ผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและสมบัติการพิมพ์ของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

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

ภูไผท ชุมพล[1,*] ภัทรชัย พงศ์โสภา[2] และ ปิติ สุคนธสุขกุล[3]

[1,3] ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพ
**Corresponding author; E-mail address: s6401081813011@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและสมบัติการพิมพ์ของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ โดยแปรผันปริมาณของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสม ตั้งแต่ 0 – 4% ของน้ำหนักซีเมนต์ ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบา ได้แก่ ค่าการยุบตัว ระยะเวลาก่อตัว หน่วยน้ำหนักคอนกรีต การซึมผ่านของน้ำ กำลังรับแรงอัดและดัด องค์ประกอบเคมีและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงสมบัติด้านของงานพิมพ์ 3 มิติ ได้แก่ ทดสอบการไหลแผ่ ระยะเวลาเริ่มต้นพิมพ์ และกรอบเวลาในการพิมพ์ ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักและค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตนั้นลดลง ในส่วนของค่ากำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น จนถึงปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์ จากนั้นมีแนวโน้มลดลง และ ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นจนถึง 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์จากนั้นมีแนวโน้มกลับมาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลยืนยันการเพิ่มขึ้นของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย XRD และ การเติมเต็มในช่องว่างด้วย SEM ในส่วนของงานพิมพ์ 3 มิติ พบว่า ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

คำสำคัญ: นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต, คอนกรีตมวลรวมเบา, การซึมผ่านของน้ำ, กำลังรับแรงอัด, งานพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ

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, flexural strength, chemical composition, and microstructure. In terms of 3D printing tested by flow test and open time. The results show that the unit weight and flexural strength 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 the case of compressive strength, it increased 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 2.5%, then increased. It was confirmed that 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 the increasing nano-calcium carbonate content.

Keywords: nano-calcium carbonate, lightweight aggregate concrete, water permeability, compressive strength, 3D cement printing

1. บทนำ

สาเหตุส่วนหนึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพคือ การซึมผ่านของความชื้นหรือสารเคมีผ่านทางรูพรุนของคอนกรีต ซึ่งน้ำ ความชื้น อากาศ หรือสารเคมีที่ซึมผ่านเข้ามาอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อคอนกรีต รวมถึงก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม จนทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ [1,2]

การใช้วัสดุผสมเพิ่มเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ สารเคมีผสมเพิ่ม ในประเภท Non-reactive filler เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ก็เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงในส่วนของความพรุน

ปัจจุบัน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการผลิต ทำให้สามารถสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร เรียกว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำนาโนแคลเซียมมาผสมคอนกรีตพบว่า นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถช่วยในเรื่องของการเร่งกระบวนการไฮเดรชั่นและเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมเต็มช่องว่าง (Filler) ในคอนกรีต เนื่องจากขนาดของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กกว่าเม็ดปูนและความไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ [3]

สำหรับงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ 1) การศึกษาผลกระทบของการใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบา โดยทำการแปรผันปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 0 – 4% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบาทั้งสภาวะเหลวและแข็งตัวแล้ว เช่น การทดสอบการยุบตัว การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว การทดสอบกำลังรับแรงอัดและดัด การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต รวมถึงองค์ประกอบเคมีและโครงสร้างภายใน โดยอายุของตัวอย่างทุกการทดสอบคือ 28 วัน และ 2) การศึกษาผลกระทบของการใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติด้านการพิมพ์ของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยทำการแปรผันปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 0-3% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จากนั้นนำไปทดสอบในส่วนที่เกี่ยวข้องความสามารถในการพิมพ์ในงานพิมพ์ 3 มิติ เช่น การไหลแผ่ ระยะเวลาเริ่มต้นพิมพ์ และ กรอบเวลาในการพิมพ์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

2.1.2 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano Calcium Carbonate)

นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 แสดงดังในรูปที่ 1

รูปที่ 1 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.1.3 ซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF)

ซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดอยู่ที่ 0.03-0.30 μm พื้นที่ผิวสัมพัทธ์อยู่ที่ 20,000 m^2/kg และมีความถ่วงจำเพาะ 2.20 มีองค์ประกอบหลักทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูม (SF) ที่ใช้ในการทดสอบ

