รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นวัตกรรมการใช้เถ้าหนักในคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

The innovation of use of bottom ash on green concrete

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. สำเริง รักซ้อน	หัวหน้าโครงการวิจัย
ผศ.ดร.วัลลภ ภูผา	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
อ.นิโรจน์ เงินพรหม	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ	ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2555

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นวัตกรรมการใช้เถ้าหนักในคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

The innovation of use of bottom ash on green concrete

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. สำเริง รักซ้อน	**หัวหน้าโครงการวิจัย**
ผศ.ดร.วัลลภ ภูผา	**ผู้ร่วมโครงการวิจัย**
อ.นิโรจน์ เงินพรหม	**ผู้ร่วมโครงการวิจัย**
ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ	**ที่ปรึกษาโครงการวิจัย**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2555

บทคัดย่องานวิจัย

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) นวัตกรรมการใช้เถ้าหนักในคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

(ภาษาอังกฤษ) The innovation of use of bottom ash on green concrete

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปี 2555 จำนวนเงิน 350,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ กันยายน 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อผู้วิจัย ผศ. ดร. สำเริง รักซ้อน[1]

ผศ.ดร.วัลลภ ภูผา[2]

อ. นิโรจน์ เงินพรหม [3]

ศ. ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ[4] (ที่ปรึกษาโครงการวิจัย)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการต้านทานคาร์บอเนชัน กำลังอัด และความพรุนของคอนกรีตผสมเถ้าหนัก เถ้าหนักที่ใช้ในการศึกษามี 3 ขนาด คือ เถ้าหนักขนาดหยาบ (GBA-1) เถ้าหนักขนาดละเอียดปานกลาง (GBA-2) และเถ้าหนักขนาดละเอียดมาก (GBA-3) ใช้เถ้าหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.50 งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัด ความพรุน และการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าหนักบดละเอียด การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เถ้าหนักขนาดละเอียดมากสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยให้กำลังอัดสูงและความพรุนต่ำ โดยสามารถใช้แทนที่ได้ในปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เถ้าหนักที่มีความละเอียดมากมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตสามารถรับกำลังอัดและต้านทานคาร์บอเนชันได้ดี

***คำสำคัญ*:** คอนกรีต, คาร์บอเนชัน, ความละเอียด. เถ้าหนัก

Abstract

This research presents a study of the resistance to carbonation, compressive strength and porosity of concrete containing ground bottom ash. Three different of bottom ash finenesses viz., coarse bottom ash (GBA-1), ground medium bottom ash (GBA-2) and ground fine bottom ash (GBA-3) were used for the study. Portland cement (CT) is partially replaced with ground bottom ash at 0-40% by weight of the bottom ash. The water to binder ratio was kept constant at 0.5. Compressive strength, porosity and resistant to carbonation of concrete were investigated. Fine bottom ash has a high potential to be used as a good cementitious material. The results show that the compressive strength and low porosity of concrete improves substantially with partial replacement of Portland cement with fine bottom ash. Concrete mix cement containing 10-20% of fine bottom ash can be used to make cementitious materials. The use of finer bottom ash produces concrete mix with good strength and resistance to carbonation.

Keywords: Concrete, Carbonation, Fineness, Bottom ash

[1] ปริญญาเอก วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

โทร. 0879454133 rerng197@rmutp.ac.th, sumrerng.r@rmutp.ac.th

[2] ปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

[3] ปริญญาโท วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

[4] ที่ปรึกษาโครงการ

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น โทร. 043 202 846

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อุดหนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณคณะอนุกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้อ่าน ให้ความรู้ แนวทางการเขียนโครงการ ตลอดทั้งการชี้แนะถึงวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในขณะเขียนโครงการวิจัย จนทำให้มีความรู้ประสบการณ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก และประสบความสำเร็จในระยะเวลาต่อมา คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความสะดวกและดูแลในด้านเอกสารของงานวิจัยทั้งหมดเป็นอย่างดี ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยอย่างเรียบร้อย ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการในการช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนวัสดุทดสอบ และสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอบคุณ คุณนัยนา เที่ยงภักดี ผู้ช่วยวิจัยในการจัดเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบตั้งแต่ต้นจนแล้วเสร็จ

ผศ ดร. สำเริง รักซ้อน	หัวหน้าโครงการ
ผศ. ดร. วัลลภ ภูผา	ผู้ร่วมวิจัย
นายนิโรจน์ เงินพรหม	ผู้ร่วมวิจัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน	4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก	10
2.3 การใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีตและมอร์ต้าร์	12
2.4 คาร์บอเนชัน	18
2.5 อิทธิพลหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อคาร์บอเนชัน	19
2.6 การตรวจสอบคาร์บอเนชัน	23
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	25
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	25
3.2 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ	32
3.3 วิธีเก็บข้อมูล	33
3.4 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล	33
3.5 สถานที่ทำการทดสอบงานวิจัย	34
3.6 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	36
4.1 รูปร่างของเถ้าหนักก่อนและหลังบด	36
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก	40
4.3 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเถ้าหนัก	41
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3	43
4.5 ความพรุนของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3	48
4.6 ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต GBA-1, GBA-2 และ GBA-3	53
4.7 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชัน	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	62
ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย	62

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความลึกคาร์บอเนชันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ [21] 23

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ศึกษา 31

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก GBA-1 GBA-2 และ GBA-3 40

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 41

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 XRD ของเถ้าหนักบด 45 ไมครอน [6] 5

รูปที่ 2.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าหนักบดละเอียด [6] 6

รูปที่ 2.3 ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าหนักและทรายของ Bai และคณะ [7] 6

รูปที่ 2.4 กำลังอัดของการแทนที่เถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด [7] 7

รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายกำลังสูงของ ก) เถ้าหนักก่อนบด และ ข) เถ้าหนักบดละเอียด [6] 8

รูปที่ 2.6 เถ้าหนัก ก) ขนาดหยาบ CBA และ ข) ขนาดละเอียด FBA [8] 8

รูปที่ 2.7 ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าหนักบดและทรายของ Kim และ Lee [8] 9

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ทรายบดด้วยเถ้าหนัก FBA และกำลังอัด [8] 9

รูปที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [9] 10

รูปที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Watcharapong และคณะ [10] 11

รูปที่ 2.11องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Sata และคณะ [11] 11

รูปที่ 2.12 ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ ผสมด้วยเถ้าหนัก 3 ความละเอียด [6] 12

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนัก ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6] 13

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและโซเดียมไฮดรอกไซด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6] 13

รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและ W/B ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6] 14

รูปที่ 2.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10] 15

รูปที่ 2.17 กำลังอัดของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10] 15

รูปที่ 2.18 กำลังดัดของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10] 16

รูปที่ 2.19 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11] 16

รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความยาวของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11] 17

รูปที่ 2.21 การต้านทานกรดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11] 17

รูปที่ 2.22 ระบบโพรงในโครงสร้างคอนกรีต [14] 18

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุน [15] 19

รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่าการซึมผ่านคาร์บอเนชัน [18] 20

รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่าน [16] 21

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับการแพร่คาร์บอเนชัน [16] 21
รูปที่ 2.27 อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คาร์บอเนชัน [20] 22
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการวัดคาร์บอเนชันด้วยตัวความเป็นกรด-ด่าง [19] 24
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างการตรวจสอบคาร์บอเนชันด้วย TGA [23] 24
รูปที่ 3.1 การตัดตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบความพรุน 27
รูปที่ 4.1 เถ้าหนัก ก) ก่อนบด, ข) บดละเอียด และ ค) เปรียบเทียบเถ้าหนักก่อนและหลังบด 38
รูปที่ 4.2 เถ้าหนัก GBA-3 38
รูปที่ 4.3 เถ้าหนัก GBA-2 39
รูปที่ 4.4 เถ้าหนัก GBA-1 39
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความละเอียดของเถ้าหนัก 42
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดและปริมาณร้อยละ ค้างบนตะแกรงมาตรฐานของเถ้าหนัก 42
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐาน 43
รูปที่ 4.8 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-1 45
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-1 45
รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-2 46
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-2 46
รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-3 47
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-3 47
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 48
รูปที่ 4.15 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-1 49
รูปที่ 4.16 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-2 50
รูปที่ 4.17 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-3 50
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความพรุนของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 51
รูปที่ 4.19 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-1 51
รูปที่ 4.20 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-2 52
รูปที่ 4.21 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-3 52
รูปที่ 4.22 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-1 53

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.23 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-2 54

รูปที่ 4.24 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-3 54

รูปที่ 4.25 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-1 55

รูปที่ 4.26 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-2 56

รูปที่ 4.27 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-3 56

คำอธิบายสัญลักษณ์

OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

GBA-1 = เถ้าหนักขนาดหยาบ มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

GBA-2 = เถ้าหนักขนาดละเอียดปานกลาง มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 1-15 โดยน้ำหนัก

GBA-3 = เถ้าหนักขนาดละเอียดสุด มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก

CT = คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ OPC ล้วน

10GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

10GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

10GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ทฤษฎี สมมติฐาน กรอบแนวความคิดของการวิจัย และประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นวัสดุถมทิ้งจากผลพลอยได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีการนำเอาถ่านหินมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งใหญ่ของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยอยู่ที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากนั้นได้ส่วนที่เหลือคือเถ้าทิ้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชนใกล้เคียง หากสามารถนำเถ้าหนักจากผลผลิตอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้มาใช้ประโยชน์ได้ จะเป็นการป้องกันและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากเถ้าหนัก นักวิจัยพยายามใช้เถ้าทิ้งที่มีอยู่ในประเทศไทย เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น เถ้าทิ้งเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต วัสดุเหล่านี้เรียกว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลที่ได้ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนที่เหมาะสม อาจทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [1-3] ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความทนทานและลดปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและลดพื้นที่การกำจัดทิ้งเถ้าถ่านหรือเถ้าทิ้งได้เป็นอย่างดี

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้น โดยเฉพาะอากาศที่ร้อนชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก การถูกทำลายเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้เกิดกระบวนการคาร์บอเนชันในโครงสร้างคอนกรีต กล่าวคือ คาร์บอเนชัน (Carbonation) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความทนทานและทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [4] โดยปกติแล้วเมื่อคาร์บอเนชันแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต จะส่งผลให้แผ่นฟิล์มบางๆ ที่เคลือบอยู่บริเวณเหล็กเสริม

คอนกรีตถูกทำลายลงและส่งผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ จากนั้นคอนกรีตจะแตกและหลุดร่อนออกมา อันเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเวลาต่อมา [4] มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาด้วยการใช้วัสดุปอซโซลาน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อพัฒนาให้สามารถต้านทานซัลเฟตและคลอไรด์ [4,5] อย่างไรก็ตาม การต้านทานคาร์บอเนชันจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานในส่วนผสม [5] ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะได้ศึกษาวิจัยถึงรายละเอียดของวิธีการป้องกันและหาแนวทางในการออกแบบให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความทนทาน ถาวร ใช้งานได้ยาวนานโดยสามารถต้านทานการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือต้านทานคาร์บอเนชัน(Carbonation) ได้ดี ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าหนักบดละเอียด (Ground bottom ash) ในงานคอนกรีต โดยใช้เถ้าหนักบดให้มีความละเอียดที่แตกต่างกัน 3 ขนาด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาเถ้าหนักสำหรับใช้ในงานคอนกรีต โดยศึกษาความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ความข้นเหลว การก่อตัว ความพรุน กำลังอัดและการต้านทานคาร์บอเนชันเนื่องจากการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาเถ้าหนักเพื่อใช้ในงานคอนกรีต สำหรับต้านทานคาร์บอเนชันจากการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเถ้าหนักที่ใช้ศึกษานี้ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในภาคเหนือของประเทศไทย

การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าหนัก โดยวิธีการบดให้มีขนาดลดลง 3 ขนาด

สารเคมีที่ใช้ ได้แก่สารละลายฟินอฟธารีน คอบเปอร์ซัลเฟต กรด เป็นต้น

ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลของคอนกรีต

วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ทดสอบความพรุน ปริมาตรโพรง และทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการศึกษาความทนทานของตัวอย่างคอนกรีตโดยทดสอบคุณสมบัติการต้านทานคาร์บอเนชันและการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชัน

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของงานวิจัย

ในประเทศไทยมีการใช้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และได้ส่วนที่เป็นผลพลอยได้ คือเถ้าถ่านหินและเถ้าหนัก เถ้าถ่านหินสามารถใช้ในงานคอนกรีตได้เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ ส่วนเถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นวัสดุกองถมทิ้งซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่ อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองมีองค์ทางเคมีที่เหมือนกันจึงอาจใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้เหมือนกัน แต่งานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าหนักเพื่อใช้ในงานคอนกรีตสำหรับต้านทานสารเคมีต่างๆ ยังมีอยู่น้อย หากนำเถ้าหนักมาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสม โดยการบดให้มีขนาดอนุภาคลดลงด้วยเครื่องบด เมื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุประสานและทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับปูนซีเมนต์ อาจทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีลักษณะเหมือนคอนกรีต และสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการนำเถ้าหนักมาใช้ประโยชน์ และทราบถึงรายละเอียดเชิงลึกของวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาผลิตคอนกรีต อิทธิพลของสารเคมีและปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการผลิต คุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ และความทนทานคอนกรีตผสม เถ้าหนัก ทั้งนี้เป็นการต่อยอดการวิจัยของการพัฒนาเถ้าทิ้งอีกชนิดหนึ่ง นอกจากการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย มีดังนี้

1) นำเถ้าทิ้งจากการวิจัยไปผลิตเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต เนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ลดปัญหาโลกร้อนจากผลกระทบการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำผลงานวิจัยเผยแพร่บทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

2) เป็นการบริหารสิ่งเหลือใช้ให้เป็นประโยชน์ สร้างความสมดุลของสังคมและสิ่งแวดล้อม ลดพลังงานขยะ ลดสภาวะโลกร้อน ทำให้มีคุณค่าจากปัจจุบันสู่อนาคต

3) งานวิจัยนี้เป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเถ้าหนักเป็นทรัพยากรจากธรรมชาติมีอยู่ในประเทศ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อเนื่องในการจ้างงานและส่งเสริมระบบเศรษฐกิจของท้องถิ่นอย่างยั่งยืน

4) คาดว่าจะนำผลทดลองอัตราส่วนที่เหมาะสมจดสิทธิบัตรเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่

5) สร้างช่องทางจำหน่ายเถ้าหนักที่ปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมแล้วได้อีกหนึ่งช่องทาง ซึ่งงานวิจัยนี้จะพัฒนาและใช้งานเถ้าหนักให้เกิดประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าหรือเปลี่ยนจากของไม่มีมูลค่าให้มีมูลค่าขึ้น และสามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อธิบายเกี่ยวกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เถ้าหนัก (Bottom ash) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก คุณสมบัติทางกายภาพและกลสมบัติด้านวิศวกรรมของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก คาร์บอเนชัน (Carbonation) อิทธิพลหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดคาร์บอเนชัน การตรวจสอบการเกิดคาร์บอเนชัน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยที่มีคุณภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่องานวิจัย

2.1 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งจะได้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+2Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

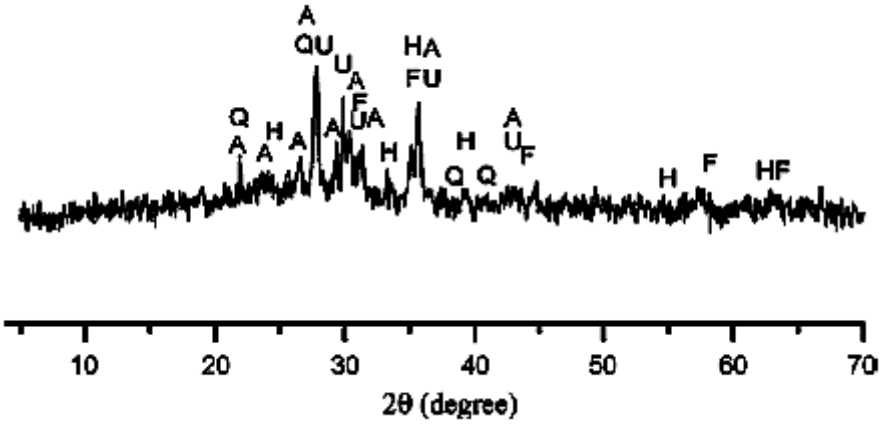
ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ยังไม่สิ้นสุด หากส่วนผสมของคอนกรีตมีวัสดุปอซโซลานผสมอยู่ นั่นคือซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งมีอยู่ในวัสดุปอซโซลานจะเข้าทำปฏิกิริยากับด่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$Ca(OH)_2+SiO_2+H_2O \rightarrow xCaO.y\,SiO_2.zH_2O \quad (2.3)$$

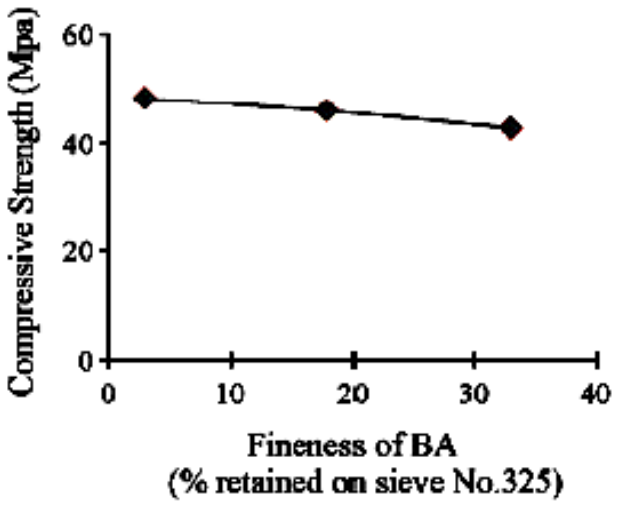
$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \rightarrow xCaO.y\,Al_2O_3.zH_2O \qquad (2.4)$$

ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (2.3) ข้างต้น คือ $xCaO.ySiO_2.zH_2O$ เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยที่ ค่า x, y และ z เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (2.4) คือ $xCaO.yAl_2O_3.zH_2O$ หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยทั้ง CSH และ CAH จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

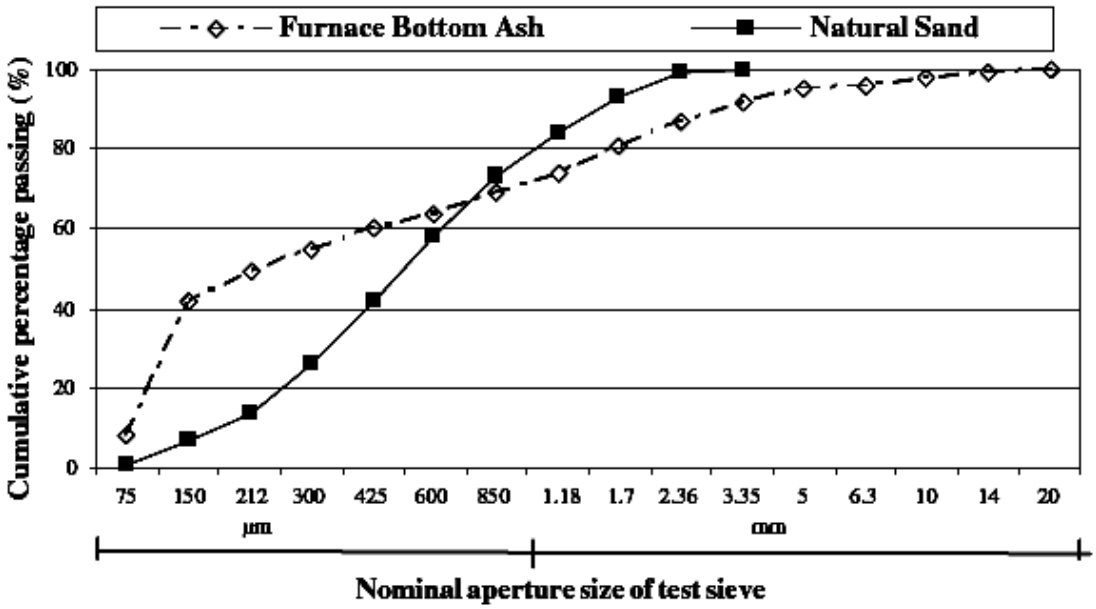
เถ้าหนัก (Bottom ash) เกิดจากการรวมตัวของเถ้าถ่านหินที่ถูกหลอมเหลว และมีขนาดค่อนข้างใหญ่และพรุน ปัจจุบันมีเถ้าถ่านหินกองทิ้งประมาณ 50 ล้านตัน และมีเถ้าหนักเกิดขึ้นประมาณ 0.8 ล้านตันต่อปี [6] ในรูปที่ 2.1 เป็นการวิเคราะห์เถ้าหนักบดด้วย XRD พบว่ามีส่วนที่เป็น SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก และในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเถ้าหนักมาบดละเอียดให้ค่ากำลังที่สูงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น [6] งานวิจัยที่ผ่านใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด [7] โดยได้แสดงขนาดการกระจายตัวของอนุภาคมาปรับปรุงและเปรียบเทียบกับทรายในงานคอนกรีตทั่วไป ดังในรูปที่ 2.3 ผลทดสอบพบว่ากำลังมีค่าสูงขึ้นตามอายุการทดสอบ อย่างไรก็ตาม กำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ด้วยเถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด ดังในรูปที่ 2.4 เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าหนักส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบลดปริมาณความต้องการน้ำ



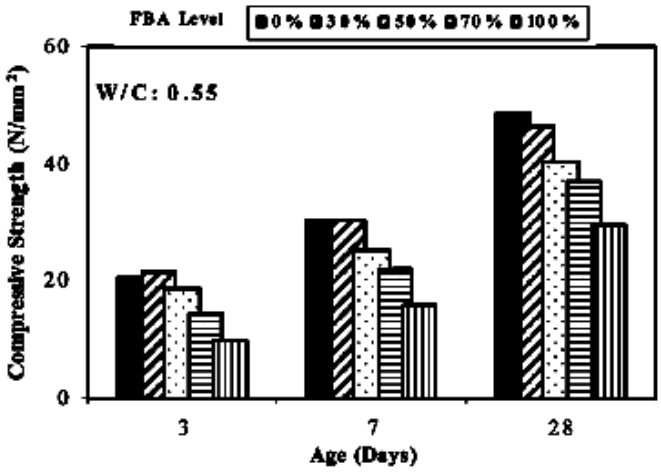
รูปที่ 2.1 XRD ของเถ้าหนักบด 45 ไมครอน [6]



รูปที่ 2.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าหนักบดละเอียด [6]



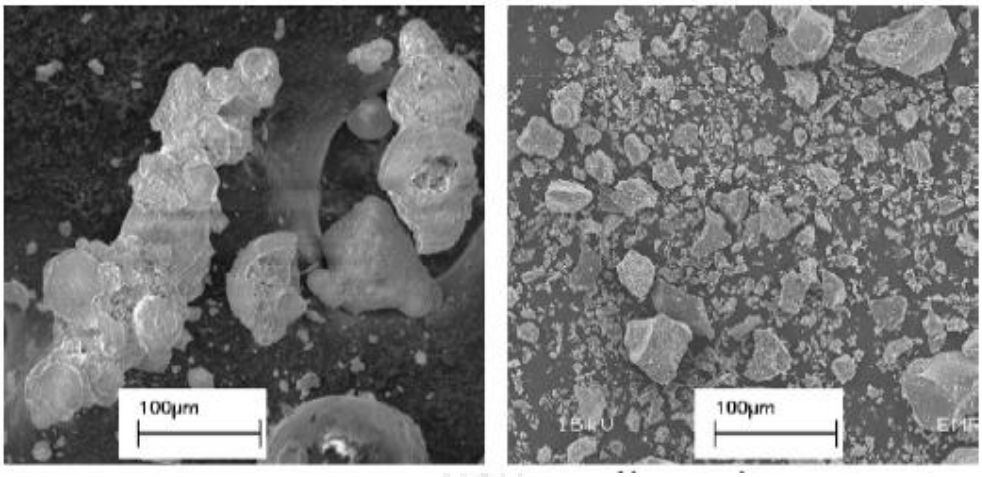
รูปที่ 2.3 ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าหนักและทรายของ Bai และคณะ [7]



(b) W/C 0.55.

รูปที่ 2.4 กำลังอัดของการแทนที่เถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด [7]

ในรูปที่ 2.5 ก) พบว่าเถ้าหนักก่อนบดมีขนาดอนุภาคใหญ่และมีความพรุนสูง หากนำไปใช้ในงานคอนกรีตจึงต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ดังนั้นกำลังอัดอาจต่ำลง ในรูปที่ 2.5 ข) แสดงเถ้าหนักหลังปรับปรุงขนาด พบว่าการบดละเอียดส่งผลให้เถ้าหนักมีขนาดอนุภาคเล็กลงและความพรุนลดลงด้วย (รูปที่ 2.5 ข) เนื่องจากขนาดอนุภาคถูกตีแตกด้วยการบด รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และสาเหตุที่ต้องปรับปรุงขนาดอนุภาคของวัสดุปอซโซลานให้ละเอียดเนื่องจากส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [6] ขนาดอนุภาคที่ละเอียดสามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงที่ใหญ่ คอนกรีตจึงมีความทึบแน่นขึ้น ในรูปที่ 2.6 แสดงขนาดอนุภาคของเถ้าหนักของงานวิจัยที่ผ่านมา [8] โดยในรูปที่ 2.6 ก) เป็นเถ้าหนักก่อนบดพบว่ามีขนาดใหญ่และความพรุนสูงคล้ายกับหินที่ใช้งานก่อสร้าง ขณะที่รูปที่ 2.6 ข) แสดงรูปของเถ้าหนักที่ผ่านการปรับปรุง พบว่ามีขนาดเล็กลง ขนาดคล้ายกับทรายที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยงานวิจัยดังกล่าวนี้ต้องการนำเถ้าหนักที่ผ่านการปรับปรุงแทนที่ทรายหรือใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด เมื่อนำไปทดสอบวัดค่าการกระจายตัวของอนุภาค พบว่ามีขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเฉลี่ยระหว่างเถ้าหนักบดและทรายก่อสร้างใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2.7) งานวิจัยที่ผ่านมาใช้เถ้าหนักขนาดหยาบ (CBA) เป็นวัสดุมวลรวมหยาบแทนหิน ส่วนขนาดละเอียดของเถ้าหนัก (FBA) ใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายสำหรับใช้ในงานผลิตคอนกรีตกำลังสูง พบว่าการใช้เถ้าหนัก FBA มีกำลังอัดสูงระหว่าง 60-70 MPa (รูปที่ 2.8)

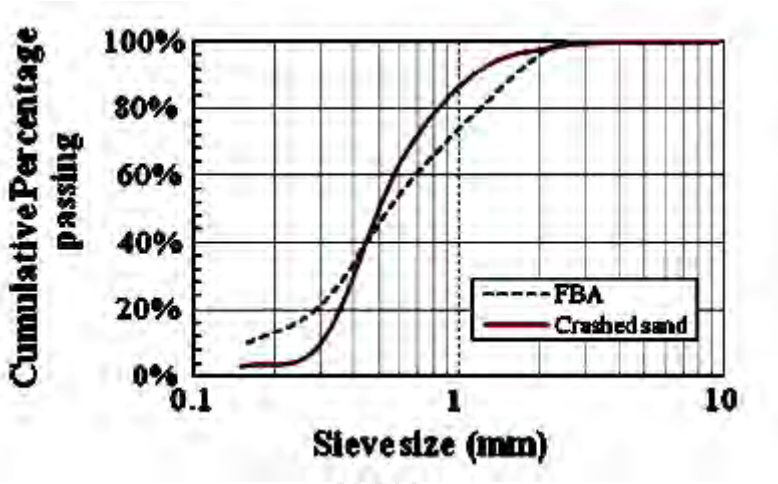


ก) ข)

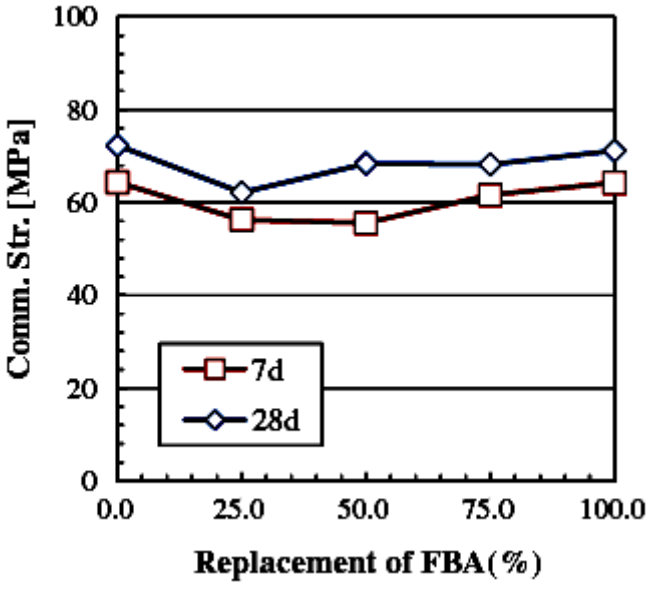
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายกำลังสูงของ ก) เถ้าหนักก่อนบด และ ข) เถ้าหนักบดละเอียด [6]

ก) ข)

รูปที่ 2.6 เถ้าหนัก ก) ขนาดหยาบ CBA และ ข) ขนาดละเอียด FBA [8]



รูปที่ 2.7 ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าหนักบดและทรายของ Kim และ Lee [8]

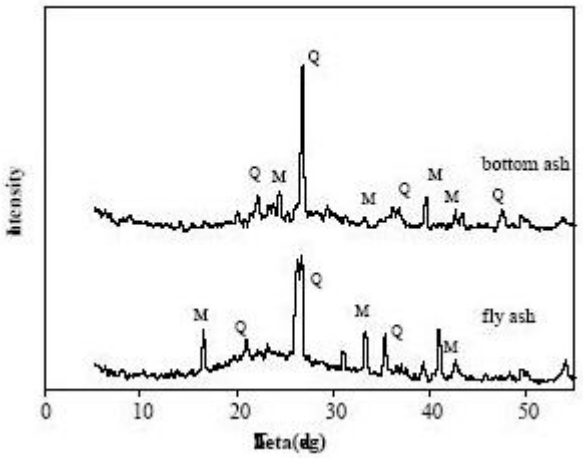


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าหนัก FBA และกำลังอัด [8]

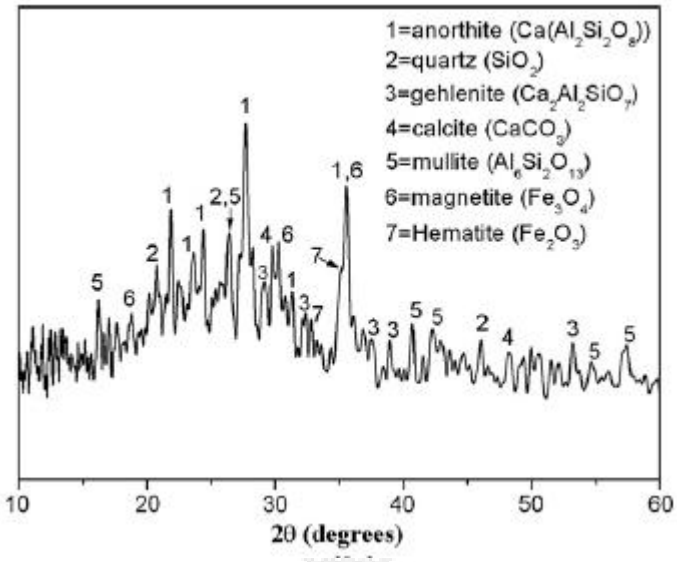
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก

สิ่งที่สำคัญสำหรับการใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตคือการพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักด้วย โดยปกติแล้ว องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน คือซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะเข้าทำปฏิกิริยากับด่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยทั้ง CSH และ CAH จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

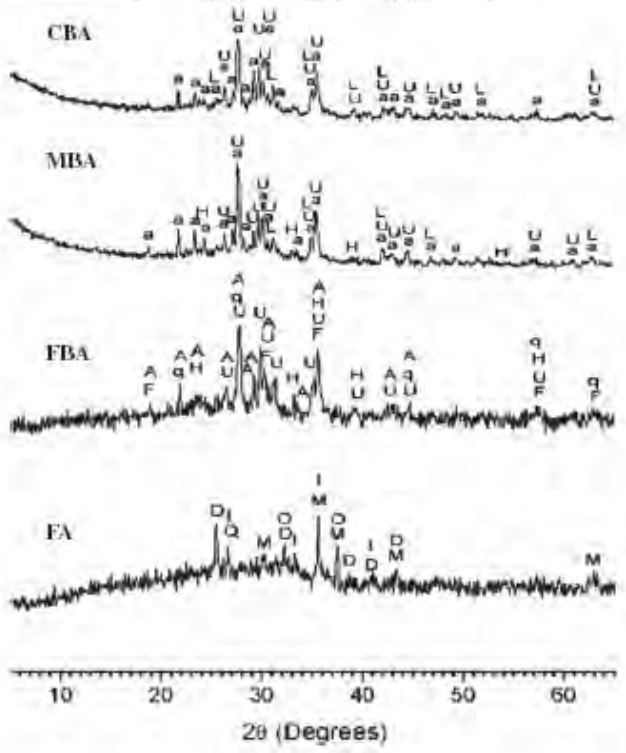
Sathonsaowapark และคณะ [6] ได้ศึกษาการใช้เถ้าหนักในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ โดยใช้เถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะของประเทศไทย พบว่าเถ้าหนักมีองค์ประกอบทางเคมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 21.3, 13.5 และ 2.1 ตามลำดับ งานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [9] พบว่า องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าหนักคือซิลิก้าหรือ Q (Quartz) ซึ่งใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ส่วนรูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักจากแม่เมาะ ประเทศไทย ที่ได้จากงานวิจัยของ Watcharapong และคณะ [10] ซึ่งมีซิลิก้า หรือ Quartz เป็นองค์ประกอบหลัก งานวิจัยของ Sata และคณะ [11] ศึกษาความทนทานต่อสารเคมีของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าหนักที่ความละเอียด 3 ขนาด คือ เถ้าหนักขนาดหยาบ (CBA) ขนาดละเอียดปานกลาง (MBA) และขนาดละเอียดมาก (FBA) ซึ่งพบว่า แม้จะมีความละเอียดที่แตกต่างกัน แต่องค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [9]



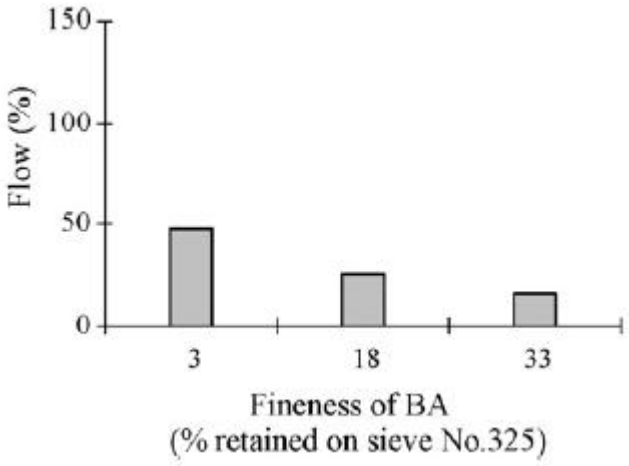
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Watcharapong และคณะ [10]



