

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของซีเมนต์เฟสท์ผสมนาโนซิลิกา

The Study of Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Cement Paste Containing Nanosilica

พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร¹ สุปรีย์ พินิจสุนทร² ปริญา จินดาประเสริฐ³

Received: March, 2014; Accepted: September, 2014

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของซีเมนต์เฟสท์ที่ผสมนาโนซิลิกา โดยศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกา โดยใช้ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา 3 ขนาดได้แก่ 12, 50 และ 150 นาโนเมตร และแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นส่วนผสมเพิ่มสามารถลดค่าการนำความร้อน และน้ำหนักของตัวอย่างได้ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลิกาขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 4 ที่อายุ 28 วัน ให้สมบัติที่ดีที่สุด โดยให้ค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดมีค่า 0.913 และ 0.927 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ ค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่า 51.62 และ 45.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และค่าความหนาแน่น 1,806 และ 1,798 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เฟสท์ควบคุมอยู่ระหว่าง 11-13 และ 10-19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งน่าสนใจสำหรับการประหยัดพลังงานเมื่อนำไปใช้เป็นกำแพงฉนวนกันความร้อน

คำสำคัญ : สมบัติเชิงกล; ค่าการนำความร้อน; นาโนซิลิกา; ซีเมนต์เฟสท์

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

E - mail : pongsak.ey@gmail.com

Abstract

This research article presents the mechanical properties and thermal conductivity of cement pastes containing nanosilica. The effects of nanosilica particle size and concentration determined by mixing three nanosilica particle sizes of 12, 50 and 150 nm, using nanosilica were of 1-5 wt%. The water to binder ratio of 0.5 was used. The results indicated that the use of nanosilica as an admixture can reduce the thermal conductivity and lowered the bulk density of specimen. The cement paste with nanosilica particle size of 50 and 150 nm containing 4 wt% nanosilica at the age of 28 days showed the optimized properties. The average of thermal conductivity were the lowest at 0.913 and 0.927 W/m-K, the average of compressive strength were the highest at 51.62 and 45.80 MPa and the bulk density were 1,806 and 1,798 kg/m³ respectively. The cement paste containing nanosilica have lower bulk density and thermal conductivity than typical control cement paste about 11 - 13% and 10 - 19% respectively. The nanosilica mixed cement paste is very interesting for energy saving when used as wall insulating material.

Keywords : Mechanical Properties; Thermal Conductivity; Nanosilica; Cement Paste

บทนำ

วัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในศตวรรษนี้ อย่างเช่น วัสดุคอมโพสิตประเภทนาโนออกไซด์ผสมซีเมนต์ที่อยู่ในรูป ซีเมนต์เฟสค์ มอร์ตาร์ คอนกรีต โดยมีงานวิจัยที่จะพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์ประเภทต่างๆ (Li et al., 2003; Li et al., 2004) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น ความแข็งแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความต้านทานต่อแรงกระแทก การเสียดสีและด้านแรงกระทำ และเป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น (Li et al., 2005; ศตวรรษ, 2554) โดยวัสดุนาโนออกไซด์มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ซิลิกาฟุ่ม ซิลิกา ไทเทเนียม เป็นต้น เช่น งานวิจัยของ (Li et al., 2004; Meng et al., 2012; Tanyildizi, 2013) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 11 สามารถเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ 1.26 เท่า และยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยให้คอนกรีตต้านทานต่อการขัดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาได้เป็นอย่างดี (Li et al., 2006; Li et al., 2007) งานวิจัยของ (Senff et al., 2009) นำเสนอผลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถในการไหล ระยะเวลาการก่อตัว และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจ ได้แก่ งานวิจัยของ (Jo et al., 2007) ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 12 และพบว่ากำลังอัดของ

(Sadrmomtazi et al., 2009) ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกา ขนาด 50 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 7 และพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พัฒนาได้มากกว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1.70 เท่า ซึ่งเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มที่นำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุง คุณสมบัติของซีเมนต์ดังกล่าวให้ดีขึ้น

