



ผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและสมบัติการพิมพ์ของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

ภูไผท ชุมพล และ ปิติ สุคนธสุขกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภัทรชัย พงศ์โสภาก*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 7106 8947 อีเมล: Phattharachai.p@rmutp.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.002

รับเมื่อ 9 สิงหาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 31 ตุลาคม 2566 ตอบรับเมื่อ 26 ธันวาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 3 กันยายน 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและสมบัติการพิมพ์ของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ โดยแปรผันปริมาณของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสม ตั้งแต่ 0–4% ของน้ำหนักซีเมนต์ ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบา ได้แก่ ค่าการยุบตัว ระยะเวลาก่อตัว หน่วยน้ำหนักคอนกรีต การซึมผ่านของน้ำ กำลังรับแรงอัด องค์ประกอบเคมีและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงสมบัติด้านของงานพิมพ์ 3 มิติ ได้แก่ ทดสอบการไหลแผ่ ระยะเวลาเริ่มต้นพิมพ์ และกรอบเวลาในการพิมพ์ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตนั้นลดลง ในส่วนของค่ากำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น จนถึงปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์จากนั้นมีแนวโน้มลดลง และ ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นจนถึง 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์จากนั้นมีแนวโน้มกลับมาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลยืนยันการเพิ่มขึ้นของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย XRD และการเติมเต็มในช่องว่างด้วย SEM ในส่วนของงานพิมพ์ 3 มิติ พบว่า ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

คำสำคัญ: นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต คอนกรีตมวลรวมเบา การซึมผ่านของน้ำ กำลังรับแรงอัด งานพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ



Effect of Nano-Calcium Carbonate on Lightweight Concrete Properties and Printability of Mortar of 3D Printing Application

Poopatai Chumpol and Piti Sukontasukkul

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Phattharachai Pongsopha*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 7106 8947, E-mail: Phattharachai.p@rmutp.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.002

Received 9 August 2023 ; Revised 31 October 2023 ; Accepted 26 December 2023; Published online: 3 September 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research investigated the effect of nano-calcium carbonate on lightweight concrete's properties. The amount of nano-calcium carbonate was varied from 0–4% by weight of cement. Experimental series included slump test, setting time, unit weight, water permeability, compressive strength, chemical composition, and microstructure. In terms of the properties of 3D printing, the focus points were flow test and open time. The results show that the unit weight increased with an increase in nano-calcium carbonate content. However, the slump and setting time were found to decrease with an increasing amount of nano-calcium carbonate. In respect of compressive strength, it was found to increase with the increasing calcium carbonate content up to about 2%, and then decreased. The water permeability also decreased with the increasing nano-calcium carbonate content up to about 2%, then increased. The increase of nano-calcium carbonate content by XRD and the void filling by SEM were observed. In terms of 3D printing, the initial printable time and width of the printed filament decreased with an increase in nano-calcium carbonate content.

Keywords: Nano-calcium Carbonate, Lightweight Aggregate Concrete, Water Permeability, Compressive Strength, 3D Cement Printing

Please cite this article as: P. Chumpol, P. Sukontasukkul, and P. Pongsopha, "effect of nano-calcium carbonate on lightweight concrete properties and printability of mortar of 3d printing application," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 2, pp. 1–12, ID. 252-067033 Apr.–Jun. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีต [1]–[10] เกิดการเสื่อมสภาพ คือ การซึมผ่านของความชื้นหรือสารเคมีผ่านทางรูพรุนของคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นน้ำ ความชื้น อากาศ หรือสารเคมีที่ซึมผ่านเข้ามาอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อคอนกรีต รวมถึงก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม จนทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ [11], [12] การใช้วัสดุผสมเพิ่มเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ สารเคมีผสมเพิ่ม ในประเภท Non-reactive Filler เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ก็เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงในส่วนของความพรุน ปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการผลิต ทำให้สามารถสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร เรียกว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำนาโนแคลเซียมมาผสมคอนกรีตพบว่า นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถช่วยในเรื่องของการเร่งกระบวนการไฮเดรชันและเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมเต็มช่องว่าง (Filler) ในคอนกรีต เนื่องจากขนาดของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กกว่าเม็ดปูนและความไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ [13]

