

ผลกระทบของความละเอียดเฉื่อยด้านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์

Effect of Fly Ash Fineness on Pozzolanic Reaction of Blended Cement Paste

ธีรวัฒน์ สันศิริ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

โทร. 0-2470-9137 โทรสาร 0-2427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

โทร. 0-4324-1288 โทรสาร 0-4324-1288 E-mail : prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของความละเอียดเฉื่อยด้านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยนำเฉื่อยด้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คือเฉื่อยด้านหินที่ไม่ได้แยกขนาด มีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 ไมโครเมตร และเฉื่อยด้านหินที่ผ่านการแยกขนาด มีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 6.4 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยใช้วิธี X-Ray Diffraction (XRD) และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM)

ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสต์มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นตามอายุ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากขึ้น แต่เพสต์ผสมเฉื่อยด้านหิน พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ปริมาณการแทนที่และความละเอียดของเฉื่อยด้านหินมีผลกระทบที่สำคัญต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเฉื่อยด้านหินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง และการแทนที่เฉื่อยด้านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ยิ่งทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมเฉื่อยด้านหินที่หยาบกว่า และผลของสภาพขยายพื้นผิวของตัวอย่างด้วย SEM พบว่าเพสต์ที่ผสมเฉื่อยด้านหินที่อายุ 7 วัน มีช่องว่างมากและเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น

Abstract

This paper presents experimental results on the effect of fly ash fineness on pozzolanic reaction of hardened blended cement pastes. Fly ash was obtained from Mae Moh power plant in Thailand. Two fly ash sizes, original fly ash with median particle size of 19.1 micron and classified fly ash with median particle size of 6.4 microns were used. Percentages of fly ash in cementitious materials were 0, 20, and 40%

by weight. The water-to-binder ratio (W/B) of 0.35 was used throughout this study. XRD was used to investigate the phase composition of blended cement paste and fractured surface of blended cement paste was studied by SEM.

Test results indicated that the Ca(OH)_2 of Portland cement paste increased with an increase in curing ages. The replacement of Portland cement by fly ash decreased the Ca(OH)_2 of blended cement paste. The pozzolanic reaction of blended cement paste was significantly affected by the replacement and the fineness of fly ash. The Ca(OH)_2 of blended cement paste decreased with an increase in fly ash content. Moreover, the blended cement paste with classified fly ash was more effective to decrease the intensity of Ca(OH)_2 than the one with original fly ash. SEM results revealed that at the age of 7 days, the pastes with fly ashes were relatively porous, however, at the age of 90 days the pastes became denser.

1. บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ เริ่มต้นเมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอัลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), แคลเซียมซัลโฟอัลูมิเนตหรือเอทริงไต์ (Ettringite), และสารประกอบอื่นๆอีกไม่มาก สารประกอบเหล่านี้จะขยายเข้าไปในโพรง เมื่อไม่มีที่ว่างเหลืออยู่การทำให้ปฏิกิริยาจะหยุด ขบวนการเกิดเอทริงไต์ซึ่งถ้ามีต่อไปจะทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา, โพรงคาปิลลารี (Capillary Pore), และโพรงอากาศ (Air Void) อีกด้วย

ในซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความทนทานลดลง ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย จากการเกิด

คาร์บอนเนชัน การกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากกรดและซัลเฟต เป็นต้น เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่ละลาย และถูกชะล้าง (Leach) ออกมาได้ง่าย นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้กำลังค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C-S-H ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงต้องลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้สารปอซโซลานเพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เนื่องจากสารปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้สารประกอบ C-S-H ซึ่งนอกจากจะเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีตแล้วยังทนสภาพต่อการกัดกร่อนได้สูงขึ้นอีกด้วย

