

แข็งตัวที่ช้า ประกอบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงทำให้สูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วจึงเกิดการบวมตัว ส่วนการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดไม่เกิดการบวมตัวของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 12 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดมีระยะการแข็งตัวที่เร็ว ด้วยสาเหตุนี้ตัวอย่างจึงแข็งตัวก่อนที่นำไปเร่งปฏิกิริยาในตู้อบ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์ทั้งหมด



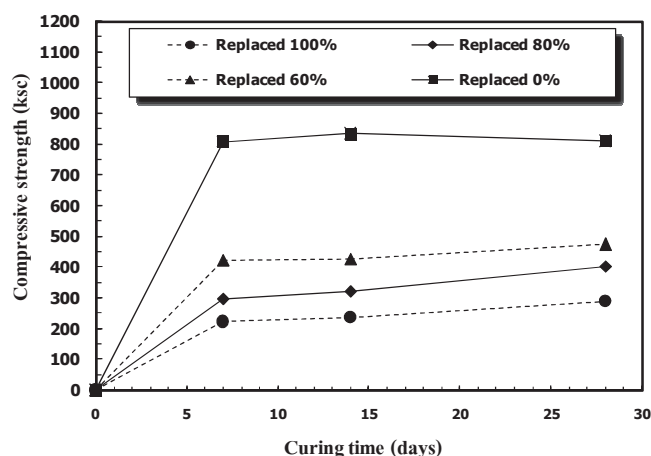
รูปที่ 5.12 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อย่างไรก็ดีอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาควรคำนึงถึงการสลายตัวของปริมาณสารประกอบของวัสดุพอลิไซลัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาสารประกอบของวัสดุพอลิไซลันมีการสลายที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรใช้อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ประมาณ 60-80% ของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบหลัก (Chaipanich A. and Nochaiya T., 2010 และ Wongkeo W. and Chaipanich A., 2010)

อีกทั้งการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังอัดลดลงได้ (Chindaprasit P. et al., 2007) และการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกร้าวส่งผลเสียต่อโครงสร้างและคุณสมบัติกายภาพของจีโอโพลิเมอร์ (Jaarsveld J.G.S. Van. et al., 2002)

5.5.7 ผลกระทบของเวลาการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่เลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Hardjito D. et al., 2004, Wongpa J. et al., 2010 และ จักรพันธุ์ และคณะ, 2010)

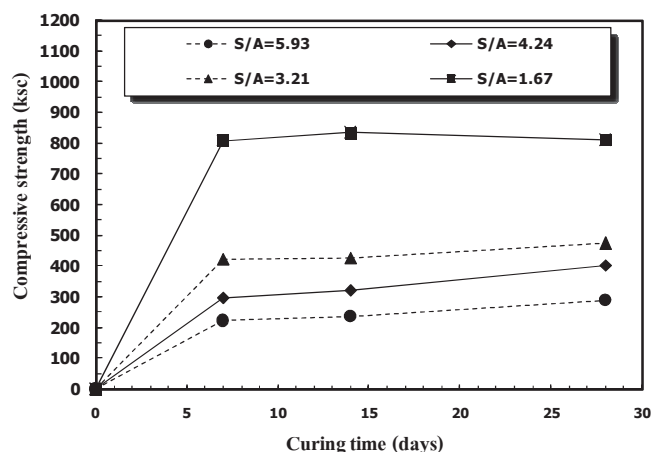


รูปที่ 5.13 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

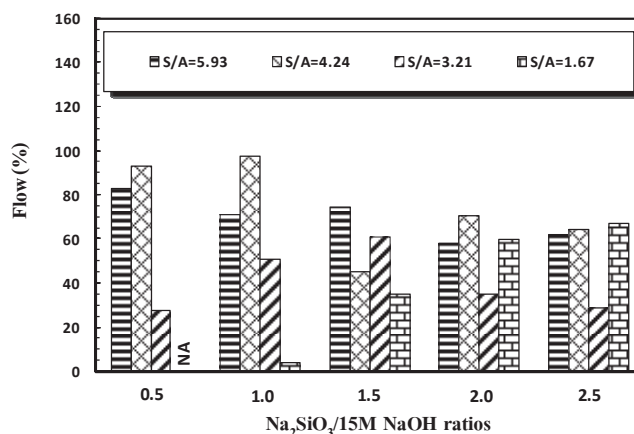
โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีลักษณะของขนาดโพรงขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังที่เพิ่มขึ้น (Chindaprasirt P. et al., 2005)

5.5.8 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุปลาย (จักรพันธ์ และคณะ, 2010) และทุกส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมาก



รูปที่ 5.14 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัด



รูปที่ 5.15 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อการไหลแผ่

อย่างไรก็ตามสาเหตุที่ทำให้ผลออกมาแตกต่างกันเป็นเพราะว่าค่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของงานวิจัยส่วนมากมีค่าไม่เกิน 5.0 ในขณะที่งานวิจัยนี้มีค่าสูงถึง 5.93 ซึ่งผลลัพธ์ที่ต่างกันอาจเกิดขึ้นได้ อาจเนื่องจากอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงทำให้มีความต้องการปริมาณสารละลายสูงเพื่อให้เกิดค่าการไหลแผ่ที่สามารถทำงานได้ง่าย ซึ่งสารละลายส่วนเกินที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้นมีการทำปฏิกิริยาอีกครั้งกับอากาศ ซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าว และหดตัว ส่งผลให้กำลังอัดลดลงแทนที่จะสูงขึ้นเหมือนกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ (Zuhua Z. et al, 2009)

นอกจากนี้ม้งานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงเทียบเท่ากับงานวิจัยนี้ และได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และงานวิจัยของ Bakharev T.(2006) และ Songpiriyakij S.(2010) ได้กล่าวไว้ว่าอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลดลงในอลูมิโนซิลิเกตเจล ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในอลูมิโนซิลิเกตเจลมีการกระจายตัวที่ดีแต่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ส่งผลต่อค่ากำลังอัด

อีกทั้งยังพบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ต่ำกว่าจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Bakharev T., 2006 and Sathonsaowaphak A., 2009) ซึ่งได้มีการให้ข้อสรุปไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลายในส่วนผสมทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้นจึงส่งผลให้กำลังอัดน้อยลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ของคอนกรีตทั่วไป

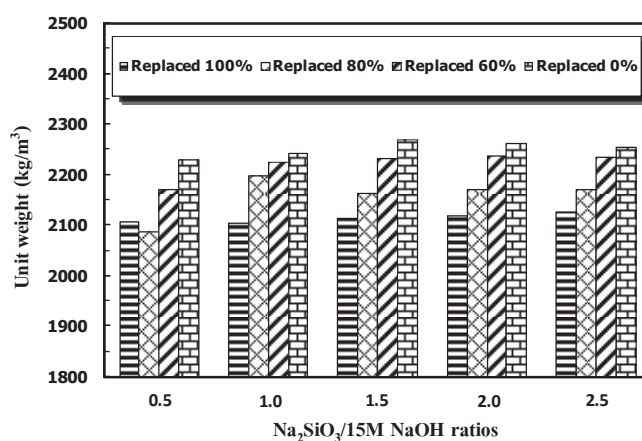
นอกจากนี้จากงานวิจัยของจักรพันธุ์ และคณะ (2010) ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าอัตราส่วน Liquid alkaline /binder ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่มากนัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงด้านกำลังอัด ขณะที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่ได้ส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนด้านกำลัง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

ปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นอัตราส่วน Liquid alkaline /binder มากกว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

รูปที่ 5.15 แสดงถึงค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ดีขึ้น แต่กำลังอัดลดลง ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

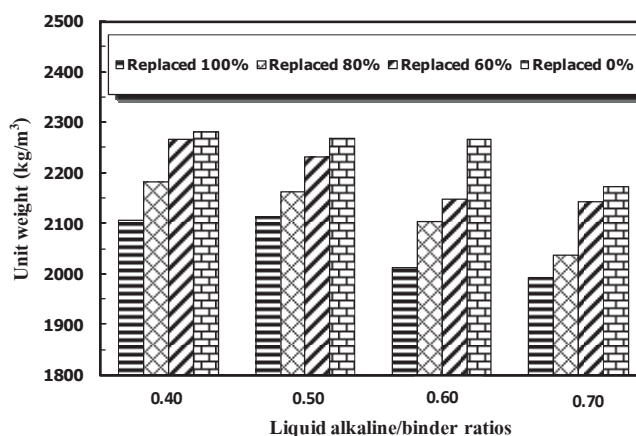
5.5.9 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 16-20 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อแทนที่ไดอะตอมไมท์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบอีกว่าปริมาณของเหลวที่มากขึ้นในส่วนผสมทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ อีกทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา



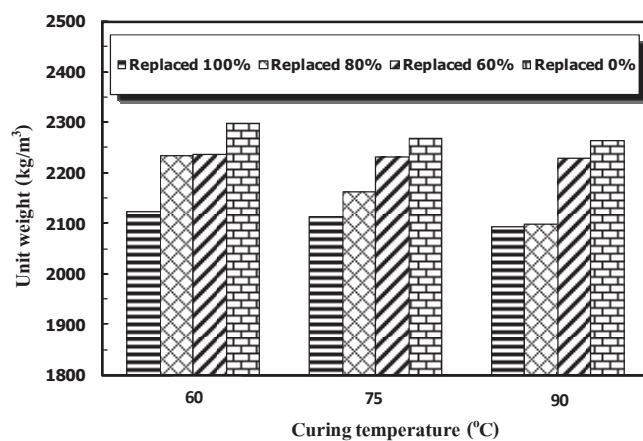
รูปที่ 5.16 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จากผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

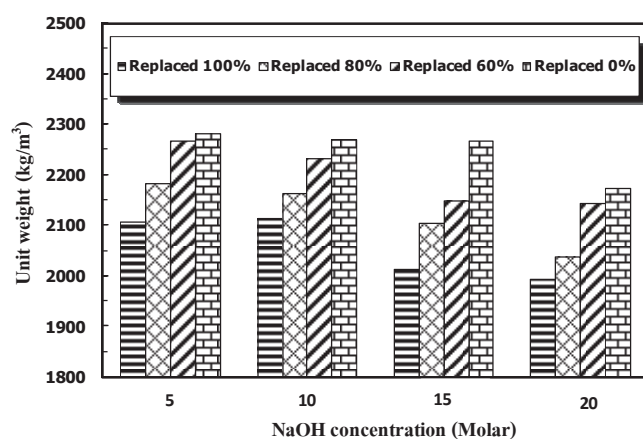


รูปที่ 17 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

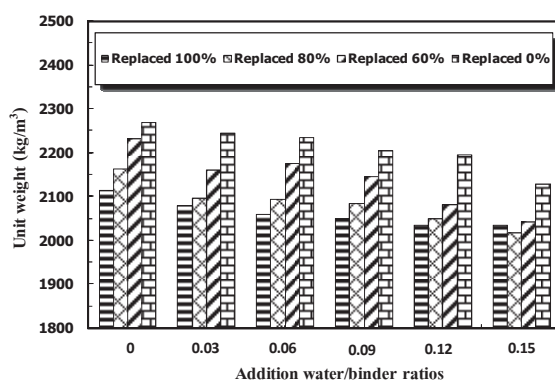
จากผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



รูปที่ 5.18 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 5.19 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของความเข้มข้น NaOH



รูปที่ 5.20 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder

5.6 สรุปผลการทดสอบ

5.1 ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยไคอะตอมไมท์ทั้งหมดมีแนวโน้มต้องการปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2 การแทนที่ไคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5-2.5 Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 10-15 โมลาร์ ให้ค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 243-474 กก/ชม² และ 29-105% ตามลำดับ

5.3 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 75 องศาเซลเซียส

5.4 อัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่ค่าลึงลดลง และอัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ระหว่าง 284-423 กก/ชม² และ 61-108% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

5.5 การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์มีแนวโน้มที่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเนื่องจากมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้ากว่าเถ้าลอย และค่าลึงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการบ่มมากขึ้น

5.6 อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถการทำงานให้ดีขึ้น แต่ค่าค่าลึงอัดมีแนวโน้มลดลง

5.7 เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี (2005). ไคอะตอมไมท์ [ออนไลน์]

<http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm>

จักรพันธุ์ วงษ์ศา ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2010). ผลกระทบระหว่าง สัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ S/A ต่อรูปแบบ Spectrum และค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 111-118

ธนากร ภูเงินขำ ชีรวัดน์ สิ้นสิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2010). การศึกษาค่าลึงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลต์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 119-124

เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญา จินดาประเสริฐ และสมิตร ส่งพิริยะกิจ (2008). ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้า

- แกลบ-เปลือกไม้ผสมเข้ากัน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. โรงแรมลองบีชการ์เดนโฮเทล แอนด์ สปา อำเภอยะนิง จังหวัดชลบุรี. MAT 24-29
- บุรฉัตร จัทรวิระ และณรงศักดิ์ มากุล (2004). สมรรถนะของแร่ดินเบาในปูนฉาบฉนวนกันความร้อนมวลเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2. จังหวัดอุดรธานี. MAT 23-32.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2004). สารจีโอโพลิเมอร์ วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ประเทศไทย
- ประมวล โสมละคร และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2007). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. จังหวัดอุบลราชธานี. MAT 37-40.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-08a, Standard Test Method for Coal fly ash and raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 1437-07, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.
- Bakharev T., (2006). Thermal behavior of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research ., 36(6) : 1134-1147
- Chaipanich A., Nochaiya T., (2010). Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. J Therm Anal Calorim., 99 : 487-493.
- Chaisena A. et al., (2004). Effect of thermal and acid treatments on some physic-chemical properties of Lampang diatomite. Journal Science Technology., 11 : 289-299.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement&Concrete Coposites., 27: 425-428
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., (2007). Workability and strength of coarse fly ash geopolymer. Cement&Concrete Coposites., 29 : 224-229
- Davidovits, J., (1982). Mineral polymers and methods of making them. United states Patent no.4349386.

