกลบด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จะสามารถใช้เป็นวัสดุพอลิโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตได้ (Ruzon and Chindapasirt 2008; Ruzon et al 2008) เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แกลบที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบหลักทางด้านเคมี คือ ซิลิกา เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 (2005) ดังนั้น หากมีการนำแกลบที่เป็นของเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นคอนกรีตสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างจะทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตเพิ่มมูลค่าให้ของเสียในชุมชน อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการประกอบอาชีพในวิสาหกิจชุมชนสำหรับการผลิตวัสดุชนิดใหม่ได้ในอนาคตอย่างยั่งยืน

ในเมืองใหญ่ของประเทศไทย มีพื้นที่ใช้สอยลดลงและมีอยู่อย่างจำกัด ขณะความต้องการในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างสำหรับประกอบการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงนิยมปลูกสร้างอาคารสูงหลายชั้นมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และมักใช้หลักการออกแบบให้ได้คอนกรีตกำลังสูง (High-strength concrete) สำหรับทำองค์อาคารหรือชิ้นส่วนของอาคารต่างๆ ดังนั้น คอนกรีตกำลังสูงจึงเริ่มนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารสำหรับประเทศไทยมากขึ้น คอนกรีตกำลังสูงโดยทั่วไปมีกำลังอัดสูงกว่า 410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Weerachat et al 2009; Ruzon and Chindapasirt 2012) ทั้งนี้ การทดสอบกำลังอัดอาจทดสอบโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หรือมาตรฐานอื่นๆ ตามสากลนิยม

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการใช้เก้าอี้หรือวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวในการผลิตคอนกรีตกำลังปกติทั่วไป (ต่ำกว่า 410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ส่วนการใช้วัสดุเหลือทิ้งในคอนกรีตกำลังสูงยังมีอยู่ไม่มาก ซึ่งหากมีการพัฒนาต่อยอดในการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงใช้งานจริงนอกเหนือจากการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในการผลิตคอนกรีตทั่วไปแล้ว ผลที่ได้จึงคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศไทยเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยพัฒนาแกลบและเก้าอี้เหล่านี้ที่เป็นของเสียพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อศึกษาข้อมูลและเก็บข้อมูลใน

การใช้เป็นแนวทางสำหรับงานคอนกรีตเทคโนโลยีและการก่อสร้างไทยในกระบวนการผลิตคอนกรีตกำลังสูงหรือกระบวนการผลิตขั้นสำเร็จรูปสำหรับงานก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ซึ่งทำให้สามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงและลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตกำลังสูง นอกจากนั้น ยังได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตคอนกรีตกำลังสูงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และความทนทานต่อสารเคมี และพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ ไปใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงในโครงการก่อสร้างขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ต่อไป

ผลที่ได้ของงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมได้จริง และทำให้เกิดความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ผลพลอยได้ที่ได้ตามมาคือการช่วยลดปัญหามลภาวะแวดล้อมและปัญหาสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียงของวัสดุเหลือทิ้งตลอดทั้งสามารถลดพื้นที่การกำจัดวัสดุเหลือทิ้งลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมและเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นวัสดุเหลือทิ้งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างในการผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นไปตามหลักเศรษฐกิจพอเพียงในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะการนำของเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้และเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมสำหรับใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยมีขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับใช้ควบคุมคอนกรีต

2) เถ้าถ่านหิน งานวิจัยนี้ ใช้เถ้าถ่านหิน จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โรงไฟฟ้า

พลังงานความร้อน อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ในภาคเหนือของประเทศไทย โดยได้รับการอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ บริษัท โบรอล คอนกรีตประเทศไทย นำเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดด้วยเครื่องแยกขนาดแรงลมให้มีความละเอียดต่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก เพื่อให้มีความละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618 2005) สำหรับเป็นวัสดุปอชโซลาน

- 3) ถ้าแกลบ งานวิจัยนี้ ใช้แกลบเผาที่อุณหภูมิประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแกลบไปบดด้วยเครื่องบดวัสดุซีเมนต์ ให้มีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก เพื่อให้มีความละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618 2005) สำหรับเป็นวัสดุปอซโซลาน
- 4) ใช้ทรายแม่น้ำและหิน เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดและหยาบในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง โดยทั้งมวลรวมละเอียดและหยาบใช้ขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM C33 2001) และ ASTM C136 (ASTM C136 1998) ทรายแม่น้ำมีค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.2-3.2 และหินโครงสร้างมีค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 5.5-7.5
- 5) ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแกลบและแกลบหิน เช่น องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดอนุภาคการกระจายตัว
- 6) สารเคมีที่ใช้ในโครงการนี้ เช่น สารลดน้ำพิเศษ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลเวอร์ไนเตรท
- 7) ใช้แกลบและแกลบหินขนาดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 8) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ($W/C = \text{Constant}$) และใช้สารลดน้ำพิเศษหรือซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) ประเภท FF หรือตามมาตรฐานสากล เพื่อควบคุมความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด (Slump test)
- 9) ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของสารเคมีและกระบวนการผลิตต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และ ความทนทานต่อสารเคมีของคอนกรีตกำลังสูงที่มีแกลบและแกลบหินเป็นส่วนผสม
- 10) ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้แกลบและแกลบหิน สำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังสูง
- 11) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ทางกลของคอนกรีตที่มีแกลบและแกลบหินเป็นส่วนผสม เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ ความพรุน ทดสอบกำลังรับแรงอัด การต้านทานคลอไรด์ การกัดกร่อน ทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่น ทั้งนี้เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการใช้คอนกรีตกำลังสูงจากแกลบทิ้งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของงานวิจัย

ถ่านหิน และแกลบ เป็นผลผลิตจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีอยู่ในประเทศไทย ในการนำ ถ่านหิน และแกลบ ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า จะได้ส่วนที่เหลือทิ้งที่เป็น ถ่านกัมมันต์ ถ่านหิน และแกลบ ซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์ใดๆ งานวิจัยได้ศึกษาเพื่อนำถ่านกัมมันต์ดังกล่าวไปใช้งานโดยเฉพาะ ใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสำหรับใช้ในงานผลิตคอนกรีต ผลการทดสอบด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่า ถ่านกัมมันต์และแกลบ สามารถนำมาทำเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากเป็น วัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ (Ruzon and Chindaprasirt 2008; Ruzon et al 2008) ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จากนั้นได้เป็น ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan reaction) เพิ่มเติม ส่วนตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์และแกลบ แสดงใน ตารางที่ 1 (Chindaprasirt and Rukzon 2008)

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 พบว่าองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 โดยมี SiO_2 ร้อยละ 41.1 มี Al_2O_3 ร้อยละ 21.6 และมี Fe_2O_3 ร้อยละ 11.3 และถ้ารวม องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 74.0 ซึ่งมากกว่า ร้อยละ 70 ดังนั้น ตามมาตรฐานของ ASTM C618 (ASTM C618 2005) ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุปอซโซลานชนิด หนึ่งได้ ขณะที่แกลบมี SiO_2 ร้อยละ 93.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก มี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วง ร้อยละ 93.7 ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับใช้ในงานคอนกรีตชนิดหนึ่งเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน (Chindaprasirt and Rukzon 2008)

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ถ่านกัมมันต์	แกลบ
CaO (%)	14.4	1.1
SiO_2 (%)	41.1	93.2
Al_2O_3 (%)	21.6	0.4
Fe_2O_3 (%)	11.3	0.1
SO_3 (%)	2.2	0.9
LOI (%)	2.5	3.7
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	74.0	93.7

คอนกรีตกำลังสูงส่วนใหญ่ใช้ ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในตารางที่ 1.2 งานของ Mazloom et al (2004) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ซิลิกาฟุ้ง พบว่ามีกำลังอัดสูงอยู่ระหว่าง 65-70 MPa ขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนกำลังอัดสูง 58 MPa อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าแกลบเพื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงและศึกษาความทนทานการต้านทานสารเคมีต่างๆ ยังมีอยู่น้อย ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังอัดทั่วไป ทั้งเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ (Chindaprasirt and Rukzon 2008) หากนำมาพัฒนาต่อยอดจากการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังปกติทั่วไปเพื่อให้เป็นคอนกรีตกำลังสูงจะส่งผลให้สามารถใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการใช้ซิลิกาฟุ้งในคอนกรีตกำลังสูง ดังนั้นการพัฒนาต่อยอดวัสดุดังกล่าวในงานวิจัยนี้อาจทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงเหมือนคอนกรีตกำลังสูงที่ได้จากการใช้ซิลิกาฟุ้ง ดังนั้น จึงควรพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินสำหรับผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูง เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดพื้นที่สำหรับการทิ้งของเสียจากวัสดุเหลือทิ้ง และลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง เพื่อบริหารจัดการของเสียให้มีคุณค่าจากปัจจุบันสู่นาคต่ออย่างยั่งยืนต่อไป

ตารางที่ 1.2 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงซิลิกาฟุ้ง (Mazloom et al 2004)

ส่วนผสมคอนกรีต	กำลังอัดที่ อายุ 28 วัน
OPC	58 MPa
SF6	65 MPa
SF10	67.5 MPa
SF15	70 MPa

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1) การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้งานก่อสร้างทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ และต้นทุนผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมก่อสร้าง อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการกำจัดทิ้งของเสีย

2) นำผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยจดสิทธิบัตรเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่

3) นำผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติหรือระดับชาติ

4) ด้้องค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาด้ำนวิศวกรรมอย่างต่อเนื่อง การร่วมมือกันระหว่างนักวิจัยต่างสถาบันเพื่อแลกเปลี่ยนประสบการณ์ความรู้ด้ำนวิจัย สร้างเทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม ตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ

5) สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ให้มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นการพัฒนาศักยภาพและความสามารถเพื่อการพัฒนานวัตกรรมและบุคลากรทางการวิจัย ตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้ อธิบายเกี่ยวกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน คุณสมบัติทางกายภาพและกลสมบัติด้านวิศวกรรมของคอนกรีตกำลังสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยด้านวัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างไทย

2.1 องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน

สารประกอบหลักหรือออกไซด์หลักของวัสดุประสานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ส่วนที่เหลือเป็นสารประกอบรองหรือออกไซด์รอง และมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition: LOI) เป็นต้น สารประกอบรองแม้ว่าจะมีอยู่ไม่มาก แต่อาจส่งผลกระทบต่อซีเมนต์เฟสต์ มอร์ตาร์หรือคอนกรีตได้ สารประกอบหลักหรือออกไซด์หลักหรือสารประกอบหลักวัสดุประสานหรือวัสดุซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (CaO, SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃) รวมตัวกันมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ โดยที่ออกไซด์ดังกล่าวนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีกันและรวมกันอยู่ในรูปของสารประกอบ โดยสารประกอบดังกล่าวนี้มีด้วยกัน 4 อย่าง รายละเอียดดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) สามารถเขียนในรูปองค์ประกอบทางเคมี คือ 3CaO.SiO₂ หรือ เขียนเป็นตัวย่อว่า C₃S ซึ่งมีอยู่มากในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45-55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) เขียนในรูปองค์ประกอบทางเคมี คือ 2CaO.SiO₂ หรือ เขียนเป็นตัวย่อว่า C₂S ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15-35
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) เขียนในรูปองค์ประกอบทางเคมี คือ 3CaO.Al₂O₃ หรือ เขียนเป็นตัวย่อว่า C₃A ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7-15 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม

4. เตรตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) เขียนในรูปองค์ประกอบทางเคมี คือ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ เขียนเป็นตัวย่อว่า C_4AF ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5-10 อยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง