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า มีลักษณะเป็นผง ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด องค์ประกอบหลักทางเคมีได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในปัจจุบันประเทศไทยมีเถ้าถ่านหินประมาณ 3.5 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอนาคต นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติทางกายภาพ แต่มีนักวิจัยส่วนน้อยที่ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติโครงสร้างขนาดเล็กเช่น ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ ในบทความนี้จึงให้ความสนใจถึงผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อการพัฒนาปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์ โดยทำการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 2 ขนาดความละเอียดคือ "OFA" (Original Fly Ash) หมายถึงเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการแยกขนาด และ "CFA" (Classified Fly Ash) หมายถึงเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดด้วยเครื่อง Air Classifier ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของ OFA และ CFA พบว่าจัดอยู่ใน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบเคมีของเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินก่อนการแยกขนาด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 2, 3, 4]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุประสาน และผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคแสดงในรูปที่ 2 เถ้าถ่านหิน OFA และ CFA มีขนาดอนุภาคที่ $d_{50} = 19.1$ และ 6.4 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของ OFA และ CFA มีค่าร้อยละ 31.0 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 34 ตามมาตรฐาน

ASTM C 618 ความถี่จำเพาะของ OFA และ CFA มีค่าเท่ากับ 2.33 และ 2.56 ตามลำดับ โดยพบว่าความถี่จำเพาะของเถ้าถ่านหินจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีความละเอียดมากขึ้น

รูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction) ของเถ้าถ่านหิน OFA และ CFA เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะส่วนประกอบที่เป็นผลึกคือ Quartz (SiO_2), Mullite (Al_2SiO_5), Hematite (Fe_2O_3), และ Anhydrite (CaSO_4) จากผลการทดสอบพบว่าจุดยอด (Peak) ของผลึกต่างๆระหว่าง OFA และ CFA มีความแตกต่างกันไม่มากนัก จากการศึกษาปริมาณส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) ของ Chindaprasirt และ คณะ [4] พบว่าปริมาณ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีประมาณร้อยละ 85-90 สูงกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 70-75 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Berry และ คณะ [5] พบว่าปริมาณ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น เมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

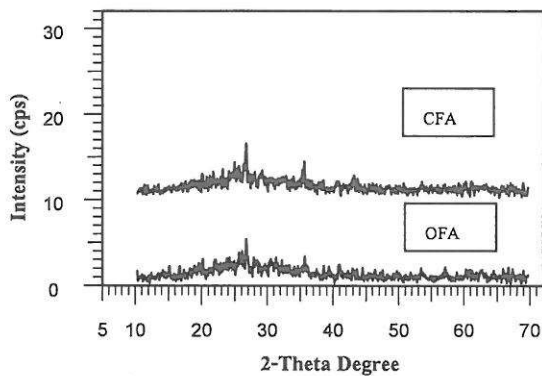
รูปที่ 3, 4, และ 5 แสดงภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, OFA, และ CFA ตามลำดับ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน (ดูรูปที่ 3) ส่วน OFA ส่วนมากมีรูปร่างกลม ขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่รูปร่างไม่แน่นอน ผิวไม่เรียบ (ดูรูปที่ 4) และ CFA มีรูปร่างเป็นทรงกลมและผิวเรียบ (ดูรูปที่ 5) CFA จะมีขนาดที่เล็กกว่า OFA รูปร่างที่กลมของเถ้าถ่านหินเกิดจากการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิสูง [6]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหิน OFA, และ CFA

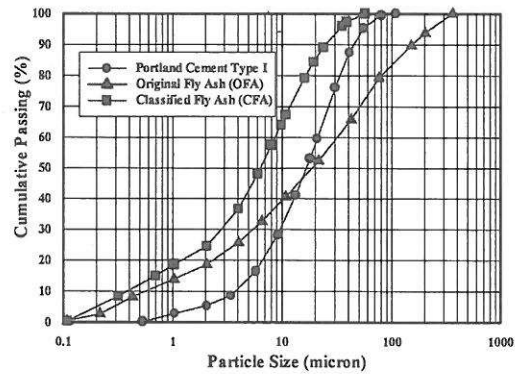
Chemical Composition (%)	Cement Type I	Fly Ash	
		Original	Classified
SiO_2	20.9	45.69	44.72
Al_2O_3	4.76	24.59	23.69
Fe_2O_3	3.41	11.26	11.03
CaO	65.41	12.15	12.67
MgO	1.25	2.87	2.63
SO_3	2.71	1.57	1.28
Na_2O	0.24	0.07	0.07
K_2O	0.35	2.66	2.87
LOI	0.96	1.23	1.42

ตารางที่ 2 ความถี่จำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหิน OFA, และ CFA

