คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซีเมนต์

บุรฉัตร ฉัตรวีระ [1] และ วินัย หอมศรีประเสริฐ [2]
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของวัสดุซีเมนต์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 มวลรวม (ทรายและหิน) และสารผสมเพิ่ม (เถ้าลอย ซิลิกาฟูม สารลดน้ำพิเศษ และสารกักกระจายฟองอากาศ) รวมถึงศึกษาความผันแปรของค่าสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุซีเมนต์ ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ และศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าสมบัติไดอิเล็กตริก ระหว่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต กับค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของวัสดุซีเมนต์ ซึ่งการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะใช้เครื่อง Network analyzer ร่วมกับเทคนิค Opened-ended coaxial probe

จากผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของวัสดุซีเมนต์ พบว่า อุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นของแข็ง แต่จะมีอิทธิพลเล็กน้อยกับวัสดุที่เป็นของเหลว สำหรับการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซีเมนต์ พบว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างทุกชุดมีค่าสูงในช่วงแรก (0 ถึง 3 ชั่วโมง) และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต่อมา (3-18 ชั่วโมง) จนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงตามไปด้วย สำหรับตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารผสมเพิ่มพบว่า วัสดุซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ วัสดุซีเมนต์ที่ใช้ซิลิกาฟูม ส่วนวัสดุซีเมนต์ที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยที่สุด

---

1 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Dielectric Properties of Cement-based Materials

Burachat Chatveera [1] and Winai Homsriprasert [2]

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

Abstract

The objective of this research was to study the influence of moisture and temperature on the dielectric properties of cementitious materials (cement paste, mortar and concrete). The mix proportions including Portland cement Types 1 and 3, sand, coarse aggregate and admixtures (fly ash, silica fume, superplasticizer and air-entraining agent) were studied to investigate the dielectric properties. The results of this study were used as the data base of curing cementitious materials with microwave energy. The Network analyzer was used for measuring of the dielectric properties with opened ended coaxial probe technique.

From the tested results of the dielectric properties of cementitious material, it was found that temperature did not affect the dielectric properties of solid proportions but it had an effect on the dielectric properties of liquid proportions. In the case of the dielectric properties of cementitious materials, it was observed that the dielectric properties of all specimens showed the highest values in initial period after mixing (0-3 hours) but these values were rapidly decreased in next period (3-18 hours), and at 24 hours after mixing the dielectric properties yield comparable values. The dielectric properties of cementing materials increased with increasing the water-to-binder ratios. For cementitious materials with Portland cement Type 3, it was found that the dielectric properties were higher than that of Portland cement Type 1. In case of the admixtures, it was observed that the cementitious materials with fly ash showed the highest dielectric properties and the dielectric properties of the cementitious materials with silica fume were less than that mixed with fly ash. The cementitious materials without admixtures showed the lowest dielectric properties.

[1] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Research Assistant, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

สืบเนื่องจากงานวิจัยสำหรับกระบวนการทำความร้อนที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเน้นผลการวิเคราะห์ในเชิงการคำนวณเป็นหลัก ได้แก่ งานวิจัยการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ [1] การศึกษาการตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุซีเมนต์โดยใช้เทคนิค impedance spectroscopy [2] การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านความเป็นไดอิเล็กตริกของวัสดุซีเมนต์ [3] มีส่วนน้อยที่ทำทั้งการทดลองและการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังไม่เคยมีการศึกษาอย่างเป็นระบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก อีกทั้งงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ทั้งผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ศึกษาเพียงวัสดุจำลองที่ง่ายต่อการควบคุมตัวแปร เพราะการบ่มด้วยไมโครเวฟเป็นเวลานานๆ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงระยะเวลาการอบ โดยคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบจะมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิและความชื้นในตัววัสดุเอง

สำหรับกรรมวิธีการอบแห้ง (หรือการบ่มคอนกรีต) ในปัจจุบันจะอาศัยหลักการที่ผลต่างของอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการไล่ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือ ใช้ระยะเวลานาน ประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไปปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุเนื่องจากใช้ระยะเวลานาน และความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในวัสดุที่มีความหนามากๆ เช่น คอนกรีต [4] อย่างไรก็ตาม วัสดุไดอิเล็กตริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า และจัดอยู่ในประเภทของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นวัสดุกลุ่มนี้จึงสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ ตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กตริกได้แก่ น้ำ น้ำมัน ไม้ และอาหารที่มีความชื้น เป็นต้น โดยยกตัวอย่างหลักการเกิดความร้อนของน้ำภายในเตาไมโครเวฟที่ใช้ภายในครัวเรือน กล่าวคือเนื่องจากโมเลกุลของน้ำซึ่งมีการกระจายตัวของประจุแบบไม่สมมาตรทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบถาวรขึ้น เกิดกลับตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ 2.45 GHz เป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาทีในหนึ่งรอบคลื่น โดยจะประกอบไปด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบของสนามไฟฟ้า ดังนั้นโมเลกุลจะหันขั้วบวกไปทางขั้วลบของสนามไฟฟ้า 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และหันขั้วลบไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วโมเลกุลต้องกลับตัวถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนและเสียดสีกันจนเกิดเป็นความร้อนภายในทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นในที่สุด

นอกจากนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟและช่วงไดอิเล็กตริกไม่ใช่คลื่นพลังงานความร้อน แต่คลื่นเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ ซึ่งจะเห็นได้จากการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุเอง [5] โดยมีกลไกในการแปลงพลังงานสองกลไกได้แก่ กลไกชนิดการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว และจากเหตุผลที่ว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยทั่วไปจะถูกพิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ถ้าหากเป็นในกรณีของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ การหลอมละลายด้วยไมโครเวฟ การแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟนั้น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่แปรเปลี่ยนสามารถหาได้ด้วยเทคนิคการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุประเภทต่างๆ [5] และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุโดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟคือค่าความทะลุทะลวงซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุรวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มข้นของพลังงานในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 จากพลังงานที่ผิวหน้าวัสดุ [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซีเมนต์ เพื่อที่จะนำไปพัฒนาเทคโนโลยีการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อไป

2. วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε'_r) และค่าลอสแทนเจนท์ ($tan\ \delta$) ของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มวลรวม

(ทรายและหิน) และวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม

2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต โดยปัจจัยดังกล่าวได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ ชนิดวัสดุปอซโซลาน และชนิดของมวลรวม

3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 3

2. น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7.0 ถึง 7.5

3. มวลรวม ประกอบด้วย ทรายแม่น้ำและหินที่มีขนาดโตสุด 19.0 มม. มีคุณสมบัติเป็นไปมาตรฐาน ASTM C 33

4. สารเคมีผสมเพิ่ม ได้แก่ สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [7]

5. วัสดุปอซโซลาน ประกอบด้วย เถ้าลอย และซิลิกาฟูม

3.2 วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบ

1. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง เท่ากับ 0.38, 0.45, 0.55 และ 0.70 โดยน้ำหนัก

2. อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) (สำหรับมอร์ต้าร์) เท่ากับ 2.75

3. อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (S/A) (สำหรับคอนกรีต) เท่ากับ 0.44 ในสภาวะที่มวลรวมอบแห้งด้วยเตาอบและอัดแน่นเพื่อทำให้เกิดช่องว่างต่ำสุด โดยมวลรวมหยาบ (หินปูน) มีขนาดโตสุด 19.0 มม.