2.2 การใช้ซิลิกาฟุ้งในคอนกรีตกำลังสูง

ซิลิกาฟุ้ง นิยมนำมาศึกษาในการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูง และนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศพยายามศึกษาเพื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ซิลิกาฟุ้งอาจมีราคาที่สูงและหาซื้อใช้งานได้ยาก ดังนั้นในประเทศไทยอาจศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ้งไว้ไม่มาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ้ง คือ ซิลิกา (SiO_2) โดยพบว่ามีสูงร้อยละ 91.7-94.09 (Behnood and Ziari 2008; Mazloom et al 2004; Jaturapitakkul et al 2004) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ซิลิกาฟุ้งในงานวิจัยของต่างประเทศ พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 91.7 (Behnood and Ziari 2008; Mazloom et al 2004) ขณะที่งานวิจัยของประเทศไทยพบว่ามีค่าองค์ประกอบของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 94.09 (Jaturapitakkul et al 2004) ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ้งงานวิจัยของต่างประเทศและในประเทศไทย ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันในด้านองค์ประกอบทางเคมี

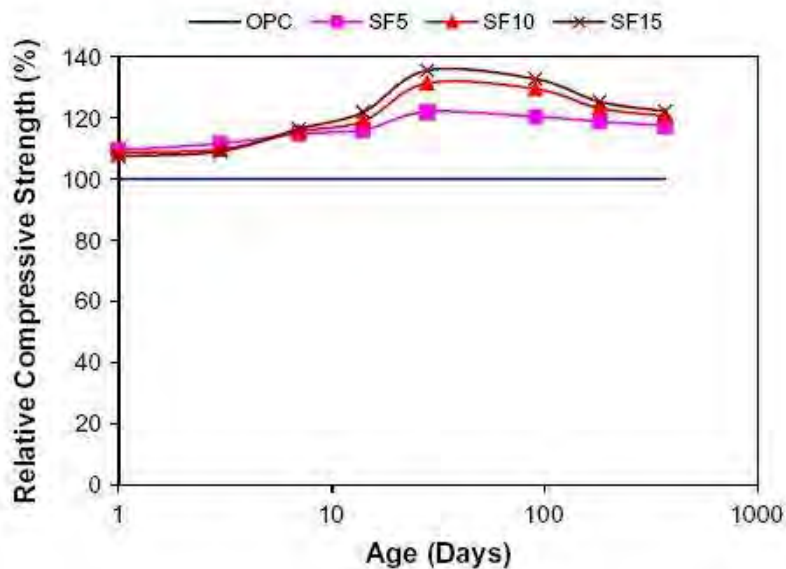
งานวิจัยของ Megat et al (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ซึ่งแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทราาย และหินคงที่ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 และ 365 วัน ด้วยแบบหล่อขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร พบว่ากำลังอัดพัฒนาตามอายุการทดสอบ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ นอกจากนั้น ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้ง ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในรูปที่ 2.1 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ้ง

Erdem and Kirca (2008) ศึกษาคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง นอกจากนั้น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูง 80.5 MPa เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณการแทนที่เท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม

(Behnood and Ziari 2008; Mazloom et al 2004; Jaturapitakkul et al 2004)

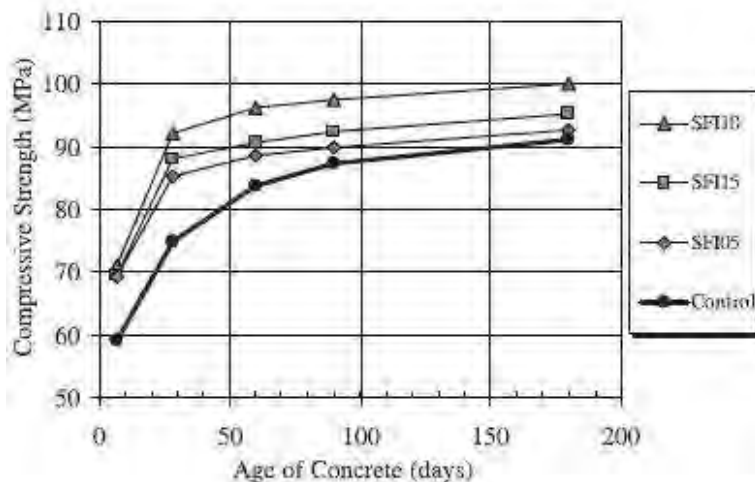
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ซิลิกาฟูม (Mazloom et al 2004)	ซิลิกาฟูม (Behnood and Ziari 2008)	ซิลิกาฟูม (Jaturapitakkul et al 2004)
CaO (%)	1.68	1.68	0.18
SiO ₂ (%)	91.7	91.7	94.09
Al ₂ O ₃ (%)	1.0	1.0	0.17
Fe ₂ O ₃ (%)	0.9	0.9	0.07
MgO (%)	1.8	1.8	0.34
K ₂ O (%)	-	-	0.35
SO ₃ (%)	0.87	0.87	-
LOI (%)	2.0	2.0	4.65
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	93.6	93.6	94.3
Specific gravity	2.2	2.2	-
Specific surface	14 000	20 000	-



รูปที่ 2.1 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟูมงานวิจัยของ Megat et al (2011)

งานวิจัยของ Behnood and Ziari (2008) ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ป่มด้วยอุณหภูมิสูง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ที่ต่างกัน คือ ที่ W/C เท่ากับ 0.30 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 0, 6 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ W/C เท่ากับ 0.30 และ 0.40 ไม่แทนที่ซิลิกาฟุ่ม ส่วนที่ W/C เท่ากับ 0.30 และ 0.35 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า เมื่อป่มคอนกรีตที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 6 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การใช้ซิลิกาฟุ่มไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อป่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 และ 200 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบมีแนวโน้มที่ดีเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) เท่ากับ 0.35 และ แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

Jaturapitakkul et al (2004) ศึกษาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้ปริมาณทรายและหินเท่ากันในทุกส่วนผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ควบคุมความชื้นเหลวของคอนกรีตที่ 175-225 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าที่อายุการทดสอบ 7 วัน คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่สูงตั้งแต่ 61.5 MPa (615 ksc) ขึ้นไป และมีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบอย่างต่อเนื่อง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ซิลิกาฟุ่มในปริมาณ ร้อยละ 10โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่คอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนเมื่อแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงในงานวิจัยของ Jaturapitakkul et al (2004) แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟุ่มงานวิจัยของ Jaturapitakkul et al (2004)

Mazloom et al (2004) ศึกษาผลกระทบของการใช้ซิลิกาฟุ้งต่อคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และปริมาณวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ้งในปริมาณร้อยละ 0, 6, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้ง ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าส่งผลที่ดีในด้านของกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ปริมาณการแทนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการขยายตัวของคอนกรีต แม้ว่าซิลิกาฟุ้งนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง แต่อาจมีราคาสูง จึงต้องพิจารณาต้นทุนการผลิตคอนกรีตกำลังสูงด้วย ดังนั้น งานวิจัยหรือนักวิจัยจึงควรศึกษาวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงและหาได้ไม่ยากนักโดยเฉพาะวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ที่มีอยู่ในประเทศไทย เช่น เถ้าแกลบ สามารถนำไปพัฒนาให้สามารถใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงได้ต่อไป

2.3 การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตกำลังสูง

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เริ่มนำใช้ในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยเฉพาะเมื่อนำมาปรับปรุงให้มีความละเอียด มาตรฐาน ASTM C618 (2005) ได้แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ เถ้าถ่านหิน Class F และ Class C และมีรายละเอียดในแต่ละประเภท ดังนี้

1) เถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

2) เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ประมาณร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบเคมีหลักของเถ้าถ่านหินคือ ซิลิกา SiO_2 โดยงานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมามีซิลิกา SiO_2 ร้อยละ 41.1 หรือ 44.4 (Chindapasirt and Rukzon 2008; Chindapasirt et al 2007; Yen et al 2007) ส่วนงานวิจัยของต่างประเทศบางชิ้น พบว่ามีซิลิกา SiO_2 ร้อยละ 56 (Yen et al 2007) หากพิจารณาประเภทของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM ดังนั้นในตารางที่ 2.2 เป็นเถ้าถ่านหินประเภท Class F กล่าวคือ มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

(Chindapasirt and Rukzon 2008; Chindapasirt et al 2007; Yen et al 2007)

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน (Chindapasirt and Rukzon 2008)	เถ้าถ่านหิน (Chindapasirt et al 2007)	เถ้าถ่านหิน (Yen et al 2007)
CaO (%)	14.4	13.1	4.8
SiO ₂ (%)	41.1	44.4	56
Al ₂ O ₃ (%)	21.6	23.4	5.3
Fe ₂ O ₃ (%)	17.3	10.4	24.81
MgO (%)	3.3	3.37	1.48
K ₂ O (%)	2.6	2.7	-
SO ₃ (%)	2.2	1.3	0.36
LOI (%)	2.5	1.0	5.78
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	80	78.2	86.11

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Yen et al (2007) ศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตกำลังสูงด้วยการใช้เถ้าถ่านหินประเภท Class F แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดประมาณ 40-48 MPa ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เมื่อกำลังอัดมีค่าสูงและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำส่งผลให้การซึมผ่านมีค่าน้อย และการซึมผ่านลดลงตามอายุการทดสอบที่มากขึ้น ในส่วนของความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับการซึมผ่านพบว่า เมื่อกำลังอัดมีค่าสูงการซึมผ่านต่ำลง ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังสูงสามารถลดการซึมผ่านได้ดี ส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้การซึมผ่านมากขึ้นตามไปด้วย

Sata et al (2007) ศึกษาอิทธิพลของวัสดุปอซโซลานต่อคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง เถ้าถ่านหินปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ขนาด 7.7 μm ใช้ปูนซีเมนต์ 560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุมความชื้นเหลือ (Slump test) เท่ากับ 175-225 มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.28 ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการ

ทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และกำลังอัดมีแนวโน้มเริ่มลดลง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดจะพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามอายุการทดสอบ นอกจากนั้นผลทดสอบพบว่า ค่ากำลังดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตกำลังสูงผสมปูนซีเมนต์ล้วน ตัวอย่างกำลังอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2.3

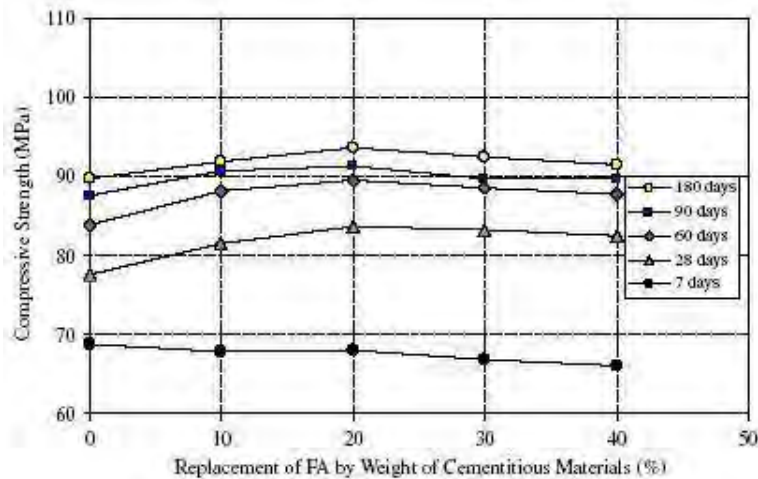
ในงานวิจัยของ Megat Johari et al (2011) ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อพิจารณากำลังอัดในรูปที่ 4 พบว่าร้อยละกำลังอัดที่อายุ 1-28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน แต่ร้อยละกำลังอัดเริ่มสูงขึ้นเมื่ออายุการทดสอบอยู่ในช่วง 90-365 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าทุกส่วนผสมเมื่อพิจารณาอายุทดสอบที่ 1-90 วัน จากนั้นจะเริ่มใกล้เคียงกันที่อายุทดสอบมากกว่า 90 วัน

