



เลขที่สัญญา R2559C146

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าหนัก
จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในงานคอนกรีต



คณะผู้วิจัย สังกัด

ดร.ทองศักดิ์ โนไชยา สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
นางสาวปาณิสรา ดีเสื่อ สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันที่รับเข้า - 7 (๗) (๒๕๖๐)
เลขทะเบียน 1024078
เลขเรียกหนังสือ 2 TP
5

ท1155
2560

สนับสนุนโดยกองทุนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับเงินสนับสนุนจาก กองทุนอุดหนุนการวิจัย จากงบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัยนเรศวรปีงบประมาณ 2559 เป็นอย่างยิ่ง โครงการวิจัยนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้หากผู้วิจัยไม่ได้รับการสนับสนุนจากทุนดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการ วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือการวิเคราะห์ผลในการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ ทางด้านการทดสอบกำลังอัด และสุดท้ายทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย นเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

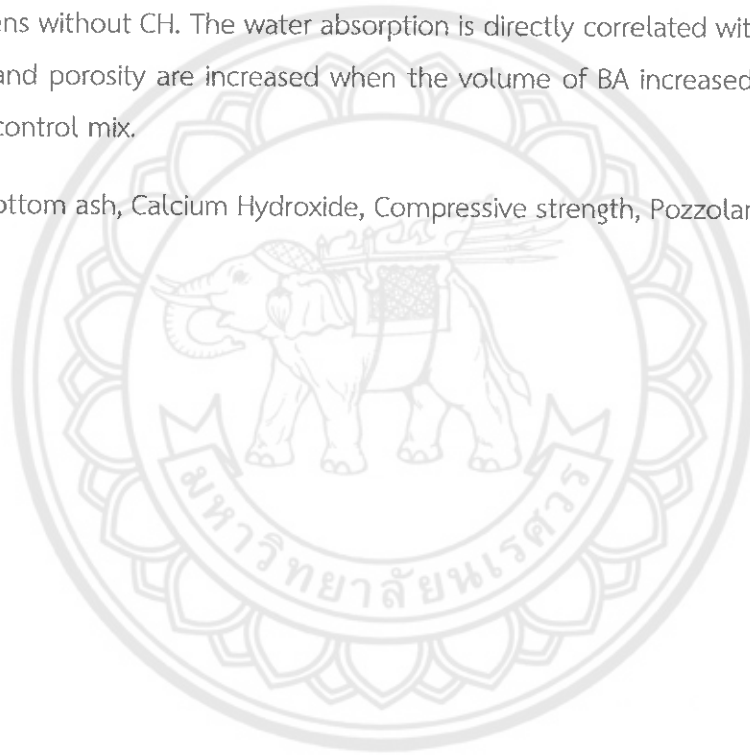
ทงศักดิ์ โนโซยา
มีนาคม 2560



Abstract

Bottom ash (BA), a by-product from the Mae Moh power plant in Lampang, can be used as pozzolanic material by a partial cement replacement. In this research, BA was used as cement replacement at 10-30 wt% and Calcium Hydroxide (CH) was used as additive materials at 2.5-10 wt%. Prior to mixing, BA was ground by ball mill for 24 hours. Physical and mechanical properties of the mortars were studied after curing at 7, 14, 28 and 90 days. It was found that the compressive strength of mortars with BA are increased with increasing curing times. Moreover, the compressive strength of the specimens was containing CH found to be higher than that of the specimens without CH. The water absorption is directly correlated with the porosity. Water absorption and porosity are increased when the volume of BA increased and are higher than that of the control mix.

Keyword: Bottom ash, Calcium Hydroxide, Compressive strength, Pozzolanicity



Executive Summary

เถ้าหนัก (Bottom Ash) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เถ้าก้นเตา” เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะโดยใช้พลังความร้อนจากถ่านหินลิกไนต์ประมาณวันละ 40,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดเถ้าเป็นปริมาณ 10,000 ตัน/วัน ในจำนวนนี้สามารถแบ่งได้เป็นเถ้าหนัก (Bottom ash) ร้อยละ 20 และเถ้าลอย (Fly ash) ร้อยละ 80 ซึ่งจำเป็นต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่มากในการฝังกลบ และจัดการ เถ้าหนักมีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) ในการใช้งานเถ้าหนักทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลงในช่วงต้น แต่จะเพิ่มขึ้นในระยะยาวเนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันแน่น และเกิดการอุดช่องว่างภายในเนื้อซีเมนต์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเถ้าหนักมาศึกษาผลของการใช้งานต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยทำการเติมสารเติมแต่งเพื่อเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากบดเถ้าหนักเพื่อให้มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาที่ดีโดยบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงโดยมีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ แล้วจึงนำไปผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนโดยรวมร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก แล้วใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเติมแต่ง และทำการเตรียมชิ้นงานเป็นมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 0.5 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำลังอัด (compressive strength) และศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์จากค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความพรุน ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วันโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาคอร์สสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกด้วย

ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 90 วัน มีกำลังอัดสูงที่สุด กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมทุกระยะเวลาในการบ่ม ในการศึกษาเพิ่มเติมผลของสารเติมแต่งต่อค่ากำลังอัดพบว่าการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปจะช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในช่วงต้น ตั้งแต่ 7 วันแรก และยังคงเพิ่มกำลังอัดในช่วงปลายอีกด้วย ส่วนผลของความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักมีค่าไม่ต่างจากมอร์ตาร์ควบคุมมากนัก แต่ในสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปจะมีค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมอร์ตาร์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของมอร์ตาร์พบว่าบริเวณผิวของเถ้าหนักมีการทำปฏิกิริยาได้ดีเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าหนักเพื่อมาทดแทนในปูนซีเมนต์นั้น จะเป็นการช่วยลดพื้นที่ฝังกลบและยังสามารถนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกข้อหนึ่งที่สำคัญคือการนำวัสดุมาแทนในปูนซีเมนต์จะสามารถช่วยลดการระเบิดภูเขาหินปูนและยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมด้วย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	2
บทคัดย่อภาษาไทย	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	4
Executive Summary	5
สารบัญ	6
บทที่ 1 บทนำ	7
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	16
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	27
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	38
เอกสารอ้างอิง	39
ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย	40
ภาคผนวก	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้ (by product) จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยถ่านหินจะถูกเผาในหังเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิสูง องค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในถ่านหินจะเกิดการแปรสภาพเป็นออกไซด์หลายชนิด ซึ่งได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา เหล็กออกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ เถ้าถ่านหินคิดเป็นปริมาณร้อยละ 25 ของถ่านหินที่ใช้ในการเผา โดยเถ้าถ่านหินแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือเถ้าลอย (Fly ash) มีปริมาณร้อยละ 90 และเถ้าหนัก (Bottom ash) มีปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักของเถ้าถ่านหินทั้งหมด [1-2]

เถ้าลอยจะเป็นเถ้าที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก มีขนาดประมาณ 1-150 ไมโครเมตร ซึ่งจะลอยฟุ้งขึ้นไปยังส่วนบนของปล่องระบายอากาศของหังเผาไหม้ เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้หลุดออกไปสู่ภายนอกเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบโรงงาน ด้วยความกลมและขนาดเล็ก อนุภาคเถ้าลอยจึงเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นที่ดี ในลักษณะของ Ball bearing ในการผสมคอนกรีตจึงสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าที่ใช้ในการผสมคอนกรีตปกติ [2] ส่วนเถ้าหนักเป็นเถ้าขนาดใหญ่ จะหล่นลงในน้ำบริเวณใต้หังเผาไหม้ เถ้าหนักมีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุน มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1-2.7 ซึ่งมีน้ำหนักโดยรวมมากเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

การใช้เถ้าหนักในอุตสาหกรรมคอนกรีตนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา เริ่มการศึกษาวิจัยการนำเถ้าหนักมาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ได้แก่การนำเถ้าหนักมาใช้ทดแทนทราย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าหนักที่นำมาใช้แทนมวลรวมละเอียดไม่ควรเกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก [3-4] หรือการนำเถ้าหนักมาใช้ทำคอนกรีตมวลเบา [5] หรือใช้เป็นวัสดุเติมเริ่มต้นสำหรับทำเป็นจีโอโพลีเมอร์ [6] นอกจากนี้การใช้งานอีกอย่างหนึ่งคือ นำเอาเถ้าหนักมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7-8] จากลักษณะทางเคมีของเถ้าหนักพบว่าองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70 [9-11] ในการใช้งานเถ้าหนักทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลงในช่วงต้นแต่จะเพิ่มขึ้นในระยะยาว จึงเป็นจุดที่ค่อนข้างท้าทายนักวิจัยในการแก้ปัญหาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าหนักในจุดนี้ ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าหนักที่ได้จากโรงไฟฟ้าจะมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ก่อนนำมาใช้จึงต้องนำไปบดก่อน (ball mill) และการทำปฏิกิริยาของเถ้าหนักกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะต้องใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์กับน้ำ นอกจากนี้การใช้เถ้าหนักจะช่วยเพิ่มปริมาณของเนื้อคอนกรีต [2-3] อย่างไรก็ตามในทางการจัดการวัสดุเหลือใช้จากโรงงานการใช้เถ้าหนักเพื่อทดแทนในปูนซีเมนต์นั้น จะเป็นการช่วยลดพื้นที่ฝังกลบและยังสามารถนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกข้อหนึ่งที่สำคัญคือการนำวัสดุมาแทนในปูนซีเมนต์จะสามารถช่วยลดการระเหิดภูเขาหินปูนและยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นมลภาวะแก่งโลบด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการพัฒนาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าหนักโดยการเติมสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุเติมแต่ง เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าหนักเพื่อใช้ในงานคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การนำเอาเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นการช่วยลดพลังงานโดยตรงจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังช่วยลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่

เกิดจากกระบวนการเผา ซึ่งส่งผลให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) และยังสามารถนำมาใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษามลของสารเติมแต่งต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าหนัก
- 1.4.2 เพื่อศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าหนักและสารเติมแต่ง
- 1.4.3 เพื่อศึกษาสมบัติความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักและสารเติมแต่ง
- 1.4.4 สามารถนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตแบบยั่งยืนได้

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1. ค้นคว้าวรรณกรรม
2. เก็บตัวอย่างเถ้าหนักจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง
3. ทำการบดเถ้าหนักให้มีขนาดที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM C618
4. วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ ด้วยเทคนิค XRD, SEM และ Particle size analyzer โดยส่งชิ้นงานไปทดสอบที่ ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
5. ศึกษาสมบัติเชิงกล ทางกายภาพ และความทนทานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าหนัก โดยทดสอบชิ้นงานที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
6. นำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล
7. เขียนรายงาน สรุปผล

1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ	■	■											
2. เก็บตัวอย่างจากโรงงาน		■	■										
3. วิเคราะห์วัสดุดิบ			■	■									
4. เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ				■	■	■	■	■					
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง						■	■	■	■				
6. นำเสนอผลงานวิจัย									■	■	■	■	
7. เขียนรายงาน สรุปโครงการ											■	■	■

บทที่ 2

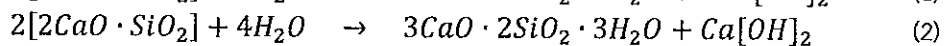
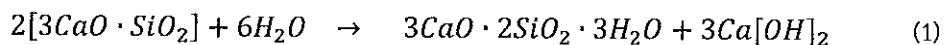
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

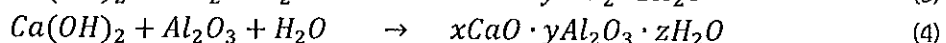
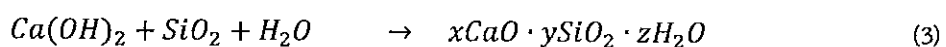
วัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต ถือเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้สำหรับงานโครงสร้างกัน เนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานง่าย และยังมีความคงทนสูง มีอายุในการใช้งานที่ยาวนานอีกด้วย ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น หินปูน ดินขาว และศิลาแลง มาเผารวมกันในเตาหลอมแบบหมุน (Rotary kiln) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,450-1500 °C จนกลายเป็นปูนเม็ด แล้วจึงนำไปผสมกับยิปซัมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [12] จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าในกรรมผลิตปูนซีเมนต์ จำเป็นจะต้องใช้พลังงานจำนวนมาก ทั้งจากการทำเหมืองแร่วัตถุดิบ การเผา และการบด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ยังมีการปล่อยก๊าซก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาอีกด้วย ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยที่มีแนวคิดที่จะพัฒนาคอนกรีตแบบยั่งยืนขึ้น โดยการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง แล้วใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งคำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 กล่าวว่า เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ [9-11] แล้วมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยยึดประสานหินและทรายในคอนกรีตได้ โดยมากแล้ววัสดุปอซโซลานก็จะเป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาวัสดุทางการเกษตรและถ่านหินในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุปอซโซลานจากภาคการเกษตรได้แก่ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) และเถ้าขานอ้อย (Sugar cane bagasse ash) และวัสดุปอซโซลานจากภาคอุตสาหกรรมได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าหนัก (Bottom ash) ตะกรันเหล็ก (Blast furnace slag) ผงฝุ่นซิลิกา (Silica fume) [2, 13-15] ซึ่งเถ้าส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานกันอยู่บ้างแต่ก็ยังไม่แพร่หลาย ยกเว้นเถ้าเถ้าลอยซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในการนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตแบบยั่งยืน แต่อย่างไรก็ตามในการใช้วัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์ก็ยังมีอุปสรรคทางด้านการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น คืออายุของคอนกรีตไม่เกิน 28 วัน ยังมีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานต้องใช้เวลา

โดยเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [12] ของคอนกรีตคือปฏิกิริยาที่สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต (C₃S, C₂S) ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสต์ เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งวุ้น (Gel) เป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัว และ ยึดเกาะ แน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง (ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม) เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) สารประกอบ C₃S และ C₂S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบซิลิเกตไฮเดรตตั้ง สมการ (1) และ (2)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ในส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับซิลิกา และอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic) ดังแสดงในสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ [2]



สำหรับการใช้งานเจ้าหน้าที่ซึ่งถือเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ อุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อการใช้งานเจ้าหน้าที่ในทางปฏิบัติที่ต้องการความแข็งแรงในช่วงแรกเพื่อที่จะสามารถถอดแบบออกได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่งปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์ เช่น การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เป็นต้น หรือการใช้สารอื่น ๆ เช่น ซิลิกาฟูม หรือสารขนาดนาโน เพื่อเพิ่มกำลังอัด (ความแข็งแรง) ให้ดียิ่งขึ้น จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นทางผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะปรับปรุงแนวทางการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่ผสมเจ้าหน้าที่ก็เป็นหนึ่งในเป้าหมายของผู้วิจัยที่ต้องการจะพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรมคอนกรีตแบบยั่งยืน ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาปูนซีเมนต์ผสมเจ้าหน้าที่เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างแบบยั่งยืน โดยการเติมสารเติมแต่ง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) แล้วทำการศึกษามลสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและการต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเจ้าหน้าที่

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์แลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และโคโลไมต์ (MgCO₃) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง, ตราพยานาคเขียว, TPI (แดง) ฯลฯ) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ฟุต³ เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

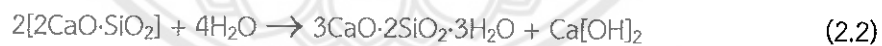
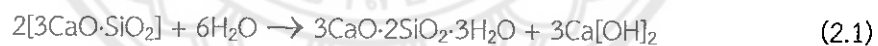
C₃S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน C₂S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย C₃A ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว C₄AF มีผลให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