- Davidovits, J., (1994). Properties of geopolymer cements. Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concrete., Kiev state Technical University., 1 : 131-149
- Davidovits J., (1999). Chemistry of geopolymetric systems, Terminology. Proceedingd : 2nd International Conference on Geopolymer. France:Paris : 9-40.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV., (2004). On the development of fly ash based geopolymer concrete. ACI Master J., 101(6) : 467-472
- Hardjito D.,Chua Chung Cheak., Carrie Ho Lee Ing., (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash based geopolymer mortar. Modern Applied Science., 2(4) : 3-11
- Jaarsveld J.G.S.van., Deventer J.S.J.van., Lukey G.C., (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymer. Chemical Engineering Journal., 89 : 63-73.
- Lertkositpong T., Pimraksa K., Chindaprasirt P., (2009). Synthesis of lightweight geopolymer materials from diatomaceous earth. Annual Concrete Conference 5, Nakhonratsima ., MAT 96-101 (In Thai)
- Nguyen Van Chanh et al., (2008). Geopolymer concrete. The 3rd ACF International Conference ACF/VCA 2008 : 235-241
- Rattanasak U., Chindaprasirt P., (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering., 22 : 1073-1078.
- Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Primraksa K., (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. Journal of Hazardous Materials., 168(1) : 44-50
- Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., (2010). Compressive strength and degree of reaction of bio-mass and fly ash based geopolymer. Construction and Building Materials., 24 : 236-240
- Wongkeo W., Chaipanich A., (2010). Compressive strength, microstructure and analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. Materials Science and Engineering A., 527 : 3676-3684.
- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2010). Compressive strength and modulus of elastic and water permeability of inorganic polymer concrete. Materials and Design., 24 :236-240
- Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. Applied Clay Science., 43(2) : 218-22

บทที่ 6

การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์เป็นวัสดุยึดประสาน

6.1 บทนำ

ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่นน้ำทิ้งจากโรงงาน ถึงแม้ว่าจะผ่านการบำบัดกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่ก็ยังคงมีกากตะกอนตกค้าง ซึ่งจะถูกนำมาตากแห้งเพื่อกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป การกำจัดกากตะกอนในลักษณะนี้ไม่ปลอดภัยต่อผู้เก็บและขนย้าย เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาต่อไป เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายความเป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย ซึ่งการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภท สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ตรึงของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมีและทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดโอกาสการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายหลังจากการแข็งตัวแล้ว ตัวยึดประสานที่ใช้มากได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา กากตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจัดเก็บก้อนหล่อแข็งได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย (Cheng and Bishop, 1992).

ซีโอไลต์ (Zeolite) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ลักษณะเด่นของซีโอไลต์ คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ที่ประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ นอกจากนี้โลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว โปรท แคดเมียม ซิลเวอร์ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน (Feng et al., 2000; Feng and Peng, 2005; Quanlin and Naiqian, 2005; Poon et al., 1999) จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลต์มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองโลหะหนักจากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรม

6.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนักและความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ตามอัตราส่วนที่กำหนด

6.3 วิธีการศึกษา

6.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (มาตรฐาน ASTM C150)
2. ซีโอไลต์สังเคราะห์ ประเภท Sodium Aluminum Silicate
3. ซีโอไลต์ธรรมชาติ ประเภท Clinoptilolite
4. กากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิล
5. น้ำประปา

6.3.2 การเตรียมวัสดุ

นำกากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิลมาอบให้แห้งจากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

6.3.3 อัตราส่วนผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยซีโอไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักและผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และทำการบ่มโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบเมื่ออายุครบ 7, 28 และ 90 วัน

6.3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ZS, ZN หมายถึง ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ตามลำดับ

20ZS, 40ZS, 20ZN, 40ZN หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

S หมายถึง กากตะกอนของเสีย

40S, 50S, 60S หมายถึง การผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

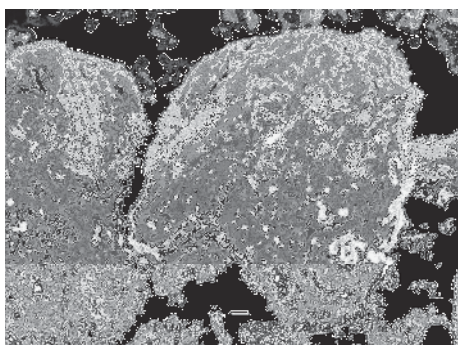
6.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

6.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

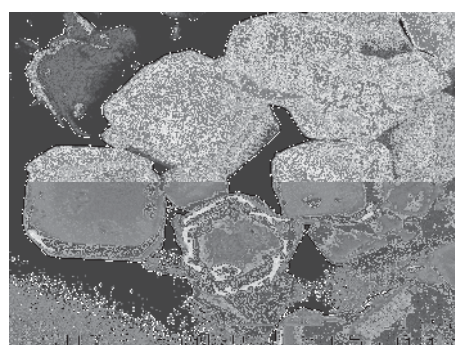
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย ซึ่งพบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการนำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ก., ก. และ ง. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 6.1 ข. พบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์ มีพื้นผิวเรียบ รูปร่างมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OPC, ZS, ZN และ S เท่ากับ 14.12, 2.51, 16.17 และ 34.81 ไมครอน ตามลำดับ โดยกราฟแสดงการกระจายขนาดของ OPC, ZS, ZN และ S ด้วยเครื่อง Mastersizer แสดงในรูปที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

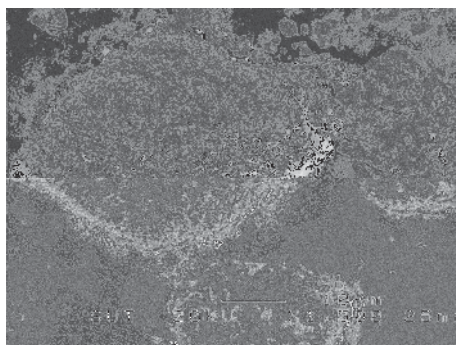
Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d_{50} (micron)
OPC	3.15	14.12
ZS	1.87	2.51
ZN	2.09	16.17
S	2.14	34.81



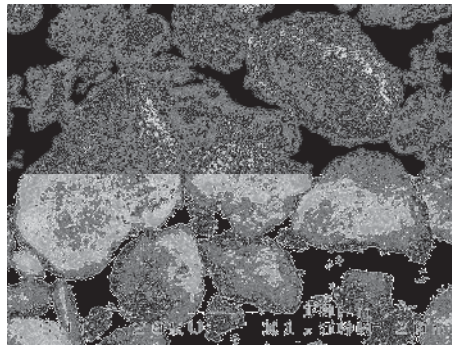
ก. ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของ OPC



ข. ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของ ZS

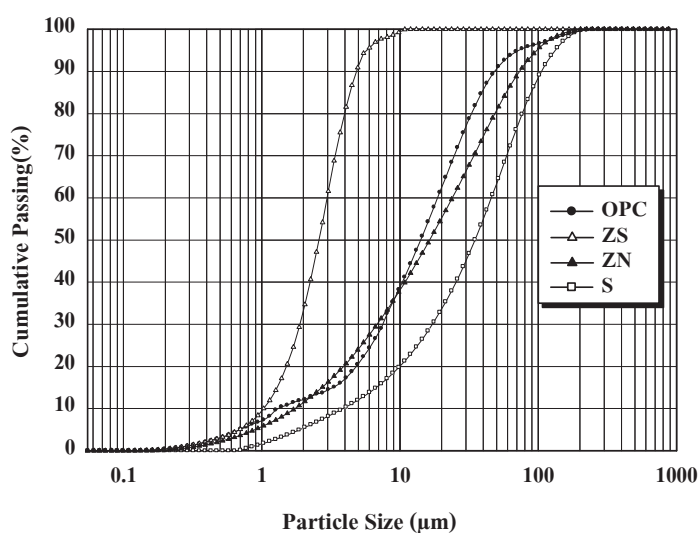


ค. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ ZN



ง. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ S

รูปที่ 6.1 ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM



รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุ

6.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสียด้วยเครื่อง XRF พบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติมีออกไซด์ของซิลิกา และ อลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนกากตะกอนของเสียมีออกไซด์ของโลหะหนัก คือ นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และโครเมียม นอกจากนี้ยังมีออกไซด์ของแคลเซียมด้วย

ตารางที่ 6.2 องค์ประกอบเคมีของ OPC, ZS, ZN และ S

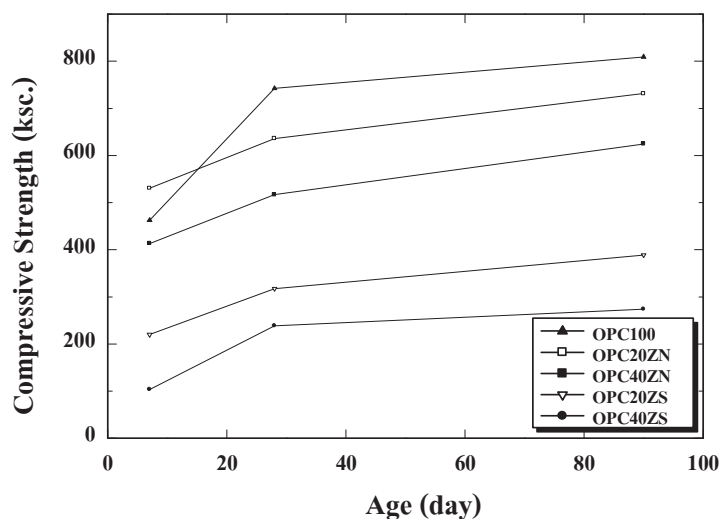
Chemical Composition (%)	OPC	ZS	ZN	S
SiO ₂	19.85	65.30	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	0.03	2.66	-
CaO	66.96	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	0.08	1.20	-
K ₂ O	0.34	2.64	4.29	-
Na ₂ O	-	1.87	0.89	-
NiO	-	-	-	40.88
CuO	-	-	-	13.08
ZnO	-	-	-	10.33
CrO	-	-	-	0.64
LOI	0.98	5.65	2.30	0.44

6.4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของก้อนตัวอย่างจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนซีเมนต์เพสต์ควบคุม และการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ทุกอายุของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

Sample	Compressive Strength (ksc.) - (Percentag, %)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC100	462.5 (100)	742.7 (100)	809.2 (100)
OPC20ZS	220.2 (47.6)	317.2 (42.7)	389.0 (48.1)
OPC40ZS	103.6 (22.4)	238.6 (32.1)	273.8 (33.8)
OPC20ZN	530.5 (114.7)	635.9 (85.6)	731.4 (90.4)
OPC40ZN	413.3 (89.4)	516.8 (69.6)	624.6 (77.2)



รูปที่ 6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 6.4 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม เนื่องจากโลหะหนักเข้ายับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Jong, 1990) และกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมากกว่า 10 ksc. (Wiles, 1990)

ตารางที่ 6.4 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

Sample	Compressive Strength (ksc.)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC40S	8.8	13.3	15.1
OPC50S	5.8	9.7	11.8
OPC60S	5.4	8.4	10.5
OPC20ZS40S	20.6	136.7	164.0
OPC20ZS50S	13.2	49.8	108.6
OPC20ZS60S	8.0	13.6	19.7
OPC40ZS40S	2.5	60.6	177.2
OPC40ZS50S	2.6	42.6	139.0
OPC40ZS60S	1.3	4.9	33.4
OPC20ZN40S	441.9	584.0	664.7
OPC20ZN50S	363.7	500.5	594.8
OPC20ZN60S	311.3	420.9	513.4
OPC40ZN40S	198.6	368.5	442.9
OPC40ZN50S	155.0	321.2	401.3
OPC40ZN60S	123.0	264.9	345.1

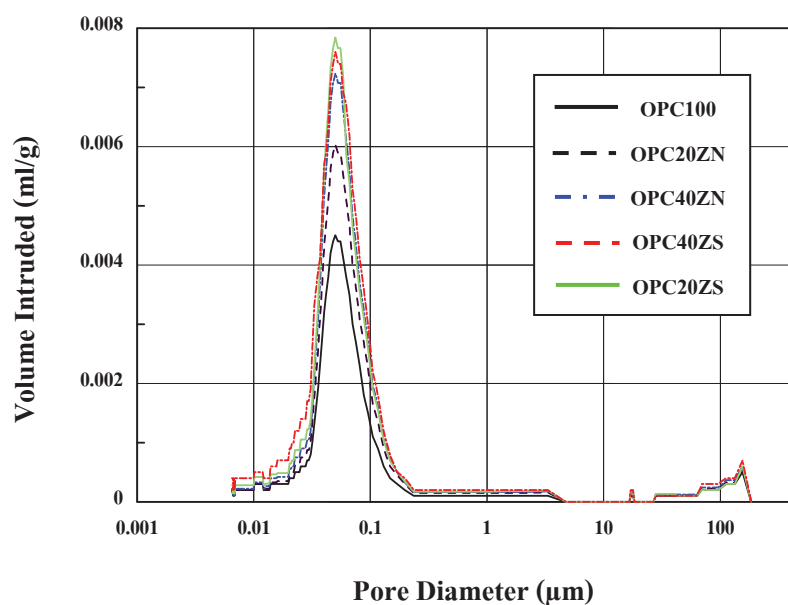
6.4.4 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อแข็ง

ตารางที่ 6.5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของ ซีโอไลต์มีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ถ้ามพิจารณขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์สังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์มีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.51 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 14.12 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอไลต์ไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมี

