



การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติการนำความร้อนของ ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา

The Study of Physical and Thermal Conductivity Properties of Cement Paste with Nanosilica

พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร

Pongsak Jittabut

โปรแกรมวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000

Physics and General Science Program, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

E-mail: pongsak.ey@gmail.com, Telephone: 0-4400-9009x1303

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอสมบัติทางกายภาพและสมบัติการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมนาโนซิลิกา โดยใช้ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา 3 ขนาดได้แก่ 12, 50 และ 150 นาโนเมตร และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นส่วนผสมเพิ่มสามารถลดค่าการนำความร้อน และน้ำหนักของตัวอย่างได้ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลิกาขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 4 ที่อายุ 28 วัน ให้สมบัติดีที่สุด โดยให้ค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดมีค่า 0.913 และ 0.927 W/m-K ตามลำดับ ค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่า 51.62 และ 45.8 MPa ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่น 1,806 kg/m³ และ 1798 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมอยู่ระหว่าง 11-13% และ 10-19% ตามลำดับ

ABSTRACT

This research article presents the physical and thermal conductivity properties of cement pastes containing nanosilica by mixing three nanosilica particle sizes of 12, 50 and 150 nm, using nanosilica of 1-5 wt% in the cement pastes. The water to binder ratio of 0.5 was used. The results indicated that the use of nanosilica as an admixture could reduce the thermal conductivity and lower the bulk density of specimen. The cement paste with nanosilica particle size of 50 and 150 nm with 4 wt% nanosilica at the age of 28 day showed the optimal properties. The average thermal conductivity volume were lowest at 0.913 and 0.927 W/m-K, respectively. The compressive strength volume were highest at 51.62 and 45.80 MPa, respectively, and the bulk density volume were 1,806 and 1798 kg/m³, respectively. The cement pastes with nanosilica gave lower bulk density and thermal conductivity than the typical control cement paste about 11-13% and 10-19%, respectively.

1. บทนำ

วัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในศตวรรษนี้ อย่างเช่น

วัสดุคอมโพสิตประเภทนาโนออกไซด์ผสมซีเมนต์ที่อยู่ในรูป ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ คอนกรีต โดยมีงานวิจัยที่จะพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์ประเภทต่างๆ [1, 2] ซึ่งมี

วัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น ความแข็งแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความต้านทานต่อแรงกระแทก การเสียดสีและการทำซ้ำไปซ้ำมาได้ และเป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น โดยวัสดุนาโนออกไซด์มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ซิลิกาฟุ่ม ซิลิกาไทเทเนียม เป็นต้น เช่นงานวิจัยของ Li และคณะ, Meng และคณะ, Tanyildizi, 2013 [3-5] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 11 สามารถเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ 1.26 เท่า และยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยให้คอนกรีตต้านทานต่อการขัดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาได้เป็นอย่างดี [2, 6] งานวิจัยของ Senff และคณะ, 2009 [7] นำเสนอผลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถในการไหล ระยะเวลาการก่อตัว และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจได้แก่งานวิจัยของ Sadrmomtazi และคณะ, 2009 [8] ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 12 และพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พัฒนาได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 2.68 เท่า และงานวิจัยของ Sadrmomtazi และคณะ, 2009 [9] ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 7 และพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พัฒนาได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1.70 เท่า ซึ่งเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มที่นำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์ดังกล่าวให้ดีขึ้น

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี และอยู่นอกเขตภาวะน่าสบาย (Comfort Zone) ซึ่งกำหนดโดย ASHRAE, 2009 [10] จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศมากขึ้น ซึ่งการที่จะช่วยทำให้เกิดภาวะน่าสบายในอาคารนั้นคือ การใช้เครื่องปรับอากาศ ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการปรับอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้