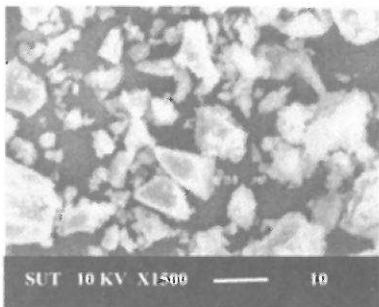
Sample	Median Particle Size (μm)	Retained on Sieve No. 325 (%)	Specific Gravity
Cement	14.1	9.4	3.15
OFA	19.1	31.0	2.33
CFA	6.4	0	2.56



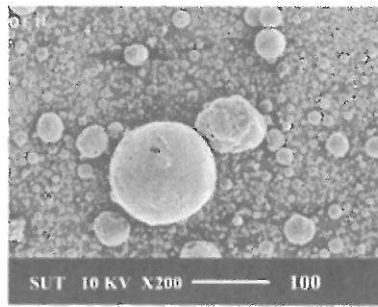
รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (XRD) ของเถ้าถ่านหิน OFA และ CFA



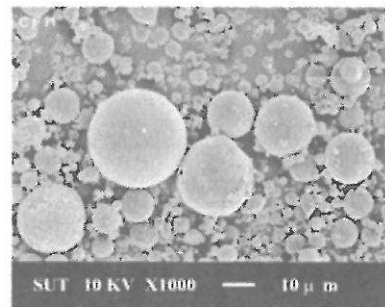
รูปที่ 2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหิน OFA, และ CFA



รูปที่ 3 ภาพขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4 ภาพขยายของเถ้าถ่านหิน OFA



รูปที่ 5 ภาพขยายของเถ้าถ่านหิน CFA

2.2 อัตราส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำภายหลังจากการหล่อตัวอย่างและถอดแบบออกที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 ทดสอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดย X-Ray Diffraction (XRD)

หุบก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆประมาณ 5-10 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียสประมาณ 5 นาทีเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส ความดัน 0.5 ปาสกาลเป็นเวลา 2 วัน [7, 8, 9] หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 นำชิ้นตัวอย่างที่แห้งไปเก็บไว้ในโถแก้วที่ความดันสูญญากาศ ซึ่งมีซิลิกาเจลดูดความชื้น (Dissicator with Silica Gel) และนำตัวอย่างไปทดสอบ XRD เพื่อวิเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์

2.3.2 ถ่ายภาพขยายของเพสต์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

หุบก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ กว้างประมาณ 10 มม. x 10 มม. หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำก้อนตัวอย่างให้แห้งเหมือนกับตัวอย่างที่นำไปทดสอบ XRD นำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบด้วยทอง และนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง SEM

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การวิเคราะห์ Ca(OH)_2 โดย X-Ray Diffraction (XRD)

รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ (PC Paste), เพสต์OFA20, และ CFA20 ที่อายุการบ่ม 28 วัน และรูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากรูปพบว่าจุดยอด (Peak Intensity) ของ Ca(OH)_2 โดยการหักเหของรังสีปรากฏที่มุม 2-theta เท่ากับ 18.09, 28.75, 34.14, 47.12, และ 50.85 องศา จุดยอดของ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแตกต่างกันไม่มากนัก เพราะในช่วงอายุ 28วัน ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินจะเกิดขึ้นน้อย โดยที่อายุ 1 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นเพียง ร้อยละ 7 เท่านั้น และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน อายุ 28 วันปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นร้อยละ 36 แต่เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นเป็น 90 วัน มีปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นถึงร้อยละ 62 [10, 11, 12, 13]

ผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน แสดงไว้ในรูป 8, 9 และรูปที่ 10, 11 ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นและมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในเพสต์ พบว่าจุดยอด Ca(OH)_2 ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดที่อายุ 90 วัน จุดยอด Ca(OH)_2 ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาปอซโซลานคือความละเอียดและปริมาณของ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าถ่านหินที่มีร้อยละของ Glassy Phase สูงมีแนวโน้มว่าจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่มี Glassy Phase ต่ำกว่า [14] นอกจากนี้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและปริมาณของ Glassy Phase สูง ส่งผลให้ซิลิกาและอลูมินาทำปฏิกิริยาได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ผลของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินากับ Ca(OH)_2 ได้ C-S-H ทำให้ปริมาณของ Ca(OH)_2 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด [8, 15, 16] ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) ของสารละลายในช่องว่างเพสต์ (Pore Solution) มีค่าสูงเพียงพอ ค่า pH ประมาณ 13.2 หรือ 13.3 สามารถละลายส่วนประกอบที่ไม่เป็นผลึก (Non-Crystalline หรือ Glassy Phase) ส่วนที่เป็น Glassy Phase ที่สำคัญของเถ้าถ่านหินในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานคือ SiO_2 และ Al_2O_3 เมื่อ Glassy Phase ละลายและทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้สารประกอบหลักที่ก่อให้เกิดแก่เพสต์คือ C-S-H [13, 17]

สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณมาก (ร้อยละ 40) พบว่าปริมาณ Ca(OH)_2 มีน้อยกว่าเพสต์ที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 20 เนื่องจากเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดขึ้นน้อย ทำให้ปริมาณ Ca(OH)_2 มีน้อย ค่า pH ของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างต่ำ ส่งผลให้การละลาย Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นได้น้อย การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่ำด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่ต่ำกว่า [18]

3.2 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาปอซโซลาน โดย Scanning Electron Microscope (SEM)

การพัฒนาโครงสร้างระดับอนุภาคของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินสังเกตจากภาพขยายโดยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 12 ถึง 15

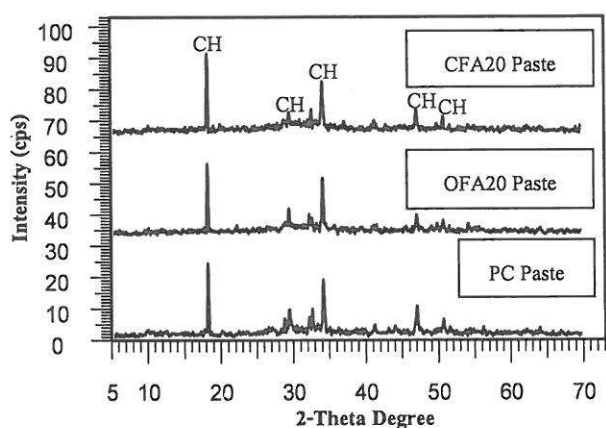
ที่อายุ 7 วัน เพสต์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 12ก และ 13ก) พบว่าโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์มีความพรุนและช่องว่างมาก ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันบนพื้นผิวอนุภาคเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นน้อย มีบางส่วนของพื้นผิวอนุภาคเถ้าถ่านหินถูกคลุมด้วยชั้นของผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มยาวขยายตัวเข้าไปในช่องว่าง ในช่วงอายุต้นของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมี 2 กระบวนการเกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลจากการกระจายตัวของเถ้าถ่านหินทำให้เกิดขบวนการ Nucleation จากกระบวนการปฏิกิริยา

ไฮเดรชัน ได้สารประกอบ เช่น C-S-H และ Ca(OH)_2 ส่วนระยะแรกของการกระบวนการ Nucleation เถ้าถ่านหินอยู่ในสภาวะพักตัว (Incubation Period) ทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) อุดช่องว่างในเพสต์ เมื่อเถ้าถ่านหินกระจายตัวในเพสต์ พื้นผิวของเถ้าถ่านหินทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect) [13, 15, 19]

