การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

Use of Ground Bottom Ash as a Pozzolanic Material in Concrete

เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Raungrut Cheerarot and Chai Jaturapitakkul

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

โทร 02-470-9137 โทรสาร 02-427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาคุณภาพเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต โดยพัฒนาคุณภาพเถ้าก้นเตาด้วยการบดให้มีขนาดที่เล็กลง จนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในอัตราร้อยละ 30-35, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามลำดับ จากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันเท่ากับ 200, 300 และ 400 กก/ซม^2 จากการศึกษาพบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดสุดสามารถพัฒนากำลังอัดจนสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป และที่อายุ 90 วันมีกำลังอัดสูงสุดร้อยละ 113 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่ความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากันพบว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่ามีค่าร้อยละกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่ำกว่า ผลจากการทดลองสรุปว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตได้อย่างดี

Abstract

This research is a study and development of bottom ash from Mae Moh power plant as a pozzolanic material in concrete. Bottom ash was improved quality by grinding until the particle size retained on sieve No. 325 as 30-35%, 15-20%, and less than 5% by weight. Portland cement type I was replaced by ground bottom ashes at the rate of 0, 10, 20, and 30% by weight of cementitious material. Designed compressive strengths of control concretes at 28-day were 200, 300, and 400 ksc. From the study, it was found that the slump of ground bottom ash concrete was close to that of the control concrete. At 28 days, ground bottom ash concrete can develop compressive strength higher than that of control concrete, and the highest compressive strength of them at 90-day was 113% of the control concrete. At the same fineness and percentage replacement, ground bottom ash concrete with higher designed compressive strength gave higher percentage compressive strength too. From the results, it was concluded that ground bottom ash could be used as a good pozzolanic material in concrete.

1. คำนำ

เถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน แต่เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนกว่าเถ้าถ่านหินมาก จากขนาดที่ใหญ่คล้ายมวลรวมละเอียดของเถ้าก้นเตา จึงมีหลายงานวิจัยนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย [1-4] ผลจากการศึกษาพบว่าเถ้าก้นเตาสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้ แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีรูพรุนสูงมากทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้น เป็นผลให้กำลังอัดลดลง แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ และเนื่องจากเถ้าก้นเตามีลักษณะที่พรุนและเบากว่ามวลรวมละเอียดทั่วไปจึงมีแนวความคิดนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นมวลรวมเพื่อทำคอนกรีตมวลเบา [5-7] ผลปรากฏว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,400 ถึง 1,800 กก/ม^3 อย่างไรก็ตามได้มีแนวคิดนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าก้นเตา แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่จึงต้องเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาให้ดีขึ้นโดยทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง จากผลการทดลองของ Cheriaf และคณะ [8] สรุปว่าเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลาน และเมื่อเถ้าก้นเตามีความละเอียดมากขึ้นจะสามารถทำปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ Jaturapitakkul และ Cheerarot [9] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน จากการศึกษาพบว่าเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้มอร์ต้าร์มีความต้องการน้ำสูงขึ้นและกำลังอัดต่ำลง แต่เมื่อพัฒนาคุณภาพโดยการบดเถ้าก้นเตาจนมีขนาดเล็กลงมาก พบว่าเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน

ในปัจจุบันการนำเถ้าถ่านหินมาใช้งานคอนกรีตได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมมีราคาถูกกว่าและมีคุณภาพที่ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง จึงมีเถ้าถ่านหินและเถ้าก้นเตาเป็นผลพลอย

RECEIVED 22 DECEMBER, 2002

ACCEPTED 28 MAY, 2003

ได้ พบว่าเถ้าก้นเตาที่สามารถผลิตได้ในแต่ละวันมีไม่น้อยกว่า 1,500 ตัน ยังไม่มีการนำมาใช้งานอย่างจริงจัง เนื่องจากขาดความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและคุณภาพของเถ้าก้นเตาที่เพียงพอ นอกจากนี้การใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตยังให้ผลที่ไม่ดีนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและพัฒนาคุณภาพของเถ้าก้นเตา โดยศึกษาผลกระทบเนื่องจากความละเอียดและการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่างกัน

