

ผลกระทบของเถ้าลอยคักขนาดและนาโนซิลิกาต่อกำลังอัดและค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

Effect of Fly Ash Fineness and Nano Silica on Compressive Strengths and Workability of Mortar

ปรีชาวุฒิ ศรีเรือง (Preechawut Sriruang)* ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasirt)**

ดร.วันชัย สะตะ (Dr.Vanchai Sata)*** ดร.พรนภา เกษมศิริ (Dr.Pornnapa Kasemsiri)***

ดร.พัชรพล โพธิ์ศรี (Dr.Pachrapol Posi)¹****

(Received: June 29, 2020; Revised: October 26, 2020; Accepted: October 28, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเถ้าลอยคักขนาด และนาโนซิลิกา ที่มีผลต่อกำลังอัด และค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ โดยมีส่วนผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ ทราย เถ้าลอยคักขนาด และนาโนซิลิกา โดยแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าลอยหยาบ เท่ากับร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 เถ้าลอยละเอียด เท่ากับร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 และนาโนซิลิกาเท่ากับร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังรับแรงอัด และค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดมีค่า 30 – 40 MPa. และค่าการไหลแผ่มีค่า 23.3 – 126.3 % ผลทดสอบชี้ว่าสามารถเพิ่มกำลังอัด ได้สูงสุด โดยการใช้เถ้าลอยหยาบที่ 20 % เถ้าลอยละเอียดที่ 40 % และนาโนซิลิกาที่ 2 % โดยน้ำหนัก ค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยหยาบ และเถ้าลอยละเอียดที่เพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกัน ค่าการไหลแผ่ลดลงตามปริมาณของนาโนซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้น มากกว่านั้นการปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าลอยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มการใช้เถ้าลอยได้ ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่อากาศ เป็นการลดการเกิดสภาวะโลกร้อนได้อย่างยั่งยืนต่อไป

ABSTRACT

This research presents a study of the fly ash and nano silica. Affecting the compressive strength and the workability of mortar. With a mixture of Portland cement, water, sand, fly ash and nano silica. Replacement cement with coarse fly ash of 0, 20, 40 and 60 %, fine fly ash of 0, 20, 40 and 60 % and nano silica of 0, 1, 2 and 3 % by weight. Test results showed that the 28 days compressive strength of mortar of 30 – 46 MPa. And workability of mortar is 23.3 – 126.3 % The results indicated that the compressive strength was maximized by using coarse fly ash at 20%, fine fly ash at 40%, and nano silica at 2% by weight. Workability of mortar tended to increase with the higher content of course and fine fly ash. On the other hand, workability of mortar tends to decrease with the increasing amount of nano silica. Moreover, Improving the properties of fly ash to be finer. It can increase the use of fly ash. Which reduces the emissions of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. This will reduce the occurrence of global warming sustainably.

คำสำคัญ: ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย นาโนซิลิกา กำลังรับแรงอัด

Keywords: Fly ash particle size, Nano-Silica, Compressive strength

¹Corresponding author: mister_wing@hotmail.com

*นักศึกษาคณะศึกษาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

**ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

****ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

บทนำ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถือว่าเป็นวัสดุหลักของงานก่อสร้างในปัจจุบันทำให้มีการผลิตออกมามากมายหลาย ความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นประมาณ 115–180 % ในปี 2020 เมื่อเทียบกับปี 1990 และอาจ เพิ่มขึ้นเป็น 400 % ภายในปี 2050 [1] ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เริ่มตั้งแต่การระเบิดหิน การย่อย การ ลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด อนึ่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทุก ๆ ขั้นตอนจะ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณหนึ่งตัน ในระหว่างกระบวนการเผา และคิดเป็น 7 % ของ คาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ [1] ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในเชิงลบ อีกทั้งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมหาศาล แม้ว่าความโดดเด่นของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีหลายด้าน แต่ขบวนการผลิต และความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำนวนมากส่งผล กระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากจึงทำให้เกิดความไม่ยั่งยืนในอุตสาหกรรม [2]

เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาและลดผลกระทบดังกล่าวจึงได้มีการทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุทดแทน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมากมาย และพบว่าวัสดุพอลิซิลานสามารถทดแทนได้ เช่น เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ เถ้า ลอยจากถ่านหินซับบิทูมินัส เถ้าแกลบ เป็นต้น ซึ่งวัสดุพอลิซิลานเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ และเป็นการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

เถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้หลักของโรงไฟฟ้าถ่านหินได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุพอลิซิลานที่อาจใช้เป็น ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมหรือวัสดุซีเมนต์เติมแต่ง ในทางปฏิบัติปริมาณเถ้าลอยถูกจำกัดไว้ที่ 15% - 20% โดยมวล [3] ปัจจุบันมีวัสดุนาโนออกไซด์ที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ซิลิกาฟุ่ม ซิลิกา โทเทเนียม เป็นต้น [4] นาโนซิลิกาเป็นวัสดุที่มี SiO_2 ในปริมาณที่สูงมากอีกทั้งยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กระดับนาโนเมตร(1-100nm) ส่งผลให้มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา แต่ยังมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับเถ้าลอย [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาวัสดุพอลิซิลานให้มีประสิทธิภาพสูง โดยนำเถ้าลอยหยาบมาคัดขนาดให้มีความละเอียด โดยผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 200 และทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและการทำงานได้ของมอร์ตาร์ที่มี ส่วนผสมของเถ้าลอยหยาบ เถ้าลอยละเอียด และนาโนซิลิกา เพื่อนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และเป็นข้อมูลในการพัฒนา วัสดุพอลิซิลานให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อช่วยในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นการช่วยลดการเกิดสภาวะโลกร้อนได้อย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและการทำงานได้ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิซิลานที่มีความละเอียด แตกต่างกันได้แก่ CFA คือเถ้าลอยหยาบ, FFA คือเถ้าลอยที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และ NSi คือนาโนซิลิกา
2. เพื่อเป็นข้อมูลไว้ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และเป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุพอลิซิลาน ต่อไป

วิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 ใ้ล้ลออกจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.2 นาโนซิลิกา ใช้นาโนซิลิกาจากบริษัท AEROXIDE® ชื่อผลิตภัณฑ์ R 972 Hydrophobic fumed silica ขนาด 16 nm ดังแสดงในภาพที่ 1
- 1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ OPC
- 1.4 ทรายแม่น้ำ
- 1.5 น้ำประปาภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

2. การเตรียมวัสดุ

ใ้ล้ลออกจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำใ้ล้ลมาทำการคัดขนาด เป็น 2 ขนาดด้วยกัน คือ ใ้ล้ลหยาบ (CFA) และขนาดละเอียดโดยทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (FFA) ทรายทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และ ร่อนเป็ยกตะแกรงเบอร์ 200 ล้างเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนสะอาด ในการผสมทรายจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 2.70 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 136 [6] คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพวัสดุนาโนซิลิกา

3. อัตราส่วนผสม

หล่อก่อนตัวอย่างโดยมีอัตราส่วนค้ำของ น้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 2.75 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกแทนที่ด้วย CFA เท่ากับร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย FFA เท่ากับร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย NSi เท่ากับร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก การผสมเริ่มต้นด้วยการนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุพอซโซลานจนเป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมานำมวลรวมละเอียดเติมลงในส่วนผสม ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เติม น้ำทิ้งไว้ 30 วินาที จากนั้นทำการผสมให้เข้ากันหรือประมาณ 5 นาที แล้วทดสอบค่าการไหลแผ่โดยทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C230/C 230M-08 [7] จากนั้นนำไปเทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50

มิลลิเมตร หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมงแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วันเมื่อครบอายุบ่มทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/ C109M-16a [8]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยหยาบ	เถ้าลอยละเอียด	นาโนซิลิกา	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ	3.16	2.52	2.62	-	2.6
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	18.7 μm	23.9 μm	14.0 μm	16 nm	-
หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	1440	1350	1146	50	1752
โมดูลัสความละเอียด	-	-	-	-	2.75
การดูดซึมน้ำ (%)	-	-	-	-	1.09