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี และอยู่นอกเขตภavn่านสบาย (Comfort Zone) ซึ่งกำหนดโดย (ASHRAE, 2009) จึงส่งผลให้มีการใช้ พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศมากขึ้น ซึ่งการที่จะช่วยทำให้เกิดภavn่านสบายในอาคารนั้นคือ การใช้ เครื่องปรับอากาศ ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการปรับอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน ของเครื่องปรับอากาศ จากการสำรวจพบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อการปรับอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 60 - 70% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในอาคาร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) จะเห็นได้ว่า พลังงานไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจและสังคมของ ประเทศทั้งในด้านการผลิตและการบริโภค อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา และมีการขยายตัว ทางด้านเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งปริมาณ การใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยนั้น จากสถิติปี 2537 (กาญจนา, 2551) มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น จำนวน 62,558 ล้านหน่วย และในปี 2550 มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น 132,492 ล้านหน่วย ในระยะเวลา 14 ปี มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 69,934 ล้านหน่วย ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 112 แนวทางหนึ่งในการช่วยลด การใช้พลังงานดังกล่าวคือ การป้องกันและลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร

จากงานวิจัยในอดีตเหล่านี้ ชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้นาโนซิลิกาเพื่อเพิ่มกำลังอัดให้แก่ซีเมนต์ มอร์ตาร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงพิเศษเป็นสิ่งที่น่าสนใจ นาโนซิลิกามีแนวโน้ม ที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้นเช่นเดียวกับซิลิกาฟุ่ม กอปรกับราคาของนาโนซิลิกาในปัจจุบัน ไม่ได้แพงมาก (กิโลกรัมละ 300 บาท) และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แต่ยังคงสูงกว่าซิลิกาฟุ่ม (กิโลกรัมละ 20 บาท) หลายเท่า (ศตวรรษ, 2554) การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล และ คุณสมบัติการนำความร้อนของของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา โดยศึกษาสมบัติ ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น สมบัติค่ากำลังอัด ผสมนาโนซิลิกา ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เพื่อเป็นวัสดุ ทางเลือกไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างและเป็นวัสดุที่อนุรักษ์พลังงาน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา เพื่อศึกษา ผลของขนาดอนุภาคและขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาโดยใช้เทคนิค SEM

วิธีดำเนินการวิจัย

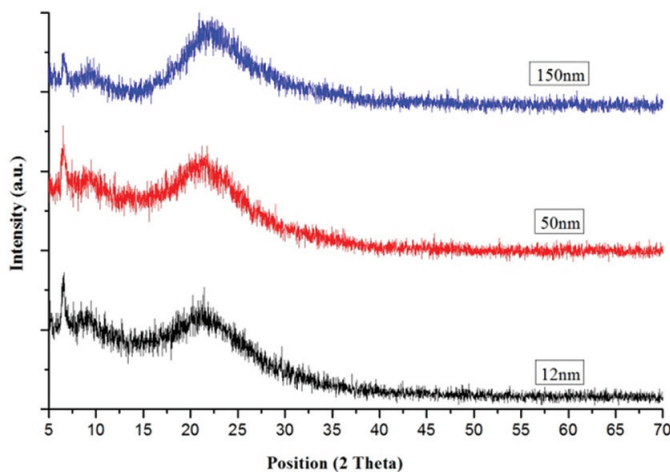
วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกา (Nano-SiO₂) ซึ่งมีส่วนผสมของ SiO₂ ร้อยละ 99.8 ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา ในงานวิจัยนี้จะใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 12 นาโนเมตร 50 นาโนเมตร และ 150 นาโนเมตร ซึ่งทั้งสามขนาดนำเข้าจากประเทศจีน โดยมีมาตรฐานระดับเกรดอุตสาหกรรม โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาคและสมบัติพื้นฐานของวัสดุเหล่านี้แสดงได้ในตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ได้เติมนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มศักยภาพของปูนซีเมนต์ โดยใช้นาโนซิลิกาที่มีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบพิสัยกว้างในตัวอย่างนาโนซิลิกา แสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด

Component	POC	Nanosilica 12 nm	Nanosilica 50 nm	Nanosilica 150 nm
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 พื้นที่ผิวของวัสดุ



รูปที่ 1 XRD ของนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12, 50 และ 150 นาโนเมตร

วิธีเตรียมตัวอย่าง

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด แทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 จากนั้นนำไปผสมกับเครื่องผสมตัวอย่างให้เข้ากันใช้เวลาประมาณ 3 นาที จากนั้นเทซีเมนต์เพสต์ลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลบ.ซม. แล้วนำตัวอย่างไปสั่นเพื่อฟองอากาศเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปวางบ่มอากาศ เมื่อครบ 24 ชั่วโมง จึงนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ และนำไปบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติเชิงกล ค่าการนำความร้อน และทดสอบโครงสร้างจุลภาคจากเครื่องถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสม เพื่อหาค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ขนาดของตัวอย่าง $5 \times 5 \times 5$ ลบ.ซม. โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในแต่ละส่วนผสมทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