Jaturapitakkul et al (2004) ศึกษาด้วยการใช้เถ้าถ่านหินขนาดหยาบปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด ให้มีความละเอียดมีปริมาณสัดส่วนค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก และนำไปแทนที่ซิลิกาฟูมเพื่อผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูง ผลการวิจัยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินบดในปริมาณร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถใช้เป็นส่วนผสมผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ดี และที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด นอกจากนั้น งานวิจัยของ Jaturapitakkul et al (2004) ได้แนะนำเพิ่มเติมไว้ว่า เถ้าถ่านหินขนาดละเอียดมากมีความเหมาะสมและสามารถใช้แทนที่ซิลิกาฟูมสำหรับผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ ดังนั้นหากปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหินด้วยการบดหรือแยกขนาดให้มีความละเอียดมากขึ้นจะสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาต่อยอดเถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตกำลังสูงดังกล่าว

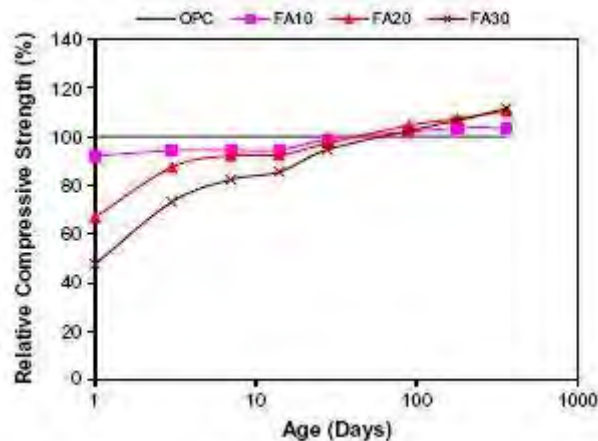
งานวิจัยที่ผ่านมาของ Atis (2003) ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณมาก (High volume fly ash) ในงานคอนกรีตกำลังสูง ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้เท่ากับ 0.28-0.34 ควบคุมความสามารถทำงานได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) ผลการทดสอบของ Atis (2003) พบว่าที่อายุ การทดสอบ 28 วัน เมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

Nath and Sarker (2011) ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง และแยกกลุ่มการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ไว้แบบ A และ B คือ ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณเท่ากับ 355 และ 517 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กลุ่ม A ใช้ W/C เท่ากับ 0.41, 0.32,

0.31 สำหรับปริมาณแทนที่ 0, 30, 40 ตามลำดับ และกลุ่ม B ใช้ W/C เท่ากับคือ 0.29 สำหรับปริมาณแทนที่ 0, 30, 40 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหินมีค่าหดตัวแห้งน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมปกติเมื่อออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เหมือนกัน การใช้เถ้าถ่านหินลดการซึมผ่านและลดการแทรกซึมคลอไรด์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในทางที่ดี



รูปที่ 2.3 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหินของ Sata et al (2007)



รูปที่ 2.4 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหินของ Megat Johari et al (2011)

2.4 การใช้เถ้าแกลบในคอนกรีตกำลังสูง

เถ้าแกลบ (Rice husk ash) เป็นผลพลอยได้จากเกษตรกรรม นักวิจัยพยายามใช้ประโยชน์โดยตรงเพื่อนำมาเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) งานวิจัยของ Rukzon et al (2008) นำเถ้าแกลบไปบดละเอียดเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่า เมื่อบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น ลดความพรุนของมอร์ตาร์ และลดปริมาณความต้องการน้ำ การบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดมากขึ้นความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นด้วย ในตารางที่ 2.3 ได้แสดงองค์ประกอบเคมีหลักของเถ้าแกลบ ซึ่งเห็นได้ว่ามีปริมาณซิลิกา (SiO_2) ระหว่างร้อยละ 89.87-93.24 โดยน้ำหนัก (Rukzon and Chindapasirt 2008; Raman et al 2011) และเมื่อพิจารณาผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) พบว่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักซึ่งตามมาตรฐาน ASTM ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง

Raman et al (2011) ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบบดในงานคอนกรีตกำลังสูง และใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดที่ได้มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ และเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายสามารถผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ดี ที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าแกลบในงานคอนกรีตกำลังสูงยังมีอยู่น้อยมาก มีเพียงการใช้ เถ้าแกลบในคอนกรีตทั่วไปเท่านั้น ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติกายภาพต่างๆ ในการผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงต่อไป

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (Rukzon and Chindapasirt 2008; Raman et al 2011)

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าแกลบ Rukzon et al 2008)	เถ้าแกลบ (Chindapasirt and Rukzon 2008)	เถ้าแกลบ (Raman et al 2011)
CaO (%)	1.1	1.1	0.49
SiO_2 (%)	93.24	93.2	89.87
Al_2O_3 (%)	0.44	0.4	0.14
Fe_2O_3 (%)	0.1	0.1	0.94
SO_3 (%)	0.96	0.9	-
LOI (%)	3.72	3.7	4.81
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	93.78	93.4	90.95

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์ตลอดจนวัสดุปอซโซลาน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบหาค่าความพรุน หรือ ปริมาณโพรง การทดสอบกำลังอัด การทดสอบการต้านทานสารเคมี

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีวิจัย

มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดแหล่งเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินที่จะใช้ในการวิจัย โดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินจาก โรงไฟฟ้าทางภาคเหนือของประเทศไทย ส่วนแกลบได้โรงไฟฟ้าและแหล่งเกษตรกรรมทั่วไป
- 2) เก็บตัวอย่างเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง
- 3) ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินให้มีขนาดละเอียด โดยให้มีปริมาณสัดส่วนร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก
- 4) ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ประกอบด้วย ตรวจสอบหา องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง x-ray fluorescence, ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ, ทดสอบหาปริมาณของ อนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน, ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope
- 5) ศึกษาถึงคุณสมบัติด้านวิศวกรรมโครงสร้างของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าแกลบและ เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กำลังอัด แรงดึง การดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
- 6) ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าแกลบและ เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อิทธิพลของกำลังอัด และความพรุน อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสาน และการบ่ม

3.1.2 ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) ใช้เถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงขนาดแล้ว แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 3) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ($W/C = \text{Constant}$)
- 4) ใช้สารลดน้ำพิเศษและเร่งกำลังชนิด F ควบคุมความสามารถทำงานได้ด้วยการทดสอบความขึ้นเหลว (Slump test)
- 5) กำลังอัดใช้อายุการทดสอบที่ 7, 28, 90, 180 และ 210 วัน

3.1.3 การทดสอบตัวอย่าง

- 1) ทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109
- 2) ทดสอบหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C567
- 3) ทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงแยก ตามมาตรฐาน ASTM C496
- 4) การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยอ้างอิงปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต ทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตโดยใช้แรงดันในการทดสอบเท่ากับ 60 โวลต์ ระยะเวลาในการทดสอบ 6 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C1202

3.1.4 วิธีเก็บข้อมูล

การศึกษาคอนกรีตด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมีวิธีการเก็บและรวบรวมแหล่งข้อมูลใช้ในงานวิจัย ดังนี้

- 1) ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน เพื่อเป็นแนวทางการศึกษา ศึกษาข้อมูลย้อนหลังจนถึงปัจจุบันขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน รวบรวมเก็บข้อมูลประวัติการกองทิ้งวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูลคัดเลือก
- 2) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน จะมีวิธีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ทดสอบ ณ สถาบันที่เกี่ยวข้อง และบันทึกผลการทดสอบโดยใช้ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 3) ทำการบันทึกผลการทดสอบของชุดทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ตามเงื่อนไขของตัวแปรที่ศึกษา โดยใช้เครื่องทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

4) ทำการบันทึกผลทดสอบหาคณสมบัติพื้นฐาน ของตัวอย่างคอนกรีต ณ ห้องปฏิบัติการของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

5) ทำการบันทึกผลทดสอบการต้านทานคลอไรด์ โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.1.5 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล

1) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบด้านกายภาพ ของตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูง ที่ผสมด้วยเถ้ากลบและเถ้าถ่านหิน

2) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์ผลการทดสอบความทนทานของตัวอย่าง คอนกรีตกำลังสูง

3) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัด คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเมื่อ มีตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนผสมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของ ส่วนผสมคอนกรีต

4) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์ผลการทดสอบส่วนผสมของตัวอย่าง คอนกรีตเพื่ออธิบายสมบัติทางกลได้

สถานที่ทำการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้าง มูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และรวมทั้งห้องปฏิบัติการของนักวิจัยที่ปรึกษา

3.2 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

แผนการดำเนินงานแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 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							←	→	→	→	→	→

3.3 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)

3.3.1. ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัยที่มีอยู่

1. Compressive machine
2. Sieve analysis
3. Mold cube, cylinder
4. Setting time test
5. Normal consistency test
6. RPCT Chloride test
7. เครื่องเจียร์คอนกรีต

3.3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการซื้อ

1. อุปกรณ์ชุดบดวัสดุ
2. เครื่องแก้ว
3. สารเคมี HCl-AgNO₃- Superplasticizer-NaOH- BufferpH- NaCl- ฟีนอล์ฟทาลีน
4. แผ่นทองเหลืองขนาดหนา 0.5 มิลลิเมตร
5. หม้อผสมเพสต์
6. ใบพายผสมเพสต์
7. ถูมือกั้นสารเคมี
8. แวนตากั้นสารเคมี
9. Epoxy
10. ซิลิโคน
11. น้ำกลั่น
12. ทราย มวลรวมละเอียด
13. หิน มวลรวมหยาบ
14. วัสดุพอลิไซลัน
15. ปูนซีเมนต์
16. เหล็กเสริมคอนกรีต
17. บีกเกอร์ขนาด 1000 ml
18. ขวดสีชาสำหรับ AgNO₃
19. ใบมีดตัดคอนกรีต

3.4 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

FA	=	เก้าอี้ถ่านหินขนาดละเอียดปริมาณสัดส่วนร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
RHA	=	เก้าอี้กลบละเอียดปริมาณสัดส่วนร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
CT	=	คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน
5FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
10FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
15FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
25FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
35FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40FA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย FA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
5RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
10RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
15RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
20RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
25RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
30RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
35RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
40RHA	=	คอนกรีตแทนที่ด้วย RHA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและนำมาวิเคราะห์ผลในด้านของกำลังอัด ความพรุน การต้านทานคลอไรด์ การกัดกร่อนด้วยการใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (CT) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และมีความละเอียดเท่ากับ 3600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ขณะที่ เถ้าแกลบละเอียด (RHA) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 และมีความละเอียดเท่ากับ 12000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ส่วนเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียด มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.45 และมีความละเอียดเท่ากับ 5700 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

การศึกษานี้พบว่า การปรับปรุงขนาดของของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบให้มีขนาดอนุภาคลดลงส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น (Rukzon and Chindaprasirt 2012; Rukzon and Chindaprasirt 2011; Rukzon et al 2008; Rukzon and Chindaprasirt 2008) ในการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ CT, FA และ RHA

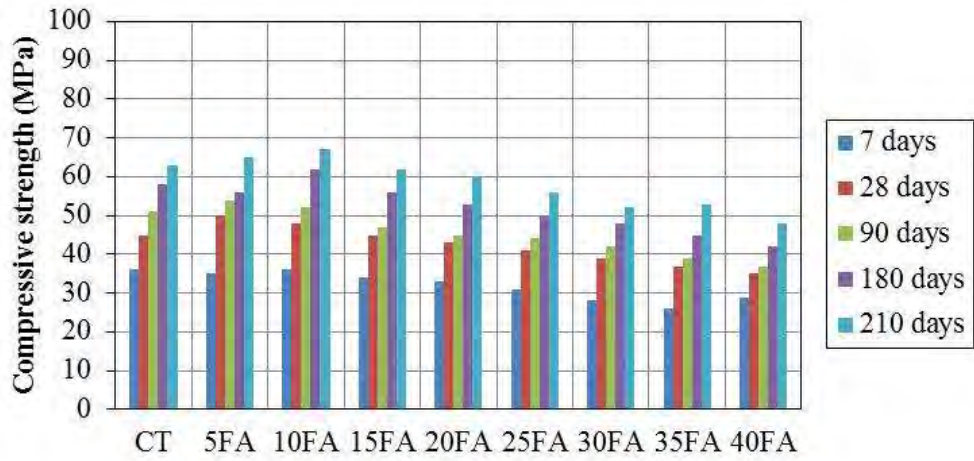
Physical properties	CT	FA	RHA
Median particle size (μm), d_{50} – ไมครอน	15.0	5.0	8
Retained on a sieve No. 325 (%)	N/A	3	3
Specific Gravity	3.14	2.45	2.24
Blaine Fineness (cm^2/gm) – ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	3,600	5,700	12,000