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3
Silica Fume	38.30	1.17	4.76	0.48	1.05

2.1.4 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ขนาดไม่เกิน 1.19 มิลลิเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.50

2.1.5 มวลรวมหยาบ

มวลรวมเบา ขนาด 4-10 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2 ลักษณะมวลรวมหยาบแสดงดังในรูปที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมเบา

Unit Weight (kg/m^3)	Void	Bulk Specific Gravity		Apparent Specific Gravity	Absorption
		SSD	Oven Dry		
732	72%	1.25	1.08	1.3	16.60%

รูปที่ 2 มวลรวมเบา

2.1.6 สารเพิ่มความอุ้มน้ำ (Water retention)

การวิจัยนี้ใช้สารเพิ่มความอุ้มน้ำ ประเภทโพลีเอธิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) มีความถ่วงจำเพาะ 1.09 มีจุดหลอมเหลว 42 – 46 องศาเซลเซียส

2.1.7 สารลดน้ำ (Water Reducers)

การวิจัยนี้ใช้สารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) Type F ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการใช้น้ำ 12 – 30%

2.2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

2.2.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวมเบา

สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมเบาที่ใช้ในการวิจัยนี้ กำหนดให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ 0.4 โดยใช้มวลรวมหยาบเป็นมวลรวมเบาประเภท Expended clay aggregate และใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตผสมในคอนกรีตมวลเบานี้โดยแบ่งเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมเบา

ส่วนผสม (kg/m^3)	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	มวลรวมเบา	NCC	สารลดน้ำ
OPC	571	228	430	570	-	5.71
1%					5.7	
1.5%					8.6	
2%					11.4	
2.5%					14.3	
3%					17.1	
3.5%					20.0	
4%					22.8	

** NCC หมายถึง นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ

สัดส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติที่ใช้ในการวิจัยนี้ กำหนดให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ 0.22 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดที่ ¾ โดยน้ำหนัก และใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์นี้โดยแบ่งเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมเบา

ส่วนผสม (kg/m^3)	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	ซิลิกาฟูม	Polyethylene Glycol	สารลดน้ำ	NCC
NC0%	879	213	1171	88	22	97	-
NC1%							8.8
NC2%							17.6
NC3%							26.4

** NCC หมายถึง นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เตรียมสัดส่วนผสมคอนกรีต ดังตารางที่ 3 นำไปผสมในเครื่องโม่แบบ Pan mixer โดยผสมจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน จากนั้นนำคอนกรีตเข้าแบบหล่อตามประเภทการทดสอบ โดยทำการเทลงแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แล้วตำด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง จากนั้นนำไปทำการสั่นบนโต๊ะสั่น (Vibrating Table) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศให้เหลือน้อยที่สุด แล้วทำการหุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยแผ่นพลาสติกใสทั้งแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจึงแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ แล้วทำการบ่มตัวอย่างในอากาศที่อุณหภูมิห้อง จนตัวอย่างทดสอบอายุครบ 28 วัน

2.3.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C143 (Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete) [4] ทำการทดสอบโดยนำคอนกรีตเหลวที่ผสมตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 3 เทลงใส่โมลด์ทรงกรวยตัด โดยแบ่งใส่ออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นตำด้วยเหล็กตำ 25 ครั้งเพื่อให้คอนกรีตเหลวมีการกระจายตัวของส่วนผสมอย่างสม่ำเสมอและไม่แยกชั้น หลังจากนั้นยกโมลด์ขึ้นอย่างช้าๆ แล้ววัดระยะการยุบของคอนกรีตเหลวโดยทำการวัดความสูงเทียบจากผิวบนสุดของโมด์ที่วางข้างๆตัวอย่าง กับผิวบนสุดของตัวอย่าง