4. การทดสอบ

4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ตามลำดับ

4.3 ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 / C109M-16a [8]

4.4 ทดสอบค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM 230/C 230M-08 [7]

4.5 ทดสอบขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยวิธี Laser Diffraction Particle size Analyzer

ผลการทดสอบ

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย

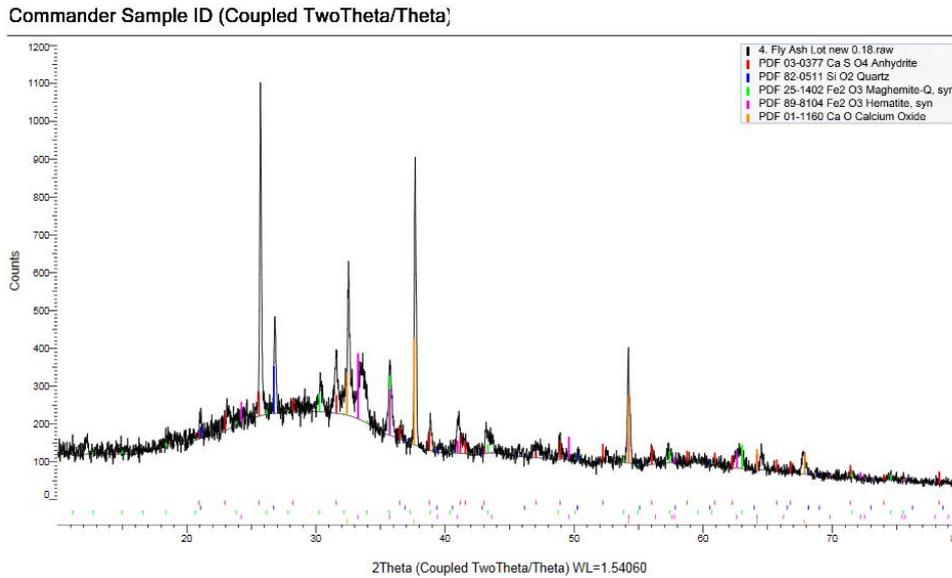
ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย คือ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของเถ้าลอย ดังแสดงในตารางที่ 2 เถ้าลอยประกอบด้วย SiO₂ 45.23%, Al₂O₃ 19.94%, Fe₂O₃ 13.14%, CaO 15.50% และมีค่า LOI 0.87% เมื่อพิจารณาตาม ASTM C618 [9] ถือเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

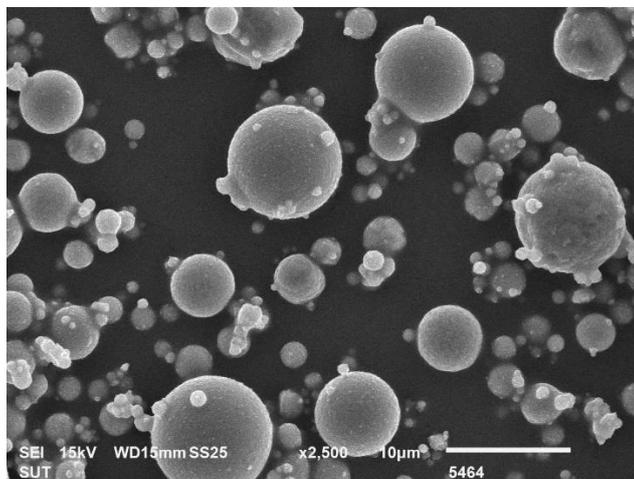
Compound	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	NaO ₂	P ₂ O ₃	TiO ₂	LOI
Fly ash	19.94	13.14	45.23	15.5	2.14	2.02	0.07	0.51	0.81	0.39	0.87
NSi	0.05	0.02	99.9	-	-	-	-	-	-	0.03	-