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำที่มีขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.1, หินปูนขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว และเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งใช้เตาเผาถ่านหินระบบฟลูเวอร์ไรด์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

เถ้าก้นเตาที่ใช้ในงานวิจัยจะนำมาผึ่งแดดให้แห้งและนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ เถ้าก้นเตาบดละเอียดสุด (SB, Small ground bottom ash) เถ้าก้นเตาบดละเอียดปานกลาง (MB, Medium ground bottom ash) และเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (LB, Large ground bottom ash) การแยกความละเอียดของเถ้าก้นเตาบดละเอียดทั้งสามขนาดใช้ปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เป็นเกณฑ์ โดยกำหนดให้มีวัสดุค้างอยู่ในช่วงร้อยละ 30-35, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สำหรับเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ บดละเอียดปานกลาง และบดละเอียดสุด ตามลำดับ

2.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่ใช้ในการทดลองจะทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายตัวของอนุภาค

2.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตได้ออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุมซึ่งไม่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมที่อายุ 28 วันเท่ากับ 200, 300 และ 400 กก/ซม^2 ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 15 ซม. และนำเถ้าก้นเตาบดละเอียดแต่ละขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน รวมจำนวนทั้งหมด 30 อัตราส่วนผสม เพื่อหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 1 โดยสัญลักษณ์ 200, 300 และ 400 หมายถึง กำลังอัดที่ออกแบบคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ซึ่งเท่ากับ 200, 300 และ 400 กก/ซม^2 ตามลำดับ, CC (Control Concrete) หมายถึงคอนกรีตควบคุม, BC (Bottom Ash Concrete) หมายถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา ซึ่งแต่ละส่วนผสมประกอบด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ LB, MB และ SB ส่วนเลข 10, 20 และ 30 หมายถึงร้อยละอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Type of Concrete	Mix Proportion (kg/m^3)					W/(C+GB)
	Water	Cement	GB	Sand	Stone	
CC200	195	260	-	855	1050	0.75
CC300	195	350	-	790	1045	0.56
CC400	195	430	-	725	1040	0.45
10BC200	195	234	26	855	1048	0.75
10BC300	195	315	35	790	1043	0.56
10BC400	195	387	43	725	1037	0.45
20BC200	195	208	52	855	1046	0.75
20BC300	195	280	70	790	1040	0.56
20BC400	195	344	86	725	1034	0.45
30BC200	195	182	78	855	1044	0.75
30BC300	195	245	105	790	1047	0.56
30BC400	195	301	129	725	1030	0.45

GB = Ground bottom ashes which have three sizes

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

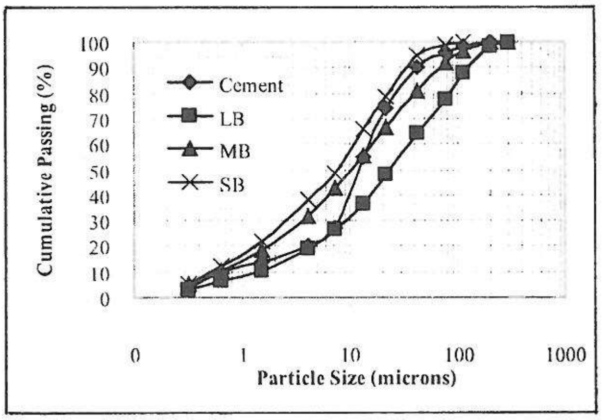
ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าก้นเตาบดละเอียด ส่วนรูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวอนุภาคของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14 ในขณะที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.60 ถึง 2.70 โดยค่าความถ่วงจำเพาะจะขึ้นกับความละเอียดของเถ้าก้นเตา กล่าวคือ เมื่อเถ้าก้นเตามีความละเอียดมากขึ้นจะมีความถ่วงจำเพาะมากขึ้นด้วย เปรียบเทียบกับความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาก่อนการบดจากแหล่งเดียวกันพบว่ามีค่า 2.10 [9] โดยความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าก้นเตาก่อนการบดมีความพรุนสูงมาก