2.3.3 การทดสอบระยะเวลาก่อตัว

ตามมาตรฐาน ASTM C191 (Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle) [5] โดยใช้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร นำคอนกรีตเหลวในตารางที่ 3 ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาเทใส่โมลด์ทรงกระบอกสำหรับการทดสอบแล้วปาดผิวให้เรียบเสมอกับขอบโมลด์ จากนั้นนำโมลด์ไปวางไว้ใต้เข็มทดสอบไวแคต เริ่มทดสอบโดยให้เข็มทดสอบแตะกับผิวของตัวอย่าง จากนั้นทำการปล่อยเข็มทดสอบให้จมลงไปในตัวอย่างเป็นเวลา 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าระยะจมของเข็มทดสอบ เมื่ออ่านค่าเสร็จจึงทำการดึงเข็มไวแคตออกจากตัวอย่าง ทำการทดสอบซ้ำทุกๆ 10 นาที จนอ่านค่าได้ 25 มิลลิเมตร จึงจะได้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และเมื่อเข็มไวแคตไม่สามารถจมลงไปในตัวอย่างได้ จึงจะได้ระยะเวลาก่อตัวสิ้นสุด โดยที่การปล่อยเข็มทดสอบแต่ละครั้ง จะต้องมีระยะห่างจากรอยเข็มเก่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และมีระยะห่างจากขอบโมลด์ไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร

2.3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตามมาตรฐาน BS EN 12390-4 (Testing hardened concrete. Compressive strength. Specification for testing machines) [6] โดยนำสัดส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร เป็นจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยในแต่ละแบบส่วนผสมจะต้องผ่านการบ่มแบบชนวนกันความชื้นเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดตัวอย่างแล้วบันทึกค่า วางก้อนตัวอย่างทดสอบให้ตรงแนวศูนย์กลางของแท่นกดทดสอบ แล้วเริ่มทำงานของเครื่องทดสอบโดยมีความเร็วของแรงกดคงที่ที่ 0.2 - 1 เมกะปาสคาลต่อวินาที จนถึงจุด

2.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ตามมาตรฐาน ASTM C78 (Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)) [7] โดยนำสัดส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างคานขนาด 10x10x35เซนติเมตร เป็นจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยในแต่ละแบบส่วนผสมจะต้องผ่านการบ่มแบบชนวนกันความชื้นเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดขนาดตัวอย่างแล้วบันทึกค่า วางตัวอย่างแบบ Third-Point Loading โดยมีความเร็วของแรงกดคงที่ที่ 0.04 - 0.22 กิโลนิวตันต่อวินาทีจนถึงจุดวิบัติ

2.3.6 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน DIN 1048 [8] โดยนำนำสัดส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 3 ลงในแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร เป็นจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยในแต่ละแบบส่วนผสมจะต้องผ่านการบ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบเพื่ออัดด้วยแรงดัน 500 ± 50 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 72 ± 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นผ่าก้อนทดสอบและทำการวัดความลึกการซึมผ่านของน้ำที่เข้ามาในเนื้อคอนกรีต

2.3.7 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ตามมาตรฐาน ASTM C138 (Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete) [9] เริ่มด้วยการชั่งน้ำหนักของถังเปล่าแล้วบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำให้เต็มถังแล้วชั่งน้ำหนักของถังที่มีน้ำเพื่อคำนวณหาปริมาตรของถัง หลังจากนั้นนำคอนกรีตลงในสัดส่วนผสมคอนกรีตตารางที่ 3 ใส่ในภาชนะโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้ค้อนยางเคาะด้านข้าง 10-15 ครั้ง แล้วปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ แล้วนำถังที่มีคอนกรีตไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก

2.3.8 การตรวจสอบองค์ประกอบเคมีและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง

การตรวจสอบองค์ประกอบเคมี เตรียมตัวอย่างโดยนำเศษชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุการบ่ม 28 วัน มาบดให้ละเอียดจนกลายเป็นผง นำไปทดสอบโดยใส่เครื่อง X-Ray Diffraction ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab ซึ่งมีเงื่อนไขการวัดดังนี้ ใช้กำลังไฟที่ 40 กิโลวัตต์ 40 มิลลิแอมป์, ความเร็วในการสแกน 2.00 องศาต่อนาที และแกนที่สแกนเริ่มตั้งแต่ θ จนถึง 2θ โดยอยู่ในช่วง 15 – 60 องศา หลังจากนั้นนำกราฟมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุการบ่ม 28 วัน ทุบด้วยค้อนเหล็ก เลือกเศษตัวอย่างมีลักษณะเป็นเกล็ดนำไปทดสอบ นำไปใส่เครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA 450 ด้วยกำลังไฟ 10 และ 20 กิโลวัตต์ และ กำลังขยาย 10,000 เท่า