2.3 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

ปฏิกริยาไฮเดรชัน ของคอนกรีตคือปฏิกริยาที่สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต (C_3S และ C_2S) ทำปฏิกริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสต์ เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งวุ้น (Gel) เป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาก ก่อตัว แข็งตัว และ ยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสมปูนซีเมนต์ธรรมดาให้ความร้อนประมาณ 85 - 100 คาลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูง คอนกรีตอาจเสียความแข็งแรงได้ และ ความร้อนนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว ในโครงสร้างคอนกรีตที่บาง ความร้อนสามารถถ่ายเทออกไปได้ แต่ในโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ และ หนา เช่น เขื่อน จะต้องมี การออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต วิธีหนึ่งอาจทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทสี่ ที่ให้ความร้อนจากปฏิกริยาไฮเดรชันต่ำ (60 - 70 คาลอรีต่อ กรัม) การทำปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเพสต์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับ การให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดาเป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลอง จะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วัน หลังจากนั้นปูนซีเมนต์ยังคงทำปฏิกริยากับน้ำต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมจากใต้ดินหรือจากความชื้นในขณะฝนตก หรือ ในขณะที่มีความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้ภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกริยาทางเคมีขึ้น ระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration) สารประกอบ C_3S และ C_2S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกริยากับน้ำ ได้สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ C-S-H) ดังสมการ (2.1) และ (2.2)

ปฏิกริยาไฮเดรชัน



2.4 วัสดุปอซโซลาน

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุประเภทปอซโซลานมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมซีเมนต์และอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายโดยวัสดุประเภทปอซโซลานนี้ถือว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ชนิดหนึ่ง คำว่าวัสดุเชื่อมประสานนี้หมายถึงวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานองค์ประกอบต่างๆหรือวัสดุอื่นเข้าด้วยกันซึ่งในอดีตวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างมีเพียงอย่างเดียวคือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุจำพวกนี้ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟุ่ม เป็นต้น ซึ่งเป็นของเหลือใช้ (Waste) จากโรงงานอุตสาหกรรม

2.5 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เกิดจากปฏิกิริยาที่สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์ มีคุณสมบัติเป็นด่าง (ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม) แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับ วัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอลูมินาผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic)

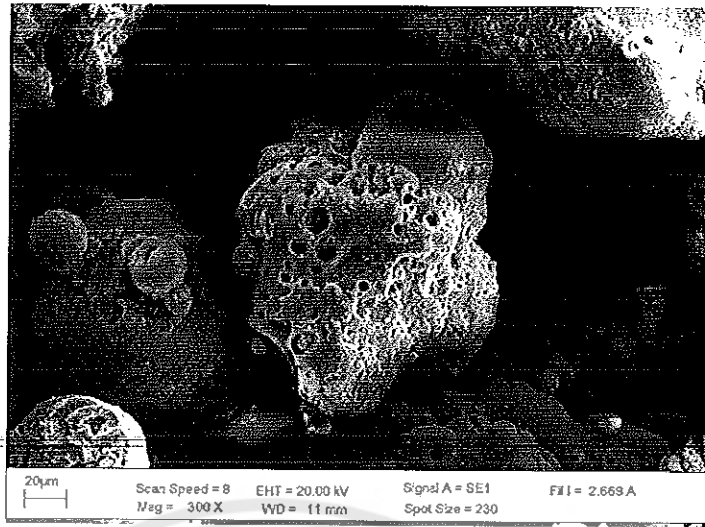


สำหรับการใช้งานเถ้าลอยซึ่งถือเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะเป็นไปตามสมการ (2.3) และ (2.4) สำหรับค่า x, y เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับซิลิกาและอลูมินา

2.4 เถ้าหนัก

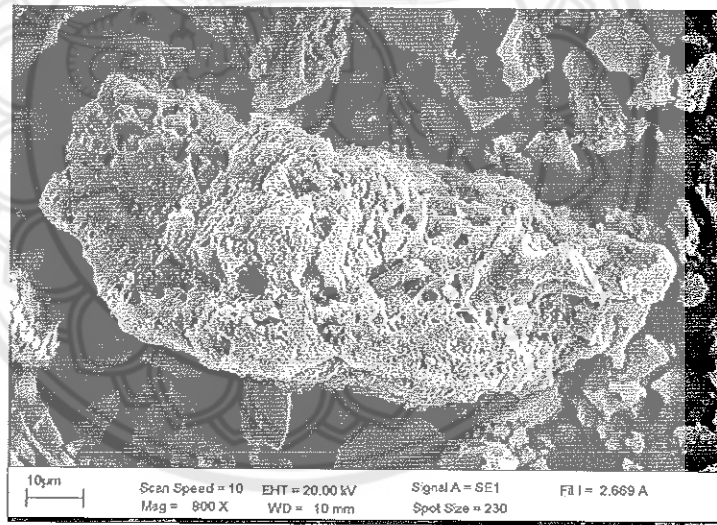
เถ้าหนัก (Bottom Ash) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เถ้าถ่านเตา” เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาเถ้าถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยอุปกรณ์ดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตส่วนเถ้าหนักจะหล่นลงในน้ำบริเวณใต้ห้องเผาไหม้ เถ้าหนักมีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุน มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1-2.7 ซึ่งมีน้ำหนักโดยรวมเบามาก ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะหลายชนิด เมื่อทดสอบคุณสมบัติการชะล้าง ตามวิธีสกัดสารของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) พบว่าปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งไม่ถือเป็นของเสียอันตรายสามารถนำไปบดเพื่อใช้ประโยชน์โดยสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เถ้าหนักมีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินัมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในการใช้งานเถ้าหนักทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลงในช่วงต้น แต่จะเพิ่มขึ้นในระยะยาว เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันแน่น และเกิดการอุดช่องว่างภายในเนื้อซีเมนต์

เถ้าหนักซึ่งเกิดจากการรวมตัวของเถ้าถ่านหินที่ถูกหลอมเหลวและมีขนาดค่อนข้างใหญ่มีความพรุนสูงเมื่อนำเถ้าหนักมาบดละเอียดจะทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนักจะทำให้กำลังสูงขึ้นตามอายุการป่ม แต่ค่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าหนัก เนื่องจากเถ้าหนักจะลดจะลดปริมาณความต้องการน้ำ [4]



ภาพที่ 2.1 ภาพถ่ายอนุภาคของถ้ำหนักจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพที่ 2.1 ถ้ำหนักก่อนบดมีขนาดอนุภาคใหญ่และมีความพรุนสูง หากนำไปใช้งานจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงแต่หากนำไปปรับรูปร่างด้วยการบดพบว่า จะทำให้ถ้ำหนักมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง



ภาพที่ 2.2 ภาพถ่ายอนุภาคของถ้ำหนักที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพที่ 2.2 พบว่า ถ้ำหนักมีความพรุนสูง มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม และสาเหตุที่ต้องปรับรูปร่างอนุภาคให้มีความละเอียด จะสามารถเข้าไปแทรกตัวในโพรงที่ใหญ่ และทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น

2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก

องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุปอซโซลานคือ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะเข้าทำปฏิกิริยากับต่างคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ ทำให้มีความทึบแน่นมากขึ้น และอัตราการดูดซึมน้ำลดลงตามไปด้วย [4] เถ้าหนักมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2)

2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

วัลลภ และคณะ [16] ศึกษาความต้านทานคาร์บอนชัน กำลังอัด และความพรุนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าหนัก ใช้เถ้าหนัก 3 ขนาดในการศึกษานี้ คือ เถ้าหนักหยาบ เถ้าหนักละเอียดปานกลาง และเถ้าหนักละเอียดมาก โดยใช้เถ้าหนักในการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในอัตราส่วนร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เถ้าหนักขนาดละเอียดสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้บางส่วน โดยให้กำลังอัดสูงและความพรุนต่ำ โดยสามารถใช้ทดแทนในปริมาณร้อยละ 10-20 ต่อน้ำหนักวัสดุประสาน

Targan และคณะ [17] ได้ศึกษาผลของวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ โคลมาไนต์ เถ้าลอย และเถ้าหนัก ต่อสมบัติของซีเมนต์ และคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังอัด การทดสอบความแข็งแรงด้วยการตัด การขยายตัวเชิงปริมาตร และเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 เถ้าหนักร้อยละ 10 และโคลมาไนต์ร้อยละ 4 โดยการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน จากธรรมชาตินั้น จะอยู่ในช่วงร้อยละ 5-30 และจากการศึกษาระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์จะอยู่ในช่วงปกติ ในการนำวัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์จะทำให้เร่งการแข็งตัว ส่วนผลการทดสอบกำลังอัด อัตราส่วนการแทนที่ที่ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

Singha และ Siddiqueb [18] ได้ประเมินศักยภาพของเถ้าหนักในการใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต เพื่อความประหยัดและอนุรักษ์ธรรมชาติ โดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้าหนักทดแทนทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าหนักมีความแข็งแรงและทนต่อการรับแรงอัดได้ดี และสามารถต้านทานคลอไรด์ไอออนหรือซัลเฟตได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าหนัก จากผลการศึกษาทดลองโดยการแช่คอนกรีตไว้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10% ที่ระยะเวลาในการบ่ม 180 วัน

García [19] และคณะได้คำนึงถึงการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะนำเอาเถ้าลอยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้ที่ยอมรับกันโดยทั่วไป เพราะหึ่งเพิ่มคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงและความทนทาน ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำเถ้าหนัก มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์โดยเตรียมชิ้นงานเป็นมอร์ตาร์ และทำการทดสอบกำลังอัดที่ 80 วัน จากการทดลองพบว่าเกิดการสูญเสียกำลังอัดเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ควบคุมถึง 12% ในระยะเวลา 1 ปี

นอกจากนี้ยังมีหลาย ๆ งานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลาน โดย Yazici [20] พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอย และตะกรันเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ล้วน ในปี 2010 Chaipanich [21] ได้พบว่าการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นได้ช้ามากในช่วงต้น จึง

ได้เติมซิลิกาฟุ่มเข้าไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย โดยในงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าซิลิกาฟุ่มสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยได้จริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาก่อน 28 วัน นอกจากนี้ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยให้เร็วขึ้นอีกด้วย ในปี 2012 Wongkeo และคณะ [22] พบว่าการเติมซิลิกาฟุ่มเข้าไปในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ตาร์นั้น นอกจากนี้ Nochaiya [15] ยังพบว่านอกจากการเติมซิลิกาฟุ่มจะช่วยปรับปรุงกำลังอัด และการก่อตัวระยะเริ่มต้นให้แก่ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแล้ว ซิลิกาฟุ่มยังทำให้โครงสร้างเนื้อของซีเมนต์มอร์ตาร์มีความแน่นตัวสูง โดยเข้าไปอุดช่องว่างของมอร์ตาร์

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้งานเถ้าหนักในงานคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพก็ยังมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งมีมาตรฐานในการควบคุมสำหรับการนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการใช้เถ้าหนักเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตแบบยั่งยืน โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ความทนทาน และการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก

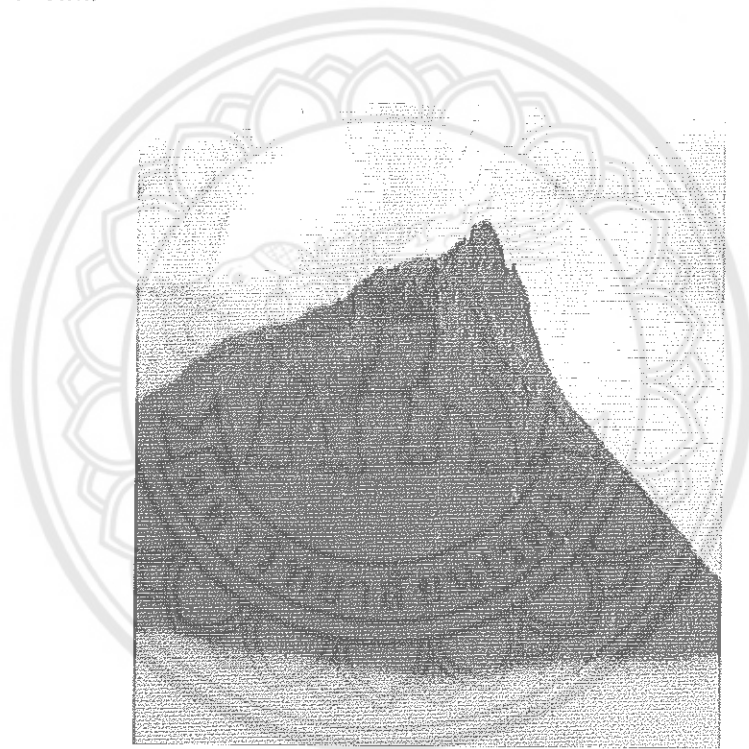


บทที่ 3

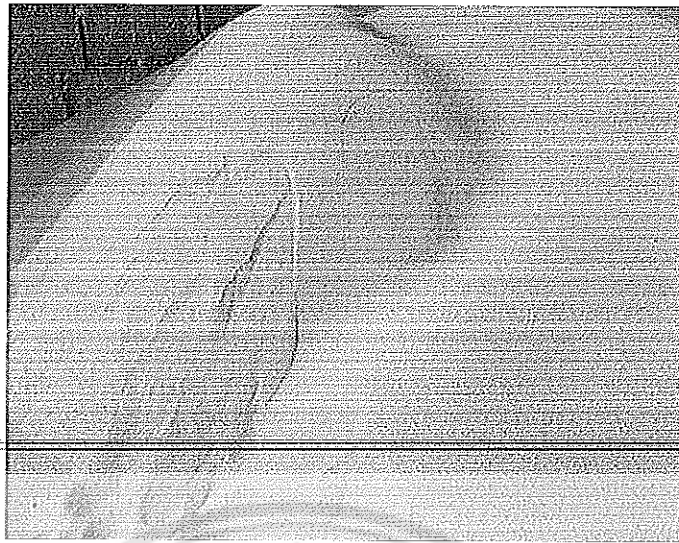
วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เล้าหนัก (ภาพที่ 3.1)
- 3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- 3.1.3 ทราย (ภาพที่ 3.2)
- 3.1.4 น้ำ (ภาพที่ 3.3)
- 3.1.5 แคลเซียมไฮดรอกไซด์
- 3.1.6 อะซีโตน



ภาพที่ 3.1 เล้าหนัก



ภาพที่ 3.2 ทราย

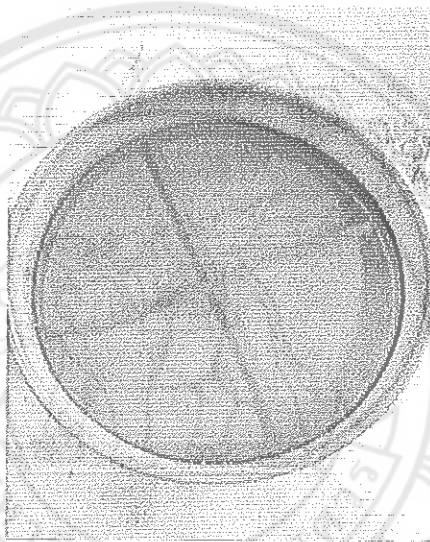


ภาพที่ 3.3 น้ำ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม
- 3.2.2 ตะแกรงลวด (ภาพที่ 3.4)
- 3.2.3 ขวดปากกว้าง (ภาพที่ 3.5)
- 3.2.4 เครื่องบดสาร (ภาพที่ 3.6)
- 3.2.5 ฟรอยด์ (ภาพที่ 3.7)