ปริมาณร้อยละน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าร้อยละ 12.5 ส่วนเถ้าก้นเตา LB, MB และ SB มี

ค่าร้อยละ 33.5, 19.6 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดตามที่กำหนด กล่าวคือ มีขนาดค้างอยู่ในช่วงร้อยละ 30-35, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามลำดับ โดยปริมาณร้อยละสูงสุดที่ค้างของวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนด ASTM C 618 [10] ซึ่งกำหนดปริมาณค้างสูงสุดของเถ้าถ่านหินมีค่าไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตาบดละเอียด

Sample	Specific Gravity	Retained on Sieve No. 325 (%)	Blaine Fineness (cm^2/g)	Median Particle Size (micron)
Cement	3.14	12.5	3,240	13.0
LB	2.60	33.5	3,580	26.1
MB	2.65	19.6	4,460	11.3
SB	2.70	4.5	6,285	6.2



รูปที่ 1 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลนของปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 3240 ซม^2/ก ส่วนเถ้าก้นเตา LB, MB และ SB มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3580, 4460 และ 6285 ซม^2/ก ตามลำดับ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขนาดมีค่าอยู่ในช่วง 800 ถึง 900 ซม^2/ก สำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 13 ไมโครเมตร ในขณะที่เถ้าก้นเตา LB, MB และ SB มีค่าเท่ากับ 26.1, 11.3 และ 6.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าก้นเตา LB มีค่าน้อยกว่าเถ้าก้นเตา SB ประมาณ 1.8 เท่าและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าประมาณ 4.2 เท่า ส่วนเถ้าก้นเตา MB มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าเถ้าก้นเตา SB ประมาณ 1.8 เท่า

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา พบว่าปูนซีเมนต์มีออกไซด์ของแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก คือมีค่าสูงถึงร้อยละ 64.99 และมีออกไซด์ของซิลิก้า อะลูมิน่าและเหล็กอยู่ร้อยละ 20.62, 5.22 และ 3.10 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าก้นเตามีออกไซด์ของซิลิก้าร้อยละ 46.02 และมีออกไซด์ของอะลูมิน่า เหล็ก และแคลเซียมอยู่ร้อยละ 22.31, 10.64 และ 11.48 ตามลำดับ พิจารณาผลรวมออกไซด์ของซิลิก้า อะลูมิน่า และเหล็กของเถ้าก้นเตาพบว่ามีค่ารวมร้อยละ 78.97 หากพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าก้นเตาสามารถจัดประเภทตาม ASTM C 618 [10] เป็นเถ้าถ่านหินชนิด F และเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตากับเถ้าถ่านหินจากแหล่งเดียวกันของงานวิจัยที่ผ่านมา [11] พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และจากการศึกษาของ Tangtermsirikul [12] พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาที่เก็บตัวอย่างทุก 2 สัปดาห์เป็นเวลา 3 เดือน มีค่าออกไซด์ของซิลิก้าอยู่ในช่วงร้อยละ 45.24 ถึง 53.26 และมีออกไซด์ของอะลูมิน่าอยู่ในช่วงร้อยละ 18.43 ถึง 20.40 ส่วนออกไซด์ของเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.0 ถึง 7.86 ซึ่งเห็นได้ว่าองค์ประกอบเคมีของเถ้าก้นเตาค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ

3.3 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

จากตารางที่ 4 ซึ่งแสดงค่ายุบตัวของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตควบคุม CC200, CC300 และ CC400 มีค่ายุบตัวเท่ากับ 12, 13 และ 14 ซม. ตามลำดับ และการใช้เถ้าก้นเตา LB และ MB ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ายุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ตัวอย่างเช่น คอนกรีต 30LBC200, 30LBC300 และ 30LBC400 มีค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 12, 13 และ 13 ซม. ตามลำดับ แสดงว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานอยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 และ 15-20 ไม่มีผลกระทบต่อค่ายุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Mn_2O_3	SO_3	LOI
Portland Cement Type I	20.62	5.22	3.10	64.99	0.91	0.07	0.50	0.76	2.70	1.13
Bottom Ash	46.02	22.31	10.64	11.48	3.47	3.47	0.07	0.07	1.52	2.72

ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา SB พบว่ามีค่ายุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เช่นคอนกรีต 30SBC200, 30SBC300 และ 30SBC400 มีค่ายุบตัวเท่ากับ 15, 16 และ 17 ซม. ตามลำดับ แสดงว่าเถ้าก้นเตาที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 เพิ่มค่ายุบตัวของคอนกรีตให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเถ้าก้นเตาบดละเอียดสุดมีขนาดอนุภาคเล็กมากจึงช่วยในการหล่อลื่นให้ส่วนผสมอื่นๆในคอนกรีตเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

3.4 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต โดยร้อยละกำลังอัดคือร้อยละของอัตราส่วนของกำลังอัดระหว่างคอนกรีตที่พิจารณากับคอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัดเดียวกัน จากการทดลองพบว่าคอนกรีตควบคุม CC200, CC300 และ CC400 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 204, 308 และ 405 กก/ซม^2 ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้คือ 200, 300 และ 400 กก/ซม^2 และมีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 145, 228, 301 และ 212, 326, 414 กก/ซม^2 ตามลำดับ

พิจารณาคอนกรีต 20LBC200, 20LBC300 และ 20LBC400 พบว่ามีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 75, 77, 81 และ 79, 82, 88 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ โดยเถ้าก้นเตา LB มีขนาดใหญ่ที่สุดจากทั้ง 3 ขนาด คือมีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 33.5 แสดงว่าความละเอียดของเถ้าก้นเตา LB มีค่าเพียงพอที่จะให้กำลังอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วันมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสามส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดจนมีค่าร้อยละ 87, 94 และ 98 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีต 20LBC300 และ 20LBC400 ที่อายุ 90 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการกำหนดความละเอียดของเถ้าก้นเตาโดยวิธีหาปริมาณน้ำหนักส่วนค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตาม ASTM C 618 [10] สามารถนำมาใช้กำหนดความละเอียดในการบดเถ้าก้นเตาได้

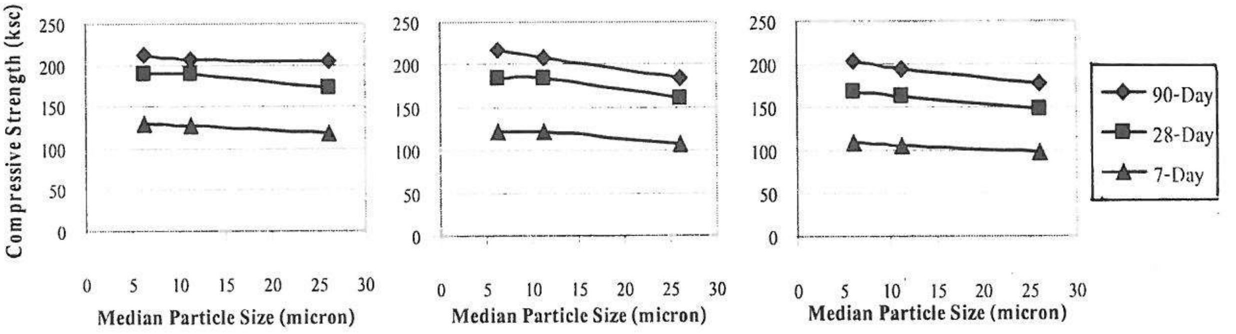
นอกจากนี้พบว่าที่อายุการทดสอบเดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่ความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เหมือนกันมีค่าร้อยละกำลังอัดแตกต่างกัน โดยคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่าจะมีแนวโน้มค่าร้อยละกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่ำกว่า เพราะคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่าจะมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่ำกว่า ดังนั้นจึงมีความเข้มข้นของด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่า ซึ่งคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 200, 300 และ 400 กก/ซม^2 มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 260, 350 และ 430 กก/ม^3 ตัวอย่างเช่น คอนกรีต 30LBC200, 30LBC300 และ 30LBC400 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 72, 76 และ 83 ของคอนกรีตควบคุม เป็นต้น