4. สมบัติไดอิเล็กตริกที่ศึกษา ประกอบด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ (ε'_r) และ ค่าลอส แฟคเตอร์สัมพัทธ์ (ε''_r) หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ค่าลอสแทนเจนท์ ($tan\ \delta$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของค่าลอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ($tan\ \delta = \varepsilon''_r/\varepsilon'_r$)

5. ระยะเวลาในการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตเริ่มตั้งแต่หลังผสมเสร็จทันทีจนถึงที่อายุ 1 วัน โดยทำการวัดทุกๆ 3 ชั่วโมง

6. อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริก มีค่าสูงสุดไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ก่อนการวัดสมบัติไดอิเล็กตริก วัตถุดิบแต่ละชนิดมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เทปูนซีเมนต์ลงในแบบหล่ออะคริลิก ขนาด 5x5x5 ซม. ที่วางบนโต๊ะสั่น โดยแบ่งเททีละชั้น จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้เวลาในการสั่นสะเทือน 30 วินาที เพื่อให้ปูนซีเมนต์อัดตัวกันแน่น

2. น้ำ

เทลงในแบบหล่ออะคริลิก ขนาด 5x5x5 ซม.

3. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer)

เทลงในแบบหล่ออะคริลิก ขนาด 5x5x5 ซม.

4. เถ้าลอยและซิลิกาฟูม

เตรียมเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

5. มวลรวม

เตรียมเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากนั้นจึงนำวัตถุดิบแต่ละชนิดไปวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริก ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

3.3.2 การวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบที่อุณหภูมิต่างๆ

วัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε'_r) และไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (ε''_r) โดยใช้เทคนิคโคเอกเซียลโพรบ (Coaxial Probe) และประมวลผลผ่านเครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) (รูปที่ 1) ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำวัตถุดิบทั้งหมดไปอบให้ร้อนจนกว่าอุณหภูมิจะคงที่ จากนั้นนำมาวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกอีก โดยทำการวัดค่าอย่างต่อเนื่องในขณะที่อุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ โดยวัดไป

จนกระทั่งอุณหภูมิเริ่มเข้าใกล้สู่อุณหภูมิห้อง

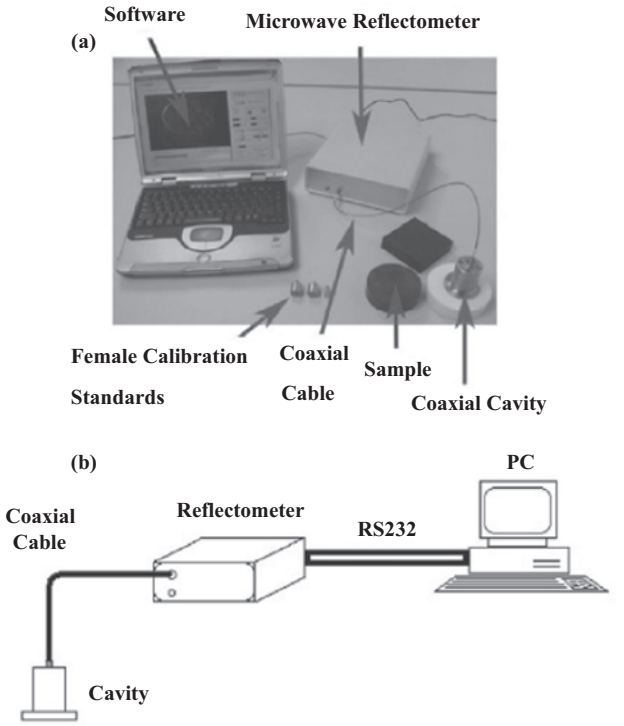
3.3.3 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในตารางที่ 1

3.3.4 การวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

เมื่อเทซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตลงในแบบหล่ออะคริลิก ขนาด 5x5x5 ซม. แล้วทำการวัดสมบัติไดอิเล็กตริก (ε'_r และ ε''_r) ของตัวอย่างทันที (ระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 0) โดยใช้เทคนิคโคเอกเซียลโพรบและประมวลผลด้วยอุปกรณ์เน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ โดยแบบหล่ออะคริลิกจะถูกบรรจุไว้ในกล่องโฟมอีก 1 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและความชื้น จากนั้นจึงกลับมาวัดสมบัติไดอิเล็กตริกอีกอย่างต่อเนื่อง ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึง 24 ชั่วโมง

เมื่อวัด ε'_r และ ε''_r ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ แล้ว จึงทำการคำนวณหาค่า tan δ ($tan\ \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r$)



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์โคเอกเซียลโพรบและเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบ

No	Symbol	Type of Specimen	Type of cement	W/C by weight	Aggregates to Cement Ratio	Mix Proportions							
						Cement	Fly ash	Silica fume	Rock	Sand	Water	Chemical Admixture	Air
						(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	($cc./m^3$)	(%)
1	CPI0.38	Paste	I	0.38	0	1419	0	0	0	0	539	0	1.0
2	CPI0.45	Paste	I	0.45	0	1290	0	0	0	0	580	0	1.0
3	CPI0.70	Paste	I	0.70	0	973	0	0	0	0	681	0	1.0
4	CPIII0.38	Paste	III	0.45	0	1421	0	0	0	0	639	0	1.0
5	CPIII0.45	Paste	III	0.45	0	1291	0	0	0	0	581	0	1.0
6	CPI0.38SF25	Paste	I	0.38	0	1064	0	354	0	0	539	0	1.0
7	CPI0.38PFA25	Paste	I	0.38	0	1064	354	0	0	0	539	0	1.0
8	MI0.38	Mortar	I	0.38	2.75	561	0	0	0	1543	213	0	1.0
9	MI0.70	Mortar	I	0.70	2.75	475	0	0	0	1306	332	0	1.0
10	MIII0.38	Mortar	III	0.38	2.75	561	0	0	0	1544	213	0	1.0
11	MIII0.70	Mortar	III	0.70	2.75	475	0	0	0	1307	332	0	1.0
12	MI0.38SUP2.75	Mortar	I	0.38	2.75	561	0	0	0	1543	213	5614	1.0
13	MIII0.38SUP2.75	Mortar	III	0.38	2.75	561	0	0	0	1544	213	5618	1.0
14	CONI0.38SUP	concrete	I	0.38	4.33	425	0	0	1035	805	159	3400	1.0
15	CONI0.45SUP	concrete	I	0.45	4.14	425	0	0	988	771	189	3400	1.0
16	CONI0.55SUP	concrete	I	0.55	3.88	425	0	0	928	721	231	3400	1.0
17	CONI0.70SUP	concrete	I	0.70	3.48	425	0	0	832	647	295	3400	1.0