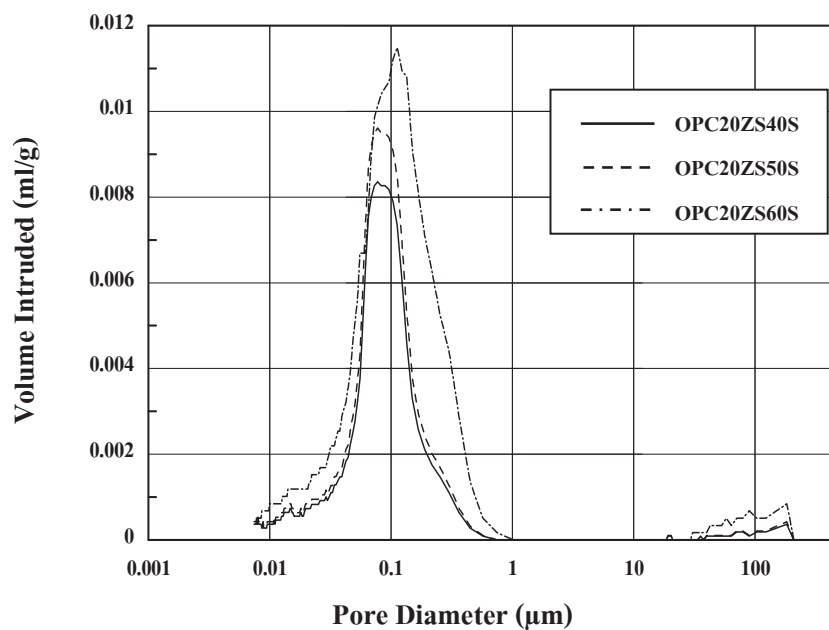
ขนาดเฉลี่ยของโพรงใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากขนาดอนุภาคของซีโอไลท์ธรรมชาติกับปูนซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน

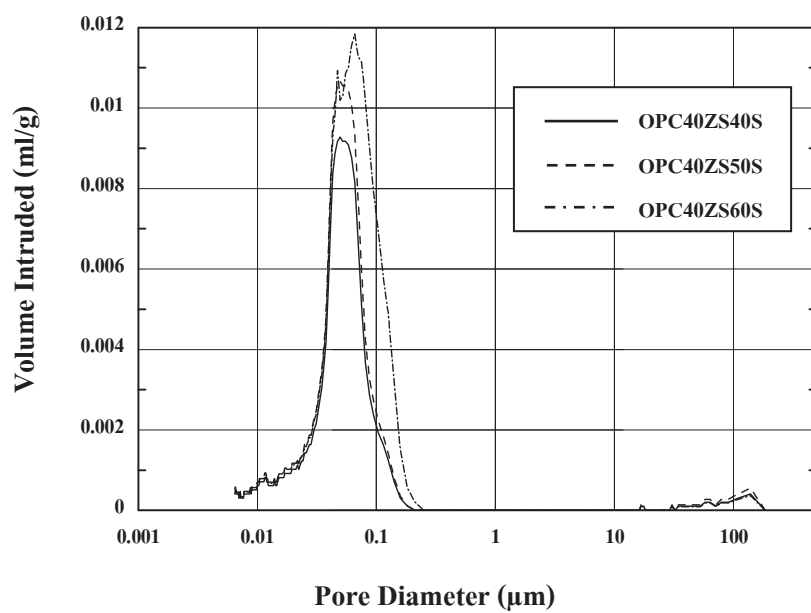
	OPC100	OPC20ZS	OPC40ZS	OPC20ZN	OPC40ZN
Air Void (%) (> 1.0 μm)	6.36	8.37	10.75	7.11	9.24
Large Capillary (%) (0.05-1.0 μm)	8.12	9.72	6.54	12.32	11.41
Medium Capillary (%) (0.01-0.05 μm)	5.31	11.75	23.30	6.19	10.52
Total Porosity (%)	19.79	29.84	40.59	25.62	31.17
Average Pore (nm)	47.11	44.00	40.25	46.68	45.99
Total Pore Area (m^2/g)	8.80	17.14	25.90	13.84	21.57



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของซีเมนต์เพสต์ อายุ 28 วัน

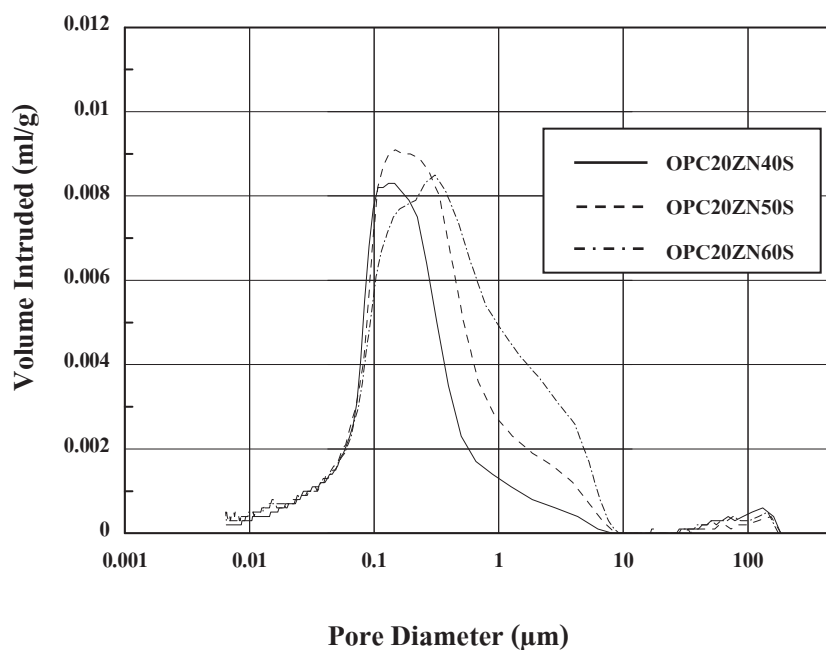


ก. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 20

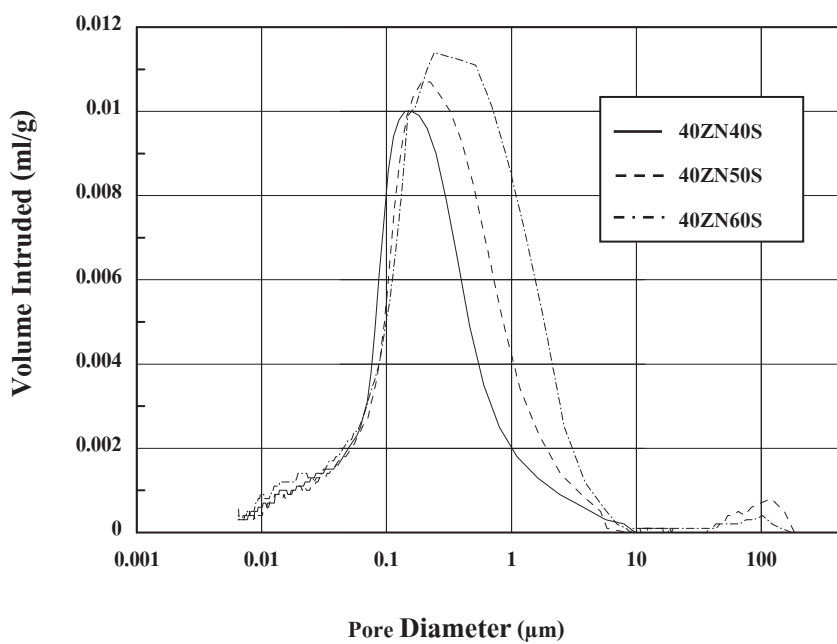


ข. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ ร้อยละ 40

รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน



ค. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20

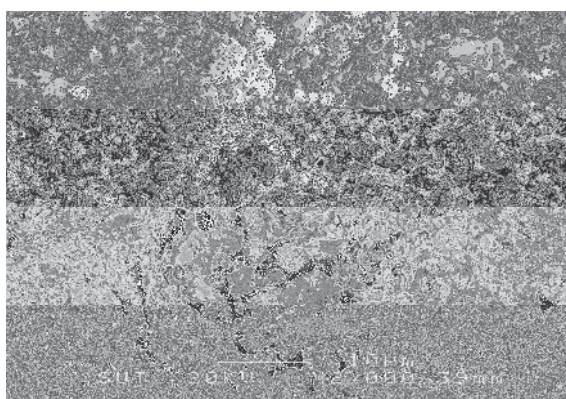


ง. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 40

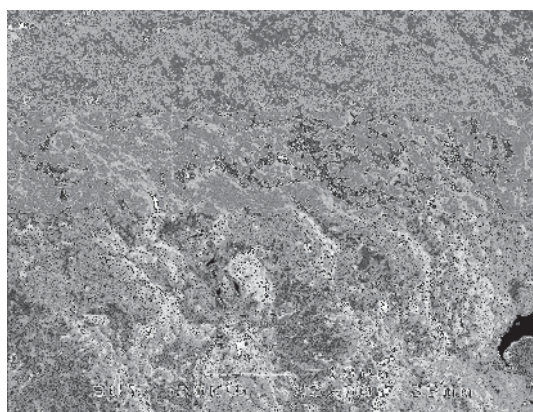
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน (ต่อ)

6.4.5 การวิเคราะห์ Fracture surface ของก้อนหล่อแข็ง

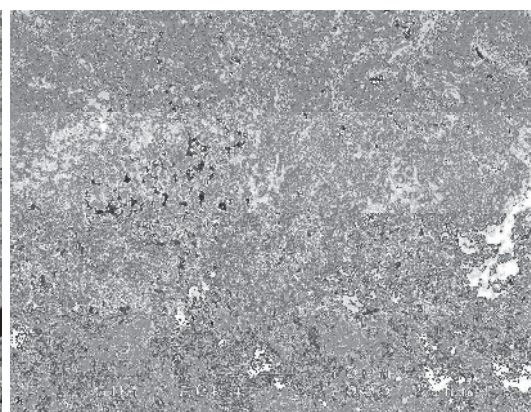
จากรูปที่ 6.7 พบว่าเพสต์ OPC100 มีความพรุนและช่องว่างมาก เมื่อพิจารณาเพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์ พบว่าเพสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ทำให้เพสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อ่อนนุ่มของ ซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณมาก ซึ่งทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แน่นขึ้น



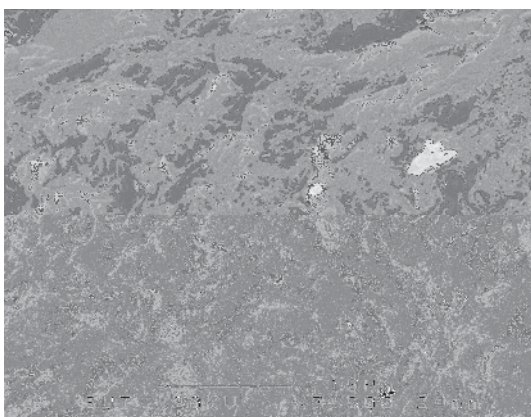
ก. ภาพขยายของ OPC100



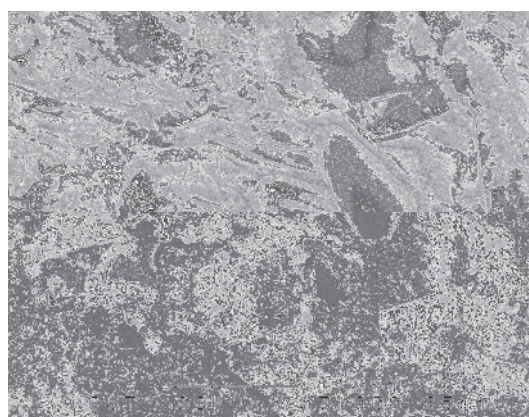
ข. ภาพขยายของ OPC20ZS



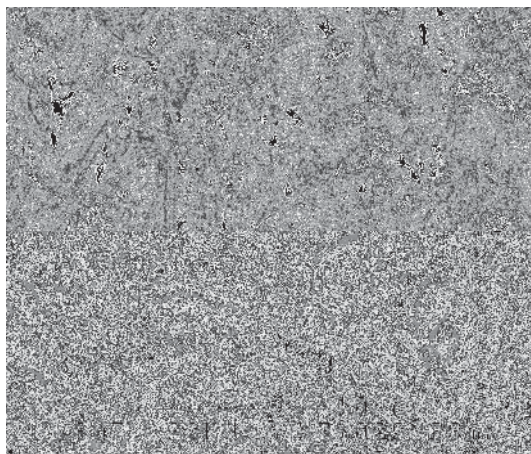
ค. ภาพขยายของ OPC40ZS



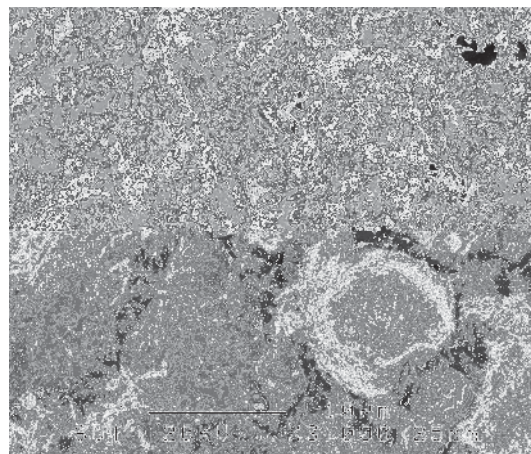
ง. ภาพขยายของ OPC20ZN



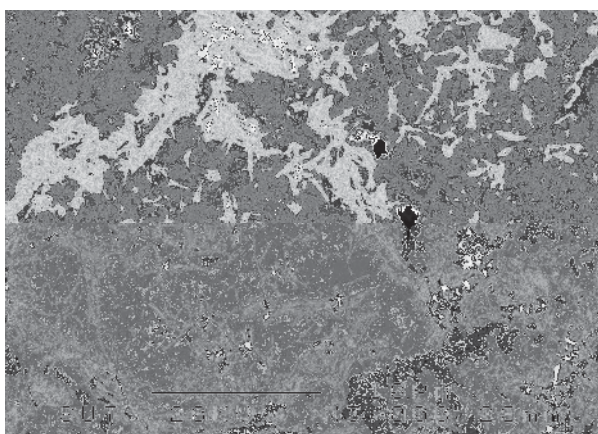
จ. ภาพขยายของ OPC40ZN



ฉ. ภาพขยายของ OPC40S



ช. ภาพขยายของ OPC50S



ซ. ภาพขยายของ OPC60S

รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ที่อายุ 28 วัน

6.4.6 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะละลาย พบว่าประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็งที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานจะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ และพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ จะพบว่าการแทนที่ด้วย ซีโอไลท์ธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่า ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน

ก้อนตัวอย่าง	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	63.21	61.64	68.31	82.21
OPC50S	55.72	58.47	60.09	78.42
OPC60S	51.43	53.71	61.11	78.10
OPC20ZS40S	83.54	80.85	86.42	100.0
OPC20ZS50S	81.93	83.31	84.61	98.81
OPC20ZS60S	77.22	76.63	85.72	97.33
OPC40ZS40S	82.13	83.80	84.2	99.73
OPC40ZS50S	81.02	87.87	79.51	99.34
OPC40ZS60S	74.35	70.02	82.10	99.33
OPC20ZN40S	92.56	91.67	94.11	100.0
OPC20ZN50S	92.72	91.43	94.33	100.0
OPC20ZN60S	91.40	91.34	92.83	100.0
OPC40ZN40S	90.84	90.31	94.0	100.0
OPC40ZN50S	90.22	91.11	94.24	100.0
OPC40ZN60S	90.41	90.15	90.06	100.0

6.5 สรุป

จากผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลท์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ซีโอไลท์ในปริมาณมากทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์
2. กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม โดยเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน
3. ความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่ามากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอน และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ และมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่าด้วย
4. ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรง กำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย คือ ปริมาตรโพรงมากจะรับกำลังอัดได้น้อยและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายก็จะต่ำ

6.6 เอกสารอ้างอิง

- Cheng KY, Bishop P. 1992. Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching J Hazardous Waste & Hazardous Materials; 9: 163-171
- Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. Magazine of Concrete Research. 52 (2): 117-122.
- Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. Construction and Building Materials, 19: 579-584.
- Jong, H.Y., 1990, Solidification of laboratory waste by using ordinary portland cement and rice husk ash cement, Master of Engineering Thesis, Environmental Program, AIT, Bangkok, 78 Pages.
- Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. Cement and Concrete Research, 35 (9): 1784-1788.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. Construction and Building Materials. 13: 427-432.
- Wiles, C.C. 1990. Solidification and stabilization technology, U.S.EPA, US.

บทที่ 7

โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ผสมเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม

7.1 บทนำ

การผลิตปูนซีเมนต์จะต้องใช้ความร้อนเผาวัตถุดิบให้กลายเป็นเม็ดปูนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตออกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 850 กิโลกรัม (Hendrik, G., et al., 2003) นักวิจัยแก้ปัญหาโดยใช้วัสดุจากเถ้าจากอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เถ้าจากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าขานอ้อย วัสดุเหล่านี้ได้มีนักวิจัยศึกษาพบว่าทำให้ความต้านทานของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Chindaprasirt, P. et al., 2008; Chusilp, N., et al., 2009 and Tangchirapat, W., et al., 2007)

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการนำกากของผลปาล์ม น้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่า ในประเทศไทยเถ้าปาล์มน้ำมันถึง 100,000 ตันต่อปี (Chindaprasirt, P. et al., 2007) ปัจจุบันเถ้าปาล์มน้ำมันยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์และจะเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมในอนาคต องค์ประกอบหลักเถ้าปาล์มน้ำมันคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) (Tangchirapat, W., et al., 2007 and Chindaprasirt, P., et al., 2008) นักวิจัยได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต Tangchirapat (2007) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและเมื่อนำมาบดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ร้อยละ 20-30 Sata et al. (2004) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อบดให้มีความละเอียดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง อีกประการหนึ่งยังช่วยในการปรับปรุงกำลังอัดและการซึมผ่านของคอนกรีต (Chindaprasirt, P., et al., 2007) นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยการต้านทานซัลเฟต (Tangchirapat, W., et al., 2009) และการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chindaprasirt, P. et al., 2008)

ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไดออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมโมโนซัลเฟตอลูมินेट (C_2ASH_8) และแคลเซียมอลูมินेटไฮเดรต (C_4AH_3) นักวิจัยได้ศึกษาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานโดยโดยวิธีการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetry Analysis) พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงด้วยการ

แทนวัสดุปอซโซลานที่เพิ่มขึ้นและความละเอียด (Chindaprasirt, P., et al., 2007) Barbhuiya et al. (2009) พบว่าการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงส่งผลคอนกรีตช่วยต้านทานซัลเฟต ขณะที่การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลาน Chaipanich and Nochiya (2010) ใช้อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (Derivative Thermogravimetric) หาปฏิกิริยาและการอธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของเพสต์ พบว่าเอททริงไกต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมโมโนซัลเฟตออลูมิเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต พบพืชของปฏิกิริยาดังกล่าว และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ผลรวมของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมโมโนซัลเฟตออลูมิเนต (C_2ASH_8) และแคลเซียมออลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ปริมาณโพรงและโครงสร้างโพรงของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านและความทนทาน โครงสร้างในซีเมนต์เพสต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Chindaprasirt, P., et al., 2007 and Mindress, S, and Young, J.F., 1981) ประกอบไปด้วยโพรงเจล (Gel pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 0.5–10 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการล้า โพรงคาปิลารีสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ขนาด คือโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 50 นาโนเมตร–10 ไมครอน ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน และโพรงคาปิลารีขนาดกลาง (Medium capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10–50 นาโนเมตร ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน การหดตัว ส่วนโพรงอากาศมีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10 ไมครอน – 100 มิลลิเมตร มีผลต่อกำลัง Khatib and Wild (1996) ศึกษาเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวร้อยละ 5, 10 และ 15 พบว่าเพสต์มีการปรับโครงสร้างของโพรง Chindraprasirt et al (2005) ใช้เกลือยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนพบว่าเพสต์ผสมด้วยเกลือยทำให้ขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเพสต์ควบคุม นอกจากนี้ Halamickova et al (1995) ศึกษาการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตและแทรกซึมของคลอไรด์พบว่าขนาดโพรงวิกฤตเป็นปัจจัยต่อการซึมผ่านน้ำและคลอไรด์

การศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้านกายภาพเป็นส่วนใหญ่เช่น กำลังอัด การต้านทานซัลเฟต และแทรกซึมของคลอไรด์ อย่างไรก็ตามการศึกษาลักษณะละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ผสมยังไม่มีการศึกษา เพื่อให้เข้าใจผลของละเอียดของเถ้าปาล์มต่อโครงสร้างจุลภาคของเพสต์และสามารถนำเถ้าปาล์มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนอกจากนี้ลดปริมาณพื้นที่ในการฝังกลบ

7.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

ศึกษาผลของความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมัน ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีความไม่เป็นผลึกของเก้าปาล์มน้ำมัน ผลของความละเอียดต่อกำลังอัด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโครงสร้างโพรงของเพสต์

7.3 วิธีการศึกษา

7.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม ASTM C150
2. เก้าปาล์มน้ำมัน ใช้เก้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม นำเก้าปาล์มน้ำมันมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และอนุภาคที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หลังจากนั้นนำเก้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียด 2 ขนาด คือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ เรียกว่า GIPOA และอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เรียกว่า G2POA
3. น้ำ ใช้น้ำประปา

7.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเก้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย การขนาดเฉลี่ยและการกระจายของอนุภาคโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบ เลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้วิธี (X-Ray Fluorescence) และทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลมตามมาตรฐาน ASTM C 204

7.3.3 อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

การหล่อซีเมนต์เพสต์ใช้เก้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันแสดงตารางที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทุกอัตราส่วนผสม หล่อตัวอย่างเพสต์ขนาด 50x50x50 มม³ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และถอดแบบเพสต์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่ อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เพสต์	OPC	G1POA	G2POA
OPC	100	-	-
20G1POA	80	20	-
40G1POA	60	40	-
20G2POA	80	-	20
40G2POA	60	-	40

7.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ เลือกชิ้นตัวอย่างซึ่งอยู่ตรงกลางก้อนลูกบาศก์ ใช้สิ่วสกัดตัวอย่างเพสต์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ต่อจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งปฏิกิริยา ไฮเดรชัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze Dry ที่ความดันสุญญากาศ -0.5 Pa อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างไว้ในโถดูดความชื้น

7.4.1 การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน

การวิเคราะห์เพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์หนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นำตัวอย่างที่หุ้ดปฏิกิริยาไฮเดรชันบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 หลังจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis วิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที

7.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของเพสต์

การวิเคราะห์การกระจายตัวโพรงของเพสต์ด้วยเครื่องมือ Mercury Intrusion porosimeter นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

7.4.3 การถ่ายภาพขยายของเฟสค์

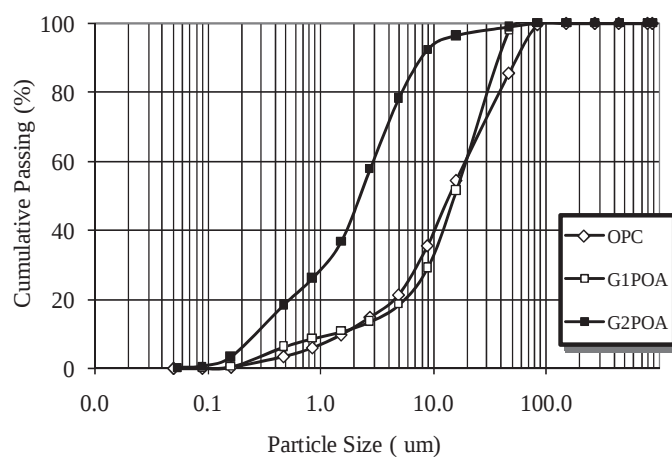
การถ่ายภาพขยายของเฟสค์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรเจนขึ้นชั้นเล็กๆ ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device หลังจากนั้นนำตัวอย่างถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

7.5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

7.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

รูปที่ 7.1 กระจายอนุภาคของวัสดุ พบว่าการกระจายอนุภาคของวัสดุออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์อนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอนและอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 2 ไมครอน ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.14 แก๊ปาล์มน้ำมัน GIPOA ขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และ G2POA ขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เท่า 2.36 และ 2.48 ตามลำดับ ส่วนความละเอียดของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3,600 ซม²/ก ขณะที่แก๊ปาล์มน้ำมัน GIPOA และ G2POA เท่ากับ 2,340 และ 18,000 ซม²/ก

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงในตารางที่ 7.3 พบว่าองค์หลักของแก๊ปาล์มคือซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 54.0 และ 55.7 สำหรับ GIPOA และ G2POA ตามลำดับ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาของ GIPOA และ G2POA เท่ากับร้อยละ 3.7 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ต่ำกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพ N ตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ GIPOA และ G2POA แสดงในรูปที่ 2 พบองค์ประกอบหลักคือ ควอตซ์ (α -quartz) และองค์ประกอบรอง คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Chandara, C., et al., 2010) การวิเคราะห์ปริมาณการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยวิธีรีทเวลด์ (Rietveld method) พบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของ GIPOA และ G2POA เท่ากับร้อยละ 70.2 และ 67.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ ควอตซ์และ คริสโตบาไลต์ เท่ากับ ร้อยละ 65, 35 และ 73, 27 สำหรับ GIPOA และ G2POA ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความไม่บริสุทธิ์ของแก๊ปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 67-70



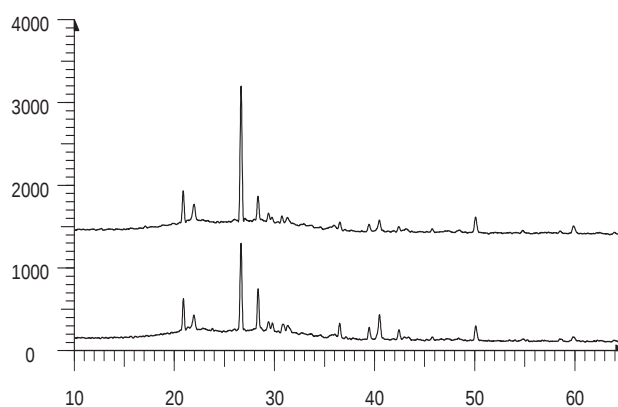
รูปที่ 7.1 กระจายอนุภาคของวัสดุ

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย , d_{50}	พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบ ลน (cm^2/g)
OPC	3.14	14.6	3,600
G1POA	2.36	15.6	6,700
G2POA	2.48	2.1	14,900

ตารางที่ 7.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	G1POA	G2POA
Silicon dioxide (SiO_2)	20.8	54.0	55.7
Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.7	0.9	0.9
Iron oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.0	2.0
Calcium oxide (CaO)	65.3	12.9	12.5
Magnesium oxide (MgO)	-	4.9	5.1
Sodium oxide (Na_2O)	0.1	1.0	1.0
Potassium oxide (K_2O)	0.4	13.5	11.9
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	4.0	2.9
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.7	4.7
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	56.9	58.6



รูปที่ 7.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ G1POA และ G2POA

7.5.2 กำลังอัดของเพสต์

กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 7.4 ที่อายุ 7 วัน พบว่ากำลังของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุม สำหรับเพสต์ผสม G1POA ด้วยอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ กำลังอัดที่อายุ 28 วันของเพสต์ 20G1POA และ 40G1POA เท่ากับ 72.0 และ 61.5 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 96 และ 82 ตามลำดับ เมื่ออายุ 90 วัน พบว่าเพสต์ดังกล่าวมีกำลังอัดเท่ากับ 102.0 และ 88.1 เมกะปาสกาลหรือคิดเป็นร้อยละ 103 และ 89 ตามลำดับ

เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูง พบว่ากำลังอัดของกำลังอัดของ 20G2POA และ 40G2POA ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 77.3, 66.5 และ 109.6, 94.1 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 89 และ 111, 95 ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของเพสต์เกิดขึ้นเนื่องจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานและผลของการอัดแน่นจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าอุดช่องว่างระหว่างเพสต์และทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดี (Isaia, G.C., et al., 2003 and Mehta, P.K. and Aietcin, P.-C.C., 1990) และ เนื่องจาก Nucleation effect เมื่อแทนที่ด้วยอนุภาคที่เล็กทำให้เกิดการกระจายตัวในซีเมนต์ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา (Gopalan, M.K., 1993 and Montgomery, D.G., et al., 1981) ดังนั้นทำให้เพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวและแน่นซึ่งเป็นการปรับปรุงกำลังอัดของเพสต์

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นได้ว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดสูงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ถึงร้อยละ 20 นอกจากนี้กำลังอัดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 96 และ 103 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

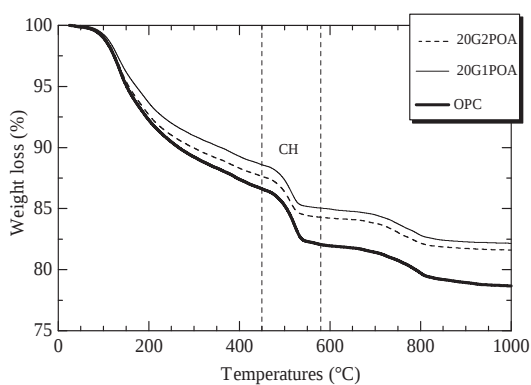
เพสต์	กำลังอัด (MPa) ร้อยละของกำลังอัด			
	7 days	28 days	60 days	90 days
OPC	53.0-100	75.0-100	84.6-100	99.1-100
20G1POA	48.3-91	72.0-96	84.6-100	102.0-103
40G1POA	41.0-77	61.5-82	72.8-86	88.1-89
20G2POA	51.9-98	77.3-103	92.2-109	109.6-111
40G2POA	44.0-83	66.5-89	78.6-93	94.1-95

7.5.3 การวิเคราะห์เพสต์โดยเทคนิคทางความร้อน

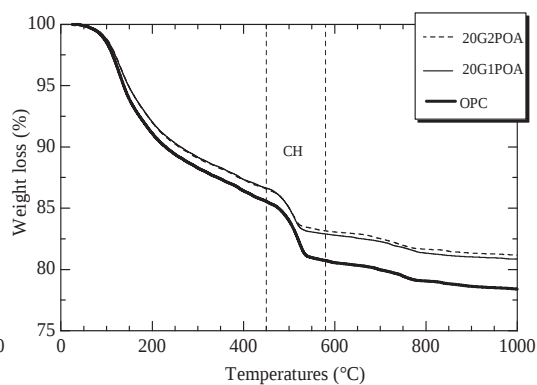
1. ปฏิกริยาของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

การวิเคราะห์เทอร์โมแกรมการสูญเสียน้ำหนักของเพสต์เมื่อได้รับความร้อนแสดงในรูปที่ 7.3 และ 7.4 พบการสูญเสียน้ำหนักแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการสลายตัวเนื่องจากเอททริงไกด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 105 – 450 °C (Bai, J., et al., 2003) ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 450 – 580 °C (El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1977) และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 580 – 1000 °C (El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1977)

อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 แสดงในรูปที่ 7.5 และ 7.6 ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของ C-S-H, C_2ASH_8 , $Ca(OH)_2$, และ $CaCO_3$ ตำแหน่งที่อุณหภูมิ 126-134 °C, 188-194°C, 488-520 °C และ 741-797 °C ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ (Chaipanich, A. and Nochaiya, T., 2010) พบว่า DTG พีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ลดลงด้วยการแทนที่ในปริมาณเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันและด้วยอายุการบ่ม เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดทำให้ DTG พีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเร็วกว่าที่มีอนุภาคนาขนาดใหญ่ การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้พีคของ C-S-H, C_2ASH_8 เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่ม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ได้ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น (Tangchirapat, W., et al., 2009 and Sata, V., et al., 2010) ทำให้เพสต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

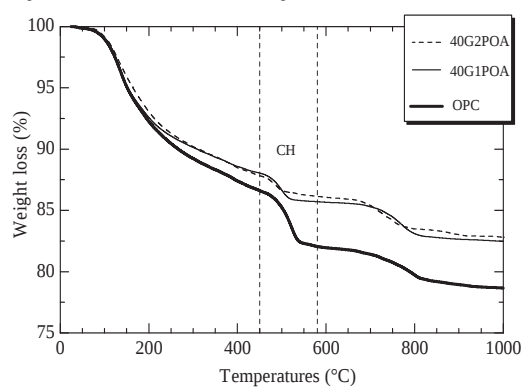


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

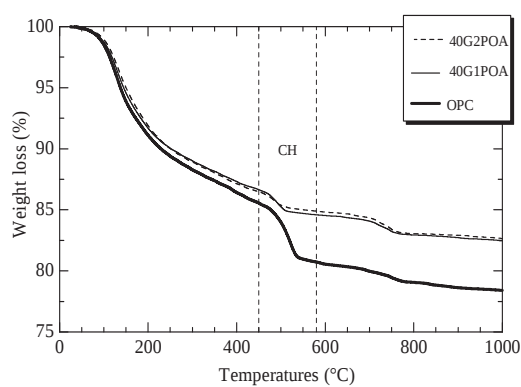


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.3 เปอร์เซ็นการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20

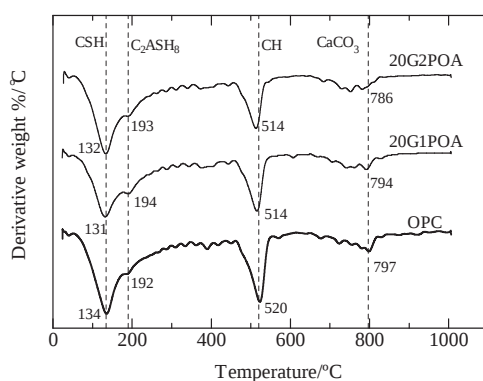


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

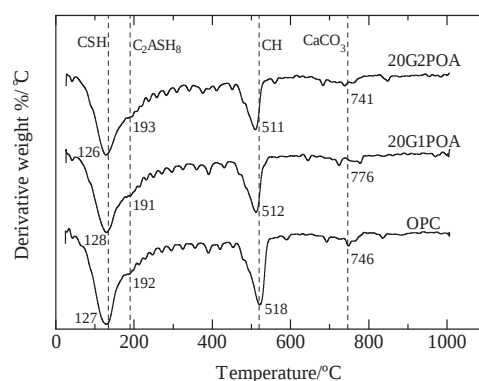


(ข) อายุการบ่ม 90

รูปที่ 7.4 เปอร์เซ็นการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

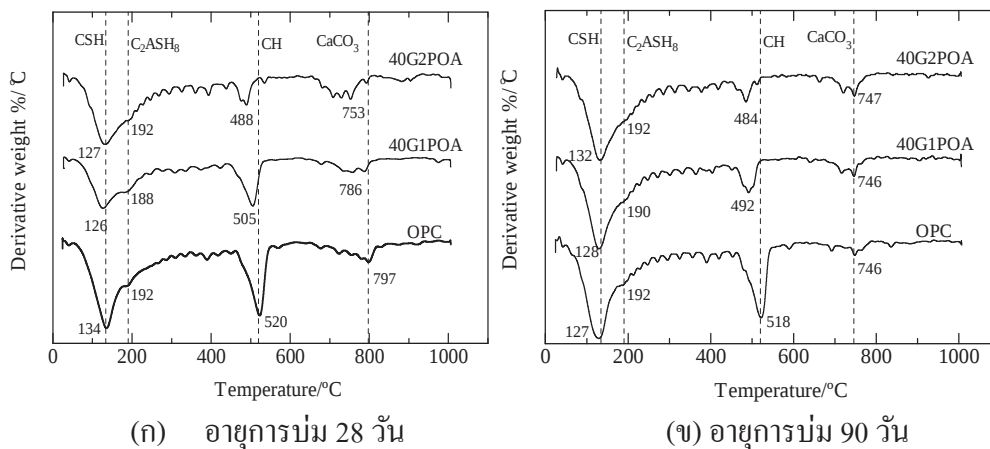


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

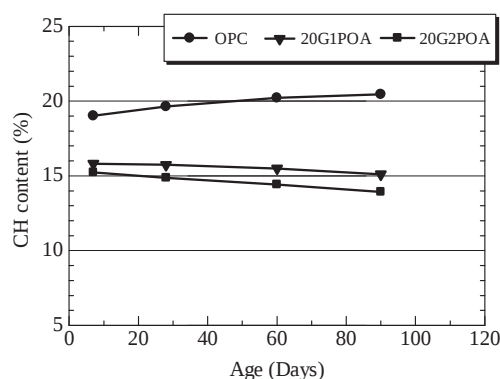
รูปที่ 7.5 อัตราการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20



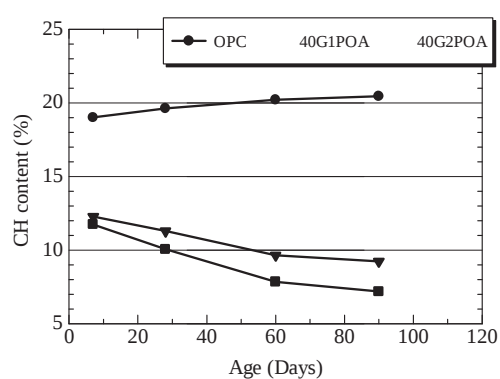
รูปที่ 7.6 อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

2. ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆแสดงในรูปที่ 7.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุ 7, 28, 60, 90 วัน เท่ากับร้อยละ 19.02, 19.64, 20.22 และ 20.46 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากไฮดรเจนที่เพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ 20G1POA และ 20G2POA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 15.10 - 15.82 และ 13.93 - 15.24 หรือลดลงประมาณร้อยละ 5 และ 9 หลังจากอายุการบ่ม 7 วัน ตามลำดับ การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นการบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับเพสต์ที่ผสมด้วย G2POA ซึ่งมีความละเอียดสูงทำให้การปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าเพสต์ที่ผสมด้วย G1POA เนื่องจากความละเอียดของอนุภาคและซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณร้อยละ 40 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ 40G1POA และ 40G2POA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.24–12.18 และ 7.19–11.75 หรือลดลงประมาณร้อยละ 24 และ 39 หลังจากอายุ 7 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่ในปริมาณที่มากทำให้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าการแทนที่ในปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้มีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้การทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการเพิ่มการแทนที่เพิ่มขึ้นด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chindaprasirt, P., et al., 2007)



(ก) การแทนที่ร้อยละ 20



(ข) การแทนที่ร้อยละ 40

รูปที่ 7.7 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์

7.5.4 โครงสร้างโพรงของเพสต์

1. ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์

ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 7.5 ปริมาตรโพรงของเพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.8, 20.1, 17.4 และ 16.6 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ 20G1POA และ 40G1POA มีปริมาตรโพรงสูงกว่าเพสต์ OPC ทุกช่วงอายุ สามารถสรุปได้ว่าปริมาตรโพรงของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคไกล์เคียงปูนซีเมนต์สูงกว่าเพสต์ OPC สำหรับเพสต์ G2POA ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มอนุภาคที่มีความละเอียดสูง ที่อายุการบ่ม 7 วัน เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงต่ำกว่าเพสต์ OPC ทุกช่วงอายุการบ่ม นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเพสต์มีปริมาตรโพรงที่อายุการบ่ม 60 วันเท่ากับร้อยละ 17.3 ต่ำกว่าเพสต์ OPC ซึ่งร้อยละ 17.4 เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มมีความละเอียดทำให้มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากอนุภาคที่เล็กทำให้อุดแทรกในช่องว่างของเพสต์ ดังนั้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์มีความแน่น (Chindaprasirt, P., et al., 2007)

ตารางที่ 7.5 ปริมาตรโพรงของเพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

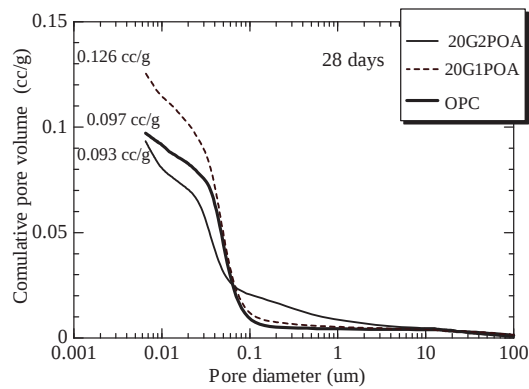
เพสต์	Total porosity (%)			
	7 days	28 days	60 days	90 days
OPC	22.8	20.1	17.4	16.6
20G1POA	26.3	21.7	18.4	17.4
40G1POA	30.2	27.5	19.3	18.5
20G2POA	20.5	17.0	15.5	11.4
40G2POA	23.8	19.7	17.3	15.6