2.3.9 การทดสอบการไหลโดยโต๊ะทดสอบการไหล

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C230 (Standard Specifications for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement) [5] โดยนำสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ในตารางที่ 4 ใส่โมลด์โลหะทรงกรวยตัดที่วางอยู่บนกลางโต๊ะการไหลจนเต็มโมลด์ โดยใช้ฐานด้านกว้างอยู่ด้านล่างแล้วปาดผิวให้เรียบและยกโมลด์ขึ้นในแนวดิ่ง จากนั้นเริ่มหมุนที่หมุนให้โต๊ะการไหลแผ่มาตรฐาน ให้ขึ้นและปล่อยให้ตกลงเป็นระยะ 12.7 มม. โดยจะต้องยกขึ้น-ลง เป็นจำนวน 15 ครั้ง ภายใน 15 วินาที ด้วยอัตราที่สม่ำเสมอทำให้มอร์ตาร์แผ่กระจายออกไปรอบด้าน วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่กระจายออกโดยเฉลี่ยจำนวน 6 ครั้ง แล้วนำไปหาเปอร์เซ็นต์การไหล

2.3.10การทดสอบกรอบเวลาในการพิมพ์

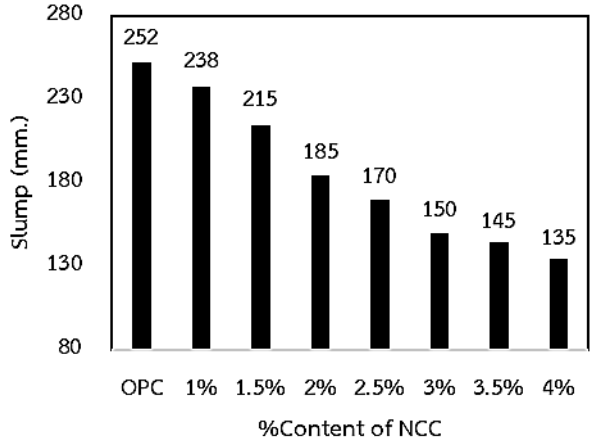
กรอบเวลาการพิมพ์ (Printable time) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่วัสดุสามารถพิมพ์ออกมาเป็นเส้นได้อย่างต่อเนื่อง มีขนาดของเส้นพิมพ์คงที่และสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเสียรูปและไม่เกิดข้อบกพร่องในการพิมพ์ (กำหนดเป็นระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์) ไปจนถึงช่วงเวลาที่วัสดุไม่สามารถพิมพ์ออกมาได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ข้างต้น (กำหนดเป็นระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์) ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในรูปที่ 3 พิมพ์เส้นตัวอย่างเป็นเส้นตรงยาว 30 เซนติเมตร โดยใช้หัวพิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พิมพ์ทำมุมตั้งฉากกับพื้น กำหนดให้หัวพิมพ์อยู่สูงจากพื้น 15 มิลลิเมตร ใช้อัตราการป้อนวัสดุประมาณ 2.5 มิลลิลิตรต่อวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการพิมพ์เส้นตัวอย่างทุก 10 นาที บันทึกเวลาในการพิมพ์แต่ละรอบกับเวลาที่ส่วนผสมเริ่มสัมผัสกับน้ำ ทำการวัดความสูงและความกว้างของเส้นตัวอย่างในตำแหน่ง หัว กลาง และท้าย ของเส้นตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณหาความกว้างเฉลี่ยของเส้นตัวอย่างเทียบกับเวลา เพื่อระบุความกว้างและเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

รูปที่ 3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1.1 การยุบตัว

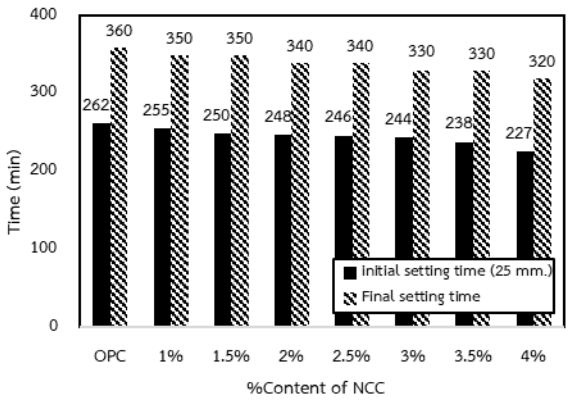
จากรูปที่ 4 แสดงผลของการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน ASTM C143 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมวลรวมเบาที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 252 มิลลิเมตร หลังจากที่เพิ่มนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตไป 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ได้ค่าการยุบตัวที่ 238, 215, 185, 170, 150, 145 และ 135 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่าการยุบตัวลดลง เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสูง จึงทำให้ดูดซับน้ำในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีความข้นเหลวลดลง