4.2 คอนกรีตกำลังสูง CT และ FA

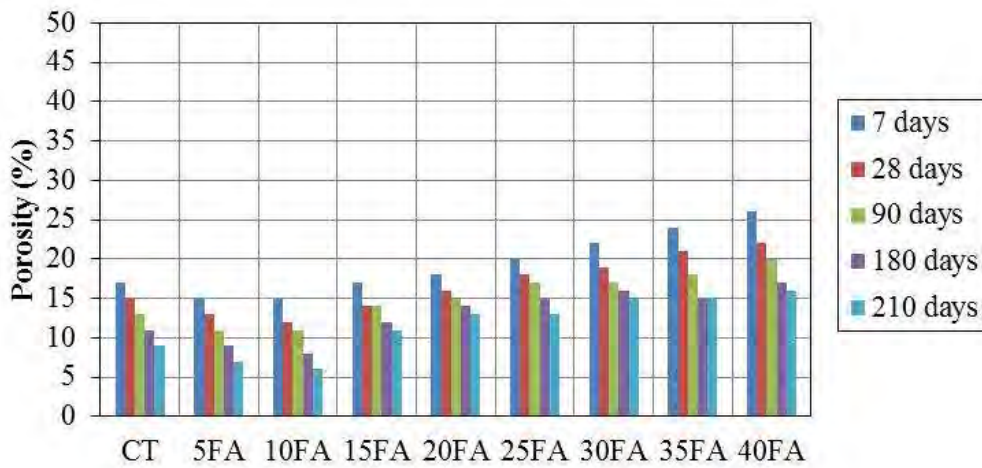
4.2.1 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง CT และ FA

การศึกษานี้พบว่าส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน FA พบว่า ลดความต้องการสารลดน้ำพิเศษ (SP) ของคอนกรีตลดลงในทุกส่วนผสมเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) และความต้องการสารลดน้ำพิเศษ (SP) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีขนาดรูปร่างของอนุภาคที่กลมตันและเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดโพรงคอนกรีต (Rukzon and Chindaprasirt 2008) และช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์และมวลรวม ในรูปที่ 4.1 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าถ่านหิน โดยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามอายุการทดสอบ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT ในทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก และกลมตันของ FA ช่วยอุดช่องว่างภายในโพรงเพสต์ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี (Rukzon and Chindaprasirt 2008) อย่างไรก็ตาม กำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 15 ขึ้นไป ในช่วงอายุต้นกำลังอัดของคอนกรีต FA มีแนวโน้มต่ำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เถ้าถ่านหินสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงถึงปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผลิตเป็นคอนกรีตกำลังสูงที่ให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 42 MPa และสูงกว่าที่ออกแบบไว้คือ 41 MPa

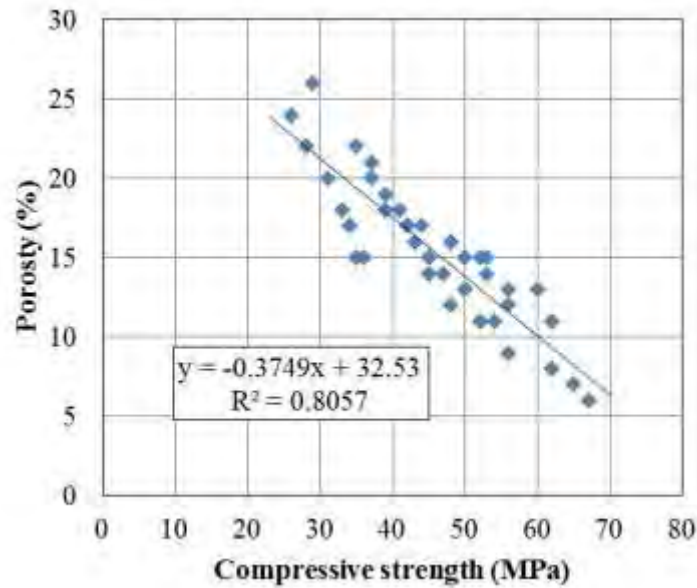
ในรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุมีความพรุนน้อยกว่าคอนกรีต CT เนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหินสามารถเข้าไปปรับปรุงขนาดของโพรงและลดความพรุนของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าเมื่อความพรุนน้อยลงค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้น (Rukzon and Chindaprasirt 2008) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าความพรุนของคอนกรีตทั้งหมดลดลงเมื่ออายุการทดสอบ ส่วนในรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุน ซึ่งพบว่าเมื่อความพรุนลดลงส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีต FA



รูปที่ 4.2 ความพรุนของคอนกรีต FA



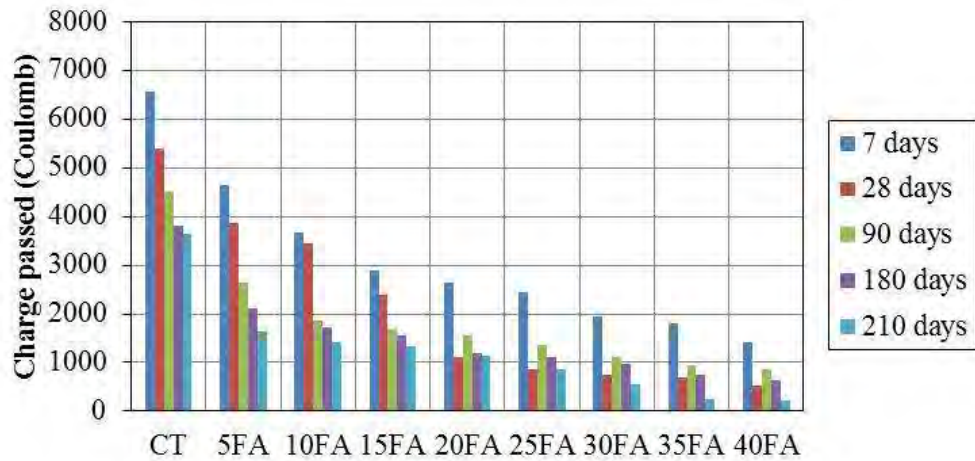
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังอัดของคอนกรีต FA

4.2.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง CT และ FA

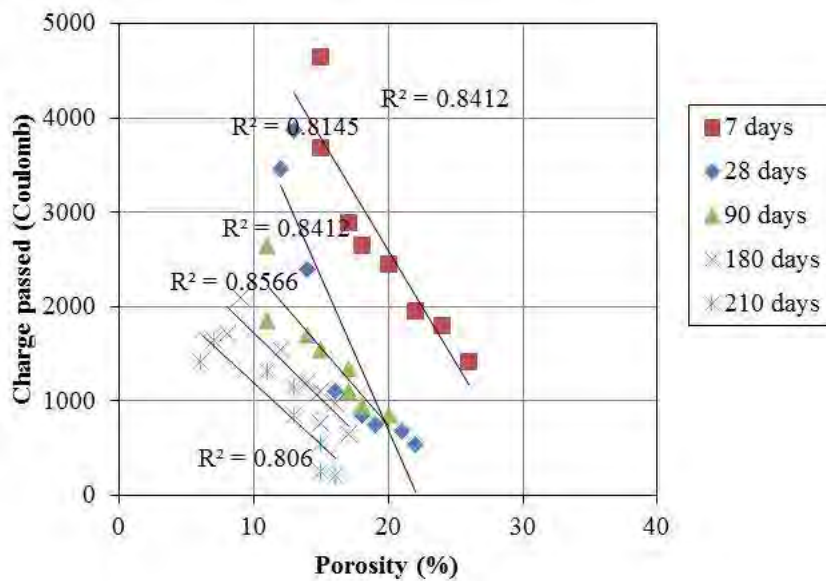
ในรูปที่ 4.4 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT และ FA ที่อายุการทดสอบ 7, 28, 90, 180 และ 210 วัน ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้พิจารณาปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) การทดสอบพบว่าปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT เนื่องจากปริมาณที่สูงกว่าของ Al_2O_3 ใน FA ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กลายเป็นแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) จากนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนคลอไรด์กลายเป็นผลึกเกลือฟิเดล ดังนั้นจึงลดการซึมผ่านคลอไรด์ได้ (Leng et al 2000; He et al 2000) ดังนั้น การแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ปริมาณที่มากส่งผลให้คอนกรีตลดค่าปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์

ในงานวิจัยได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตไว้เท่ากับ 41 MPa พบว่าสามารถใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงปริมาณร้อยละ 5-25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ MPa และสูงกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นถึงแม้ว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA ในปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จะสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีที่สุด แต่ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ จึงควรพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป ส่วนในรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึม

คลอไรด์กับกำลังอัดของคอนกรีต FA ในรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ ของคอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าถ่านหิน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อความพรุนของคอนกรีตมีค่าต่ำส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงด้วย



รูปที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต FA



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง FA

4.3 คอนกรีตกำลังสูง CT และ RHA

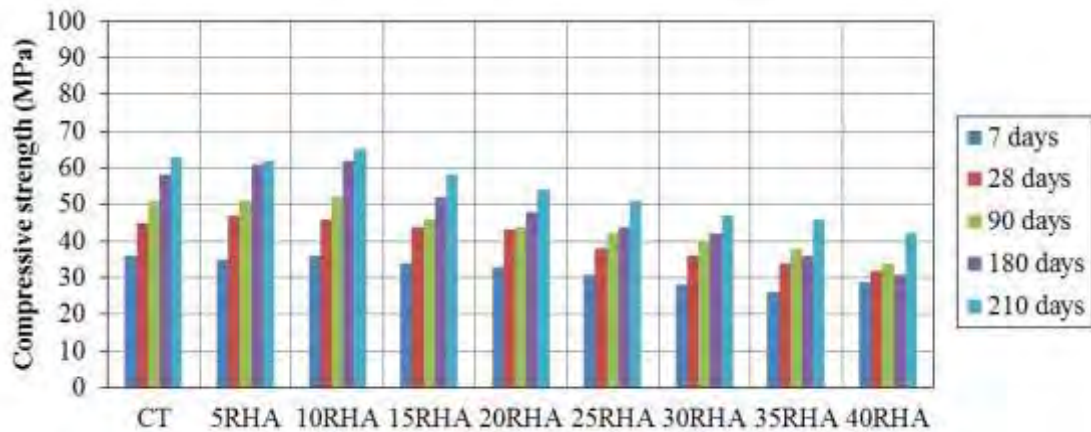
4.3.1 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง CT และ RHA

ผลการทดสอบปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าแกลบ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดให้เล็กจึงต้องการสารลดน้ำพิเศษมากกว่าปกติที่จะทำให้คอนกรีตได้ค่าการยุบตัวตามต้องการ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย RHA ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบที่มีอยู่ในอนุภาคแม้ว่าจะผ่านการบดไปแล้วก็ตาม