2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยประกอบด้วย แมกนีไทต์ (Magnetite) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (Magnesioferrite) แดชไฮไครท์ (Dachiardite) และอลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Calcium aluminum oxide) และผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอยด้วยกล้อง Scanning electron microscope (SEM) ในภาพที่ 3 พบว่าเถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมตันผิวเรียบ



ภาพที่ 2 องค์ประกอบทางแร่ของ เถ้าลอย(A-Magnetite: Fe_3O_4 ; C-Magnesioferrite: Fe_2MgO_4 ; D-Dachiardite: $Na_{1.1}K_{.7}Ca_{1.7}Al_{5.2}Si_{18.8}O_{48}(H_2O)_{12.7}$; N-Calcium Aluminum Oxide: $CaAl_2O_4$)



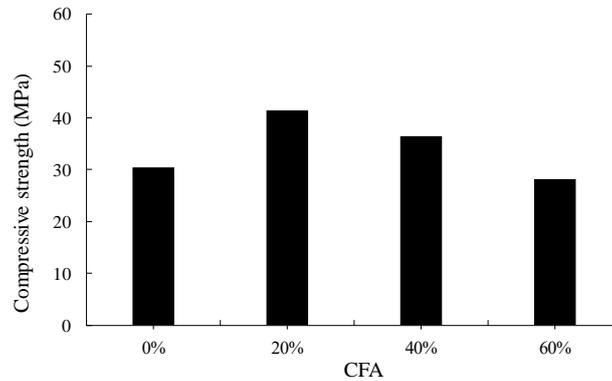
ภาพที่ 3 SEM ของเถ้าลอยแม่เมาะ

3. กำลังรับแรงอัด

3.1 เถ้าลอยหยาบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยหยาบ แสดงในภาพที่ 4 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหยาบเท่ากับร้อยละ 0 – 20 โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อปริมาณการแทนที่มากกว่า 20 % กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง ตามลำดับเนื่องจาก เถ้าลอยหยาบมีออกไซด์ของธาตุซิลิกอน และอะลูมิเนียม ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซ

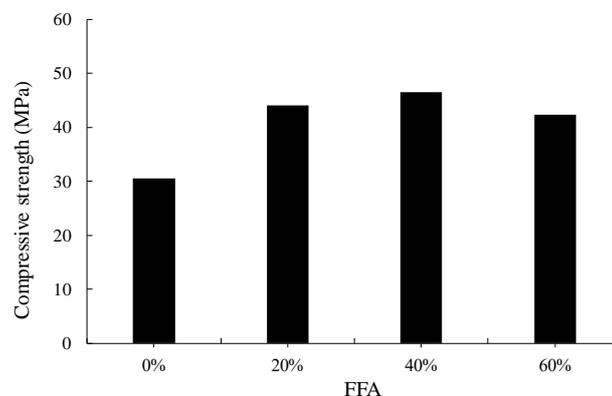
โซลาน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ลดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความแข็งแรงต่ำลงได้ ตลอดจนได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมออกไซด์ไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งจะทำการกำลัรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น [10-11] ดังตัวอย่างกำลัรับแรงอัดที่ 28 วัน ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 20, 40 และ60 % โดยน้ำหนัก เท่ากับ 30.4, 41.5, 36.5 และ28.2 MPa ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ผลกำลัรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยหยาบ

3.2 เถ้าลอยละเอียด

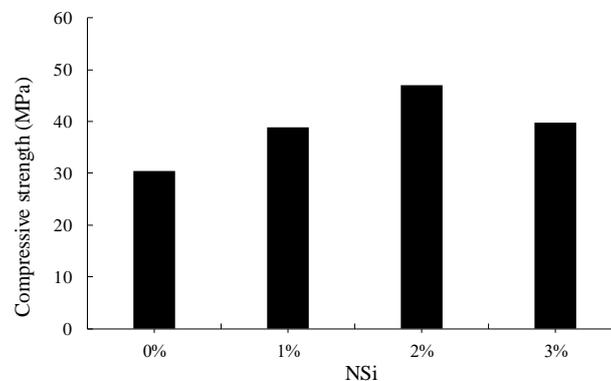
ผลการทดสอบกำลัรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยละเอียด แสดงในภาพที่ 5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยละเอียดเท่ากับ 0 – 40 % โดยน้ำหนัก กำลัรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อปริมาณการแทนที่มากกว่า 40 % กำลัรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเถ้าลอยละเอียดมีพื้นที่ผิวสูง มีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าลอยหยาบส่งผลให้กำลัรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการใช้เถ้าลอยละเอียดช่วยเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กทำให้มอร์ตาร์แน่นขึ้น สิ่งเหล่านี้ช่วยในการพัฒนาความแข็งแรงให้เพิ่มสูงขึ้น [12-15] ดังตัวอย่างกำลัรับแรงอัดที่ 28 วัน ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 20, 40 และ60% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 30.4, 45.1, 46.5 และ42.3 MPa ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ผลกำลัรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยละเอียด

3.3 นาโนซิลิกา

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา แสดงในภาพที่ 6 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0 – 2 % โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่มากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง ดังตัวอย่างกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 30.4, 38.7, 46.7 และ 39.9 MPa ตามลำดับ การแทนที่นาโนซิลิกาในปริมาณเล็กน้อย สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้สูงกว่าตัวอย่างควบคุมด้วยอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรของนาโนซิลิกาทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งสามารถเติมช่องว่างทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้นาโนซิลิกาในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้น การแทนที่นาโนซิลิกามากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง [16-18]



ภาพที่ 6 ผลกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

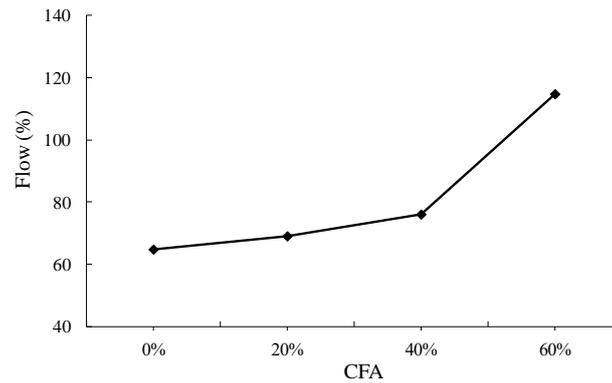
4. ค่าการไหลแผ่

4.1 เถ้าลอยหยาบ

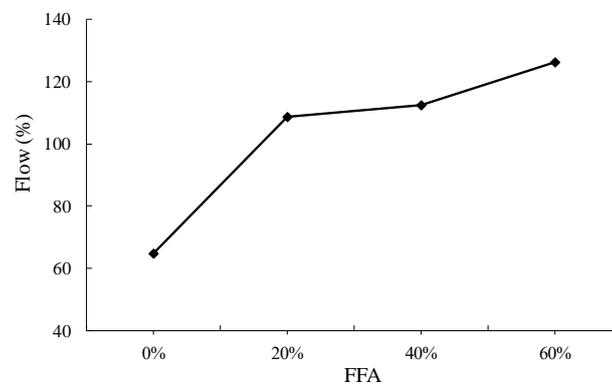
ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยหยาบ แสดงในภาพที่ 7 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหยาบเพิ่มมากขึ้น ค่าการไหลแผ่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมผิวเรียบและความพรุนต่ำของเถ้าลอยหยาบ [10,19] ดังตัวอย่างค่าการไหลแผ่ ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 20, 40 และ 60 % โดยน้ำหนัก เท่ากับ 64, 69, 76 และ 114 % ตามลำดับ

4.2 เถ้าลอยละเอียด

ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยละเอียด แสดงในภาพที่ 8 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยละเอียดเพิ่มมากขึ้น ค่าการไหลแผ่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมและความพรุนต่ำประกอบกับความละเอียดสูงของเถ้าลอยละเอียด อีกทั้งมีการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มีลักษณะเหลี่ยม จึงทำให้มีความเสียดทานน้อยกว่า ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่สูง [10,19-20] ดังตัวอย่างค่าการทำงาน ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 20, 40 และ 60% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 64, 108, 112 และ 126 % ตามลำดับ



