

ผลกระทบของเถ้านหินต่อคุณสมบัติของเพสต์

ธีรวัฒน์ สินศิริ¹, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล² และ ปริญญา จินดาประเสริฐ³

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างมานานแล้ว โดยพบได้จากสิ่งก่อสร้างทั่วไป เช่น ตึก บ้าน ถนน สะพาน เป็นต้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีของการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ให้ความสำคัญกับความทนทานมากขึ้น เพราะจะมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ปัญหาที่ทำให้ความคงทนลดลง คือ การเกิดสนิมในเหล็ก, การกัดกร่อนจากซัลเฟต, สภาพแวดล้อมที่เป็นกรด, ปฏิกิริยาอัลคาไลกับมวลรวม, การแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน, การตกผลึกของเกลือ, การเกิดคาร์บอนเนชัน เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวมาข้างต้นพบว่ามีกลไกที่คล้ายกัน คือ เกิดจากการซึมผ่านของน้ำในรูปของตัวทำละลาย (น้ำทะเล, น้ำที่มีซัลเฟต, น้ำที่มีกรด ฯลฯ) หรือก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน) เข้ามาในโพรงหรือรูพรุนของโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นการป้องกันหรือลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ได้แก่ การออกแบบให้คอนกรีตมีการซึมผ่านต่ำ, บ่มคอนกรีตให้นานขึ้น, ปรับปรุงคุณภาพส่วนผสมหลักและส่วนผสมเพิ่ม, เคลือบผิวด้วยสารกันซึม เป็นต้น

พฤติกรรมคอนกรีตสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ การพัฒนาโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ เริ่มต้นเมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอทริงไกต์ (Ettringite), และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา, โพรงคาปิลลารี (Capillary Pore), และโพรงอากาศ (Air Void) ด้วย เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมคอนกรีตมากยิ่งขึ้นการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทความนี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์และผลกระทบของเถ้านหินต่อการพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์

1. คุณสมบัติของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน พบว่าปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ถ้ำถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยแยกขนาดให้มีความละเอียดมากขึ้นทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 2.33 เป็น 2.54 ส่วนความละเอียดของเถ้านหินที่แยกขนาด CFA มีค่าเท่ากับ 5070 cm^2/g ในขณะที่ความละเอียดของเถ้านหินที่ไม่ได้ผ่านการแยกละเอียดและปูนซีเมนต์มีค่าเป็น 3570 และ 3050 cm^2/g ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงการกระจายของวัสดุประสาน พบว่าหลังจากการแยกเถ้านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น ถ้ำถ่านหินมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง 19.1 ไมโครเมตรเป็น 6.4 ไมโครเมตร ลักษณะผิวของเถ้านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดส่วนมากมีรูปร่างกลม มีอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ถึง 150 ไมครอน โดยผิวของขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะไม่เรียบ มีรูปร่างไม่แน่นอน ดัง

แสดงในรูปที่ 2ก ขณะที่แก้ด้านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีรูปร่างกลมมน ผิวเรียบ ดังในรูปที่ 2ข ส่วนปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอน (รูป 2ก)

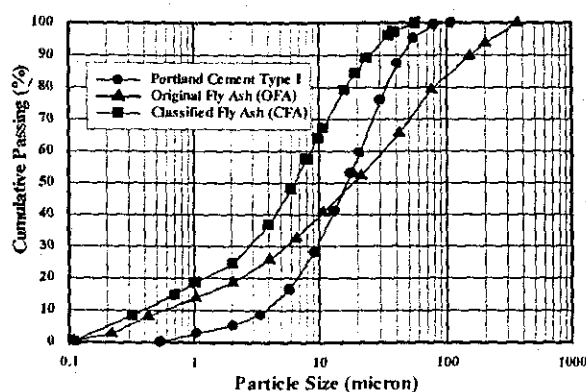
ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่าแก้ด้านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดและผ่านการแยกขนาด มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันและจัดอยู่ใน Class F ตาม ASTM C 618 เนื่องจากมีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 83.39 และ 80.61 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ร้อยละ 70 มีค่า LOI (Loss On Ignition) และปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 6 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

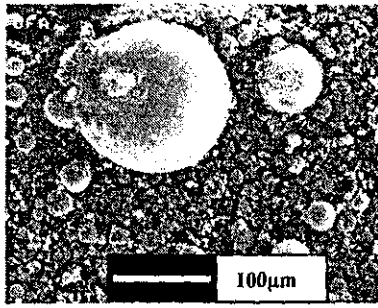
Property	Portland Cement	Original Fly Ash (OFA)	Classified Fly Ash (CFA)
Specific Gravity	3.15	2.33	2.54
Retained on Sieve No. 325 (%)	4.8	31.0	0.0
Blaine Fineness (cm^2/g)	3570	3050	5070
Median Particle Size, d_{50} (micron)	14.1	19.1	6.4

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

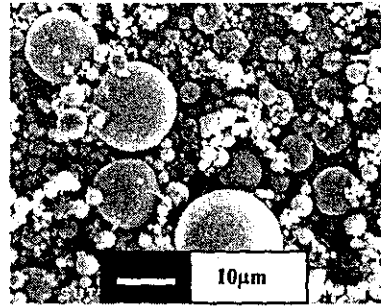
Chemical Composition (%)	Cement Type I	Original Fly Ash (OFA)	Classified Fly Ash (CFA)
SiO_2	20.90	45.69	44.72
Al_2O_3	4.76	24.59	23.69
Fe_2O_3	3.41	11.26	11.03
SO_3	2.71	1.57	1.28
CaO	64.41	12.15	12.67
MgO	1.25	2.87	2.63
Na_2O	0.24	0.07	0.07
K_2O	0.35	2.66	2.87
Loss On Ignition	0.39	1.23	1.42
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	83.39	80.61



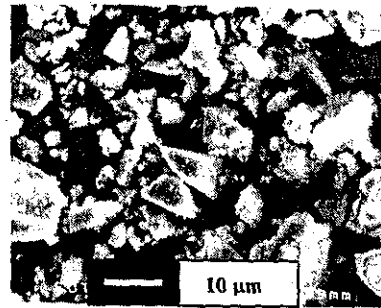
รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน



ก. แก้วถ่านหินไม่ได้แยกขนาด



ข. แก้วถ่านหินแยกขนาด



ค. ปูนซีเมนต์

รูปที่ 2 ภาพขยายกำลังสูงของวัสดุ

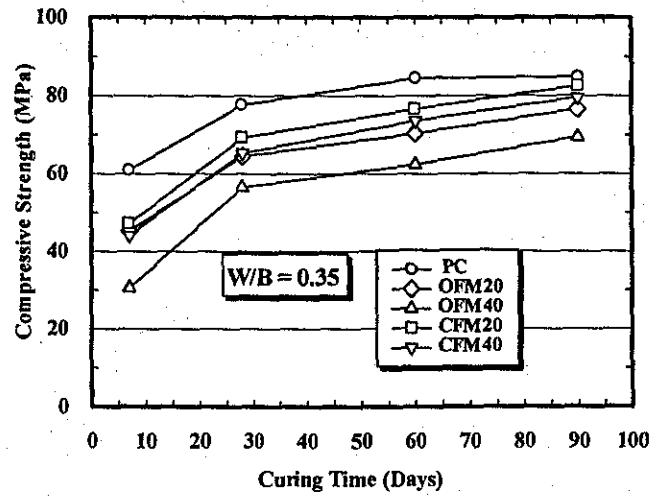
3. กำลังอัดของเพสต์

ผลทดสอบกำลังอัดแสดงไว้ในรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัดของเพสต์ OFA และ CFA ทุกอัตราส่วน ให้กำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ และเมื่ออัตราส่วนที่ด้วย OFA และ CFA เพิ่มขึ้น ค่าของกำลังอัดของเพสต์ก็ลดลง ทุกอายุของการบ่มจนถึง 90 วัน แต่มีแนวโน้มว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินจะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่อมีอายุมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด

ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของเพสต์ OFA20 และ OFA40 มีค่าเท่ากับ 45.2 และ 30.6 เมกะปาสคาล โดยที่ซีเมนต์เพสต์มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 60.9 เมกะปาสคาล ขณะที่เพสต์ CFA20 และ CFA40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 47.2 และ 44.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน พบว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่มีขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ เช่น กำลังอัดของเพสต์ CFA20 และ OFA20 มีค่าเท่ากับ 47.2 และ 45.2 เมกะปาสคาล ส่วนเพสต์ CFA40 และ OFA40 มีค่าเท่ากับ 44.1 และ 30.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่ออายุของเพสต์เพิ่มเป็น 28 และ 60 วัน พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดของเพสต์เหมือนกับที่อายุ 7 วัน

ที่อายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดของเพสต์ OFA20, OFA40, CFA20, และ CFA40 มีค่าเท่ากับ 74.5, 61.4, 81.4, และ 78.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับและยังคงต่ำกว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเท่ากับ 84.8 เมกะปาสคาล ในกรณีของเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินทั้งหมดพบว่าเพสต์ CFA20 ให้กำลังอัดสูงสุด และมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์เมื่ออายุมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเพสต์ OFA40 ให้กำลังอัดต่ำสุด เพราะขนาดของอนุภาคที่ใหญ่และมีอัตราส่วนการแทนที่ที่สูง

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการแยกขนาดของแก้วถ่านหินให้มีขนาดเล็กลง กำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ทำให้กำลังอัดแตกต่างกัน เนื่องจากปัจจัย 3 ประการ ประการแรก คือ ขนาดอนุภาคของแก้วถ่านหินที่ต่างกันเพราะแก้วถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและมากกว่าแก้วถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ ประการที่สอง เนื่องจากผลของการอัดตัว (Packing Effect) ของอนุภาคเพราะแก้วถ่านหินที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดสูง จะแทรกอยู่ในโพรงของเพสต์ ทำให้เพสต์แน่นขึ้น เป็นผลให้กำลังอัดสูงขึ้น และประการที่สาม ผลจากการกระจายตัวของแก้วถ่านหินในเพสต์ทำให้เกิดกระบวนการ Nucleation กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น



รูปที่ 3 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA, และ เพสต์ CFA

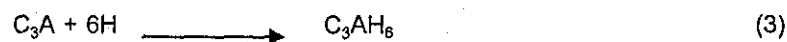
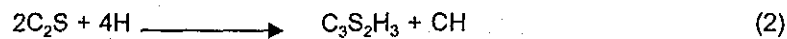
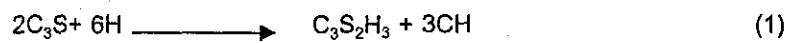
หมายเหตุ : PC = ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

OFA20, OFA40 = เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด (OFA) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ

CFA20, CFA40 = เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกขนาด (CFA) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ

4. โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ในสภาพแข็ง

รูปที่ 4 แสดงแผนภูมิการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ เริ่มต้นจากเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะขยายตัวเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง ผลผลิตไฮเดรชันเรียกรวมๆ ว่าซีเมนต์เจล (Cement Gel) โดยปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) เป็นได้ดังสมการดังนี้



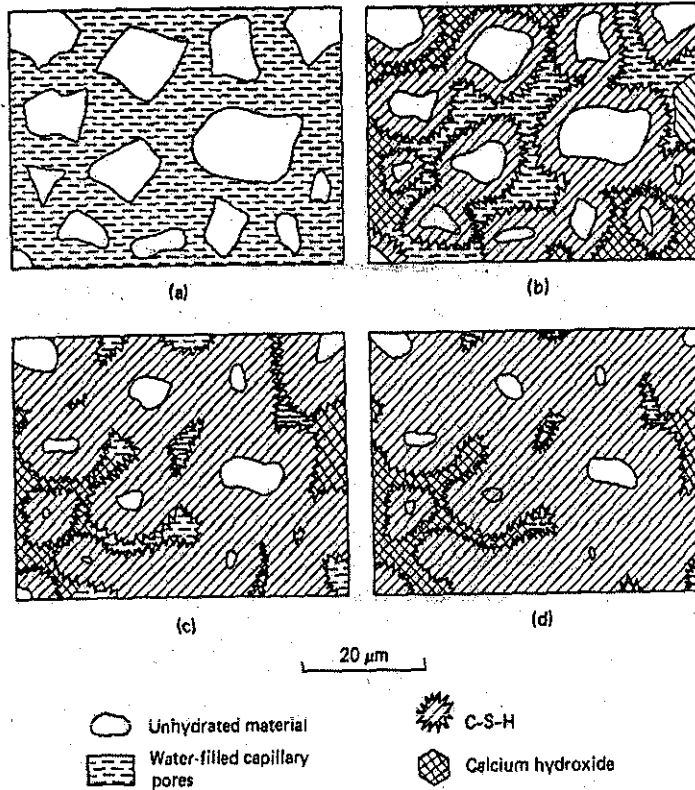
รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่อโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ โดยพิจารณาที่ปริมาตรเท่ากัน พบว่าที่ w/c = 0.65 อนุภาคของปูนซีเมนต์จะอยู่ห่างกัน เมื่อ w/c ลดลงเท่ากับ 0.25 อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่ใกล้กัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลผลิตของปฏิกิริยาจะอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น ที่ระยะเวลาเท่ากัน พิจารณา w/c = 0.65 การพัฒนาผลผลิตจากปฏิกิริยาให้เชื่อมโยงถึงกันต้องใช้เวลาานาน มีปริมาณน้ำเกินความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ส่วนประกอบของน้ำที่เหลือจะเป็นตัวกลางในการนำสารอันตรายเข้ามาทำอันตรายต่อคอนกรีต และถ้ามีส่วนเกินนั้นก็ทำให้เกิดโพรงในคอนกรีต ทำให้ของเหลวหรือก๊าซที่สามารถทำอันตรายกับคอนกรีตซึมเข้ามาในโพรงของคอนกรีต และทำปฏิกิริยากับสารประกอบในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพและความทนทานลดลง

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง, ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ (Voids) และน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว [3]

1. ของแข็ง ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นสารที่ให้กำลังกับคอนกรีต มีปริมาณมากที่สุดนในซีเมนต์เพสต์ คือ มีอยู่ประมาณร้อยละ 50-70, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์มีอยู่ประมาณร้อยละ 10-15, แคลเซียมไฮ

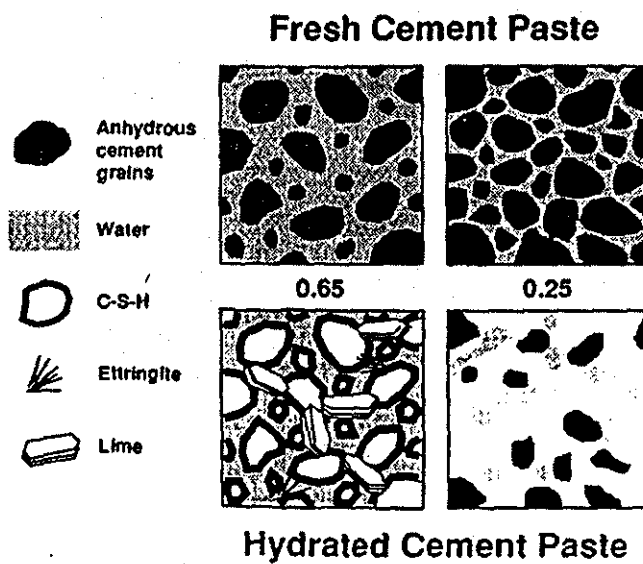
ดรอกไซด์เป็นสารที่เหลือ ซึ่งแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตรของซีเมนต์เฟส และอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เฟสด้วย

2. ช่องว่างในซีเมนต์เฟส ได้แก่ ช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Voids) คือ ช่องว่างที่ไม่ถูกอุดด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง และโพรงอากาศ (Air Voids) คือ ช่องว่างอากาศ



รูปที่ 4 แผนภูมิการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟส [1]

(a) เริ่มผสม; (b) อายุ 7 วัน; (c) อายุ 28 วัน; (d) อายุ 90 วัน



รูปที่ 5 ผลกระทบของ w/c ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เฟส [2]

3. น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว (Hydrate Cement Paste, HCP) น้ำที่อยู่ใน HCP สามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ การแบ่งแยกประเภทของน้ำที่อยู่ใน HCP แบ่งโดยดูจากความยากง่ายในการเคลื่อนน้ำออกจาก HCP ซึ่งน้ำสามารถออกจาก HCP เมื่อได้รับความร้อน ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาวะแข็งประกอบไปด้วยสารต่างๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามความยากง่ายในการกำจัดออกไป ดังนี้