รูปที่ 4 ค่าการยุบของคอนกรีตของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.2 ระยะเวลาก่อตัว

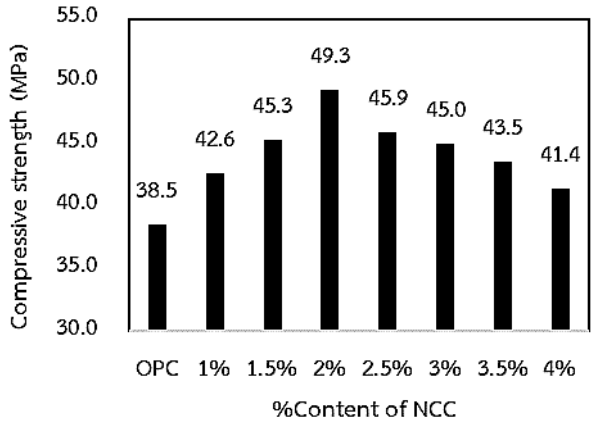
จากรูปที่ 5 แสดงผลของระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน ASTM C191 จากผลการทดสอบพบว่า ทั้งระยะเวลาเริ่มต้นและระยะเวลาสิ้นสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากส่วนผสมที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าระยะเวลาเริ่มต้นที่ 262 นาที และระยะเวลาสิ้นสุดที่ 360 นาที หลังจากที่เพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากถึง 4% ของน้ำหนักซีเมนต์ มีค่าระยะเวลาเริ่มต้นลดลงถึง 227 นาที และระยะเวลาสิ้นสุดลดลงถึง 320 นาที เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากและการดูดซับน้ำที่พื้นผิวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการยุบตัว



รูปที่ 5 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.3 กำลังรับแรงอัด

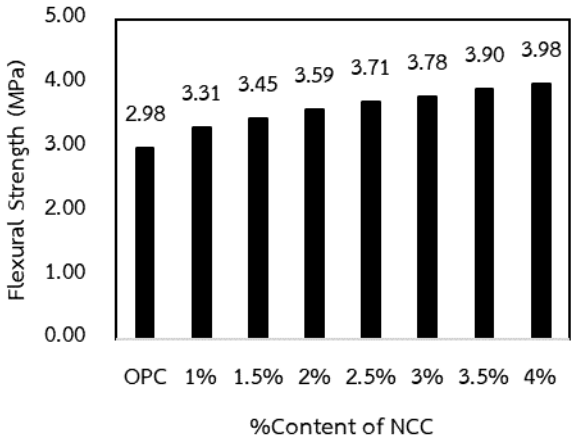
จากรูปที่ 6 แสดงผลของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน BS EN 12390 จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 38.52 เมกะปาสคาล หลังจากนั้นได้เพิ่มนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไป ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ตัวอย่างที่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 2% ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 49.32 เมกะปาสคาล เพิ่มขึ้นมาจากตัวอย่างควบคุมอยู่ 22% เนื่องมาจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุเฉื่อยขนาดเล็กมีความสามารถเป็นวัสดุผสมเพิ่ม ทำให้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปเติมเต็มหรือลดขนาดของช่องว่างลงได้ แต่หากเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 2% ของน้ำหนักซีเมนต์ จะพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นถ้าใส่มากเกินไป ทำให้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจับตัวกันเอง จนเป็นช่องว่างในคอนกรีต ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตเปราะมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.4 กำลังรับแรงดัด

จากรูปที่ 7 แสดงผลของการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน ASTM C78 จากผลการทดสอบพบว่า มีค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมเบาที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 2.98 เมกะปาสคาล หลังจากที่เพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตถึง 4% ของน้ำหนักซีเมนต์ มีค่ากำลังรับแรงดัด 3.98 เมกะปาสคาล สรุปได้ว่า กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น