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยานยนต์ อาหาร เป็นต้น [14] เนื่องจากความสามารถในการผลิตวัตถุที่มีรูปร่างที่มีลักษณะซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและมีราคาถูกลง ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมาใช้ประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างเพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง และสามารถสร้างผลิตภัณฑ์จำนวนมากได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดพัก เปรียบเทียบกับการใช้แรงงานมนุษย์ที่ประสิทธิภาพในการทำงานเพียง 5–8 ชั่วโมงต่อวัน อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงได้หลากหลาย และช่วยลดข้อจำกัดทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมลงได้ เช่น การพิมพ์ผนังที่มีส่วนเว้าส่วนโค้ง ชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เป็นต้น โดยการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติขึ้นรูปโดยการใช้เทคนิคการผลิตแบบเพิ่มชั้น [15] โดยการขึ้นรูปโครงสร้างจากการฉีดอมอร์ตาร์ผ่านหัวพิมพ์ที่ทำงานร่วมกับแขนกลที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ



รูปที่ 1 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [16]–[18] ได้มีการศึกษาเฉพาะในคอนกรีตทั่วไป งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อศึกษาผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบา เช่น คุณสมบัติเชิงกล การซึมผ่านน้ำ เป็นต้น และการนำนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใช้ร่วมกับอมอร์ตาร์เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านการพิมพ์ของซีเมนต์อมอร์ตาร์ สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ เช่น การทดสอบการไหลของอมอร์ตาร์ การทดสอบกรอบเวลาในการพิมพ์ เป็นต้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [19]
- นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 แสดงดังในรูปที่ 1
- ซิลิกาฟุ่ม (SF) อนุภาคเฉลี่ย 0.03–0.30 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวสัมพัทธ์อยู่ที่ 20,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และมีความถ่วงจำเพาะ 2.20 ตามมาตรฐาน ASTM C1240 [20] มีองค์ประกอบหลักทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1
- มวลรวมละเอียด (FA) ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ขนาด ไม่เกิน 1.19 มิลลิเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.50 มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2
- มวลรวมเบา (LWA) ขนาด 4–10 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3 และดังแสดงในรูปที่ 2
- น้ำสะอาด



รูปที่ 2 มวลรวมเบา

- สารเพิ่มความอุ่มน้ำ ประเภทโพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol) มีความถ่วงจำเพาะ 1.09 มีจุดหลอมเหลว 42–46 องศาเซลเซียส
- สารเคมีผสมเพิ่ม (SP) ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูง Type F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [21]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้ง (SF)

	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	ไอออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)
ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)	38.30	1.17	4.76	0.48	1.05

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

ข้อมูลจำเพาะ	
ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์	2.52
ความถ่วงจำเพาะสภาพพื้ผิวแห้ง	2.50
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.56
ค่าโมดูลัสความละเอียด	2.45
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	1.61

ตารางที่ 3 คุณสมบัติมวลรวมเบา

ข้อมูลจำเพาะ	
หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	732
ร้อยละช่องว่างมวลรวม	72
ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง	1.08
ความถ่วงจำเพาะสภาพพื้ผิวแห้ง	1.25
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	1.3
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	16

2.2 สัดส่วนผสม

กำหนดสัดส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบเป็น 2 ประเภท คือ คอนกรีตมวลเบาและมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

2.2.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา

กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c ratio) คงที่ 0.4 โดยสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1.33 และปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูงคงที่ 1% ของปูนซีเมนต์ และผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NC) ในคอนกรีตมวลเบา อัตราส่วน 0-4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

ประเภทคอนกรีต	สัดส่วนผสม (กก./ลบ.ม)					
	C	W	FA	LWA	NC	SP
LWC	571	228	430	570	-	5.7
1.0% NC	571	228	430	570	5.7	5.7
1.5% NC	571	228	430	570	8.6	5.7
2.0% NC	571	228	430	570	11.4	5.7
2.5% NC	571	228	430	570	14.3	5.7
3.0% NC	571	228	430	570	17.1	5.7
3.5% NC	571	228	430	570	20.0	5.7
4.0% NC	571	228	430	570	22.8	5.7

โดยที่ C หมายถึง ปูนซีเมนต์, FA หมายถึง มวลรวมละเอียด

W หมายถึง น้ำสะอาด, LWA หมายถึง มวลรวมเบา

NC หมายถึง นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

SP หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูง

LWC หมายถึง คอนกรีตมวลเบา

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบา

เตรียมสัดส่วนผสมคอนกรีต ดังตารางที่ 3 นำไปผสมในเครื่องโม่แบบ Pan Mixer โดยใช้เวลาผสมให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน 2–5 นาที จากนั้นนำคอนกรีตสดทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักก่อนเข้าแบบหล่อ โดยหลังจากเทคอนกรีตเข้าแบบแล้วตามการทดสอบต่างๆ จากนั้นทำการตาดด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง แล้วนำไปทำการสั่นบนโต๊ะ (Vibrating Table) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศให้เหลือน้อย