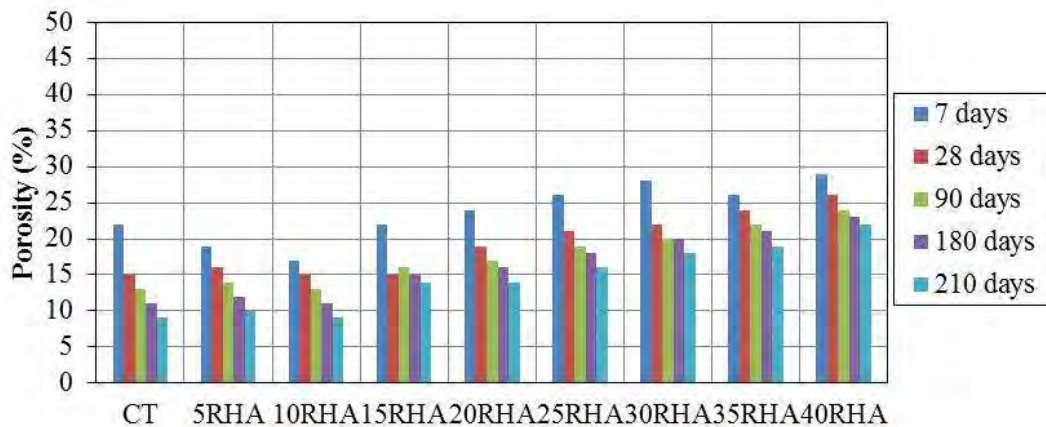
ในรูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าแกลบ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดละเอียดให้เล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น อีกทั้งเพิ่มการยึดเกาะระหว่างมวลรวมและเพสต์จึงทำให้ที่บแน่นกำลังอัดสูงขึ้น ในอายุต้นกำลังอัดคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าแกลบอาจต่ำ แต่เมื่อหลังอายุ 28 วัน การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ ที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างต่างๆ ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น (Chindaprasirt et al 2008) เถ้าแกลบสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และให้ค่ากำลังอัดสูงดังแสดงในรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีต CT การทดสอบครั้งนี้ พบว่าสามารถใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในปริมาณ ร้อยละ 5-20 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สูงระหว่าง 43 MPa และสูงกว่าที่ออกแบบไว้คือ 41 MPa เช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหิน

ความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าความพรุนใกล้เคียงกับคอนกรีต CT เนื่องจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าแกลบ เข้าไปอุดและแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของโพรงและพื้นที่ผิวที่สูงของเถ้าแกลบ เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ได้เร็ว (Leng et al 2000) การเพิ่มอายุการบ่มส่งผลให้ความพรุนลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงร้อยละที่สูงขึ้น พบว่าความพรุนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความพรุนในตัวของเถ้าแกลบยังคงมีอยู่ การเพิ่มร้อยละของความพรุน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัสดุปอซโซลานจึงต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

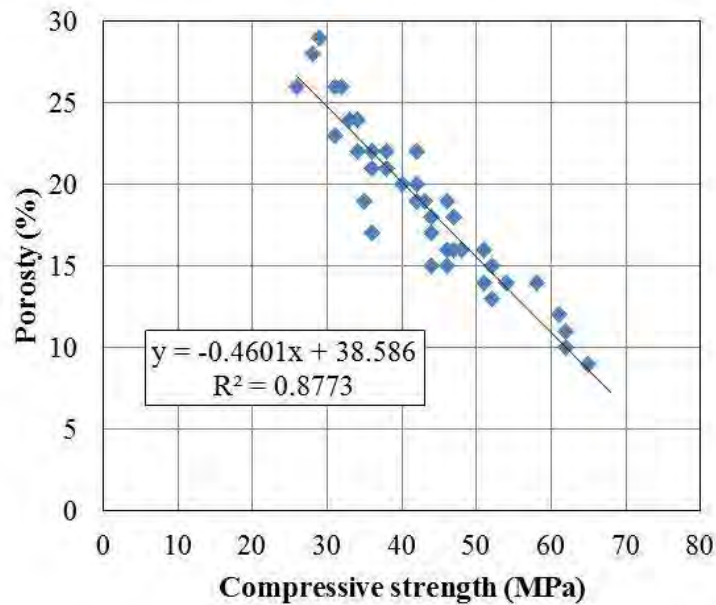
น้อยที่อายุต้น ด้วยเหตุผลนี้แม้ว่าความพรุนเพิ่มขึ้น แต่มีผลทางที่ดีในด้านการจัดเรียงหรือปรับปรุงขนาดของโพรงในคอนกรีต เนื่องจากการเพิ่มของปฏิกิริยาปอซโซลาน รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ซึ่งพบว่าเมื่อความพรุนลดลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น



รูปที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีต RHA



รูปที่ 4.7 ความพรุนของคอนกรีต RHA

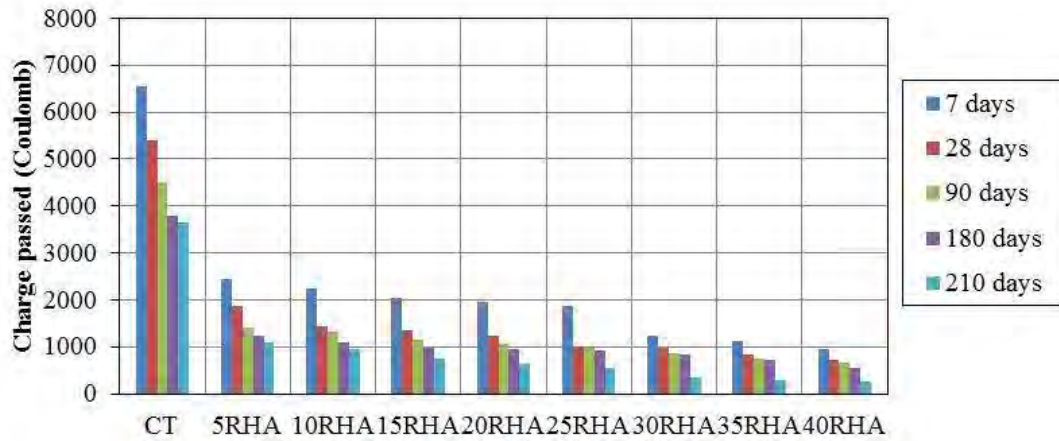


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังอัดของคอนกรีต RHA

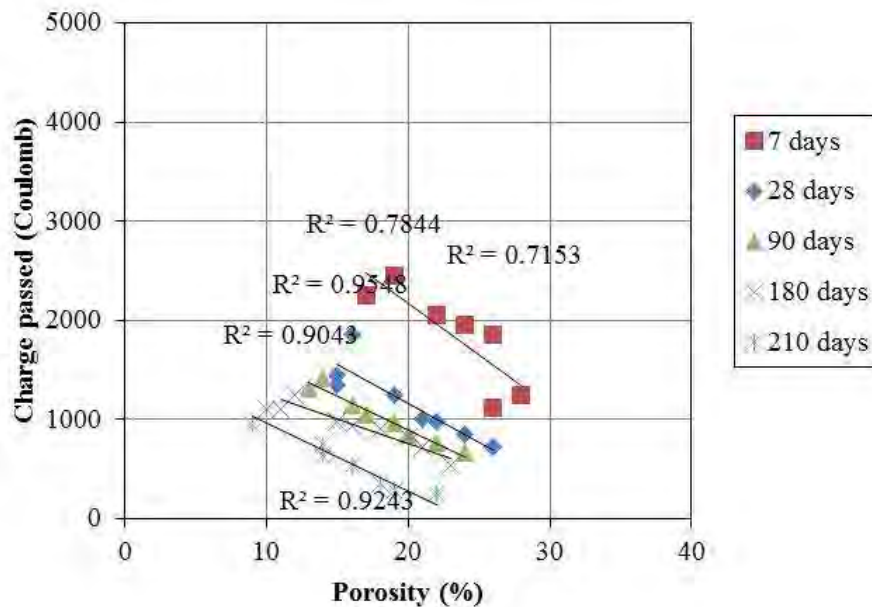
4.3.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT และ RHA

ในรูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT และคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ การศึกษาครั้งนี้พิจารณาปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตกำลังสูงเถ้าแกลบลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต CT การที่คอนกรีตกำลังสูงเถ้าแกลบต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง Ca(OH)_2 กับ SiO_2 คือ CHS ซึ่งเพิ่มความทึบแน่นแก่คอนกรีต ปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น การทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบพบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบ เมื่อผ่านการบดส่งผลให้มีอนุภาคมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถเข้าไปแทรกในโพรงหรือช่องว่างต่างๆ ภายในคอนกรีตและขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี (Rukzon et al 2008; Chindaprasirt et al 2008) เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดที่อายุ 28 วันพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 5-20 มีค่าเท่ากับ 43-46 MPa และมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 1200-1800 Coulomb ขณะที่คอนกรีตกำลังสูง

ผสมด้วยเถ้าแกบลในปริมาณร้อยละ 25-40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 30-38 MPa และมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 700-1000 Coulomb ในรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าแกบล ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อความพรุนของคอนกรีตมีค่าต่ำส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงด้วย



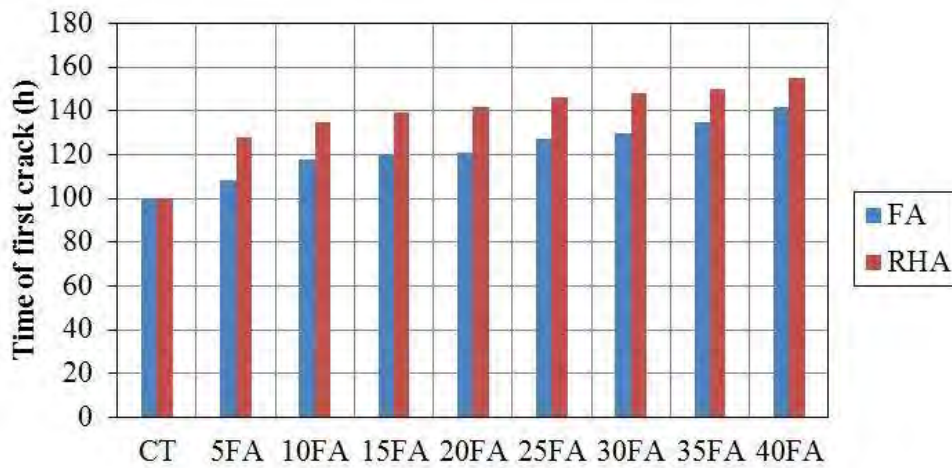
รูปที่ 4.9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RHA



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกำลังสูง RHA

4.4 การกัดกร่อนของคอนกรีตกำลังสูง

ในรูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน การต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ ผลการทดสอบ พบว่าเถ้าแกลบต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง Ca(OH)_2 กับ SiO_2 คือ CHS ซึ่งเพิ่มความทึบแน่นแก่คอนกรีต ปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ลดลง



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และแนวทางต่อการวิจัยอย่างต่อเนื่องในการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนสำหรับใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาการใช้ถ่านหิน และเถ้าแกลบในคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งพบว่าเถ้าถ่านหิน (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) สามารถใช้ในการผลิตคอนกรีต กำลังสูงได้ โดยให้ค่ากำลังอัดที่สูง ความพรุนต่ำ และต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนได้ดี เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดที่อายุ 28 วันพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 5-20 มีค่าเท่ากับ 43-46 MPa และมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 1200-1800 Coulomb ขณะที่คอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 25-40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 30-38 MPa และมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 700-1000 Coulomb ดังนั้น ในการใช้งานส่วนผสมคอนกรีตจึงสามารถพิจารณาเลือกค่าการซึมผ่านคลอไรด์ให้สอดคล้องกับกำลังอัดนอกจากนั้น ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความพรุนลดลงส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยยังต้องการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการทดสอบคุณสมบัติอื่นเพิ่มเติมในส่วนที่ตัวอย่างคอนกรีตมีข้อจำกัดในการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในกระบวนการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจากเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นการพัฒนาเถ้าทิ้งให้เกิดประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าหรือเปลี่ยนจากของไม่มีมูลค่าให้มีมูลค่าขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ASTM C33, 2001, Standard Specification Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standard, 04.02, 10-17.
- ASTM C136, 1998, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM Standard, 04.02, 78-82.
- ASTM C618, 2005, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standard, 04.02, 323-325.
- Atis, C.D., 2003. High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage. *Journal of materials in Civil Engineering*, 15, 153-156.
- Behnood, A., Ziari, Hasan., 2008, Effect of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 30, 106-112.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., 2008, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 22, 1601-1606.
- Chindaprasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H.T., Sirivivatnanon, V., 2007, Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete, *Construction and Building Materials*, 21, 356-361.
- Erdem, T.K., Kirca, O., 2008, Use of binary and ternary blends in high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 1447-1483.
- Jaturapitakkul, C., KiatTikomol, K., Sata, V., Leekeeratikul, T., 2004, Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 549-555.
- 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.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Megat Johari, M.A., Brooks, J.J., Kabir, S., Rivard, P., 2011, Influence of supplement cementitious materials on engineering properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 2639-2648.
- Megat Johari, M.A., Brooks, J.J., Kabir, S., Rivard, P., 2011, Influence of supplement cementitious materials on engineering properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 2639-2648.
- Mazloom, M., Ramizianpore, A.A., Brooks, J.J., 2004, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26, 347-357
- Nath, P., Sarker, P., 2011. Effect of fly ash on the durability properties of High-strength concrete, *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
- Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2012, Use of bagasse ash in high-strength concrete, *Materials and Design*, 34, 45-50.
- 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.
- 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.
- Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2008, Development of classified fly ash as a pozzolanic material, *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 1097-1102.
- Raman, S.N., Ngo, T., Mendis, P., Mahmud, H.B., 2011, High strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand, *Construction and Building Materials* 25, 3123-3130.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- 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.
- Weerachat, T., Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P., 2009, Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete, *Construction and Building Materials* , 23, 2641-2646.
- Yen, T., Hsu, T.H., Liu, Y.W., Chen, S.H., 2007, Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 21, 458-463.