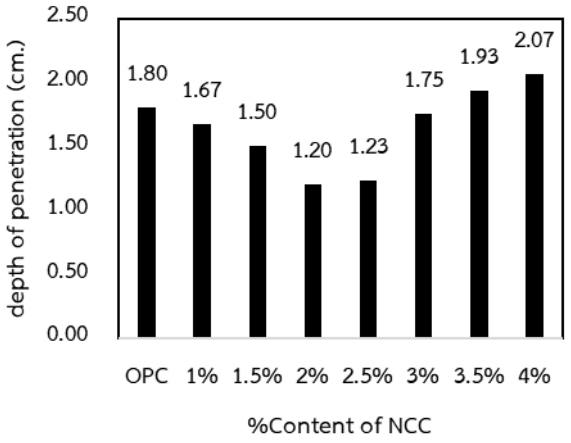


รูปที่ 7 กำลังรับแรงดัดของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.5 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

จากรูปที่ 8 แสดงผลของการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน DIN 1048 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความลึกการซึมผ่านของคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 1.80 เซนติเมตร หลังจากนั้นได้เพิ่มนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไป ทำให้ค่าความลึกการซึมผ่าน

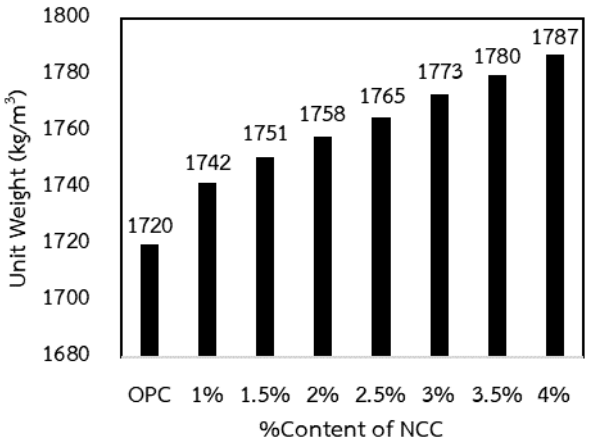
ลดลง และสูงสุดที่ตัวอย่างที่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 2% ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งมีค่าความลึกการซึมผ่านอยู่ที่ 1.20 เซนติเมตร เนื่องมาจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุผสมเพิ่มสามารถลดขนาดของช่องว่างได้ แต่หากเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 2% ของน้ำหนักซีเมนต์ จะพบว่าค่าความลึกการซึมผ่านกลับมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไป ทำให้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจับตัวกันเอง จนเป็นช่องว่างในคอนกรีต



รูปที่ 8 ความลึกการซึมผ่านของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.6 ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

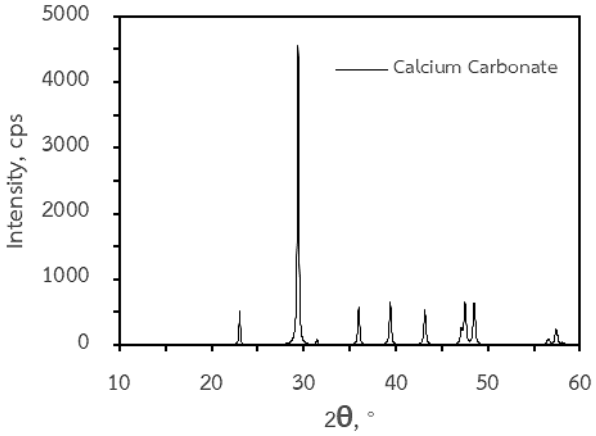
จากรูปที่ 9 แสดงผลของการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลรวมเบาที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน ASTM C138 จากผลการทดสอบพบว่า มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นจาก 1720 ถึง 1787 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่าหน่วยน้ำหนักไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