การทดสอบความหนาแน่น

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

การทดสอบการนำความร้อน

ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสม การศึกษาค่าการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 5930 โดยใช้ขนาดของตัวอย่าง $5 \times 5 \times 5$ ลบ.ซม. โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

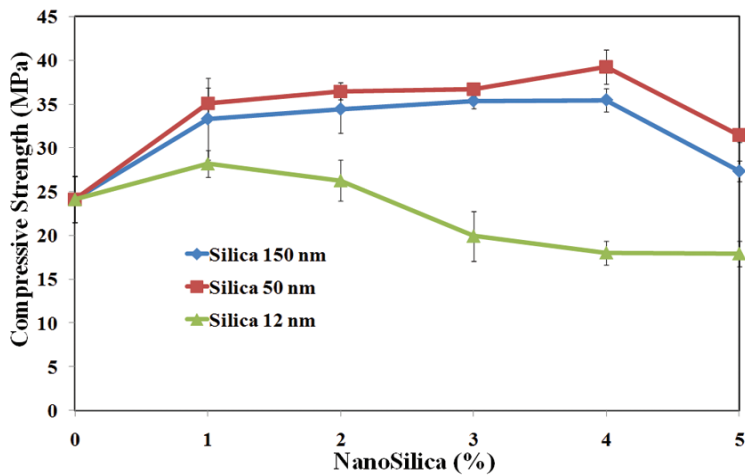
การศึกษาทางโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาทางด้านโครงสร้างจุลภาคทำโดยการถ่ายภาพขยายด้วยเครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน (SEM) รุ่น JSM-5910LV โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างระดับจุลภาค และผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาทดสอบเมื่อซีเมนต์เพสต์มีอายุ 28 วัน

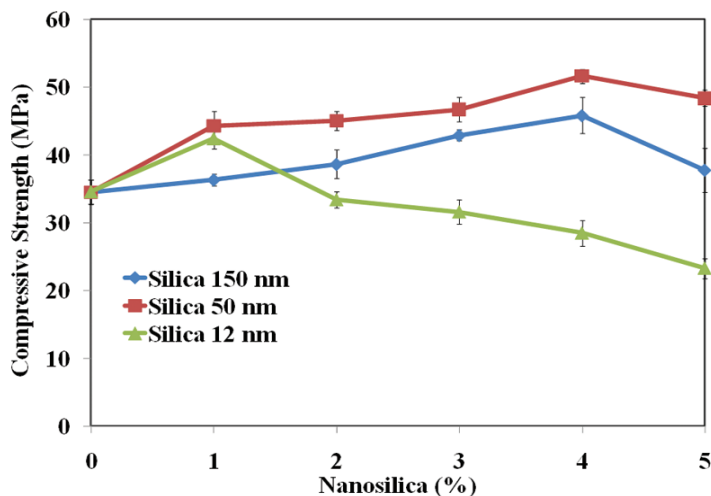
ผลการวิเคราะห์

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา

ผลจากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด มีการพัฒนา กำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยนาโนซิลิกา 50 และ 150 นาโนเมตรให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยนาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 นาโนเมตร ซึ่งให้ค่าการกำลังอัดที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อัตราส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3 - 5 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1 - 2 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของนาโนซิลิกา มีขนาดเล็กมากสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาคและลดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ได้ดี อีกทั้งนาโนซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณที่สูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความรวดเร็วของปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อเปรียบเทียบการใช้นาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาดพบว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 35.44 เมกะปาสคาล และ 45.80 เมกะปาสคาลซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม 47 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ 50 ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 39.21 เมกะปาสคาล และ 51.62 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม 63 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 - 3 ซึ่งขนาดอนุภาค 150 และ 50 นาโนเมตร แสดงให้เห็นความรวดเร็วในการพัฒนากำลังดัน และ 12 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าขนาดอนุภาค 150 และ 50 นาโนเมตร ทั้งที่มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า สามารถอธิบายได้ว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไป แทนที่จะสามารถเข้าไปอัดแน่นในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดี อาจจะเข้าไปเคลือบผิวรอบๆ อนุภาคของซีเมนต์แทน หรือเกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาค (ศตวรรษ, 2554) เช่น การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต ซึ่งพบว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาด 10 - 15 นาโนเมตร (Li et al., 2003; Li et al., 2004) ผสมลงในมอร์ตาร์ จะพัฒนากำลังได้น้อยกว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 - 50 นาโนเมตร อย่างเห็นได้ชัด (Jo et al., 2007; Sadrmomtazi et al., 2009) สรุปได้ว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ ในกรณีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และปริมาณการแทนซีเมนต์ร้อยละ 4 คือ ขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโนเมตร เนื่องจากพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นเป็นผลร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาค การเลือกใช้ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจะสามารถพัฒนากำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน

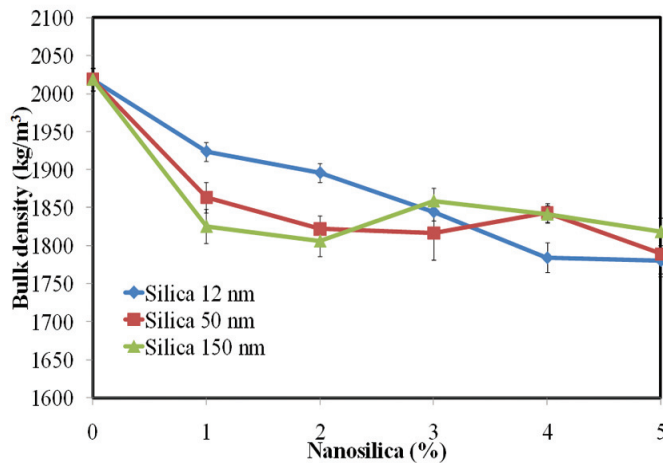


รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา ขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

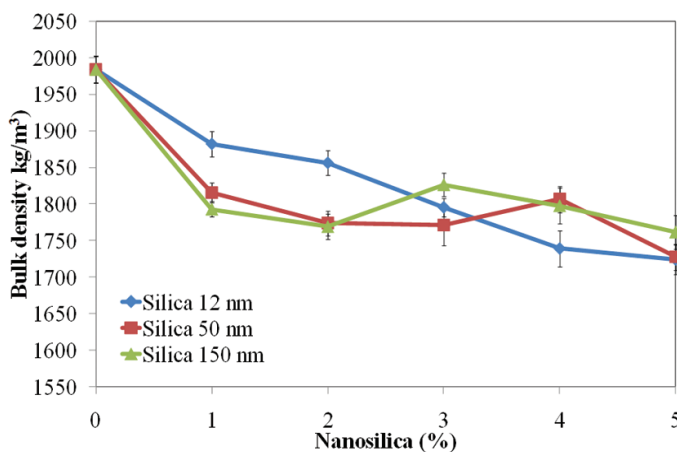
ความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกา

การทดสอบค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4 - 5 นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1,806 และ 1,769 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1,790 และ 1,728 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 11 เปอร์เซ็นต์ และ 13 เปอร์เซ็นต์ และนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร

ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 1,781 และ 1,724 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 12 เปอร์เซ็นต์ และ 13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก (12 นาโนเมตร) จะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนัก สามารถลดค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด เพราะว่าเกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาคทำให้ในเนื้อของเพสต์มีช่องว่างเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ความหนาแน่นลดลง



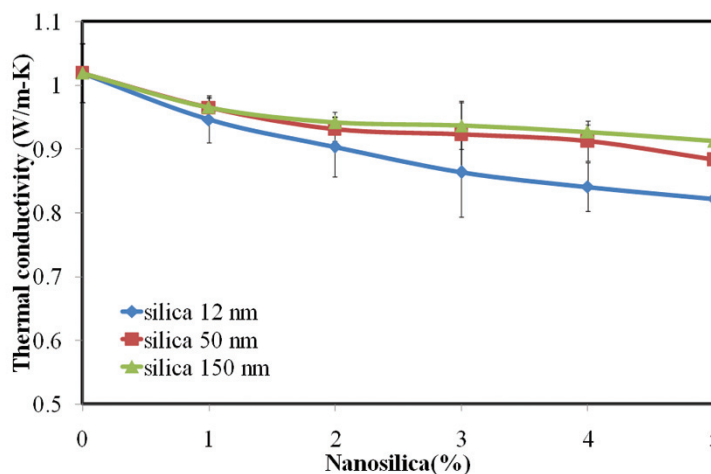
รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร
ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร
ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