4. ผลการทดสอบ

4.1 สมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

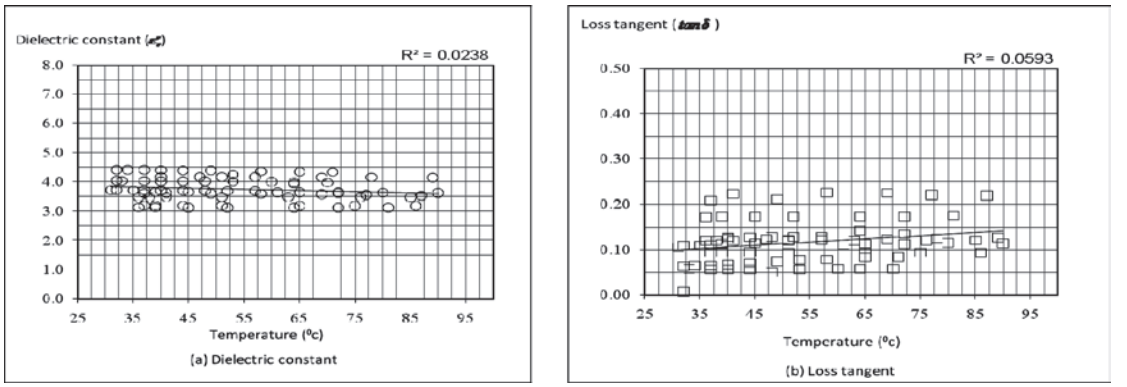
รูปที่ 1- 9 แสดงถึงสมบัติไดอิเล็กตริก (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε'_r) และ ค่าลอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ ($tan\ \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r$) ของส่วนประกอบของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ซิลิกาฟูม เถ้าลอย น้ำ สารลดน้ำพิเศษ สารกักกระจายฟองอากาศ ทราย และหิน) ในรูปฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของสมบัติไดอิเล็กตริกของส่วนประกอบแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งสามารถแยกวัตถุดิบออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. วัตถุดิบที่เป็นผงประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และค่าลอสแทนเจนท์ ไม่ต่างกันมากและอยู่ในแนวเดียวกันตลอดช่วงอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีค่าโดยเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือ เถ้าลอย ต่อมาคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และต่ำที่สุดคือ ซิลิกาฟูม เมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกับค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบผงมากนัก เนื่องจากวัตถุดิบผงมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อยมากทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็ไม่ทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกจึงไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน [5]

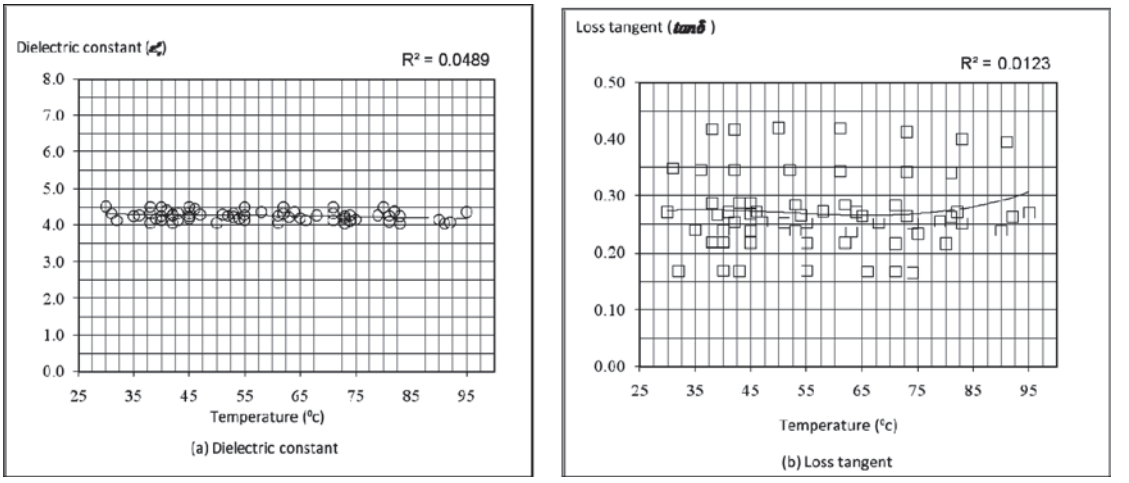
2. กลุ่มของวัตถุดิบที่เป็นสารละลาย (Solution-based materials) ประกอบไปด้วย น้ำ สารลดน้ำพิเศษ (Polycarboxylic water-based) และสารกักกระจายฟองอากาศ จะเห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองต่างกันและไม่อยู่ในแนวเดียวกัน โดยน้ำมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำยากักกระจายฟองอากาศ และต่ำที่สุดคือ สารลดน้ำพิเศษ ทั้งนี้เกิดจากน้ำซึ่งเป็นวัตถุดิบไดอิเล็กตริกที่มีค่า ε'_r และ $tan\ \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r$ สูงกว่าส่วนประกอบอื่นๆ มาก และจะเห็นได้ชัดเจนในส่วนของสารผสมเคมีที่มีน้ำและโพลีเมอร์เป็นส่วนประกอบ ดังข้อมูลจากผู้ผลิตจึงกำหนดส่วนประกอบของแข็งคือ สารลดน้ำพิเศษ และสารกักกระจายฟองอากาศ เป็นร้อยละ 40 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ นั่นคือ สมบัติไดอิเล็กตริกของส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำที่อยู่ภายใน โดยเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนมีผลกับค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบที่เป็นสารละลายมาก เนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นสารละลายมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความหนาแน่นของสารละลายจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติไดอิเล็กตริกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย แต่แนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ซับซ้อนโดยอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิก็ได้ [5]

3. กลุ่มที่เป็นวัสดุมวลรวมได้แก่ ทรายแม่น้ำและหิน จะเห็นว่าช่วงของสมบัติไดอิเล็กตริกไม่ต่างกันมากและอยู่ในแนวเดียวกัน โดยทรายแม่น้ำจะมีค่าโดยเฉลี่ยที่สูงกว่าหิน เนื่องจากเป็นกลุ่มของวัตถุดิบ ถือได้ว่ามีน้ำเป็นส่วนประกอบน้อยหรือว่าแทบจะไม่มีเลย ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่วัดได้จึงมีการกระจายตัวไม่มากนัก และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิกับสมบัติไดอิเล็กตริกก็มีลักษณะเช่นเดียวกับวัตถุดิบผง