พลังงานไฟฟ้าในการทำงานของเครื่องปรับอากาศ จากการสำรวจพบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อปรับอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 60-70% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในอาคาร [11] จะเห็นได้ว่า พลังงานไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ทั้งในด้านการผลิตและการบริโภค อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา และมีการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยนั้น จากสถิติปี 2537 [12] มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น จำนวน 62,558 ล้านหน่วย และในปี 2550 มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น 132,492 ล้านหน่วย ในระยะเวลา 14 ปีมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 69,934 ล้านหน่วย ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 112 แนวทางหนึ่งในการช่วยลดการใช้พลังงานดังกล่าวคือ การป้องกันและลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการนำความร้อนของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา โดยศึกษาสมบัติ ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น สมบัติค่ากำลังอัด และศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างและเป็นวัสดุที่อนุรักษ์พลังงาน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

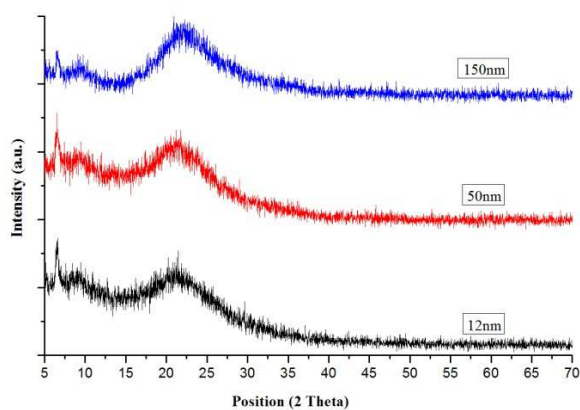
วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ นาโนซิลิกา (Nano-SiO₂) ซึ่งมีส่วนผสมของ SiO₂ ร้อยละ 99.8 และเพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา ในงานวิจัยนี้จะใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 12 นาโนเมตร (NS12), 50 นาโนเมตร (NS50) และ 150 นาโนเมตร (NS150) องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และสมบัติพื้นฐานของวัสดุเหล่านี้แสดงได้ในตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ได้เลือกนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มศักยภาพของปูนซีเมนต์ โดยใช้นาโนซิลิกาที่ใช้มี

สมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบพื้นฐานกว้างในตัวอย่างนาโนซิลิกา แสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด

Component	POC	NS12	NS50	NS150
SiO ₂	20.80	99.8	99.8	99.8
Al ₂ O ₃	4.70	-	-	-
Fe ₂ O ₃	3.40	-	-	-
CaO	65.30	-	-	-
MgO	1.50	-	-	-
K ₂ O	0.40	-	-	-
Na ₂ O	0.10	-	-	-
SO ₃	2.70	-	-	-
LOI	0.90	0.2	0.2	0.2
SSA (m ² /g)	0.38	200	50	10

หมายเหตุ: POC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, LOI หมายถึง Loss on Ignition การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา, SSA หมายถึง Specific Surface Area คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ



รูปที่ 1 XRD ของนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 12 50 และ 150 นาโนเมตร

2.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด ทดแทนปูนซีเมนต์โดยผสมนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 จากนั้นนำไปผสมกับเครื่องผสมตัวอย่างให้

เข้ากันใช้เวลาประมาณ 3 นาที จากนั้นเทซีเมนต์เพสต์ลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม. แล้วนำตัวอย่างไปสั่นเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปวางบ่มอากาศจนครบ 24 ชั่วโมง จึงนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ และนำไปบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์และค่าการนำความร้อน และทดสอบโครงสร้างจุลภาคจากเครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน (SEM)

2.3 วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสม เพื่อหาค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ขนาดของตัวอย่าง 5x5x5 ลบ.ซม. โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในแต่ละส่วนผสมทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

2. การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบค่าความหนาแน่นโดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส ตามมาตรฐาน ASTM B962-08 โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในแต่ละส่วนผสมทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

3. การทดสอบการนำความร้อน

ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสม การศึกษาค่าการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 5930 โดยใช้ขนาดของตัวอย่าง 5x5x5 ลบ.ซม. โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

4. การศึกษาทางโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาทางด้านโครงสร้างจุลภาคทำโดยการถ่ายภาพขยายด้วยเครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5910LV โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างระดับ

จุลภาค และผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา ทดสอบเมื่อซีเมนต์เพสต์มีอายุ 28 วัน

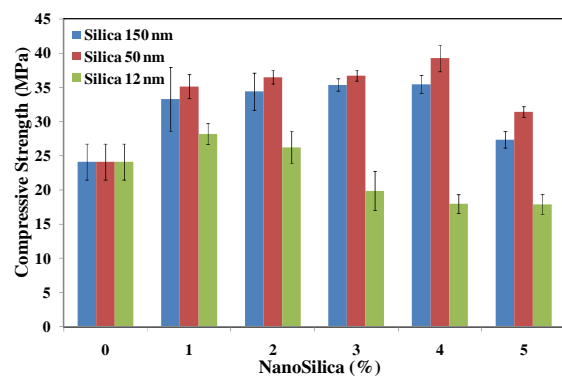
3. ผลการอภิปรายผลการทดลอง

3.1 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา

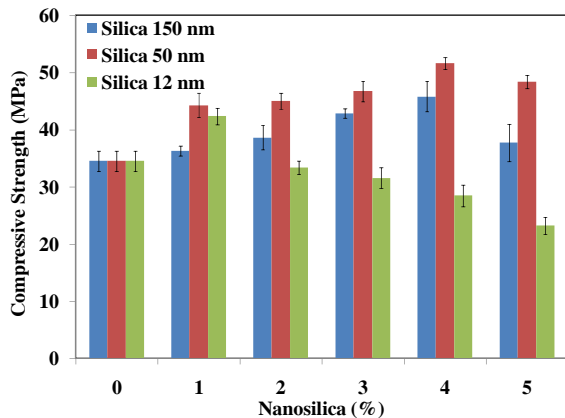
รูปที่ 2-3 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 27 MPa และ MPa และผลจากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่ได้สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมซึ่งไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร ส่วนนาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 นาโนเมตร ซึ่งให้ค่าการกำลังอัดที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนักน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของนาโนซิลิกามีขนาดเล็กมากสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาคและลดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ได้ดี อีกทั้งนาโนซิลิกามีองค์ประกอบของ ซิลิกาในปริมาณที่สูงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความรวดเร็วของปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) เมื่อเปรียบเทียบการใช้นาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาดพบว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 35.44 MPa และ 45.80 MPa ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม 47% และ 33 % ตามลำดับ ส่วนขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ 50 ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 39.21MPa และ 51.62 MPa ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม 63% และ 50% ตามลำดับ

ซึ่งขนาดอนุภาค 150 และ 50 นาโนเมตรแสดงให้เห็นความรวดเร็วในการพัฒนาด้านกำลัง (การเพิ่มของกำลังอัด) และ 12 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าขนาด

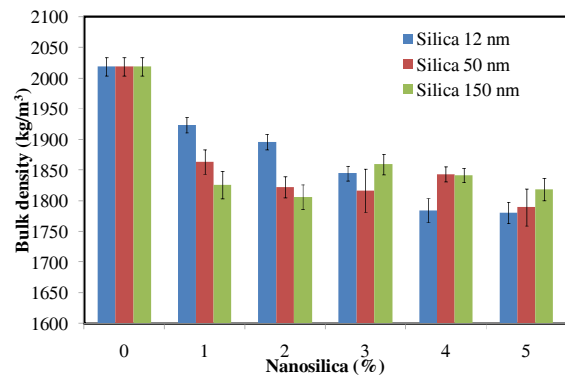
อนุภาค 150 และ 50 นาโนเมตร ทั้งที่มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า สามารถอธิบายได้ว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไป แทนที่จะสามารถเข้าไปอัดแน่นในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดี อาจจะเข้าไปเคลือบผิวรอบๆ อนุภาคของซีเมนต์แทน หรือเกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียรขาดการอัดแน่นของอนุภาค [13] เช่นการพัฒนาการกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) อย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต ซึ่งพบว่าการใช้นาโนซิลิกขนาด 10-15 นาโนเมตร [1, 14] ผสมลงในมอร์ตาร์ จะพัฒนากำลังได้น้อยกว่าการใช้นาโนซิลิกขนาด 40-50 นาโนเมตร อย่างเห็นได้ชัด [3, 9] สรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ ในกรณีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และปริมาณการแทนซีเมนต์ร้อยละ 4 คือ ขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโนเมตร เนื่องจากพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นเป็นผลร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) และการอัดแน่นของอนุภาค การเลือกใช้นาโนซิลิกาของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจะสามารถพัฒนากำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน



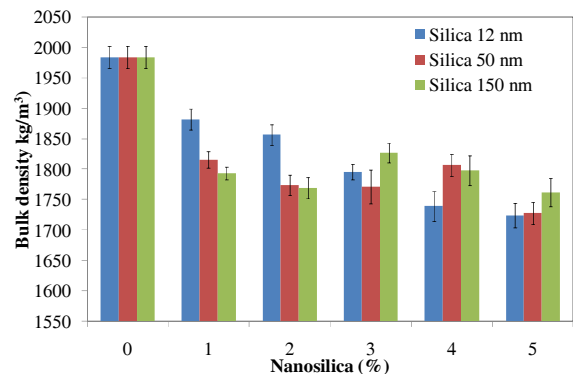
รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา ขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา ขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน

3.2 ความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา

รูปที่ 4-5 แสดงผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน โดยมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2025 และ 1979 kg/m³ และทดสอบค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1806 และ 1769 kg/m³ ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 11% และ 11% ตามลำดับ ส่วนนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1790 และ 1728 kg/m³ ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 11% และ 13% และนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1781 และ 1724 kg/m³ ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 12% และ 13% โดยทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก (12 นาโนเมตร) จะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก สามารถลดค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์

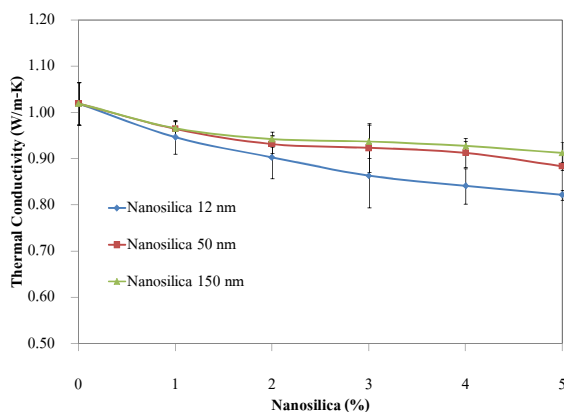


รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา ขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

3.3 การนำความร้อนของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนของซีเมนต์เพสต์ควบคุมซึ่งให้ค่าความร้อน 1.09 W/m-K และทดสอบซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตรที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อน 0.912 W/m-K ซึ่งจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 10% ส่วนของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตรที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อน 0.883 W/m-K ซึ่งจะให้ค่า

ความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 13% และนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตรที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อน 0.821 W/m-K ซึ่งจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 19% จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตรที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา จะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าขนาดนาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 50 นาโนเมตร เนื่องจากปริมาณช่องว่างของอัตราส่วนผสมนาโนซิลิกา 150 นาโนเมตร มีปริมาณช่องว่างมากกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 50 นาโนเมตร อัตราส่วนผสมซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาดสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในงานก่อสร้าง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน และป้องกันความร้อนในรูปแบบต่างๆ ได้