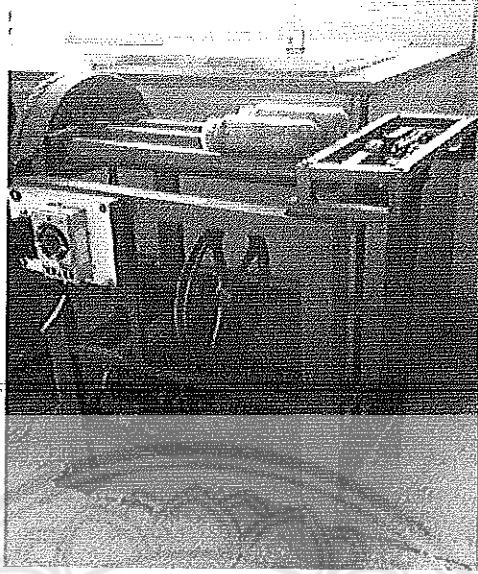
- 3.2.6 ภาชนะสำหรับดวงซีเมนต์ ทราय และน้ำ
- 3.2.7 เครื่องผสมปูน (ภาพที่ 3.8)
- 3.2.8 ถูม็อยาง และแมสปิดจุ่มก (ภาพที่ 3.9)
- 3.2.9 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ (ภาพที่ 3.10)
- 3.2.10 เครื่องเหล็กโป้ว (ภาพที่ 3.11)
- 3.2.11 แท่งกระทู้ง (ภาพที่ 3.12)
- 3.2.12 พลาตีกหุ้มอาหาร และปากกา permanent
- 3.2.13 ครงบดเซรามิก
- 3.2.14 ท่อพลาสติก
- 3.2.15 ดินน้ำมัน



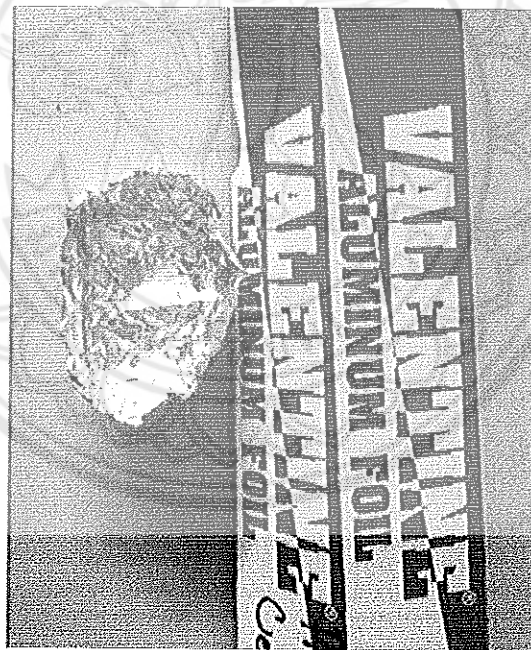
ภาพที่ 3.4 ตะแกรงลวด



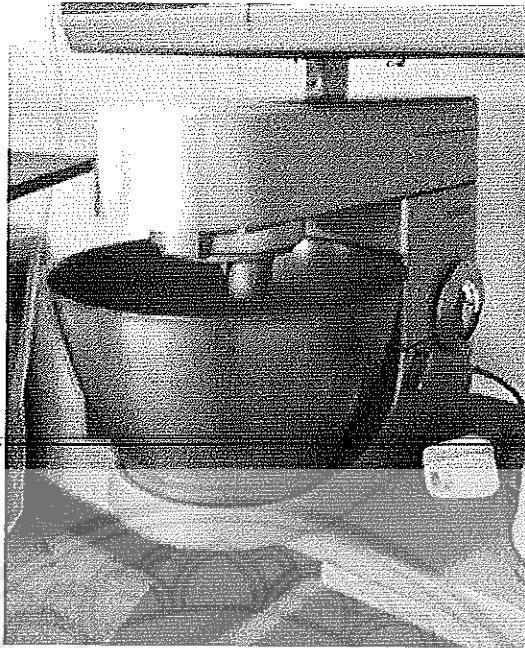
ภาพที่ 3.5 ขวดปากกว้าง



ภาพที่ 3.6 เครื่องบดสาร



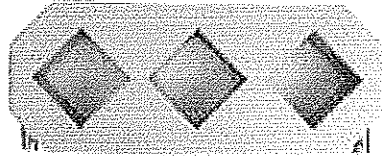
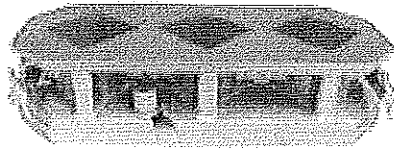
ภาพที่ 3.7 ฟรอยด์



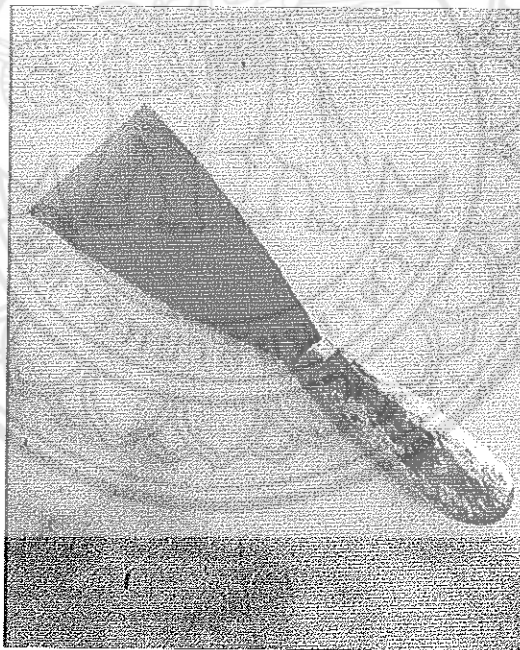
ภาพที่ 3.8 เครื่องผสมปูน



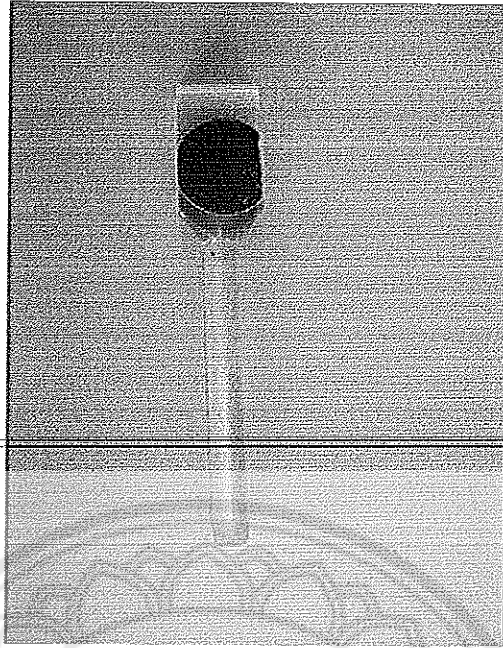
ภาพที่ 3.9 ถุงมือยาง และแมสปิดจมูก



ภาพที่ 3.10 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$



ภาพที่ 3.11 เครื่องเหล็กโป้ว



ภาพที่ 3.12 แท่งกระทุ้ง

3.3 การเตรียมวัสดุ

1. นำเข้าหนักมาร้อนด้วยตะแกรงลวด เพื่อคัดเอาเข้าหนักที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตรออก
2. ชั่งเข้าหนักที่ผ่านการร่อนแล้ว 100 กรัม ต่อเม็ดบดเซอร์โคเนีย 500 กรัม
3. นำสารตั้งต้นมาใส่ในขวดพลาสติกปากกว้างที่มีเม็ดบดเซอร์โคเนียบรรจุอยู่ แล้วนำไปวางบนเครื่องบดสารเพื่อบดย่อยผสมสารแบบ ball-milling ทำการบดย่อยผสมสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เมื่อบดย่อยเข้าหนักครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการแยกเม็ดบดออกจากผงเข้าหนักแล้วนำเข้าหนักที่ได้ไปทดแทนปูนซีเมนต์ในขั้นตอนต่อไป

3.4 การผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ และการเตรียมการทดสอบ

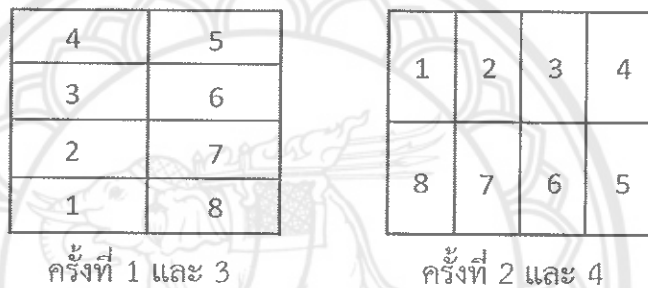
3.4.1 ขั้นตอนการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์

1. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ ให้สะอาดและแห้ง
2. เทน้ำที่เตรียมไว้ลงในอ่างผสม
3. เติมน้ำปูนซีเมนต์ลงไปใต้น้ำ และเดินเครื่องเกียร์ 1 (140 ± 5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
4. ในขณะที่เดินเครื่องผสมเกียร์ 1 ให้เติมทรายลงไปใต้น้ำอย่างผสมอย่างช้าๆให้หมด ภายในเวลา 30 วินาที
5. หยุดเครื่องผสม และเปลี่ยนอัตราความเร็วเป็นเกียร์ 2 (285 ± 10 รอบต่อนาที) แล้วเดินเครื่องผสมต่อไปอีก 30 วินาที

6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 1:30 นาที แล้วให้รีบชุบปูนมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ข้างๆอ่างผสมให้เสร็จ ภายในเวลา 15 วินาที แล้วใช้ฝ่าปิดอ่างผสมเดินเครื่องผสมต่อไปอีก 1 นาที ด้วยอัตราความเร็วเป็นเกียร์ 2 (285 ± 10 รอบต่อนาที) เป็นอันเสร็จการผสม

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. ผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ตามสูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1
2. นำปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มาหล่อในแบบหล่อขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ ที่สะอาดและทาน้ำมันบางๆไว้เรียบร้อยแล้ว (สาเหตุที่ทาน้ำมันเพื่อทำให้เวลาแกะปูนออกจากแบบเป็นไปได้อย่างสะดวก)
3. เอาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ใส่ในช่องแบบหล่อหนาประมาณ 1 ใน 3 ของแบบหล่อ กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งช่องละ 32 ครั้ง ภายใน 10 วินาที โดยกระทุ้งเป็น 4 รอบ แต่แต่ละครั้งกระทุ้งให้ตั้งฉากให้ทั่วแบบหล่อ ดังรูป 3.13



ภาพที่ 3.13 ลักษณะการกระทุ้งมอร์ตาร์

4. ใส่มอร์ตาร์ในช่องแบบหล่ออีก 2 ใน 3 แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับขั้นแรก
5. ใส่มอร์ตาร์ที่เหลือในช่องแบบหล่อให้สูงกว่าขอบ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกัน เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์ควรสูงกว่าขอบเล็กน้อย
6. ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ให้มีผิวหน้าที่เรียบ วิธีปาดควรเอียงเกรียงเล็กน้อยและค่อยๆปาดจะทำให้ผิวเรียบเร็วขึ้น และใช้เกรียงปาดเบาๆอีก 1 ครั้งตลอดความยาวของแบบหล่อ โดยใช้ขอบเกรียงวางทำมุมเล็กน้อยแล้วขยับเกรียงไปมาตลอดความยาวของแบบหล่อ
7. หลังจากหล่อแบบเรียบร้อยแล้วให้คลุมด้วยพลาสติกหุ้มอาหารคลุมไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบ และนำชิ้นงานมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำสะอาดที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 90 วัน นำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Compressive strength tester

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) กับเถ้าหนัก (BA)

ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่		สารเติมแต่ง
	PC	BA	
PC	100	-	-
10BA	90	10	-
10BA2.5CH	90	10	2.5
10BA5CH	90	10	5
20BA	80	20	-
20BA5CH	80	20	5
20BA10CH	80	20	10
30BA	70	30	-
30BA5CH	70	30	5
30BA10CH	70	30	10

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.5, ทรายต่อวัสดุประสาน = 2.5

3.5 การผสมซีเมนต์เพสต์ และการเตรียมการทดสอบ

1. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ ที่สะอาดและแห้งเหน้าที่เตรียมไว้ลงในภาชนะที่ใช้ผสมเติมส่วนผสมลงไป
ในน้ำ ค่อยๆคนซีเมนต์เพสต์ให้เข้ากันอย่างช้าๆเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นให้คนซีเมนต์เพสต์ให้
เร็วขึ้นคนต่อไปอีก 30 วินาที
2. หยุดคนเป็นเวลา 1:30 นาที แล้วให้รับชุดซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ข้างๆภาชนะผสมให้เสร็จภายใน
เวลา 15 วินาที แล้วใช้ฝาปิด จากนั้นคนต่อไปอีก 1 นาที ด้วยอัตราความเร็วพอเหมาะเป็นอัน
เสร็จการผสม
3. เตรียมแบบหล่อเพสต์ที่ทำจากท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5 cm และสูง
ประมาณ 3.5 cm ซึ่งวางยึดกับพื้นไว้ด้วยดินน้ำมัน
4. จากนั้นนำเพสต์ที่ผสมแล้วเทลงในแบบหล่อ ใช้พลาสติกหุ้มอาหารคลุมไว้ 24 ชั่วโมง แล้วถอดเพสต์
ออกจากแบบหล่อ จากนั้นนำไปบ่มในน้ำสะอาดที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน
5. เมื่อครบระยะเวลาที่บ่มในน้ำให้นำเพสต์มาแช่อะซิโตนเพื่อหยุดการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
จากนั้นนำออกจากอะซิโตนและนำไปอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. ทำการกะเทาะชิ้นงานเลือกชิ้นที่เป็นระนาบเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง SEM
8. ทำการบดชิ้นงานที่เหลือด้วยครกเซรามิกให้ละเอียดเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย
เครื่อง XRD

๖ TP
8x2
.3
ทท55
2560

1024078



สำนักพิมพ์

๗ ๗ ๗ ๗ ๗

3.6 วิธีการทดสอบ

3.6.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยใช้มอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด โดยใช้ระยะเวลาการบ่มที่ 7, 14, 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดดังกล่าว ชิ้นงานมอร์ตาร์ จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 [8] โดยเครื่อง compressive strength tester และใช้แรงในการกด (dF/dT) อยู่ในช่วง 0.9-1.8 KN/s (ในงานวิจัยนี้ใช้แรงในการกด = 1.2 KN/s) ในการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ในแต่ละสูตรจะใช้มอร์ตาร์จำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำกำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับซีเมนต์ควบคุม (สูตรที่ใช้ PC 100%)

การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์มอร์ตาร์หาได้จากสมการ (3.1)

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่

f_c = กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย มีหน่วยเป็น กก/ตร.ซม. หรือ ปอนด์/ตร.นิ้ว

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น กก. หรือ ปอนด์

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตร.ซม. หรือ ตร.นิ้ว

3.6.2 ทางกายภาพของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

การทดสอบหาความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 642-06 [9] โดยจะใช้มอร์ตาร์ชิ้นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสัดส่วนละ 3 ก้อนตัวอย่าง ซึ่งหลังจากที่ทดสอบกำลังอัดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นส่วนมอร์ตาร์ที่เหลือมาตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่ามอร์ตาร์นั้นแห้งสนิท นำมาชั่งน้ำหนัก (มวลแห้ง) และจดบันทึก (A) จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วนำไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และจึงทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ (มวลเปียก) และจดบันทึก (C) จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ชั่งน้ำหนักในน้ำแล้ว นำขึ้นมาชั่งน้ำ และชั่งน้ำหนัก (มวลหมาด) และจดบันทึก (B) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความพรุน ดังสมการ (3.2) – (3.4) ตามลำดับ

- การดูดซึมน้ำหลังจากการบ่ม

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \left| \frac{(B-A)}{A} \right| \times 100 \quad (3.2)$$