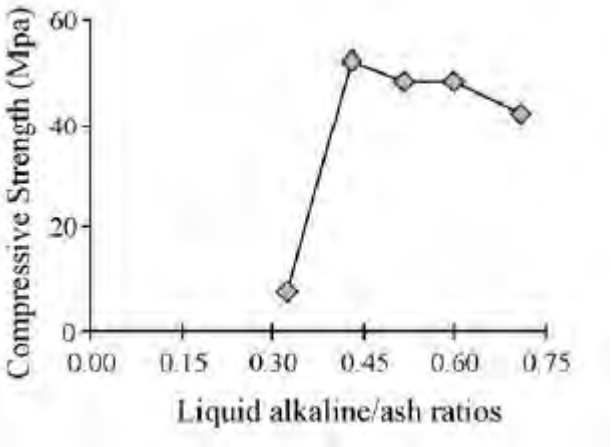
รูปที่ 2.11องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักงานวิจัยของ Sata และคณะ [11]

2.3 การใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีตและมอร์ต้าร์

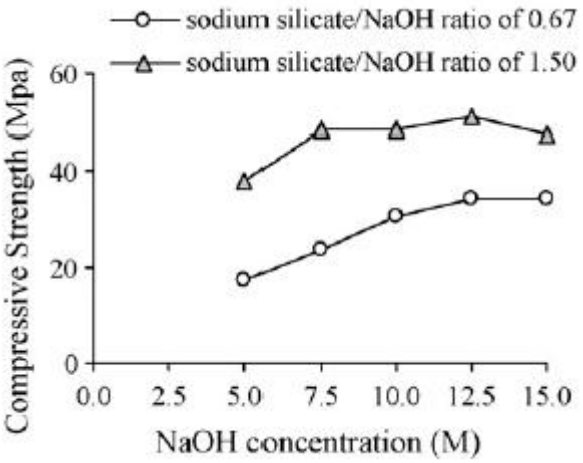
Sathonsaowapark และคณะ [6] ศึกษาความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยการใช้เถ้าหนักบดละเอียด 3 ขนาด โดยแต่ละขนาดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3, 18 และ 33 โดยน้ำหนัก แต่ละขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.7, 24.5 และ 32.2 ไมโครเมตร และมีความละเอียดเท่ากับ 5000, 3400 และ 2100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูง 24-56 MPa เมื่อใช้เถ้าหนักที่ความละเอียดค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.7 ไมโครเมตร ในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าค่าการไหลแผ่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความละเอียดของเถ้าหนักมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ละเอียดสามารถแทรกตัวเข้าไปโพรงของมอร์ต้าร์ ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีความทึบแน่น และพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากของเถ้าหนักบดละเอียดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว อย่างไรก็ตามกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าหนักที่มีขนาดหยาบขึ้น นอกจากนั้น ผลการทดสอบของ Sathonsaowapark และคณะ พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์สูงขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนักเท่ากับ 0.429-0.709 และใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67-1.5 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 7.5-12.5 โมล่า ดังแสดงในรูปที่ 2.13-2.14 นอกจากนั้น ในรูปที่ 2.15 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าหนัก 0.03 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด



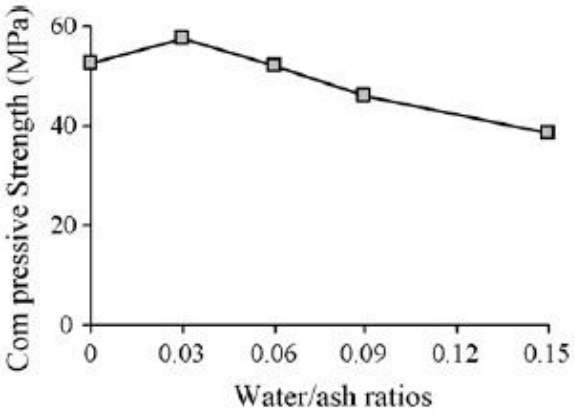
รูปที่ 2.12 ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ผสมด้วยเถ้าหนัก 3 ความละเอียด [6]



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนักของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6]



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและโซเดียมไฮดรอกไซด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6]

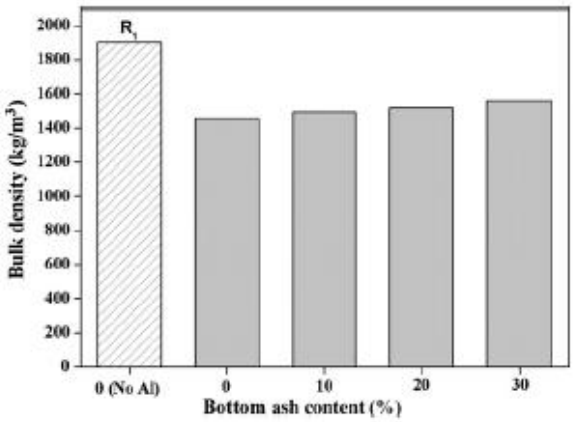


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและ W/B ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ [6]

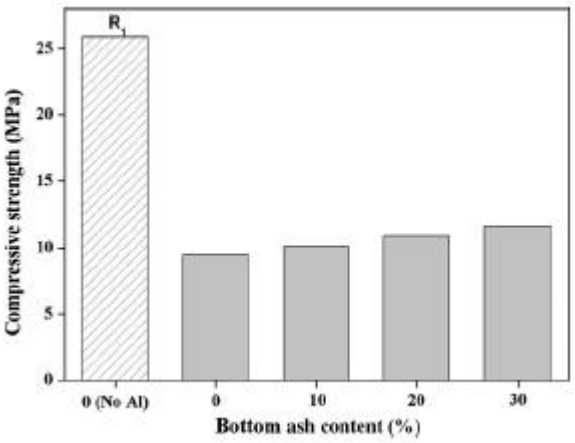
Watcharapong และคณะ [10] ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตด้วยการใช้เถ้าหนักที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของประเทศไทย สำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตเบา งานวิจัยของ Watcharapong และคณะ ใช้เถ้าหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้ผงอะลูมีเนียมร้อยละ 0.2 ทดสอบด้วยการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ 6 ชั่วโมง และจากนั้น บ่มอากาศ 7 วัน ผลการทดสอบในรูปที่ 2.16 พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเบามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้น ในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น ส่วนการต้านทานการดัดของคอนกรีตเบามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยของ Sata และคณะ [11] ได้ศึกษาความทนทานของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก โดยศึกษาความทนทานต่อกรดและซัลเฟต และใช้เถ้าหนักที่มีขนาดความละเอียดแตกต่างกัน 3 ความละเอียด คือ เถ้าหนักขนาดหยาบ ขนาดละเอียดปานกลาง และขนาดละเอียดสุด และใช้วิธีการบ่มตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ในเวลา 8 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าหนักขนาดละเอียดที่สุดให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าเถ้าหนักขนาดหยาบ (รูปที่ 2.19) เนื่องจากผลของความละเอียดที่สูงและพื้นที่ผิวที่สูงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของซิลิก้าและอลูมีน่า และมอร์ต้าร์มีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบ ส่วนเถ้าหนักขนาดหยาบมีกำลังอัดที่ต่ำเนื่องขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีความพรุนสูง การบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ในเวลา 8 ชั่วโมง ส่งผลต่อกำลังอัดในช่วงอายุต้นเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตในรูปที่ 2.20 พบว่าการใช้เถ้าหนักละเอียดเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่ามอร์ต้าร์อื่นๆ ผลการทดสอบเช่นเดียวกับการต้านทานกรดในรูปที่ 2.21

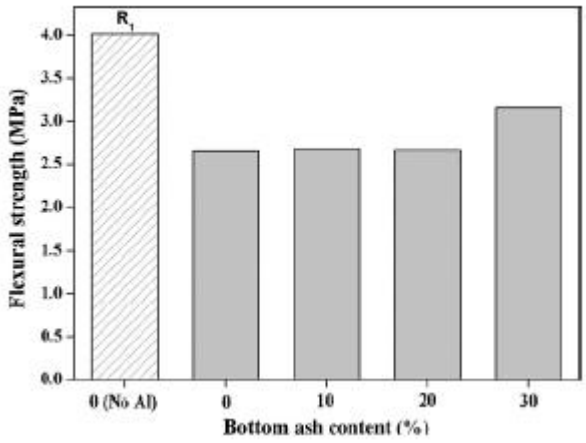
นอกจากการศึกษาเถ้าหนักในประเทศไทยแล้ว ในต่างประเทศได้ศึกษาการใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีต เช่น Pera และคณะ [12] ศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าหนักในงานคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าหนักเกิดปฏิกิริยาช้าในอายุต้น และจะพัฒนาปฏิกิริยาขึ้นในช่วงอายุ 28 วัน ขึ้นไป การวัดดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าร์มีความสำคัญมากในการพิจารณาใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีต การบดเถ้าหนักในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่งผลให้ดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 27



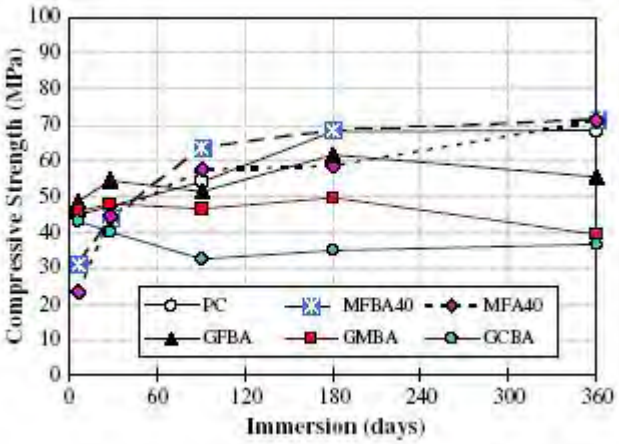
รูปที่ 2.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10]



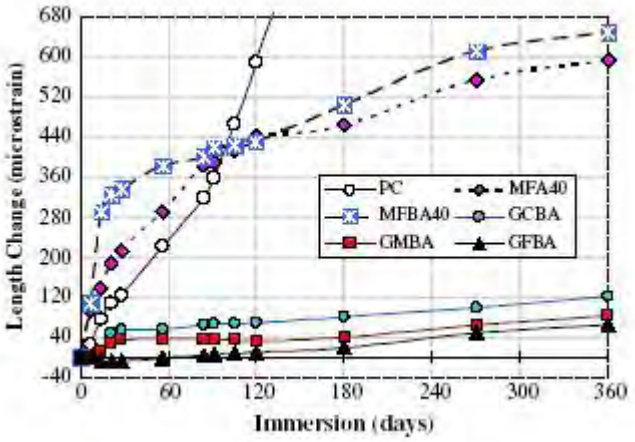
รูปที่ 2.17 กำลังอัดของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10]



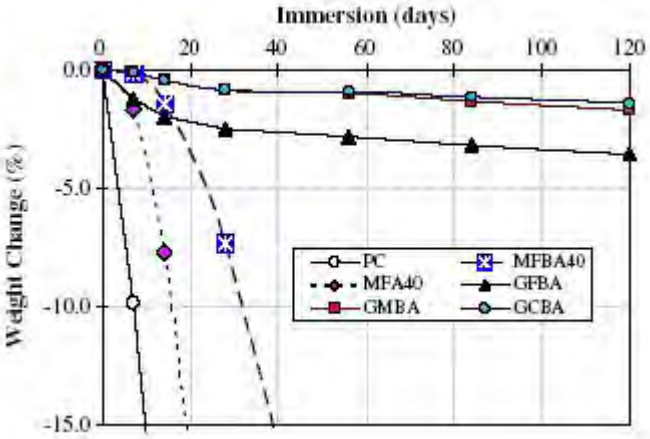
รูปที่ 2.18 กำลังดัดของคอนกรีตเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก [10]



รูปที่ 2.19 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11]



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความยาวของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11]



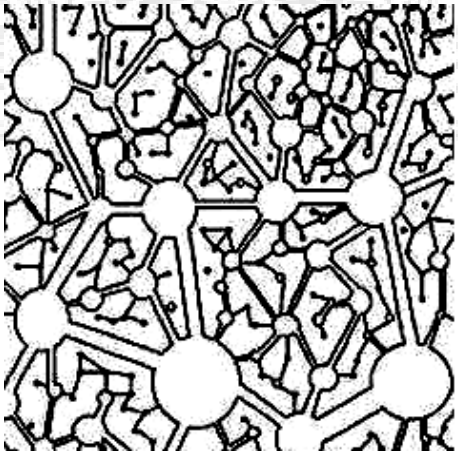
รูปที่ 2.21 การต้านทานกรดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าหนัก [11]

2.4 คาร์บอเนชัน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้น โดยเฉพาะอากาศที่ร้อนชื้น CO_2 เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีต คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่อากาศร้อนชื้น จะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมนั้นๆ โดยส่งผลกระทบในด้านของกำลังการรับน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากกระบวนการคาร์บอเนชัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) จำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) ซึ่งจะแปรเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นและ CO_2 กล่าวคือ คาร์บอเนชัน เกิดจาก CO_2 ทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต และสำหรับปฏิกิริยาเคมีกระบวนการคาร์บอเนชันแสดงไว้ ในสมการที่ (2.5) [13]

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (2.5)$$

ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.5) ต้องการน้ำด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพสารละลาย คอนกรีตเมื่อถูกคาร์บอเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วภายในจะมีระบบของความเป็นโพรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 [14] ที่ทำให้ CO_2 ซึมผ่านภายในโพรงและเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และจะเข้าไปตกตะกอนในโพรงของคอนกรีต

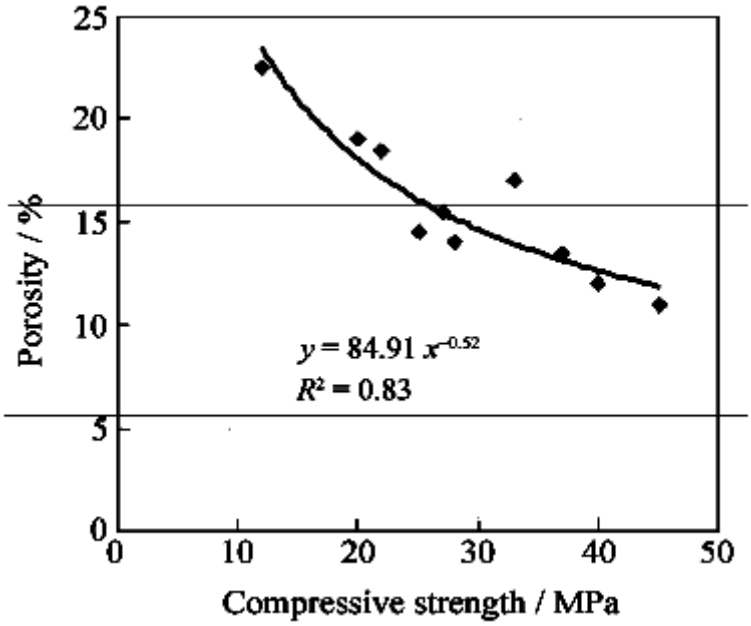


รูปที่ 2.22 ระบบโพรงในโครงสร้างคอนกรีต [14]

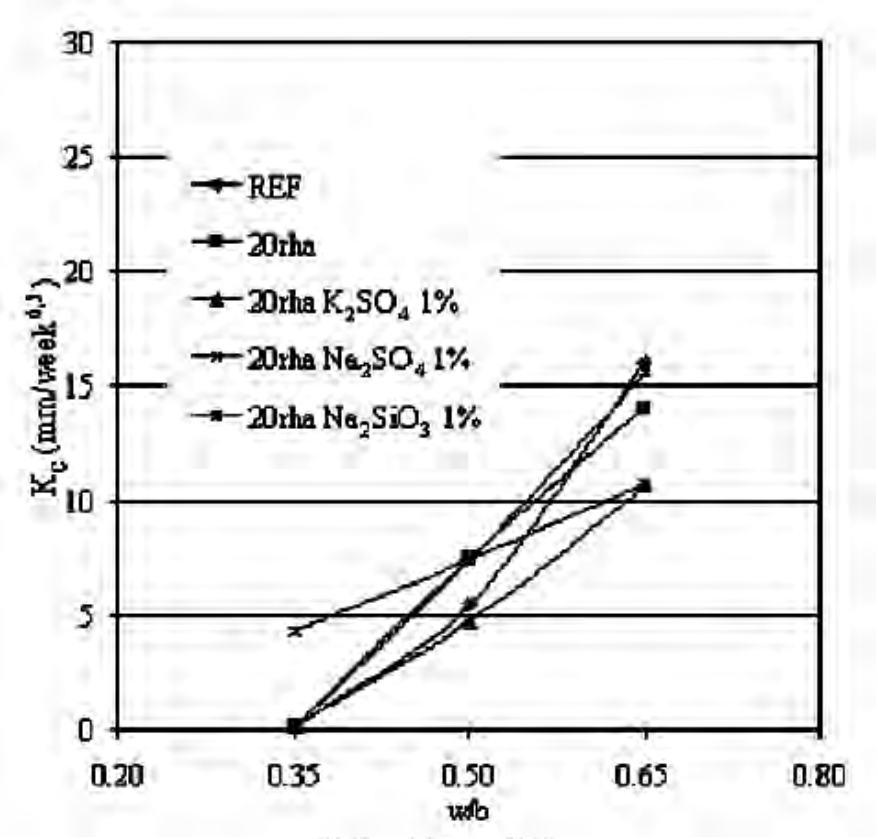
2.5 อิทธิพลหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อคาร์บอเนชัน

1) อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

การใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตในทางที่ดี เช่น ต้านทานซัลเฟตและคลอไรด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามอาจส่งผลกระทบต่อการเกิดคาร์บอเนชันในคอนกรีตได้ [5] จึงต้องพิจารณาอิทธิพลต่างๆ ด้วย เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นต้น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีความสำคัญต่อความพรุนและขนาดในช่องว่างของโพรงคอนกรีต โดยที่ความพรุนและขนาดในช่องว่างโพรงของคอนกรีตอาจส่งผลต่อกำลังอัด [15] ดังนั้นการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานคาร์บอเนชันดีขึ้น ดังในรูปที่ 2.23 [16] การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในตัวอย่างทดสอบสามารถต้านทานคาร์บอเนชันได้ [17] และในรูปที่ 2.24 พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านคาร์บอเนชันมีค่าต่ำลงด้วย [18]



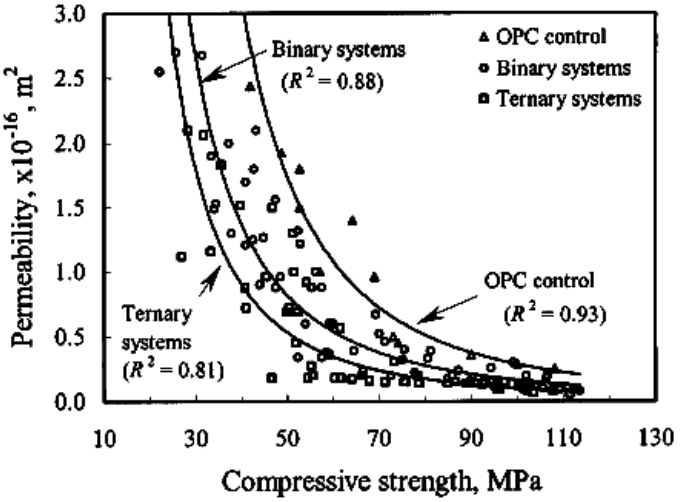
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุน [15]



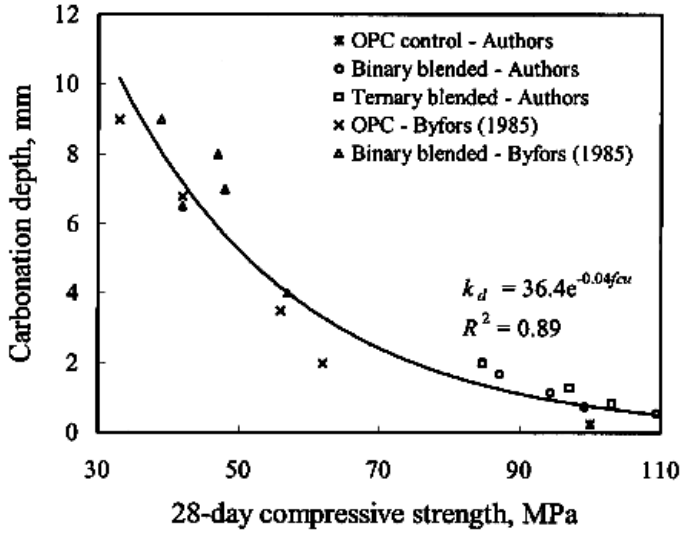
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและค่าการซึมผ่านคาร์บอเนชัน [18]

2) อิทธิพลของกำลังอัด

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความลึกคาร์บอเนชันมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้น [15,19] ซึ่งปกติแล้วงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังอัดจะแปรผันโดยตรงต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อคอนกรีตมีความพรุนน้อยส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นดี ดังนั้นค่ากำลังอัดจึงสูงและลดการซึมผ่าน [16,19] ดังในรูปที่ 2.25 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อกำลังอัดสูงในช่วง 70-110 MPa ขึ้นไป ส่งผลให้การซึมผ่านลดลงอยู่ในช่วง 0.1-0.5 $\times 10^{-16}$ m^2 ส่วนในรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชัน ซึ่งพบว่าเมื่อค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าสูง ส่งผลให้ความลึกคาร์บอเนชันลดลงตามไปด้วย [16] ดังนั้นหากพิจารณาถึงปัจจัยดังกล่าวนี้แล้ว ควรออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังที่สูงเพื่อที่จะสามารถช่วยลดการซึมผ่านของสารเคมีหรือลดการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทั้งนี้จึงได้คอนกรีตที่มีความทนทานใช้งานได้นาน ประหยัดเวลาและค่าดูแลรักษาในอนาคต



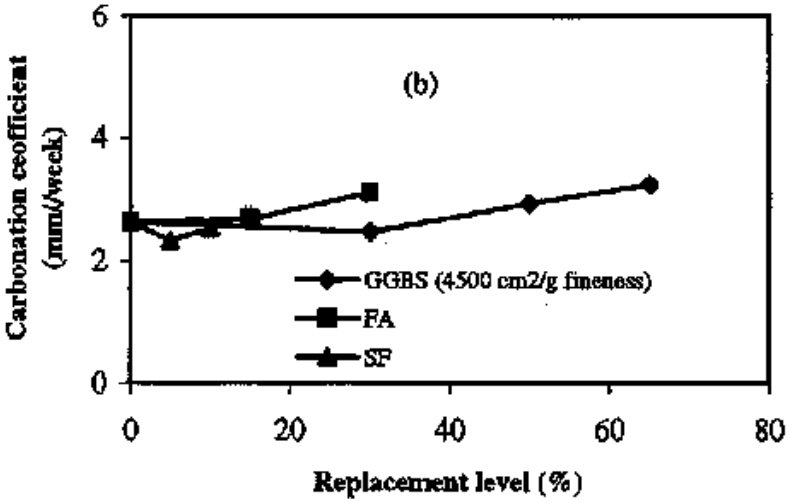
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่าน [16]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับการแพร่คาร์บอเนชัน [16]

3) อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสาน

การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่งผลทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลงและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติม ดังนั้นคอนกรีตแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานอาจมีแนวโน้มทำให้เกิดคาร์บอเนชันสูงขึ้นได้ด้วย [5] ในรูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มากส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่คาร์บอเนชันสูงขึ้น [20] เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่งผลทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลง



รูปที่ 2.27 อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คาร์บอเนชัน [20]

4) ความชื้นสัมพัทธ์

หลังจากการบ่มคอนกรีต คอนกรีตจะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอกซึ่งอาจรวมถึงการสัมผัสกับการแพร่กระจายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศส่งผลให้เกิดคาร์บอเนชัน กล่าวคือ คาร์บอเนชันเป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาไฮเดรชันจำพวก $Ca(OH)_2$ ซึ่งจะแปรเป็นคาร์บอเนต ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ในตารางที่ 2.1 เป็นผลการทดสอบความสัมพันธ์ของความลึกคาร์บอเนชันที่มีต่อความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่าระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 มีความลึกคาร์บอเนชันสูงสุดทั้งการทดสอบแบบเร่งหรือแบบปกติ [21]

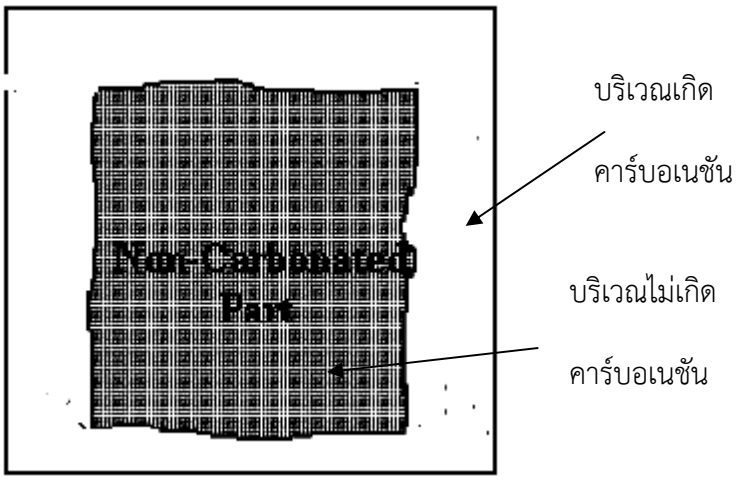
ตารางที่ 2.1 ความลึกคาร์บอเนชันที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ [21]

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความลึกคาร์บอเนชัน (มม) ในสภาวะ 10% CO_2	ความลึกคาร์บอเนชัน (มม) ในสภาวะ 0.03% CO_2
90	4.9	0.5
80	5.6	0.5
70	7.5	0.8
60	8.0	0.6
50	8.5	1.4
40	6.8	0.9

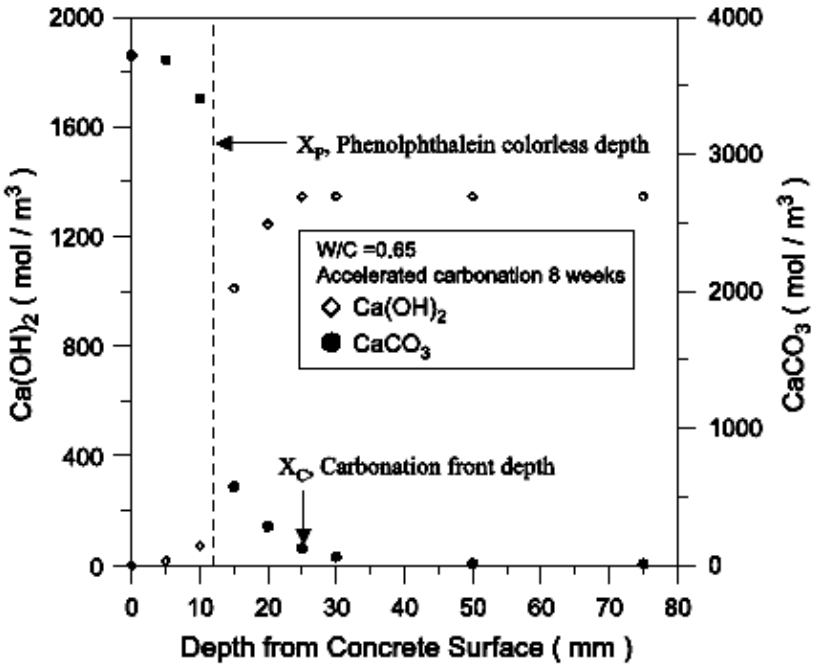
2.6 การตรวจสอบคาร์บอเนชัน

ปกติแล้วการศึกษาที่ผ่านมาจะหาความลึกคาร์บอเนชันจากการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง [14,16,17,19] ด้วยการใช้สารละลายฟีนอฟทารีน (Phenolphthalein indicator) ฉีดพ่นในหน้าตัดการทดสอบที่คาดว่าจะมีการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือเกิดคาร์บอเนชัน จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี กล่าวคือ บริเวณที่เกิดคาร์บอเนชันจะไม่มีสีเกิดขึ้น (รูปที่ 2.28 [19]) ซึ่งหมายถึงค่า pH จะมีค่าต่ำกว่า 9 [21] ในขณะที่บริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอเนชันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู หมายถึงค่า pH จะมีค่าประมาณ 12.6 [21] โดยปกติค่าความด่างในคอนกรีตเป็นผลมาจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากผลผลิตของปูนซีเมนต์กับน้ำ จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจะแพร่เข้าไปในโพรงคอนกรีตและส่งผลให้ค่า pH ของน้ำในโพรงลดลงและมีค่าต่ำกว่า 9 [21] วิธีการหาความลึกคาร์บอเนชันดังกล่าวข้างต้นเป็นการแนะนำโดยมาตรฐานการทดสอบของ RILEM CPC–18 [22] ในรูปที่ 2.28 เป็นตัวอย่างการวัดความลึกคาร์บอเนชันด้วยการตรวจสอบด้วยค่าความเป็นกรด—ด่าง [19]

นอกจากการวัดคาร์บอเนชันด้วยสารละลายฟีนอฟทารีนแล้ว ในรูปที่ 2.29 แสดงการตรวจสอบคาร์บอเนชันด้วยเครื่อง TGA [23] ได้จากการเร่งการทดสอบคาร์บอเนชัน ณ ระยะจากผิวคอนกรีตถึงระยะต่างที่ต้องการตรวจสอบ โดยการตรวจสอบวัดค่าของแคลเซียมคาร์บอเนต และปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากคาร์บอเนชัน



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการวัดคาร์บอเนชันด้วยตัวความเป็นกรด-ด่าง [19]



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างการตรวจสอบคาร์บอเนชันด้วย TGA [23]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์ตลอดจนวัสดุปอซโซลานอื่น การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบหาค่าความพรุนหรือปริมาณโพรง การทดสอบกำลังอัด การทดสอบการต้านทานคาร์บอเนชัน

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าหนัก ทราย และหิน ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด ทดสอบเถ้าหนักก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุง วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการวิจัย น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา

3.1.2 วิธีวิจัย

มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1) กำหนดแหล่งเถ้าหนักที่จะใช้ในการวิจัย โดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าทางภาคเหนือของประเทศไทย

2) เก็บตัวอย่างเถ้าหนัก ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเถ้าหนักดังกล่าว

3) ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักโดยนำเถ้าหนักไปบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดวัสดุซีเมนต์ ก่อนนำมาศึกษา

4) ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าหนัก ประกอบด้วย ตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง x-ray fluorescence, ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ, ทดสอบหาปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430, ทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลนตามมาตรฐาน ASTM C 204, ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope,

ทดสอบการกระจายตัวและขนาดอนุภาคเฉลี่ย ด้วยเครื่อง Mastersizer และวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ด้วยเครื่อง x-ray diffraction ทั้งทางคุณภาพและปริมาณ

5) ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าหนักบดละเอียดในแต่ละความละเอียด ปัจจัยที่ศึกษา คือ อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อิทธิพลของกำลังอัดและความพรุน อิทธิพลของปริมาณวัสดุประสาน การบ่ม และความชื้นสัมพัทธ์

3.1.3 การศึกษากำลังอัด

1) ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยแบบหล่อขนาด 10 × 10 × 10 ซม.^{3} ของคอนกรีตจากเถ้าหนักบดละเอียดในแต่ละความละเอียด นำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ควบคุมความข้นเหลวให้สามารถทำงานได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษ ส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3.1

2) ภายหลังหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงได้มีการถอดแบบบ่มในน้ำสะอาด จากนั้นนำมาทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 7, 28 และ 180 วัน ตามลำดับ การทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างทดสอบอายุทดสอบละ 3 ก้อนตัวอย่างทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด

3.1.4 การทดสอบความพรุน

การทดสอบหาค่าความพรุนประยุกต์การทดสอบวิธีการใช้ Vacuum pump ซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมาใช้วิธีทดสอบนี้ ส่วนผสมของคอนกรีตใช้เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดและได้ให้ไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งการทดสอบได้ มีรายละเอียด ดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C39

2) ภายหลังหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงได้มีการถอดแบบบ่มในน้ำสะอาด จากนั้นนำมาทดสอบหาความพรุนที่อายุ 7, 28 และ 180 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุทดสอบ ตัดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางคือประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยให้มีความหนาประมาณด้านละ 50 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่าง 2 ชิ้นกลางเพื่อนำไปทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3) นำตัวอย่างคอนกรีตวางใน Desiccators ภายใต้ Vacuum เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ระบบโพรงเป็นช่องว่างของอากาศและเติมน้ำกลั่น จากนั้นวัดความพรุนหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยที่ความพรุนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1)

$$p = \frac{(Wa - Wd)}{(Wa - Ww)} \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้ p คือ ความพรุนของตัวอย่างด้วย vacuum saturated หน่วยเป็นร้อยละ (%), Wa คือ น้ำหนักของตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นกรัม (g), Wd คือ น้ำหนักอบแห้งในตู้ควบคุมหลังจาก 24 ชั่วโมงที่ 100 ± 5 องศาเซลเซียส หน่วยเป็นกรัม (g) และ Ww คือ น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหน่วยเป็นกรัม (g)

รูปที่ 3.1 การตัดตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบความพรุน

3.1.5 การทดสอบคาร์บอเนชันแบบเร่ง

การทดสอบการคาร์บอเนชันใช้ส่วนผสมคอนกรีตเช่นเดียวกับตารางที่ 2 และขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างคอนกรีตเช่นเดียวกับตารางที่ 3.1

2) ภายหลังหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ถอดแบบและบ่มในน้ำสะอาด จากนั้นนำมาทดสอบคาร์บอเนชันที่อายุ 3, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ร้อยละ 5 และ 10 ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เมื่อครบอายุทดสอบ ตัดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางคือประมาณ 100 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) โดยให้มีความหนาประมาณด้านละ 50 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่าง 2 ชิ้นเพื่อนำไปทดสอบ เช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 3.1 (ในส่วนแรเงา)

3) ทดสอบความทนทานต่อคาร์บอเนชัน ด้วยการหาระยะความลึกของคาร์บอเนชัน ทำโดยนำตัวอย่างมาผ่าซีก จากนั้นพ่นสารละลายฟีนอฟทาลีน โดยความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในเอทานอลลงในเนื้อตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่าซีก

4) ตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันสังเกตดูจากการเปลี่ยนสีของสารเคมีที่ฉีดพ่น ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะไม่มีการเปลี่ยนสี ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง จากนั้นทำการวัดความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน โดยมีการกำหนดตัวแปรเพื่อแสดงความลึกของคาร์บอเนชันเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยต่อไปสำหรับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หรือสถิติในการใช้เป็นข้อมูล หรือทดสอบวิธีอื่นๆ เช่น ศึกษาด้านโครงสร้างภายในด้วย XRD, EDS, SEM และ FTIR เป็นต้น ส่วนวิธีการทดสอบคาร์บอเนชัน พิจารณา ดังนี้

$$J = -D\frac{dC}{dx} \tag{3.2}$$

จากนั้นจะได้ว่า $$dJ = DA\frac{C1-C2}{x}dt \tag{3.3}$$

เมื่อกำหนดให้

dJ = ปริมาณ CO_2 ที่แพร่ผ่านคอนกรีต

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ CO_2

A = พื้นที่หน้าตัดการแพร่

$C1$ = ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ผิว

$C2$ = ความเข้มข้นของ CO_2

t = เวลา

x = ระยะทางจากผิวถึงแนวการเกิดคาร์บอเนชัน

เมื่อกำหนดให้ปริมาณของ CO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในปูนซีเมนต์ จึงได้ว่า

$$dJ = adV \quad \text{หรือ} \quad dJ = aAdx \tag{3.4}$$

เมื่อกำหนดให้

a = ปริมาณของ CO_2 ที่ทำให้คอนกรีต 1 หน่วยปริมาตรเกิดคาร์บอเนชัน

dV = ปริมาตรของคอนกรีต

dx = ระยะทางที่ CO_2 เคลื่อนที่

จากนั้นนำสมการที่ (3.4) แทนที่ในสมการที่ (3.3) จะได้ดังสมการที่ (3.5)

$$aAdx = DA(C1 - C2)\frac{dt}{x} \tag{3.5}$$

$$xdx = D\frac{C1 - C2}{a}dt \tag{3.6}$$

จากนั้นอินทิเกรทจะได้ดังสมการที่ (3.712)

$$x = \sqrt{\frac{2D}{a}(C1 - C2)\sqrt{t}} \tag{3.7}$$

หากให้ D, $C1$ และ $C2$ เป็นค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับเวลาและระยะทาง กำหนดให้ความเข้มข้นของ CO_2 ที่แนวการเกิดคาร์บอเนชันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากการอินทิเกรทได้ในสมการที่ (3.8)

$$x = \sqrt{\frac{2D}{a}C1\sqrt{t}} \tag{3.8}$$

โดยที่ปริมาณความหนาแน่น CO_2 ในอากาศปกติ มีค่าร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร และการทดสอบครั้งนี้ถ้าใช้ปริมาณความหนาแน่นของ CO_2 ปริมาณ ร้อยละ 5 กำหนดให้ความลึกคาร์บอเนชันในสภาวะการทดสอบแบบเร่งในสมการที่ (3.9) และ ความลึกคาร์บอเนชันในสภาพทั่วไปแสดงในสมการที่ (3.10)

$$x_{acc} = \sqrt{\frac{2D}{a}C1_{acc}}\sqrt{t}\ ;C1_{acc} = 5\% \tag{3.11}$$

$$x_{nomal} = \sqrt{\frac{2D}{a}C1_{normal}}\sqrt{t}\ ;\ C1_{normal} = 0.03\% \tag{3.12}$$

กำหนดให้อัตราคาร์บอเนชันในสภาวะทดสอบแบบเร่งต่อสภาวะแบบปกติจะได้ว่า

$$\frac{x_{acc}}{x_{normal}} = \frac{\sqrt{\frac{2D}{a} C1_{acc}}\sqrt{t}}{\sqrt{\frac{2D}{a} C1_{normal}}\sqrt{t}} \tag{3.13}$$

$$\frac{x_{acc}}{x_{normal}} = \frac{\sqrt{C1_{acc}}}{\sqrt{C1_{normal}}} = \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{0.03}} = 12.91 \tag{3.14}$$

ในสมการที่ (3.14) พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชันในสภาวะแบบเร่งมีค่าสูงเท่ากับ 12.91 และหากกลับสมการที่ (3.13) เป็นอัตราการเกิดคาร์บอเนชันแบบธรรมชาติหรือปกติให้ค่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชันที่ต่ำกว่า ดังนั้นให้ได้ผลการทดสอบในการเกิดคาร์บอเนชันอย่างรวดเร็วจึงใช้การทดสอบคาร์บอเนชันแบบเร่ง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ศึกษา

Mix	Mix Proportions			
	OPC	Ground bottom ash		
		GBA-1	GBA-2	GBA-3
CT	100	-	-	-
10GBA-1	90	10	-	-
20GBA-1	80	20	-	-
30GBA-1	70	30	-	-
40GBA-1	60	40	-	-
10GBA-2	90	-	10	-
20GBA-2	80	-	20	-
30GBA-2	70	-	30	-
40GBA-2	60	-	40	-
10GBA-3	90	-	-	10
20GBA-3	80	-	-	20
30GBA-3	70	-	-	30
40GBA-3	60	-	-	40

หมายเหตุ : ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และควบคุมความข้นเหลวให้สามารถทำงานได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษ

3.2 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

GBA-1 = เถ้าหนักขนาดหยาบ มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

GBA-2 = เถ้าหนักขนาดละเอียดปานกลาง มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 1-15 โดยน้ำหนัก

GBA-3 = เถ้าหนักขนาดละเอียดสุด มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก

CT = คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ OPC ล้วน

10GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-1 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

10GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-2 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-2 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

10GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

20GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

40GBA-3 = คอนกรีตแทนที่ด้วย GBA-3 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3.3 วิธีเก็บข้อมูล

การศึกษาการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าหนัก มีวิธีการเก็บและรวบรวมแหล่งข้อมูลใช้ในงานวิจัย ดังนี้

1) ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของเถ้าหนักเพื่อเป็นแนวทางการศึกษา ทำการศึกษาข้อมูลย้อนหลังจนถึงปัจจุบันขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก และรวบรวมเก็บข้อมูลประวัติการกองทิ้งเถ้าหนัก เพื่อใช้เป็นข้อมูลคัดเลือกเก็บตัวอย่าง

2) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าหนัก จะมีวิธีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ทดสอบ ณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบันทึกผลการทดสอบตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

3) ทำการบันทึกผลการทดสอบของชุดทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ตามเงื่อนไขของตัวแปรที่ศึกษา โดยใช้เครื่องกดทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

4) ทำการบันทึกผลทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน ของตัวอย่างคอนกรีต ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

5) ทำการบันทึกผลทดสอบการต้านทานคาร์บอเนชัน โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

3.4 วิธีการประมวลผล /วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูล

1) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัด ความพรุน และคุณสมบัติทางกล ของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ

2) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์ผลการทดสอบการต้านทานคาร์บอเนชัน และการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต

3) ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัด คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเมื่อมีตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนผสมและปัจจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีตจากเถ้าหนักบดละเอียด

4) ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล และสังเคราะห์ผลการทดสอบส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต ความพรุน เพื่ออธิบายสมบัติทางกลได้

3.5 สถานที่ทำการทดสอบงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และรวมทั้งห้องปฏิบัติการของนักวิจัยร่วมโครงการ

3.6 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย)

3.6.1 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัยที่มีอยู่

1. Compressive machine
2. Sieve analysis
3. Mold
4. เครื่องมือทดสอบพื้นฐาน
5. ตะแกรงมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ทราย

3.6.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการซื้อ

1. อุปกรณ์ชุดบดวัสดุ
2. เครื่องแก้ว
3. สารเคมี

- HCl-$AgNO_3$
- Superplasticizer
- NaOH
- BufferpH
- NaCl
- ฟีนอฟทาลีน

4. แผ่นทองเหลืองขนาดหนา 0.5 มิลลิเมตร
5. หม้อผสมเพสต์
6. ใบพายผสมเพสต์
7. ถุงมือกันสารเคมี
8. แว่นตากันสารเคมี
9. Epoxy
10. ซิลิโคน
11. น้ำกลั่น
12. ทรายและหิน
13. วัสดุปอซโซลาน
14. ปูนซีเมนต์
15. เหล็กเสริมคอนกรีต
16. บิ๊กเกอร์ขนาด 1000 ml
17. ขวดสีชาสำหรับ $AgNO_3$
18. ใบมีดตัดคอนกรีต

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน วิเคราะห์ขนาดรูปร่างและขนาดอนุภาควัสดุ การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก และนำมาวิเคราะห์ผลในด้านของกำลังอัด ความพรุน และการต้านทานคาร์บอเนชัน การทำนายการเกิดคาร์บอเนชันด้วยการใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 รูปร่างของเถ้าหนักก่อนและหลังบด

ในรูปที่ที่ 4.1 แสดงรูปร่างของเถ้าหนักซึ่งถ่ายจากสภาพจริงด้วยกล้องปกติทั่วไป โดยที่วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเถ้าหนักก่อนบด (รูปที่ 4.1 ก) และเถ้าหนักหลังการบดละเอียดด้วยเครื่องบด (รูปที่ 4.1 ข) โดยพิจารณาในรูปที่ 4.1 ก) พบว่าเถ้าหนักมีขนาดใหญ่และความพรุนสูง จับกันเป็นก้อนแข็งคล้ายหินที่ใช้ในงานโครงสร้าง ขณะที่ในรูปที่ 1 ข) เป็นเถ้าหนักที่ผ่านการปรับปรุงขนาดด้วยการบดละเอียด ซึ่งพบว่าเมื่อบดเถ้าหนัก ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลงและความพรุนลดลง รูปร่างเถ้าหนักบดละเอียดคล้ายผงฝุ่นหรือคล้ายกับปูนซีเมนต์ แตกต่างกันเพียงสี ผลการทดสอบครั้งนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านบางชิ้น [6,8] ส่วนในรูปที่ 4.1 ค) แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของวัสดุปอซโซลานระหว่างเถ้าหนักก่อนและเถ้าหนักหลังบดทั้งนี้เพื่อให้ภาพวัสดุจริงที่ชัดเจนในการใช้เปรียบเทียบรูปร่างและขนาด

เพื่อให้เห็นรูปร่างและขนาดชัดเจนยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังสูงหรือ Scanning electron microscopy (SEM) ผลการทดสอบ SEM แสดใน ในรูปที่ 4.2-4.4 พบว่าเถ้าหนักเมื่อผ่านการบด 3 ขนาด มีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เถ้าหนัก GBA-3 ละเอียดที่สุด ตามด้วยเถ้าหนักละเอียดปานกลาง (GBA-2) และเถ้าหนักขนาดหยาบ (GBA-1) ตามลำดับ โดยพบว่าเถ้าหนักเมื่อผ่านการบดมีอนุภาคเล็กลง รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ความพรุนลดลง ขนาดอนุภาคที่เล็กนี้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างซีเมนต์ และเข้าไปอุดตามรูโพรง ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นและทึบขึ้น อีกทั้งพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วขึ้น ในขณะที่รูปร่างของวัสดุปอซโซลานที่ใหญ่และมีความพรุนสูงต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมาก ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลง

0 10m 20 30 40 50 60 70 80 90
650 600 550

ก)

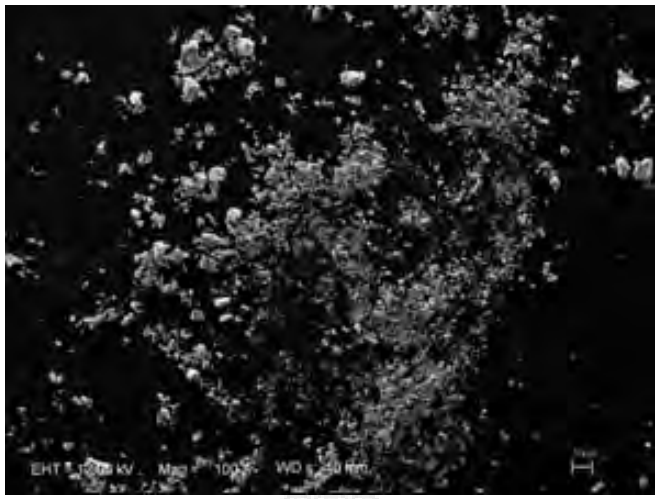
1:1000 0 10m 20 30 40 50 60 70

ข)

ค)

รูปที่ 4.1 เถ้าหนัก ก) ก่อนบด, ข) บดละเอียด และ ค) เปรียบเทียบเถ้าหนักก่อนและหลังบด

รูปที่ 4.2 เถ้าหนัก GBA-3



รูปที่ 4.3 เถ้าหนัก GBA-2

รูปที่ 4.4 เถ้าหนัก GBA-1

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก

การทดสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก GBA-1 GBA-2 และ GBA-3 แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 โดยมี SiO_2 อยู่ระหว่างร้อยละ 36-40 มี Al_2O_3 อยู่ระหว่างร้อยละ 17-21 และมี Fe_2O_3 อยู่ระหว่างร้อยละ 14-15 การบดเถ้าหนักส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก และถ้ารวม $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 71, 71 และ 74 สำหรับเถ้าหนัก GBA-1 GBA-2 และ GBA-3 ตามลำดับ และมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM C618 ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งได้ ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของงานวิจัยนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านบางชิ้น [6,9,10,11]

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก GBA-1 GBA-2 และ GBA-3

Compositions (%)	เถ้าหนัก GBA-1	เถ้าหนัก GBA-2	เถ้าหนัก GBA-3
SiO_2	39	40	39
Al_2O_3	17	17	21
Fe_2O_3	15	14	14
CaO	13	12	16
Na_2O	4	3	3
MgO	8	8	6
K_2O	2	2	2
SO_3	-	-	-
LOI	4.5	4.4	4.4

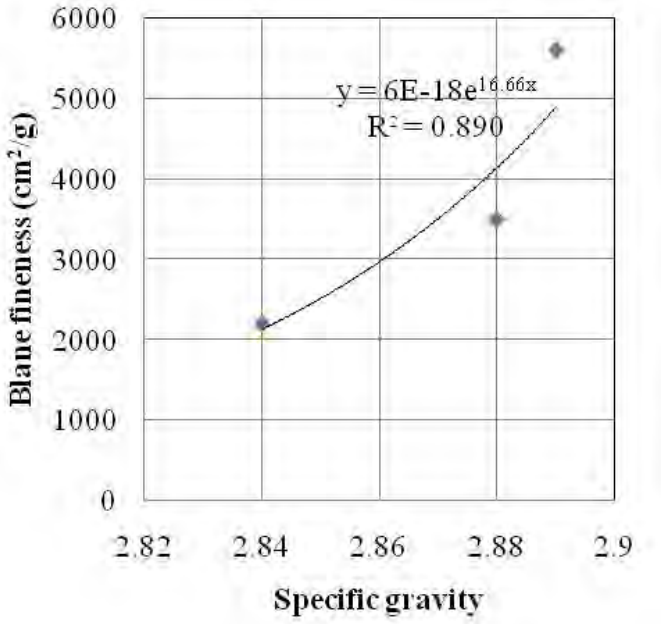
4.3 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเถ้าหนัก

ผลการทดสอบตารางที่ 4.2 เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของของปูนซีเมนต์ (CT) และเถ้าหนัก ประกอบด้วย ความละเอียดด้วยตะแกรงมาตรฐาน ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดทดสอบด้วยวิธีของเบลน ผลการทดสอบพบว่าเถ้าหนักขนาดหยาบ (GBA-1) มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เถ้าหนักขนาดละเอียดปานกลาง (GBA-2) มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเถ้าหนักขนาดละเอียดสุด (GBA-3) มีปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้น ผลการทดสอบยังอีกพบว่า เถ้าหนัก GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 มีความถ่วงจำเพาะและมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.84, 2.88, 2.89 และ 2200, 3600, 5600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

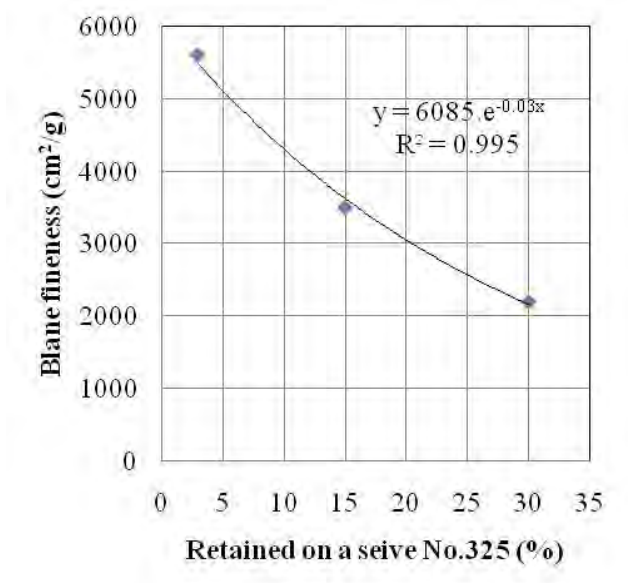
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุในการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การบดเถ้าหนัก ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคเล็กลง สาเหตุที่ขนาดอนุภาคเถ้าหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าน้อยลงจากปริมาณเริ่มแรกที่ใส่บนตะแกรง เนื่องจากส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและอนุภาคที่ถูกบดจนแตกมีปริมาณมากกว่า การบดเถ้าหนักให้ละเอียดขึ้น ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น เนื่องจากการบดเถ้าหนักช่วยให้รูพรุนของอนุภาคลดลง ดังนั้นน้ำหนักต่อปริมาตรจึงเพิ่มขึ้น [6] ในการบดเถ้าหนักให้มีความละเอียดมากขึ้นพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย ในรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ของเถ้าหนัก ซึ่งพบว่าเมื่อบดเถ้าหนักให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย ผลทดสอบนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [3,6,24] ในรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของเบลนและร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยที่ความละเอียดของเบลนเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานที่มีค่าน้อย ส่วนความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานมีค่าน้อย (รูปที่ 4.7)

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3

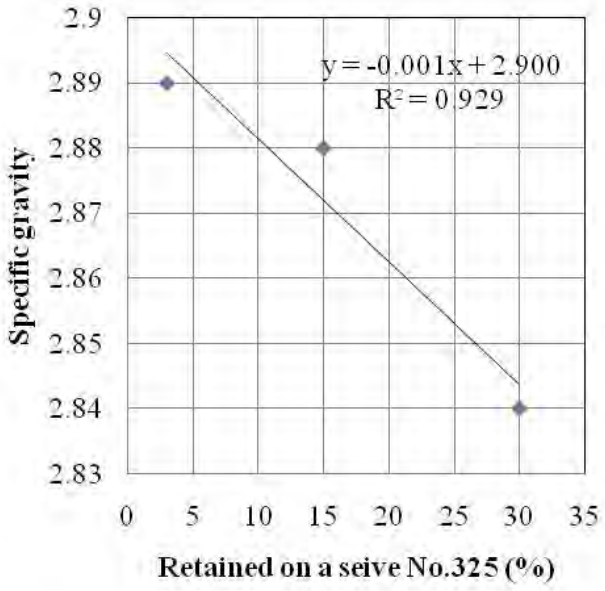
Physical properties	CT	GBA-1	GBA-2	GBA-3
Retained on a sieve No. 325 (%)	N/A	30	15	3
Specific Gravity	3.14	2.84	2.88	2.89
Blaine Fineness (cm^2/gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	3,600	2200	3500	5600