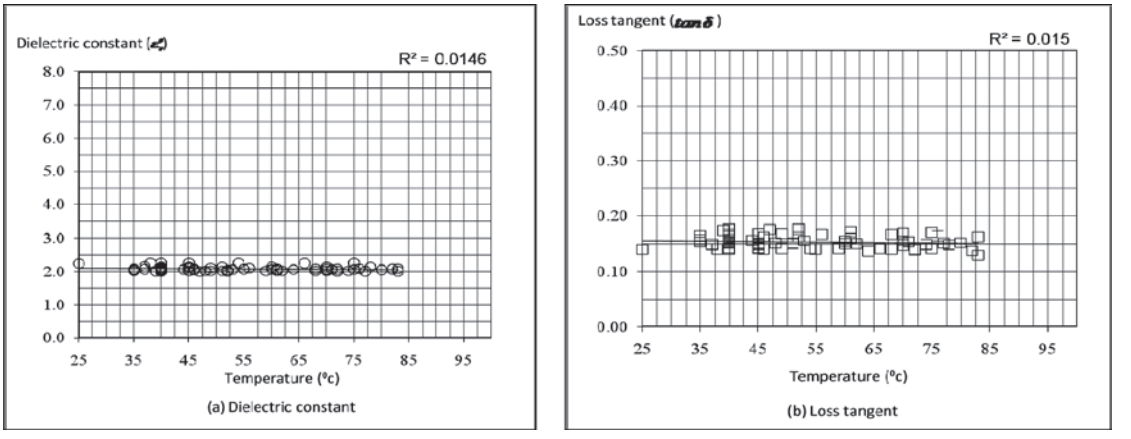
4. จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซีเมนต์น้อยมาก โดยจากการพิจารณาจากกราฟการกระจายของข้อมูลรูปที่ 2-10 นั้นสามารถวิเคราะห์ค่า R square ของแต่ละกราฟได้ โดยค่า R square ที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละกราฟนั้นมีค่าน้อยมาก นั่นคือในงานวิจัยนี้ไม่สามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์อย่างไรต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริก หรืออุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยมาก



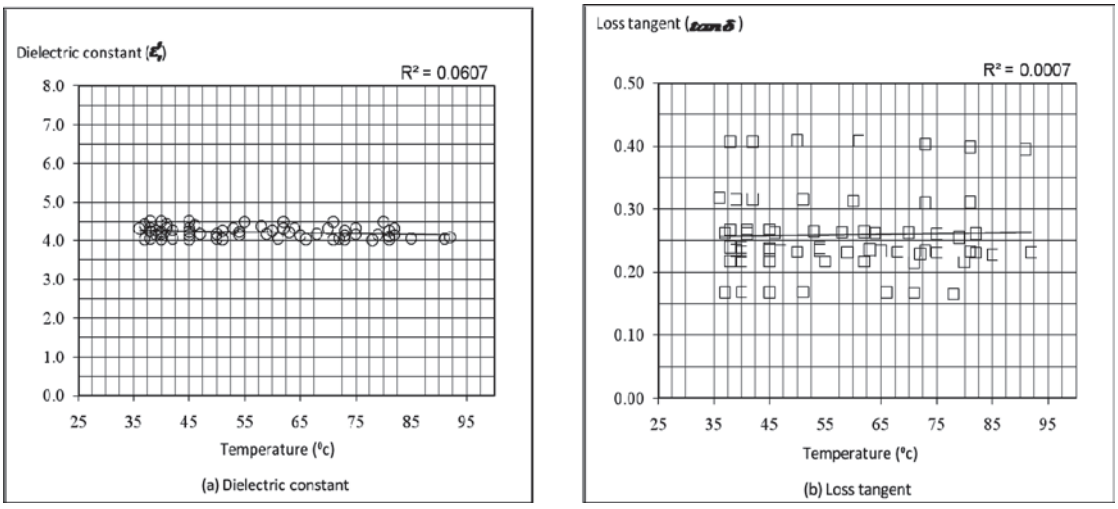
รูปที่ 2 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



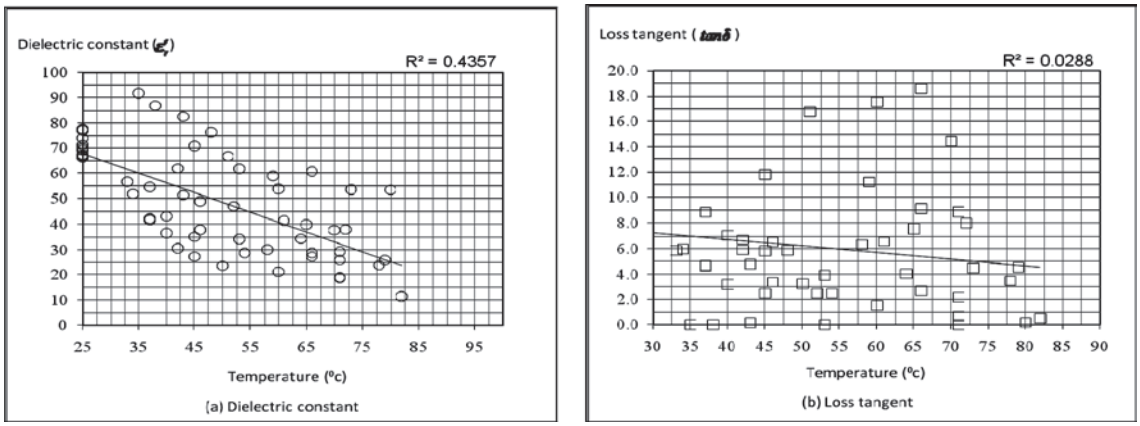
รูปที่ 3 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3



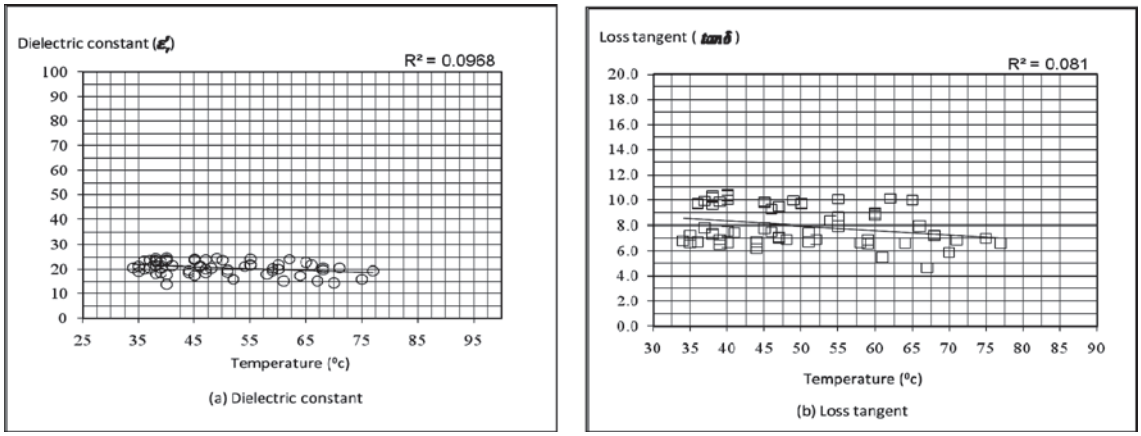
รูปที่ 4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซิลิกาฟูม



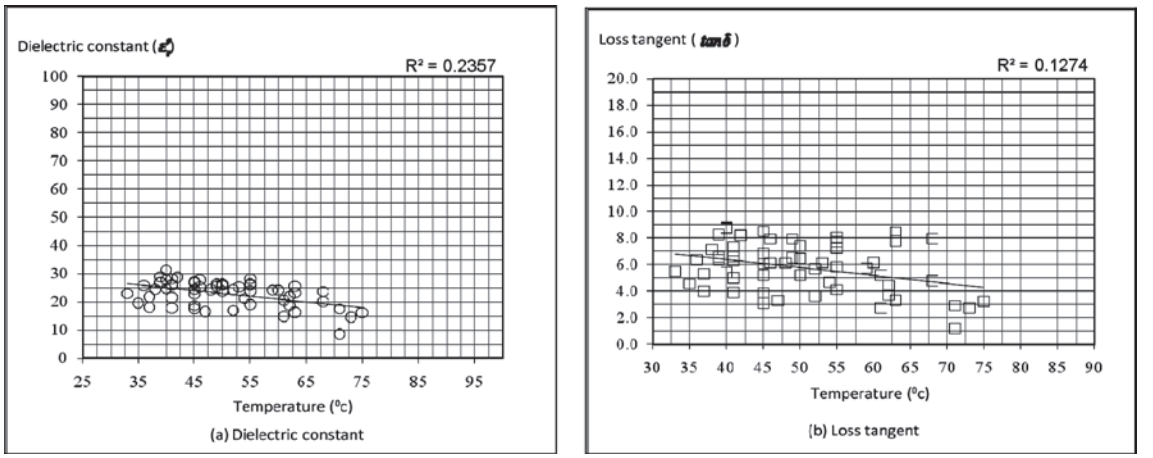
รูปที่ 5 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของเถ้าลอย



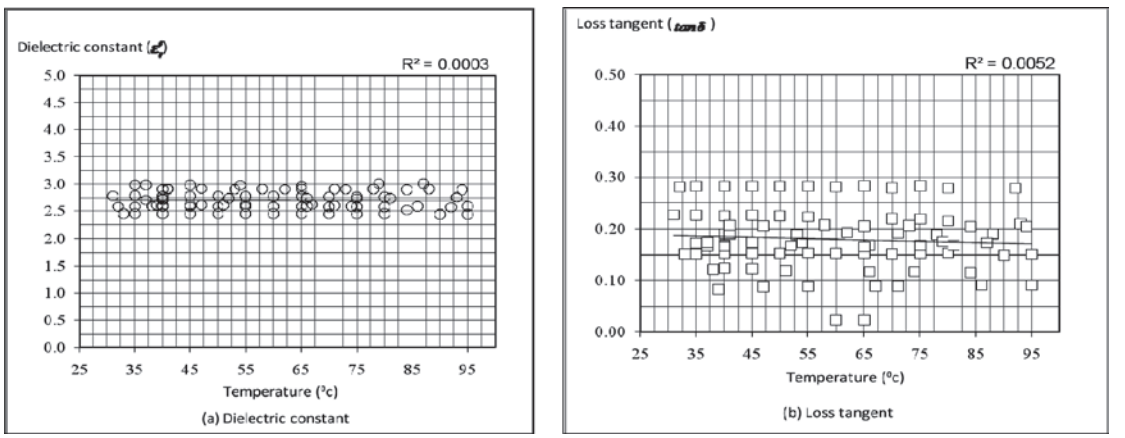
รูปที่ 6 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ



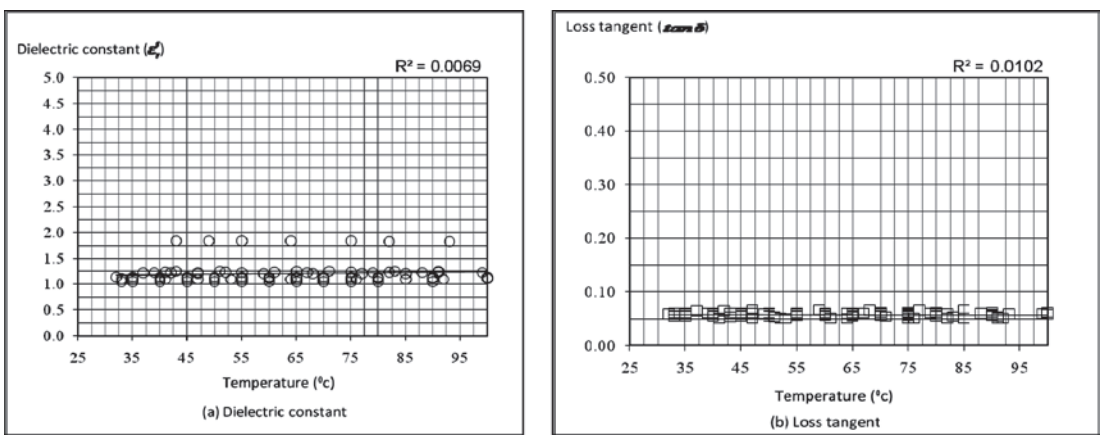
รูปที่ 7 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของสารลดน้ำพิเศษ ชนิด ADVA CAST 207



รูปที่ 8 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของสารกักกระจายฟองอากาศ ชนิด DARAX AEA



รูปที่ 9 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของทรายแม่น้ำ



รูปที่ 10 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของหิน

ตารางที่ 2 ค่าต่ำสุด สูงสุด สมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสม ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

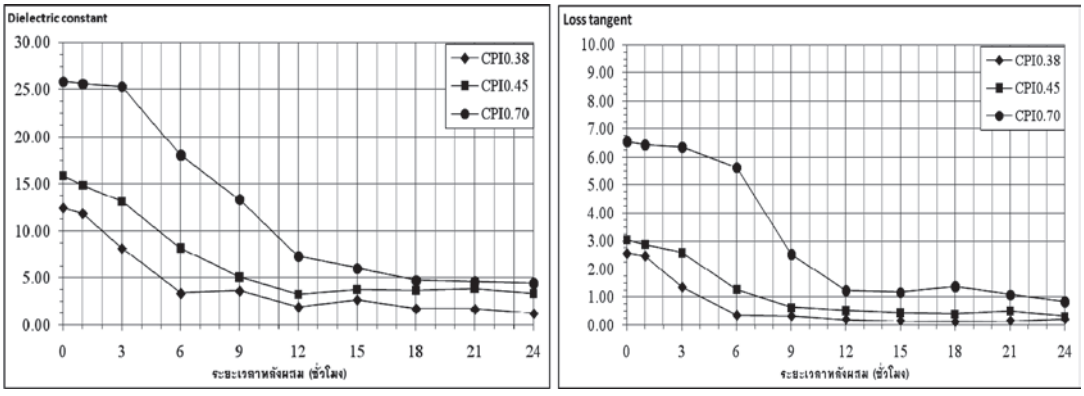
วัตถุดิบ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant (ε'_r))		ลอสแทนเจนท์ (Loss tangent ($tan\,\delta$))	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement Type I)	3.1270	4.4100	0.0070	0.2250
ซิลิกาฟูม (Silica fume)	2.0016	2.2616	0.1303	0.1771
เถ้าลอย (Fly ash)	4.0091	4.5004	0.1657	0.4094
น้ำ (Water)	11.4044	91.8206	0.0001	18.5861
สารลดน้ำพิเศษ (ADVA CAST 207)	13.8916	24.9266	4.6281	10.4388
สารกักกระจายฟองอากาศ (DARAX AEA)	8.5879	31.3209	1.1891	8.8140
ทรายแม่น้ำ (River sand)	2.4353	3.0067	0.0221	0.2840
หินปูน (Crushed limestone rock)	1.0472	1.8442	0.0511	0.0668
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (Portland cement Type III)	4.0357	4.5106	0.1657	0.4198