2. ผลความละเอียดของเถาปลาล์มน้ำมันต่อการกระจายตัวโพรงของเพสต์

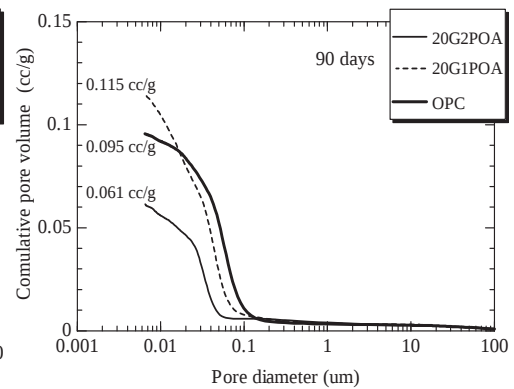
ปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์แทนที่ด้วยเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 40 แสดงในรูปที่ 7.8 และ 7.9 พบว่าเพสต์ 20G2POA มีปริมาตรโพรงต่ำสุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าความละเอียดของเถาปลาล์มน้ำมันของ G2POA ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี อนุภาคที่มีความละเอียดสูง สามารถเข้าไปอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้ปริมาตรความพรุนลดลงและเพสต์มีความแน่นขึ้น ส่วนเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 40 ที่อายุ 28 วันมีปริมาตรโพรงสะสมสูงกว่าเพสต์ OPC แต่เมื่ออายุ 90 วันปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์ 40G2POA ต่ำกว่าเพสต์ OPC เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นขยายเข้าไปในช่องว่างของโพรง ดังนั้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์มีการเปลี่ยนแปลง (Li, Z. and Ding, Z., 2003)

ขนาดโพรงวิกฤติสามารถหาได้จากจุดตัดกลับของปริมาตรโพรงสะสมหรือค่าสูงสุดของ $dv/d(\log D)$ ซึ่งเรียกว่า ขนาดโพรงวิกฤติหรือขนาดโพรงที่มีความต่อเนื่อง (Li, Z. and Ding, Z., 2003 and Pipilikaki, P. and Beazi-Katsioti, M., 2009) ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโพรงกับขนาดของโพรงแสดงรูปที่ 7.10 และ 7.11 เมื่อพิจารณารูปที่ 10(ก) สำหรับเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน เพสต์ 20G1POA และ 20G2POA มีขนาดโพรงวิกฤติเท่ากับ 45.9 และ 38.0 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งกระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง และมีค่าต่ำกว่าเพสต์ OPC กระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 56.1 นาโนเมตร เมื่ออายุ 90 วัน ขนาดโพรงวิกฤติของเพสต์ OPC, 20G1POA และ 20G2POA เท่ากับ 54.6, 41.7 และ 31.1 นาโนเมตร เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถาปลาล์มน้ำมัน ส่งผลให้โครงสร้างของโพรงมีการปรับเปลี่ยนจากโพรงที่หยาบให้มีความละเอียดมากขึ้น สำหรับเพสต์ผสมด้วยเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 40 แสดงในรูปที่ 11 พบว่าเพสต์ 40G1POA และ 40G2POA มีขนาดโพรงวิกฤติที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ 42.1, 41.8 และ 36.8, 35.0 นาโนเมตร ตามลำดับและกระจายในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง ซึ่งต่ำกว่าเพสต์ OPC

ผลการทดสอบการกระจายตัวของโพรงแสดงให้เห็นว่าขนาดโพรงวิกฤติของเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์มีปริมาตรโพรงสูงกว่าเพสต์ OPC แต่อนุภาคที่มีความละเอียดทำให้มีปริมาตรโพรงต่ำกว่าเพสต์ OPC นอกจากนี้เพสต์ผสมด้วยเถาปลาล์มน้ำมันมีขนาดโพรงวิกฤติต่ำกว่าเพสต์ OPC เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลของการอัดตัวของอนุภาค การกระจายตัวของเถาปลาล์มน้ำมันในเพสต์ทำให้โครงสร้างโพรงเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดของโพรงที่มีความละเอียด อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัย (Ye, G., et al., 2006) พบว่าขนาดโพรงวิกฤติเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านและ (Halamicikova, P., et al., 1995) ขนาดโพรงวิกฤติเป็นปัจจัยต่อการซึมผ่านของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์

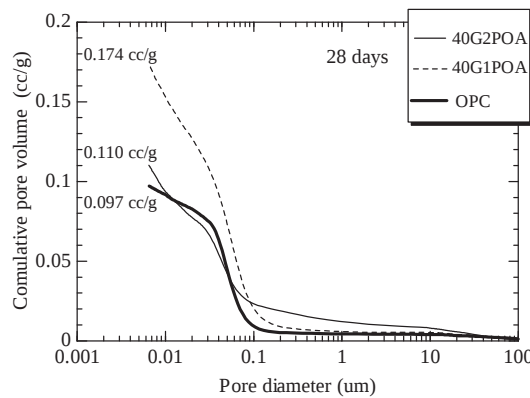


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

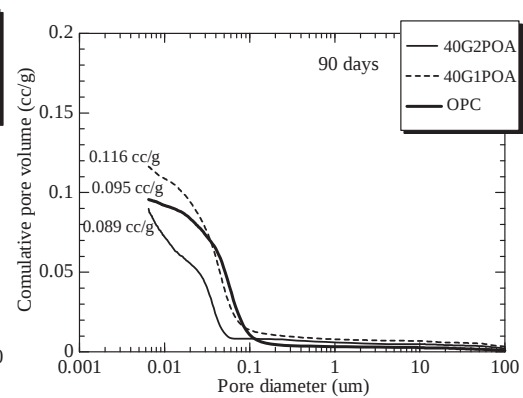


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเฟสค์ 20POA

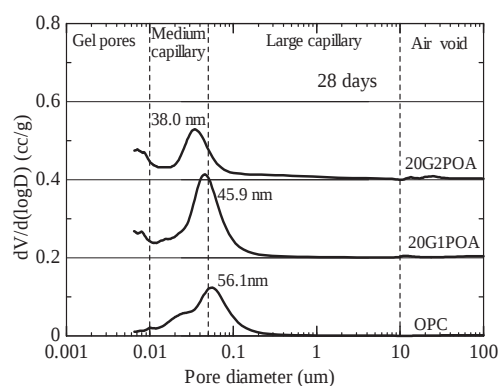


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

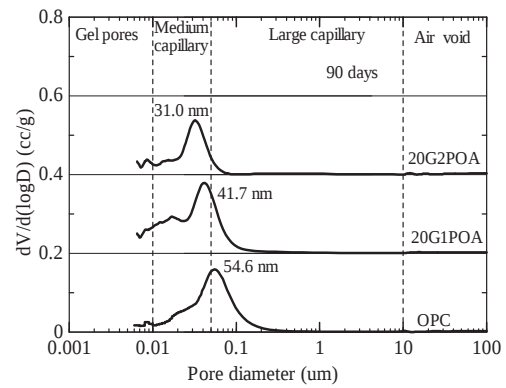


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเฟสค์ 40POA

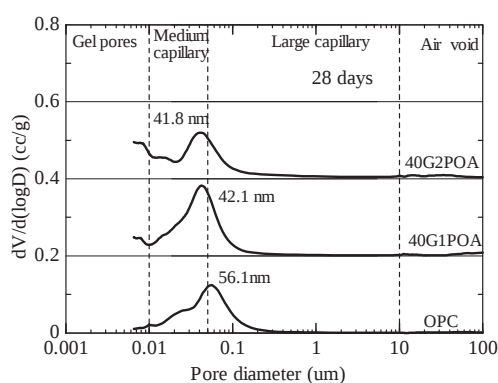


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

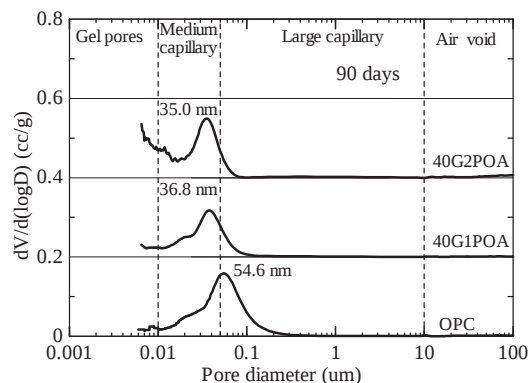


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพรงกับขนาดโพรงของเฟสค์ 20POA



(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

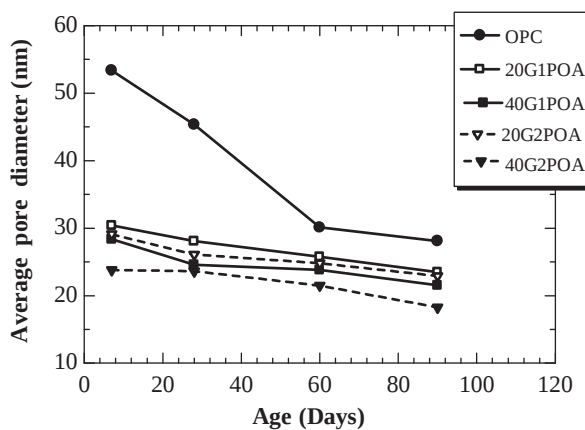


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรงกับขนาดโพรงของเฟส 40POA

3. ผลของความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส

ผลการทดสอบขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟสแสดงในรูปที่ 7.12 พบว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส OPC ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 53.4, 45.3, 30.1 และ 28.1 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับเฟสผสมเก้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคไกล์เคียงปูนซีเมนต์ ขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส 20G1POA และ 40G1POA ต่ำกว่าเฟส OPC ทุกช่วงอายุการทดสอบ ขณะที่ปริมาตรโพรงสูงกว่าเฟส OPC สำหรับเฟส 20G2POA และ 40G2POA ซึ่งผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงมีขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเฟส OPC ทุกอายุการบ่ม เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าโครงสร้างโพรงของเฟสมีการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่าขนาดโพรงเฉลี่ยลดลงด้วยการใช้เก้าปาล์มน้ำมันและการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโพรงเฉลี่ยลดลงด้วยความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chindaprasirt, P. et al., 2005 and Frías, M. and Cabrera, J., 2000)



รูปที่ 7.12 แสดงขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส

7.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

1. กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มร้อยละ 20 ด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงมีค่าสูงกว่าเพสต์ OPC นอกจากนี้การแทนที่ร้อยละ 40 กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มที่มีความละเอียดสูงมีค่ามากกว่าร้อยละ 95 ของเพสต์ OPC ที่อายุ 90 วัน
2. เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นและความละเอียดนอกจากนี้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้พีคของ CSH, CASH เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่ม
3. การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลเนื่องจากการปฏิกิริยาปอซโซลานและทำให้การกระจายตัวโครงสร้างโพรงของเพสต์ที่มีขนาดหยาบเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงเป็นโพรงที่มีขนาดความละเอียด ทำให้นิวาสโพรงวิกฤติและขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต่ำกว่าเพสต์ OPC
4. เถ้าปาล์มน้ำมันมีความไม่เป็นผลึกประมาณร้อยละ 67-70 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 เป็นการปรับปรุงกำลังอัด นอกจากนี้ทำให้ปริมาตรโพรงเพสต์ต่ำกว่าเพสต์ OPC และส่งผลเพสต์มีความแน่นขึ้นจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี

7.7 เอกสารอ้างอิง

- ASTM C618, (2001). A standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. *Annual book of ASTM standards*, 2001, vol. 04.02(Philadelphia), 310–313.
- Barbhuiya, S.A., Gbagbo, J.K., Russell, M.I. and Basheer, P.A.M. Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10), 3233-3239.
- Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. and Lewis, M.H. Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(8), 1189-1202.

- Chandara, C., Sakai, E., Azizli, K.A.M., Ahmad, Z.A. and Hashim, S.F.S. The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9), 1590-1593.
- Chaipanich, A. and Nochaiya, T. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2010, 99(2), 487-493.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(4), 425-428.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7), 1492-1499.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7), 1534-1541.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5), 932-938.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8), 1701-1707.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(12), 3523-3531.
- El-Jazairi, B. and Illston, J.M. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1977, 7(3), 247-257.
- Frías, M. and Cabrera, J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(4), 561-569.
- Gopalan, M.K. Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 1993, 90(2), 117-121.

- Halamickova, P., Detwiler, R.J., Bentz, D.P. and Garboczi, E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(4), 790-802.
- Hendrik, G., Oss, V. and Padovani, A.C. Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, vol. 7, 93-126.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(1), 69-76.
- Khatib, J.M. and Wild, S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(10), 1545-1553.
- Mindress, S. and Young, J., F. Concrete. 1981(Prentice-Hall, Engle Cliffs), .
- Mehta, P.K. and Aietcin, P.-C.C. Principles underlying production of high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1990, 12(2), 70-78.
- Montgomery, D.G., Hughes, D.C. and Williams, R.I.T. Fly ash in concrete - a microstructure study. *Cement and Concrete Research*, 1981, 11(4), 591-603.
- Pipilikaki, P. and Beazi-Katsioti, M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(5), 1966-1970.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(6), 623-628.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Rattanashotinunt, C. Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(March).
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Compressive strength and expansion of blended cement mortar containing palm oil fuel ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(8), 426-431.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 2007, 27(1), 81-88.

Ye, G., Lura, P. and van Breugel, K. Modelling of water permeability in cementitious materials.
Materials and Structures, 2006, 39(9), 877-885.

บทที่ 8

ผลการดำเนินการ (Output)ที่ได้จากโครงการวิจัย

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถตีพิมพ์เป็นผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติที่มี Impact Factor 4 เรื่อง ผลงานที่อยู่ในขั้นตอนรอ submit อีก 2 เรื่อง นอกจากนี้ ยังมีผลงานอีก 2 เรื่องที่ได้นำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ของบทความได้จากภาคผนวก ก. สำหรับรายชื่อบทความมีดังนี้

8.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มี Impact Factor

1. Kroehong, W., Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2011), Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials, 25(11), 4095-4104. (IF= 1.366)
2. Sinsiri, T.*, Phoo-ngernkham, T., Sata V., Chindapasirt, P., (2012), The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymers mortar, Computers and Concrete, 9 (6), 427-437. (IF= 0.763)
3. Napia, C. , Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul C., Chindapasirt, P. (2012), Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, Waste Management, 32, 1459-1467. (IF= 2.353)
4. Sinsiri, T.*, Kroehong, W, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2012), Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on compressive strength of blended cement paste, Materials and Design, 42, 424-433. (IF= 2.200)

หมายเหตุ * หมายถึง Corresponding Author

8.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์เชิงวิชาการ

มีนักศึกษาจบการศึกษาระดับปริญญาเอก 1 คน จบการศึกษาระดับปริญญาโท 2 คน และกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกอีก 1 คน คาดว่าจะจบการศึกษาในเดือน ธันวาคม 2555 ภายใต้การดูแลของนักวิจัย (ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ) ที่ทำวิจัยในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

8.3 ผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติ

8.3.1 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

5. Pantawee, S., Sinsiri, T., 2008, The Use of natural pozzolans in lightweight concrete, Proceedings of the 3rd ACF International Conference ACF/VCA-2008 on Sustainable Concrete Technology and Structure in Local Climate and Environment Conditions, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 224-230.
6. Napia, C., Sinsiri, T., Chindaprasert, P., 2008, The Effect of zeolite on microstructure of blended cement paste, Proceedings of Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11), Thipei, TAIWAN, November 19-21, 1-7.