3.1 น้ำที่สามารถระเหยได้ง่าย (Water Vapour) เป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ของซีเมนต์เพสต์ น้ำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิ

3.2 น้ำคาปิลลารี (Capillary Water) คือ น้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นน้ำอิสระจากอิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแบ่งน้ำคาปิลลารีได้ 2 ชนิด ชนิดที่ 1 น้ำในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร เรียกน้ำดังกล่าวว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้วจะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่ 2 เป็นน้ำที่เกิดจากแรงตึงคาปิลลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด 5-50 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อน้ำชนิดนี้ระเหยออกไปจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เกิดการหดตัวได้

3.3 น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือ น้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบๆผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนาแน่นไม่เกิน 1.3 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกขับออกโดยทำให้เพสต์แห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 การสูญเสียน้ำในส่วนนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว

3.4 น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจากโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้อยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เพสต์ (มีขนาดเล็กกว่า 2.6 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 11% โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

3.5 น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) เป็นน้ำที่เป็นส่วนประกอบของผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Product) น้ำในส่วนนี้เข้าไปใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์และน้ำสลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition) เช่น การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ CaO กับน้ำ (H₂O)

เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 100-400°C ปริมาณน้ำประเภทต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์จะระเหยไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 400-1,000°C สารประกอบต่างๆในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลงหรือเป็นธาตุดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ (Decomposition Reaction)

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	ปฏิกิริยา
1	100	น้ำในช่องว่างระเหย
2	180	การสลายตัวของ C-S-H
3	350	การสลายตัวของ C-S-H
4	400	การสลายตัวของ C-S-H
5	600	การสลายตัวของ Ca(OH) ₂
6	700	การสลายตัวของ CaCO ₃

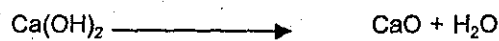
ลำดับที่ 1 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกจากช่องว่าง (Pore) ซึ่งเป็นน้ำอิสระ (Free Water) ที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่สามารถระเหยได้อุณหภูมิประมาณ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำกลายเป็นไอ

ลำดับที่ 2 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำจากช่องว่างคาпилลารีออก ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดจากแรงตึงคาпилลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาดเล็กในโครงสร้างของ C-S-H

ลำดับที่ 3 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) ออกซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งในโครงสร้างของ C-S-H

ลำดับที่ 4 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) ออกซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในแต่ละชั้นในโครงสร้างของ C-S-H อันเนื่องมาจากว่าโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้นๆ

ลำดับที่ 5 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสลายตัวได้แคลเซียมออกไซด์และน้ำ ดังสมการ



ลำดับที่ 6 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยสลายตัวได้แคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ



การศึกษาโครงสร้างที่แท้จริงของ C-S-H เป็นเรื่องยาก โดยได้มีการนำเสนอแบบจำลองของ C-S-H ขึ้นหลายแบบ เพื่ออธิบายคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แสดงในรูปที่ 3 แบบจำลองของ Powers-Brunauer แสดงไว้ในรูปที่ 6a แสดงโครงสร้างของ C-S-H ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ซึ่งยึดติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยแผ่น C-S-H จำนวน 2 หรือ 3 แผ่นเกาะกันอยู่ แบบจำลองของ Feldman-Sereda แสดงไว้ในรูปที่ 6b เชื่อว่าโครงสร้างของ C-S-H ประกอบด้วยแผ่น C-S-H เดี่ยวที่เกาะกันอยู่

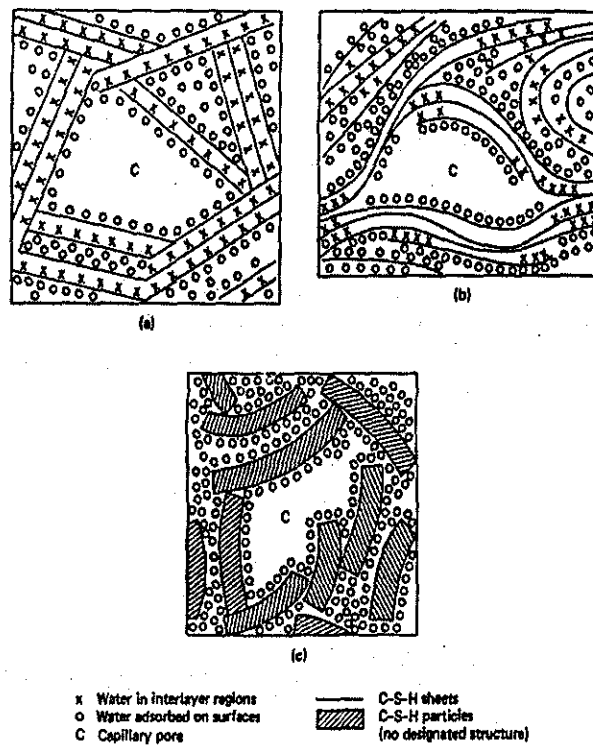
รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 7 วัน (รูปที่ 7a) โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอทริงไคต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 7b) ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 7c) ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้น

5. โครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยโพรงอากาศ (Air Voids) โพรงคาпилลารี (Capillary Pores) และโพรงเจล (Gel Pores) รูปที่ 8 และ 9 แสดงโครงสร้างและขนาดโพรงต่างๆ

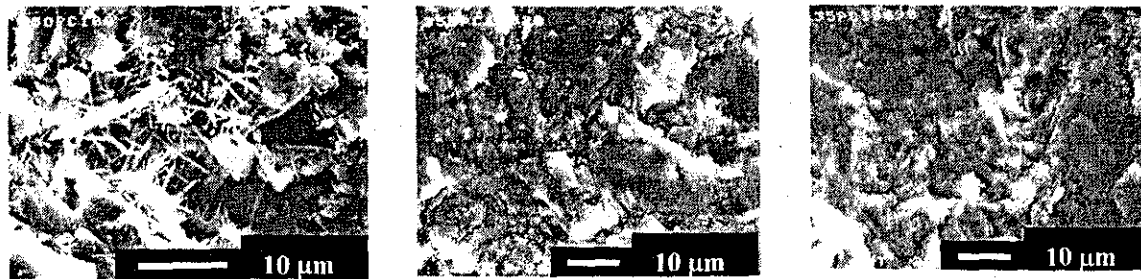
1. โพรงอากาศ (Air Voids) โดยทั่วไปโพรงอากาศมีรูปร่างค่อนข้างกลมในระหว่างการผสมคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศ (Entrapped Air Voids) ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และถ้าใส่สารผสมเพิ่มชนิดสารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) เข้าไปในคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายในซีเมนต์เพสต์ระหว่างการผสมเรียกโพรงอากาศชนิดนี้ว่า Entrained Air Voids มีขนาดอยู่ในช่วง 50-200 ไมโครเมตร โพรงอากาศที่ใหญ่และจำนวนมาก ทำให้กำลังรับแรงลดลงและทำให้การซึมผ่านเร็วและง่ายขึ้น

2. โพรงคาпилลารี (Capillary Pores) เป็นส่วนของช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Shape) ปริมาตรและขนาดของโพรงคาпилลารีขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และการเกิดปฏิกิริยา ในอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ($w/c < 0.35$) โพรงคาпилลารีมีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 นาโนเมตร ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูง ($w/c > 0.50$) โพรงคาпилลารีมีขนาดใหญ่ถึง 3-5 ไมโครเมตร โพรงคาпилลารีที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรมีผลต่อกำลังและการซึมผ่านของคอนกรีต ส่วนโพรงคาпилลารีที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต



รูปที่ 6 แบบจำลองโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต [1]