- ความหนาแน่นปรากฏ

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm}^3\text{)} = \left| \frac{A}{(A-C)} \right| \times \rho \quad (3.3)$$

• ความพรุน

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{|(B-A)|}{|(B-C)|} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่

A = มวลแห้งซึ่งในอากาศ (g)

B = มวลหมาดที่ผ่านการแช่น้ำ (g)

C = มวลซึ่งในน้ำ (g)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm³)

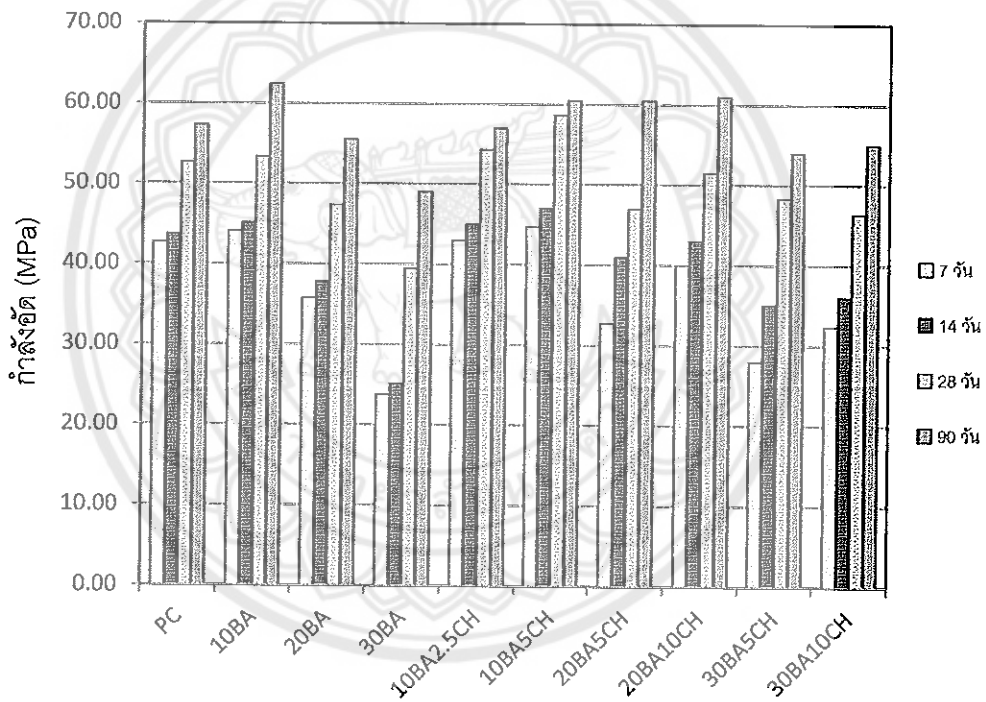


บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ในการทดลองได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยใช้เถ้าหนักทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, และ 30 และเติมสารเติมแต่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดเฉลี่ยจากตัวอย่างชิ้นงานละ 3 ก้อน ของตัวอย่างเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ดังแสดงในรูปที่ 4-1 พบว่าในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม



ภาพที่ 4.1 กำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก (BA) ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ 10-30%

ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วันจะเห็นว่าค่ากำลังอัดจะมีค่าน้อยกว่า 90 วัน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าหนักเกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นสารยึดประสาน และเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์ [10] โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดค่อนข้างสูงที่

ระยะเวลาบ่ม 90 วัน และมอร์ตาร์ที่ใส่สารเติมแต่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานไปพร้อมกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาบ่มที่ 90 วัน ของสูตร 10BA ที่มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม อีกทั้งสูตร 10BA ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในทุกๆ ระยะเวลา ดังตารางที่ 4.1

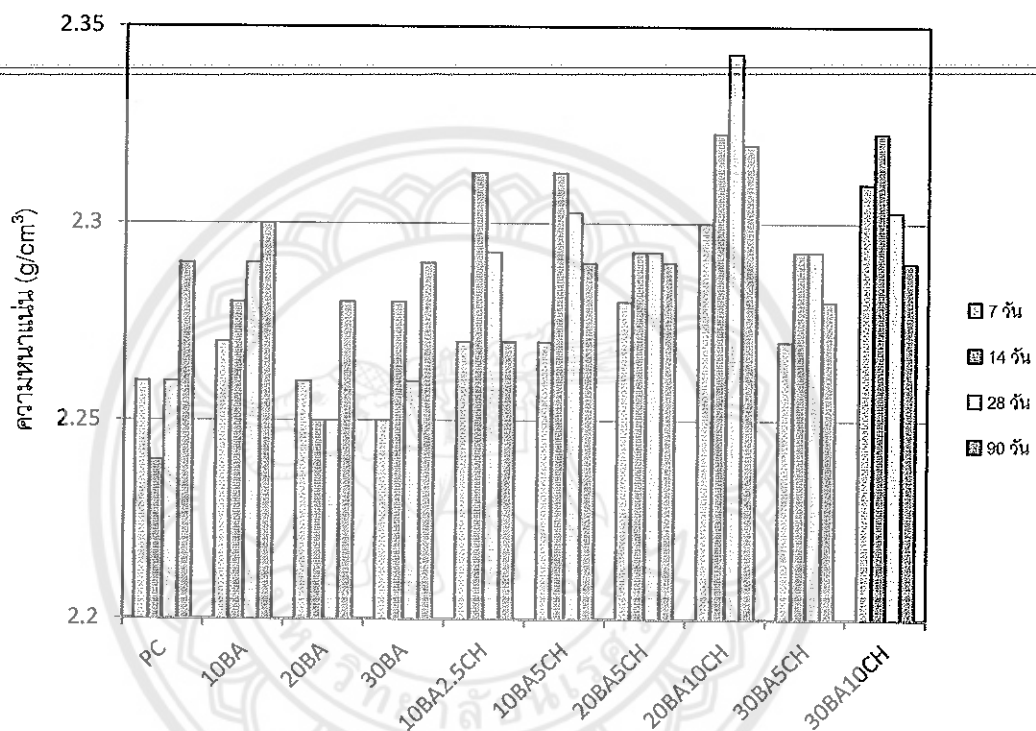
ตารางที่ 4.1 กำลังอัดสัมพัทธ์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน เทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

สูตร	กำลังอัดสัมพัทธ์ (%)			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
PC	100	100	100	100
10BA	103	104	101	109
10BA2.5CH	101	103	103	99
10BA5CH	105	108	111	106
20BA	84	87	94	97
20BA5CH	77	94	89	106
20BA10CH	94	98	98	106
30BA	55	58	75	86
30BA5CH	66	80	92	94
30BA10CH	76	82	88	96

ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าหนักที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนในอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าหนักหากเพิ่มปริมาณการแทนที่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง ดังนั้น อัตราส่วนที่เหมาะสมคือการแทนที่เถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 คือสูตร 10BA แต่หากคำนึงถึงสูตร 10BA5CH จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่า 10BA ในทุกๆ ระยะเวลาการบ่มเนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาสูตร 20BA จะเห็นว่าทุกระยะเวลาการบ่มจะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่อยู่ในช่วงที่ไม่ต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถนำไปใช้งานได้

4.2 ความหนาแน่น

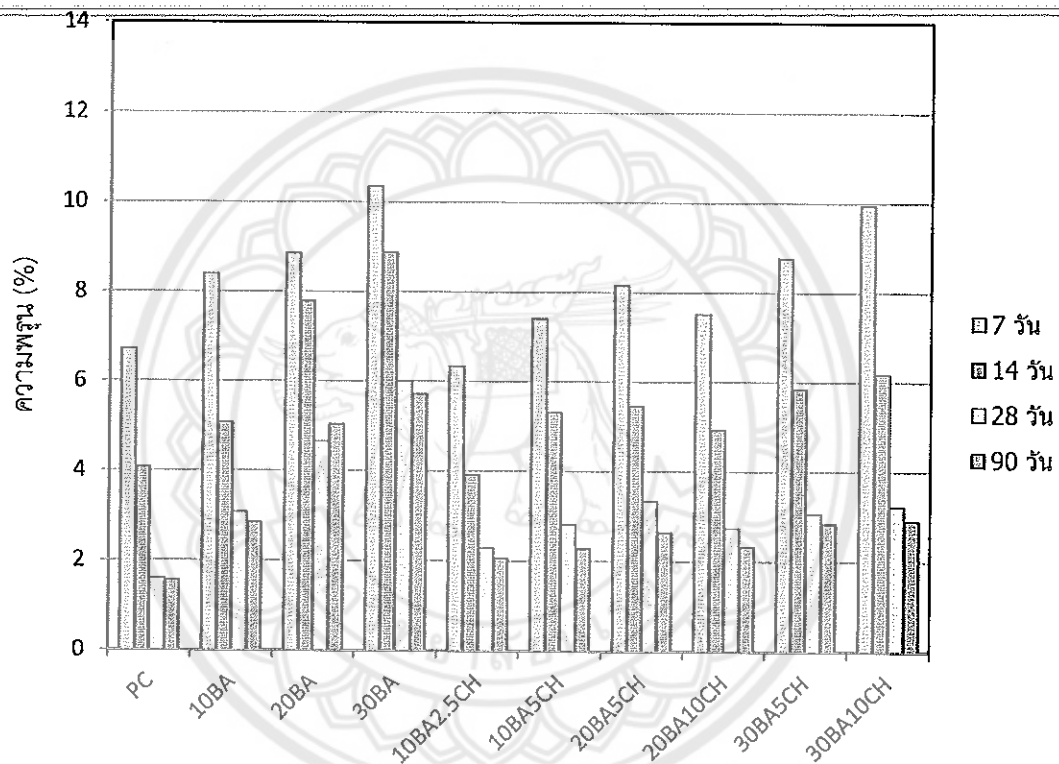
จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่าความหนาแน่นของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในทุกๆระยะเวลาการบ่ม จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม คืออยู่ในช่วง $2.24 - 2.30 \text{ g/cm}^3$ ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะเท่ากับ 3.15 g/cm^3 (แคลเซียมซิลิเกต) แต่เมื่อมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกแล้วจะเกิดเป็นเฟส (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) ที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $2.3 - 2.6 \text{ g/cm}^3$ [10]



ภาพที่ 4.2 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดด้วยเม็ดบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.3 ความพรุน

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความพรุนของชิ้นงานมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [9] พบว่าค่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก ณ ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14, 28 และ 90 วัน ความพรุนจะลดลง โดยความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักจะมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากในตัวของเถ้าหนักเองมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน เมื่อทำการผสมเข้าไปในมอร์ตาร์จึงทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้น อีกทั้งที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน การทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าหนักยังเกิดขึ้นได้น้อย

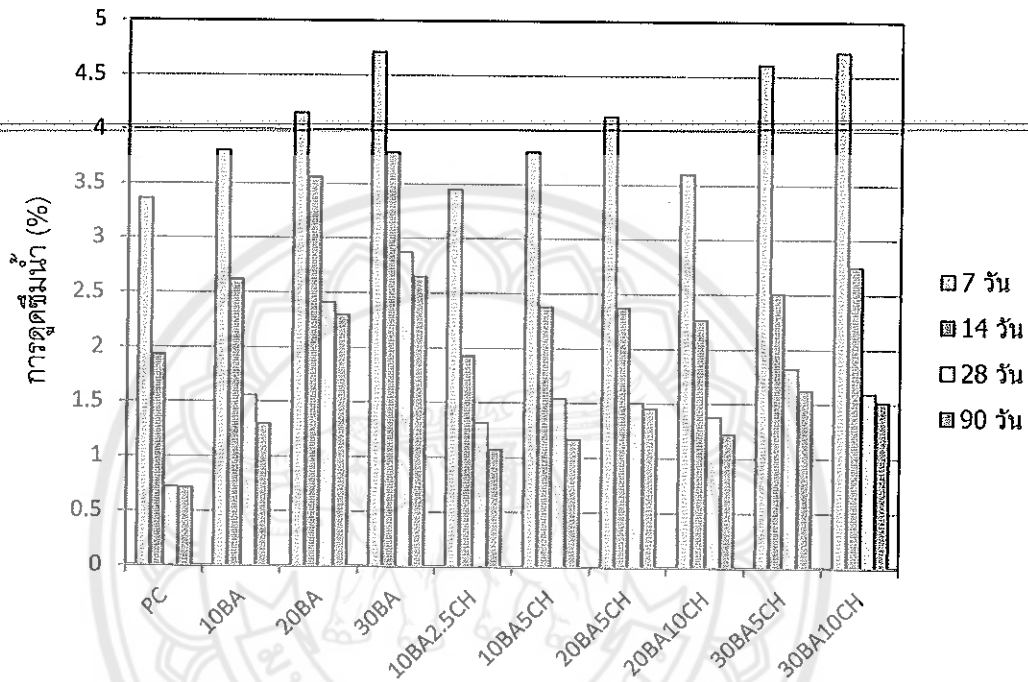


ภาพที่ 4.3 ความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดด้วยเม็คบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน พบว่าค่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก มีค่าต่ำกว่า 7 วัน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และเถ้าหนักจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าหนัก จะเห็นว่าเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าหนักในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวเถ้าหนักเองมีปริมาณความพรุนสูง ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูง เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าหนักในปริมาณมาก และความพรุนจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน และ 28 วัน เนื่องจากเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าหนัก และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปอุดบริเวณรูพรุน จึงทำให้ความพรุนลดลง

4.4 การดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [9] พบว่า การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักจะมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่การบ่ม 7 วัน จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูง และจะลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนักจะทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น

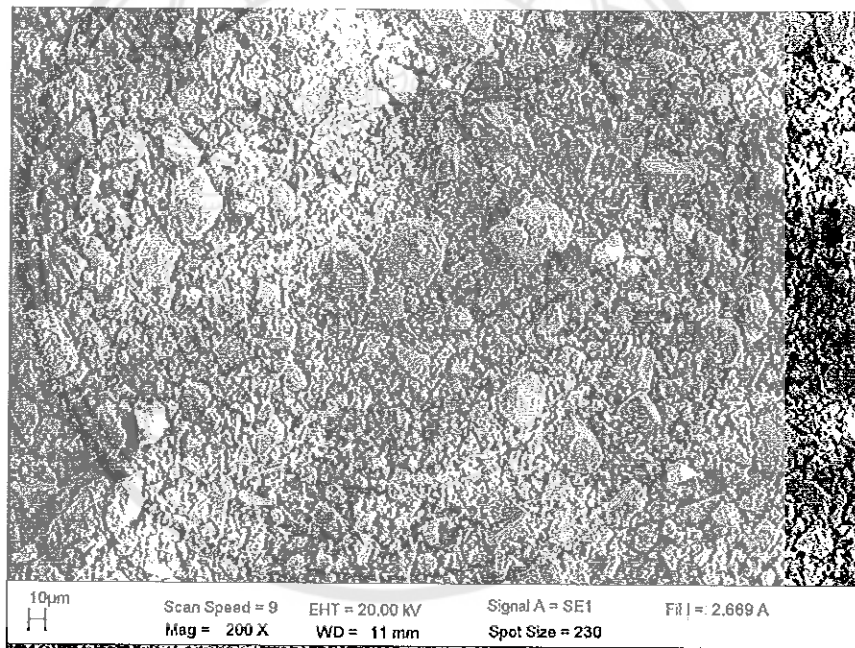


ภาพที่ 4.4 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่ผ่านการบดด้วยเม็ดบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