8.3.2 ผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

7. ธนากร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมท์. วิศวกรรมสาร มข. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น), ฉบับที่ 38(1), หน้า 11-26.ค
8. ธนากร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี), ฉบับที่ 34(1), มกราคม-มีนาคม 2554, หน้า 31-44.

8.3.3 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมระดับชาติ

9. ชูวิทย์ นาเพีย, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552).การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-206-MAT-213.
10. วันโชค เครือหงษ์, เพลิมชัย ชื่นตา, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปฏิริยาปอชโซลานของเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม.การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-136-MAT-143.
11. ธนากร ภูเงินขำ, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2553). การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลท์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, หน้า 119-124.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ก.1 รายชื่อบทความและบทความที่ได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มี Impact Factor

1. Kroehong, W., **Sinsiri, T.***, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2011, Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 11, pp.4095-4104. (IF= 1.366)
2. Napia, C. , Sinsiri, T.* , Jaturapitakkul C., Chindapasirt, P., 2012, Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, Waste Management, 32 (2012), 1459-1467. (IF= 2.353)
3. **Sinsiri, T.***, Phoo-ngernkham, T., Sata V., Chindapasirt, P., 2012, The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, Computer and Concretes, Vol. 9, No.6, pp. 427-437. (IF= 0.763)
4. **Sinsiri, T.***, Kroehong, W, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2012, Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on compressive strength of blended cement paste, Materials and Design, Vol. 42, pp. 424-433. (IF= 2.200)

หมายเหตุ * หมายถึง Corresponding Author

1. Kroehong, W., Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P., Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 11, pp.4095-4104. (IF= 1.366)



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Review

Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste

Wunchock Kroehong^a, Theerawat Sinsiri^{a,*}, Chai Jaturapitakkul^b, Prinya Chindaprasirt^c^a School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 January 2011

Received in revised form 2 March 2011

Accepted 22 April 2011

Available online 25 May 2011

Keywords:

Palm oil fuel ash

Amorphous

Compressive strength

Thermogravimetric

Porosity

ABSTRACT

This paper presents the effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. Palm oil fuel ash (POFA) was ground to two different finenesses. Coarse and high fineness palm oil fuel ash, with median particle sizes of 15.6 and 2.1 μm , respectively, were used to replace ordinary Portland cement (OPC) at 0%, 20% and 40% by binder weight. A water to binder (W/B) ratio of 0.35 was used for all blended cement pastes. The amorphous ground palm oil fuel ash was characterized by the Rietveld method. The compressive strength, thermogravimetric analysis and pore size distribution of the blended cement pastes were investigated. The test results indicate that the ground palm oil fuel ash was an amorphous silica material. The compressive strengths of the blended cement pastes containing coarse POFA were as high as that of OPC cement paste. Blended cement paste with high fineness POFA had a higher compressive strength than that with coarse POFA. The blended cement pastes containing 20% of POFA with high fineness had the lowest total porosity. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contents of blended cement paste containing POFA decreased with increasing replacement of POFA and were lower than those of the OPC cement paste. In addition, the POFA fineness had an effect on the reduction rate of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Furthermore, the critical pore size and average pore size of blended cement paste containing POFA were lower than those of the OPC cement paste. The incorporation of high fineness POFA decreased the critical pore size and the average pore size of blended cement paste as compared to that with coarse POFA.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	4096
2. Experimental details	4096
2.1. Materials	4096
2.2. Mix proportion and curing	4096
2.3. Compressive strength	4096
2.4. X-ray diffraction (XRD)	4097
2.5. Thermal analysis	4097
2.6. Determination of the porosity of the pastes	4097
3. Results and discussion	4097
3.1. Properties of OPC and POFA	4097
3.2. Compressive strength	4098
3.3. Thermogravimetric analysis	4099
3.3.1. Hydrated phase of cement pastes containing palm oil fuel ash	4099
3.3.2. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content	4099
3.4. Pore size distribution of the cement paste	4100
3.4.1. Total porosity of the cement paste	4100
3.4.2. Effect of palm oil fuel ash fineness on the pore size distribution of the pastes	4100
3.4.3. Effect of palm oil fuel ash fineness on the average pore diameter of the cement paste	4101
3.5. Relationships between the compressive strength and total porosity of the pastes	4102

* Corresponding author. Tel.: +66 4422 4420; fax: +66 4422 4607.

E-mail address: sinsiri@gsu.ac.th (T. Sinsiri).

4. Conclusions.....	4103
Acknowledgments.....	4103
References.....	4103

1. Introduction

The Portland cement clinker process results in the emission of CO₂. Every ton of Portland cement produces around 850 kg of CO₂ emitted to the atmosphere, thus causing greenhouse effects [1]. Therefore, it is necessary to reduce the production of Portland cement clinker. To solve this problem, the partial replacement of ordinary Portland cement with pozzolanic materials has been proposed. Pozzolanic materials, such as fly ash, rice husk ash, palm oil fuel ash and baggase ash, are used as mineral admixtures to reduce the cement content in the mixtures. These materials have been reported to increase the durability of paste, mortar and concrete [2–4].

Palm oil fuel ash (POFA) is a by-product from biomass thermal power plants where oil palm residues are burned to generate electricity. More than approximately 100,000 tons of palm oil fuel ash are produced every year in Thailand [5]. Palm oil fuel ash is rarely utilized, and it may add to future environmental problems. Many researchers have studied the use of POFA as a partial replacement of cement in concrete. The main chemical constituent of palm oil fuel ash is silicon dioxide [4,6]. Tangchirapat et al. [4] found that ground palm oil fuel ash is a good pozzolanic material and can be used to replace Portland cement up to 30% by binder weight. Sata et al. [7] also showed that POFA with high fineness has an excellent pozzolanic reaction and can be used as a supplementary material to produce high strength concrete. In addition, the utilization of POFA can improve concrete strength and water permeability [5]. Furthermore, the partial replacement of OPC with POFA assists in the sulfate resistance [8] and chloride resistance of concrete [2].

Silicon dioxide (SiO₂) and aluminum trioxide (Al₂O₃) contents in pozzolanic material react with calcium hydroxide (Ca(OH)₂) to produce CSH, C₂ASH₈ and C₄AH₁₃. Most researchers have studied Ca(OH)₂ in cement paste containing pozzolanic material by thermogravimetry (TG). The Ca(OH)₂ content is reduced with increasing replacement of pozzolanic material and fineness [9]. Barbhuiya et al. [10] found that the reduction of the Ca(OH)₂ content indicates consumption in the pozzolanic reaction. In addition, the use of pozzolanic material to partially replace cement reduces the Ca(OH)₂ content in concrete, which could improve the sulfate resistance of the concrete. Furthermore, Chaipanich and Nochiya [11] used differential thermal analysis (DTG) to determine the hydration products involved and explained the increase in the compressive strength of paste. They showed that blended cement paste containing fly ash and silica fume reduces the amount of Ca(OH)₂ content while the mass loss of ettringite, C–S–H and C₂ASH₈ increases when the curing time is increased.

The porosity and pore structure are very important for permeability and durability. The pore system in cement-based materials consists of two types of pores [9,12]: (a) gel pores with a diameter less than 10 nm that affect shrinkage and fatigue and (b) capillary pores that are divided into large capillary pores with diameters between 50 and 10,000 nm, which affect the compressive strength and permeability, and medium capillary pores with diameters between 10 and 50 nm, which influence the compressive strength, permeability and shrinkage. Khatib and Wild [13] studied cement pastes containing metakaolin at 5%, 10% and 15% and found that the pore size of a cement paste depends on refinement of the pore

structure. In addition, Chindraprasirt et al. [14] used fly ash to replace Portland cement and showed that the cement paste containing fly ash had a smaller average pore diameter than that of control cement paste. In addition, Halamickova et al. [15] studied water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortar and showed that they are influenced by the critical pore size.

Many researchers have already reported on the influence of palm oil fuel on the physical properties of mortar and concrete, including compressive strength, sulfate resistance and chloride resistance. However, the pore size distribution and microstructure of blended cement pastes containing palm oil fuel ash with different finenesses have not been well established. An understanding of the influence of the fineness of palm oil fuel ash on the pore size distribution and microstructure of cement paste could lead to an increase in the use of palm oil fuel ash in concrete and could be productive for the environment by reducing the volume of waste disposed of in landfills. Thus, the objective of this research was to study the effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. The chemical properties and amorphous structure of ground palm oil fuel ash were determined. The effects of ground palm oil fuel ash with two different finenesses on the compressive strength, calcium hydroxide and pore size distribution of blended cement pastes were investigated.

2. Experimental details

2.1. Materials

Type I Portland cement was used in this study. Palm oil fuel ash (POFA) from a thermal power plant in Thailand was used as a pozzolan. The POFA was sieved through a No. 16 sieve to remove large particles and incompletely combusted materials [16,17]. The POFA was ground to two different sizes. The first fineness was ground to have the same as that of OPC with grinding machine. The second fineness was ground by attrition mill for 60 min at 1000 rpm using 2 mm diameter steel ball [18,19]. The abbreviations G1 and G2 were used to identify the ground POFA as having the same particle size cement and the smaller particle size, respectively.

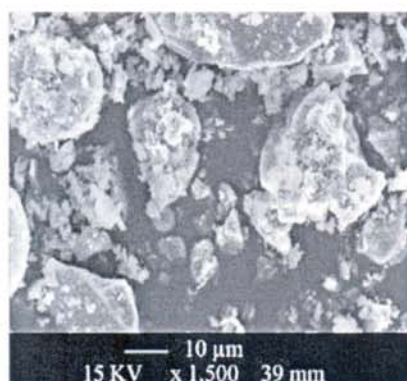
SEM photos of POFA with different finenesses are shown in Fig. 1. G1POFA and G2POFA consist of irregular and crushed shaped particles. A similar observation has also been reported by other researchers [4]. The physical properties of OPC and POFA are given in Table 1. The specific gravity of OPC was 3.14, and those of G1POFA and G2POFA were 2.36 and 2.48, respectively. The Blaine fineness values of OPC, G1POFA and G2POFA were 3600, 6700 and 14,900 cm²/g, respectively. The specific gravity and specific surface area of POFA increased with increasing grinding time [8,20,21]. The median particle sizes of OPC, G1POFA and G2POFA were 14.6, 15.6 and 2.2 μm, respectively. Fig. 2 shows a comparison of the particle size distributions of type I Portland cement and POFA. The two group of POFA particle size are similar to the particle size of the cement and smaller, respectively.

2.2. Mix proportion and curing

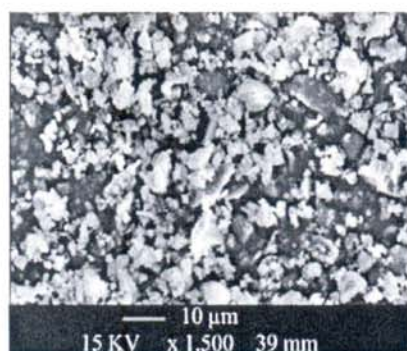
Type I Portland cement was partially replaced by POFA (G1POFA or G2POFA) at the rate of 0%, 20%, and 40% by binder weight. The water to binder (W/B) ratio was constant at 0.35 for all mixtures. The cast specimens were covered with plastic to prevent water loss. After casting for 24 h, the specimens were removed from the mold. Thereafter, they were cured in saturated lime water at a temperature of 23 ± 2 °C. The mix proportions of cement paste and blended pastes containing POFA are given in Table 2.

2.3. Compressive strength

Cube specimens of 50 × 50 × 50 mm were used for compressive strength tests of the pastes. The strengths were determined at 7, 28, 60 and 90 days according to ASTM C 109 [22]. The compressive strength of the pastes at each age was the average value of five samples.



(a)



(b)

Fig. 1. Scanning electron microscopy of palm oil fuel ash (a) ground palm oil fuel ash (G1POFA), (b) ground palm oil fuel ash (G2POFA).

Table 1
Physical properties of OPC and POFA.

Sample	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine fineness (cm^2/g)
OPC	3.14	14.6	3600
G1POFA	2.36	15.6	6700
G2POFA	2.48	2.1	14,900

2.4. X-ray diffraction (XRD)

The XRD scans were performed for 2θ between 10° and 65° , with an increment of $0.02^\circ/\text{step}$ and a scan speed of $0.5^\circ/\text{step}$. The amorphous structure in the palm oil fuel ash was determined by quantitative XRD analysis using Bruker's TOPAS software.

2.5. Thermal analysis

Thermal analysis is a widely used method for determining hydration products such as ettringite, calcium silicate hydrate (C–S–H), calcium aluminum silicate hydrate (C_2ASH_8), calcium aluminate hydrate (C_4AH_{13}), calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and calcium carbonate (CaCO_3) [23]. Thermogravimetric analysis was carried out using Netzsch STA 409 C/CD equipment. The sample was heated from room temperature to 1000°C at a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ under a nitrogen atmosphere. The thermogravimetric (TG) signal was used to calculate the weight loss during heating and to estimate the content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and carbonated phases. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content was calculated from the weight loss between 450 and 580°C [24]. Furthermore, the derivative thermogravimetric (DTG) data of the weight loss can be used to further determine each phase [25].