(a) Powers-Brunauer (b) Feldman-Sereda (c) Munich



(a) อายุ 7 วัน

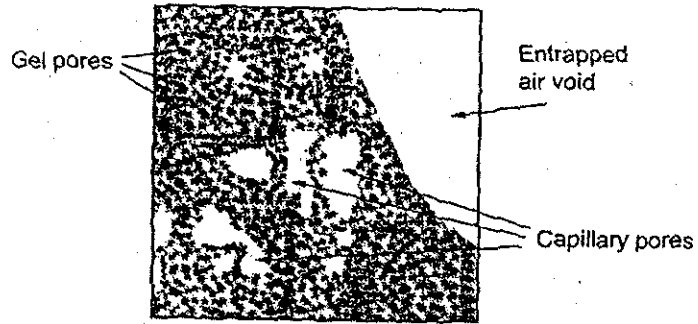
(b) อายุ 28 วัน

(c) อายุ 90 วัน

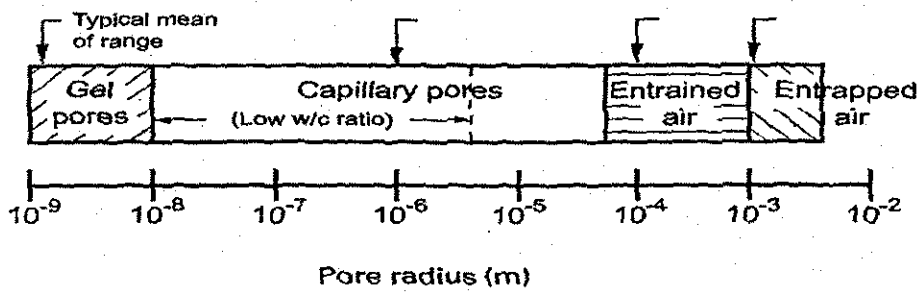
รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เฟส

3. โพรงเจล (Gel Pores) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของซีเมนต์เจล เป็นโพรงที่มีขนาดเล็กมาก คือ มีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตร โดย Powers คำนวณว่าโพรงเจลระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดเฉลี่ย 18°A ($1^{\circ}\text{A} = 10^{-10}$ เมตร) Feldman and Seredar พบว่าช่องว่างระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดตั้งแต่ 5 ถึง 25°A โพรงเจลมีผลน้อยมากต่อการกักน้ำและการซึมผ่าน แต่จะมีผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

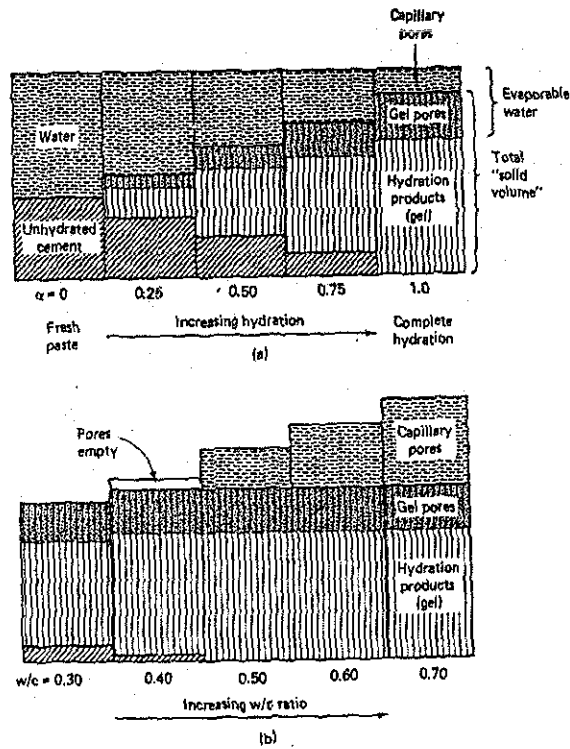
รูปที่ 10a แสดงปริมาณของส่วนประกอบซีเมนต์เฟสที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50 พบว่าปริมาณโพรงคาลิลลารีลดลงและโพรงเจลเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อพิจารณารูปที่ 7b พบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากัน ปริมาณโพรงคาลิลลารีเพิ่มขึ้น ส่วนโพรงเจลจะเท่ากัน รูปที่ 11 เปรียบเทียบขนาดของช่องว่างและโพรงในซีเมนต์เฟส



รูปที่ 8 โครงสร้างโพรง [4]

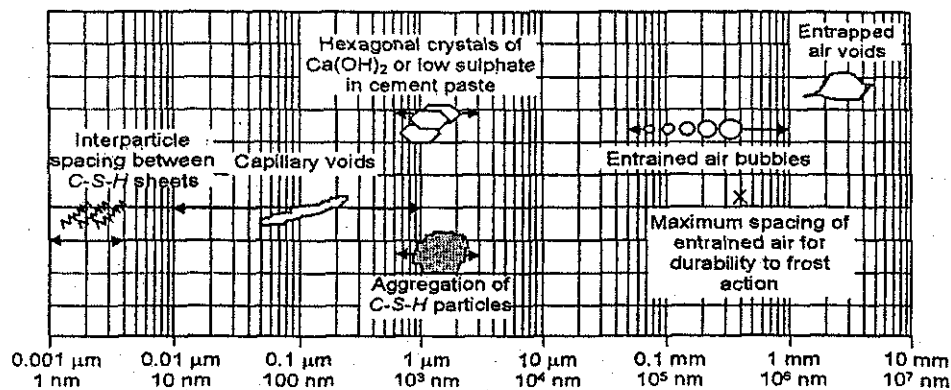


รูปที่ 9 ขนาดโพรง [4]



รูปที่ 10 ปริมาตรของส่วนประกอบซีเมนต์เฟส [1]

(a) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50 (b) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลง



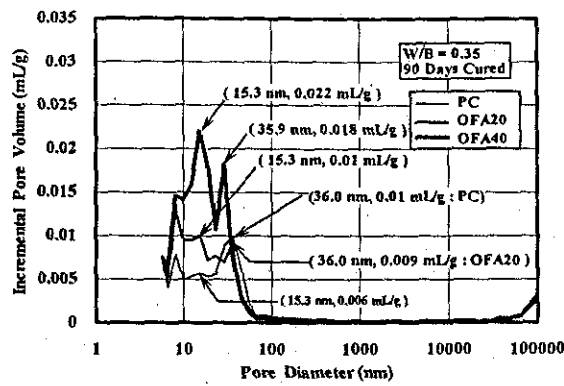
รูปที่ 11 ขนาดของช่องว่างและโพรงในซีเมนต์เพสต์ [4]

6. ผลกระทบของเส้นผ่านหินต่อการกระจายขนาดโพรง

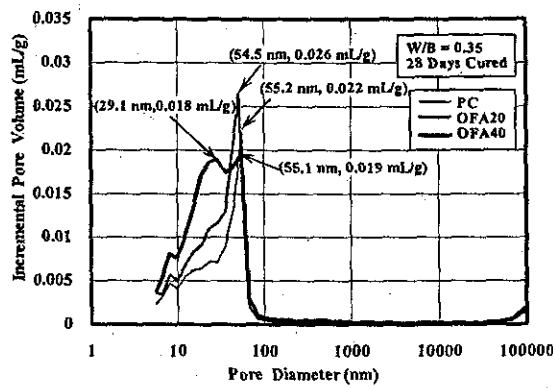
ในหัวข้อนี้ PC คือ ซีเมนต์เพสต์, OFA20 และ OFA40 คือ เพสต์ที่ใช้เส้นผ่านหินแม่เกาะจากโรงงานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ส่วน CFA20 และ CFA40 คือ เพสต์ที่ใช้เส้นผ่านหินแยกขนาดละเอียดมีอนุภาคเฉลี่ย 6.4 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ เพสต์ทั้งหมดมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35

รูปที่ 12ก และ 12ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ OFA40 ที่อายุ 28 วัน และ 90 วันตามลำดับ ในขณะที่รูปที่ 13ก และ 13ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เพสต์, เพสต์ CFA20, และ CFA40 ที่อายุ 28 วัน และ 90 วันตามลำดับ พบว่าเพสต์ CFA20 และ CFA40 มีขนาดโพรงคาบิลลารีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ OFA20 และ OFA40 พิจารณาที่อายุ 28 วัน จุดยอดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ CFA20 และ CFA40 มีค่าเท่ากับ 50.4 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0266 มล/ก และ 44.7 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0195 มล/ก ตามลำดับ ส่วนเพสต์ OFA20 มีค่าเท่ากับ 54.5 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.026 มล/ก และ OFA40 มีค่าเท่ากับ 55.1 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.019 มล/ก ที่จุดยอดจุดที่หนึ่ง และ 29.1 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.018 มล/ก ที่จุดยอดจุดที่สอง ตามลำดับ