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความละเอียดของเถ้าหนัก



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดและปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานของเถ้าหนัก



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและปริมาณร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐาน

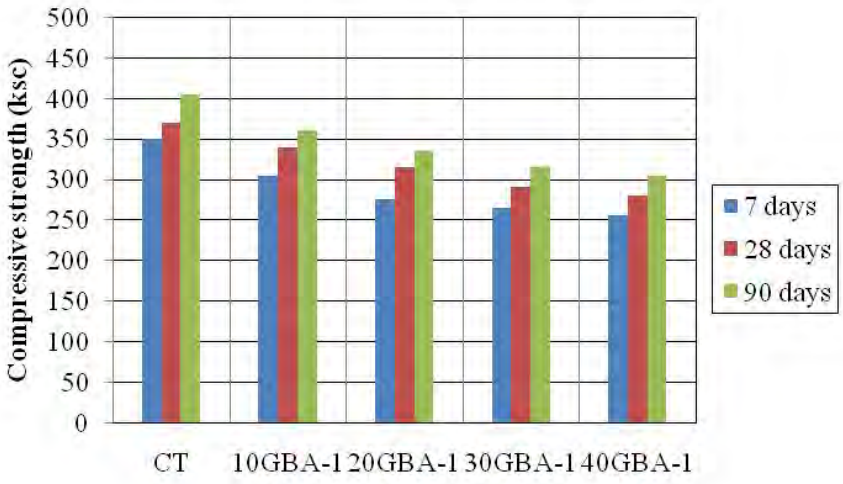
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3

ผลทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าหนัก GBA-1, GBA-2, GBA-3 และคอนกรีต CT แสดงไว้ในรูปที่ 4.8-4.13 ในรูปที่ 4.8 เป็นผลการทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วย GBA-1 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT ในทุกส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBA-1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 4.9) ยกตัวอย่างเช่น ที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต CT มีค่าเท่ากับ 370 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีต 10GBA-1, 20GBA-1, 30GBA-1 และ 40GBA-1 มีค่าเท่ากับ 340, 315, 290 และ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีต CT มีค่าเท่ากับ 405 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีต 10GBA-1, 20GBA-1, 30GBA-1 และ 40GBA-1 มีค่าเท่ากับ 360, 335, 315 และ 305 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยคิดเป็นร้อยละ 76-92 ของคอนกรีต CT คอนกรีต GBA-1 มีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบ เช่น คอนกรีต 20GBA-1 มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 275, 315 และ 335 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การใช้เถ้าหนักขนาดหยาบให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากเถ้าหนัก GBA-1 มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ความพรุนสูง แม้ว่าจะผ่านการบดแต่ความพรุนในตัวของอนุภาคอาจยังคงมีอยู่ จึงต้องปรับปรุงขนาดเถ้าหนักต่อไป กล่าวคือ อาจต้องบดให้มีความละเอียดมากขึ้น

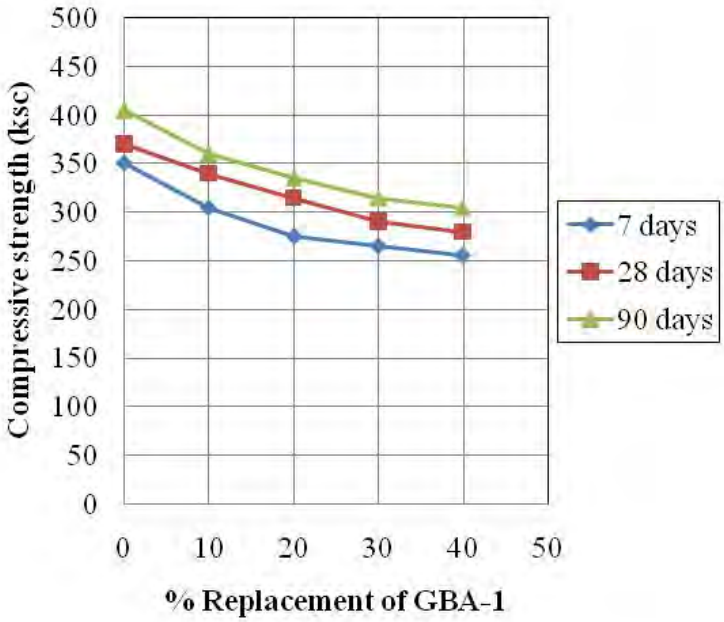
ในรูปที่ 4.10 เป็นผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-2 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ใกล้เคียงกับคอนกรีต GBA-1 กล่าวคือ การใช้เถ้าหนัก GBA-2 แทนที่ปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีต CT ในทุกส่วนผสม ในรูปที่ 4.11 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ เช่น ที่อายุ 28 คอนกรีต 10GBA-2, 20GBA-2, 30GBA-2 และ 40GBA-2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 365, 350, 325 และ 315 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยคิดเป็นร้อยละ 85-95 ของคอนกรีต CT (โดยที่คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 370 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ในรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก GBA-3 ซึ่งเป็นเถ้าหนักขนาดละเอียดที่สุด การใช้เถ้าหนัก GBA-3 แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต CT ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เช่น ที่อายุการทดสอบ 28 วัน คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 370 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีต 10GBA-3 และ 20GBA-3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 420 และ 410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยคิดเป็นร้อยละ 111-114 ของคอนกรีต CT ส่วนที่อายุการทดสอบ 90 วัน คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 405 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีต 10GBA-3 และ 20GBA-3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 445 และ 440 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยคิดเป็นร้อยละ 109-110 ของคอนกรีต CT การใช้เถ้าหนักที่มีความละเอียดส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก GBA-3 ช่วยอุดช่องว่างภายในโพรงเพสต์ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี [1,3,25] อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBA-3 ในช่วงร้อยละ 30-40 กำลังอัดมีแนวโน้มเริ่มลดลง โดยร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วย GBA-3 ปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก อยู่ในช่วงร้อยละ 80-97 ของคอนกรีต CT ในทุกอายุการทดสอบ กำลังอัดของคอนกรีต GBA-3 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตอื่นๆ ดังในรูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น เช่น ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน คอนกรีต 10GBA-3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 385, 420 และ 445 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

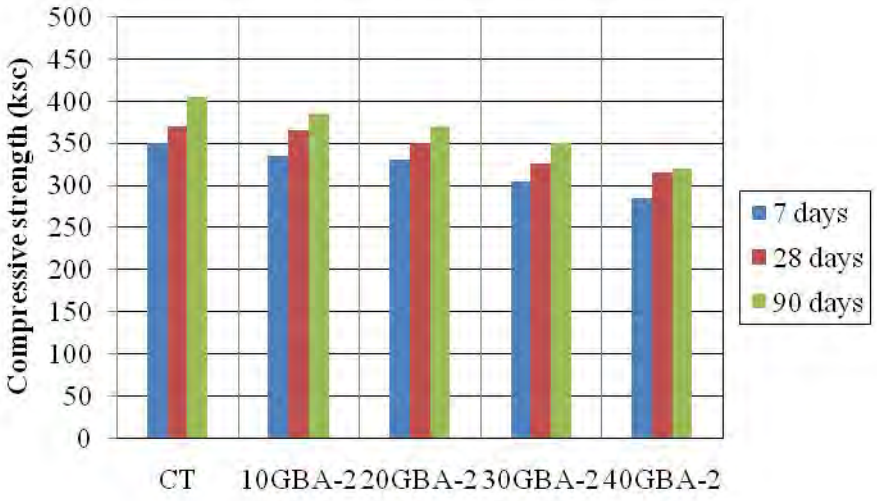
ในรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตเถ้าหนัก GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การใช้เถ้าหนักที่มีความละเอียดให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าเถ้าหนักขนาดหยาบกว่า ความละเอียดของเถ้าหนักสามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงของคอนกรีต ลดช่องว่างภายในโพรง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่น เนื้อแน่น รับกำลังอัดได้ดี คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3,25] ดังนั้นในการพัฒนาเถ้าหนักในงานคอนกรีตควรพิจารณาถึงผลของความละเอียดสำหรับใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากผลของขนาดอนุภาคที่เล็ก พื้นที่จำเพาะที่สูง และปริมาณของซิลิกา (SiO_2) ที่มีอยู่ในเถ้าหนัก สามารถทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) คือ ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) คอนกรีตจึงมีเนื้อแน่น มีความแข็งแรงรับแรงได้ดี [26,27]



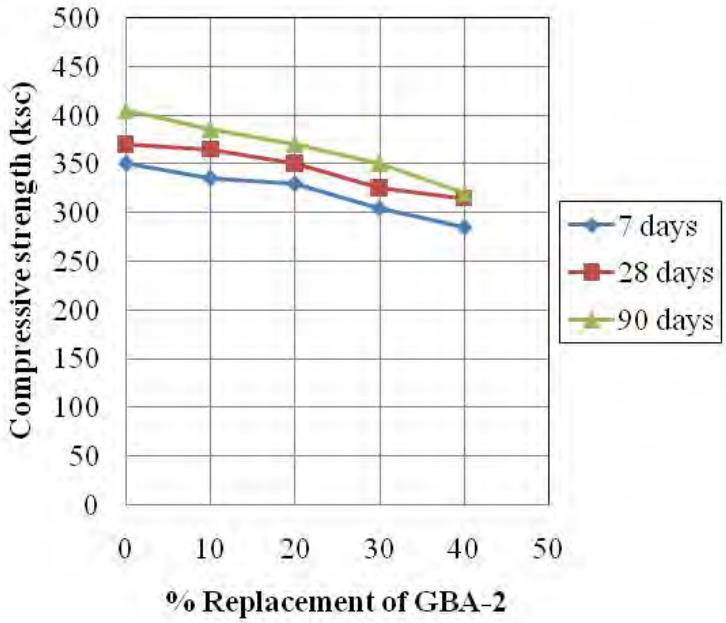
รูปที่ 4.8 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-1



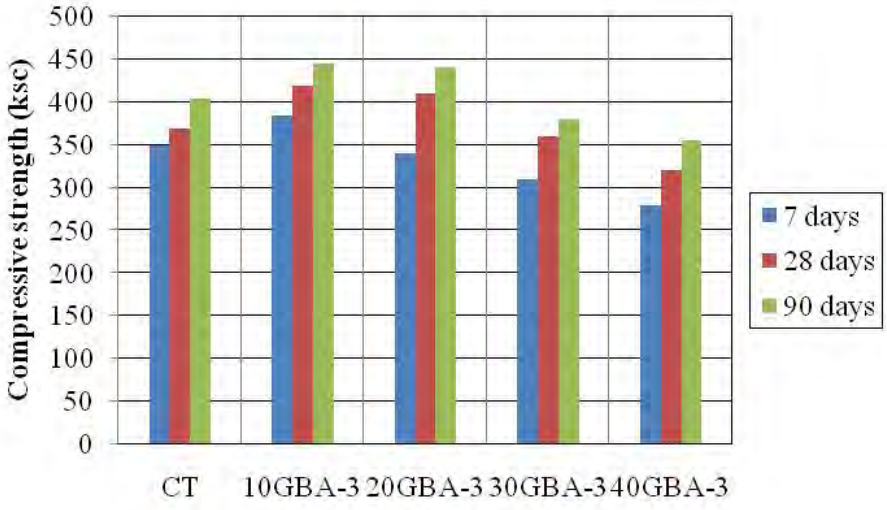
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-1



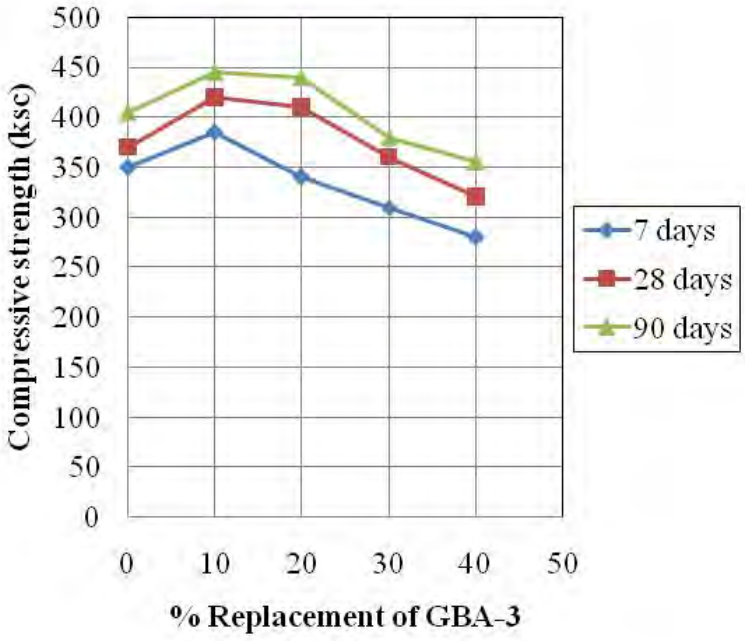
รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-2



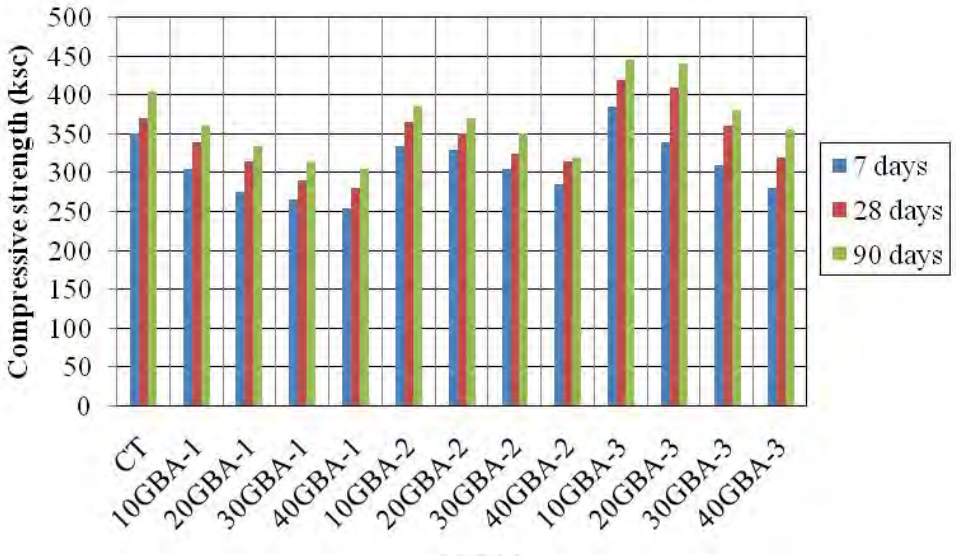
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-2



รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีต CT และ GBA-3



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของร้อยละการแทนที่และกำลังอัดของคอนกรีต GBA-3



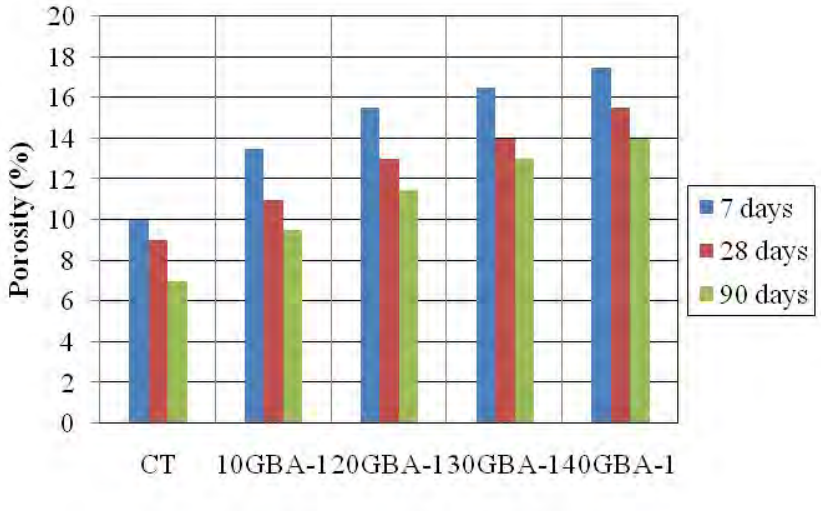
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3

4.5 ความพรุนของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3

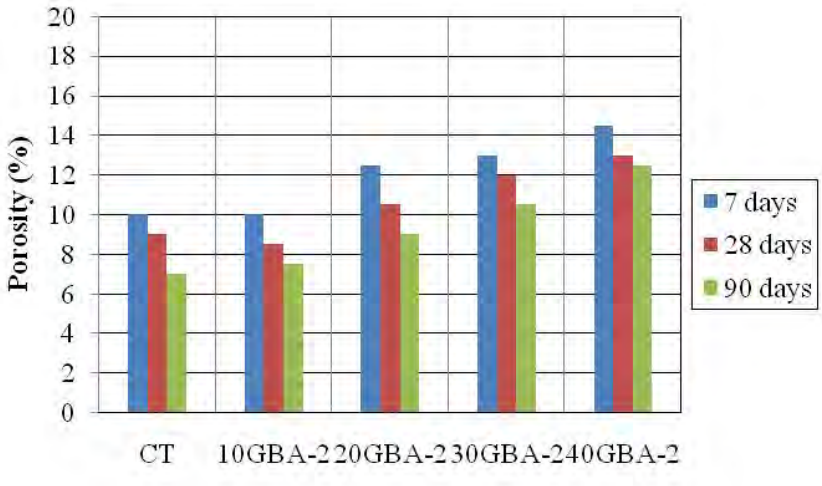
ในรูปที่ 4.15-4.17 แสดงผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนัก GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ตามลำดับ โดยการศึกษานี้ใช้เถ้าหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ในรูปที่ 4.15 ผลการทดสอบพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีต GBA-1 สูงกว่าคอนกรีต CT ในทุกส่วนผสม และเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ร้อยละความพรุนมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย (รูปที่ 4.15) เช่น ที่อายุทดสอบ 28 วัน ความพรุนของคอนกรีต 10GBA-1, 20GBA-1, 30GBA-1 และ 40GBA-1 มีค่าร้อยละ 11, 13, 14 และ 15.5 ขณะที่คอนกรีต CT มีความพรุนร้อยละ 9

