

พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุพอซโซลาน ในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟ

บุรฉัตร ฉัตรวีระ^{1*} และ วินัย หอมศรีประเสริฐ²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุพอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะ โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 0 10 และ 20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.38 และ 0.45

จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.38 จะมีอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 ในส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุพอซโซลานที่มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลงและอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าของเถ้าแกลบ ในส่วนของค่าไดอิเล็กตริก ควรเลือกค่าในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและเมื่อปมได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วควรปรับพลังงานให้มีค่าลดลงเพราะค่าไดอิเล็กตริกจะลดลงตามเวลา ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความชื้นในวัสดุทดสอบลดลงจนแห้ง ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดตอนปลายลดลงได้

สำหรับค่าความจุความร้อนจำเพาะพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงใดๆ ของร้อยละการแทนที่เท่ากันทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. จะมีค่าการคายความร้อนที่น้อยกว่าของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ทั้งนี้เนื่องจากที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำมากกว่าที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. ทำให้น้ำที่ไม่ได้ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Free water) ลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิและพลังงานในการคายความร้อนลดลงตามไปด้วย

คำสำคัญ : ซีเมนต์เพสต์ / วัสดุพอซโซลาน / พลังงานไมโครเวฟ

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Behavior of Cement Paste Blended Pozzolanic Material in the Application of Microwave Energy

Burachat Chatveera^{1*} and Winai Homsriprasert²

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

The objective of this research was to study the behavior of cement paste mixed with pozzolanic materials such as fly ash (FA) and rice husk ash (RHA) in the application of microwave energy. The temperature profile of hydration reaction, dielectric properties and specific heat capacity of cement paste specimens were tested. The percentage replacements of FA and RHA by weight of Portland cement type I were 0, 10 and 20 and water-to-binder ratios were 0.38 and 0.45.

From the tested results, the temperature from hydration reaction of cement paste with water-to-binder ratio equal to 0.38 as higher than that with water-to-binder ratio equal to 0.45. The temperature decreased with increasing pozzolanic materials replacement and the hydration temperature of cement paste with FA were higher than that with RHA. In the part of the dielectric value, it should be picked up during the initial setting time and after a period of incubation time, the energy should be reduced because the dielectric value will be reduced over time or there will be caused a moisture in the tested materials to reduce until dry resulting in the long term strength development decreased.

For the specific heat capacity was found that at any water-to-binder ratios of the same percentage replacements, both FA and RHA with fineness equal to 4,000 cm²/g are evolved the heat less than the FA and RHA with fineness equal to 5,000 cm²/g because of fineness equal to 5,000 cm²/g, the material has a surface area to absorb water higher than a fineness equal to 4,000 cm²/g. So that the free water reduced resulted in temperature and evolved energy reduced accordingly.

Keywords : Cement Paste / Pozzolanic Material / Microwave Energy

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Research Assistant, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ในอนาคตมีการคาดการณ์ว่างานก่อสร้างจะมีการแข่งขันกันสูงจึงมีความพยายามที่จะลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างให้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น มีการจัดการงานก่อสร้างที่ดีเพื่อให้งานเสร็จเร็วขึ้น และเลือกใช้วัสดุที่มีราคาถูกกว่า แต่ยังคงเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบไว้ เพราะต้นทุนในการก่อสร้างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอันมีสาเหตุมาจากราคาน้ำมันที่มีราคาสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าขนส่งวัสดุก่อสร้างและราคาวัสดุก่อสร้างมีราคาสูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งค่าแรงงานที่ปรับเพิ่มขึ้นทุกปี ในงานด้านคอนกรีตสามารถหาวิธีที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายได้บางส่วนคือ การทดแทนวัสดุผงปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบ เพราะนอกจากจะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายแล้วยังเป็นการช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมได้ด้วย

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานมีผลดีทางด้านวิศวกรรมคอนกรีต แต่ผลเสียที่สามารถปรับปรุงได้คือ กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกจะไม่สูง ซึ่งจะทำให้เสียเวลาและพื้นที่ในการเก็บวัสดุ จึงต้องใช้วิธีเร่งปฏิกิริยาเพื่อพัฒนากำลังอัด วิธีหนึ่งที่สามารถช่วยได้คือ การบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากวิธีดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนอย่างทั่วถึงทุกส่วนทั้งภายในและภายนอกของวัสดุ [1] เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Non-Ionizing Radiation ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยการโยกย้ายอออน และ Dipole Rotation แต่ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างโมเลกุล [2] ในขณะที่การบ่มด้วยความร้อนแบบเก่าจะทำให้ผิวภายนอกของวัสดุแห้งและแตกร้าวแต่ภายในกลับยังมีความชื้นอยู่ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญส่วนหนึ่งของการนำวัสดุไปบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติดังกล่าวไม่เหมือนกัน [3] โดยเฉพาะซีเมนต์เพสต์ มีสถานะตั้งแต่ของเหลว กึ่งของแข็ง จนกระทั่งเป็นของแข็ง อีกทั้งซีเมนต์เพสต์ยังเป็นสารประกอบ เพราะฉะนั้นจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติดังกล่าวแปรเปลี่ยนไปกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น และประโยชน์ทางอ้อมที่จะได้รับจากการบ่มด้วยวิธีนี้คือ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเพราะการทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สูญเสีย

ความร้อนน้อยกว่าการบ่มด้วยความร้อนที่มีความดันสูงหรือที่เรียกว่า ออโทคลอว์ (Autoclave)

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบที่กำหนดช่วงระยะเวลา 1 วัน
2. เพื่อหาค่าไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบที่กำหนดช่วงระยะเวลา 1 วัน
3. เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบที่กำหนดช่วงระยะเวลา 1 วัน

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. เถ้าแกลบ จากโรงไฟฟ้าพุมโธรมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด จังหวัดปทุมธานี และเถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทำการบดด้วยความละเอียด 4,000 และ 5,000 ตร.ซม./ก.
3. น้ำที่ใช้เพื่อเป็นส่วนผสมและในกระบวนการบ่มใช้น้ำประปา

3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบ

3.2.1 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบทดสอบปูนซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบทำจากอาคริลิคขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.
2. เครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตีตามมาตรฐาน ASTM C 204-96 [4]
3. เครื่องทดสอบค่าความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบและเถ้าลอยที่ผ่านการบดในแต่ละขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 187-10 [5]
4. เซ็มไวแคทตามมาตรฐาน ASTM C 191-08 [6]
5. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

6. เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)
7. เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ จะใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) รุ่น Tokyo Sokki TDS 302 โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปอเรอร์ Type K ซึ่งวัดอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง 270 องศาเซลเซียส
8. กล้องโฟมหนา 2.5 ซม.
9. เครื่อง Network Analyzer ซึ่งประกอบไปด้วย Coaxial Cavity, Microwave Reflectometer 3.5 มม., Coaxial Cable 3.5 มม., Female Calibration Short-Open, Matched load และ Software โดย Coaxial Cavity วัดได้ในช่วงความถี่ 1.5 - 2.6 GHz ที่ระดับความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 ในส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และไม่เกินร้อยละ 5 ในส่วนของค่าไดอิเล็กตริกสูญเสีย (Dielectric Loss Factor) Coaxial Cavity จะวัดสัมพันธ์กับตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การ