ภาคผนวก

ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย

ส่วน ค : ประวัติคณะผู้วิจัย

ค. 1 หัวหน้าโครงการ:

- ชื่อ รศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน (Assoc. Prof. Dr. Sumrerng Rukzon)
- รหัสประจำตัว 3 1805 00327 90 8
- ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
- หน่วยงานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา
96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
โทรศัพท์ 02 497 8573 โทรสาร 02 497 8573
E-mail: sumrerng.ruk@mutr.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิ	ชื่อสถานศึกษาและประเทศ	ปี พ. ศ. ที่จบ
ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (วช. เทเวศร์) ประเทศไทย	2537-3539
ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศไทย	2543-2545
ปริญญาเอก	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย	2547-2550

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

โครงสร้างเชิงประกอบ คอนกรีต วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมกลศาสตร์คำนวณ สิ่งประดิษฐ์และจีไอโพลีเมอร์

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้วและทุนที่ได้รับ

ชื่อทุนวิจัย	แหล่งทุนที่ให้	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
การใช้เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุพอลิโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2551
อิทธิพลของความละเอียดของวัสดุพอลิโซลานต่อความคงทนของมอร์ตาร์	สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา	2551
การพัฒนาเถ้าถ่านหินแยกขนาดเป็นวัสดุพอลิโซลาน	ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2550
การพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2553
การใช้เถ้าถ่านหิน เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีตกำลังสูง	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2553

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้วและทุนที่ได้รับ (ต่อ)

ชื่อทุนวิจัย	แหล่งทุนที่ให้	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
การวิจัยด้านวัสดุปูนฉาบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2554
นวัตกรรมการใช้เถ้าหนักในคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2555
การพัฒนาคอนกรีตพอลิโซลานไหลเข้าแบบง่ายด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้งสองชนิดรวมกัน	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2555-2556
นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2556
การพัฒนาเถ้าหนักเป็นวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2557
นวัตกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2557
การพัฒนาเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตกำลังสูง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558
นวัตกรรมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีตมวลเบาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558
การวิจัยด้านคอนกรีตพูนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558
ผู้ร่วมวิจัยภายใต้ทุนเมธีวิจัย อวูโส	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย	2555-2557
ผู้ร่วมวิจัยภายใต้ทุนเมธีวิจัย อวูโส	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย	2557-2560

7.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่

7.2.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ (Full paper)

- 7.2.1.1 Chindaprasirt, 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.
- 7.2.1.2 Chindaprasirt, 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.
- 7.2.1.3 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.
- 7.2.1.4 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2008, Development of classified fly ash as a pozzolanic material, *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 1097-1102.
- 7.2.1.5 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, 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.
- 7.2.1.6 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, 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.
- 7.2.1.7 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, 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.
- 7.2.1.8 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2009, Use of disposed waste ash from landfills to replace Portland cement, *Waste Management and Research*, 27(6), 588-594.

- 7.2.1.9 **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.
- 7.2.1.10 **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.
- 7.2.1.11 **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.
- 7.2.1.12 **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.
- 7.2.1.13 **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.
- 7.2.1.14 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.
- 7.2.1.15 **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.
- 7.2.1.16 **Rukzon, S.**, Chindapasirt, P., 2012, Use of bagasse ash in high-strength concrete, *Materials and Design*, 34, 45-50.

- 7.2.1.17 Chindaprasirt, P., **Rukzon, S.**, 2015, Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand, *Materials and Structures*, Has been accepted, online first (in press).
- 7.2.1.18 Chindaprasirt, P., Chottitanorm, C, Sata, V., **Rukzon, S.**, 2013, SathonsaowapHark, A., High calcium bottom ash geopolymer : sorptivity, pore size and resistance to sodium sulfate attack, *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 25(1), 105–111.
- 7.2.1.19 **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*, 20(8), 808-814.
- 7.2.1.20 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., Vanchai, S., Wongkongkeaw, w., 2013, The innovation of use of waste ash from agricultural by-product in concrete work, *Journal of Applied Sciences Research* 9,12, 6160-6164.
- 7.2.1.21 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2014, Strength and porosity of bagasse ash-based geopolymer mortar, *Journal of Applied Sciences*, 14(6), 586-591.
- 7.2.1.22 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2014, Use of ternary blend of Portland cement and two pozzolans to improve durability of high-strength concrete. *KSCE Journal of in Civil Engineering*, 18(6), 1745-1752.
- 7.2.1.23 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2014, Use of rice husk-bark ash in producing self-compacting concrete, *Advances in Civil Engineering*, 2014, Article ID 429727.
- 7.2.1.24 **Rukzon, S.**, Chindaprasirt, P., 2015, Physical properties of cement mortar containing waste ash, *Applied Mechanics and Materials*, 804, 129-132.

7.2.2 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ (Full paper)

- 7.2.2.1 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.2.2 Rukzon, S., Chindapasirt, 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
- 7.2.2.3 Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2008, Strength and chloride penetration of mortar with mixture proportioning in ternary cementitious system, KMUTT Research and Development Journal, 31(4), 859-869.
- 7.2.2.4 Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2008, Use of ternary cementitious system in concrete work, Civil Engineering Magazine, 20(5), 70-76.
- 7.2.2.5 Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2009, Corrosion of reinforcement in concrete, Civil Engineering Magazine, 21(2), 41-46.

7.2.3 ผลงานประชุมวิชาการต่างประเทศ (Proceedings)

- 7.2.3.1 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.3.2 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.3.3 Chotetanorm, C., Chindapasirt, P., Sata, V., Boonserm, K., Rukzon, S., Sathonsaowaphak, A., Homwuttiwong, S., Manasri, T., 2014, The effect of nano silica on compressive strength, sorptivity and ultrasonic pulse velocity of mortars containing bottom ash, The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI), 28-30 August 2014, Apsara Angkor Resort & Conference, Siem Reap, Kingdom of Cambodia

7.2.4 ผลงานประชุมวิชาการในประเทศ (Proceedings)

- 7.2.4.1 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.1.2 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.1.3 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.
- 7.2.1.4 Rukzon, S., Chindapasirt, 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.
- 7.2.1.5 ชัยชาญ โชติถนอม, ปริญญา จินดาประเสริฐ, สำเร็จ รักซ้อน, วันชัย สะตะ, อภา สธนเสาวภาคย์, 2555, ความสามารถต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังไว้ใน จีโพลิเมอร์เถ้าหนัก, งานประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 8, ชลบุรี, 22-24 ตุลาคม 2555.
- 7.2.1.6 ชัยชาญ โชติถนอม, ปริญญา จินดาประเสริฐ, สำเร็จ รักซ้อน, วันชัย สะตะ, อภา สธนเสาวภาคย์, 2555, ความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าจีโพลิ เมอร์เถ้าหนักงาน, ประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 8, ชลบุรี, 22-24 ตุลาคม 2555.
- 7.2.1.7 Rukzon, S., and Chindapasirt, P. (2013b). Durability of concrete using of two kinds of pozzolanic materials. TRF Senior Research Scholars Progress II Faculty of Engineering, Khon Kean University, August 2

7.3 บทความทางวิชาการ

- 7.3.1 Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2008, Use of ternary cementitious system in concrete work, Civil Engineering Magazine, 20(5), 70-76.
- 7.3.2 Rukzon, S., Chindapasirt, P., 2009, Corrosion of reinforcement in concrete, Civil Engineering Magazine, 21(2), 41-46.

7.4 ผลงานวิชาการในลักษณะอื่น เช่น สิ่งประดิษฐ์ วรรณกรรม ฯลฯ

- 7.4.1 สิ่งประดิษฐ์ เรื่อง “วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ มีเก้าถ่านหินแยกขนาดผสมรวมกับเก้าชาน อ้อยบด Petty Patent No. 7957”
- 7.4.2 สิ่งประดิษฐ์ เรื่อง “วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ มีเก้าถ่านหินผสมรวมกับเก้าเกลบ-เปลือกไม้ Petty Patent No. 7958”
- 7.4.3 สิ่งประดิษฐ์ เรื่อง “เครื่องบดวัสดุซีเมนต์จากเก้าทั้ง Petty Patent No. 5440”
- 7.4.4 วรรณกรรม ลิขสิทธิ์ตำรา/หนังสือ เรื่อง “การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน เลขที่ 236666”
- 7.4.5 วรรณกรรม ลิขสิทธิ์ตำรา/หนังสือ เรื่อง “การออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก เลขที่ 210582”
- 7.4.6 วรรณกรรม ลิขสิทธิ์ตำรา/หนังสือ เรื่อง “ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี เลขที่ 210583”

7.5 งานแต่ง เรียบเรียง หนังสือ / ตำรา

- 7.1.1 **Sumrerng Rukzon**, 2012, Reinforced Concrete Structure Design: Strength and Working Design Method, 5th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 426 pages.
- 7.1.2 **Sumrerng Rukzon**, 2009, Timber and Steel Structure Design, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.
- 7.1.3 **Sumrerng Rukzon**, 2009, Theory and Testing Concrete Technology, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.
- 7.1.4 **Sumrerng Rukzon**, 2011, Handbook of Reinforced Concrete Structure Design, 1st edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 244 pages.
- 7.1.5 **Sumrerng Rukzon**, Prinya Chindapasirt, 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) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ
- 3) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ
- 3) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ
- 4) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ
- 5) สมาชิกระดับวุฒิสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.)
- 6) ไปประกอบวิชาชีพวิศวกรรม (ก.ว.) ระดับสามัญวิศวกรโยธา
- 7) สมาชิกเครือข่ายจีโอโพลีเมอร์ไทย
- 8) เป็นกรรมการพิจารณาร่างหลักสูตรปริญญาโท มทร.ตะวันออก และหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
- 9) เป็นกรรมการ/ประธานกรรมการสอบนักศึกษาระดับปริญญาโท/เอก

7.4 สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

- 7.4.1 Conservative Energy of Grinding Machine for Pozzolan Materials, Petty Patent No. 3674
- 7.4.1 วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ มีเถ้าถ่านหินแยกขนาดผสมรวมกับเถ้าชานอ้อยบด Petty Patent No. 7957
- 7.4.2 วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ มีเถ้าถ่านหินผสมรวมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ Petty Patent No. 7958
- 7.4.3 เครื่องบดวัสดุซีเมนต์จากเถ้าทิ้ง Petty Patent No. 5440