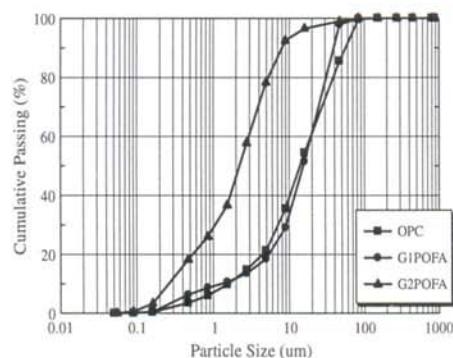


Fig. 2. Particle size distribution of OPC and POFA.

Table 2
Mix proportions of cement paste and pastes containing POFA.

Mix No.	Symbol	OPC	G1POFA	G2POFA	W/B
1	OPC	100	–	–	0.35
2	20G1POFA	80	20	–	0.35
3	40G1POFA	60	40	–	0.35
4	20G2POFA	80	–	20	0.35
5	40G2POFA	60	–	40	0.35

2.6. Determination of the porosity of the pastes

The measurement of the distribution of pore diameters in the hardened cement pastes, determined by mercury intrusion porosimetry (MIP), was conducted at a pressure capacity of 228 MPa. After curing, the samples were obtained by carefully breaking the cube specimens with a chisel. The representative samples of 3–6 mm pieces weighing between 1 and 1.5 g were taken from the middle of the specimen. To stop the hydration reaction, the samples were submerged directly into liquid nitrogen for 5 min and were then evacuated at a pressure of 0.5 Pa at -40°C for 48 h. This method has been used previously to stop the hydration reaction of cement paste [26,27]. The pressure is determined by the Washburn equation [28]. A constant contact angle of 140° and a constant surface tension of mercury of 480 dynes/cm were used for the pore size calculation.

3. Results and discussion

3.1. Properties of OPC and POFA

The chemical composition of the POFA is given in Table 3. The main chemical component of the POFA was silicon dioxide (SiO_2), which accounted for 54.0% and 55.7% for G1POFA and G2POFA, respectively. The losses on ignition (LOI) for G1POFA and G2POFA were 3.7% and 4.7%, respectively. The sums of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 for G1POFA and G2POFA were 56.9% and 58.6%, respectively. Awal and Hussin [29] reported that POFA might be grouped between Class C and Class F pozzolan as specified by ASTM C 618 [30] and the sum of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 content of palm oil fuel ash used in their study was 59.7%, which was close to the finding in this research. However, the LOI was 18.0%, which is much higher than that in this study. The burning efficiency and the material source are the major causes of differences in the chemical composition of palm oil fuel ash [7,31].

The X-ray diffraction (XRD) patterns of G1POFA and G2POFA are shown in Fig. 3. It was found that the major phase was α -quartz (SiO_2), and the minor phase was cristobalite (SiO_2). A similar result was reported by Chandara et al. [16]. Quantitative XRD analysis based on the Rietveld method was carried out using Bruker's TOPAS. The percentages of amorphous G1POFA and G2POFA were 70.2% and 67.2% (by mass), respectively. Moreover, the proportions

Table 3
Chemical composition of OPC and POFA.

Chemical composition (%)	OPC	G1POFA	G2POFA
Silicon dioxide (SiO_2)	20.8	54.0	55.7
Aluminum trioxide (Al_2O_3)	4.7	0.9	0.9
Iron oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.0	2.0
Calcium oxide (CaO)	65.3	12.9	12.5
Magnesium oxide (MgO)	–	4.9	5.1
Sodium oxide (Na_2O)	0.1	1.0	1.0
Potassium oxide (K_2O)	0.4	13.5	11.9
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	4.0	2.9
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.7	4.7
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	–	56.9	58.6

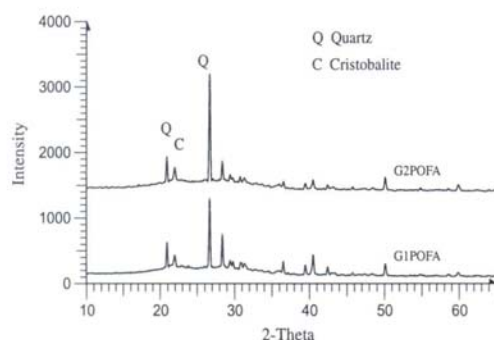


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of G1POFA and G2POFA.

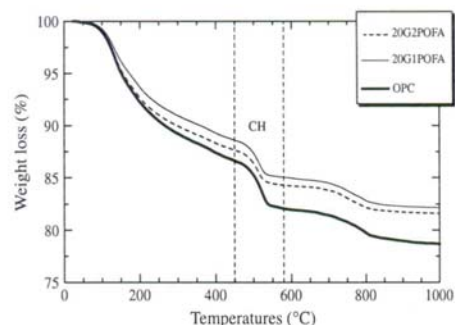
of quartz and cristobalite were 65% and 35% and 73% and 27% (by mass) for G1POFA and G2POFA, respectively. These results suggest that the amorphous content of the palm oil fuel ash was approximately 67–70%.

3.2. Compressive strength

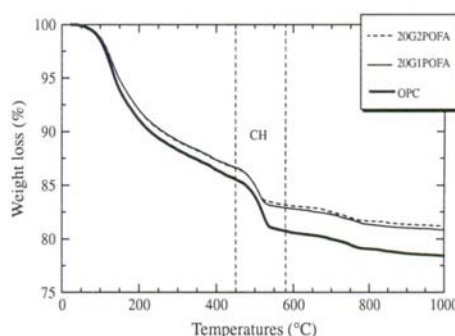
The compressive strength and normalized strength of pastes containing POFA compared to OPC paste (cement paste) are shown in Table 4. At 7 days, the compressive strength of the pastes containing palm oil fuel ash was less than that of OPC paste. For the paste containing POFA with the same particle size as cement at 28 days, the compressive strengths of the 20G1POFA and 40G1POFA pastes were 72.0 and 61.5 MPa or about 96% and 82% of that of the OPC paste, respectively. They increased to 102.0 and 88.1 MPa or about 103% and 89% of that of the OPC paste, respectively, at 90 days. The compressive strength of the 20G1POFA paste at 90 days was slightly higher than that of the OPC paste, and that of 40G1POFA was lower than that of the OPC paste. For pastes with the small particle size, the compressive strengths of 20G2POFA and 40G2POFA at 28 and 90 days were 77.3, 66.5 and 109.6, 94.1 MPa or about 103%, 89% and 111%, 95% of that of the OPC paste, respectively.

Table 4
Compressive strength of OPC paste and pastes containing ground palm oil fuel ash.

Mix no.	Symbol	Compressive strength (MPa)				Normalized compressive strength (%)			
		7 days	28 days	60 days	90 days	7 days	28 days	60 days	90 days
1	OPC	53.0	75.0	84.6	99.1	100	100	100	100
2	20G1POFA	48.3	72.0	84.6	102.0	91	96	100	103
3	40G1POFA	41.0	61.5	72.8	88.1	77	82	86	89
4	20G2POFA	51.9	77.3	92.2	109.6	98	103	109	111
5	40G2POFA	44.0	66.5	78.6	94.1	83	89	93	95



(a) Curing time 28 days



(b) Curing time 90 days

Fig. 4. TGA curve results of OPC paste and 20POFA pastes.

The compressive strength of the blended cement paste increased with curing time but decreased with an increase in the replacement of POFA. When the POFA was ground to a reasonably high fineness, the rate of compressive strength gain of the blended cement paste was significantly improved due to the hydration reaction, nucleation effect, packing effect and pozzolanic reaction. The hydration reaction occurs due to the chemical constituents in cement and water, while the pozzolanic reaction occurs due to the reaction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with SiO_2 and Al_2O_3 from palm oil fuel ash, which produces an increase in calcium silicate hydrate, C-S-H. The pozzolanic reaction of high fineness POFA is faster than that of coarse POFA [8,31]. The packing effect is exhibited as the small particles fill the voids of the paste, allowing for denser packing within the material particles and the matrix phase [32,33]. The nucleation effect, arising when the smaller particles are dispersed in the blended cement paste, accelerates the reactions and forms a smaller cementing paste product [34,35]. Thus, the paste containing POFA with high fineness was more homogeneous and denser, which improved the compressive strength of the paste. These

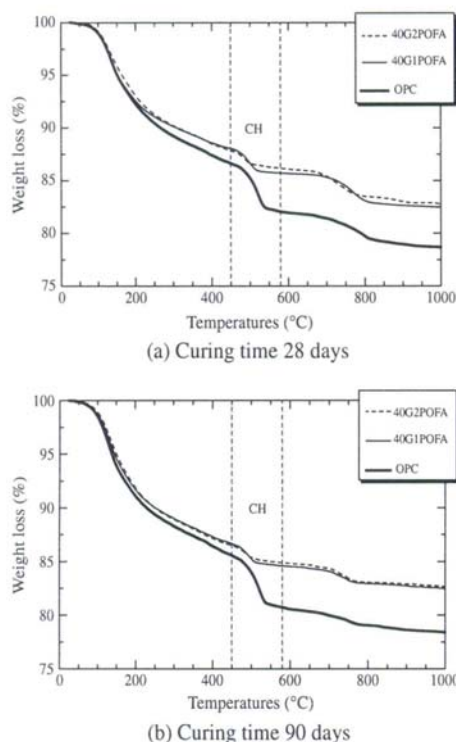


Fig. 5. TGA curve results of OPC paste and 40POFA pastes.

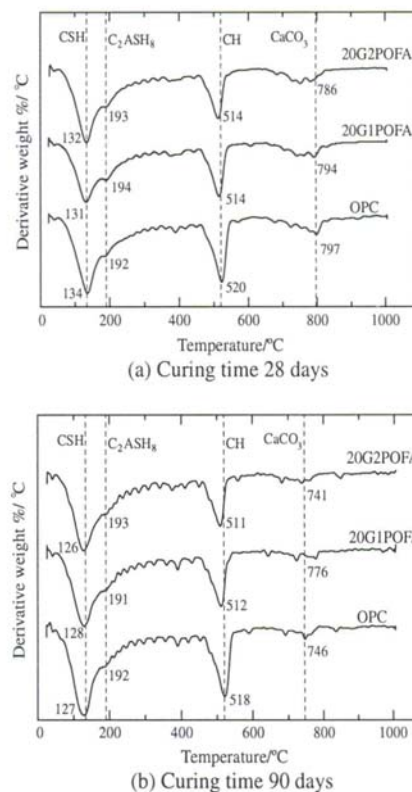


Fig. 6. DTG curve results of OPC paste and 20POFA pastes.

results are similar to those of Chindaprasirt et al. [9,14]. From these results, it can be concluded that POFA with high fineness can be used as a good pozzolan in cement-based materials and can be used to replace Portland cement up to 20%. In addition, the compressive strength of 20G1POFA at which G1POFA has the same particle size as cement is 96% and 103% of that of OPC paste at 28 and 90 days, respectively.

3.3. Thermogravimetric analysis

3.3.1. Hydrated phase of cement pastes containing palm oil fuel ash

Thermogravimetric analysis (TGA) results of the OPC paste and pastes containing POFA are given in Figs. 4 and 5, respectively. Three step mass loss transitions were found. The first step shows the mass loss of dehydration such as ettringite, C-S-H and C₂ASH₈, which occurred at 105–450 °C [23]. The second step mass loss of Ca(OH)₂ was detected between 450 and 580 °C [24], and the third step at 580 and 1000 °C showed the mass loss of calcium carbonate (CaCO₃) [24].

The derivative thermogravimetric (DTG) results of the OPC paste and 20POFA cement paste are plotted in Figs. 6 and 7, respectively. At 28 and 90 days, the DTG curves of all pastes showed similar phases, which are C-S-H, C₂ASH₈, Ca(OH)₂ and CaCO₃ detected at 126–134 °C, 188–194 °C, 488–520 °C and 741–797 °C, respectively. Similar findings have also been reported by other researchers [11,36]. The DTG curve peak for Ca(OH)₂ of the pastes containing palm oil fuel ash decreased with increasing replacement of the palm oil fuel ash and also decreased with curing time. The high fineness palm oil fuel ash was more effective for decreasing the peak intensity of Ca(OH)₂ than that with a large particle

size because the high fineness palm oil fuel ash has a large surface area to provide the silica and alumina compounds for pozzolanic reaction. These compounds reacted and consumed Ca(OH)₂. The Ca(OH)₂ consumption was used as an indicator of the pozzolanic reaction. The reduction of Ca(OH)₂ in all palm oil fuel ash pastes became more subtle with age. The fineness of the palm oil fuel ash had an effect on the pozzolanic reaction rate. The paste containing high fineness palm oil fuel ash showed a higher pozzolanic reaction rate than the paste containing coarse palm oil fuel ash. The reduction of Ca(OH)₂ led to an increased peak intensity for the C-S-H and C₂ASH₈ phases with increasing curing time, which resulted in an increase in the compressive strength.

3.3.2. Ca(OH)₂ content

The Ca(OH)₂ contents of the pastes at different ages are shown in Fig. 8. The Ca(OH)₂ contents of the OPC paste at 7, 28, 60 and 90 days were 19.02%, 19.64%, 20.22% and 20.46%, respectively. The increase in the Ca(OH)₂ contents of the OPC paste was due to hydration of the cement. The Ca(OH)₂ contents of the pastes containing POFA decreased with the pozzolanic reaction of POFA. The Ca(OH)₂ contents of 20G1POFA and 20G2POFA were between 15.10–15.82% and 13.93–15.24% or reduced by approximately 5% and 9% of that of the 20G1POFA and 20G2POFA pastes at 7 days, respectively. The reduction of Ca(OH)₂ in the blended cement paste indicates its consumption by the pozzolanic reaction [37]. In addition, the pastes containing G2POFA showed lower Ca(OH)₂ contents than that of the G1POFA due to the high fineness of the particles and the silicon dioxide (SiO₂) contents in the POFA, which