ที่อายุ 90 วัน พบว่ามีจุดยอดขนาดโพรง 2 จุดที่ชัดเจน จุดแรกแสดงขนาดโพรงที่ใหญ่กว่า 10 นาโนเมตร เรียกว่าโพรงคาบิลลารี และจุดที่ 2 แสดงขนาดโพรงที่เล็กกว่า 10 นาโนเมตร เรียกว่าโพรงเจล เช่น จุดยอดจุดที่หนึ่งและสองของโพรงคาบิลลารีของเพสต์ CFA20 มีค่าเท่ากับ 29.0 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0204 มล/ก และ 15.3 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0114 มล/ก ในขณะที่เพสต์ OFA20 มีค่าเท่ากับ 36.0 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.009 มล/ก ที่จุดยอดจุดที่หนึ่ง และ 15.3 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.01 มล/ก ที่จุดยอดจุดที่สอง ตามลำดับ และพบว่าขนาดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ผสมเส้นผ่านหินมีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่เส้นผ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและอายุของเพสต์เพิ่มขึ้น

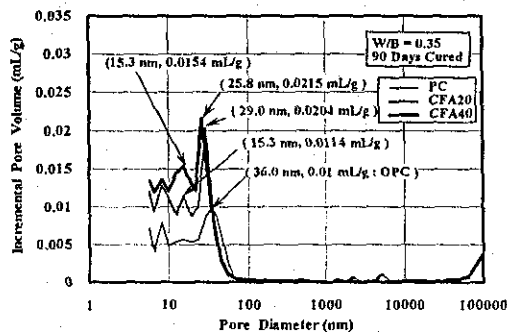


ก. อายุการบ่ม 28 วัน

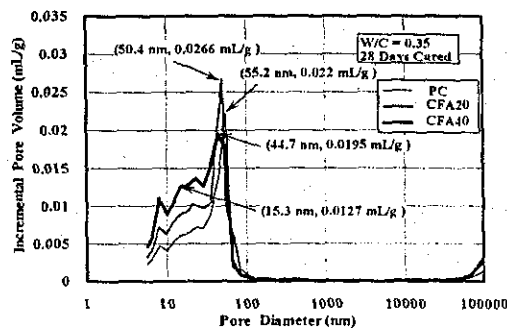


ข. อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เฟสดี, เฟสดี OFA20 และ OFA40



ก. อายุการบ่ม 28 วัน



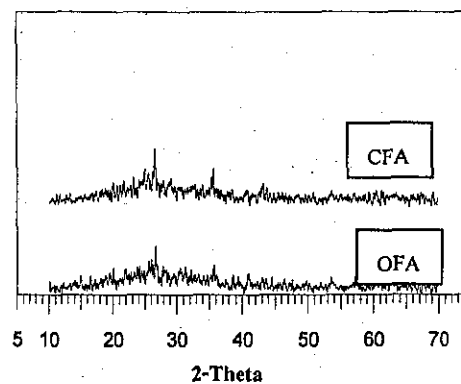
ข. อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เฟสดี, เฟสดี CFA20 และ CFA40

7. การวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction, XRD)

รูปที่ 14 แสดงผลวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction) ของแท่งถ่านหิน OFA และ CFA แท่งถ่านหินจากแม่เมาะส่วนประกอบที่เป็นผลึก คือ Quartz (SiO_2), Mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), Hematite (Fe_2O_3), และ Anhydrite

(CaSO₄) จากผลการทดสอบพบว่าจุดยอด (Peak) ของผลึกต่างๆ ระหว่างเก้าถ่านหิน OFA และ CFA มีความแตกต่างกันไม่มากนัก จากการศึกษารายละเอียดส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) ของ Chindaprasit และคณะ [5] พบว่าปริมาณที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) ของเก้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีประมาณร้อยละ 85-90 สูงกว่าเก้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 70-75 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Berry และคณะ [6] ที่พบว่าปริมาณ Glassy Phase ของเก้าถ่านหินเพิ่มขึ้น เมื่อเก้าถ่านหินมีความละเอียดเพิ่มขึ้น เก้าถ่านหินที่ไม่เป็นผลึกสูงจะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ ขณะที่เก้าถ่านหินส่วนที่เป็นผลึกจะมีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเก้าถ่านหินที่ดีจึงต้องมีความไม่เป็นผลึกที่สูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (XRD) ของเก้าถ่านหิน OFA และ CFA

ในซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร มีประโยชน์ในการเป็นฟิล์มเคลือบผิวเหล็กในคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้เหล็กเป็นสนิมช้าลง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีประโยชน์ต่อคอนกรีตค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตดังนี้

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนเป็นผลึกแทรกตัวอยู่ในคอนกรีต เมื่อสัมผัสกับน้ำจะถูกชะล้างออกไปก่อให้เกิดช่องว่าง (Void) ภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่านของน้ำหรือก๊าซต่างๆ ที่สูงขึ้น
2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในบรรยากาศที่ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ดังสมการ



ก่อให้เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่าคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ส่งผลเสียในการเปลี่ยนขนาดและปริมาตรของคอนกรีตเรียกว่า Carbonation Shrinkage นอกจากนี้คาร์บอนเนชันยังทำลายฟิล์มที่เคลือบเหล็กเสริมทำให้เหล็กเป็นสนิมง่ายขึ้น

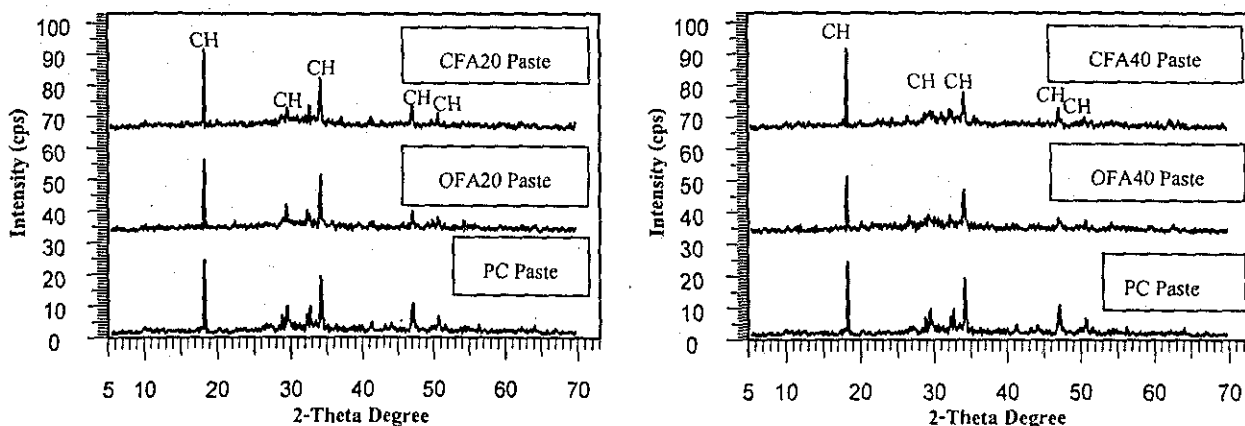
3. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาซัลเฟต
4. แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมกล่าวคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนเป็นผลึกในบริเวณผิวระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมหยาบทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงได้

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงต้องลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานขึ้น

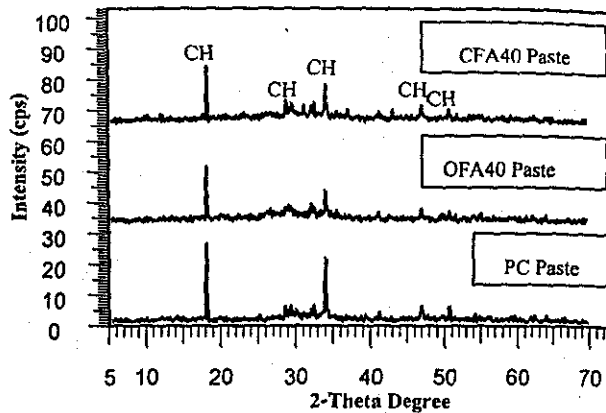
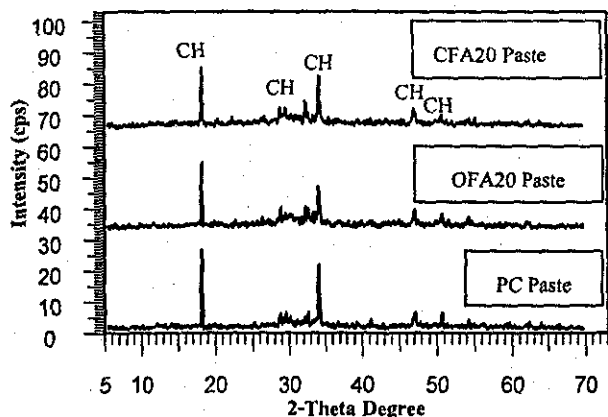
รูปที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ (PC Paste), เพสต์ OFA20, และ CFA20 ที่อายุการบ่ม 28 วัน และรูปที่ 16 แสดงผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากรูปพบว่าจุดยอด (Peak Intensity) ของ Ca(OH)_2 โดยการหักเหของรังสีปรากฏที่มุม 2-theta เท่ากับ 18.09, 28.75, 34.14, 47.12, และ 50.85 องศา จุดยอดของ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแตกต่างกันไม่มากนัก เพราะในช่วงอายุ 28 วัน ปฏิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ ปฏิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนปฏิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินจะเกิดขึ้นน้อย โดยที่อายุ 1 วัน ปฏิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นเพียง ร้อยละ 7 เท่านั้น และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน อายุ 28 วัน ปฏิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นร้อยละ 36 แต่เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นเป็น 90 วัน มีปฏิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นถึงร้อยละ 62