การนำความร้อนของซีเมนต์ผสมสนาโนซิลิกา

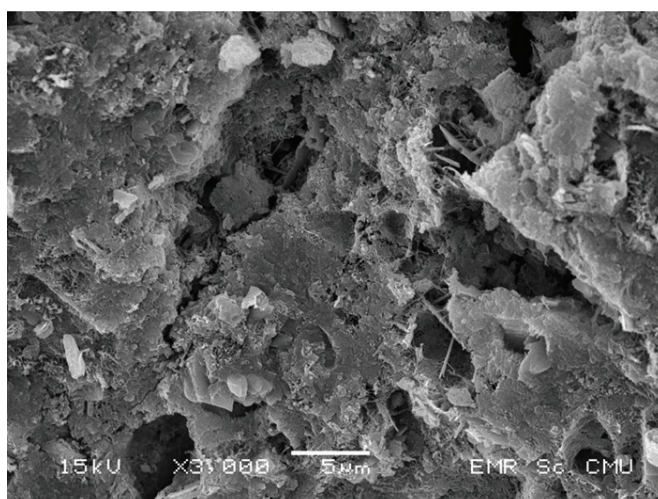
ผลการทดสอบค่าความร้อนซีเมนต์ผสมสนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5 นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจะให้ค่าความร้อน 0.912 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน ซึ่งจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร ที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อน 0.883 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน ซึ่งจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 13 เปอร์เซ็นต์ และนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความร้อน 0.821 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุมถึง 19 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร ที่อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา จะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าขนาดนาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 50 นาโนเมตร เนื่องจากปริมาณช่องว่างของอัตราส่วนผสมนาโนซิลิกา 150 นาโนเมตร มีปริมาณช่องว่างมากกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 50 นาโนเมตร เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด เพราะว่าเกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาคทำให้ในเนื้อของเพสต์มีช่องว่างเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้การนำความร้อนลดลง ดังนั้น อัตราส่วนผสมซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในงานก่อสร้าง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน และป้องกันความร้อนในรูปแบบต่างๆ ได้



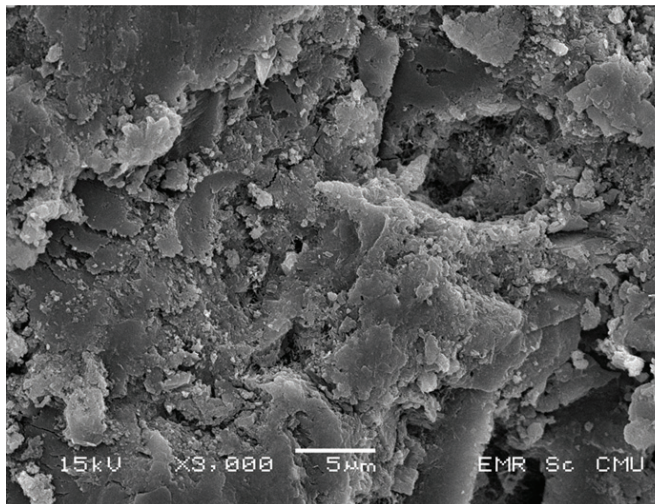
รูปที่ 6 การนำความร้อนเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา

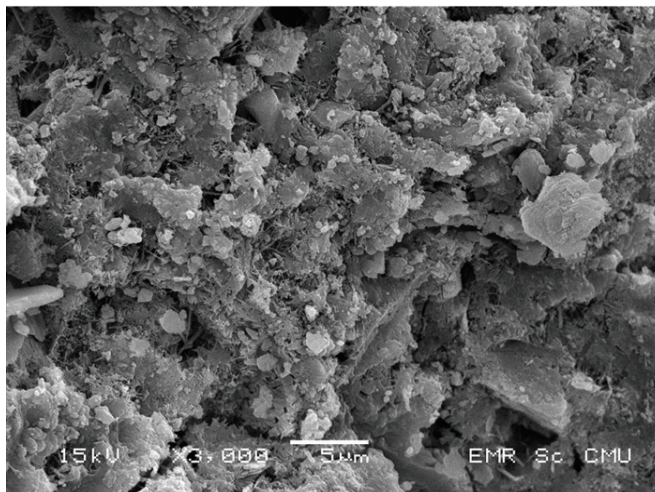
รูปที่ 7-9 เป็นรูปถ่ายขยายของเพสต์ที่อายุ 28 วัน ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาดอนุภาคแตกต่างกันร้อยละ 4 โดยใช้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกามีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จากรูปที่ 7 ซึ่งใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก (12 นาโนเมตร) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ไม่แน่นเต็มที่ มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันน้อย และมีพบว่ามีช่องว่าง เกิดขึ้นจำนวนมากเนื่องจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นไม่เต็มที่ (ศตวรรษ, 2554; Li et al., 2004) เมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ใช้นาโนซิลิกาขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ดังรูปที่ 8-9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแน่นเต็มที่ และแทบไม่มีช่องว่างปรากฏให้เห็น ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือ C - S - H เกิดได้เร็วกว่า (ภายใน 28 วัน) และสามารถเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างได้เกือบทั้งหมด เนื้อของเพสต์มีความแน่นมากกว่าและการถ่ายแรงจะทำได้ดีกว่า และส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้รับมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลร่วมกันระหว่างการอัดแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในขณะที่เพสต์ที่ใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กเกินไป (12 นาโนเมตร) ไม่สามารถเติมเต็มช่องของเพสต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาจเข้าไปยึดเกาะที่ผิวของอนุภาคขนาดใหญ่และขาดการอัดแน่นอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร



รูปที่ 8 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร



รูปที่ 9 ภาพขยายซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12, 50 และ 150 นาโนเมตร ของเพสต์ที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 10 - 12 ค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา มีค่าน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ และซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาจะให้ค่าการนำความร้อนจะสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของวัสดุ โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีช่องว่างในเนื้อของวัสดุมากจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ (Kim, 2003) ซึ่งซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 12 นาโนเมตร มีความหนาแน่นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 50 และ 150 นาโนเมตร และสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา ขนาด

12, 50 และ 150 นาโนเมตร แสดงดังสมการที่ 1 - 3

ซีเมนต์เฟสท์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 91 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 1

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

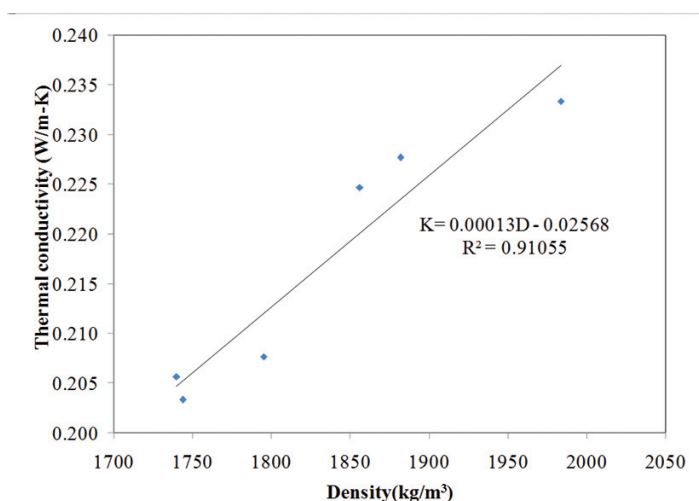
ซีเมนต์เฟสท์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 84 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2

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

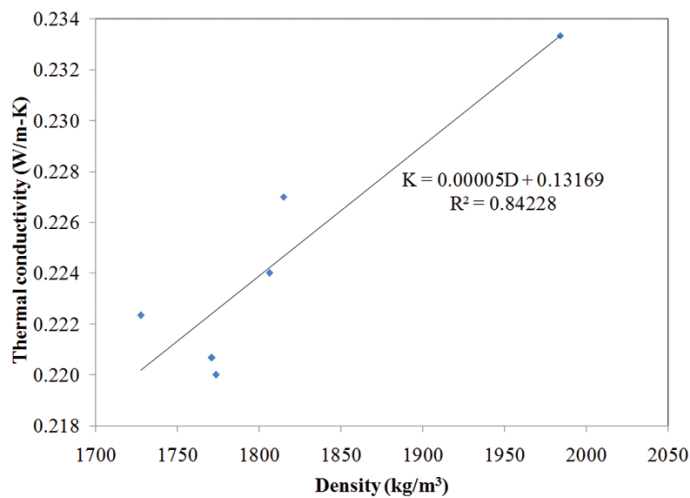
ซีเมนต์เฟสท์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 88 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3