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสม ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

วัตถุดิบ	ค่าเฉลี่ย	
	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant (ε'_r))	ลอสแทนเจนท์ (Loss tangent ($tan\,\delta$))
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement Type I)	3.7394	0.1159
ซิลิกาฟูม (Silica fume)	2.0798	0.1535
เถ้าลอย (Fly ash)	4.2192	0.2592
น้ำ (Water)	48.4202	6.2173
สารลดน้ำพิเศษ (ADVA CAST 207)	20.6534	7.9708
สารกักกระจายฟองอากาศ (DARAX AEA)	22.9615	5.7640
ทรายแม่น้ำ (River sand)	2.6943	0.1803
หินปูน (Crushed limestone rock)	1.2084	0.0578
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (Portland cement Type III)	4.254	0.2724

4.2 สมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตโดยพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

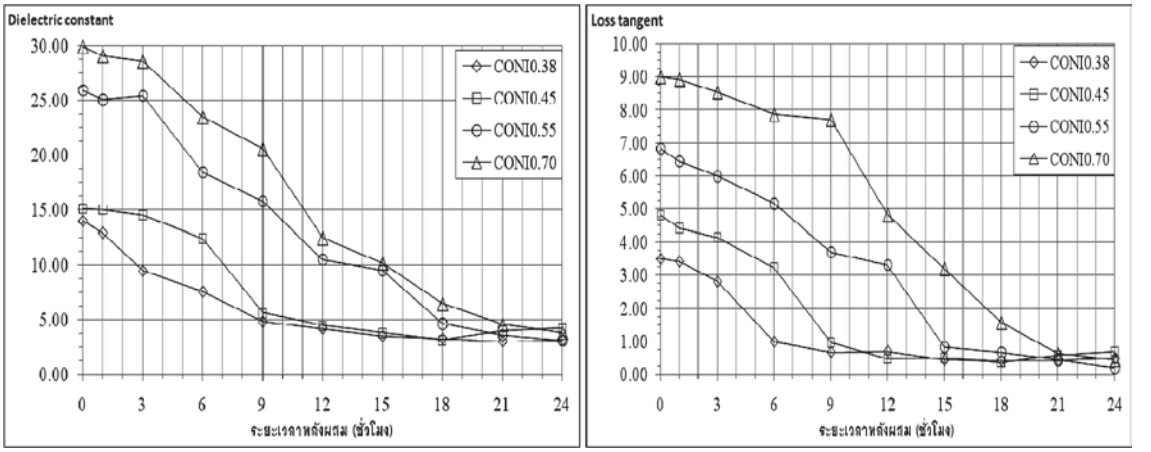
จากรูปที่ 11 และ 12 พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริก (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและลอสแทนเจนท์) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทุกชุดตัวอย่างมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าสูงในช่วงต้น (0 ถึง 3 ชม. หลังจากผสม) และลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชม. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อยๆ ลดลง จนมีค่าน้อยสุดในช่วง 24 ชม. หลังผสม เนื่องจากช่วงแรกตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีปริมาณน้ำอิสระ (Free water) สูง จึงทำให้สมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าสูงเนื่องจากน้ำเป็นสสารหรือวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูง [5] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 3 ถึง 12 ชม. พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีอัตราการลดลงสูงตามการลดลงของปริมาณน้ำอิสระ สำหรับช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 12 ถึง 24 ชม. พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีอัตราการลดลงต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงระยะเวลา 3 ถึง 12 ชั่วโมงหลังผสมถือว่าเป็นระยะเร่ง (Acceleration period) ซึ่งระยะนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นโดยการเกิดและการพัฒนาของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ ไฮเดรชัน สำหรับช่วงหลัง 12 ชม. สมบัติไดอิเล็กตริกมีอัตราการลดลงต่ำเนื่องจากระยะนี้เป็นระยะหลังการเร่ง (Post-Acceleration period) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์ [8] ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c ratio) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ต่ำ ขณะที่น้ำเป็นสสารที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้สูงกว่า ดังนั้นหากซีเมนต์เพสต์มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงนั่นย่อมหมายความว่าจะมีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ความเป็นสมบัติไดอิเล็กตริก (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและลอสแทนเจนท์) ของซีเมนต์เพสต์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 11 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน

สำหรับการเปรียบเทียบค่าสมบัติไดอิเล็กตริกระหว่างซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ในทุกช่วงเวลาหลังการผสม เนื่องจากคอนกรีตมีวัสดุอื่นที่เป็นส่วนผสมนอกเหนือจากปูนซีเมนต์และน้ำในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งวัสดุดังกล่าว ได้แก่ ทราย และหิน โดยวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 เมื่อปูนซีเมนต์ กับ น้ำ (ซีเมนต์เพสต์) ผสมรวมกับหินและทราย เกิดเป็นคอนกรีตซึ่งจะทำให้มีสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริกมากขึ้น เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะมีค่าระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ [5]