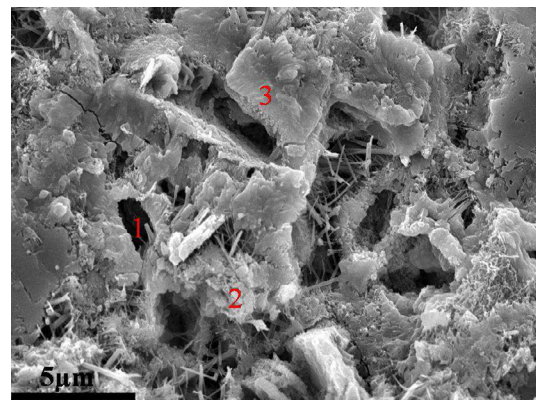
รูปที่ 6 การนำความร้อนเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

3.4 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา

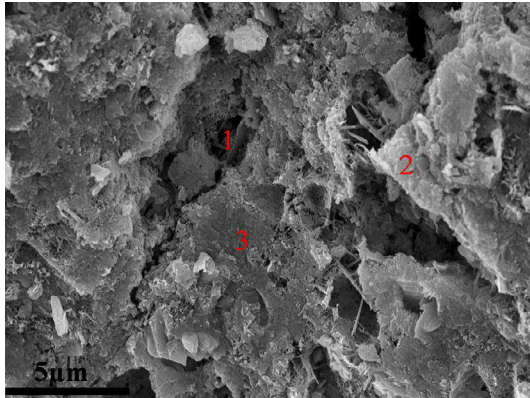
รูปที่ 7 เป็นรูปถ่ายขยายของซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุ 28 วัน จะมีช่องว่างภายในมากกว่าลักษณะการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโนเมตร แต่ที่ขนาดอนุภาคแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร จะมีลักษณะช่องว่างมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมและขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโน

เมตร จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกามีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan)

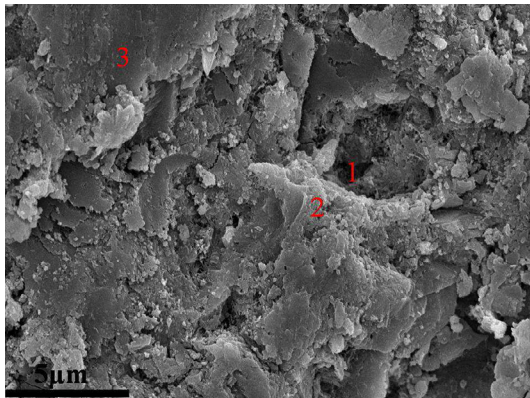
จากรูปที่ 8 ซึ่งใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก (12 นาโนเมตร) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ไม่แน่นเต็มที่ มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันน้อย และมีพบว่ามีช่องว่าง เกิดขึ้นจำนวนมากเนื่องจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นไม่เต็มที่ [13, 14] เมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ใช้นาโนซิลิกขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ดังรูปที่ 9-10 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ที่ได้ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแน่นเต็มที่ และแทบไม่มีช่องว่างปรากฏให้เห็น ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือ C-S-H เกิดได้เร็วกว่า (ภายใน 28 วัน) และสามารถเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างได้เกือบทั้งหมดเนื้อของเพสต์มีความแน่นมากกว่า และการถ่ายแรงจะทำได้ดีกว่า และส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้รับมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลร่วมกันระหว่างการอัดแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในขณะที่เพสต์ที่ใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กเกินไป (12 นาโนเมตร) ไม่สามารถเติมเต็มช่องของเพสต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาจเข้าไปยึดเกาะที่ผิวของอนุภาคขนาดใหญ่และขาดการอัดแน่นอย่างมีประสิทธิภาพ



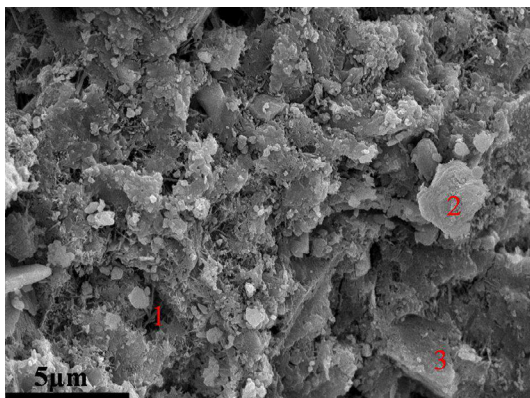
รูปที่ 7 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ (1 = pores, 2=C-S-H, 3= Ca(OH)₂)