ทดสอบ (Specimen Under Test : SUT)

10. เครื่องแคลอริมิเตอร์

3.2.2 วิธีการเตรียมวัสดุ และการผสม

วิธีการผสม คือ นำเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยที่ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 10 และ 20 โดยน้ำหนัก กับปูนซีเมนต์ ลงผสมในเครื่องกวนประมาณ 30 วินาที เมื่อผสมให้เข้ากันแล้วจึงเติมน้ำ ปล่อยให้เครื่องกวนประมาณ 2 นาที แล้วจึงเทซีเมนต์เพสต์ลงในบล็อกอาคริลิก ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม. ที่เตรียมไว้ และทำการหล่อด้วยพลาสติกหุ้มด้วยโฟม และแผ่นกระดาษอะลูมิเนียมตามลำดับ เพื่อเป็นการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิจากภายนอกเข้ามารบกวนในระบบในระหว่างที่ซีเมนต์เพสต์กำลังทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และควบคุมตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ทำการควบคุม

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
ปูนซีเมนต์เพสต์	- ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ และเถ้าลอย	- ชนิดของเถ้าแกลบและเถ้าลอย
	- ความละเอียด	- อุณหภูมิห้อง
	- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง	- แบบทดสอบปูนซีเมนต์เพสต์ และรูปแบบการหล่อแบบทดสอบ

3.2.3 สัดส่วนการผสมซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลาน

ส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย และน้ำประปา ดังแสดงในตารางที่ 2 และมีการกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

- CP หมายถึง ซีเมนต์เพสต์
- R (Rice Husk Ash) หมายถึง เถ้าแกลบ
- F (Fly Ash) หมายถึง เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย
- W(xx) หมายถึง อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุผง โดย xx คือ ค่าร้อยละของปริมาณน้ำที่ใช้

- ตัวเลขหน้าสัญลักษณ์ หมายถึง ค่าร้อยละการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์

- ตัวเลขหลังสัญลักษณ์ หมายถึง ขนาดความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

- 10F4000-W38 หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยบดละเอียดขนาด 4,000 ตร.ซม./ก. ปริมาณร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงร้อยละ 38
- 10R4000-W45 หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดขนาด 4,000 ตร.ซม./ก. ปริมาณร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงร้อยละ 45

ตารางที่ 2 สัดส่วนของส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าลอย 4,000 ตร.ซม./ก. (ก.)	เถ้าลอย 5,000 ตร.ซม./ก. (ก.)	เถ้าแกลบ 4,000 ตร.ซม./ก. (ก.)	เถ้าแกลบ 5,000 ตร.ซม./ก. (ก.)	น้ำ (ก.)
1	CPw38	2000	0	0	0	0	760
2	10F4000w38	1800	200	0	0	0	760
3	20F4000w38	1600	400	0	0	0	760
4	10F5000w38	1800	0	200	0	0	760
5	20F5000w38	1600	0	400	0	0	760
6	10R4000w38	1800	0	0	200	0	760
7	20R4000W38	1600	0	0	400	0	760
8	10R5000W38	1800	0	0	0	200	760
9	20R5000W38	1600	0	0	0	400	760
10	CPw45	2000	0	0	0	0	900
11	10F4000w45	1800	200	0	0	0	900
12	20F4000w45	1600	400	0	0	0	900
13	10F5000w45	1800	0	200	0	0	900
14	20F5000w45	1600	0	400	0	0	900
15	10R4000w45	1800	0	0	200	0	900
16	20R4000w45	1600	0	0	400	0	900
17	10R5000w45	1800	0	0	0	200	900
18	20R5000w45	1600	0	0	0	400	900

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเถ้าแกลบ

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยการทดสอบหาลักษณะรูปร่างของอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบความเป็นผลึกของอนุภาคโดยใช้เทคนิค X – Ray Diffraction (XRD) ในการหาองค์ประกอบทางเคมี

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเพสต์

ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเพสต์โดยการ

ทดสอบหาความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

3.4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเถ้าแกลบ โดยใช้เทคนิค X – Ray Diffraction (XRD)

เมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและเถ้าแกลบไปทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่อง X – Ray Diffraction (XRD) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่าสูงสุดร้อยละ 67.80 และมี

องค์ประกอบรองคือ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ปริมาณร้อยละ 18.30 3.52 และ 3.08 ตามลำดับ ขณะที่แก้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เท่ากับ 40.38 22.69 และ 11.70 ตามลำดับ และในส่วนของแก้าเคลือบนั้นพบว่ามีออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) เท่ากับ 87.99 1.27 และ 0.77 ตามลำดับ

3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้าลอย และแก้าเคลือบไปขยายลักษณะอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม บางก้อนขรุขระไม่มากและเรียบบางก้อนคละกันไป และมีลักษณะเนื้อแน่นไม่ปรากฏรูพรุนให้เห็น ส่วนแก้าลอยพบว่ามีอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน เนื้อแน่น บางส่วนมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระบ้างเล็กน้อย ยังมีความละเอียดมากยิ่งเป็นรูปทรงกลมและผิวเรียบเนียน และแก้า

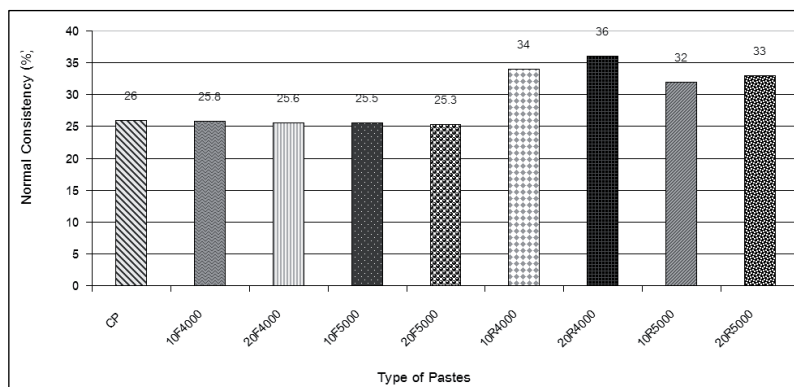
เคลือบพบว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่และมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน ลักษณะเป็นแผ่นยึดติดกัน ผิวโดยส่วนใหญ่ขรุขระค่อนข้างกลวงและมีรูพรุนสูง

3.4.3 การทดสอบหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุทำการทดสอบด้วยเครื่อง HELOS Particle Size Analysis โดยผลการทดสอบขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้าเคลือบ และแก้าลอย พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดเล็กที่สุด คือ 11.43 ไมโครเมตร รองลงมาคือ แก้าลอย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 12.00 ไมโครเมตร และวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุดคือ แก้าเคลือบ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.21 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อการทดสอบความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

3.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเพสต์

3.5.1 ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency)



รูปที่ 1 ความชื้นเหลวปกติของเพสต์

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์และปูนซีเมนต์ผสมแก้าลอยที่ความละเอียด 4,000 กับ 5,000 ตร.ซม./ก. มีค่าแตกต่างกันไม่มาก ส่วนปูนซีเมนต์ผสมแก้าเคลือบที่ความละเอียด 4,000