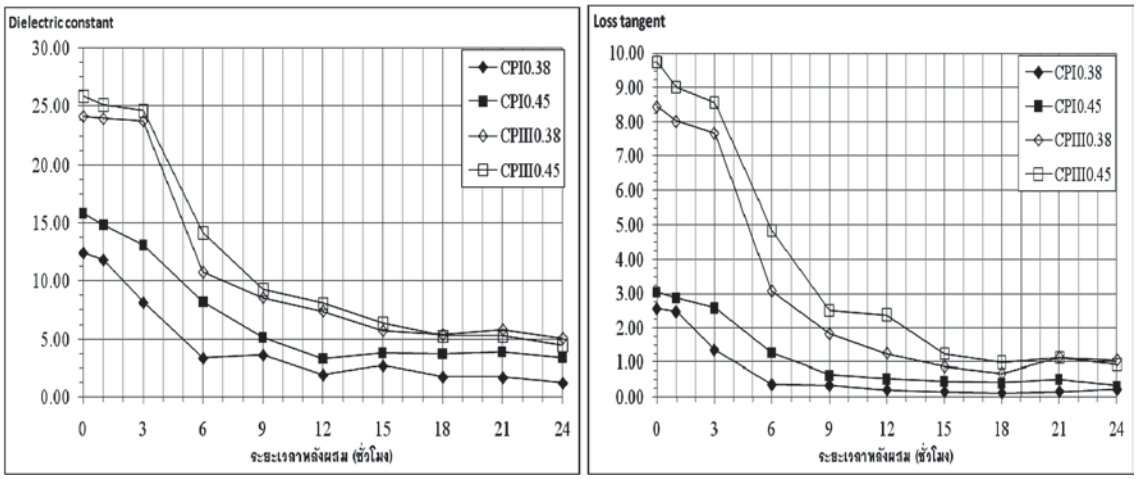
(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 12 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน

4.3 สมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสและมอร์ต้าร์โดยพิจารณาชนิดของปูนซีเมนต์

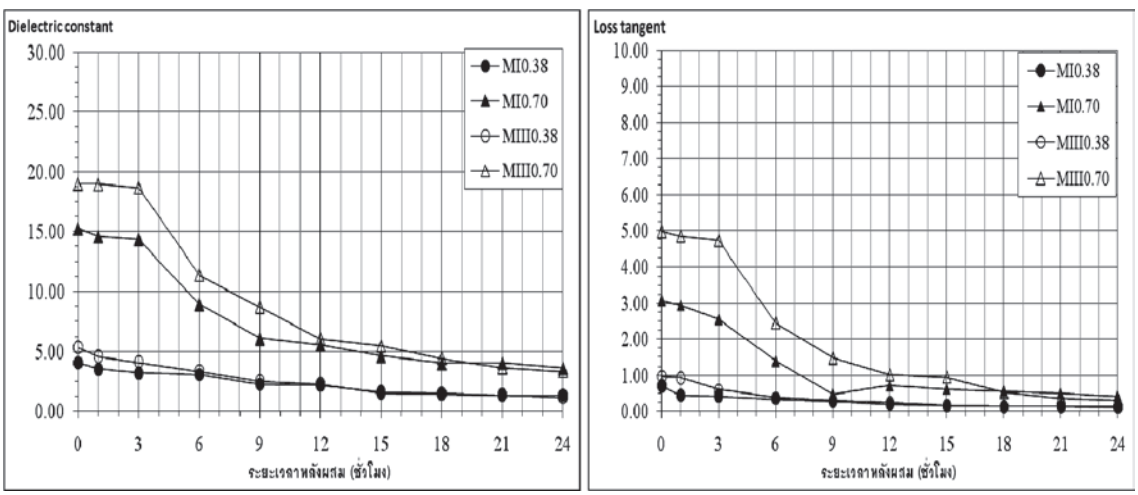
จากรูปที่ 13 และ 14 เมื่อเปรียบเทียบชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ พบว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีค่าสูงกว่าตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งความละเอียดนี้เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งการที่ปูนซีเมนต์มีค่าความละเอียดมากกว่า นั่นหมายความว่าปูนซีเมนต์นั้นจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วกว่ารวมทั้งมีระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวได้เร็วกว่าด้วยจึงทำให้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าสูงตามไปด้วย

และเมื่อพิจารณาระยะเวลาหลังผสม พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 มีค่าสูงในช่วงต้น (0 ถึง 3 ชม. หลังจากผสม) และลดลงอย่างต่อเนื่องจนเมื่อเวลาผ่านไป 15 ชม. สมบัติไดอิเล็กตริกของทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อยๆ ลดลง จนมีค่าน้อยสุดในช่วง 24 ชม. หลังผสม เช่นเดียวกับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับข้อ 4.2



(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 13 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ
สำหรับประเภทของปูนซีเมนต์ต่างกัน



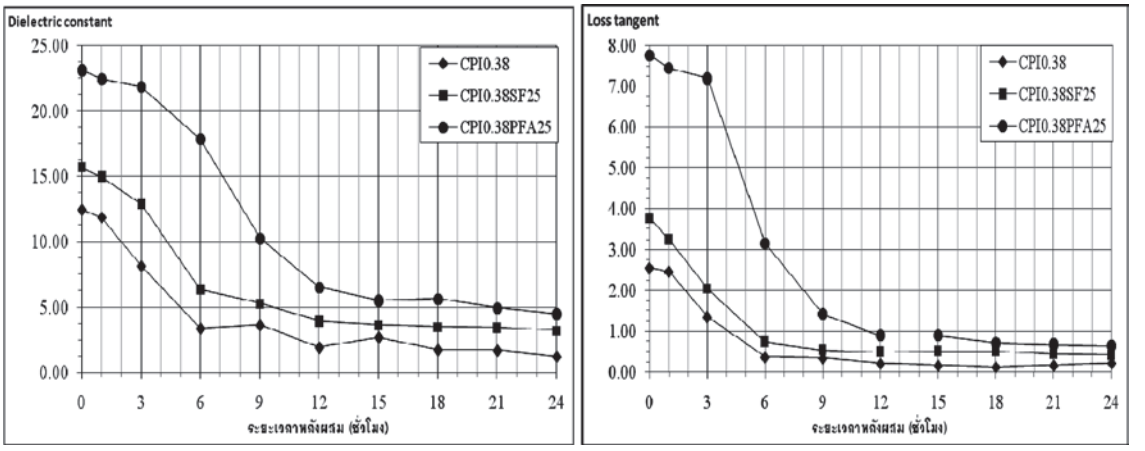
(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 14 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของมอร์ต้าร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ
สำหรับประเภทของปูนซีเมนต์ต่างกัน

4.4 สมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ โดยพิจารณาชนิดของวัสดุและสารผสมเพิ่ม

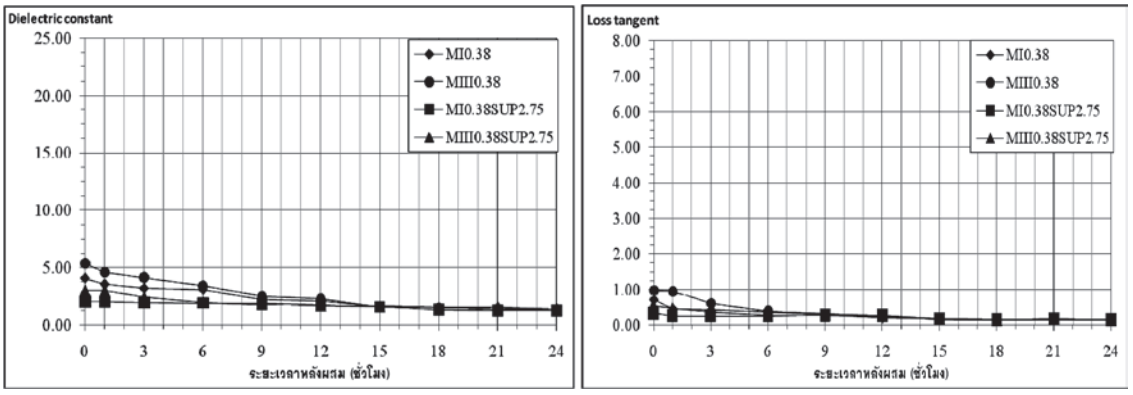
จากรูปที่ 15 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารผสมเพิ่มประเภทสารปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าลอยและซิลิกาฟูม ในปูนซีเมนต์ที่มีต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด รองลงมา คือ ซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารผสมเพิ่ม และซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าซิลิกาฟูม ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ดังนั้นซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจึงมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม

และเมื่อพิจารณามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีค่าสูงกว่า มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังอธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.3 โดยสมบัติไดอิเล็กตริกของมอร์ต้าร์ที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ผสมสารลดน้ำพิเศษ ทั้งนี้เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษเป็นสารเคมีผสมเพิ่มชนิดหนึ่งที่มีสมบัติไดอิเล็กตริก ดังนั้นเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษในมอร์ต้าร์จึงทำให้มอร์ต้าร์นั้นมีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่เติมสารลดน้ำพิเศษ



(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 15 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ สำหรับชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่างกัน

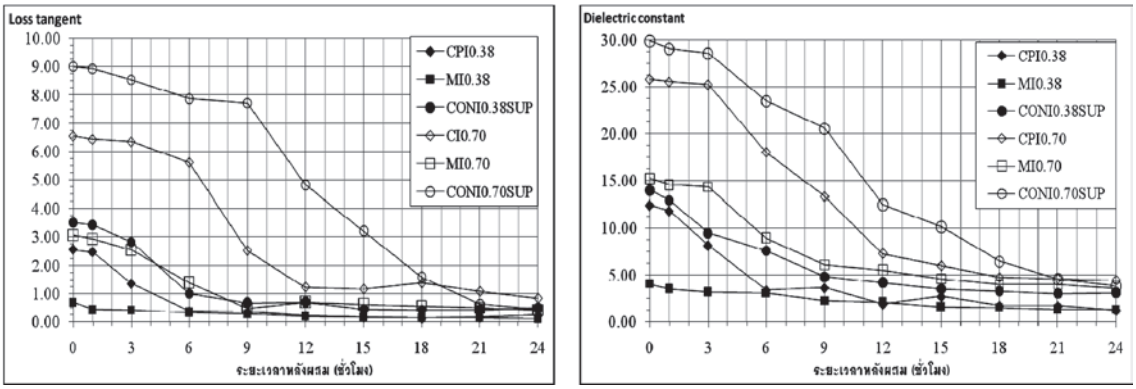


(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 16 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของมอร์ต้าร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ สำหรับการใช้สารผสมเพิ่มต่างกัน

4.5 สมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต โดยพิจารณาชนิดของมวลรวม

เมื่อพิจารณารูปที่ 17 พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกในทุกช่วงระยะเวลาหลังผสมของคอนกรีตมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ซีเมนต์เพสต์ และมอร์ต้าร์มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากคอนกรีตซึ่งประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และ น้ำ เป็นส่วนประกอบ โดยที่วัสดุดังกล่าวแต่ละชนิดต่างก็มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง จึงทำให้คอนกรีตมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด รองลงมาคือซีเมนต์เพสต์ ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ น้ำ เป็นส่วนประกอบ และสุดท้ายคือมอร์ต้าร์ ซึ่งมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวมละเอียด และ น้ำ เป็นส่วนประกอบ จะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกน้อยที่สุดเนื่องจากสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะมีค่าระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ [5] สำหรับในกรณีของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่ามอร์ต้าร์นั้น ก็เนื่องมาจากอิทธิพลของความหนาแน่น นั่นคือมอร์ต้าร์จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ จึงมีผลทำให้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำกว่า เพราะโดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลงซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย [5]



(a) Dielectric constant (b) Loss tangent

รูปที่ 17 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ

5. บทสรุป

จากสมบัติไดอิเล็กตริกของ ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตลอดช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียสของกลุ่มวัตถุดิบผง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าลอสแทนเจนท์ ไม่ต่างกันมากและอยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนกลุ่มวัตถุดิบที่เป็นสารละลาย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าลอสแทนเจนท์ ทั้งสองต่างกันและไม่อยู่ในแนวเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาจากค่า R square นั้นพบว่า ค่า R square ของแต่ละกราฟมีค่าน้อยมาก อุณหภูมิจึงมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกน้อย

2. เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าทั้งซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงกว่าก็จะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า

3. เมื่อเปรียบเทียบชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เป็นส่วนผสม ซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่า ซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะมีค่าไดอิเล็กตริกสูงกว่าซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารผสมเพิ่มประเภทสารปอซโซลานในปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่า ซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด รองลงมาคือซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมและสุดท้ายคือซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่ไม่มีสารผสมเพิ่มใดๆ เลย จะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด

5. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของมวลรวมที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกับค่าสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าคอนกรีตจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงที่สุด รองลงมาคือซีเมนต์เพสต์ และสุดท้ายคือมอร์ต้าร์ซึ่งมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด

6. เมื่อพิจารณาระยะเวลาหลังผสมของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตพบว่า ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของทุกชุดตัวอย่างมีทิศทางเหมือนกันคือ มีค่าสูงในช่วงต้น (0 ถึง 3 ชม. หลังจากผสม) และลดลงอย่างต่อเนื่องจนเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชม. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อยๆ ลดลง จนมีค่าน้อยสุดในช่วง 24 ชม. หลังผสม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณว่าน บัวเทศ ที่ช่วยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ บริษัทดับบริว อาร์ เกรซ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์สารลดน้ำแบบพิเศษ น้ำยากักกระจายฟองอากาศ และซิลิกาฟูม และบริษัท ปทุมธานีคอนกรีต ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าลอย

7. เอกสารอ้างอิง

1. 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.

2. McCarter, W.J. and Garvin, S., 1989, “Dependence of Electrical Impedance of Cement-based Materials on Their Moisture Condition”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 22, No. 11.

3. Kharkivskiy, S., Akay, M.F., Hasar, U.C., and Atis, C.D., 2002, “Measurement and Monitoring of Microwave Reflection and Transmission Properties of Cement-based Specimens”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 6, pp. 1210- 1218.

4. ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, วัชระ เกาะแก้ว, ณรงค์ศักดิ์ มากุล, และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2550, “การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*

5. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551, *“พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*

6. Rattanadecho, P, Watanasungsuit, A., and Atong, D., 2007,“Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace”, *ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering*, Vol. 129.

7. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 494 : Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete" *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

8. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2536, *คอนกรีตเทคโนโลยี,* บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.