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีต

Type of Concrete	Compressive Strength (ksc) –*Percentage Compressive Strength (%)*			Slump (cm)
	7-Day	28-Day	90-Day	
CC200	145-*100*	204-*100*	212-*100*	12
CC300	228-*100*	308-*100*	326-*100*	13
CC400	301-*100*	405-*100*	414-*100*	14
10LBC200	118-*82*	174-*85*	205-*97*	12
10LBC300	199-*87*	281-*91*	319-*98*	12
10LBC400	276-92	385-*95*	412-*99*	14
20LBC200	108-*75*	160-*79*	184-*87*	11
20LBC300	176-77	252-*82*	306-*94*	12
20LBC400	243-*81*	258-*88*	407-*98*	14
30LBC200	99-*68*	147-*72*	178-*84*	12
30LBC300	162-*71*	233-*76*	278-*85*	13
30LBC400	224-*75*	336-*83*	373-*90*	13
10MBC200	129-*89*	189-*93*	207-*98*	13
10MBC300	220-*96*	305-*99*	337-*103*	14
10MBC400	293-*97*	405-*100*	431-*104*	14
20MBC200	123-*85*	184-*90*	209-*98*	14
20MBC300	206-*90*	292-*95*	358-*110*	15
20MBC400	279-*93*	409-*101*	436-*105*	14
30MBC200	106-*73*	163-*80*	194-*92*	14
30MBC300	189-*83*	278-*90*	343-*105*	15
30MBC400	254-*84*	370-*91*	423-*102*	16
10SBC200	129-*89*	190-*93*	213-*101*	14
10SBC300	223-*98*	311-*101*	336-*103*	15
10SBC400	299-*99*	412-*102*	429-*104*	17
20SBC200	123-*85*	185-*91*	218-*103*	15
20SBC300	212-*93*	309-*100*	365-*112*	16
20SBC400	285-*95*	414-*102*	443-*107*	16
30SBC200	110-*76*	169-*83*	204-*96*	15
30SBC300	197-*86*	308-*100*	369-*113*	16
30SBC400	263-*87*	413-*102*	450-*109*	17

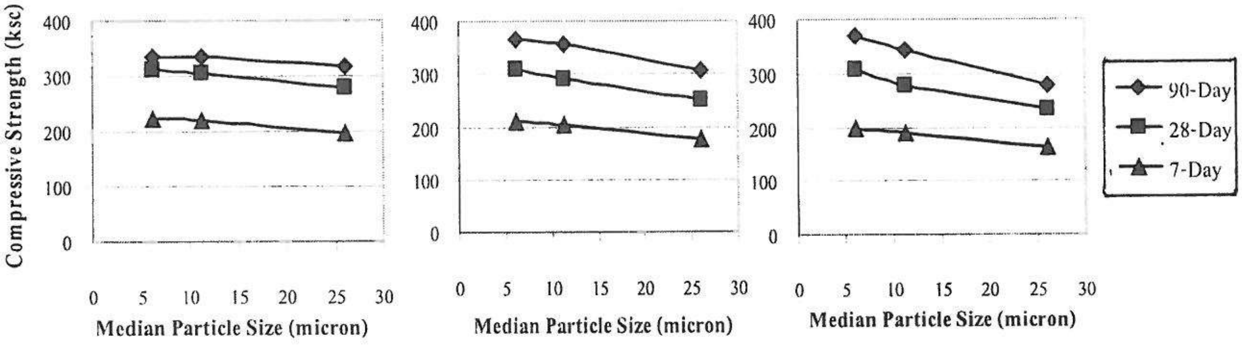
3.5 ผลกระทบของความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัด

รูปที่ 2 ถึง 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตาเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ส่วนรูปที่ 5 ถึง 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตา พบว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดและมีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดมากกว่ามีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่หยาบกว่า ตัวอย่างเช่น คอนกรีต 20LBC300, 20MBC300 และ 20SBC300 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 252, 292 และ 309 กก/ซม^2 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดในช่วงอายุต้นๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่ละเอียดกว่าจะมีค่ากำลังอัดที่ลดลงจากคอนกรีตควบคุมน้อยลง เพราะขนาดอนุภาคที่เล็กมากของเถ้าก้นเตาทำให้คอนกรีตมีเนื้อที่แน่นขึ้น โดยกำลังในส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้คือกำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาคนั่นเอง [13] ซึ่งเห็นได้จากกำลังอัดของคอนกรีต 20LBC300, 20MBC300 และ 20SBC300 ที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 162, 189 และ 197 กก/ซม^2 และมีกำลังอัดต่างกันมากขึ้นที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 278, 343 และ 369 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 85, 105 และ 113 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ โดยกำลังอัดที่ต่างกันเพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าย่อมมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากกว่านั่นเอง



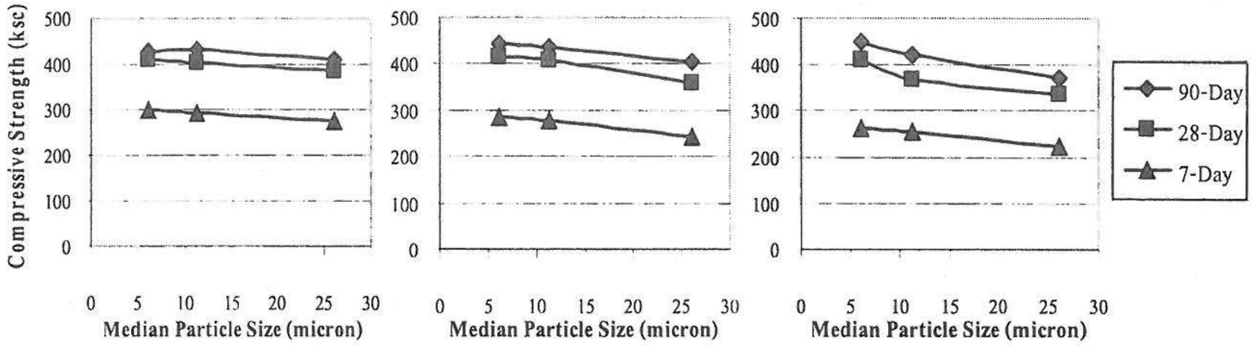
ก) อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 ข) อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 ค) อัตราการแทนที่ร้อยละ 30

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 200 กก/ซม^2 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตา



ก) อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 ข) อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 ค) อัตราการแทนที่ร้อยละ 30