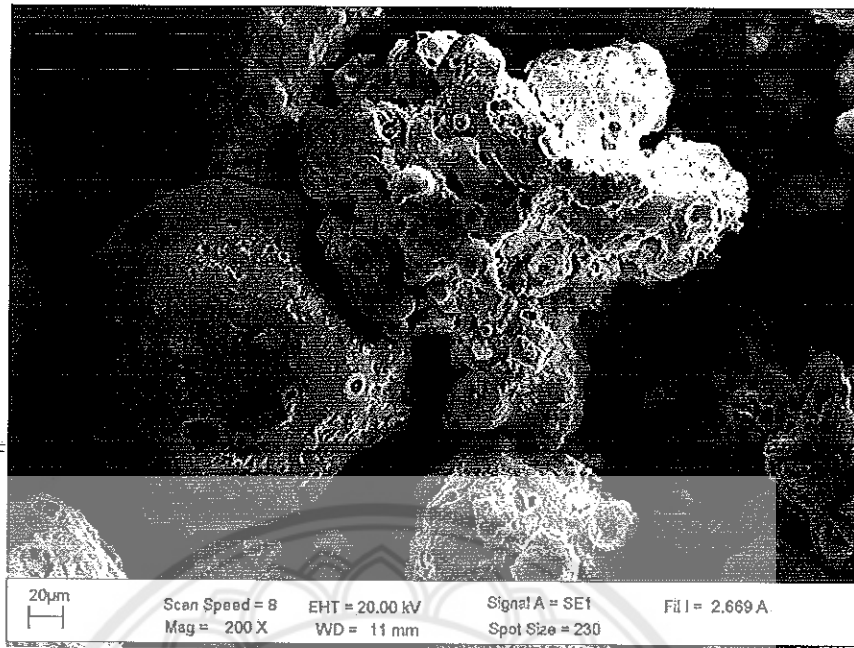
ปัจจัยเหตุที่ทำให้เป็นเช่นนี้เนื่องจากในตัวของเถ้าหนักเองมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนสูง เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้น อีกทั้งที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน การทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าหนักยังเกิดขึ้นได้น้อย จะเห็นว่าทิศทางของผลการทดสอบการดูดซึมน้ำจะแปรผันตรงกับความพรุน เนื่องจากเมื่อมีความพรุนมากจะทำให้มอร์ตาร์ดูดซึมน้ำได้มากเพราะน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน

4.5 โครงสร้างทางจุลภาค

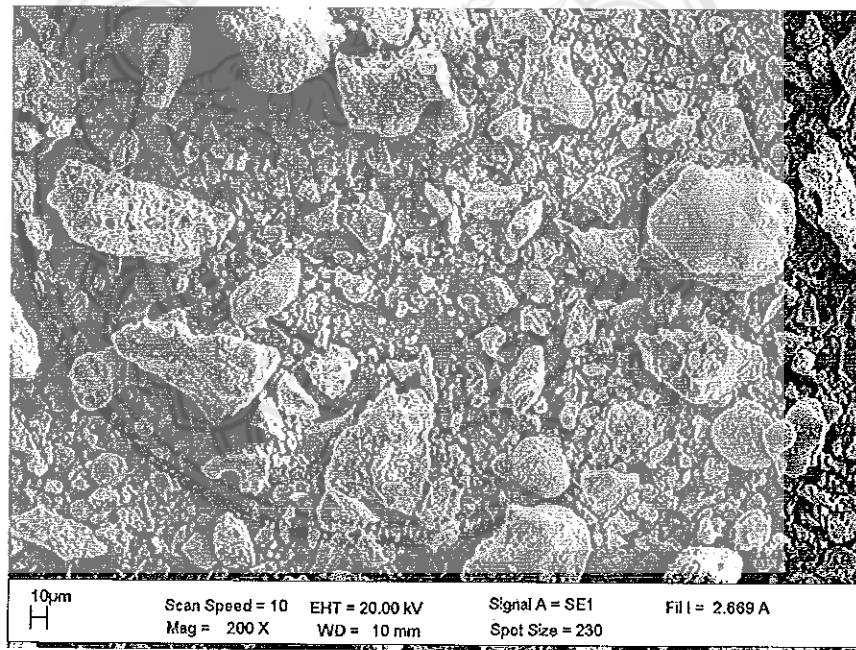
จากภาพที่ 4.5a เป็นภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (PC) จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของ PC จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม มีขนาดประมาณ 5-10 μm มีความหนาแน่นในโครงสร้างสูง เมื่อเทียบกับเม็ดหนักในภาพที่ 4.5b เป็นภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดหนักที่ยังไม่ผ่านกระบวนการบด จะเห็นว่าอนุภาคของเม็ดหนักมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม มีขนาดใหญ่มาก และมีความเป็นรูพรุนสูง ก่อนที่จะนำมาใช้งานต้องนำไปบดก่อนดังภาพที่ 4.5c เป็นภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดหนักที่ผ่านการบดที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (BA) จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของเม็ดหนักมีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับ PC แต่ก็ยังคงมีรูพรุนอยู่ ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นที่ลดลง ความพรุนและการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น และมีผลให้ค่ากำลังอัดลดลงด้วย แต่ทั้งนี้หากนำเม็ดหนักมาแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ค่ากำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้น



(a)

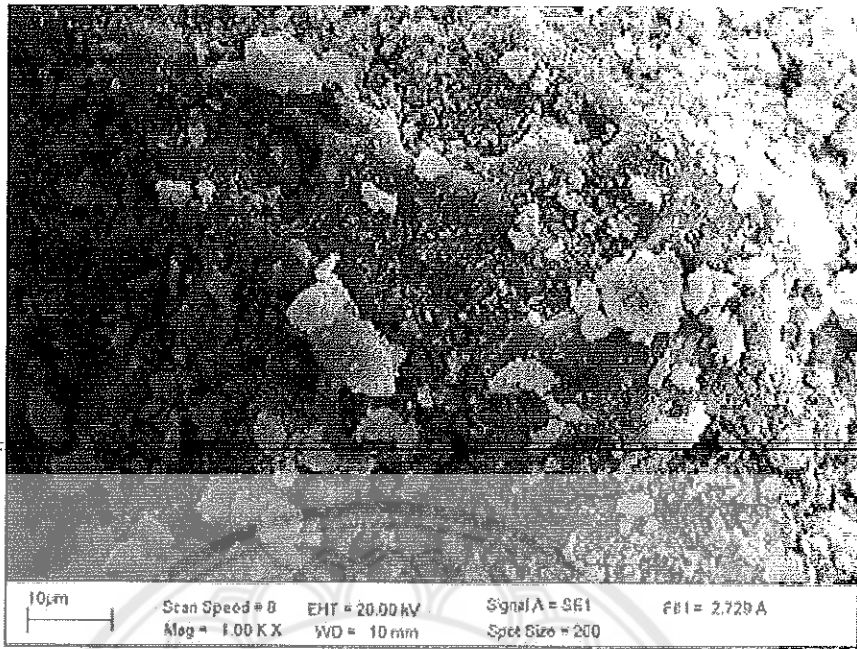


(b)

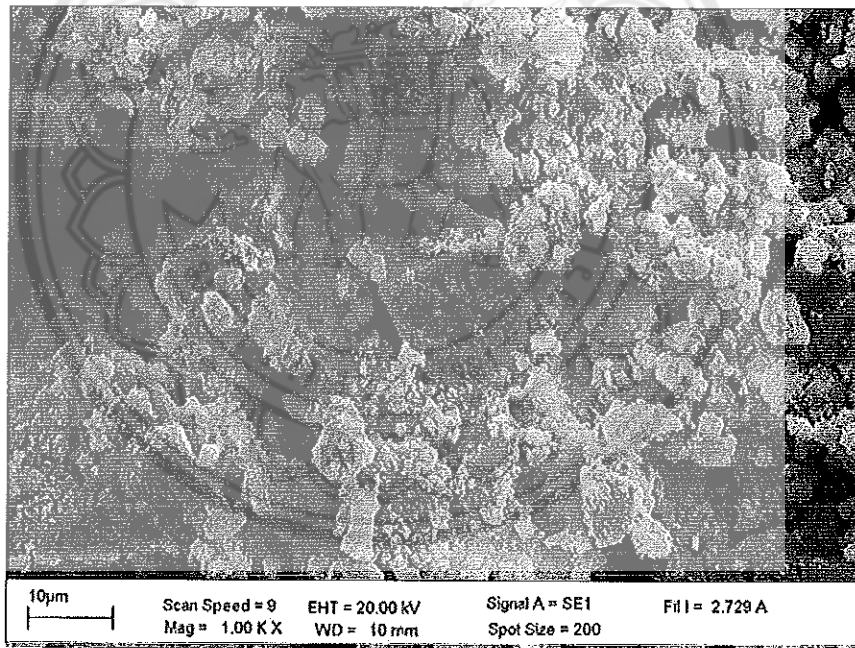


(c)

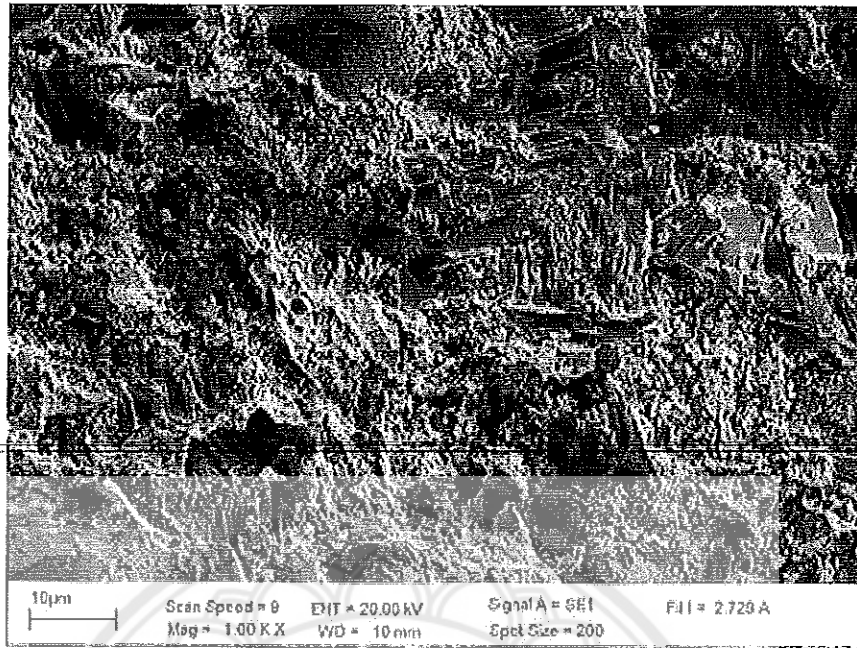
ภาพที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาค (a) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (PC), (b) ใ้หนักที่ยังไม่ผ่านการบด และ (c) ใ้หนักที่ผ่านการบดแล้ว ที่ 24 ชั่วโมง (BA)



(a)



(b)



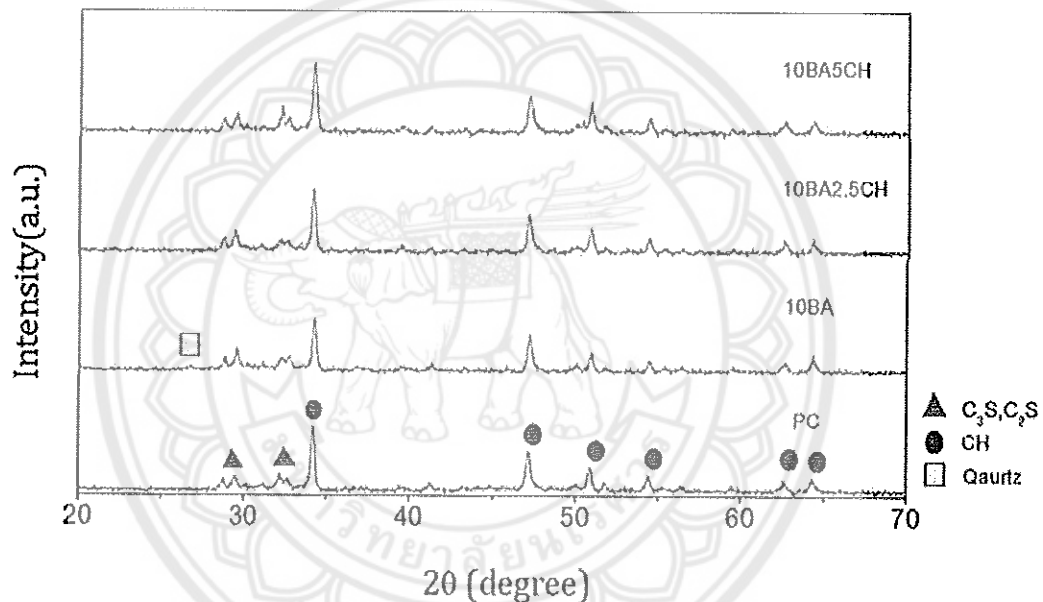
(c)

ภาพที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์ ที่อายุในการบ่ม 7 วันของ (a) PC, (b) 10BA และ (c) 10BA5CH

จากภาพที่ 4.6 แสดงการทำปฏิกิริยาของเพสต์ ซึ่งจะเห็นว่า จากภาพที่ 4.6a โครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์ ของ PC มีการทำปฏิกิริยาที่แน่นทึบ ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นมาก และมีค่ากำลังอัดสูง ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง พิจารณาภาพที่ 4.6b โครงสร้างทางจุลภาคของ 10BA และภาพที่ 4.6c โครงสร้างทางจุลภาคของ 10BA5CH จะเห็นว่า 10BA5CH มีการทำปฏิกิริยาที่แน่นทึบกว่า 10BA ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะเกิดเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แคลเซียมซิลิเกตจะทำหน้าที่เป็นเฟสยึดประสาน แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นแคลเซียมซิลิเกตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งจะได้เป็นเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานทำให้ปูนซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นและมีค่ากำลังอัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดย 10BA5CH มีสารเติมแต่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาในเถ้าหนัก ไปพร้อมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้ 10BA5CH มีการทำปฏิกิริยามากกว่า 10BA ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดของ 10BA5CH สูงกว่า 10BA ในทุกระยะเวลาการบ่ม