ผลการวิเคราะห์ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน แสดงไว้ในรูป 17, 18 และรูปที่ 19, 20 ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นและมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในเพสต์ พบว่าจุดยอด Ca(OH)_2 ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดที่อายุ 90 วัน จุดยอด Ca(OH)_2 ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิริยาปอซโซลานคือความละเอียดและปริมาณของ Glassy Phase ของเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าถ่านหินที่มีร้อยละของ Glassy Phase สูงมีแนวโน้มว่าจะทำปฏิริยาได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่มี Glassy Phase ต่ำกว่า นอกจากนี้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและปริมาณของ Glassy Phase สูง ส่งผลให้ซิลิกาและอลูมินาทำปฏิริยาได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ผลของการทำปฏิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินากับ Ca(OH)_2 ได้ C-S-H ทำให้ปริมาณของ Ca(OH)_2 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด [8, 15, 16] ปฏิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) ของสารละลายในช่องว่างเพสต์ (Pore Solution) มีค่าสูงเพียงพอ ค่า pH ประมาณ 13.2 หรือ 13.3 สามารถละลายส่วนประกอบที่ไม่เป็นผลึก (Non-Crystalline หรือ Glassy Phase) ส่วนที่เป็น Glassy Phase ที่สำคัญของเถ้าถ่านหินในการทำปฏิริยาปอซโซลานคือ SiO_2 และ Al_2O_3 เมื่อ Glassy Phase ละลายและทำปฏิริยากับ Ca(OH)_2 ได้สารประกอบหลักที่ทำให้กำลังแก่เพสต์คือ C-S-H

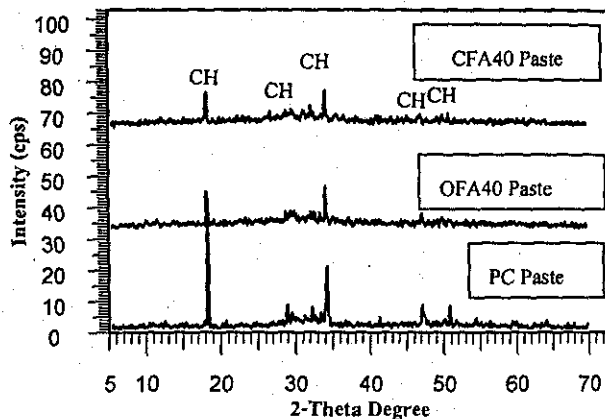
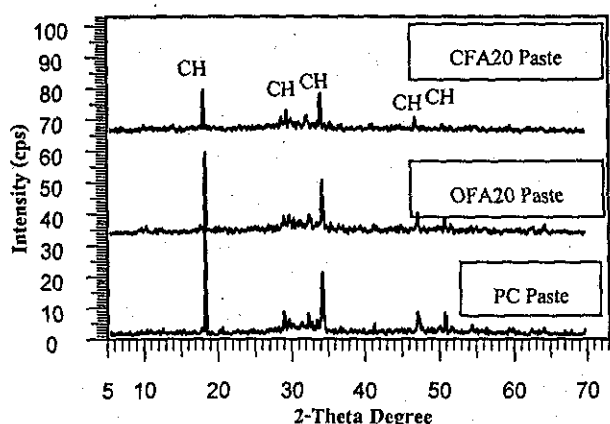
สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณมาก (ร้อยละ 40) พบว่าปริมาณ Ca(OH)_2 มีน้อยกว่าเพสต์ที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 20 เนื่องจากเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ปฏิริยาไฮเดรชันจึงเกิดขึ้นน้อย ทำให้ปริมาณ Ca(OH)_2 มีน้อย ค่า pH ของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างต่ำ ส่งผลให้การละลาย Glassy Phase ของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นได้น้อย การเกิดปฏิริยาปอซโซลานก็ต่ำด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่ต่ำกว่า



รูปที่ 15 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ CFA20 อายุ 28 วัน รูปที่ 16 XRD ของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA40, และ CFA40 อายุ 28 วัน



รูปที่ 17 XRD ของซีเมนต์เฟสค์, เฟสค์ OFA20, และ CFA20 อายุ 60 วัน รูปที่ 18 XRD ของซีเมนต์เฟสค์, เฟสค์ OFA40, และ CFA40 อายุ 60 วัน



รูปที่ 19 XRD ของซีเมนต์เฟสค์, เฟสค์ OFA20, และ CFA20 อายุ 90 วัน รูปที่ 20 XRD ของซีเมนต์เฟสค์, เฟสค์ OFA40, และ CFA40 อายุ 90 วัน

8. ภาพขยายโดยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM)

การพัฒนาโครงสร้างระดับอนุภาคของเฟสค์ผสมเก่าแก่ด้านหิน สังเกตจากภาพขยายโดยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 21 ถึง 24

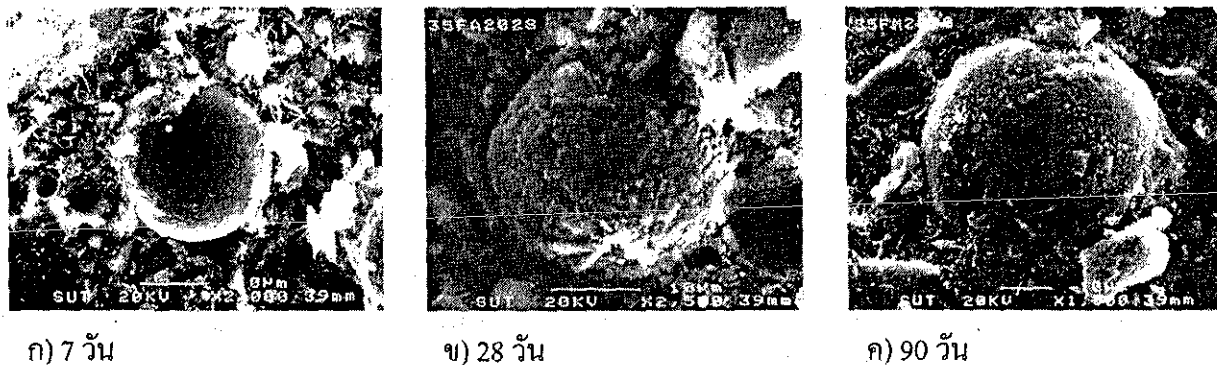
ที่อายุ 7 วัน เฟสค์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 21ก และ 22ก) พบว่าโครงสร้างขนาดเล็กของเฟสค์มีความพรุนและช่องว่างมาก ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันบนพื้นผิวอนุภาคเก่าแก่ด้านหินเกิดขึ้นน้อย มีบางส่วนของพื้นผิวอนุภาคเก่าแก่ด้านหินถูกคลุมด้วยชั้นของผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบเอทริงไทต์ (Ettringite) ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มยาวขยายตัวเข้าไปในช่องว่าง ในช่วงอายุต้นของเฟสค์ผสมเก่าแก่ด้านหินมี 2 กระบวนการเกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลจากการกระจายตัวของเก่าแก่ด้านหินทำให้เกิดกระบวนการ Nucleation จากกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สารประกอบ เช่น C-S-H และ $Ca(OH)_2$ ส่วนระยะแรกของกระบวนการ Nucleation แก่เก่าแก่ด้านหินอยู่ในสภาวะพักตัว (Incubation Period) ทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) อุดช่องว่างในเฟสค์ เมื่อเก่าแก่ด้านหินกระจายตัวในเฟสค์ พื้นผิวของเก่าแก่ด้านหินทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect)