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

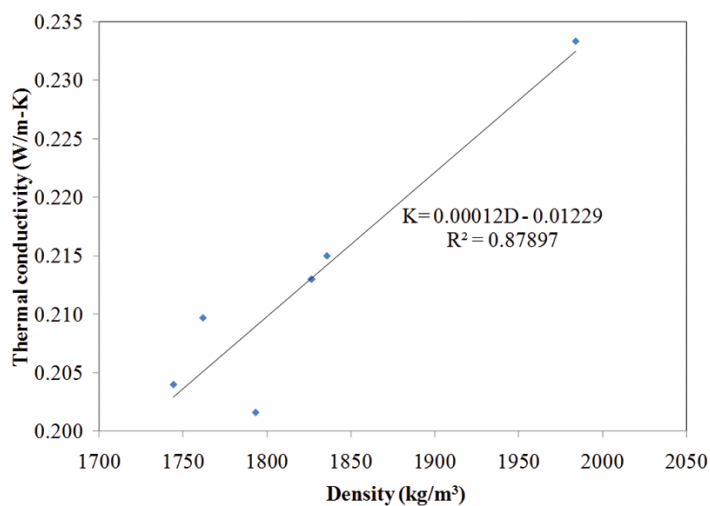
เมื่อ K คือค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน) และ D คือ ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เฟสท์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร

สรุปผลการดำเนินการ

1. การพัฒนากำลังอัดที่ได้จะมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก และเมื่อใช้นาโนซิลิกา ขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่พอเหมาะประสิทธิภาพในการอัดแน่นจะเพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังที่ได้เป็นผลร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาค

2. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 4 ที่ขนาดอนุภาค 50 และ 150 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม และโนซิลิกาที่มีอนุภาค 12 นาโนเมตร อัตราส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม

3. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร จะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักสามารถลดค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 11 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 และ 28 วัน

4. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมปริมาณขนาดของนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่านาโนซิลิกาที่มีขนาด 50 และ 150 นาโนเมตร ปริมาณการแทนที่นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักสามารถลดค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์อยู่ในช่วง 10-19 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 28 วัน

5. ซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาจะให้ค่าการนำความร้อนจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัสดุ โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีช่องว่างในเนื้อของวัสดุมากจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 12 นาโนเมตร มีความหนาแน่นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมนาโนซิลิกา 50 และ 150 นาโนเมตร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และโปรแกรมวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ให้สถานที่ในการทำวิจัยและสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2548). คู่มือชุดความรู้การอนุรักษ์พลังงานสำหรับสำนักงาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กระทรวงพลังงาน
- กาญจนา บุญชัย. (2551). การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฟฟ้ากับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ศตวรรษ ทูทธรพงษ์, ทวีช พูลเงิน และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2554). กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 34. เล่มที่ 3. หน้า 231-244
- ASHRAE. (2009). ASHRAE Handbook Fundamentals S-I Edition. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta Georgia. USA.

- Harun Tanyildizi. (2013). Variance analysis of crack characteristics of structural light weight concrete containing silica fume exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*. Vol. 47. pp. 1154-1159
- Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., and Park J.B. (2007). Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles. *Construction and Building Materials*. Vol. 21. pp. 1351-1355
- Kook-Han Kim, Sang-Eun Jeon, Jin-Keun Kim, Sungchul Yang. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33. pp. 363-371
- Li, H. Xiao, H.G., and Qu, J.P. (2004). A Study on Mechanical and Pressure-sensitive Properties of Cement-Mortar with Nanophase Materials. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. pp. 435-438
- Li, H., Xiao, H.G., and Qu, J.P. (2004). Microstructure of Cement Mortar with Nano Particles. *Composite Part B*. Vol. 35. pp. 185-189
- Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P. (2006). Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement. *Wear*. Vol. 260. pp. 1262-1266
- Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P. (2007). Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-particles for Pavement. *International Journal of Fatigue*. Vol. 29. pp. 1292-1301
- Sadrmomtazi, A., Fasihi, A., Balalaci, F., and Haghi, A.K. (2009). Investigation of Mechanical and Physical Properties of Mortars Containing Silica Fume and Nano-SiO₂. *Proceeding of the Third International Conference of Concrete & Development*. (CD11-001). pp. 1153-1160
- 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. pp. 2489-2491
- Tao Meng, Yachao Yu, Xiaoqian Qian, Shulin Zhan, Kuangliang Qian. (2012). Effect of nano-TiO₂ on the mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*. Vol. 29. pp. 241-245