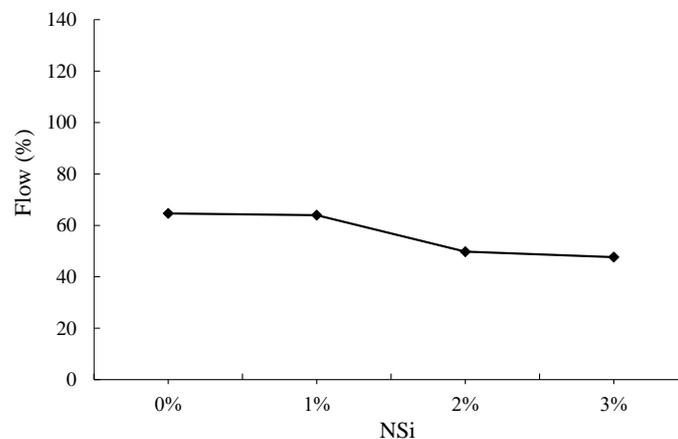
ภาพที่ 7 ผลค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยหยาบ



ภาพที่ 8 ผลค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยละเอียด

4.3 นาโนซิลิกา

ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา แสดงในภาพที่ 9 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ค่าการไหลแผ่จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากทำให้พื้นที่ผิวสูงของนาโนซิลิกาส่งผลให้มีความต้องการน้ำที่มาก [14, 21] ดังตัวอย่างค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 1, 2, 3 และ 4% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 64, 63, 49, 47 และ 23 % ตามลำดับ



ภาพที่ 9 ผลค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

5. ความสัมพันธ์ของ กำลังอัด ค่าการไหลแผ่ และ ขนาดของอนุภาค

ความสัมพันธ์ของ ค่าการไหลแผ่ และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยคัดขนาด และนาโนซิลิกา แสดงในภาพที่ 10 และผลสรุปค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการไหลแผ่ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

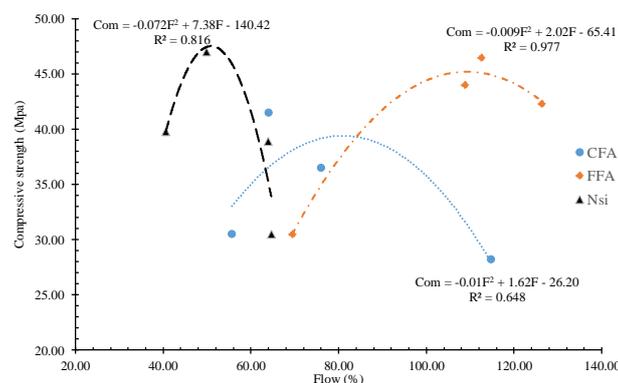
ความสัมพันธ์ของ ค่าการไหลแผ่ และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยคัดขนาด และนาโนซิลิกา แสดงในภาพที่ 10 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยคัดขนาดเพิ่มขึ้น ค่าการไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมผิวเรียบ และเมื่อนาโนซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ค่าการไหลแผ่มีค่าลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวของนาโนซิลิกามีค่ามาก กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ค่าการไหลแผ่ การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยคัดขนาดและนาโนซิลิกาเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นประกอบกับปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้มีไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา ค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมถูกนำเสนอโดยสมการที่ 1, 2 และ 3

จากผลการทดสอบตารางที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัด: เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย และเถ้าลอยหยาบ เถ้าลอยละเอียด และนาโนซิลิกา พบว่า การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงขึ้น ซึ่งเถ้าลอยขนาดละเอียด สามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 53 % เมื่อใช้เถ้าลอยขนาดละเอียดที่ 40 % ขณะที่ เถ้าลอยหยาบสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 37 % เมื่อใช้เถ้าลอยหยาบที่ 20 %