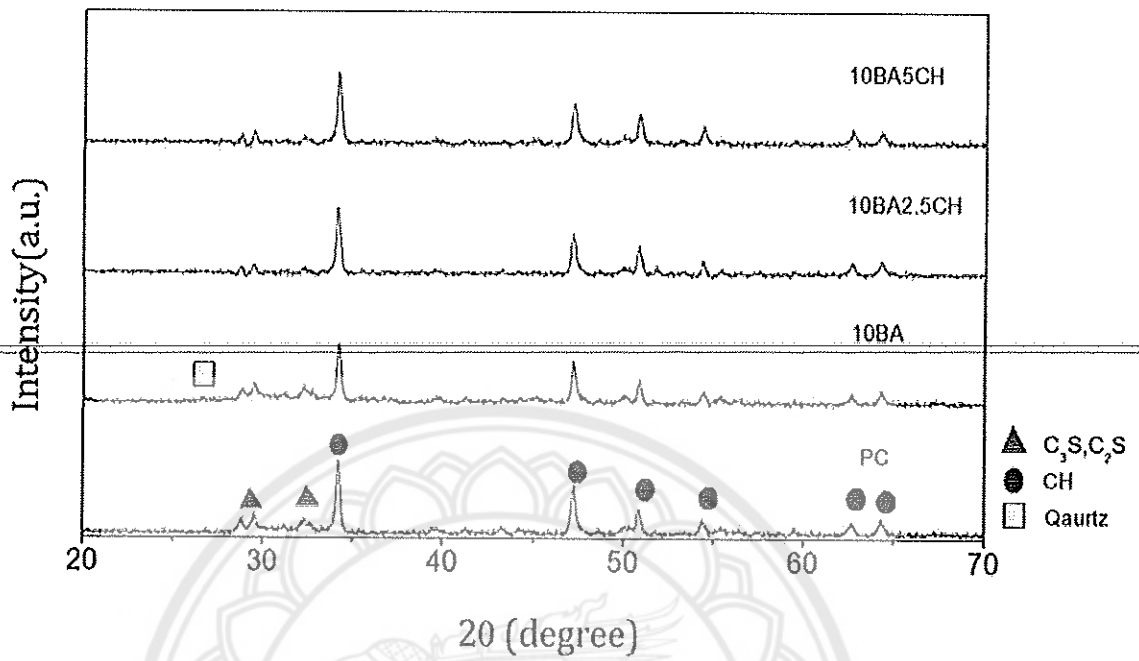
4.6 องค์ประกอบทางเคมี

จากภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ณ ระยะเวลาในการบ่มที่ 7 วันพบว่าพีคหลักจะสอดคล้องกับฟิสิกัลเคมีไฮดรอกไซด์ (CH) ตามฐานข้อมูล JCPDF no.04-0733 โดยความเข้มของฟิสิกัลเคมีไฮดรอกไซด์ของปูนเพสต์ทุกสัดส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกตของปูนซีเมนต์กับน้ำ [11] ในส่วนของเพสต์ที่ผสมเถ้าหนักจะเกิดฟิสิกัลเคมีของซิลิกอน (Quartz) ด้วย แต่ความสูงของฟิสิกัลเคมียังไม่ชัดเจนเนื่องจากผสมเถ้าหนักต่อปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักที่อัตราส่วนร้อยละ 10 เทียบกับ PC ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าหนักที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (ดังแสดงในภาพที่ 4.8) จะพบว่าปูนเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนปรากฏฟิสิกัลเคมีของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับฟิสิกัลเคมีของแคลเซียมซิลิเกต ส่วนในปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าหนักทุกสัดส่วนผสมจะพบฟิสิกัลเคมีของควอร์ซ แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าความสูงของฟิสิกัลเคมีไฮดรอกไซด์จะต่ำกว่าที่พบในปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เนื่องการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก [12] ของซิลิกาและอลูมินาในเถ้าหนักกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นเฟสยึดประสาน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) จากผลของ XRD ดังกล่าวจะสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักมีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 เทียบกับ PC ที่ระยะเวลาใน การบ่ม 28 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนัก สามารถสรุปได้ว่า เถ้าหนักที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบดด้วยเม็ดบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะช่วยให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้น จะเห็นว่า การใส่สารเติมแต่งด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยในการทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น เนื่องจากมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมทุกระยะเวลาในการบ่ม ทั้งสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสูตรที่ไม่ได้เติม ส่วนความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำมีค่าเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ควบคุม อย่างไรก็ตาม จากผลของค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุน จะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันและมีค่ามากกว่าชุดมอร์ตาร์ควบคุม ทุกระยะเวลาในการบ่ม



เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Cordeiro, R.D.T Filijp, E.M.R. Fairbairt and et al., In: *Proceedings of the International Conference on Use of Recycled Materials in Building and Structure*, Barcelona; 2004. p. 1-9.
- [2] รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 (2554) หน้า 369-381.
- [3] G.C. Carderio, R.D. Toledo Filho and E.M.R. Fairbairt, *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3301-3303.
- [4] E.V. Morales, E. Villar-Cocina and et al., *Cem. Concr. Compos.*, 31 (2009) 22-28.
- [5] ASTM C 618-08a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete1. American Society for Testing and Materials, Philadelphia; 2008.
- [6] บรรจง แสงแก้ว และคณะ, “การศึกษาความสามารถเทได้ และกำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์ลอยลิกไนต์”, รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.
- [7] N.B. Singh, V.D. Singh, and S. Rai, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 1485-1488.
- [8] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, and et al., *Cem. Concr. Compos.*, 30 (2008) 410-418.
- [9] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and et al., *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3523-3531.
- [10] T. Akram, S.A. Memon, H. Obaid, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 703-712.
- [11] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho and et al., *Constr. Buil. Mater.*, 29 (2012) 641-646.
- [12] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin, *Concrete; 2nd Edition*, Prentice Hall (2002).
- [13] H. Yazici, H. Yigiter, A.S. Karabulut and B. Baradan, *Fuel* 87 (2008) 2401-2407.
- [14] A. Chaipanich, T. Nochaiya, *J Therm. Anal. Calorim.* 99 (2010) 487-493.
- [15] A. Chaipanich, T. Nochaiya, W. Wongkeo and P. Torkittikul, *Mater. Sci. Eng. A* 527 (2010) 1063-1067.
- [16] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การใช้งานเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุป้อนโซลันในงานคอนกรีต, *วารสารคอนกรีต*, ฉบับที่ 16 ประจำเดือนสิงหาคม (2555) หน้า 1-7.
- [17] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, กองอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550, สรุปสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศประจำปีการผลิต 2549/50, เล่มที่2, หน้า 1-3
- [18] V.M. Malhotra and P.K. Mehta, *Pozzolanic and cementitious materials*, Gordon and Breach Publishers, Netherlands, 1996
- [19] สันติ รุจิธนพานิช, “การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตบดอัดที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสม”, รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- [20] A. Sales, S.A. Lima, *Waste Management* 30 (2010) 1114-1122.
- [21] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn and A. Chaipanich, *Mater. Design* 36 (2012) 655-662.
- [22] T. Nochaiya, W. Wongkeo and A. Chaipanich, *Fuel* 89 (2010) 768-774.
- [23] Nattawong Phosuphanan, Savanee Vanaleesin, Phongthorn Julphunthong and Thanongsak Nochaiya, *Effect of Calcinations Temperature on Pozzolanicity of Sugarcane Bagasse Ash*, Proceedings The 6th National Science Research Conference,(20-21 March 2014), Burapha University, pp. 205-210.

ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหนักเพื่อใช้งานในทางวิศวกรรมก่อสร้างได้ โดยได้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังต่อไปนี้

1. นำเสนอแบบปากเปล่า ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ “The 3rd International Congress on Advanced Materials (AM 2016) ” วันที่ 27 - 30 พฤศจิกายน 2559 ณ โรงแรม Centara grand at Central Plaza Ladprao จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย. เรื่อง “Setting time and microstructure of Portland Cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes”

ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ จำนวน 1 เรื่อง ได้แก่

1. Aniruj Akkarapongtrakul, Phongthorn Julphunthong, Thanongsak Nochaiya*, “Setting time and microstructure of Portland Cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes”, Chemical monthly, DOI: 10.1007/s00706-017-1953-5, (accepted).





Decision on your manuscript #MCCM-D-16-00855R1

em.mccm.0.51a836.405de423@editorialmanager.com ในนามของ

Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly (MCCM) <em@editorialmanager.com>

จ. 6/3/2017 4:48

ผ.จ. THANONGSAK NOCHAIYA <thanongsakno@nu.ac.th>;

Ref: Ms. No. MCCM-D-16-00855R1

Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes

Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly

Dear Dr. Nochaiya,

I am pleased to tell you that your work has now been accepted for publication in Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly.

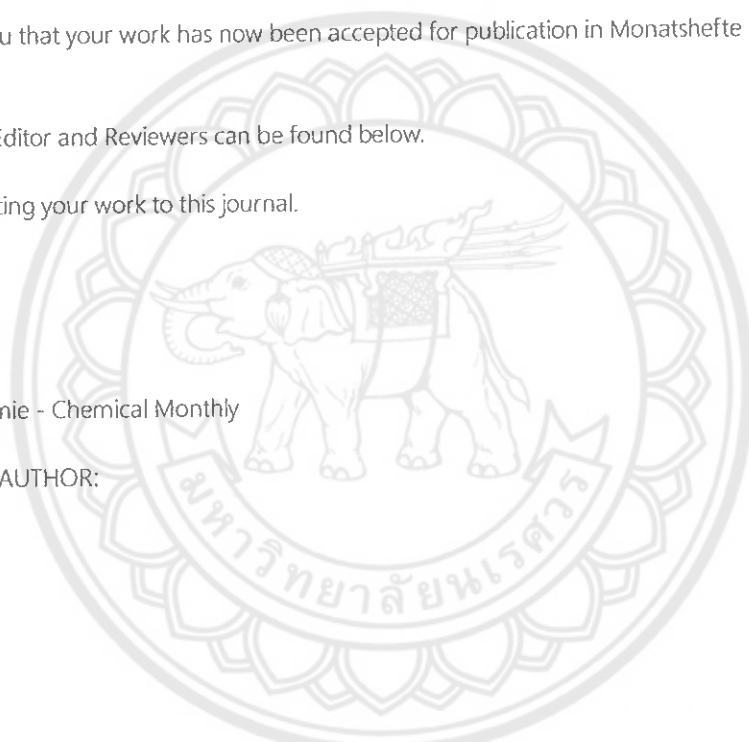
Comments from the Editor and Reviewers can be found below.

Thank you for submitting your work to this journal.

With kind regards

Prof. Peter Gärtner
Editor-in-Chief
Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly

COMMENTS TO THE AUTHOR:

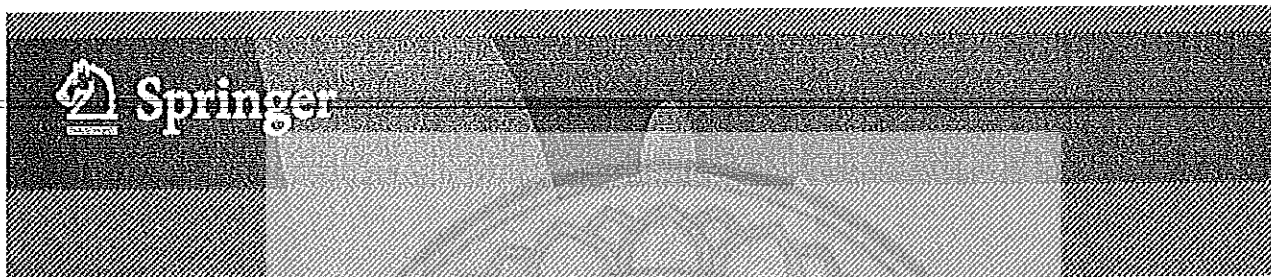


Copyright Transfer Statement (CTS) for your article in Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly (1953)

Springer

Fr, 8/3/2017 13:23

THANONGSAK NOCHAIYA <thanongsakno@nu.ac.th>;



Copyright Transfer

08.03.2017

visit us at springer.com

Confirmation of your Copyright Transfer

Dear Author,

Please note: This e-mail is a confirmation of your copyright transfer and was sent to you only for your own records.

The copyright to this article, including any graphic elements therein (e.g. illustrations, charts, moving images), is hereby assigned for good and valuable consideration to Springer-Verlag Wien effective if and when the article is accepted for publication and to the extent assignable if assignability is restricted for by applicable law or regulations (e.g. for U.S. government or crown employees). Author warrants (i) that he/she is the sole owner or has been authorized by any additional copyright owner to assign the right, (ii) that the article does not infringe any third party rights and no license from or payments to a third party is required to publish the article and (iii) that the article has not been previously published or licensed.

The copyright assignment includes without limitation the exclusive, assignable and sublicensable right, unlimited in time and territory, to reproduce, publish, distribute, transmit, make available and store the article, including abstracts thereof, in all forms of media of expression now known or developed in the future, including pre- and reprints, translations, photographic reproductions and microform. Springer may use the article in whole or in part in electronic form, such as use in databases or data networks for display, print or download to stationary or portable devices. This includes interactive and multimedia use and the right to alter the article to the extent necessary for such use.

Authors may self-archive the Author's accepted manuscript of their articles on their own websites. Authors may also deposit this version of the article in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later. He/she may not use the publisher's version (the final article), which is posted on SpringerLink and other Springer websites, for the purpose of self-archiving or deposit. Furthermore, the Author may only post his/her version

provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be provided by inserting the DOI number of the article in the following sentence: "The final publication is available at Springer via [http://dx.doi.org/\[insert DOI\]](http://dx.doi.org/[insert DOI])".

Prior versions of the article published on non-commercial pre-print servers like arXiv.org can remain on these servers and/or can be updated with Author's accepted version. The final published version (in pdf or html/xml format) cannot be used for this purpose. Acknowledgement needs to be given to the final publication and a link must be inserted to the published article on Springer's website, by inserting the DOI number of the article in the following sentence: "The final publication is available at Springer via [http://dx.doi.org/\[insert DOI\]](http://dx.doi.org/[insert DOI])". Author retains the right to use his/her article for his/her further scientific career by including the final published journal article in other publications such as dissertations and postdoctoral qualifications provided acknowledgement is given to the original source of publication.

Articles disseminated via <http://link.springer.com> are indexed, abstracted and referenced by many abstracting and information services, bibliographic networks, subscription agencies, library networks, and consortia.

After submission of the agreement signed by the corresponding author, changes of authorship or in the order of the authors listed will not be accepted by Springer.

This is an automated e-mail; please do not reply to this account. If you have any questions, please go to our [help pages](#).

Thank you very much.

Kind regards,

Springer Author Services

Article Details

Journal title

Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly

DOI

10.1007/s00706-017-1953-5

Copyright transferred to

Springer-Verlag Wien

Article title

Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes

Corresponding Author

Thanongsak Nochaiya

Transferred on

Wed Mar 08 07:23:22 CET 2017

Service Contacts

Springer Customer Service Center

Tiergartenstr. 15-17
69121 Heidelberg
Germany
phone: +49 6221 345 0
fax: +49 6221 345 4229
customerservice@springer.com

Springer New York, LCC

233 Spring Street
New York, NY 10013
USA
phone: +1 212 460 1500 or 800-SPRINGER
(Weekdays 8:30am - 5:30pm ET)
fax: +1 212-460-1700
customerservice@springer.com

© Springer 2017, springer.com



Setting time and microstructure of Portland Cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes

Aniruj Akkarapongtrakul¹ • Phongthorn Julphunthong^{2, 3} • Thanongsak Nochaiya^{1,3}

Received:/Accepted ...

Abstract Bottom ash (BA) and sugarcane bagasse ash (SCBA) are by-products from the power plants and the sugar industry and they have a great potential to be used in green-concrete structure application. This study reports the effects of BA and SCBA as cement replacements up to 20 percent by weight, on the properties of Portland cement (PC) pastes and mortars. All mortars used had water to binder ratio (w/PC+BA, w/PC+SCBA and w/PC+BA+SCBA) of 0.5. Normal consistency, setting time, compressive strength and microstructure (using scanning electron microscope; SEM) were systematically investigated.

The results showed that the water requirement for normal consistency was decreased with increasing BA content, while the increment of SCBA content was found to increase. The initial and final setting times of all pozzolan mixes was longer when compared to that of PC mix. Moreover, the compressive strengths of all mixtures with BA were similar to that of the PC mix at 90 days. In addition, the SEM micrograph of pastes confirmed a good pozzolanic reaction between ash particles and Portland cement, resulting in an increase in the compressive strength of the mortars especially after a period of time (more than 28 days).

Keywords Bottom ash • Sugarcane bagasse ash • Pozzolanic reaction • Hydration reaction

✉ Thanongsak Nochaiya

thanongsakno@nu.ac.th

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,
Phitsanulok 65000, Thailand

³ ~~Research Center for Academic Excellence in Applied Physics, Naresuan University,~~
Phitsanulok 65000, Thailand



Introduction

Cement is the principal material in the production of concrete, which is the most important material in the world, that forms the basis of the construction industry but it emits CO₂ at a rate of 0.7-1.1 tons for one ton of cement production [1]. In order to reduce the amount of CO₂ emission from the cement industry, the manufacturing process has to be improved to reduce the environmental problem of air pollution [2]. These include the utilization of supplementary cementitious materials such as natural pozzolans material [3-5].