ตร.ซม./ก. ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ 20 (20R4000) มีค่าความชื้นเหลวปกติมากที่สุดคือ 36 (ร้อยละ 13.68) รองลงมาคือ 10R4000 (ร้อยละ 12.92)

ค่าความชื้นเหลวปกติแสดงให้เห็นถึงความต้อง

การนำในการทำให้วัสดุไหลลื่น ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย มีค่าความชื้นเหลือปกติมากที่สุด เนื่องจาก พื้นผิวของอนุภาคเถ้าแกลบเมื่อส่องด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เถ้าแกลบมีการดูดซึมน้ำไว้ภายในได้ดีกว่าวัสดุอื่นที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากเมื่อนำวัสดุปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับน้ำ ด้วยเหตุที่เถ้าแกลบมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำให้น้ำถูกดูดซึมด้วยเถ้าแกลบในร้อยละที่มากจนเหลือน้ำในร้อยละต่ำที่จะทำให้เกิดความไหลลื่นได้

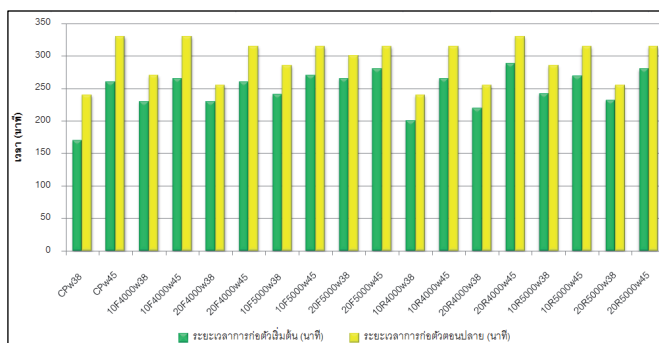
ด้วยเหตุนี้สามารถสรุปจากการทดสอบได้ว่าวัสดุปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับน้ำ เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้องการน้ำหรือค่าความชื้นเหลือปกติเพิ่มขึ้น

3.5.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลานในปริมาณร้อยละที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าองค์

ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ลดลง ส่งผลทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) หรือเอไลต์ลดลง ซึ่งปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดในระยะเริ่มแรกถึง 7 วัน ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเล็กน้อย ทั้งๆที่เถ้าแกลบมีแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าเถ้าลอย สันนิษฐานได้ว่าเมื่อนำร้อยละของแคลเซียมแทนในสมการโบริกที่ด้วย C_3S แล้วพบว่า ได้ปริมาณ C_3S ไม่แตกต่างจากเถ้าลอยมากนัก และอาจเป็นเพราะเถ้าแกลบมีค่าความชื้นเหลือปกติที่สูงกว่าเถ้าลอยเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งน้ำที่มีอยู่ก็จะถูกดูดซับไว้ในอนุภาคที่มีความพรุนของเถ้าแกลบจึงทำให้เพสต์แห้งตัวเร็ว

ช่วงห่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นถึงระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายจากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีระยะห่างของเวลามากกว่าเพสต์ที่แทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลาน สันนิษฐานได้ว่าความละเอียดของปูนที่น้อยกว่าทำให้เกิดการก่อตัวช่วงปลายนานกว่าต่างจากซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากกว่าจะทำให้ง่ายต่อการทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึงกว่าจึงใช้เวลาการก่อตัวปลายเร็วกว่า



รูปที่ 2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวตอนปลาย (Final Setting Time)

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

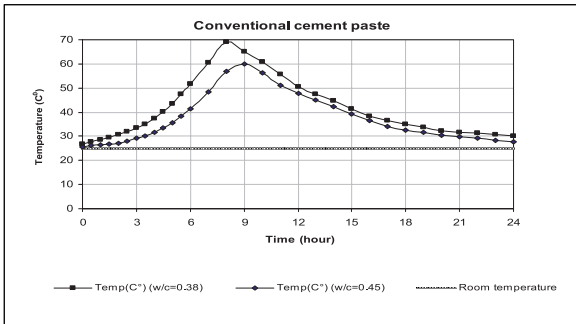
4.1 อุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดขึ้นในวันแรกๆ โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาการก่อตัว

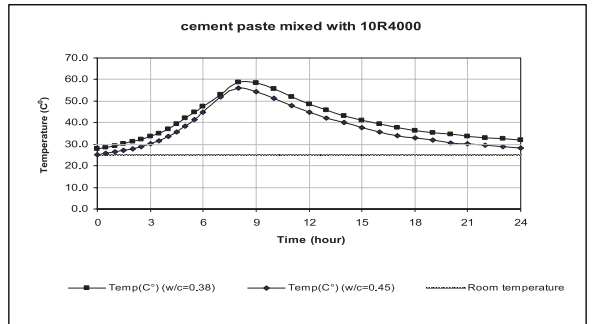
เบื้องต้นหรือการเกิดผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพราะไอออนที่ละลายออกจากสารประกอบมารวมกันเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต เป็นไอออนของ Ca^{2+} , Al^{3+} และ Fe^{2+} เป็นหลัก ซึ่งไอออน

เหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วอุณหภูมิจะสูงขึ้น จนเมื่อไอออนเหล่านี้ทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นอุณหภูมิก็จะลดลงจนกระทั่งมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย [7] อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณ

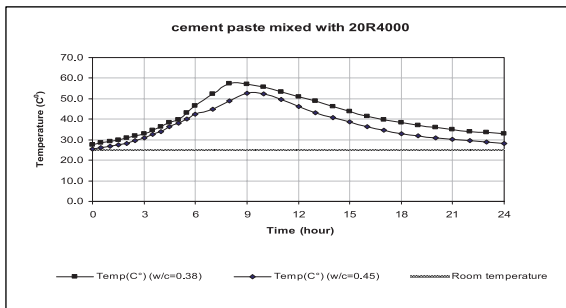
ของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์ [8]



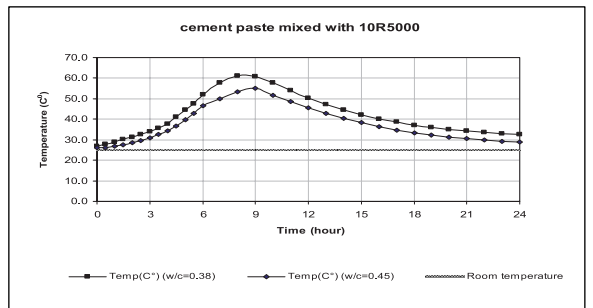
รูปที่ 3 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CP



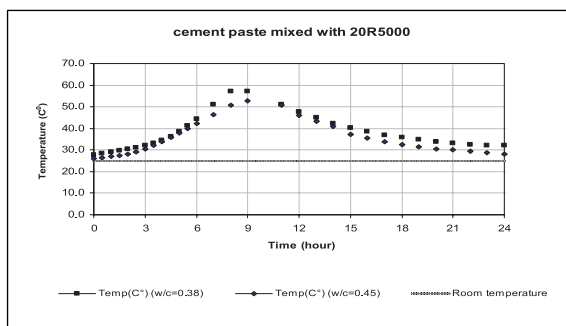
รูปที่ 4 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 10R4000