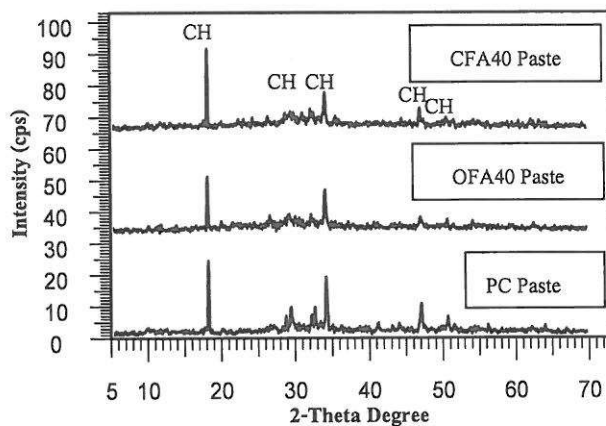
ที่อายุ 28 วันของเพสต์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 12ข และ 13ข) พบว่ามี 3 ลักษณะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าถ่านหินคือ พื้นผิวของเถ้าถ่านหินมีลักษณะผิวเรียบ, พื้นผิวถูกทำลาย (Etching), และพื้นผิวถูกคลุมด้วยชั้นของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา บริเวณพื้นผิวของเถ้าถ่านหินที่ถูกทำลายเป็นตัวชี้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ในอายุช่วงต้นพบอนุภาคของเถ้าถ่านหินบางส่วนยังไม่ทำปฏิกิริยา และบางส่วนของพื้นผิวอนุภาคเถ้าถ่านหินถูกทำลายโดยการละลาย Glassy Phase ของเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับ Ca(OH)_2 ที่พื้นผิวของอนุภาคเถ้าถ่านหิน [13, 20, 21] ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นที่ผิวชั้นในของเถ้าถ่านหินเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นเมื่ออลูมินาและซิลิกาถูกทำให้ละลายจาก Glassy Phase ของเถ้าถ่านหิน โดยที่ค่า pH ของสารละลายในช่องว่างมีค่าประมาณ 13.2 หรือ 13.3 และมีการแพร่ออกมาที่ผิวนอกของเถ้าถ่านหิน ทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ในช่องว่างทำให้เกิดสารประกอบ C-S-H สารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยารอบอนุภาคของเถ้าถ่านหินมี 2 ชั้น ชั้นนอกสุดเกิดจากผลของ Nucleation และชั้นในเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน [13, 22, 23]

อายุ 90 วันของเพสต์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 12ค และ 13ค) เพสต์มีความแน่นมากขึ้น เนื่องจากผลของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่ออายุมากความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำในช่องว่างจะสูง สามารถละลาย Glassy Phase ที่ผิวของอนุภาคของเถ้าถ่านหินได้ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของเพสต์มากขึ้น [20, 21] จากผลการทดสอบพบว่าอนุภาคของเถ้าถ่านหินจำนวนมากทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ทำให้สารประกอบ C-S-H เพิ่มขึ้นด้วย พื้นผิวของอนุภาคเถ้าถ่านหินถูกคลุมด้วย C-S-H ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลาน นอกจากนั้นยังพบว่ามีอนุภาคของเถ้าถ่านหินบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่ช่วยอุดช่องว่างในเพสต์ (Filling Effect) ส่งผลให้ได้โครงสร้างเพสต์ที่แน่นขึ้น

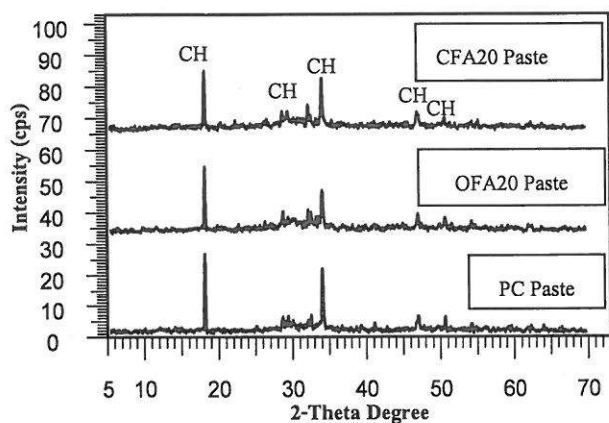
สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด (เพสต์ CFA20 และ CFA40) แสดงในรูปที่ 14 และ 15ก, ข, ค ตามลำดับ การเกิดปฏิกิริยาจะคล้ายกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีอนุภาคที่เล็กทำให้การอุดช่องว่าง การเกิดขบวนการ Nucleation และปฏิกิริยาปอซโซลานดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น



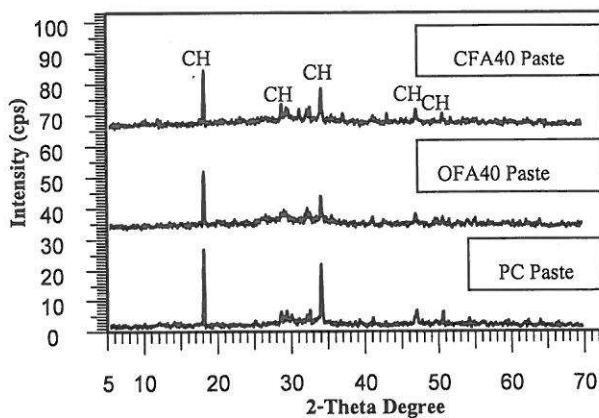
รูปที่ 6 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ CFA20 อายุ 28 วัน