ที่อายุ 28 วันของเฟสค์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 21ข และ 22ข) พบว่ามี 3 ลักษณะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาคเก่าแก่ด้านหินคือ พื้นผิวของเก่าแก่ด้านหินมีลักษณะผิวเรียบ, พื้นผิวถูกทำลาย (Etching), และพื้นผิวถูกคลุมด้วยชั้นของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา บริเวณพื้นผิวของเก่าแก่ด้านหินที่ถูกทำลายเป็นตัวชี้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในอายุช่วงต้นพบอนุภาคของเก่าแก่ด้านหินบางส่วนยังไม่ทำปฏิกิริยา และบางส่วนของพื้นผิวอนุภาคเก่าแก่ด้านหินถูกทำลายโดยการละลาย Glassy Phase ของเก่าแก่ด้านหิน ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับ $Ca(OH)_2$ ที่พื้นผิวของอนุภาคเก่าแก่ด้านหิน ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นที่ผิวชั้นในของเก่าแก่ด้านหินเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นเมื่ออลูมินาและซิลิกาถูกทำให้

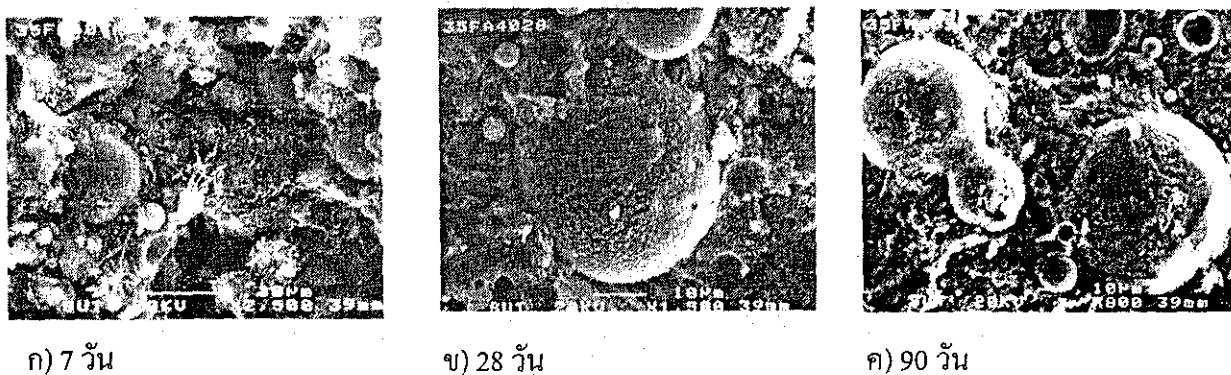
ละลายจาก Glassy Phase ของแก้วด้านหิน โดยที่ค่า pH ของสารละลายในช่องว่างมีค่าประมาณ 13.2 หรือ 13.3 และมีการแพร่ออกมาที่ผิวของแก้วด้านหิน ทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในช่องว่างทำให้เกิดสารประกอบ C-S-H สารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยารอบอนุภาคของแก้วด้านหินมี 2 ชั้น ชั้นนอกสุดเกิดจากผลของ Nucleation และชั้นในเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน [13, 22, 23]

อายุ 90 วันของเพสต์ OFA20 และ OFA40 (รูปที่ 21ค และ 22ค) เพสต์มีความแน่นมากขึ้น เนื่องจากผลของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน เพสต์ที่ผสมแก้วด้านหินเมื่ออายุมากความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำในช่องว่างจะสูง สามารถละลาย Glassy Phase ที่ผิวของอนุภาคของแก้วด้านหินได้ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของเพสต์มากขึ้น [20, 21] จากผลการทดสอบพบว่าอนุภาคของแก้วด้านหินจำนวนมากทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้สารประกอบ C-S-H เพิ่มขึ้นด้วย พื้นผิวของอนุภาคแก้วด้านหินถูกคลุมด้วย C-S-H ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลาน นอกจากนั้นยังพบว่ามีอนุภาคของแก้วด้านหินบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่ช่วยอุดช่องว่างในเพสต์ (Filling Effect) ส่งผลให้ได้โครงสร้างเพสต์ที่แน่นขึ้น

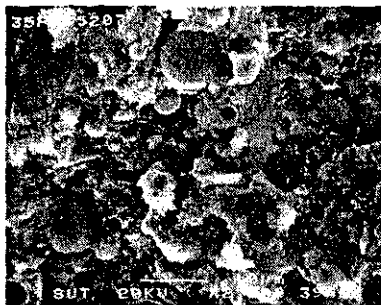
สำหรับเพสต์ที่ผสมแก้วด้านหินที่ผ่านการแยกขนาด (เพสต์ CFA20 และ CFA40) แสดงในรูปที่ 23 และ 24ก, ข, ค ตามลำดับ การเกิดปฏิกิริยาจะคล้ายกับแก้วด้านหินที่ไม่ได้แยกขนาด แก้วด้านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีอนุภาคที่เล็กทำให้การอุดช่องว่าง การเกิดขบวนการ Nucleation และปฏิกิริยาปอซโซลานดีกว่าแก้วด้านหินที่ไม่ได้แยกขนาด ทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น



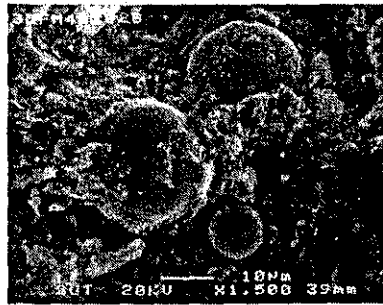
รูปที่ 21 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ OFA20 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน



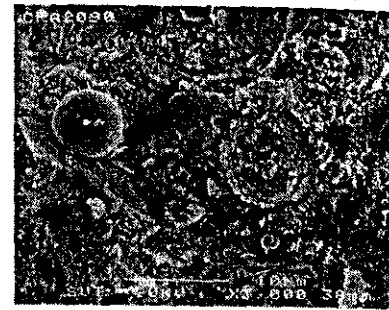
รูปที่ 22 Fractured Surface ของเพสต์ OFA40 ที่ 7, 28 และ 90 วัน



ก) 7 วัน



ข) 28 วัน

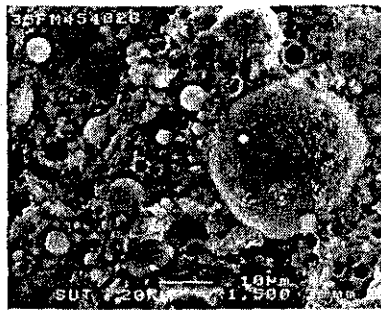


ค) 90 วัน

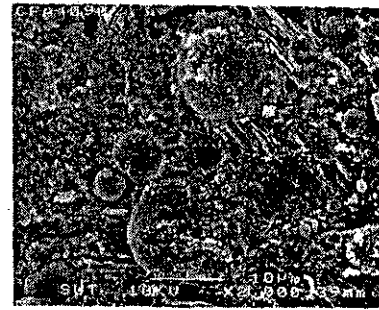
รูปที่ 23 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ CFA20 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน



ก) 7 วัน



ข) 28 วัน

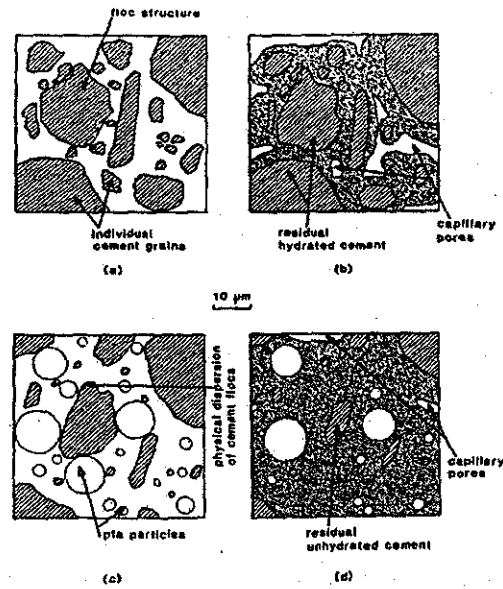


ค) 90 วัน

รูปที่ 24 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพสต์ CFA40 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน

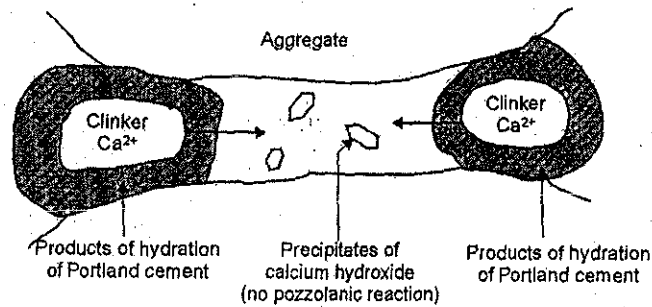
รูปที่ 25 แสดงแบบจำลองผลกระทบของเก้าถ่านหินในคอนกรีต พิจารณารูปที่ 25a เมื่อเริ่มผสมคอนกรีต ปูนซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาได้ผลผลิตไฮดรอกไซด์รวมๆ ว่าซีเมนต์เจล (Cement Gel) เกิดขึ้นของผลผลิต เช่น C-S-H, Ca(OH)_2 ขยายออกจากเม็ดปูนเข้าไปในโพรง โดยเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนซีเมนต์และขยายเข้าไปสู่ภายในเม็ดปูนซีเมนต์ อนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ถูกปกคลุมด้วยซีเมนต์เจลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกัน ช่วยในการอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ (รูปที่ 25b และ 26)

รูปที่ 25c แสดงโครงสร้างของคอนกรีตเมื่อผสมเก้าถ่านหิน พบว่าเมื่อเก้าถ่านหินกระจายในซีเมนต์เพสต์ รูปว่างกลมของอนุภาคเก้าถ่านหินซึ่งอยู่อย่างอิสระในซีเมนต์เพสต์ ทำให้มวลรวมในคอนกรีตสิ้นไหลดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติการเทได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง เมื่อพิจารณา คอนกรีตที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 25d) เก้าถ่านหินบางอนุภาคเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดย Glassy Phase ของเก้าถ่านหิน คือ SiO_2 และ Al_2O_3 ถูกละลายโดยต่างที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิต คือ C-S-H, C-A-H ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ขยายเข้าไปในโพรง (รูปที่ 27) นอกจากนี้บางอนุภาคของเก้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาก็ช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์และเก้าถ่านหิน

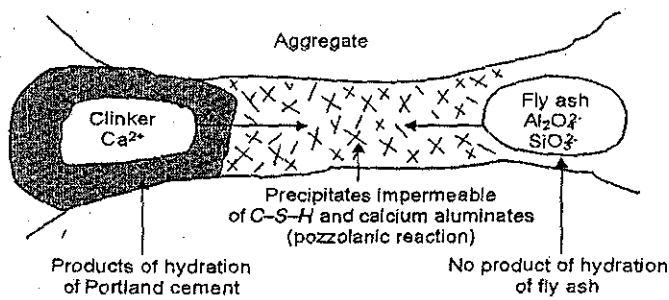


รูปที่ 25 แบบจำลองผลกระทบของเม็ดถ่านหินในคอนกรีต [16]

- (a) เริ่มต้นผสมคอนกรีต (b) โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตหลังจากผสม 28 วัน
- (c) เริ่มต้นผสมคอนกรีตผสมเม็ดถ่านหิน (d) โครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตผสมเม็ดถ่านหินหลังจากผสม 28 วัน



รูปที่ 26 โครงสร้างระดับจุลภาคของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์



รูปที่ 27 โครงสร้างระดับจุลภาคของปฏิกิริยาปอซโซลานของเม็ดถ่านหิน

9. บทสรุป จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์ โครงสร้างโพรงเป็นตัวควบคุมอัตราการซึมผ่านของก๊าซหรือของเหลวที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อม โพรงขนาดใหญ่และโพรงคาปิลลารีมีผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังอัดและการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์ โดยขนาดโพรงที่ใหญ่และจำนวนมาก ทำให้กำลังอัดลดลงและทำให้การซึมผ่านของสารที่ทำอันตรายต่อคอนกรีตเร็วและง่ายขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง วัสดุปอซโซลานได้นำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น ลดการซึมผ่าน ลดปริมาตรและขนาดของโพรงในซีเมนต์เพสต์ ทำให้ความหนาแน่นดีขึ้น และจากการทดสอบพบว่า

- ขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และอายุของเพสต์เพิ่มขึ้น

- การแทนที่เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดให้มีขนาดเล็ก จะทำให้ขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ต่ำลงเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นลดลง โครงสร้างเกิดความเสียหาย จากการเกิดคาร์บอนเนชัน การกัดกร่อนคอนกรีตเนื่องจากกรดและซัลเฟต เป็นต้น เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่ละลาย และถูกชะล้าง (Leach) ออกมาได้ง่าย นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้กำลังค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C-S-H มีการใช้สารปอซโซลานเพื่อลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้คอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้น เนื่องจากสารปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้สารประกอบ C-S-H ซึ่งนอกจากจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีตแล้วยังทนสภาพต่อการกัดกร่อนได้สูงขึ้นอีกด้วย และจากการทดสอบพบว่า

- การแทนที่เถ้าถ่านหินในเพสต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อเพสต์มีอายุมากขึ้น

- เมื่อเพสต์มีอายุมากขึ้นการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดให้มีขนาดเล็กในเพสต์ ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ลดลงมากกว่าและเร็วกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด

3. เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดทำให้เพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect) นอกจากนี้ยังช่วยอุดช่องว่างภายในเพสต์ (Filling Effect) และทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด

10. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์ สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาภายในประเทศ ตามความต้องการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

11. เอกสารอ้างอิง

1. S. Mindess and J. F. Young, 1981, Concrete, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
2. P. C. Aitcin and M. Baalbaki, 1994, Concrete Admixtures-Key Components of Modern Concrete, In: Aguado, A., et al., Editor. Concrete Technology: New Trends, Industrial Application, Proceeding of the International RILEM Workshop on Technology Transfer of the New Trends in Concrete, Barcelona, November, pp. 33-47

3. P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, 1993, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, Prentice Hall, Second Edition.
4. M. G. Richardson, 2002, *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Spon Press, London and New York.
5. P. Chindaprasirt, S. Ruangsiriyaku, H.T. Cao, L. Bucea, 2001, 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, December, p. 6.
6. E.E. Berry, R.T. Hemmings, W.S. Langley, and G.G. Carette., 1989, 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, pp. 241-273.
7. H. Jun-Yuan, B.E. Scheetz, and D.M., Roy, 1984, Hydration of fly ash-portland cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, pp. 505-511.
8. L. Konecny and S.J. Naqui, 1993, The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 1223-1228.
9. F. Sybert and U. Wiens, 1991, Effect of fly ash fineness on hydration characteristics and strength development, *International Conference on Blended Cement in Construction*, University of Sheffield, U.K., pp. 152-165.
10. H.A. Harris, J.L. Thompson, and T.E. Murphy, 1987, Factor affecting the reactivity of fly ash from western coals, *Cement and Concrete Aggregate*, Vol. 9, pp. 34-37.
11. A.L.A. Fraay, J.M. Bijen, and Y.M. de Haan, 1989, The reaction of fly ash in concrete: A critical examination, *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 235-246.
12. E.E. Beery, R.T. Hemmings, and B.J. Cornelious, Mechanism of hydration reaction in high- volume fly ash pastes and mortars, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 12, pp. 253-261.
13. D.G. Montgomery, 1981, Fly ash in concrete – A microstructure study, *Cement and Concrete. Research*, Vol. 11, pp. 591-603.
14. E.E. Berry, R.T. Hemmings, M.H. Zhang, B.J. Cornelious, and D.M. Golden, 1994, Hydration in high-volume fly ash binders, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, pp. 382-389.
15. A. Xu, and S.L. Sarker, 1994, Microstructure development in high-volume fly ash cement system, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, pp. 117-136.
16. R. K. Dhir, 1986, Pulverized-Fuel Ash, In: R. N. Swamy. Editor, *Concrete Technology and Design Volume3: Cement Replacement Materials*, Surrey University, London, pp. 197-255.