สุด แล้วทำการหุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยแผ่นพลาสติกใสทั้งแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ แล้วทำการหุ้มแผ่นพลาสติกใสทั้งตัวอย่าง จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (27–32 องศาเซลเซียส) จนอายุครบ 28 วัน และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติความร้อนต่อไป

2.2.3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์คงที่ 0.22 และสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.75 และปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูงคงที่ 1% และผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NC) ในมอร์ตาร์ อัตราส่วน 0-4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์

สัดส่วนผสม (กก./ลบ.ม)							
ประเภทมอร์ตาร์	C	W	FA	SF	PEG	SP	NC
OPC	879	213	1171	88	22	97	-
1.0% NC-M	879	213	1171	88	22	97	8.8
2.0% NC-M	879	213	1171	88	22	97	17.6
3.0% NC-M	879	213	1171	88	22	97	26.4

โดยที่ C หมายถึง ปูนซีเมนต์, FA หมายถึง มวลรวมละเอียด
W หมายถึง น้ำสะอาด, SF หมายถึง ซิลิกาฟูม
PEG หมายถึง สารเพิ่มความชุ่มชื้น ประเภทโพลีเอทิลีนไกลคอล
NC หมายถึง ปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต
OPC หมายถึง มอร์ตาร์ปกติ, M หมายถึง มอร์ตาร์
SP หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูง

2.2.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

เตรียมสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ ดังตารางที่ 4 นำไปผสมด้วยไม้แบบ Pan Mixer โดยใช้เวลาผสมให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน 2–5 นาที จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมไปบรรจุใส่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อเตรียมการทดสอบในลำดับต่อไป

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

- การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C143 [22]

- การทดสอบระยะเวลาก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C191 [23]

- การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C138 [24]

- การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS EN 12390-4 [25] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร ที่อายุตัวอย่างทดสอบ 28 วัน

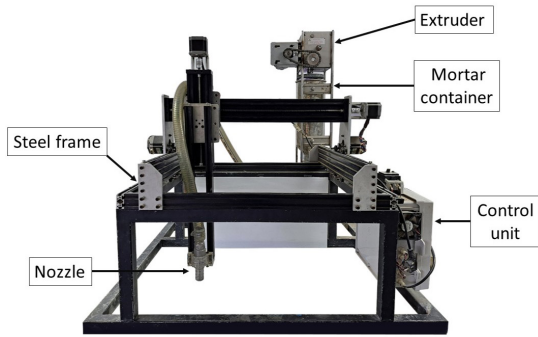
- การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ตามมาตรฐาน DIN 1048 [26] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ติดตั้งที่เครื่องทดสอบเพื่ออัดด้วยแรงดันน้ำ 500 ± 50 กิโลปาสกาล เป็นเวลา 72 ± 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นผึ่งก่อนทดสอบและทำการวัดความลึกการซึมผ่านของน้ำที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต

2.3.2 การตรวจสอบองค์ประกอบเคมีและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง

2.3.2.1 การตรวจสอบองค์ประกอบเคมี เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุการบ่ม 28 วัน บดให้ละเอียดจนกลายเป็นผง นำไปทดสอบโดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab โดยใช้กำลังไฟที่ 40 กิโลวัตต์ 40 มิลลิแอมป์ ความเร็วในการสแกน 2.00 องศาต่อนาที และแกนที่สแกนเริ่มตั้งแต่ θ จนถึง 2θ โดยอยู่ในช่วง 15–60 องศา จากนั้นนำกราฟที่ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป

2.3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างเตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตขนาดเล็กที่มีอายุการบ่มครบ 28 วัน นำไปทดสอบ นำไปใส่เครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA 450 โดยใช้กำลังไฟ 10 และ 20 กิโลวัตต์ และ กำลังขยาย 10,000 เท่า

2.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

- การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C230 [27]