ในรูปที่ 4.16 ที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก GBA-2 ในปริมาณร้อยละ 10 มีร้อยละความพรุนลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT คือ คอนกรีต 10GBA-2 มีค่าร้อยละความพรุนเท่ากับร้อยละ 8.5 ขณะที่ CT มีค่าความพรุนร้อยละ 9 แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนัก GBA-2 ในปริมาณร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าร้อยละความพรุนเพิ่มขึ้น และสูงกว่าคอนกรีต CT เช่น คอนกรีต 20GBA-2, 30GBA-2 และ 40GBA-2 มีค่าร้อยละ 10.5, 12 และ 13 ตามลำดับ

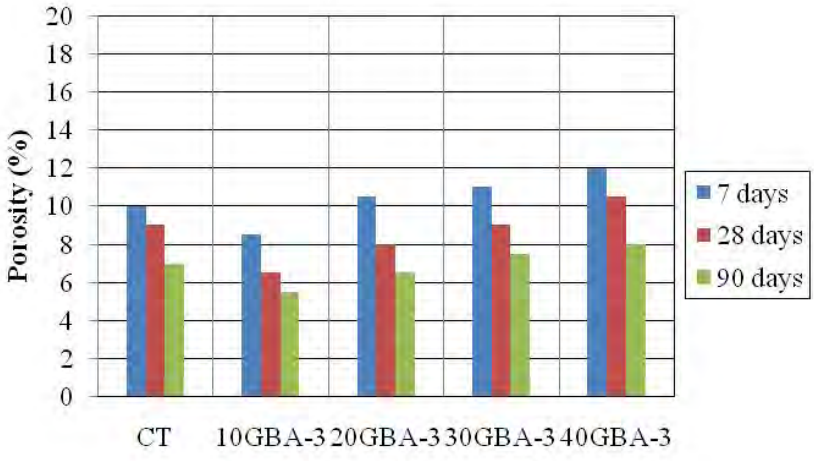
ในรูปที่ 4.17 การทดสอบร้อยละความพรุนของคอนกรีต GBA-3 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT พบว่าค่าร้อยละความพรุนลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GBA-3 ในปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เช่น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต 10GBA-3 และ 20GBA-3 มีค่าร้อยละความพรุนเท่ากับ 6.5 และ 8 ขณะที่คอนกรีต CT มีความพรุนร้อยละ 9 เนื่องจากการบดเถ้าหนักให้มีความละเอียดมากที่สุด ส่งผลให้ขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างโพรง และเป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสำหรับการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ [25,27,28] โดยผลผลิตที่ได้คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมีเนตไฮเดรต คอนกรีตจึงมีความทึบแน่นขึ้นและลดความพรุนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนัก GBA-3 ในปริมาณร้อยละ 30-40 ร้อยละความพรุนเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกส่วน เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต เช่น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต 30GBA-3 และ 40GBA-3 มีร้อยละความพรุนเท่ากับ 9 และ 10.5 ในรูปที่ 4.19-4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละความพรุนของคอนกรีต GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ซึ่งพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีตลดลงส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น ความพรุนเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควรคำนึงถึงความพรุนของคอนกรีตด้วย โดยพยายามออกแบบให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากที่สุด กล่าวคือ ควรพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีความเหมาะสม การใช้ปริมาณน้ำที่น้อยอาจส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ความพรุนน้อย ในรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละความพรุนของคอนกรีต GBA-14, GBA-2 และ GBA-3 ซึ่งพบว่าเถ้าหนักที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถลดความพรุนของคอนกรีตได้



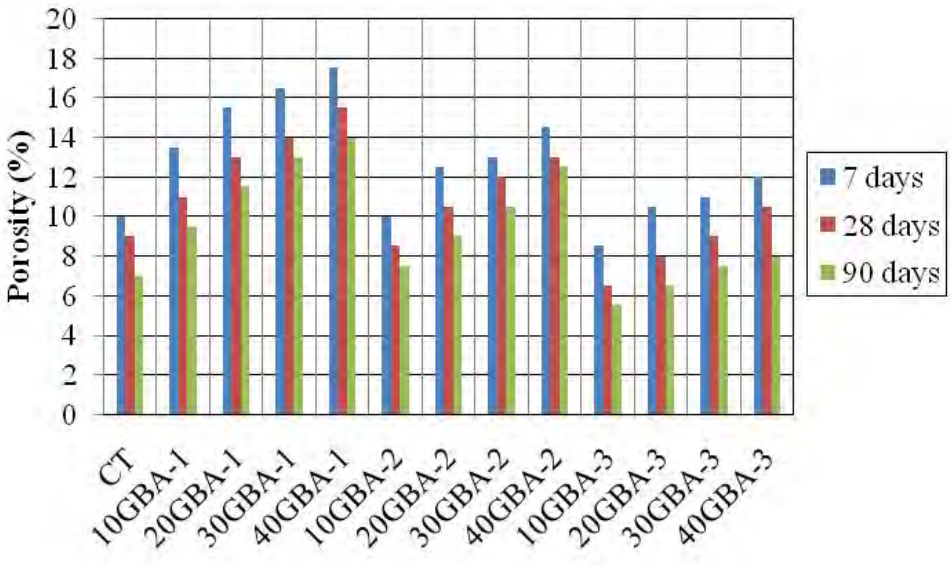
รูปที่ 4.15 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-1



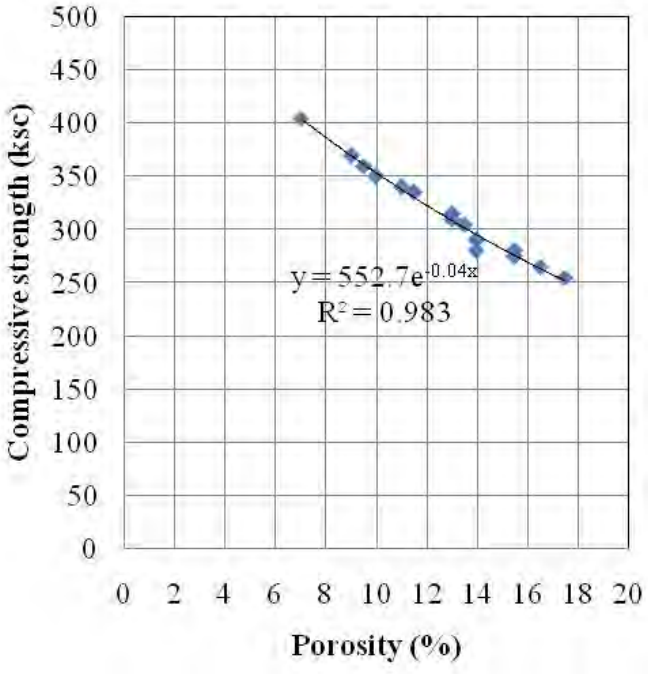
รูปที่ 4.16 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-2



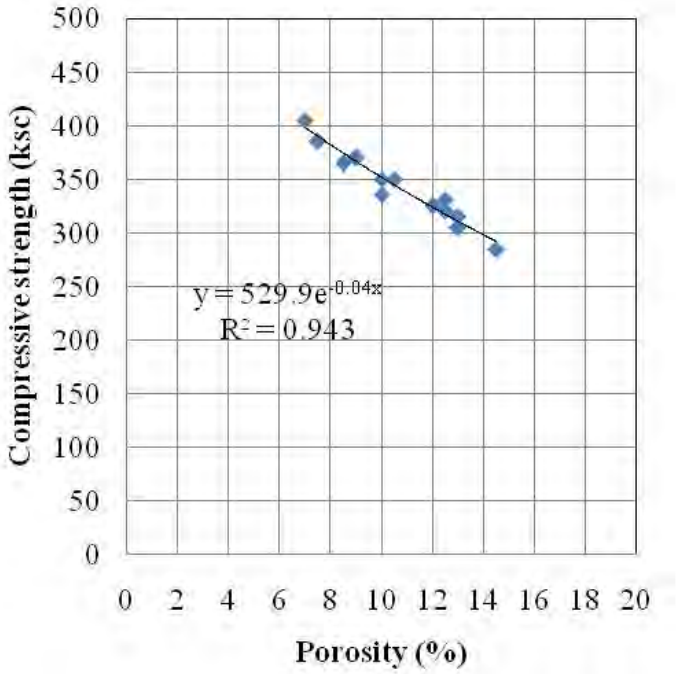
รูปที่ 4.17 ความพรุนของคอนกรีต CT และ GBA-3



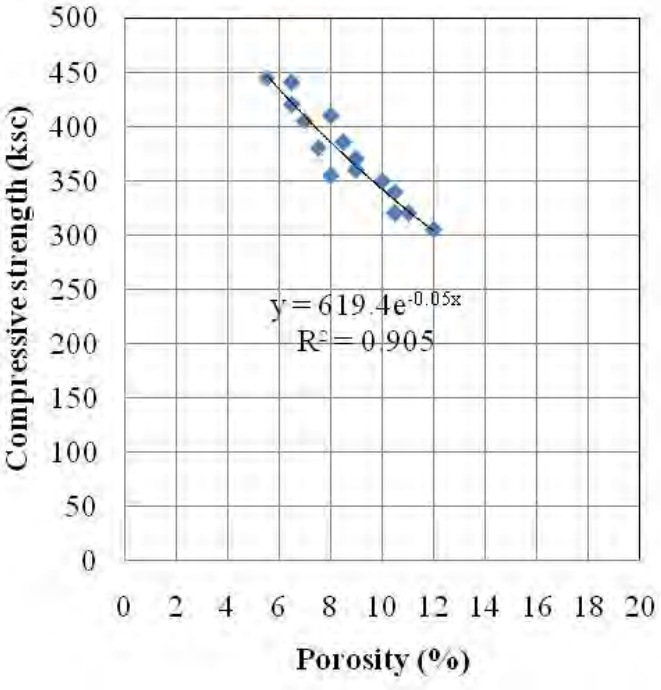
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความพรุนของคอนกรีต CT, GBA-1, GBA-2 และ GBA-3



รูปที่ 4.19 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-1



รูปที่ 4.20 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-2



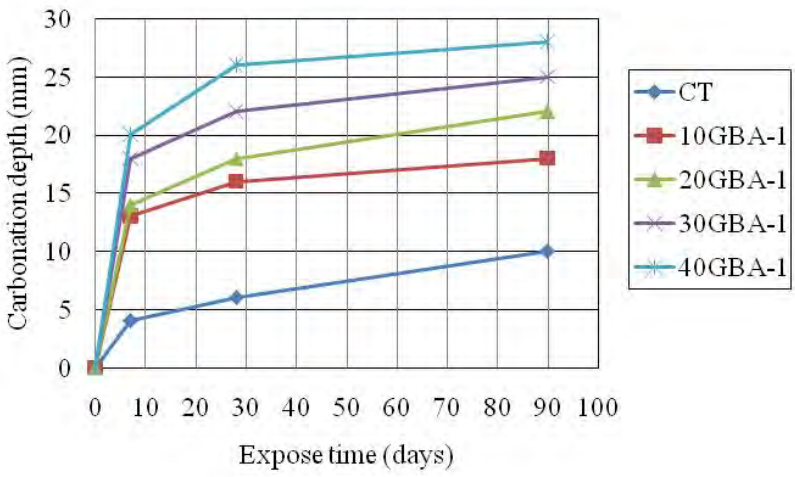
รูปที่ 4.21 กำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต GBA-3

4.6 ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต GBA-1, GBA-2 และ GBA-3

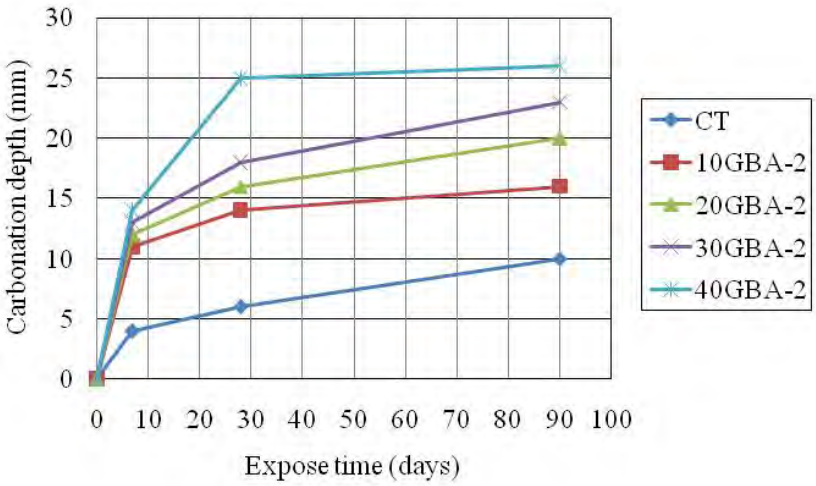
ในรูปที่ 4.22-4.25 แสดงผลการทดสอบคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าหนัก GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ตามลำดับ ผลการทดสอบในรูปที่ 4.22 พบว่า การใช้เถ้าหนัก GBA-1 (เถ้าหนักขนาดหยาบ) มีค่าความลึกของคาร์บอเนชันสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน (CT) ในทุกส่วนผสม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาการทดสอบการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 4.23 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนัก GBA-2 (เถ้าหนักความละเอียดปานกลาง) ผลการทดสอบคล้ายกับการใช้เถ้าหนัก GBA-1 กล่าวคือ ความลึกของคาร์บอเนชันสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน (CT) ในทุกส่วนผสม

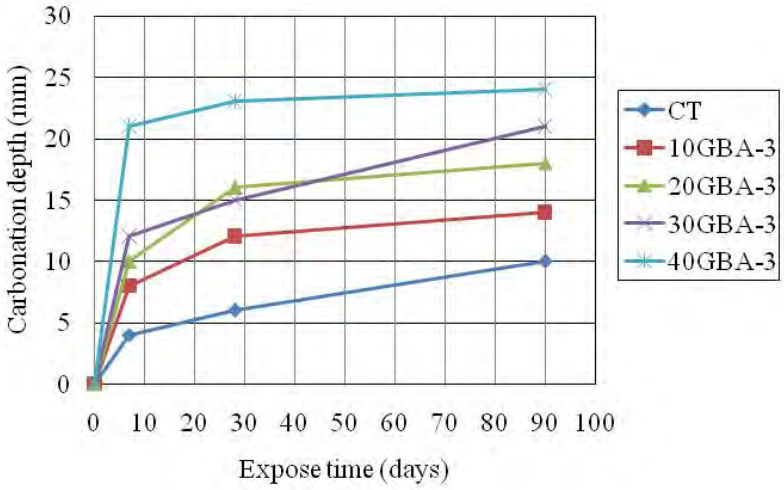
ในรูปที่ 4.24 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าหนัก GBA-3 ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มลดความลึกคาร์บอเนชันลงเมื่อเทียบกับเถ้าหนัก GBA-2 และ GBA-1 การปรับปรุงเถ้าหนักให้มีความละเอียด ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปโพรงของคอนกรีตได้ดี ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้นและลดขนาดของโพรงบางขนาดในคอนกรีตลงไปได้ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ความลึกคาร์บอเนชันเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผลการทดสอบพบอีกว่า ความลึกคาร์บอเนชันเพิ่มขึ้นตามอายุการทดสอบ การใช้เถ้าหนักในทุกส่วนผสมส่งผลให้ความลึกคาร์บอเนชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง [30] หากต้องใช้เถ้าหนักในคอนกรีตสำหรับต้านทานคาร์บอเนชัน ควรปรับปรุงให้มีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 4.22 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-1



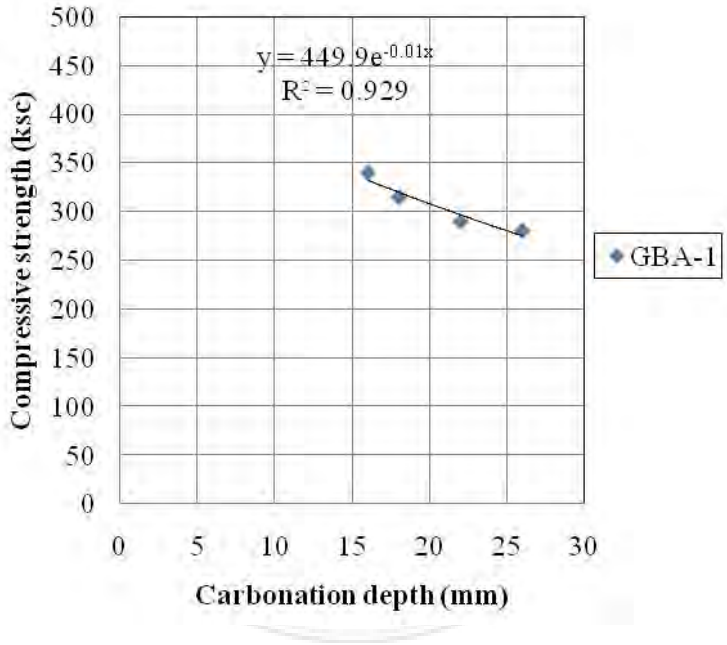
รูปที่ 4.23 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-2