และเมื่อพิจารณาระหว่างเถ้าลอยละเอียด และนาโนซิลิกา พบว่า นาโนซิลิกาให้กำลังรับแรงอัดแรงอัดสูงกว่า เถ้าลอยละเอียดเล็กน้อย แต่การใช้ปริมาณที่น้อยกว่า คือ กำลังรับแรงอัดของนาโนซิลิกา สามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 54 % เมื่อใช้นาโนซิลิกาที่ 2 %

เมื่อพิจารณาค่าการไหลแผ่: เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยและเถ้าลอยหยาบ เถ้าลอยละเอียด และนาโนซิลิกา พบว่า การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงขึ้น ซึ่งเถ้าลอยขนาดละเอียด สามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงสุด 96.9 % เมื่อใช้เถ้าลอยขนาดละเอียดที่ 40 % ขณะที่ เถ้าลอยหยาบสามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงสุด 78.1 % เมื่อใช้เถ้าลอยหยาบที่ 40 %

และเมื่อพิจารณาระหว่างเถ้าลอยละเอียด และนาโนซิลิกา พบว่า ถึงแม้ว่านาโนซิลิกาให้กำลังรับแรงอัดแรงอัดสูงกว่า เถ้าลอยละเอียดเล็กน้อย แต่ว่าการใช้นาโนซิลิกาที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ของ กำลังอัด ค่าการไหลแผ่ และ ขนาดของอนุภาค

$$\text{Nsi; Com}_{\text{Nsi}} = -0.072F^2 + 7.38F - 140.42, R^2 = 0.816 \quad (1)$$

$$\text{CFA; Com}_{\text{CFA}} = -0.01F^2 + 1.62F - 26.20, R^2 = 0.648 \quad (2)$$

$$\text{FFA; Com}_{\text{FFA}} = -0.009F^2 + 2.02F - 65.41, R^2 = 0.977 \quad (3)$$

เมื่อ

CFA คือ เถ้าลอยหยาบ, FFA คือ เถ้าลอยขนาดละเอียด โดยทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200, Com คือ กำลังรับแรงอัด และ F คือ ค่าการไหลผ่าน

ตารางที่ 3 ผลสรุปค่ากำลังรับแรงอัด

ประเภท		ปริมาณ (%)			
		0	20	40	60
FFA	กำลังอัด(MPa)	30.4	45.1	46.5	42.3
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	48.4	53.0	39.1
CFA	กำลังอัด(MPa)	30.4	41.5	36.5	28.2
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	36.5	20.1	-7.2

ประเภท		ปริมาณ (%)			
		0	1	2	3
Nsi	กำลังอัด(MPa)	30.4	38.7	46.7	39.9
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	27.3	53.6	31.3

ตารางที่ 4 ผลสรุปค่าการไหลผ่าน

ประเภท		ปริมาณ (%)			
		0	20	40	60
FFA	ค่าการไหลผ่าน(%)	64	108	122	126
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	68.8	90.6	96.9
CFA	ค่าการไหลผ่าน(%)	64	69	66	114
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	7.8	3.1	78.1

ประเภท		ปริมาณ (%)			
		0	1	2	3
Nsi	ค่าการไหลผ่าน(%)	64	64	63	49
	ร้อยละที่เพิ่มขึ้น	-	0.0	-1.6	-23.4

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาของถ้ำลอยคัดขนาด และนาโนซิลิกา ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด และค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1 เมื่อใช้ถ้ำลอยหยาบ ถ้ำลอยละเอียด และนาโนซิลิกา แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 20, 40 และ 2 % ตามลำดับ ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ถ้าแทนที่สูงกว่านั้นทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

2 ค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณถ้ำลอยหยาบ และถ้ำลอยละเอียด เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลง

3 ความละเอียดของถ้ำลอยที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงขึ้นคือ ถ้ำลอยหยาบสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 37 % เมื่อใช้ที่ 20 % และถ้ำลอยละเอียดสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 53 % เมื่อใช้ที่ 40 % และพบว่า นาโนซิลิกาสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงกว่า ถ้ำลอยละเอียดเล็กน้อย แต่ที่ใช้ปริมาณที่น้อยกว่า คือ นาโนซิลิกาสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงสุด 54 % เมื่อใช้ที่ 2 %

4 เมื่อพิจารณาค่าการไหลแผ่ การใช้ถ้ำลอยที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงขึ้น ถ้ำลอยขนาดละเอียด สามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงสุด 96.9 % เมื่อใช้ที่ 40 % และถ้ำลอยหยาบสามารถเพิ่มค่าการไหลแผ่สูงสุด 78.1 % เมื่อใช้ที่ 40 % ในขณะที่การใช้นาโนซิลิกาที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำหรับทุนอุดหนุนในงานวิจัย จากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Hosan A, Uddin F, Shaikh A. Influence of nano-CaCO₃ addition on the compressive strength and microstructure of high volume slag and high volume slag-fly ash blended pastes. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27: 100929.
2. Celik K, Meral C, Mancio M, Kumar Mehta P, Paulo JM. Monteiro. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 2014; 67: 14-19.
3. Metha PK. High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing (2004)*, pp. 3-14.
4. Jittabut P, Pinitsoontorn S, Chindaprasirt P. The Study of Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Cement Paste Containing Nanosilica. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*. 2014; 7(2): 1-15.
5. Nuaklong P, Sata V, Chindaprasirt P. Use of Ordinary Portland Cement and Nano-Silica in Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *KKU Research Journal*. 2019; 19(2): 53-64.
6. American Society for Testing and Materials, ASTM C136-96a: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *Annual Book of ASTM Standard*, 2001, Vol. 04. 02, 78-82.



7. American Society for Testing and Materials, ASTM C230 / C230M - 08: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard, 2008, 1-6.
8. American Society for Testing and Materials, ASTM C109/C109M-01: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04. 01, 83-88.
9. American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, 2000, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.
10. Buaklee K, Stitmanathum B. Fly ash concrete mix, proceeding of the 1st National Convention on Civil Engineering, 2003, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, 130-108
11. Neville AM. Concrete technology, New York (USA): Longman, 1987.
12. Chindaprasirt P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and Concrete Research. 2004; 34: 1087-1092.
13. Erdoğdu K, Türker P. EFFECTS OF FLY ASH PARTICLE SIZE ON STRENGTH OF PORTLAND CEMENT FLY ASH MORTARS. Cement and Concrete Research. 1998; 28: 1217-1222.
14. Chindaprasirt P, Chotithanorm C, Cao HT, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. Construction and Building Materials. 2007; 21: 356-361.
15. Posi P, Kasemsiri P, Lertnimoolchai S, Chindaprasirt P. EFFECT OF FLY ASH FINENESS ON COMPRESSIVE, FLEXURAL AND SHEAR STRENGTHS OF HIGH STRENGTH-HIGH VOLUME FLY ASH JOINTING MORTAR. International Journal of GEOMATE. 2019; 16(54): 36-41.
16. Jo BW, Kim CH, Tae GH, Park JB. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. Construction and Building Materials. 2007; 21: 1351-1355.
17. Phoo-ngernkham T, Chindaprasirt P, Sata V, Hanjitsuwan S, Hatanaka S. The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Materials & Design. 2014; 55: 58-65.
18. Chindaprasirt P, Silva PD, P, Sagoe-Crentsil K, Hanjitsuwan S. Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. Journal of Materials Science. 2012; 47: 4876-4883.
19. Promsawat P, Chatveera B. Flow Behavior of Self-leveling Mortar Containing Bagasse Ash and Lignite Fly Ash. Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal. 2017; 10: 52-61.
20. Nath P, Sarker PK. Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. Cement and concrete composites. 2015; 55: 205-214.
21. Bernal J, Reyes E, Massana J, Leon N, Sanchez E. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. Construction and building materials. 2018; 160: 196-210.