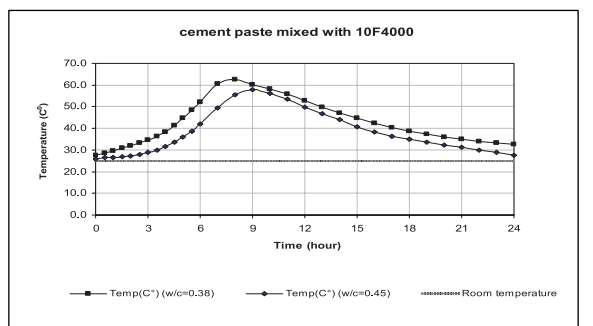
รูปที่ 5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 20R4000



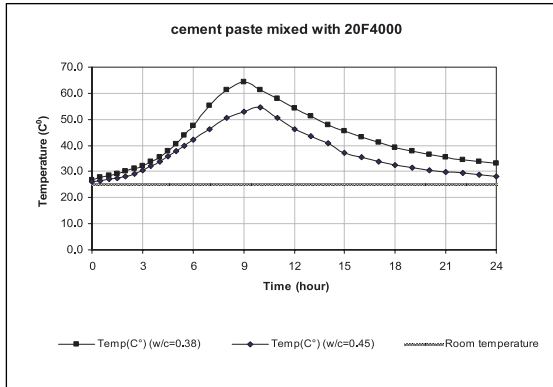
รูปที่ 6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 10R5000



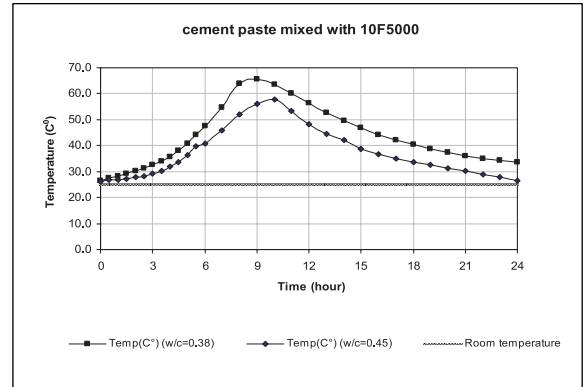
รูปที่ 7 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 20R5000



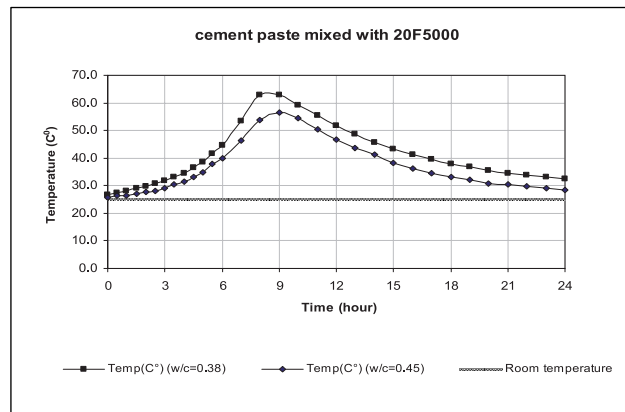
รูปที่ 8 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 10F4000



รูปที่ 9 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ของ 20F4000



รูปที่ 10 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ของ 10F5000



รูปที่ 11 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 20F5000

จากรูปที่ 3 ถึง 11 เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่สำคัญพบว่า

4.1.1 ปัจจัยด้านอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.38 จะมีอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 จากกราฟอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่มากกว่าจะมีผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลง เพราะว่ามีน้ำมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง เมื่อสารทำปฏิกิริยากันแล้วจะคายความร้อนออกมา น้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกระจายความร้อนซึ่งก่อนที่ จะถ่ายเทความร้อน น้ำสามารถจุความร้อนในตัวเองก่อนที่ คายความร้อนออกมา

4.1.2 ปัจจัยด้านร้อยละการแทนที่ ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มากขึ้นจะทำให้องค์ประกอบทางเคมีซึ่งคือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีมากในผงปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่ามาก เพราะการเกิดปฏิกิริยาจะมีแคลเซียมออกไซด์เป็นสารตั้งต้น เมื่อแคลเซียมออกไซด์ลดลงจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลง ซึ่งทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลง [9]

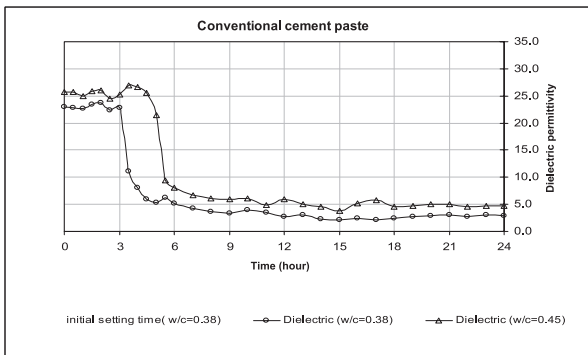
4.1.3 ปัจจัยด้านความละเอียด ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

ความละเอียดที่มากทำให้การทำปฏิกิริยาทำได้ง่ายหรือเร็วขึ้น เพราะอนุภาคมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อบดให้มือนุภาคขนาดเล็กลงจะส่งผลทำให้รูพรุนลดลงทำให้มีเนื้อแน่นมากขึ้น แต่การที่อุณหภูมิจะมากหรือน้อยต้องดูองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก [10] จึงไม่สามารถบอกได้ชัดว่าความละเอียดมากหรือน้อยส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงขึ้น เนื่องจากในการทำการทดสอบความละเอียดมีช่วงห่างไม่มาก จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน อุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าของเถ้าแกลบ เนื่องจากเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์และไตรแคลเซียมซัลเฟตที่สูงกว่าเถ้าแกลบ ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น [11] อีกทั้งเถ้าลอยมีลักษณะกลมเล็ก

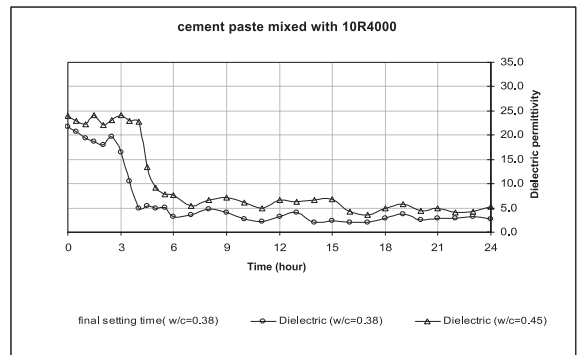
ซึ่งไม่เหมือนกับเถ้าแกลบที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมากและมีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและง่ายกว่าเถ้าแกลบ

4.2 ค่าไดอิเล็กตริก

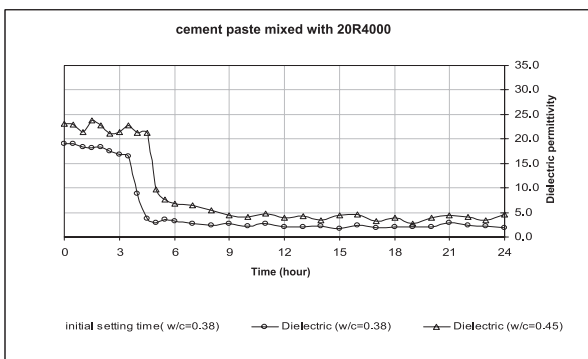
ค่าไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการซึมซับผ่านของคลื่นไมโครเวฟ หากค่าไดอิเล็กตริกมีค่ามาก แสดงว่าวัสดุง่ายต่อการซึมซับผ่านของคลื่น รวมไปถึงความสามารถในการหมุนชั่ววอกกลับไปมาของโมเลกุลเพื่อทำให้เกิดความร้อนของวัสดุ โดยถ้าวัสดุมีความเป็นขั้วมากน้อยต่างกันก็จะทำให้มีผลต่อเวลาในการทำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟช้าหรือเร็ว [12]