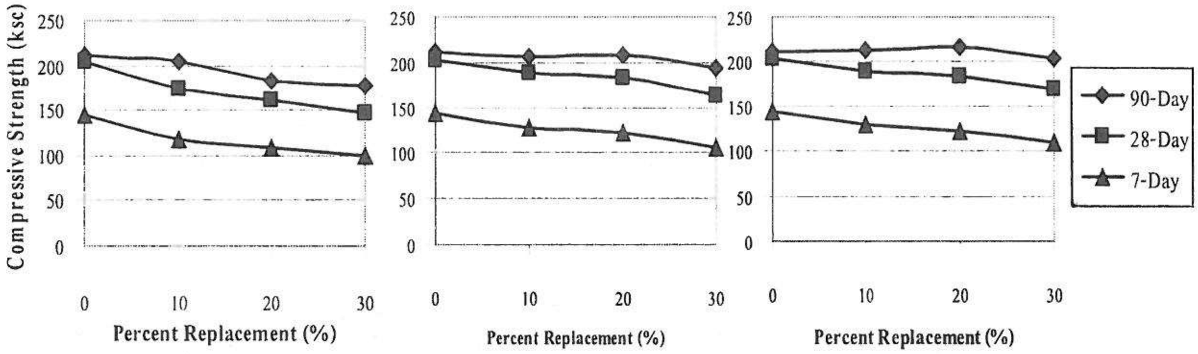
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 300 กก/ซม^2 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตา



ก) อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 ข) อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 ค) อัตราการแทนที่ร้อยละ 30

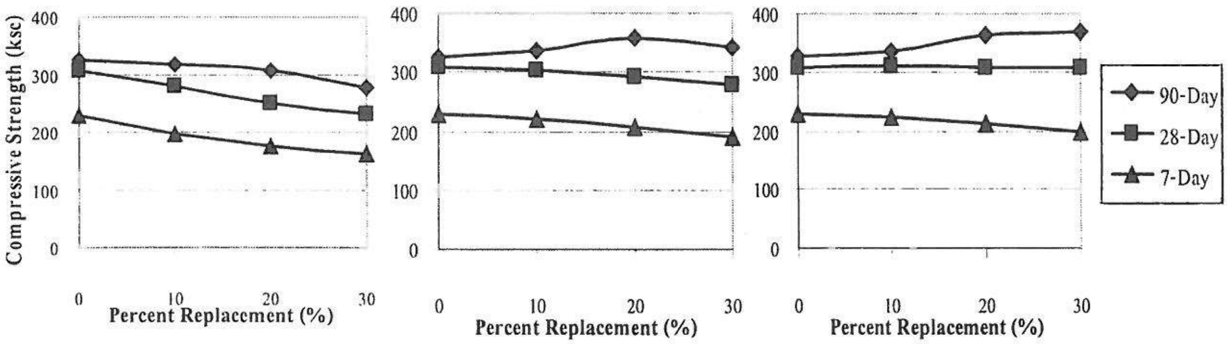
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 400 กก/ซม^2 และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าก้นเตา

พิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดและผสมเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนที่เท่ากัน ตามรูปที่ 5 ถึง 7 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (7 วัน) ยิ่งลดลง ซึ่งเป็นเรื่องปกติในการใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต เช่นคอนกรีต 10LBC200, 20LBC200 และ 30LBC200 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 118, 108 และ 99 กก/ซม^2 แต่หากเถ้าก้นเตาที่ใช้มีความละเอียดสูงมากกำลังอัดในช่วงอายุปลายของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนที่มากกว่าจะมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนที่น้อยกว่าเพราะกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่ามากกว่ากำลังที่หายไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์