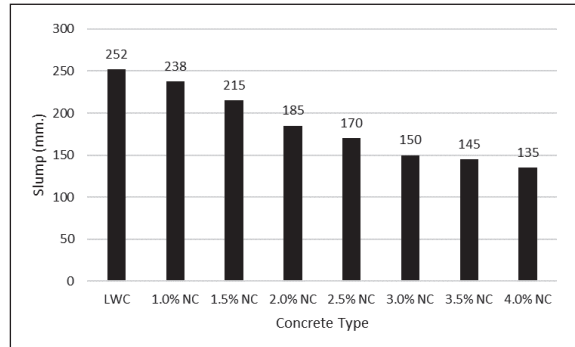
- การทดสอบกรอบเวลาในการพิมพ์

กรอบเวลาการพิมพ์ (Printable Time) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่วัสดุสามารถพิมพ์ออกมาเป็นเส้นได้อย่างต่อเนื่อง มีขนาดของเส้นพิมพ์คงที่และสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเสียรูปและไม่เกิดข้อบกพร่องในการพิมพ์ (กำหนดเป็นระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์) ไปจนถึงช่วงเวลาที่สุดที่ไม่สามารถพิมพ์ออกมาได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ข้างต้น (กำหนดเป็นระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์) ทำการทดสอบโดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในรูปที่ 3 พิมพ์เส้นตัวอย่างเป็นเส้นตรงยาว 30 เซนติเมตร หัวพิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พิมพ์ทำมุมตั้งฉากกับพื้น กำหนดให้หัวพิมพ์อยู่สูงจากพื้น 15 มิลลิเมตร อัตราการป้อนวัสดุประมาณ 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการพิมพ์เส้นตัวอย่างทุก 10 นาที บันทึกเวลาในการพิมพ์แต่ละรอบกับเวลาที่ส่วนผสมเริ่มสัมผัสกับน้ำ ทำการวัดความสูงและความกว้างของเส้นตัวอย่างในตำแหน่ง หัวกลาง และท้ายของเส้นตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณหาความกว้างเฉลี่ยของเส้นตัวอย่างเทียบกับเวลา เพื่อระบุความกว้างและเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

3.1.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ 4 ค่าการยุบของคอนกรีต

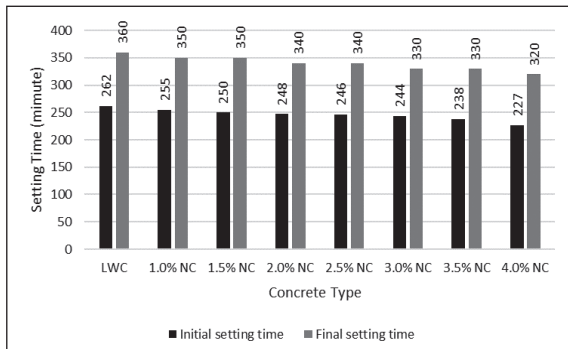
ผลการทดสอบพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมวลรวมเบา (LWC) มีค่า 252 มิลลิเมตร หลังจากที่เพิ่มนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NC) ปริมาณ 1% 1.5% 2% 2.5% 3% 3.5% และ 4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 238 215 185 170 150 145 และ 135 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลงตามปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสูง จึงทำให้ดูดซับน้ำภายในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีความชื้นเหลวลดลง [28]

3.1.2 ระยะเวลาก่อตัว

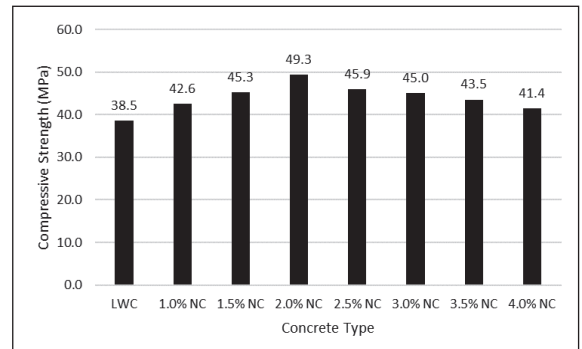
ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย มีแนวโน้มลดลง สังเกตได้จากคอนกรีต LWC มีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่ 262 นาที และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายที่ 360 นาที และเมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจนถึง 4% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นลดลงเหลือ 227 นาที และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายลดลงเหลือ 320 นาที เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากและการดูดซับน้ำที่พื้นผิวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าการยุบตัว [29]

3.1.3 ค่าหน่วยน้ำหนัก

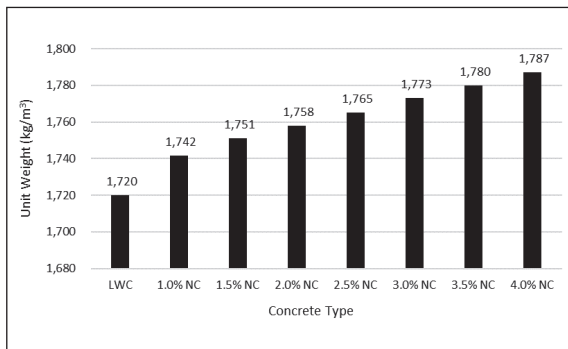
ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีต LWC มีค่าหน่วยน้ำหนัก