Bottom ash (BA) is a by-product of the combustion of coal in power plants. It is consolidated of the ashes at the bottom of the furnace. Bottom ash particles are physically coarse, porous, granular and gray color. The world production of coal ash is approximately 459 million tons in 1992 [1] while the output of lignite BA at Mae Moh power plant in the north of Thailand is about 0.8 million tons per year [6]. Many researchers reported that BA contains a high silica and alumina contents similar to fly ash. Furthermore, it has been reported that the pozzolanic reactivity of BA may improve the compressive strength of concrete [7-9]. Several researchers [10-11] found that grinding of BA can increase its pozzolanic activity of the concrete and make it suitable for use as a partial replacement in Portland cement.

Sugarcane bagasse ash (SCBA), which is a by-product of the burning of sugarcane bagasse from the sugar industry, has recently been accepted as a pozzolanic material and can be used as a supplementary material in cement based-materials [12-16]. However, the SCBA is a pozzolanic material with high silica content could also be used as pozzolan [15]. This ash is generally disposed in landfills every day, leading to environmental problems in the region. Since the received SCBA from the sugar industry has a large particle size and high porosity, it needs more water content and thus results in lower mechanical properties. However, when SCBA is ground into small particles, the properties of the cement based-materials containing ground SCBA improves significantly [17]. Ganesan et al. [15] reported that the SCBA was an effective

mineral admixture, with 20% by weight of the binder as optimal replacement ratio of cement. The 28 and 90 day compressive strengths have been higher than that of the mix without SCBA.

The relationship between the microstructure and compressive strength of BA and SCBA blended cement were not well reported. Consequently, this research investigated the effect of ground BA and SCBA on the microstructure, setting time and compressive strength of pastes and mortars and compared them to the PC control mix. This knowledge could be beneficial and used commercial for this type of waste in paste and mortars and thus lead to the reduction in the amount of cement usage and environmental problems.

Results and Discussion

Normal consistency

Normal consistency of cement paste with and without BA and SCBA, which was accepted when the plunger sunk to a point 10 ± 1 mm scale in 30 s of the test, presented to determine the changes in water requirements of the pastes due to BA and SCBA waste is given in Table 3 and Fig. 2. The results showed that the normal consistency of the PC 20BA and 20SCBA pastes had water requirements of 136, 133 and 145 g, respectively. Therefore, the normal consistency of 20BA paste was lower than that of the ordinary cement paste while 20SCBA paste was higher than that of the control cement paste. This is mainly due to the LOI content of SCBA was higher than that of the BA (LOI of BA and SCBA of 3.4% and 11.2%, respectively). This behavior was also found in the case of high LOI content in fly ash [18-20]. However, the low LOI content tended to be less effect in water demand and attributed to the absorption of free water by unburned carbon particle in pozzolanic material [21]. Furthermore, it was found that the water requirements for normal consistency of the paste with 20 wt% of between BA and SCBA (5BA15SCBA, 10BA10SCBA and 15BA5SCBA) were 139, 137 and 134 g, respectively. In addition, this result indicated that the normal consistency of the paste was decreased when the amount of SCBA increased.

Setting time

The initial and final setting times of the control cement paste and the pastes modified with SCBA (20BA, 20SCBA, 5BA15SCBA, 10BA10SCBA and 15BA5SCBA) are shown in Fig. 3 and Table 3. It can be seen that all specimens with BA and SCBA were found to have higher initial and final setting times of the pastes than that of the PC control mix. It can be noted that BA had a small delaying effect on the hydration of Portland cement paste as similarly reported by the previous studies [22-25]. The main reason for the increase in both the initial and final setting

times is the reduction of the C₃A component (in the case of using mineral additive) which arises from the cement in the mixture and has an important role in improving the hydration in the early hours. By replacing cement with 20BA in certain proportions, the initial and final setting times of the cement increased 26 and 31 minutes in comparison with PC cement paste. Moreover, the final setting time of the 20 wt% of overall replacement by BA and SCBA was tended to slightly decrease when the fraction of BA increases.

Compressive strength

Table 4 shows the compressive strength of the mortar blended with pozzolan for 7, 28, and 90 days of curing. The compressive strengths of PC mix at 7, 28, and 90 days were 40.5±2.7, 41.4±1.5 and 46.3±0.9 MPa, respectively. At 7 days of curing, the compressive strengths of the mortar with 20BA and 20SCBA as substitutive binders had 26.2±2.5 and 30.6±0.9 MPa, respectively. The compressive strengths of the 20BA and 20SCBA mixes at 28 days were 39.6±1.6 and 35.1±1.9 MPa, respectively, while the compressive strength of these mixes at 90 days was 45.1±0.6 and 46.3±0.4 MPa, respectively. The strength of the mortar was commonly found in the case of pozzolan material usage similar to that of the fly ash and bagasse ash in concrete, as reported by Akram and Ganesan. [15, 26].

In addition, the compressive strength of the mortar with 20wt% of the total cement replacement by BA and SCBA (5BA15SCBA, 10BA10SCBA and 15BA5SCBA) trended to decrease when BA increased and SCBA decreased, for all ages. These compressive strength results of 7 days curing were 26.7 ± 4.7 , 26.6 ± 0.9 and 23.8 ± 2.9 MPa, respectively. Furthermore, the compressive strengths at 28 days were 40.3 ± 4.2 , 38.0 ± 3.8 and 37.2 ± 2.5 MPa, respectively, while the compressive strength was 46.7 ± 0.4 , 46.2 ± 0.6 and 46.2 ± 2.5 MPa for 90 days. This result indicates that the compressive strength of all mixes with ashes at 28 days and 90 days curing was close to the PC mortar. It can be understood from this result that the replacement of PC by both ashes at 20wt% possibly results in lower effects on the compressive strength at later ages.

Microstructure

A comparison of the microstructure of the pastes blended with BA and SCBA using SEM analysis are presented in Figs. 4 (a), 4 (c), 4 (e) and 4 (g). The regions analyzed by EDS are indicated by a gray rectangle in the SEM image. Results obtained in the EDS spectra are shown with the relative intensities of each element in the SEM micrograph from Figs. 4 (b), 4 (d), 4 (f) and 4 (h).

The SEM photograph of the PC paste at 28 days was shown in Fig. 4 (a). The microstructure of the PC paste presented several shapes such as a generally equant crystals, plate-like crystals, condensed phase and needle-like crystals. Such large plate-like crystals are referred to an unhydrated cement phase and the needle-like crystals have been described as CSH phases inside pores or cracks [27] as reported by other studies [28]. Furthermore, the SEM image relates to the high amount of Ca, Si and O elements by the EDS analyze (Fig. 4 (b)), having 40.96, 8.39 and 36.97 wt%, respectively. This result confirmed that Ca element was generally found in the ordinary Portland cement [29-30].

Fig. 4 (c) shows SEM micrograph for the paste of 20 wt% BA after curing in water for 28 days. The BA concluded with burning procedure of coal and they are often contaminated with

both particles. It can be seen that the BA particle, rather spherical chunk and rough surface was the size of about 25 μm . It was bonded with the paste surface (as seen in the interface around the BA particles) and some spherical BA particles came off when crushing samples. The bottom ash particle can be seen throughout in Fig. 4 (c), which was similarly found in the case of fly ash usage [31-32]. Furthermore, the SEM image showed that a hydration gel surrounded the large BA particle and their surfaces were a little rough, indicating their pozzolanic reaction degree generated at this age. The investigation of element of the BA paste by EDS is shown in Fig. 4 (d). The elements on the BA (overall area) showed high Si and Ca, which is mainly detected for the reacted normal pozzolan materials.

Fig. 4 (e) shows the morphology of the 20SCBA paste at 28 days of curing. It can be seen that the SCBA particle inserted in hydration products of PC, approximately 70 μm . This can be noted that the cement dilution can be effected to the hydration degree, which seemed to be loose of hydration products of the SCBA paste. However, the SEM result of SCBA paste related to the compressive strength of the SCBA mix that found to be less than that of the PC mix at 28 days curing. The EDS analysis of the paste with 20 wt% SCBA is shown in Fig. 4 (f). The amount of the elements on the SCBA particle shows Si of 12.09 wt% indicating as the SCBA particle in the 20SCBA paste, as similarly reported in other pozzolan usage [33-35]. Moreover, it can be noticed by EDS analysis that the SCBA paste shows Si and Si/Ca ratio higher than that of PC paste.

The microstructure of 10BA10SCBA is shown in Fig. 4 (g). The SEM image showed the remaining BA and SCBA particles in the matrix that the large BA particles were surrounded by hydration gel and their surfaces appeared to be rougher than that of the SCBA surfaces. This seems that the BA consumed of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (from the hydration reaction), led to an increase in C-S-H form via the pozzolanic reactions. However, both ashes were not only used for the development of pozzolanic reaction, but also act by the microfiller effect in the paste [36-39]. In

addition, the EDS analysis of such areas showed Si and Ca elements of 12.62 and 24.55 wt%, respectively.



Table 1 Chemical composition of PC, BA, and SCBA

Materials	Oxide content/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	LOI
PC	18.4	3.7	3.4	65.6	1.5	0.6	0.2	4.5	-	2.2
BA	41.1	17.1	13.8	17.4	2.0	2.2	0.5	2.4	-	3.4
SCBA	74.0	3.7	1.8	1.7	0.7	4.4	0.4	0.3	1.8	11.2

Table 2 Mix proportions of PC with BA and SCBA pastes

Mix	w/b	Mix proportion/wt% of PC			
		PC	BA	SCBA	*Sand
PC	0.5	100	-	-	250
20BA	0.5	80	20	-	250
20SCBA	0.5	80	-	20	250
5BA15SCBA	0.5	80	5	15	250
10BA10SCBA	0.5	80	10	10	250
15BA5SCBA	0.5	80	15	5	250

* For mortar mixture

Table 3 Normal consistency and setting time of PC with BA and SCBA pastes

Mix	Water requirement for normal consistency/g, w/b	Setting time/min	
		Initial	Final
PC	136, 0.27	127	155
20BA	133, 0.27	153	186
20SCBA	145, 0.29	134	179
5BA15SCBA	139, 0.28	138	178
10BA10SCBA	137, 0.27	141	172
15BA5SCBA	134, 0.27	146	171

Table 4 Compressive strength of mortar containing BA and SCBA after curing in saturated lime water at 7, 28 and 90 days

Mixture	Compressive strength/MPa			Relative compressive strength/%		
	7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days
PC	40.5±2.7	41.4±1.5	46.3±0.9	100.0	100.0	100.0
20BA	26.2±2.5	39.6±1.6	45.1±0.6	64.7	95.7	97.4
20SCBA	30.6±0.9	35.1±1.9	46.3±0.4	75.5	84.9	99.9
5BA15SCBA	26.7±4.7	40.3±4.2	46.7±0.4	65.9	97.3	100.9
10BA10SCBA	26.6±0.9	38.0±3.8	46.2±0.6	65.5	91.9	99.8
15BA5SCBA	23.8±2.9	37.2±2.5	46.2±2.5	58.8	90	99.7