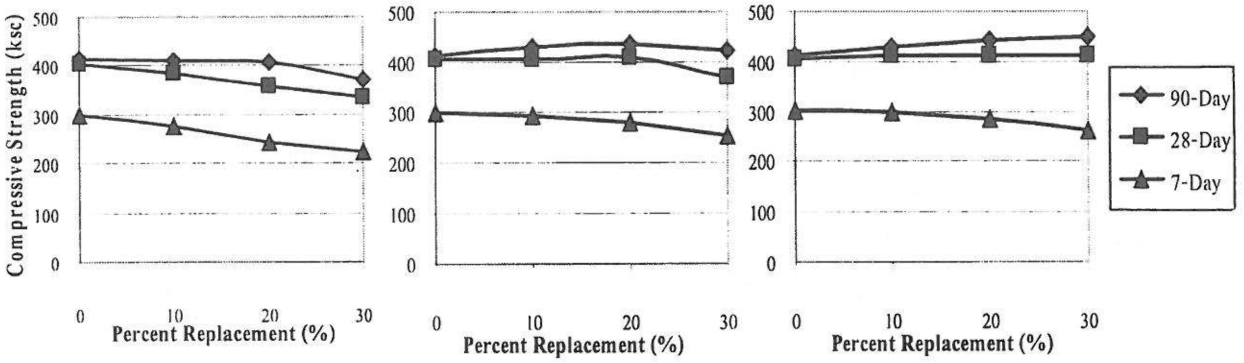
ก) LB ข) MB ค) SB

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 200 กก/ซม^2 และอัตราการแทนที่ของเถ้าก้นเตา



ก) LB ข) MB ค) SB

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 300 กก/ซม^2 และอัตราการแทนที่ของเถ้าก้นเตา



ก) LB ข) MB ค) SB

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ออกแบบ 400 กก/ซม^2 และอัตราการแทนที่ของเถ้าก้นเตา

ตัวอย่างเช่นที่อายุ 90 วัน คอนกรีต 10SBC300, 20SBC300 และ 30SBC300 มีกำลังอัดเท่ากับ 336, 365 และ 369 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีกำลังอัดเท่ากับ 326 กก/ซม^2

จากผลการทดสอบด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดเห็นได้ว่าเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติวัสดุปอซโซลานที่ดีเพราะสามารถเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตได้ โดยเฉพาะการใช้เถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูง เพราะนอกจากให้กำลังอัดที่สูงขึ้นแล้วยังเพิ่มค่ายุบตัวของคอนกรีตให้สูงขึ้นด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ

1. ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และหากเถ้าก้นเตามีความละเอียดมากขึ้นค่ายุบตัวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้น

2. เถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ตามข้อกำหนดของ ASTM C 618 สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ เพราะให้กำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุมเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และหากเถ้าก้นเตามีความละเอียดเพิ่มยิ่งขึ้นจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นทุกช่วงอายุ

3. คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่ความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่าจะมีค่าร้อยละกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่ำกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Ghafoori, and J. Bucholc, "Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 5, 1997, pp. 90-101.

[2] N. Ghafoori and Y. Cai, "Laboratory - Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash : Part I – Mechanical Properties," ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 2, 1998, pp. 121-130.

[3] N. Ghafoori and Y. Cai, "Laboratory - Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash : Part II – Long Term Durability," ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, 1998, pp. 244-251.

[4] Y. Bai and PAM. Basheer, "Influence of Furnace Bottom Ash on Workability, Compressive Strength, and Durability of Concrete," The Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 2001, pp. 157-173.

[5] M. Nisnevich, "Improving Lightweight Concrete with Bottom Ash," Concrete International, Vol. 19, No. 12, 1997, pp. 56-60.

[6] M. Nisnevich, T. Schlesinger, Y. Eshel and Y. Grof, "Lightweight Concrete with Bottom Ash – Radiological Aspects," ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 2, 1999, pp. 250-254.

[7] M. Nisnevich, G. Sirotin, Y. Dvoskin, and Y. Eshel, "Using High Volume Fly Ash in Lightweight Concrete with Bottom Ash as Aggregate," The Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Chennai, India, 2001, pp. 99-114

[8] M. Cheriaf, R. Cavalcante and J. Pera, "Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash," Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 9, 1999, pp. 1387-1391.

[9] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Utilization of Bottom Ash as a Pozzolanic Material," The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore, 2001, Paper No. 1579.

[10] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete," In 1997 Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, 1997, pp. 298-296.

[11] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Chutubtim, "Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials," Cement & Concrete Composition, Vol. 23, 2001, pp. 335-343.

[12] S. Tangtermsirikul, "Use of Bottom Ash in Concrete" Engineering Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand, 2002, pp. 169-177.

[13] GC. Isaia, ALG. Gastaldinil and R. Moraes, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete" Cement & Concrete Composition, Vol. 25, 2003, pp. 69-76.