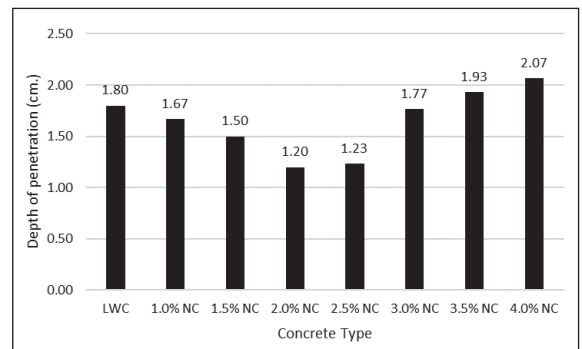
รูปที่ 5 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้าย



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 6 ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต



รูปที่ 8 ความลึกการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

1,720 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อปริมาณ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 1,742 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (1.0% NC) เป็น 1,787 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (4.0% NC) ดังแสดงดังรูปที่ 6

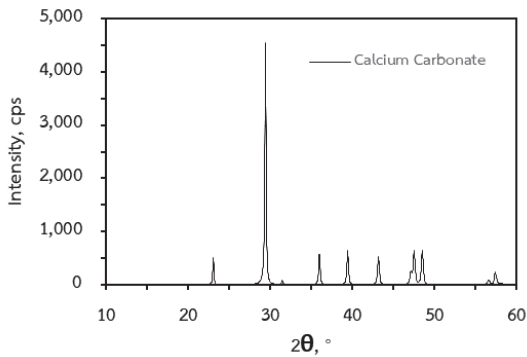
3.1.4 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต LWC มีค่า 38.5 เมกะปาสคาล และเมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 49.3 เมกะปาสคาล (2.0% NC) โดยเพิ่มขึ้นมาจากคอนกรีต LWC ประมาณ 22% เนื่องมาจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดเล็กมีความสามารถเป็นวัสดุผสมเพิ่ม สามารถเข้าไปเติมเต็มหรือลดขนาดของช่องว่างภายในคอนกรีตลงได้ แต่เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 2% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

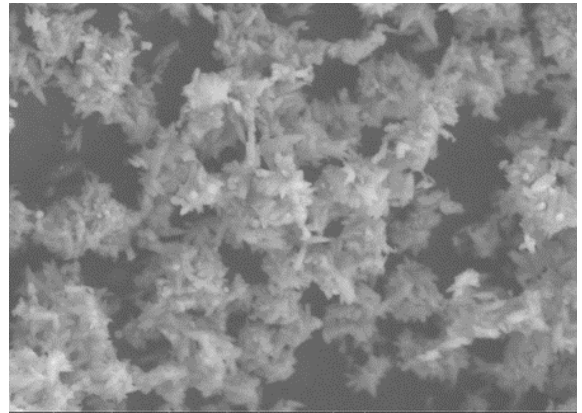
พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไปส่งผลให้มีการจับตัวกันของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตเปราะมากขึ้นนำไปสู่การลดลงของกำลังรับแรงอัด [30] ดังแสดงในรูปที่ 7

3.1.5 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

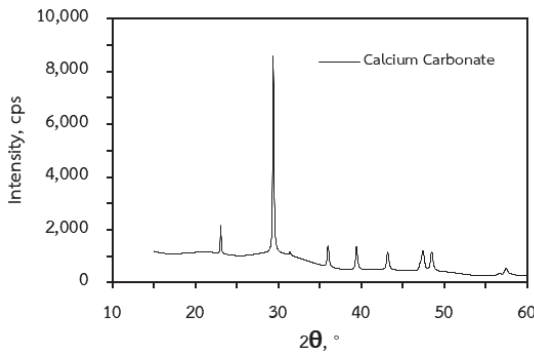
ค่าความลึกการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต LWC มีค่า 1.80 เซนติเมตร เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความลึกการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยลดลงต่ำสุด มีค่าความลึกการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 1.20 เซนติเมตร (2.0% NC) ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องมาจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุผสมเพิ่มสามารถลดขนาดของช่องว่างภายในคอนกรีต แต่เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 2% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่า ค่าความลึกการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณนาโนแคลเซียม



รูปที่ 9 ผลการทดสอบ XRD ของตัวอย่างที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 10 ผลการทดสอบ XRD ของตัวอย่างที่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