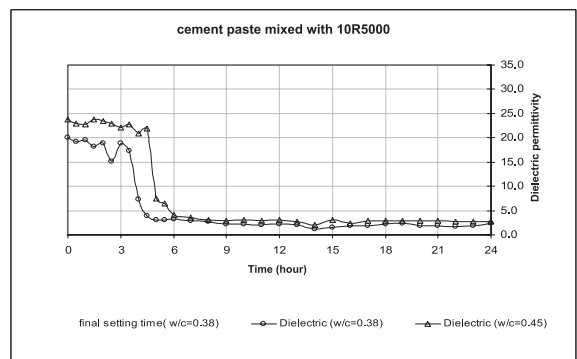
รูปที่ 12 ค่าไดอิเล็กตริกของ CP



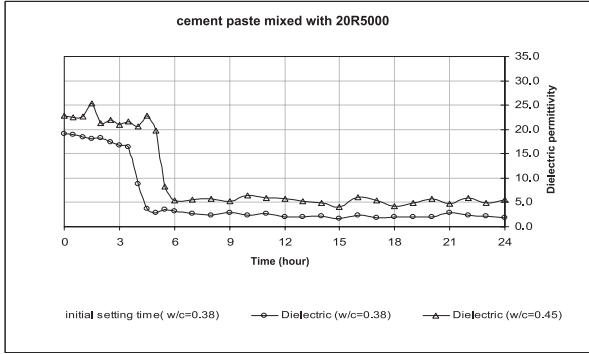
รูปที่ 13 ค่าไดอิเล็กตริกของ 10R4000



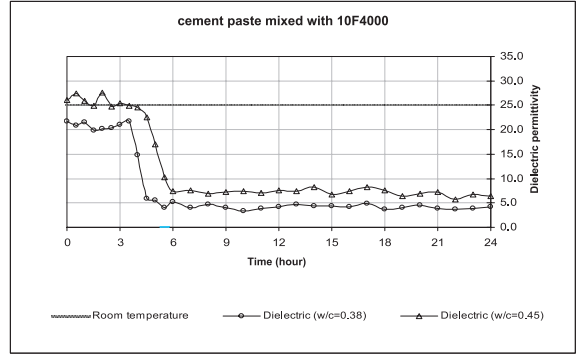
รูปที่ 14 ค่าไดอิเล็กตริกของ 20R4000



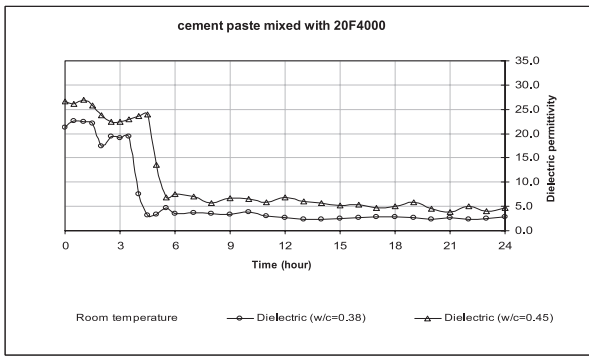
รูปที่ 15 ค่าไดอิเล็กตริกของ 10R5000



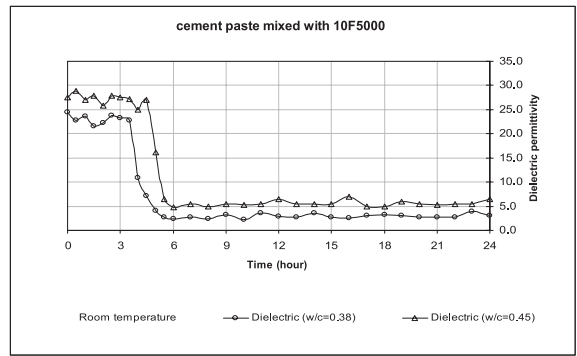
รูปที่ 16 ค่าไดอิเล็กตริกของ 20R5000



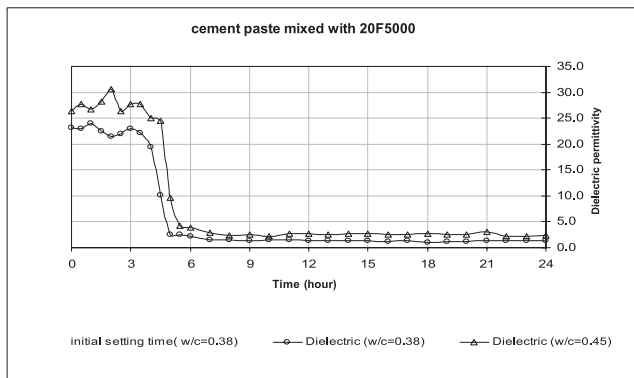
รูปที่ 17 ค่าไดอิเล็กตริกของ 10F4000



รูปที่ 18 ค่าไดอิเล็กตริกของ 20F4000



รูปที่ 19 ค่าไดอิเล็กตริกของ 10F5000



รูปที่ 20 ค่าไดอิเล็กตริกของ 20F5000

จากรูปที่ 12 ถึง 20 เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่สำคัญพบว่า

4.2.1 ปัจจัยด้านอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) ที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 จะมีค่าไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.38 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า ปัจจัยหลักในการทำให้เกิดค่าไดอิเล็กตริกที่สูงขึ้นคือ ความชื้นของวัสดุ ยิ่งวัสดุมีความชื้นมากจะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกสูงขึ้น แต่อีกเหตุผลหนึ่งเป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายมีปริมาณมากจะทำให้การละลายไอออนออกจาก C_3S , C_3A และ C_4AF เกิดเป็นไอออนได้มากกว่าน้ำที่มีปริมาณน้อย อีกทั้งยังมี OH^- ของน้ำที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี ขณะที่น้ำเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้สูงกว่า ดังนั้นหากซีเมนต์เพสต์มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูง นั่นย่อมหมายความว่าจะมีน้ำส่วนเกินที่หลุดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ความเป็นสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [8]

4.2.2 ปัจจัยด้านความละเอียด ที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก

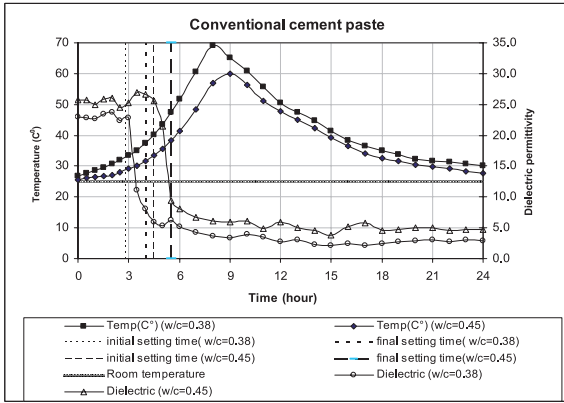
ที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ซึ่งความละเอียดนี้เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถ้าค่าความละเอียดมีมาก ย่อมส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วกว่า รวมทั้งมีระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวได้เร็วกว่าด้วยจึงทำให้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าสูงตามไปด้วย แต่หากค่าความละเอียดมีค่าน้อย หมายความว่าอนุภาคที่มีพื้นผิวขรุขระและมีรูพรุนมากกว่าความละเอียดที่มาก จึงทำให้เมื่อผสมกับน้ำอนุภาคจะทำการดูดซับน้ำไว้ก่อนทำปฏิกิริยา ทำให้เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วยังมีน้ำอิสระ