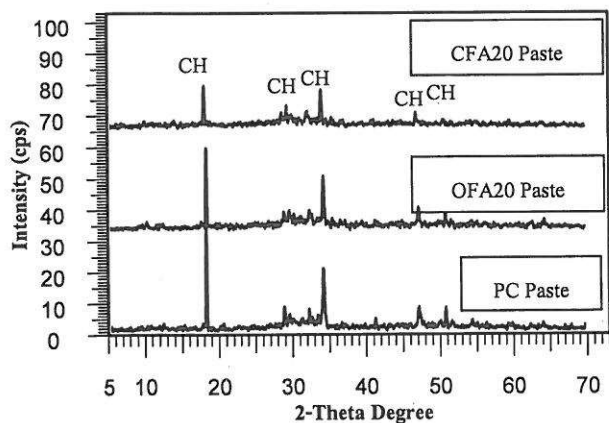
รูปที่ 7 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 อายุ 28 วัน



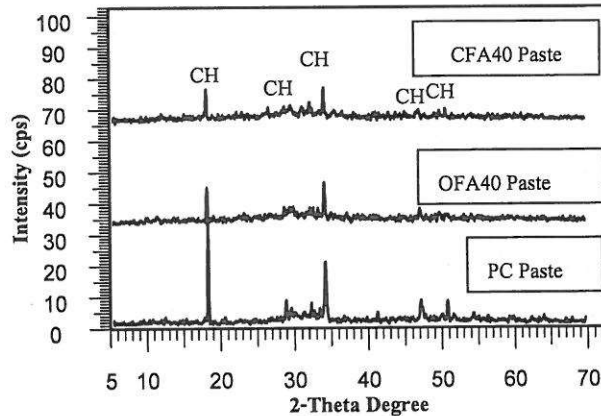
รูปที่ 8 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ CFA20 อายุ 60 วัน



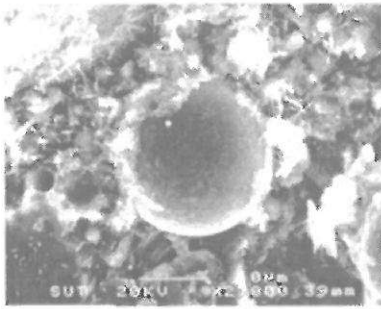
รูปที่ 9 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 อายุ 60 วัน



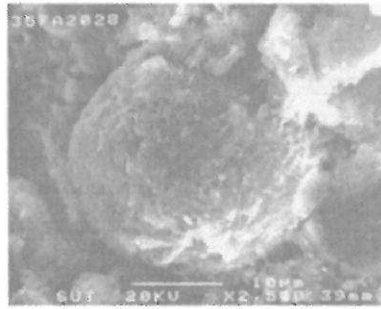
รูปที่ 10 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ CFA20 อายุ 90 วัน



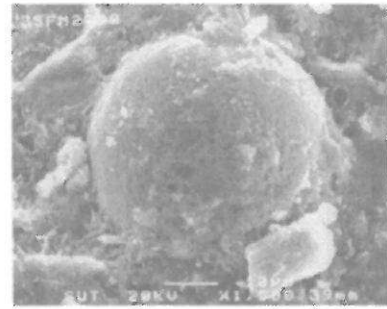
รูปที่ 11 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 อายุ 90 วัน



ก) 7 วัน

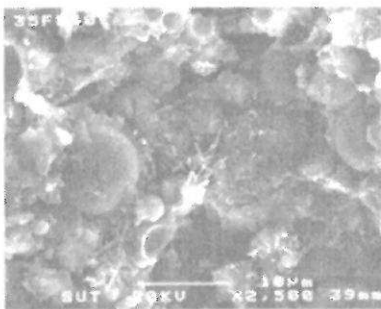


ข) 28 วัน

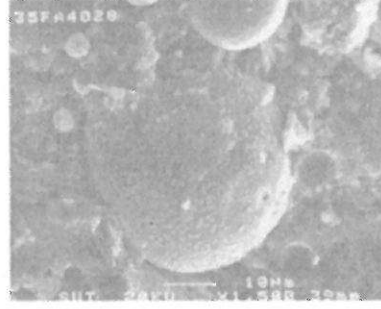


ค) 90 วัน

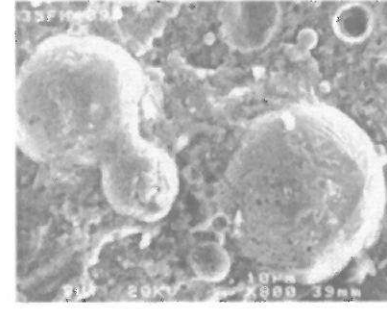
รูปที่ 12 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ OFA20 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน



ก) 7 วัน

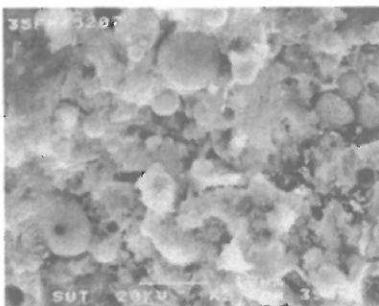


ข) 28 วัน

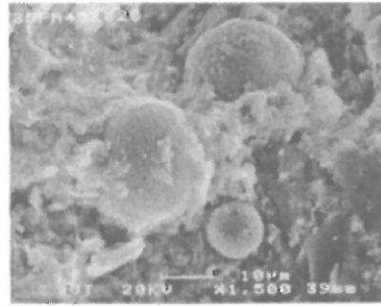


ค) 90 วัน

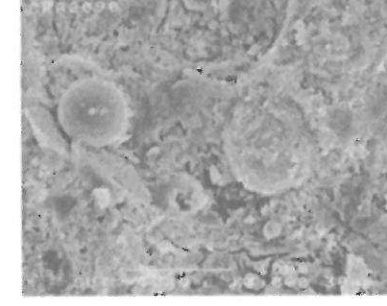
รูปที่ 13 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ OFA40 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน



ก) 7 วัน

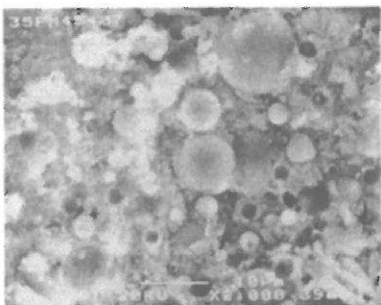


ข) 28 วัน

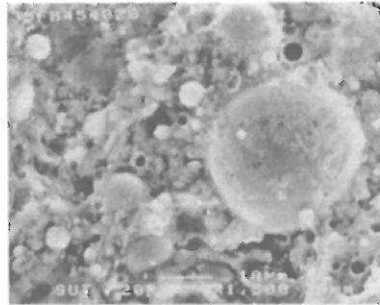


ค) 90 วัน

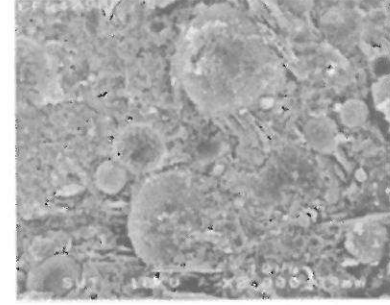
รูปที่ 14 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ CFA20 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน



ก) 7 วัน



ข) 28 วัน



ค) 90 วัน

รูปที่ 15 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ CFA40 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่เถ้าถ่านหินในพาสต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อพาสต์มีอายุมากขึ้น

2. เมื่อพาสต์มีอายุมากขึ้น การแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดให้มีขนาดเล็กในพาสต์ ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของพาสต์ลดลงมากกว่าและเร็วกว่าพาสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด เป็นการยืนยันผลการทดสอบในระดับจุลภาคว่าเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด

3. พาสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด ทำให้พาสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในพาสต์ ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect) นอกจากนี้ยังช่วยอุดช่องว่างภายในพาสต์ (Filling Effect) และทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการอุดมศึกษาภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์ สาขาวิชาแคลนเพื่อศึกษาภายในประเทศตามความต้องการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Erdogdu, P. Turker, Effect of fly ash particle size on compressive strength of portland cement fly ash mortars, *Cem Concr Res*, 28 (1998) 1217-1222.
- [2] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, J. Woranisrakul, P. Keatkrai, P. Nimityongskul, C. Chindaprasirt, C. Tangsathikulchai, A. Lertprasertwong, T. Ketranaborvorn, Classifying and selecting of Mae Moh fly ash for using as a cement based material. In : CEPSI 12 th, Thailand, (1998). p. 226-234.
- [3] E. Angsuwattana, C. Jaturapitakkul, A. Siripanichgorn, K. Kiattikomol, T. Ketranaborvorn, Use of classified Mae Moh fly ash in high strength concrete. Sixth CANMET/ACI Inter. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplement Papers, Thailand, (1998), p. 49-60.
- [4] P. Chindaprasirt, S. Ruangsiriyaku, H.T. Cao, L. Bucea, Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics, strength and drying shrinkage development of blended cement mortars", The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore, 5-7 December 2001, Paper No.1191, p. 6.
- [5] E.E. Beery, R.T. Hemmings, W.S. Langley, G.G. Carrete., Beneficiated Fly ash: Hydration, Microstructure, and Strength Development in Portland Cement Systems, in: V.M. Malhotra (Ed.), Third CANMET/ACI, Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (SP-114), Detroit, 1989, pp. 241-273.
- [6] Alonso JL, Wesche K. Characterization of fly ash. In: Wesche K, editor. Fly ash in concrete properties and performance. RILEM report, vol.7; (1991), pp. 3-23.
- [7] C. Galle, Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven, vacuum, and freeze-drying, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1467-1477.
- [8] L. Konecny, S.J. Naqui, The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 23 (1993) 1223-1228.
- [9] A. Kumar, D.M. Roy, The effect of desiccation on the porosity and pore structure of freeze dried hardened portland cement and slag-blended pastes, *Cem. Concr. Res.* 16 (1986) 74-78.
- [10] S. Li, D.M. Roy, and A. Kumar, Quantitative determination of pozzolanas in hydrated systems of cement or $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with fly ash or silica fume, *Cem. Concr. Res.* 15 (1985) 1079-1086.
- [11] R.K. Dhir, F.H. Hubbard, J.G.L. Munday, M.R. Jones, S.L. Duerden, Contribution of PFA to concrete workability and strength development, *Cem. Concr. Res.* 18 (1988) 277-289.
- [12] B.K. Marsh, R.L. Day, Pozzolan and cementitious reactions of fly ash blended cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 18 (1988) 301-310.
- [13] A.L.A. Fraay, J.M. Bijen, Y.M. de Haan, The reaction of fly ash in concrete: A critical examination, *Cem. Concr. Res.* 19 (1989) 235-246.
- [14] H. Jun-Yuan, B.E. Scheetz, and D.M., Roy, Hydration of fly ash-portland cement, *Cem. Concr. Res.* 14 (1984) 505-511.
- [15] F. Sybert, U. Wiens, Effect of fly ash fineness on hydration characteristics and strength development, International Conference on Blended Cement in Construction, University of Sheffield, UK (1991) 152-165.

- [16] H.A. Harris, J.L. Thompson, T.E. Murphy, Factor affecting the reactivity of fly ash from western coals, *Cem. Concr. Aggr.* 9 (1987) 34-37.
- [17] E.E. Beery, R.T. Hemmings, B.J. Cornelious, Mechanism of hydration reaction in high- volume fly ash pastes and mortars, *Cem. Concr. Compos.* 12 (4) (1990) 253-261.
- [18] M.H. Zhang, W. Sun, H.D. Yan, Hydration of high-volume fly ash cement paste, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 445-452.
- [19] D.G. Montgomery, Fly ash in concrete – A microstructure study, *Cem. Concr. Res.* 11 (1981) 591-603.
- [20] E.E. Berry, R.T. Hemmings, M.H. Zhang, B.J. Cornelious, D.M. Golden, Hydration in high-volume fly ash binders, *ACI Mater. J.* 91 (1994) 382-389.
- [21] A. Xu, S.L. Sarker, Microstructure development in high-volume fly ash cement system, *ASCE J. Mater. Civ. Eng.* 6 (1994) 117-136.
- [22] X. Aimin, Microstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste, *Cem. Concr. Res.* 21 (1991) 1137-1147.
- [23] H.T. Cao, D.W.S. Ho, S. Guirguis, Hydration characteristics of cements containing fly ash, *Concrete for the Nineties, International Conference on the Use of Fly Ash, Slag, Silica Fume and Other Silicious Materials in Concrete, Australia* (1990)