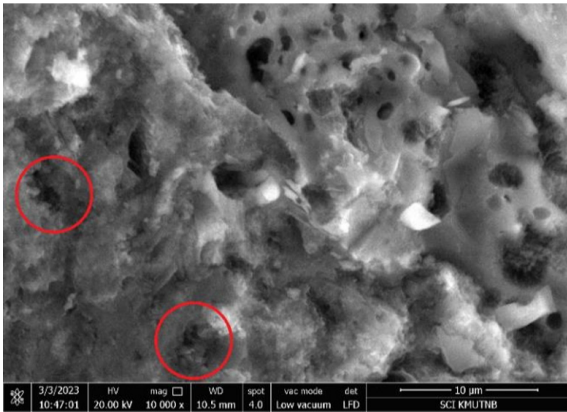
รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา (OPC)

คาร์บอเนตที่มากเกินไปส่งผลให้ จับตัวกันจึงนำไปสู่การเกิดช่องว่างภายในคอนกรีต

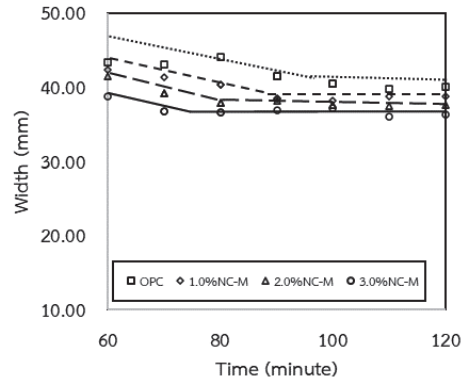
3.1.6 องค์ประกอบเคมีและโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างด้วย SEM และ XRD

จากรูปที่ 9 และ 10 ได้แสดงให้เห็นความเข้มของแคลเซียมคาร์บอเนตในแต่ละมุมแสวนของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมเบา ซึ่งสรุปได้ว่า มืองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้ม (Intensity) ที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาผสม NC ที่ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต LWC ซึ่งวิเคราะห์ได้จากความสูงของจุดยอดกราฟที่มุม 29.4 องศา จากความเข้มที่ 4,550 ถึง 8,531 จำนวนต่อวินาที (cps)

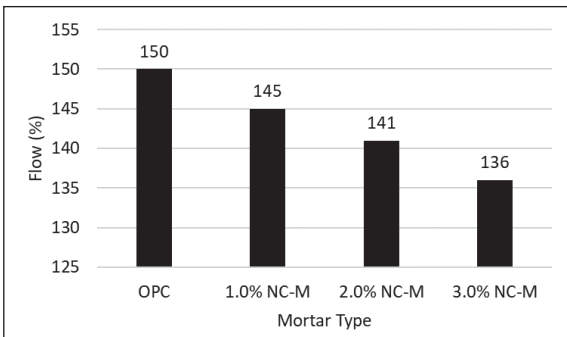
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผลการทดสอบ แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่จับตัวกันเป็นกลุ่มเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 11 และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต LWC ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยมีช่องว่างอยู่ในเนื้ออมอร์ตาร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาผสม NC ที่ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สังเกตได้ว่าขนาดของช่องว่างมีขนาดเล็กลง เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดเล็กมากและเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ จึงมีหน้าที่เติมเต็มช่องว่างที่มีในเนื้อคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 13



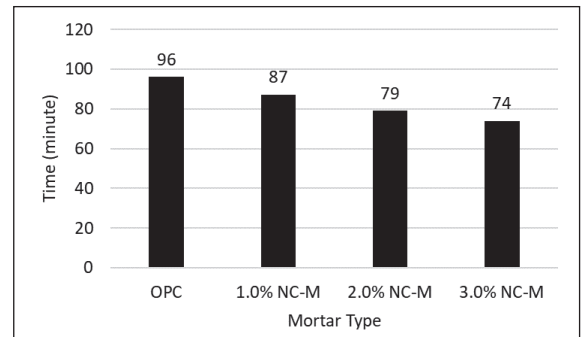
รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาผสม NC



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเส้นพิมพ์และเวลา



รูปที่ 14 ค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 16 ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