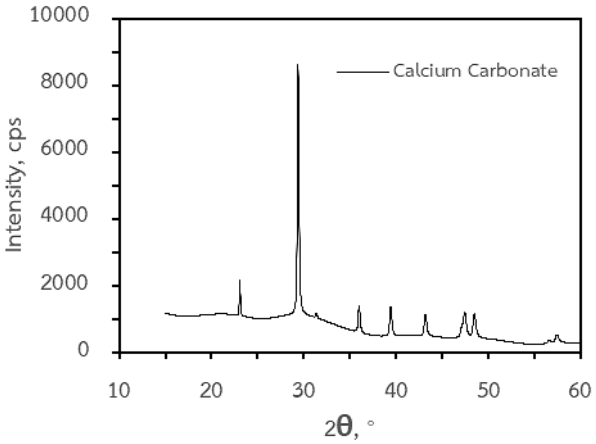
รูปที่ 9 หน่วยน้ำหนักของแต่ละสัดส่วนผสม

3.1.7 องค์ประกอบเคมีและโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างด้วย SEM และ XRD

ในรูปที่ 10 และ 11 ได้แสดงให้เห็นความเข้มแคลเซียมคาร์บอเนตในแต่ละมุมแสกนของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมเบา ซึ่งสรุปได้ว่า มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้ม (Intensity) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมเบาที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนผสม (OPC) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากความสูงของจุดยอดกราฟที่มุม 29.4 องศา จากความเข้มที่ 4,550.096 ถึง 8,531.667 จำนวนต่อวินาที (cps)

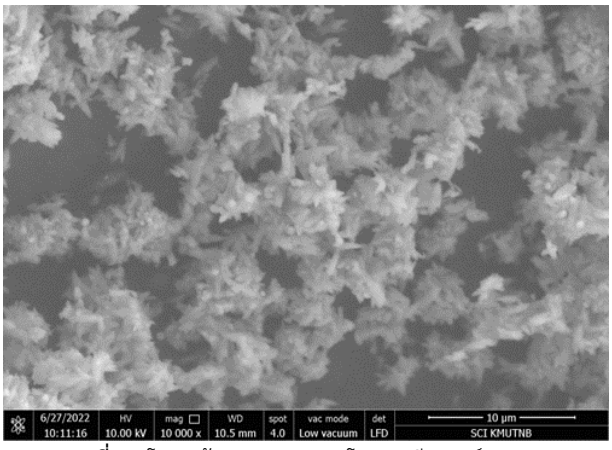


รูปที่ 10 ผลการทดสอบ XRD ของตัวอย่างที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

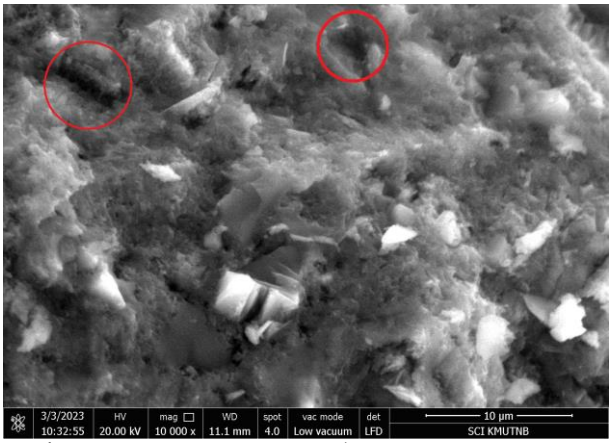


รูปที่ 11 ผลการทดสอบ XRD ของตัวอย่างที่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

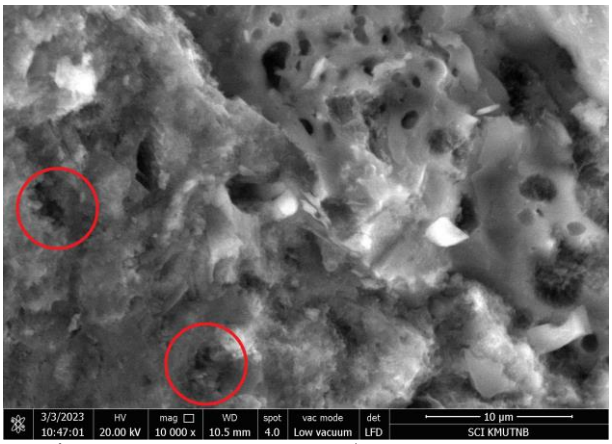
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง โดยใช้ SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ได้ผลการทดสอบดังนี้ รูปที่ 12 แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่จับตัวกันเป็นกลุ่มเข็ม ส่วนในรูปที่ 13 แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมเบาที่ไม่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยมีช่องว่างอยู่ในเนื้อมอร์ตาร์ หลังจากใส่นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตแล้ว สังเกตได้ว่าช่องว่างมีขนาดเล็กลง เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดเล็กมากและเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ จึงมีหน้าที่เติมเต็มช่องว่างที่มีในเนื้อคอนกรีต ดังในรูปที่ 14