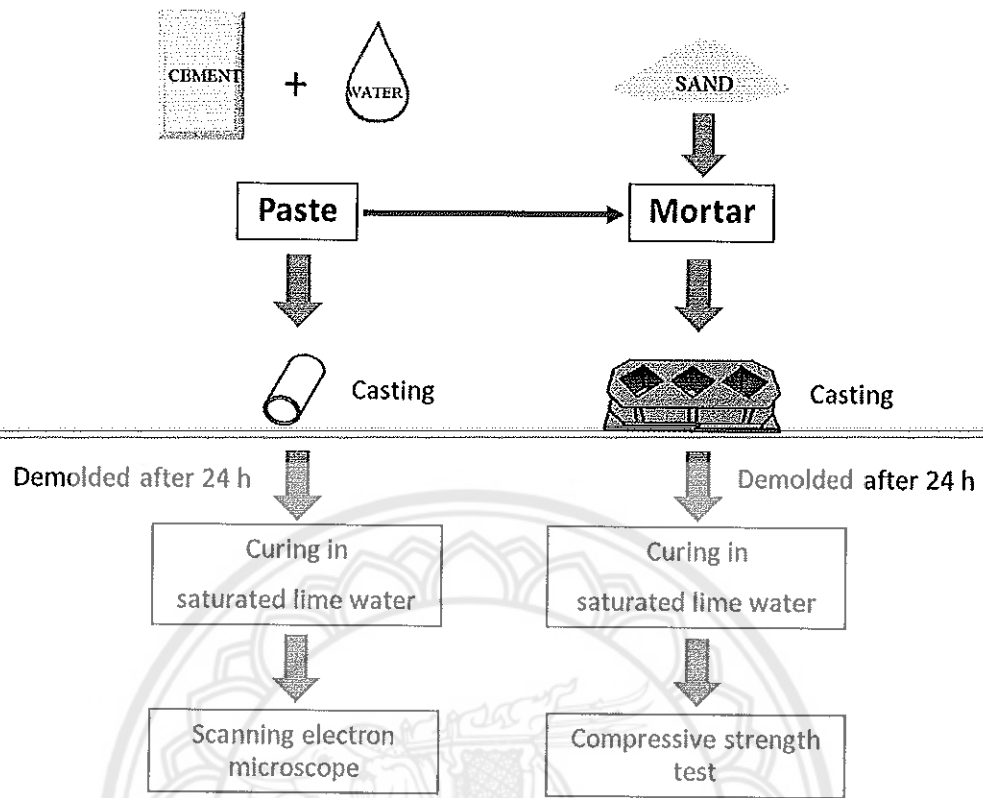


Fig. 1 Flow chart of experimental program of this research

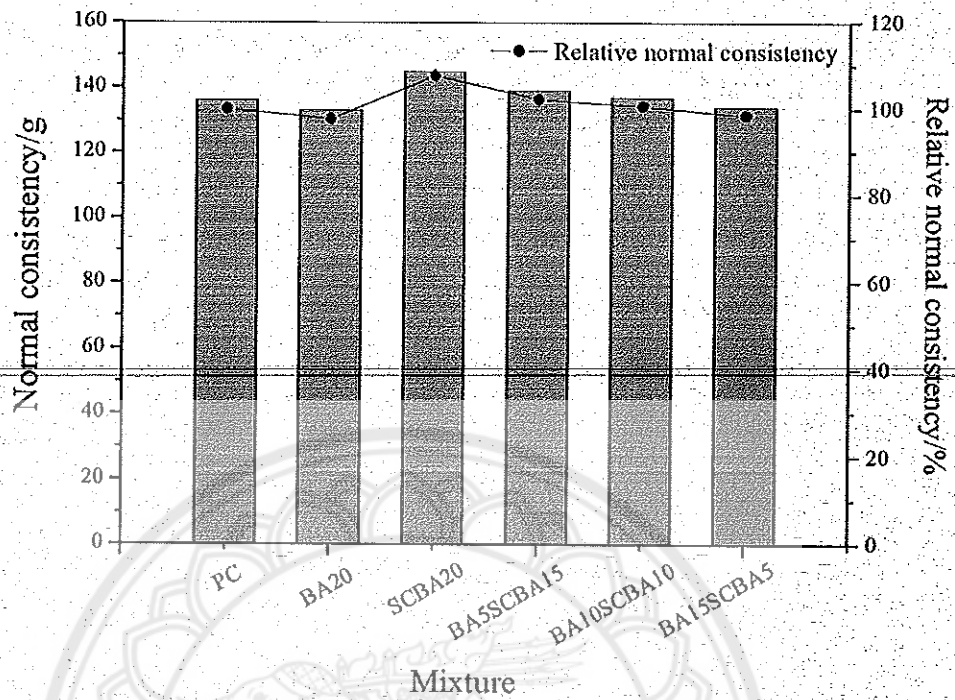


Fig. 2 Normal consistency of PC containing BA and SCBA paste

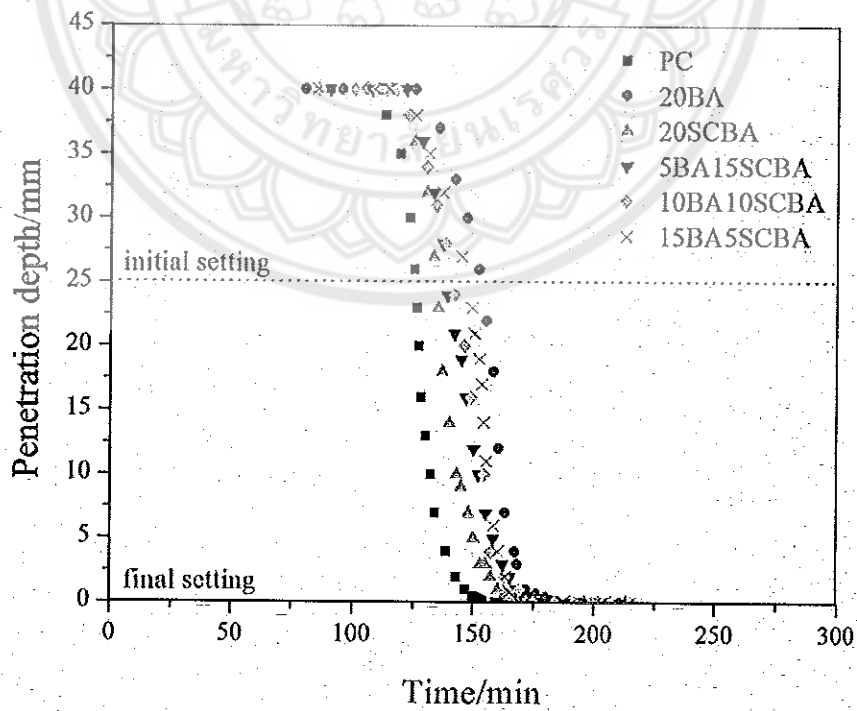


Fig. 3 Setting time of ordinary Portland cement containing BA and SCBA

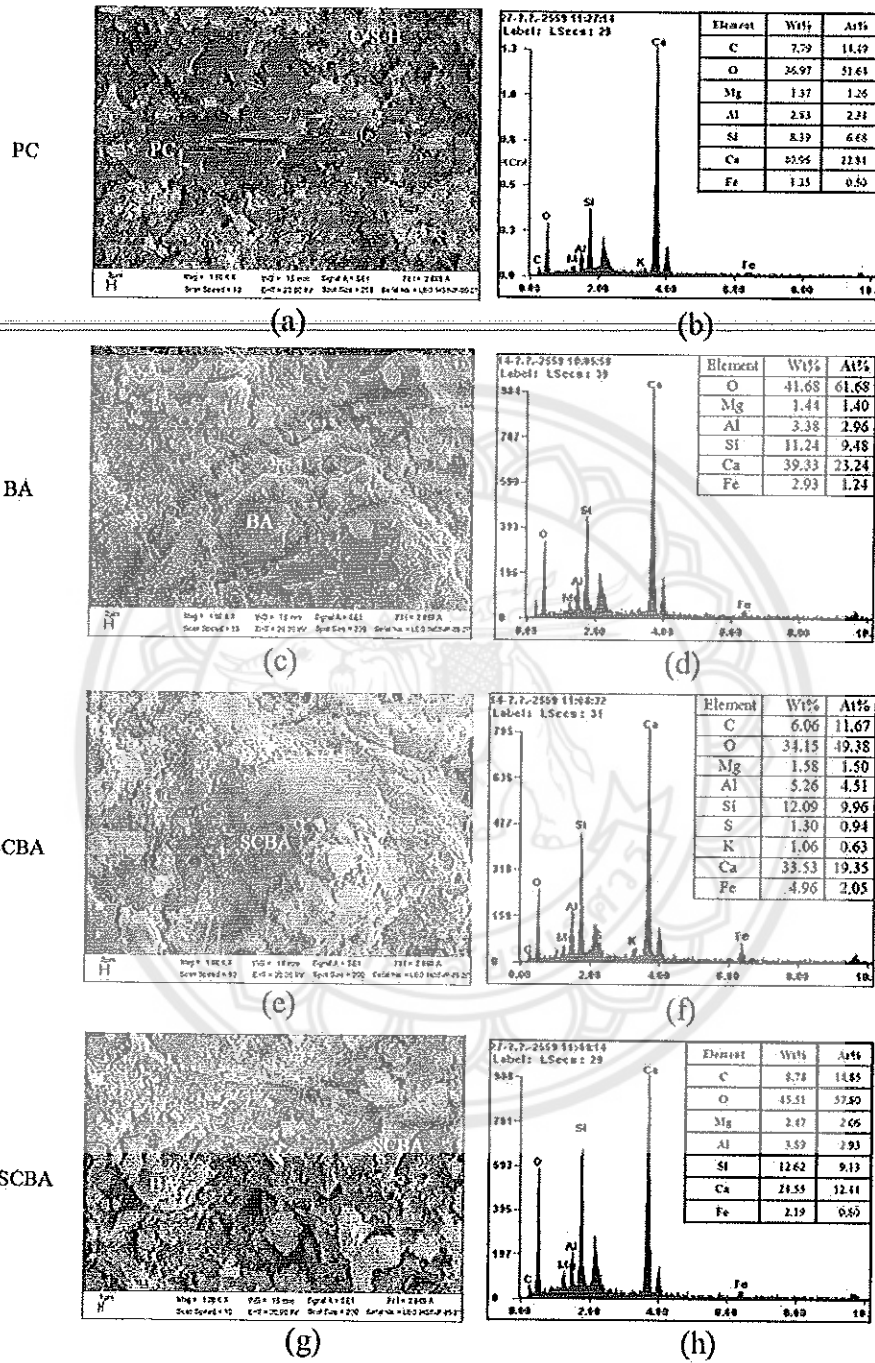


Fig. 4 SEM photographs and EDS analyses of the pastes blended pozzolan; (a) PC, (b) PC-EDS, (c) 20BA, (d) 20BA-EDS, (e) 20SCBA, (f) 20SCBA-EDS, (g) 10BA10SCBA and (h) 10BA10SCBA-EDS at 28 days

Conclusion

Based on the present experimental results, the following conclusions can be drawn:

1. The normal consistency of paste was found to decrease with increasing BA content while the SCBA paste showed an increase in water requirement when SCBA increased. The initial and final setting times were increased with added BA and SCBA content up to 20 wt%, indicating that BA and SCBA had lowered the hydration reaction than that of the PC phases due to pozzolanic reaction.

2. The highest compressive strength of the mortar samples was observed in the 5BA15SCBA mortar at 28 and 90 days, with the values of 40.3 and 46.7 MPa, respectively. Furthermore, the BA and SCBA had a positive influence on the compressive strength of the mortars, which made them suitable for use as a mineral addition.

3. The utilization of BA and SCBA in mortar showed a fairly dense matrix (from SEM analysis) via pozzolanic reaction, observing at the boundary of the pozzolan particles, resulting in a significant gain in the compressive strength.

Experimental

Material and Methods

Chemical compositions of Portland cement type I (PC), BA and SCBA are given in Table 1. Portland cement presented 65.6% of CaO, 18.4% of SiO₂, 3.7% of Al₂O₃ and 3.4% of Fe₂O₃. The loss on ignition (LOI) of PC particle was 2.2%, with the median particle size of 36.78 μm. In this study, Bottom ash from Mae Moh power plant in the north of Thailand was used. BA was ground by a ball mill for 20 h and had a median particle size (d_{50}) of 23.21 μm. The main chemical composition of BA was SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO and LOI of 41.1%, 17.1%, 13.8%, 17.1% and 3.4%, respectively. The sum percentage of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ was 72% that is higher than 70% of the requirement for natural pozzolan according to ASTM C618 standard [40]. Sugarcane bagasse ash (SCBA) obtained from the sugar industry in Phitsanulok province, Thailand, was ground by a ball mill for 12 h to reduce the particle size (d_{50} of 27.61 μm). SCBA has a sum percentage of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ of 79.5%, while SO₃ and LOI were 0.3% and 11.2%, respectively. The BA and SCBA were used as a cement replacement at up to 20 wt%. The mix proportion of Portland cement with BA and SCBA pastes and mortars is given in Table 2.

For the normal consistency test, the binders (PC, BA, and SCBA) were firstly mixed in the mixer, after that the pastes were approximately shaped to a ball with gloved hands. The paste was tossed six times through a free path of about 150 mm and then inserted into the Vicat mold.

The excess paste was removed and surface was made smooth. After that, the center of the Vicat mold sample was placed under the center of a rod (plunger) and then the plunger touched the paste surface. Finally, the rod was immediately free released. The normal consistency was accepted when the plunger sunk to a point 10 ± 1 mm scale below the original surface in 30 s in accordance with ASTM C 187 standard [41].

In this investigation, setting time was indicated the cement paste solidification time [42] using a Vicat apparatus following the ASTM C 191 standard [43]. The paste samples with and without BA and SCBA were mixed with water to binder ratio following the water requirement of the normal consistency test as given in Table 3. A 1 mm diameter needle was allowed to penetrate into the pastes every 15 min, and the penetration depth was measured. The time from initial contact of cement and water, and when the penetration depth of 25 mm was reached by the needle and then calculated the “Initial setting” time using Eq. (1)

$$\text{Initial setting} = \left(\frac{H-E}{C-D} \right) \times (C - 25) + E \quad (1)$$

Where E is the time in minutes of the last penetration greater than 25 mm, H is time in minutes of first penetration less than 25 mm, C is penetration reading at time E , and D is penetration reading at time H . The time from the initial contact of cement and water until the penetration of the needle did not sink visibly into the paste surface, was defined as the “Final setting” time.

For compressive strength tests, the water/binder ratio and the sand/binder ratio of the cement mortars were 0.5 and 2.5, respectively. To help homogeneously, the binders (PC, BA, and SCBA) were first mixed in the mixer, then, the water was added and mixed for approximately 2 min in accordance with the ASTM C 305 standard [44]. The pastes were then poured into cube molds ($50 \times 50 \times 50$ mm³) and then compacted in accordance with the ASTM C 109 standard [45]. The specimens were surface-smoothed, and covered with plastic film. After 24 h, all specimens were removed from the molds after casting. Thereafter, they were cured in water at 25 ± 2 °C. Three specimens of each mix were tested for compressive strength at 7, 28, and 90 days after curing and the process of mortar preparation, as followed in Fig.1.

The microstructure of the paste samples was examined by a LEO 1455VP scanning electron microscope (SEM) coupled with an energy dispersive spectrometry (EDS). The paste samples were soaked in acetone to stop the hydration and then treated an oven maintained at 100 °C before the analysis. The procedure summary of paste preparation is shown in Fig.1.

Acknowledgements The present study wish to thank the faculty of science, Naresuan university for funding the research and the department of Physics support the materials and equipments used in the experiments. Thank also extend Dr. Kyle V. Lopin for language checking.

References

1. Sata V, Sathonsaowaphak A, Chindapasirt P (2012) *Cem Concr Compos* 34:700-708
2. Li ZJ (2011) *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons, New Jersey
3. Zhang MH, Lastra R, Malhotra VM (1996) *Cem Concr Res* 26:963-977
4. ~~Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Songpiriyakij S, Chutubtim S (2001) *Cem Concr Compos* 23:335-343~~
5. Sata V, Jaturapitakkul C, Rattanashotinunt C (2010) *J Mater Civil Eng* 22:1033-1038
6. Manz OE (1997) *Fuel* 76:691-696
7. Singh M, Siddique R (2013) *Resour Conserv Recy* 72:20-32
8. Zhang B, Poon CS (2015) *J Clea Prod* 99:94-100
9. Targana S, Olgunb A, Erdoganb Y, Sevince V (2003) *Cem Concr Res* 33:1175-1182
10. Cheriaf M, Rocha JC, Pera J (1999) *Cem Concr Res* 29:1387-1391
11. Jaturapitakkul C, Cheerarot R (2003) *J Mater Civil Eng* 15:48-53
12. Hernández JFM, Middendorf B, Gehrke M, Budelmann H (1998) *Cem Concr Res* 28:1525-1536
13. Singh NB, Singh VD, Rai S (2000) *Cem Concr Res* 30:1485-1488
14. Paya J, Monzo J, Borrachero MV, Diaz-Pinzon L, Ordonez LM (2002) *J Chem Technol Biotechnol* 77:321-325
15. Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K (2007) *Cem Concr Compos* 29(6): 515-524
16. Rukzon S, Chindapasirt P (2012) *Mater Des* 34:45-50
17. Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn EMR (2008) *Cem Concr Compos* 30:410-418
18. Mtarfi NH, Rais Z, Taleb M, Kada KM (2017) *J Build Eng* 9:109-116
19. Moon GD, Oh S, Choi YC (2016) *Constr Build Mater* 124:1072-1080
20. Kim HK (2015) *Constr Build Mater* 91:57-64
21. Thomas M (2013) *Supplementary cementing materials in concrete*. Taylor & Francis, London
22. Kamali M, Ghahremaninezhad A (2016) *Constr Build Mater* 112:915-924

23. Hou P, Wang K, Qian J, Kawashima S, Kong D, Shah SP (2012) *Cem Concr Compos* 34:1095-1103
24. Sakai E, Miyahara S, Ohsawa S, Lee SH, Daimon M (2005) *Cem Concr Res* 35:1135-1140
25. Byfors K (1987) *Cem Concr Res* 17:115-130
26. Akram T, Memon SA, Obaid H (2009) *Constr Build Mater* 23:703-712
27. Nunes C, Slížková Z, Stefanidou M, Němeček J (2016) *Cem Concr Res* 83:152-163
28. Stefanidou M (2013) *Rom J Mater* 43(2):223-226
29. Manuel GB, Francisco A, Auxi B, Jesús A, Antonio R (2014) *Constr Build Mater* 72:231-238

30. Kurama H, Kaya M (2008) *Constr Build Mater* 22:1922-1928
31. Duan P, Yan C, Zhou W, Ren D (2016) *Constr Build Mater* 118:76-88
32. Wang Q, Feng J, Yan P (2012) *Constr Build Mater* 29:114-119
33. Medina G, Sáez del Bosque IF, Frías M, Sánchez de Rojas MI, Medina C (2017) *Appl Clay Sci* 135:362-371
34. Robayo-Salazar RA, Mejía de Gutiérrez R, Puertas F (2016) *Appl Clay Sci* 132-133: 491-497
35. Wilson W, Rivera-Torres JM, Sorelli L, Durán-Herrera A, Tagnit-Hamou A (2017) *Cem Concr Res* 91:1-12
36. Khalid NHA, Hussin MW, Mirza J, Ariffin NF, Ismail MA, Lee H, Mohamed A, Jaya RP (2016) *Constr Build Mater* 102:950-960
37. Bajare D, Bumanis G, Upeniece L (2013) *Procedia Engineering* 57:149-158
38. Curcio F, DeAngelis BA, Pagliolico S (1998) *Cem Concr Res* 28:803-809
39. Goldman A, Bentur A (1993) *Cem Concr Res* 23:962-972
40. Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (2008) Part C 618-08
41. Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (2011) Part C 187-11
42. Mehta PK, Monteiro PJM (2006) *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3rd edn. McGraw-Hill, New York
43. Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (2013) Part C 191-13
44. Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (1999) Part C 305-99

45. Annual Book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (2001) Part
C 109-01



Figure Captions

Fig. 1 Flow chart of experimental program of this research

Fig. 2 Normal consistency of PC containing BA and SCBA paste

Fig. 3 Setting time of ordinary Portland cement containing BA and SCBA

Fig. 4 SEM photographs and EDS analyses of the pastes blended pozzolan; (a) PC, (b) PC-EDS, (c) 20BA, (d) 20BA-EDS, (e) 20SCBA, (f) 20SCBA-EDS, (g) 10BA10SCBA and (h) 10BA10SCBA-EDS at 28 days