7.5 ทุนวิจัย / รางวัล

ชื่อรางวัล	หน่วยงานที่ให้	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท	วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท กรมอาชีวศึกษา	2552
รางวัลนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2552
รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานดีเด่นในการขอรับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2552
รางวัลนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2553
รางวัลนักวิจัยระดับดีเด่น สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2555
รางวัลนักวิจัยดีเด่นด้านการตีพิมพ์ผลงานวิจัย สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2556
รางวัลวิทยานิพนธ์ดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2552
รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานด้านการวิจัยระดับดีเยี่ยม	ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2552
รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานวิจัยดีเด่น	ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2552
รางวัลการนำเสนอผลงานวิจัยระดับดี	การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ทั้ง 9 แห่ง ครั้งที่ 3 และ 4	2556

7.6 งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

โครงการวิจัยงบประมาณ ปี พ. ศ. 2559 กำลังดำเนินการ (ขณะเขียนขอทุน ปี พ.ศ. 2560)



ค. 2 ที่ปรึกษาโครงการ: (1)

1. ชื่อ ศ. ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ
(Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt)
2. รหัสประจำตัว 3 4099 00531 56 7
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ศาสตราจารย์ ระดับ 11
รองประธานสมาคมคอนกรีตไทย
ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนมหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประธานเครือข่ายจีโอโพลิเมอร์ไทย
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 และจีโอโพลิเมอร์

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ (Full paper) ใน SCOPUS

1. DJ. Cook, P. Chindaprasirt, Influence of loading history upon the compressive properties of concrete, Magazine of Concrete Research, 32,111,1980,89-100.
2. DJ. Cook, P. Chindaprasirt, A mathematical model or the prediction of damage in concrete, Cement and Concrete Research, 11,4,1981,581-590.
3. DJ. Cook, P. Chindaprasirt, Influence of loading history upon the tensile properties of concrete, Magazine of Concrete Research, 33,116,1981,154-160.

4. P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon, Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34,2004,1087-1092.
5. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, *Cement and Concrete Composite*, 27,2005,425-428.
6. P. Chindaprasirt, N. Buapa, H. T. Cao, Mixed cement containing fly ash for masonry and plastering work, *Construction and Building Materials*, 19,2005,612-618
7. P. Chindaprasirt, C. Chotithanorn, HT. Cao, V. Sirivivatnanon, Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete, *Construction and Building Materials*, 21,2007,356-361.
8. P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivananon, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, *Cement and Concrete Composites*, 29,3,2007,224-229.
9. P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and HT. Cao, Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash, *Construction and Building Materials*, 21,2007,1356-1361.
10. P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, C. Jaturapitakkul, Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash, *Construction and Building Materials*, 21,2007,1492-1499.
11. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials*, 21,2007,1534-1541.
12. S. Rukzon, P. Chindaprasirt, Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar, *Computers and Concrete*, 5,1,2008,1-6.
13. P. Chindaprasirt, K. Pimraksa, A study of fly ash-lime granule unfired brick, *Powder Technology*, 2008,182(1),33-41.
14. P. Chindaprasirt, S. Rukzon, Development of classified fly ash as a pozzolanic material, *Journal of Applied Sciences*, 2008,8(6),1097-1102.
15. P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y.Yuasa, Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Construction and Building Materials*, 22,5,2008,894-901.

16. P. Chindapasirt, S. Rukzon, V. Sirivivatnanon, Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, *Construction and Building Materials*, 22,5,2008,932-938.
17. P. Chindapasirt, S Rukzon, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 22, 8,2008,1601-1606.
18. P. Chindapasirt, S Rukzon, V. Sirivivatnanon, Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar, *Construction and Building Materials*, 22,8,2008,1701-1707.
19. W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 22,8,2008,1812-1819.
20. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 2008,30 (4),485-489.
21. C. Napia, T. Sinsiri, P. Chindapasirt, The effect of zeolite on microstructure of blended cement paste, 2008, EASEC-11 - Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction
22. P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, U. Rattanasak, Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate, *Fuel*, 88,1,2009,158-162.
23. K. Pimraksa, P. Chindapasirt, Lightweight bricks made of diatomaceous earth and hydrated lime, *Ceramic International*, 35,2009,471-478.
24. P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak, Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, *Waste Management*, 29,2009,539-543.
25. S. Rukzon, P. Chindapasirt, R. Mahachai, Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formerly Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material)*16,2,2009,242-247.
26. W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater, *Marine Structures*, 22,2009,341-353.
27. W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 23,2009,2641-2646.

28. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16,4,2009, 475-481.
29. S. Rukzon, P. Chindapasirt, An experimental investigation of carbonation of blended Portland cement palm oil fuel ash mortar in indoor environment, *Indoor and Built Environment*,18,4,2009, 313–318.
30. K. Pimraksa, S. Hanjitsuwan, P. Chindapasirt, Synthesis of belite cement from lignite fly ash, *Ceramics International*, 35,2009,2415-2425.
31. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Use of disposed waste ash from landfills to replace portland cement, *Journal of Waste Management Research*, 2009, 27: 588-594.
32. A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, K. Pimraksa, Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 2009, 44-50.
33. U. Rattanasak, P. Chindapasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22,12,2009, 1073-1078.
34. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and ground river sand, *Computer and Concrete*, 2009,6(5),391-401.
35. P. Chindapasirt, S. Rukzon, Pore structure changes of blended cement pastes containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009,21,11, 666-671
36. S. Detphan, P. Chindapasirt, Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formerly Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material)*,16,6,2009, 720-726
37. K. Pimraksa, T. Chareerat, P. Chindapasirt, N. Mishima, S. Hatanaka, Composition and microstructure of fly ash geopolymer containing metakaolin, *Excellence in Concrete Construction through Innovation - Proceedings of the International Conference on Concrete Construction*, 2009,201-206
38. P. Chindapasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima and Y. Yuasa, Effects of binder strength and aggregate size on compressive strength and void ratio of porous concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formerly Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material)*,16,6,2009, 714-719.

39. S. Songpiriyakit, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Compressive strength and degree of reaction of biomass and fly ash based geopolymer, *Construction & Building Materials*, 24 (2010) 236–240.
40. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22,3, 253-259.
41. P. Chindapasirt, U. Rattanasak, Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer, *Waste Management*, 30,2010, 667-672.
42. U. Rattanasak, P. Chindapasirt, P. Suwanvitaya, Development of high volume rice husk ash alumino-silicate composite, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formerly Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material)*, 2010, 654-659.
43. K. Pimraksa, P. Chindapasirt, N. Setthaya, Synthesis of zeolite phases from fly ash, bottom ash and rice husk ash used for Ag, Cd and Ni ion adsorption, *Journal of Waste Management and Research*, 28 (12) 2010, 1122-1132. DOI: 10.1177/0734242X09360366.
44. T. Chareerat, V. Detphan, P. Chindapasirt, Initial study on rice husk ash and fly ash-based flowable geopolymer mortar, *Materials, Experimentation, Maintenance and Rehabilitation - Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2010* , pp. 621-62.
45. J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete, *Materials and Design* 31 (2010), 4748–4754
46. T. Sinsiri, P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, Influence of fly ash fineness and shape on the porosity and air permeability of blended cement paste, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010,17(6), 683-690.
47. P. Chindapasirt, U. Rattanasak, C. Jaturapitakkul, Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials, *Cement and Concrete Composites*, 33,2011, 55-60
48. S. Hanjitsuwan, P. Chindapasirt, K. Pimraksa, A Study on Electrical Conductivity and Dielectric Property of Fly Ash Geopolymer Paste, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2011,18,1,94-99.

49. P.Chindaprasirt, U. Rattanasak, Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash, *Materials and Design*, 32 (2) 2011, 723-727.
50. C. Rittiruth, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa, Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymer paste, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2011,18,1, 100-104.
51. P. Chindaprasirt, T. Chareerat, S. Hatanaka, T. Cao, High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23,3,2011, 2264-270.
52. S. Rukzon, P. Chindaprasirt, Chloride penetration and corrosion resistance of ground fly ash blended cement mortar, *International Journal of Materials Research*, 102,2011,3,335-338
53. P. Chindaprasirt, C. Chotetanorm, S. Rukzon, Use of palm oil fuel ash to improve the chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011,23 (4), 499-503
54. U. Rattanasak, K Pankhet, P. Chindaprasirt, Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2011,18(3), 364-369.
55. K. Somna, C. Jaturapitakkul, Puangrat Kajitvichyanukul, Prinya Chindaprasirt, NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature, *Fuel*, 90,2011(6),2118-2124.
56. P. Chindaprasirt, K. Boonserm, T. Chairuangsi, W. Vichit-Vadakan, T. Eaimsin, T. Sato, K. Pimraksa, Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives, *Construction and Building Materials*, 2011,25(8), 3193-3203.
57. K. Pimraksa, P. Chindaprasirt, T. Lertkhositpong, K. Sagoe-Crentsil, T. Sato, Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ ratios, *Materials Science and Engineering A*, 2011,25(8), 6616-6623.
58. V. Sata, P. Khammathit, P. Chindaprasirt, Efficiency factor of high calcium Class F fly ash in concrete, *Computers and Concrete*, 2011,8(5),583-595
59. K. Jitchaiyaphum, T. Sinsiri, P. Chindaprasirt, Cellular lightweight concrete containing pozzolan materials, *Procedia Engineering*, 2011, pp. 1157-1164

60. W. Kroehong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials*, 2011,25(11), 4095-4104.
61. A. Chaipanich, R. Rianyoi, R. Potong, W. Suriya, N. Jaitanong, P. Chindapasirt, Dielectric properties of 2-2 PMN-PT/cement composites, *Ferroelectrics, Letters Section*, 2012,39 (4-6),76 - 80.
62. V. Sata, J. Tangpagasit, C Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Effect of W/B Ratios on Pozzolanic Reaction of Mortars Containing Biomass Ashes, *Cement and Concrete Composites*, 2012,34,94-100
63. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Utilization of bagasse ash in high strength concrete, *Materials and Design*, 2012,34,45-50
64. T. To-in, V. Sata, , C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Porous high-calcium fly ash geopolymer concrete, *CBM*, 2012,30(7) 366-371.
65. V. Sata, A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack, *Cement and Concrete Composites*, 2012,34(5),700-708
66. S. Vangchangyia, E. Swatsitang, P. Thongbai, S. Pinitsoontorn, T. Yamwong, S. Maensiri, V. Amornkitbamrung, P. Chindapasirt, Very low loss tangent and high dielectric constant in pure-CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics prepared by a modified sol-gel process, *Journal of the American Ceramic Society*, 2012,95 (5),1497-1500
67. K. Boonserm, V. Sata, K. Pimraksa, P. Chindapasirt,, Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash and using waste gypsum as additive, *Cement and Concrete Composites*, 2012,34,819-24
68. T.Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, P. Chindapasirt, The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, *Computers and Concrete*, 2012,9(6), 427-437
69. P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, S. Hanjitsuwan, Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash based geopolymer systems, *Journal of Materials Science*, 2012,47 (12),4876-4883
70. C. Napia, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, *Waste Management* 2012,32(7),1459-1467