3.2.1 การไหลแผ่

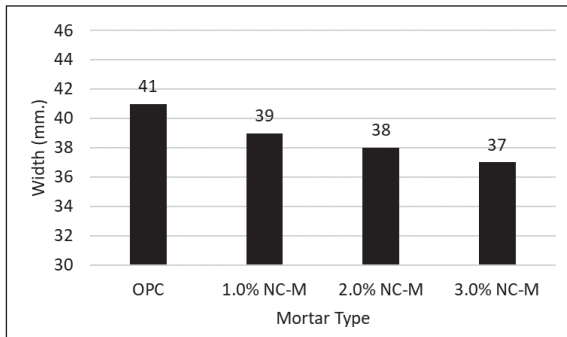
ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติพบว่า มอร์ตาร์ล้วน (OPC) มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 150% เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง โดยลดลงจาก 145% (1.0%NC-M) เป็น 136 (3.0%NC-M) ดังแสดงในรูปที่ 14 เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตดูดซับน้ำในกายคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตมีความชื้นเหลวลดลง สอดคล้องผลค่าการยุบตัวซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ต้องการการไหลแผ่ไม่น้อยกว่า 115%

3.2.2 กรอบระยะเวลาการพิมพ์

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความกว้างของเส้นพิมพ์มาพล็อตเทียบ

กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 15 สามารถแบ่งแนวโน้มออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อเวลาผ่านไปความกว้างของเส้นพิมพ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สองคือช่วงที่ค่าความกว้างของเส้นพิมพ์เริ่มคงที่ จุดที่เส้นกราฟทั้ง 2 ช่วงตัดกันเป็นเรียกว่า ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 16 แสดงระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ของแต่ละสัดส่วนผสมพบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ลดลง

ผลการวิเคราะห์ความกว้างที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์แต่ละสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 17 พบว่า มอร์ตาร์ล้วน (OPC) มีความกว้างของเส้นพิมพ์เท่ากับ 41 มิลลิเมตร เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง โดยลดลงจาก 39 มิลลิเมตร (1.0% NC-M) เป็น 37 มิลลิเมตร (3.0% NC-M) เนื่องจากนาโน



รูปที่ 17 ความกว้างที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ไม่ทำปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำลดลง การไหลแผ่ลดลง อนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถรองรับการทรุดตัวของเส้นพิมพ์ได้ดี จึงทำให้ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง

ในส่วนของระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์พบว่า ทุกส่วนผสมสามารถทำการพิมพ์ต่อไปได้ไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อระยะเวลาในการทำงานแล้ว จึงทำการยุติการทดสอบเพื่อป้องกันการแข็งตัวของมอร์ตาร์ภายในระบบลำเลียงวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทุกสัดส่วนผสมมีกรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง เหตุผลที่มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการทำงานได้นานนั้น มาจากการใส่สารลดน้ำประเภท G [8] เนื่องจากสารลดน้ำชนิดนี้มีคุณสมบัติช่วยลดการใช้ปริมาณสูงและหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต

4. อภิปรายผลและสรุป

ในส่วนของคอนกรีตมวลเบาผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นและสูงสุดเท่ากับ 49.3 เมกะปาสกาล (2.0% NC) และเมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มากกว่า 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่ายุบตัว

ของคอนกรีตและระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากและการดูดซับน้ำที่พื้นผิวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้น

ค่าความลึกการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นโดยลดลงต่ำสุด มีค่าความลึกการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 1.20 เซนติเมตร (2.0% NC) เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุผสมเพิ่มสามารถลดขนาดของช่องว่างภายในคอนกรีต แต่เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มากกว่า 2% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่าค่าความลึกการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไปส่งผลให้ จับตัวกันจึงนำไปสู่การเกิดช่องว่างภายในคอนกรีต

ในส่วนของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ซีเมนต์มอร์ตาร์ 3 มิติ เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ทั้งค่าการไหลแผ่ กรอบระยะเวลาการพิมพ์ ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์มีแนวโน้มลดลงและเมื่อถึงระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์พบว่า ทุกส่วนผสมสามารถทำการพิมพ์ต่อไปได้ไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อระยะเวลาในการทำงาน แสดงให้เห็นว่าทุกสัดส่วนผสมมีกรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง

การพัฒนาต่อยอดงานวิจัยสำหรับการศึกษาในอนาคต

- ศึกษาผลกระทบของจำนวนชั้นของการพิมพ์และการยุบตัวของพิมพ์ในแต่ละชั้น
- ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ได้จากการพิมพ์ เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด เป็นต้น
- ศึกษาผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์คอนกรีต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมทุนพัฒนานักวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา งบประมาณปี 2566 สัญญาเลขที่ N41A660230 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการจัดเตรียมตัวอย่างและเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sutthiphasilp, P. Sukontasukkul, and W. Chalodhorn, "Study on thermal properties of plastering mortar mixed with paraffin and polyethylene glycol type phase change material," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 2, pp. 341–352, 2018 (in Thai).
- [2] J. Sanguansin, P. Pongsopha, P. Sukontasukkul, and K. Tontiwattanukul, "Preliminary study on effects of viscoelastic polymer on damping and sound properties of concrete panels," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 257–265, Apr.–Jun. 2021 (in Thai).
- [3] B. Warinlai and P. Krammart, "Slump, compressive strength, chloride penetration resistance and carbonation of concrete with partial replacement of cement by fly ash, ground bottom ash, limestone powder," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 438–449, 2021 (in Thai).
- [4] D. Intarabut, B. Maho, P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, T. Phoo-ngernkham, and S. Hanjitsuwan, "Preliminary study on high performance Alkali-activated material from fly ash, silica fume and ground granulated Blast-furnace slag," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–13, 2023 (in Thai).
- [5] S. Kongtun, P. Sukontasukkul, and W. Jiradamkerng, "Mechanical properties and material cost of concrete reinforced with steel fibers with different tensile strengths," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 700–710, 2021 (in Thai).
- [6] S. Jamnam, B. Maho, P. Sukontasukkul, K. Fujikake, and N. Banthia, "Energy absorption and failure patterns of multilayer bulletproof concrete panel made of steel fiber, styrofoam and Para-rubber," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 515–524, 2018 (in Thai).
- [7] B. Maho, A. Techaphatthanakon, S. Jamnam, and P. Sukontasukkul, "Class 3A bullet resistance of multilayer bulletproof panels made of fibre reinforced concrete and rubber sheet," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 427–437, 2021 (in Thai).
- [8] A. Kijjanon and T. Sumranwanich, "Effect of recycled concrete aggregates from ready-mixed concrete plant on chloride penetration resistance and compressive strength of concrete," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 87–96, 2022 (in Thai).
- [9] L. Y. Ponghsampate, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride penetration and steel corrosion of concrete containing palm oil fuel ash under 5-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 23–36, 2018 (in Thai).
- [10] S. Haruehansapong, A. Neramitkornburee, and W. Kroehong, "Workability, mechanical properties and sulfate resistance of self compacting concrete with ternary blended cementitious materials," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 685–699, 2021 (in Thai).
- [11] H. Al-khaiat and N. Haque, "Strength and durability of lightweight and normal weight concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, pp. 231–5, 1999.
- [12] D. Hughes, L. Hodgkinson, D. Cullen, and H. Seaton, "Adjusted density concrete," *Concrete Engineering International*, vol. 3, pp. 54–58, 1999.
- [13] M. Cao, X. Ming, K. He, L. Li, and S. Shen, "Effect



- of Macro-, Micro- and Nano-Calcium Carbonate on Properties of Cementitious Composites—A Review,” *Materials*, vol. 12, pp. 781, 2019.
- [14] K.V. Wong, and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, pp. 1–10, 2012.
- [15] R. Buswell, R. Soar, A. Gibb, and A. Thorpe, “Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction,” *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 224–231, 2007.
- [16] Y. Che, and H. Yang, “Hydration products, pore structure, and compressive strength of extrusion-based 3D printed cement pastes containing nano calcium carbonate,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, pp. e01590, 2022.
- [17] D. Shen, J.Kang, H. Shao, C. Liu, M. Li, and X. Chen, “Cracking failure behavior of high strength concrete containing nano-CaCO₃ at early age,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 139, pp. 104996, 2023.
- [18] S. Rami & Hamad, and A. Hesham, “Mechanical properties of lightweight green concrete including nano calcium carbonate,” *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 8, 2023.
- [19] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150-20, 2020.
- [20] *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures West Conshohocken*, ASTM C1240-20, 2020.
- [21] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C494/C494M-19, 2019.
- [22] *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, ASTM C143/C143M-10a, 2010.
- [23] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-21, 2021.
- [24] *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM C 138-17, 2017.
- [25] *British Standards Document: Testing hardened concrete - Compressive strength - Specification for testing machines*, BS EN 12390-4, 2000.
- [26] *Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Germany, DIN 1048-5*, 2005.
- [27] *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*, ASTM C230/C230 M-20, 2020.
- [28] M. Berra, F. Carassiti, T. Mangialardi, A. E. Paolini, and M. Sebastiani, “Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 666–675, 2012.
- [29] L. Poudyal, K. Adhikari, and M. Won, “Mechanical and durability properties of portland limestone cement (PLC) incorporated with nano calcium carbonate (CaCO₃),” *Materials*, vol. 14, pp. 905, 2021.
- [30] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, and W. L. Repette, “Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2487–2489, 2009.