เหลืออยู่ภายในอนุภาค [8]

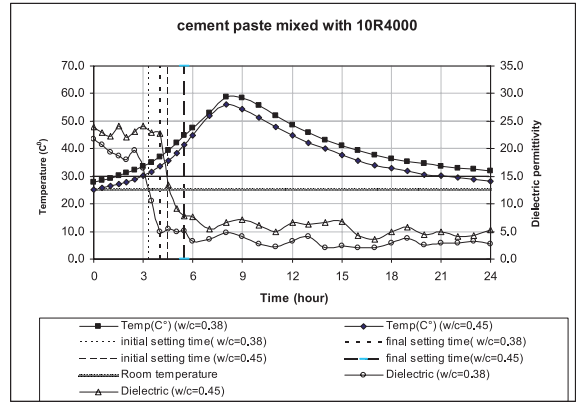
4.2.3 ปัจจัยด้านร้อยละการแทนที่ ที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุพอโซลานที่ร้อยละ 0 10 และ 20 ไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ได้ทั้งหมด แต่จากรูปในรูปที่ 12 ถึง 20 พบว่าซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ล้วนกับซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่ามากกว่าเถ้าแกลบ ทั้งนี้เนื่องจากในปูนซีเมนต์ล้วนจะมีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุด ส่วนปูนซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 จะมี CaO รองลงมาตามลำดับ ซึ่ง CaO เมื่อรวมกับสารประกอบอื่นได้เป็น C_3S C_2S C_3A และ C_4AF แล้วจะถูกทำละลายโดยน้ำทำให้เกิดไอออนของ Ca^{2+} โดยถ้ามี CaO มากจะทำให้ได้ไอออนของ Ca^{2+} มาก จึงทำให้วัดค่าไดอิเล็กตริกได้สูงในช่วงแรก ส่วนเถ้าลอยถึงแม้จะมีองค์ประกอบของ CaO น้อยกว่าปูนซีเมนต์ แต่จะมี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าในปูนซีเมนต์ จึงทำให้มีไอออนของ Al^{3+} และ Fe^{2+} มาชดเชยไอออนของ Ca^{2+} จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ล้วน ในส่วนของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบจะทำให้ CaO ลดลง อีกทั้งเถ้าแกลบยังมี Al_2O_3 Fe_2O_3 และ SO_3 น้อยกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกที่ได้จึงมีค่าน้อยที่สุด สำหรับระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายจนถึงระยะเวลา 1 วัน ค่าไดอิเล็กตริกที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าไดอิเล็กตริกลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วงแรก จะเกิดจาก C_3S C_3A และ C_4AF เป็นหลัก จึงทำให้ไอออนของ Ca^{2+} Al^{3+} และ Fe^{2+} ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลดลง [8]

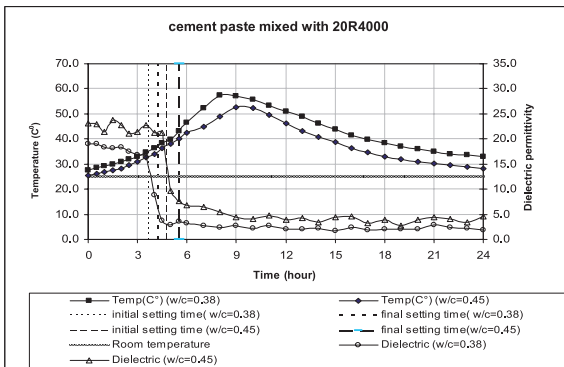
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัว



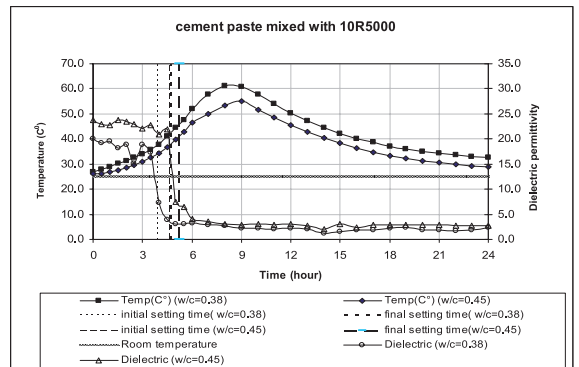
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ CP



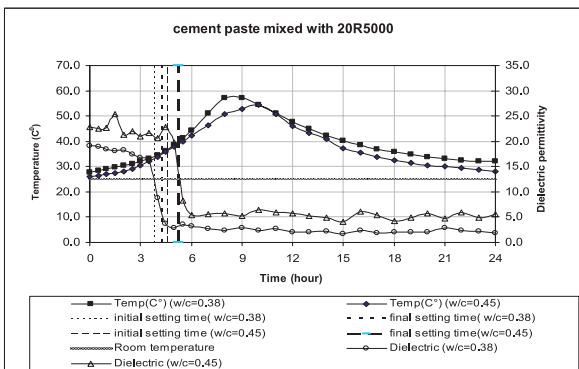
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 10R4000



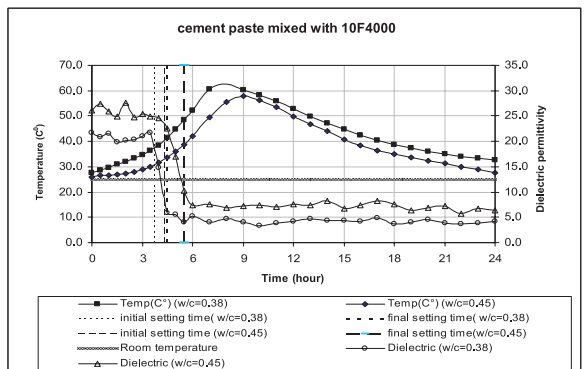
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 20R4000



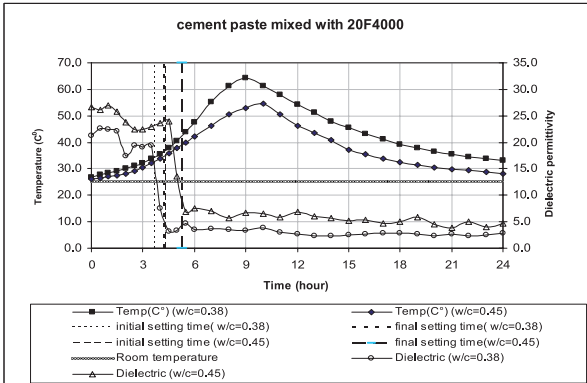
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 10R5000