71. K. Boonserm, V. Sata, K. Pimraksa, P. Chindapasirt, Micro structure and strength of blended FBC-PCC fly ash geopolymer containing gypsum as additive, *ScienceAsia*, 2012,38, 175–181
72. S. Homwuttiwong, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Strength and water permeability of concrete containing various types of fly ash and filler material, *Inter Journal of Mater. Research*, 2012,103(8), 1058-64
73. S. Hatanaka, N. Mishima, T. Nakagawa, H. Morihana, P. Chindapasirt, Finishing methods and compressive strength-void ratio relationships of in-situ porous concrete pavement, *Computers and Concrete*, 2012,10(3), 231-240
74. P. Chindapasirt, U. Rattanasak, P. Vongvoradit, Thermal treatment and utilization of Al-rich waste in high calcium fly ash geopolymeric material, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 19(9), 872-878.
75. S. Homwuttiwong, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Permeability and abrasion resistance of concrete containing high volume fine fly ash and palm oil fuel ash, *Computers and Concrete*, 2012, 10(4), 331-342
76. K. Chaimoon, S. Pantura, S. Homwuttiwong, A. Wongkvanklom, P. Chindapasirt, Factors affecting the workability and strength of high calcium fly ash geopolymer concrete, *Environmental Engineering and Management Journal*, 2012,11(8), 1821-1829
77. T. Sinsiri, W. Kroehong, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste, *Materials and Design*, 2012,42, 424-433
78. C. Waisurasingha, P. Chindapasirt, W. Sri-Amporn, S. Chuangcham, The utilization of geographic information systems and multi-criteria decision making with local community participation for selection of site for micro hydropower project: A case study of Chi river Basin, Thailand, 2012, 33rd Asian Conference on Remote Sensing 2012, ACRS 2012 2 , pp. 1201-1205
79. S. Kantakam, K. Pimraksa, A. Ngamjarurojana, P. Chindapasirt, A. Chaipanich, Investigation on the dielectric properties of 0–3 lead zirconate titanate-geopolymer composites, *Ferroelectrics*, 2013, 451 (1), 84-89.
80. P. Chindapasirt, U. Rattanasak, S. Taebuanhuad, Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer, *Materials and Structure*, 2013,46(3), 375-381

81. P. Chindapasirt, S. Thaiwitcharoen, S. Kaewpirom U. Rattanasak, Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete, *Cement and Concrete Composite*, 2013,41,24–28
82. K. Pimraksa, P. Chindapasirt, T. Huanjit, C. Tang, T. Sato, Cement mortars hybridized with zeolite and zeolite-like materials made of lignite bottom ash for heavy metal encapsulation, *Journal of Cleaner Production*, 2013,41, 31-41
83. C. Chotetanorm, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Rukzon, A. Sathonsaowapak, High-calcium bottom ash geopolymer: sorptivity, pore size, and resistance to sodium sulfate attack, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013,25,1, 105-111.
84. A. Chaipanich, R Rianyo, R Potong, N Jaitanong, P. Chindapasirt, 2013 Compressive Strength and Microstructure of 0-3 Lead Zirconate Titanate Ceramic-Portland Cement Composites, *Ferroelectrics* 457 (1), 53-61.
85. S. Rukzon, P. Chindapasirt, Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013,20(8) 808-814
86. P. Kamhangrittirong, P. Suwanvitaya, W. Witayakul, P. Suwanvitaya, P. Chindapasirt, Factors influence on shrinkage of high calcium fly ash geopolymer paste, Vol. 610 – 613, 2012, 2275-2281.
87. P. Jitsangiam, P. Chindapasirt, H. Nikraz, An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions, *Construction and Building Materials* 2013, 40, 961–970
88. T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Pangdaeng, T. Sinsiri, Properties of high calcium fly ash geopolymer pastes with Portland cement as an additive, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20(2) 214-219
89. V. Sata, A. Wongsa, P. Chindapasirt, Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 2013,42, 33–39
90. P. Thongbai, V. Amornkitbamrung, T. Yamwong, S. Maensiri, P. Chindapasirt, Reducing loss tangent by controlling microstructure and dielectric relaxation behaviors of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Volume 10, Issue Supplement s1, pages E77–E87, September/October 2013.
91. K. Jitchaiyaphum, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, Cellular lightweight concrete containing high-calcium fly ash and natural zeolite, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013,20(5), 462-471

92. P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, S. Taebuanhuad, Role of microwave radiation on curing the fly ash geopolymer, *Advanced Powder Technology*, 2013,24(3),703–707
93. N. Sangwong, P. Thongbai, T. Yamwong, S. Maensiri, P. Chindaprasirt, Dielectric response and electrical behavior $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{-xV}_x\text{O}_{12}$ Ceramics prepared by a simple poly(ethylene glycol) sol-gel route. *Japanese Journal of Applied Physics* 2013,52, pp.06GF05-1
94. P. Posi, S. Lertnimoolchai, V. Sata, P. Chindaprasirt, Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate, *Construction and Building Materials*, 2013,47, October, 896–901
95. P. Sukmak, S. Horpibulsuk, S.L. Shen, P. Chindaprasirt, Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 2013, 47, October, 1125–1136.
96. T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, T. Sinsiri, High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 20, August 2013, 310-8.
97. Y. Zaetang, A. Wongsu, V. Sata, P. Chindaprasirt, Use of lightweight aggregates in pervious concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 48, November 2013, 585–591
98. W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, P. Chindaprasirt, A. Chaipanich, Thermogravimetry of ternary cement blends - Effect of different curing methods, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, September, 113:1079–90.
99. P. Chindaprasirt, T. Sinsiri, C. Napia, C. Jaturapitakkul, Solidification of heavy metal sludge using cement, fly ash and silica fume, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 20, October 2013, 405-414.
100. S. Boonjaeng, K. Pimraksa, A. Chaipanich, S. Kuharungrong, P. Chindaprasirt, Thermal activation on phase formation of alkaline activated kaolin based system, *Advanced Materials Research*, Volume 770, 2013, 262-266
101. N. Setthaya, C. Pindi, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa, Synthesis of faujasite and analcime using of rice husk ash and metakaolin, *Advanced Materials Research*, Volume 770, 2013, Pages 209-212
102. P. Posi, C. Teerachanwit, C. Tanutong, S. Limkamoltip, S. Lertnimoolchai, V. Sata, P. Chindaprasirt, Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block, *Mat and Design*, 2013, 52, 580-586

103. A. Chaipanich, R Rianyoi, R Potong, P Penpokai, P. Chindapasirt, Dielectric and piezoelectric properties of 2-2 PZT-portland cement composites, *Integrated Ferroelectrics* 2013, 149 (1), 89-94.
104. S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, P. Chindapasirt, Influence of curing condition on the properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive, *Materials & Design*, 2014, 53, 269–274
105. S. Hanjitsuwan, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, P. Chindapasirt, Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, *Cement and Concrete Composites* 45 (2014) 9–14.
106. P. De Silva, S. Hanjitsuwan, P. Chindapasirt, The role of SiO₂ & Al₂O₃ on the properties of geopolymers with and without calcium, *Ceramic Engineering and Science Proceedings* 34 (10), 25-35
107. T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, S. Hatanaka, The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Mat and Design*, March 2014, 58–65
108. S. Hunpratub, T. Yamwong, S. Srilomsak, S. Maensiri, P. Chindapasirt, Effect of particle size on the dielectric and piezoelectric properties of 0-3BCTZO/cement composites, *Ceramics International*, 40 (1 PART A), 2014, 1209-1213.
109. P. Thongbai, T. Yamwong, S. Maensiri, V. Amornkitbamrung, P. Chindapasirt, Improved dielectric and nonlinear electrical properties of fine grained-CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics prepared by a glycine nitrate process, *J. Am. Ceram. Soc.*, 1–6 (2014)
110. P. Chindapasirt, P. Paisitsrisawat, U. Rattanasak, Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-activated composite, *Advanced Powder technology*, 25 (3) pp. 1087 - 1093
111. P. Chindapasirt and W. Chalee, Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site, *Construction and Building Materials*, 2014, 63, 303-310.
112. P. Chindapasirt, S. Hiziroglu, C. Waisurasingha, P. Kasemsiri, Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant, *Polymer Composites*, in press
113. S. Boonjaeng, P. Chindapasirt, K. Pimraksa, Lime-calcined clay materials with alkaline activation: Phase development and reaction transition zone, *Applied Clay Science*, in press

114. P. Posi, V. Sata, P. Chindapasirt, Lightweight calcined diatomite concrete, KSCE, in press
115. S. Hunpratub, P. Chindapasirt, S. Maensiri, Synthesis and characterization of Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.9}Zr_{0.1}O₃ ceramics by hydrothermal method, Ceramic Inter, in press.

7.2 Book

1. P. Chindapasirt, 2010, Fly ash, 3rd edition, Khon Kaen: Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Khon Kaen University, 132 pages.
2. P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, 2012, Cement Pozzolan and Concrete, 7th edition, Bangkok: Thai Concrete Association, 381 pages.
3. U. Rattanasak, P. Chindapasirt, 2010, Rice Husk Ash in Concrete, 1st edition, Science and Engineering Publisher, 136 pages.

7.3 Patent/Petty patent

1. Jaturapitakkul, C., Songpiriyakit, S., Grubprasert, T., Chindapasirt, P., 2007, Preparation of geopolymer from rice husk bark ash and fly ash, Patent no. 0701002256.
2. Chindapasirt, P., Rattanasak, U., 2007, Lightweight aggregate from rice husk ash, Petty patent application no. 0703001131.
3. Chindapasirt, P., Rattanasak, U., Sittiichote, J., Songpiriyakit, S., 2008, Method for production of sodium silicate from rice husk ash, Petty patent application no. 080300941.
4. Chindapasirt, P., Rattanasak, U., 2008 Geopolymeric material from rice husk ash, Patent application no. 0801002860.
5. Nakagawa, T., Chindapasirt, P., T. Chaleerat, M. Presertrunguang, 2009, Porous concrete and improvement on the strength of porous concrete, Patent application no. 0801005389.
6. Chindapasirt, P., Rattanasak, U., Songpiriyakit, S., 2009, Lightweight concrete with low shrinkage, Patent application no. 0901004579.
7. Issaravisut, J., Sangiamsak, J., Harnsoongnern, S., Chindapasirt, P., 2009, Magnetic probe for measuring corrosion of steel, Patent application no. 0901104580.
8. Chindapasirt, P., Imnang, P., Detphan, S., 2009, High water retention mortar for plastering, Patent application no. 0901004982.
9. Sinsiri, T., Jitchaiyaphum, K., Chindapasirt, P., 2009, Compressed air foam producing tank, Petty patent application no. 1003001033.

10. **Chindaprasirt, P.,** Detphan, S., 2009, Fly ash-rice husk ash geopolymer, Patent application no. 1001000042.
11. **Chindaprasirt, P.,** Kingko, K., 2010, High strength cellular lightweight concrete, Patent application no. 1001000248.
12. **Chindaprasirt, P.,** Phosi, P., 2010, Cellular structural lightweight geopolymer concrete, Patent application no. 1001000249.
13. **Chindaprasirt, P.,** Hanjitsuwan, S., 2010, Aluminium powder lightweight geopolymer concrete, Petty patent application no. 10030000248.
14. **Chindaprasirt, P.,** Rattanasak, U., 2010, Use of PCC fly ash in improving the strength of FBC coal ashes, Petty patent application no. 1003001126.
15. **Chindaprasirt, P.,** Boonserm, K., 2010, Use of flue gas desulfurization gypsum in enhancing strength of bottom ash geopolymer, Patent application no. 1003001126.

7.4 Research Interests

Pozzolanic materials, Cement, Composite materials, Concrete technology, Geopolymer, Eco-efficient binders

7.5 Research Honors and Awards

1. 1991 Gold Medal Award for Outstanding Water Resources Development, Department of Local Administration, Ministry of Interior.
2. 2002 Outstanding Technologist Award, Utilization of Fly Ash, Foundation for the Promotion of Science and Technology.
3. 2003 Outstanding Sri Mor Din Daeng Award, Khon Kaen University, received from Princess Maha Chakri Sirindhorn.
4. 2007 Professor Vittaya Pianwichit Gold Medal Award, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.
5. 2009 Outstanding Teacher Award in Science and Technology, the Council of University Faculty Senate of Thailand (CUFST).
6. 2009 Silver Medal Award of Outstanding Researcher, Khon Kaen University.
7. 2011 Gold Medal Award of Outstanding Researcher, Khon Kaen University.
8. 2011-2014 TRF Senior Scholar.
9. 2012-2014 Chair Professor, Siam Cement Group
10. 2012 Golden Thad Phanom Award, KKU