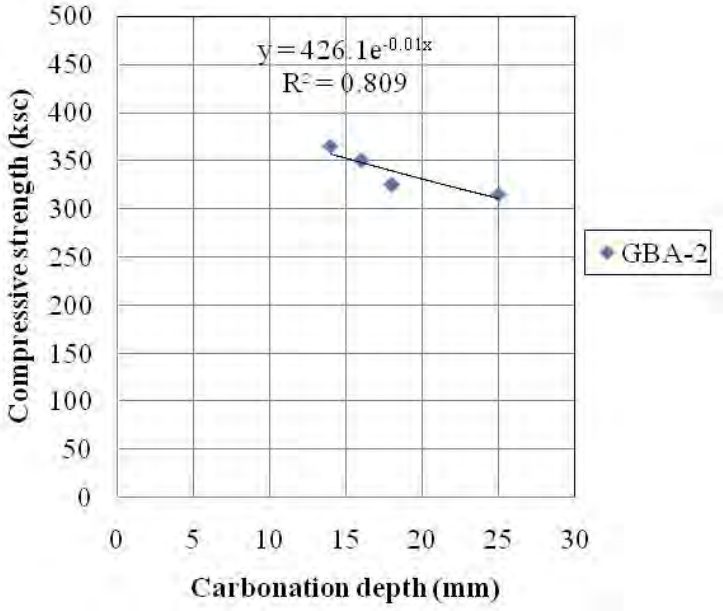
รูปที่ 4.24 คาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-3

4.7 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชัน

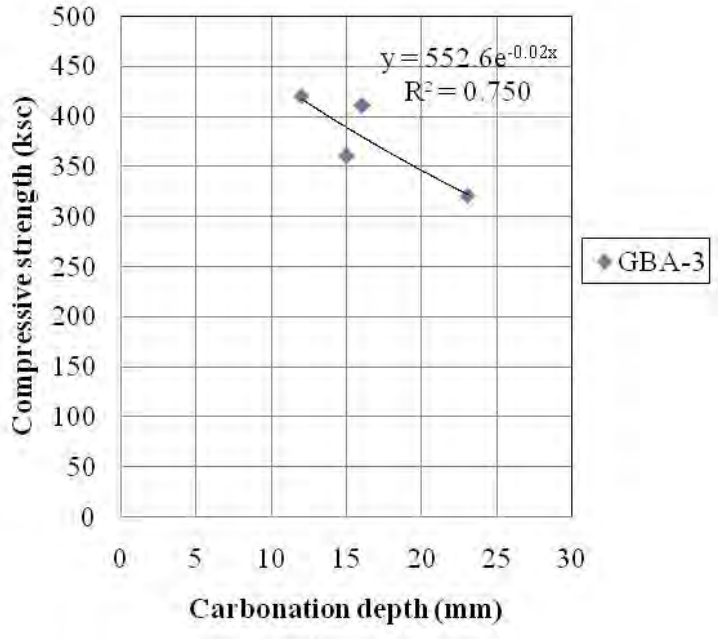
ในรูปที่ 4.25-4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และความลึกคาร์บอเนชันที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความลึกคาร์บอเนชันลดลงเมื่อกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น โดยแนวโน้มด้านทางสถิติหรือ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.929, 0.809 และ 0.750 สำหรับคอนกรีตผสมด้วย GBA-1, GBA-2 และ GBA-3 ตามลำดับ เนื่องจากการลดความพรุนของคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น คอนกรีตมีความทึบแน่นการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กระทำได้ยากขึ้น งานวิจัยนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ สำเริง รักซ้อน [29,30] ซึ่งใช้วัสดุปอซโซลานสำหรับศึกษาการต้านทานคาร์บอเนชันของมอร์ต้าร์และพบว่า เมื่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง โดยสำเริง รักซ้อน [29] ได้อธิบายว่า การลดความพรุนทำให้มอร์ต้าร์มีเนื้อทึบแน่นและลดการซึมผ่าน



รูปที่ 4.25 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-1



รูปที่ 4.26 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-2



รูปที่ 4.27 กำลังอัดและความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต CT และ GBA-3

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และแนวทางต่อการวิจัยอย่างต่อเนื่องในการนำเถ้าหนักสำหรับใช้ในงานคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาการใช้เถ้าหนักในคอนกรีต สามารถสรุปได้ ดังนี้

1) เถ้าหนักสามารถใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2) การใช้เถ้าหนักที่มีขนาดความละเอียดมากให้ค่ากำลังอัดที่สูงและลดความพรุนของคอนกรีต

3) เถ้าหนักขนาดละเอียดมากสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ลดความพรุน อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4) การใช้เถ้าหนักขนาดละเอียดมากแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานคาร์บอเนชันได้ดี

5) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้เถ้าหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ควรออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยและกำลังอัดสูง เนื่องจากสามารถลดการซึมผ่านได้ คอนกรีตมีเนื้อทึบแน่น รับกำลังอัดและต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุปอซโซลานคือเถ้าหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตเพื่อศึกษาด้านกำลังอัด ความพรุน และการต้านทานคาร์บอเนชัน ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจศึกษาการต้านทานคลอไรด์ การกัดกร่อน ความทนทานต่อสารเคมีต่างๆ ของคอนกรีต เพื่อสร้างความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างในการใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีตสำหรับโครงการก่อสร้างต่างๆ ที่ใช้คอนกรีตและมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต และเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างของประเทศไทยอย่างยั่งยืนและต่อเนื่องต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2007. “Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash,” Construction and Building Materials, 22: 932–938.

[2] Poon, C.S., Wong, Y.L., and Lam, L., 1997. “The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars,” Construction and Building Materials, 11(7–8):383–393.

[3] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P., 2006. “Strength of ternary blended cement mortar containing Portland cement, rice husk ash and fly ash,” Journal of Engineering Institute of Thailand, 17(2):33–38.

[4] Papadakis, V.G., 2000. “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress,” Cement and Concrete Research, 30(2): 291-299.

[5] Isgor, O.B., Razaqpur, A.G.. 2004. “Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures,” Cement and Concrete Composites, 26(1): 57-73.

[6] Sathonsaowapark, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009. “Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar,” Journal of Harzadous Materials, 168: 44-50.

[7] Bai, Y., Darcy, F., Basheer, P.A.M., 2005. “Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate,” Construction and Building Materials, 19: 691-697.

[8] Kim, H.K., Lee, H.K., 2010. “Use of power plant bottom ash as fine and coarse agreegates in high-strength concrete,” Construction and Building Materials, inpress.

[9] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul., C., Chalee, W., Rattanasak, U., 2009. “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers,” Waste Management, 29: 539-543.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[10] Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Pimraksa, K., Chaipanich, A., 2012. “Compressive strength ,flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials,” Materials and Design, 35: 434-439.

[11] Sata, V., Sathonsaowapak, A., Chindaprasirt, P., 2012. “Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack,” Cement and Concrete Composites, 34: 700-708.

[12] Cheriak, M., Cavalvante, R., Pera, j., 1999. “Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash,” Cement and Concrete Research, 29: 1387-1394.

[13] Steffens, A., Dinkler, D., Ahrens, H., 2002. “Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures,” Cement and Concrete Research, 32(6): 935-941.

[14] Houst, Y.F., Wittmann, F.H., 2002. “Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation,” Cement and Concrete Research, 32(12): 1923-1930.

[15] 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. 16:242-247.

[16] Khan, M.I., Lynsdale, C.J., 2002. “Strength, permeability and carbonation of high-performance concrete,” Cement and Concrete Research, 32(1): 123-131.

[17] Jiang, L., Lin, B., Cai, Y., 2000. “A Model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete,” Cement and Concrete Research, 30(5): 699-702.

[18] Gastaldini, A.L.G., Isaia, G.C., Gomes, N.S., Sperb, J.E.K., 2007. “Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators,” Cement and Concrete Composites, 29: 176-180.

[19] Atis, C.D., 2003. “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, Construction and Building Materials, 17(3): 147-152.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[20] Sulapha, P., Wong, S.F., Wee, T.H., 2003. “Swaddiwudhipong S. Carbonation of concrete containing mineral admixtures,” Journal of Materials in Civil Engineering, 15(2): 134-143.

[21] พิพัฒน์ นิตยโกศล., 2545. “การคาร์บอเนชันในสภาวะแบบเร่งและแบบธรรมชาติม,” [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[22] RILEM Committee TC. 56., 1988. “Measurement of hardened concrete carbonation depth, Draft RILEM CPC-18,” Materials and Structure, 21: 453-5.

[23] Chang, C.F., Chen, J.W., 2006. “The experimental investigation of concrete carbonation depth,” Cement and Concrete Research, 36(9): 1760-1767.

[24] 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.

[25] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri T., 2005. “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste,” Cement and Concrete Composites, 27(4): 425-428.

[26] Isaia, GC., Gastaldini, ALG., Moraes, R., 2003. “Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete,” Cement and Concrete Composites, 25: 69–76

[27] Neville, AM., 1995. “Properties of concrete,” 4th and Final Edition. Malaysia: Longman Group Limited.

[28] Mehta, PK., 1987. “Studies on the mechanisms by which condensed silica fume improves the properties of concrete: durability aspects,” [In] Proceedings of International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Ottawa 17.

[29] สำเริง รักซ้อน, 2008. “คาร์บอเนชันและการทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ผสมวัสดุปอซโซลาน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 170 หน้า.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[30] Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2010. “Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness,” Journal of Materials in Civil Engineering, 22(3): 253-259.

ภาคผนวก

ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย

<u>หัวหน้าโครงการ</u>

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

5. ประวัติการศึกษา

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

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

โครงสร้างเชิงประกอบ คอนกรีต วิศวกรรมกลศาสตร์คำนวณ สิ่งประดิษฐ์และจีโอโพลิเมอร์

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1) 2008. Received research funding from the Commission on Higher Education. 300,000 baht. Research completed.

2) 2008. Received research grants from Office of the National Research Council of Thailand. 800,000 baht. Research completed.

3) 2010. Received research grants from Office of the National Research Council of Thailand. 842,000 baht. Research completed.

4) 2010. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 605,000 baht. Research completed.

5) 2011. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 450,000 baht. Research completed.

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

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

8) 2013. Received research grants from the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. 500,000 baht.

งานวิจัยดำเนินการในประเทศไทยทั้งหมด

7.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่

7.2.1 Publications in International Journals

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.
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.
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.

4. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2008, Development of classified fly ash as a pozzolanic material, Journal of Applied Sciences, 8(6), 1097-1102.
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.
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. 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.
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.
9. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2009, Pore structure changes of blended cement paste containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation, Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 21(11), 666-671.
10. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2009, An experimental investigation of carbonation of blended Portland cement palm oil fuel ash mortar in indoor environment, Indoor and Built Environment, 18(4), 131-138.
11. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2009, Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (formally Journal of University of Science and Technology Beijing), 16(4), 475-481.
12. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2009, Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and ground river sand, Computers and Concrete, 6(5), 391-401.
13. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2010, Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness, Journal of Materials in Civil Engineering, 22(3), 253-259.

14. Chindaprasirt, P., Chottitanorm C, Rukzon, S., 2011, Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 23(4), 499-503.
15. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2011, Chloride penetration and corrosion resistance of ground fly ash blended cement mortar, International Journal of Materials and Research, 102(3), 335-339.
16. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2012, Use of bagass ash in high-strength concrete, Materials and Design, 34, 45-50.
17. Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand, Sent to Journal of ASCE. (Status is revising)
18. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., Strength, porosity and chloride penetration of geopolymer mortar made with bagass ash. Has been accepted.
19. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., Utilization of waste materials in producing in high strength concrete. Has been sent to journal.

7.2.2 Publications in National Journals

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

7.2.3 Publications in International conference proceedings

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

7.2.4 Publications in national conference proceedings

1. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2005, Strength and carbonation of Portland cement rice husk ash, Proceedings of 1st National Conference of Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, October 31, 98-105.
2. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2006, Effect of the fly ash fineness on carbonation. Proceeding of the 6th National Graduate Research Conference, Chulalongkorn University, Bangkok, October 13-14, 98-105.
3. Rukzon, S., 2005, Use of ground fly ash fineness in concrete work, Proceeding of The 10th National Convention on Civil Engineering (NCCE), Chonburi, May 2-4.
4. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2008, A modification of ASTM C1202 for rapid test for sulfate ingress, Proceedings of 2nd National Conference of Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, September 25-26, 98-105.

7.2.5 Book

1. Rukzon, S., 2010, Reinforced Concrete Structure Design: Strength and Working Design Method, 4th edition (reversion), Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 426 pages.
2. Rukzon, S., 2009, Timber and Steel Structure Design, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.
3. Rukzon, S., 2009, Theory and Testing Concrete Technology, 2th edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 223 pages.

4. Rukzon, S., 2011, Strength of materials, 1st edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 155 pages.
5. Rukzon, S., 2011, Handbook of Reinforced Concrete Structure Design, 1st edition, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 244 pages.
6. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2012, Theory and Testing Concrete Technology, 4th edition, Nonthaburi: Angles of Sci, Chulalongkorn University Printing House, 219 page

7.3 อื่นๆ ที่สำคัญ

ผลงานอื่นๆ

1) นักวิจัยศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา

3) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติของ Asia Pacific Journal of Chemical Engineering

4) เป็นผู้ประเมินบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

5) สมาชิกระดับวุฒิสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.)

6) ใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรม (ก.ว.) ระดับสามัญวิศวกรโยธา

7) สมาชิกเครือข่ายจีโอโพลิเมอร์ไทย

7.4 สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

1. Jaturapitukkul, C., Chucheepsakul, S., Rukzon, S., 2006, Conservative Energy of Grinding Machine for Pozzolanic Materials, Petty Patent No. 3674.
2. Rukzon, S. Teinhiran, C., Ngernprom, N., 2008, Grinding Machine of Cementitious for waste ash, Petty Patent No. 5440.

7.5 ทุนวิจัย / รางวัล

รางวัลที่เคยได้รับ

1. รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท
2. รางวัลนักวิจัยดีเด่นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. รางวัลวิทยานิพนธ์ดีของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

4. รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานวิจัยดีเด่นและดีเยี่ยม ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ร่วมวิจัย (1)

1. ชื่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัลลภ ภูผา

2. รหัสประจำตัว -

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยอธิการบดีและคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

4. หน่วยงานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลพระนคร ถนนพิบูลสงคราม
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร 029132424

5. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
ปริญญาตรี	เทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาโท	วิศวกรรมการผลิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปริญญาเอก	วิศวกรรมการจัดการ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

วิศวกรรมการจัดการ การผลิต เทคโนโลยีขนส่ง วัสดุวิศวกรรม

7. ประสบการณ์ในงานวิจัย

7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

7.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ไม่ต่ำกว่า 40 เรื่อง

7.3 อื่นๆ ที่สำคัญ

ผลงานอื่นๆ

- ได้รับโล่ผู้บริหารดีเด่น จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครปี 2550

- ได้รับโล่ ศิษย์เก่าดีเด่น จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา เทคโนโลยี ขนถ่ายวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี 2550

- ได้รับการประกาศเกียรติคุณ บุคคลตัวอย่างประจำปี2551 สาขา พัฒนาการศึกษาจากนิตยสาร เส้นทางไทย

- บุคคลแห่งปี ข้าราชการพลเรือนผู้มีผลงานดีเด่น ประจำปี พ.ศ.2552 นิตยสารโปรลิศนิวส์ ปีที่ 2 ฉบับที่ 6 ธันวาคม 2552

- บุคคลแห่งปี ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์ ประจำปี พ.ศ.2552

- หนังสือพิมพ์โปรลิศนิวส์ ปีที่ 2 ฉบับที่ 6 ธันวาคม 2552

- ตำรา วิศวกรรมซ่อมบำรุง วิศวกรรมเครื่องมือ กระบวนการผลิต การเขียนโครงงานทางวิศวกรรม

- Forecast a Shortage of Power in Thailand

- A Study of Appropriate Model of Unit Cost for Electricity Generation in Thailand

- ออกแบบโรงงานเตาเผาขยะ และวางระบบกระบวนการผลิตทั้งหมด จ.ฉะเชิงเทรา

- ออกแบบโรงงานเตาเผาศพ และวางระบบกระบวนการผลิตทั้งหมด จำนวน 50 วัด

7.4 สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

7.5 ทุนวิจัย / รางวัล

- ได้รางวัลที่ 1 เรื่อง เครื่องบีบน้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ปี2550 กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2550

- รางวัลที่ 3 เรื่อง สกรีนปลาแผ่นของ นวัตกรรมกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2550

- ได้รับรางวัล Bronze Medal งาน The 2009 RMUTPs Conference Awards

- ได้รับรางวัลด้านพลังงานที่ประเทศญี่ปุ่น ปี 2010 เรื่อง A Study of Model for Constructing the Appropriate Power Plant as Guidelines for Decision-making in Selecting the Electricity-Generating Energy in Thailand

ผู้ร่วมวิจัย (2)

1. ชื่อ นายนิโรจน์ เงินพรหม
(Mr. Nirojn Ngenprom)
2. รหัสประจำตัว 3800300181504
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ระดับ 5
4. หน่วยงานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมสาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลพระนคร ถนนพิบูลสงคราม
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
E-mail: kim98766@hotmail.com โทร 02 9132424

5. ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2547	ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2549	ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ
วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย
7. ประสบการณ์ในงานวิจัย
7.1 โครงการวิจัย
1. การประเมินค่า CBR ของดินลูกรังโดยใช้โครงขายประสาทเทียม (Estimation of CBR of Lateritic Soil using Neural Network) ปี 2549
2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจในงานของข้าราชการสายสนับสนุนและพนักงานในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ปี 2551
7.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่
<u>วารสารระดับชาติ</u>
การประเมินค่า CBR ของดินลูกรังโดยใช้โครงขายประสาทเทียม (Estimation of CBR of Lateritic Soil using Neural Network) ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในเอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 เล่มที่ 3 หน้า GTE 422-428 ปี 2550