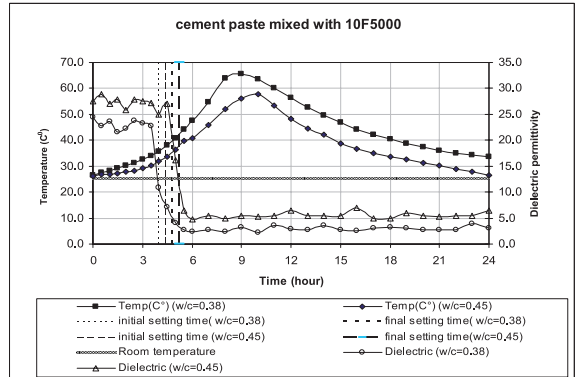
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 20R5000



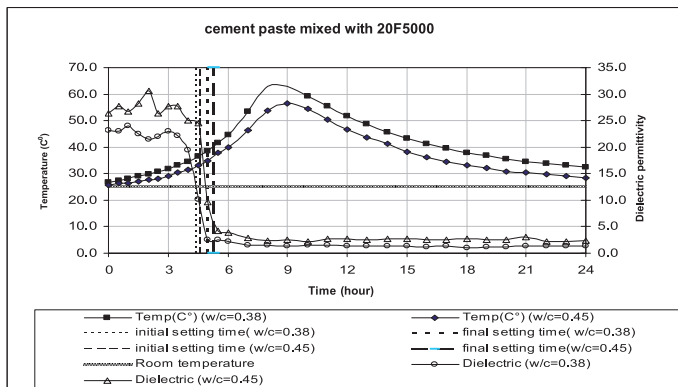
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 10F4000



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 20F4000



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 10F5000



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ ค่าไดอิเล็กตริก และระยะเวลาการก่อตัวของ 20F5000

จากรูปที่ 21 ถึง 29 เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่สำคัญพบว่า

ปฏิกิริยาไฮเดรชันประมาณ 5 องศาเซลเซียส แต่ทั้งนี้ควรคำนึงถึงค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุแต่ละชนิดด้วย

4.3.1 อุนหนุมิที่เหมะสมในการบ่ม

อุนหนุมิที่เหมะสมในการบ่มวัสดุซีเมนต์เพสต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟควรคำนึงถึงอุนหนุมิสูงสุดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงไม่ควรบ่มด้วยอุนหนุมิที่สูงเกินอุนหนุมิสูงสุดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพราะความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้ลายพันธะทางเคมีทำให้วัสดุแตกเปราะได้ อีกทั้งจะทำให้เกิดแรงดันน้ำที่สูง เกิดเป็นฟองอากาศอยู่ภายในผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดข้อเสียนด้านกำลังอัด ซึ่งการบ่ม ที่ดีควรบ่มที่อุนหนุมิไม่สูงมากเกินไป และเมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่งแล้วจึงปรับอุนหนุมิขึ้นไปตามลำดับ แต่อุนหนุมิในการบ่มสูงสุดควรต่ำกว่าอุนหนุมิที่เกิดจาก

4.3.2 ค่าไดอิเล็กตริก

ค่าไดอิเล็กตริกที่ใช้เป็นการแทนค่าในสมการพลังงานของการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ คือ $[Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2]$ ดังนั้นควรเลือกใช้ค่าไดอิเล็กตริกในช่วงเวลาที่ต้องการบ่ม เช่น เลือกช่วงบ่มที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นควรเลือกค่าไดอิเล็กตริกในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นโดยแทนค่าในสมการแล้วใช้พลังงานดังกล่าวในการบ่ม แต่เมื่อบ่มไปไ้ระยะเวลาหนึ่งควรปรับพลังงานให้ลดลงเพื่อทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลดลงตามเวลาด้วย ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความชื้นในวัสดุทดสอบลดลงจนแห้งไม่สามารถพัฒนากำลังอัด

ตอนปลายได้ [13] จากสมการพลังงานมีตัวแปร ดังนี้

E คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าในหน่วย โวลต์ต่อเมตร (V/m)

ϵ' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของวัสดุที่คลื่นแพร่กระจายเข้าไป

ϵ'' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ (Loss factor)

f คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (เฮิรตซ์, Hz)

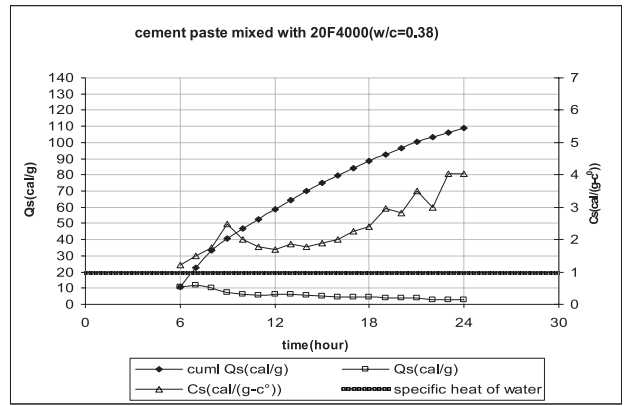
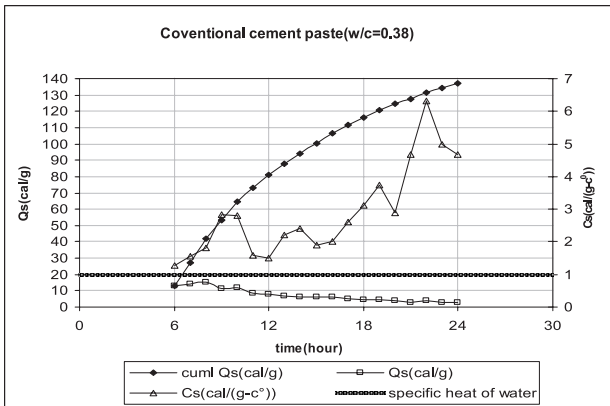
$\tan\delta$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ (Loss tangent coefficient)

μ_r คือ การซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative magnetic permeability)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi f$ ในหน่วย เรเดียนต่อวินาที (Rad/s)

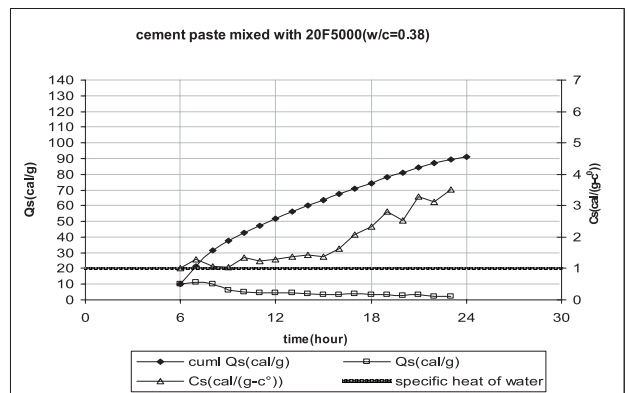
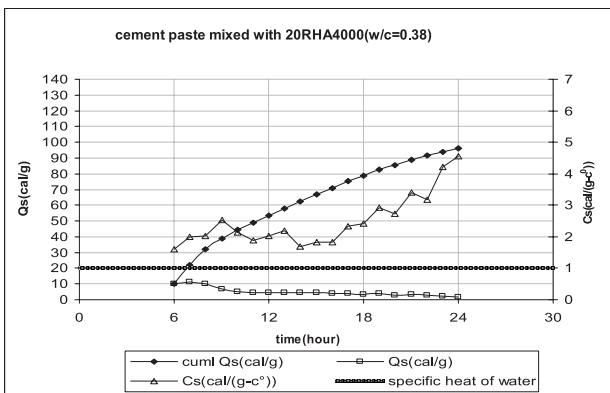
สำหรับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุนี้โดยทั่วไปแล้ว จะถูกพิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิของวัสดุเพียงอย่างเดียวในกรณีของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) และการหลอมละลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave melting) และแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Microwave drying) ด้วยไมโครเวฟ