รูปที่ 8 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 4%
โดยน้ำหนักร ขนาด 12 นาโนเมตร
(1 =pores, 2=C-S-H, 3= Ca(OH)₂)



รูปที่ 9 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 4%
โดยน้ำหนักร ขนาด 50 นาโนเมตร
(1 =pores, 2=C-S-H, 3= Ca(OH)₂)



รูปที่ 10 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 4%
โดยน้ำหนักร ขนาด 150 นาโนเมตร
(1 =pores, 2=C-S-H, 3= Ca(OH)₂)

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อน

รูปที่ 11-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร ของเพสต์ที่อายุ 28 วัน ค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกามีค่าน้อยกว่า ซีเมนต์เพสต์ปกติ และซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาจะให้ค่าการนำความร้อนจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัสดุโดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีช่องว่างในเนื้อของวัสดุมากจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ [15] ซึ่งซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 12 นาโนเมตรมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 50 และ 150 นาโนเมตร และสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร แสดงดังสมการที่ 1-3

ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ที่ความชื้น 91% ดังสมการที่ 1

$$K = 1.3 \times 10^{-4} D - 0.02568 \quad (1)$$

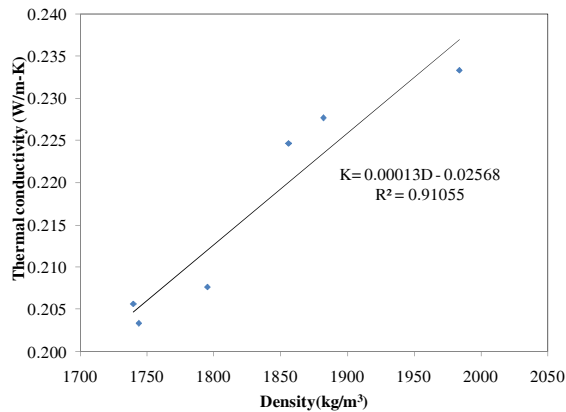
ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความชื้น 84% ดังสมการที่ 2

$$K = 5 \times 10^{-5} D + 0.2066 \quad (2)$$

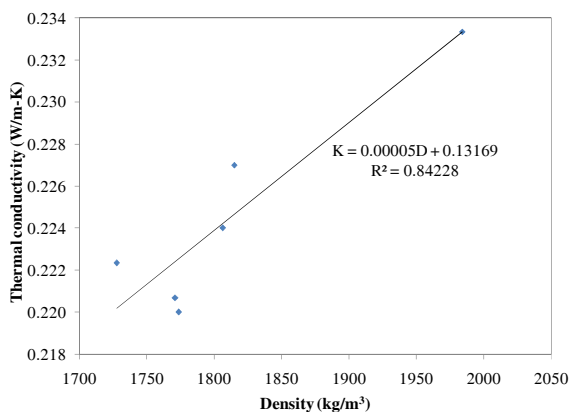
ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร ที่ความชื้น 88% ดังสมการที่ 3

$$K = 1.2 \times 10^{-4} D - 0.0122 \quad (3)$$

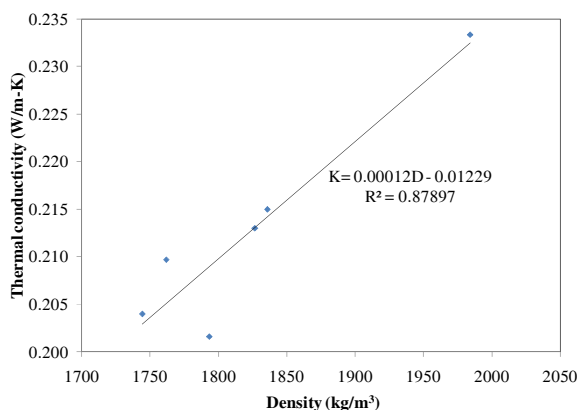
เมื่อ K คือค่าการนำความร้อน (W/m-K) และ D คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m³)