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน



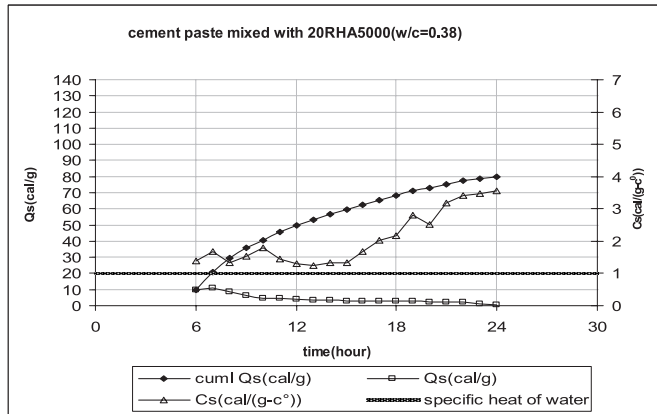
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน CP (W/B) เท่ากับ 0.38

รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน 20F4000 (W/B) เท่ากับ 0.38



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน 20R4000 (W/B) เท่ากับ 0.38

รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน 20F5000 (W/B) เท่ากับ 0.38



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะและพลังงานคายความร้อน 20R5000 (W/B) เท่ากับ 0.38

เนื่องจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ คือค่าที่บ่งบอกว่าวัสดุดังกล่าวต้องการพลังงานมากน้อยเพียงใดที่จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ยิ่งค่าความจุความร้อนจำเพาะมีค่ามากแสดงว่าต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นในการบ่มซีเมนต์เฟสดีผสมวัสดุปอซโซลานด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงจำเป็นต้องรู้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้บ่ม เช่นเดียวกันเพื่อทำให้ทราบว่าจะต้องใช้พลังงานมากน้อยเพียงใดเพื่อจะทำให้ได้ความร้อนที่ต้องการ ซึ่งความร้อนในที่นี้จะเป็นการเร่งปฏิกิริยาให้วัสดุรับกำลังอัดได้เร็วขึ้นหรือเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

จากรูปที่ 30 ถึง 34 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงใดๆ ของร้อยละการแทนที่เท่ากัน พบว่าทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. จะมีค่าการคายความร้อนที่น้อยกว่าของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ทั้งนี้เนื่องจากที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำมากกว่าที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. ทำให้น้ำที่ไม่ได้ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Free water) ลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิและพลังงานในการคายความร้อนลดลงตามไปด้วย

ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนกับเวลา (6 – 21 ชั่วโมง) พลังงานในการคายความร้อนของวัสดุทุกตัวอย่างจะมีลักษณะขึ้นๆ ลงๆ ในช่วงแรก ซึ่งเกิดจากการปรับตัวของอุณหภูมิที่มีการเคลื่อนย้ายจากอากาศลงสู่น้ำ ทำให้พลังงานในการคายความร้อน

ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกตกลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากวัสดุทุกตัวอย่างมีการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วพลังงานในการคายความร้อนจะคงที่

5. สรุป

จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.38 จะมีอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 ในส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลง และอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าของเถ้าแกลบ ในส่วนของค่าไดอิเล็กตริก ควรเลือกค่าในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและเมื่อบ่มได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วควรปรับพลังงานให้มีค่าลดลงเพราะค่าไดอิเล็กตริกจะลดลงตามเวลา ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความชื้นในวัสดุทดสอบลดลงจนแห้งส่งผลให้ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดตอนปลายได้ และสำหรับค่าความจุความร้อนจำเพาะพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงของร้อยละการแทนที่เท่ากัน จะพบว่าทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. จะมีค่าการคายความร้อนที่น้อยกว่าของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ทั้งนี้เนื่องจากที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีพื้นที่ผิวในหาดูดซึมน้ำมากกว่าที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. ทำให้น้ำที่ไม่ได้ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิและพลังงานในการคายความร้อนลดลงตามไปด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชาญชัย สิ้นประเสริฐ และคุณธนภฤต วงศ์กัลยา ที่ช่วยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และได้อนุเคราะห์ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี การกระจายขนาดคละของอนุภาคและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และเถ้าลอย โรงไฟฟ้าพุมโชนิมิล แอนด์ แกรนารี จังหวัดปทุมธานี ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าแกลบ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าลอย ที่ใช้ในการทดสอบ และคุณสิริธร จิตตารีย์ ที่ช่วยอนุเคราะห์จัดเตรียมข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

1. Chatveera, B., Atong, D., Rattanadecho, P., Makul, N., and Suwannapum, N., 2007, "Utilization of Microwave Energy for Improving Mechanical Properties of Concrete", *Pamphlet National Metal and Materials Technology Center*. (In Thai)
2. Sutton, W.H., 1989, "Microwave Processing of Ceramic Materials", *Ceramic Bulletin*, Vol. 68, No. 2, pp. 376-386.
3. Suwannapum, N., Rattanadecho, P., Khokhew, W., Makul, N., and Chatveera, B., 2007, "Development of Compressive Strength of Concrete Using Microwave Energy with Continuous Belt System", *The 21st Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*. (In Thai)
4. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTMC 204-96: Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02 Philadelphia, PA, USA*.
5. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 187-10: Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02 Philadelphia, PA, USA*.
6. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 191-08: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02 Philadelphia, PA, USA*.
7. Ben-Dor, and Perez D., 1975, "Hydration of Cement Minerals with Various Admixtures Studies by Differential Thermal Analysis and Infrared Spectrometry", *Thermochim Acta*, Vol. 12, p. 81.
8. Chatveera, B. and Homsriprasert, W., 2010, "Dielectric Properties of Cement-based Materials", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 163-181. (In Thai)
9. Skalny, J. and Young, J.F., 1980, "Mechanisms of Portland Cement Hydration", *International Conference on the Chemistry of Cement*, Paris, France, Vol. 2, pp 1.3-1.45.
10. Perez-Pena, M. and Roy, D.M., 1989, "Influence of the Chemical Composition and Inorganic Admixtures on the Electrical Conductivity of Hydrating Cement Paste", *J. Mater. Res*, Vol. 4, pp. 215-223.
11. Reboul, J.P., 1978, "The Hydraulic Reaction of Tricalcium Silicate Observed by Microwave Dielectric Measurements", *Revue de Physique Appliquee Tome*, Vol. 13, pp. 383-386.
12. Wilson J.G., Whittington, H., and Forde, M.C., 1984, "Dielectric Properties of Concrete at Different Frequencies", *Forth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Application*, Lancaster, UK, pp. 157-160.
13. Bruce, J. Christensen, Tate, Coverdale., Rudolf, A. Olson, Steven, J. Ford, Edward, J. Garboczi, Hamlin, M. Jennings, and Thomas, O. Mason, 1994, "Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 11, pp. 2787-3048.