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร

4. สรุปผล

1. ขนาดของนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ นาโนซิลิกาที่มีอนุภาคเล็กเกินไป 12 นาโนเมตร จะไม่สามารถอัดแน่นในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้อย่างเหมาะสม และเมื่อใช้นาโนซิลิกาขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการอัดแน่นจะเพิ่มขึ้น การพัฒนาค่าการนำความร้อนที่ได้เป็นผลรวมกันระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan) และการอัดแน่นของอนุภาค

2. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในส่วนร้อยละ 4 ที่ขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโนเมตร ให้ค่าการนำความร้อนมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม

3. นาโนซิลิกาที่มีอนุภาค 12 นาโนเมตรให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม

4. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร จะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก สามารถลดค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ 11% และ 13% ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน

5. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก สามารถลดค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์อยู่ในช่วง 10-19% ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 28 วัน และซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาจะให้ค่าการนำความร้อนจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของ

วัสดุโดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีช่องว่างในเนื้อ
ของวัสดุมากจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งซีเมนต์เพสต์
ผสมนาโนซิลิกา 12 นาโนเมตรมีความหนาแน่นน้อยกว่า
ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 50 และ 150 นาโนเมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่าง
ยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้สถานที่ในการทำวิจัย
และสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Li, H. Xiao, H.G., and Qu, J.P. A Study on Mechanical and Pressure-sensitive Properties of Cement-Mortar with Nanophase Materials. *Cement and Concrete Research*, 2004; 34(3): 435-438.
- [2] Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P. Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-particles for Pavement. *International Journal of Fatigue*, 2007; 29: 1292-1301.
- [3] Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., and Park J.B. Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles. *Construction and Building Materials*, 2007; 21(6): 1351-1355.
- [4] Harun Tanyildizi. Variance analysis of crack characteristics of structural lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 2013; 47: 1154-1159.
- [5] Tao Meng, Yachao Yu, Xiaoqian Qian, Shulin Zhan, Kuangliang Qian. Effect of nano-TiO₂ on the mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2012; 29: 241-245.
- [6] Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P. Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement. *Wear*, 2006; 260: 1262-1266.
- [7] Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira V.M., Hotza, D., and Repette W. (2009). Effect of Nano-Silica on Rheology and Fresh Properties of Cement Paste and Mortars. *Construction and Building Materials*, vol. 23, March 2009, pp. 2489-2491.
- [8] Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., and Park J.B. Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles. *Construction and Building Materials*, 2007; 21(6): 1351-1355.
- [9] Sadrmomtazi, A., Fasihi, A., Balalaci, F., and Haghi, A.K. Investigation of Mechanical and Physical Properties of Mortars Containing Silica Fume and Nano-SiO₂. Proceeding of the Third International Conference of Concrete & Development 2009, Tehran, I.R. Iran, 2009; 1153-1160.
- [10] ASHRAE. 2009 ASHRAE Handbook Fundamentals S-I Edition. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta Georgia, USA, 2009.
- [11] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือชุดความรู้การอนุรักษ์พลังงานสำหรับสำนักงาน. เอกสารเผยแพร่, พิมพ์ครั้งที่ 2, กระทรวงพลังงาน, 2548.
- [12] กาญจนา บุญชัย. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฟฟ้ากับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [13] ศตวรรษ หุณหรรณพงศ์ ทวีช พูลเงิน และ สมชาย ชูชีพสกุล. กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 2554; 34(3): 231-244.
- [14] Li, H., Xiao, H.G., and Qu, J.P. Microstructure of Cement Mortar with Nano Particles. *Composite Part B*, 2004; 35(2): 185-189.
- [15] Kim, K-H., Jeon, S-E., Kim, J-K., Yang, S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2003; 33(3): 363-371.