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



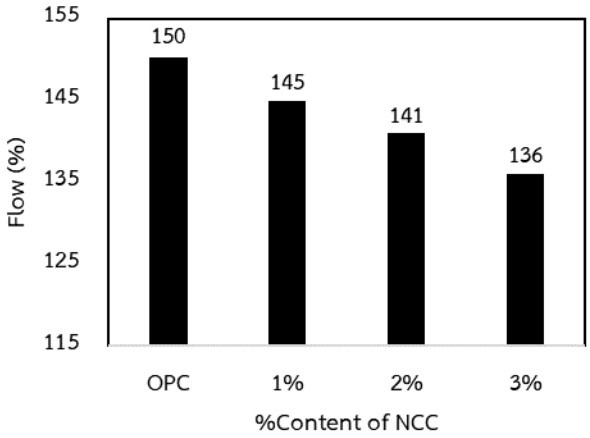
รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ไม่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (OPC)



รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่มีนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (4%NCC)

3.1.8 การไหลแผ่

ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้โต๊ะทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230 จากรูปที่ 15 พบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตดูดซับน้ำในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีความข้นเหลวลดลง สอดคล้องผลค่าการยุบตัว ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ต้องการการไหลแผ่ไม่น้อยกว่า 115%



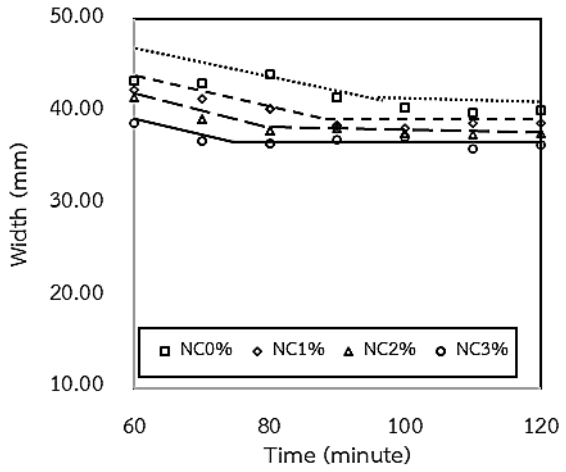
รูปที่ 15 ค่าการไหลแผ่แต่ละสัดส่วนผสม

3.1.9 กรอบระยะเวลาการพิมพ์

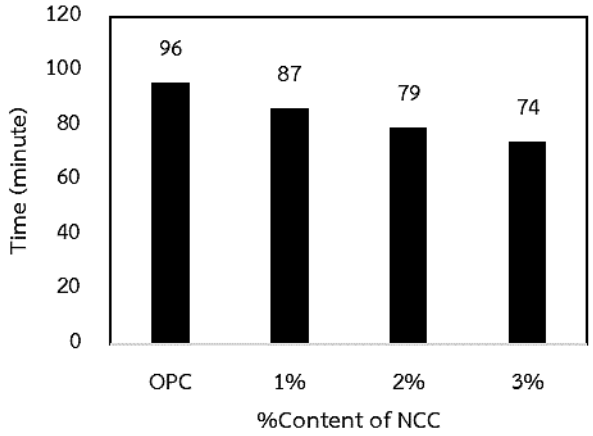
จากรูปที่ 16 เมื่อนำค่าเฉลี่ยความกว้างของเส้นพิมพ์มาพล็อตเทียบกับเวลา สามารถแบ่งแนวโน้มออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อเวลาผ่านไปความกว้างของเส้นพิมพ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สองคือช่วงที่ค่าความกว้างของเส้นพิมพ์เริ่มคงที่ จุดที่เส้นกราฟทั้ง 2 ช่วงตัดกันเป็นเรียกว่า ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 17 แสดงระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ของแต่ละสัดส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ลดลง

รูปที่ 18 แสดงผลการวิเคราะห์ความกว้างที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์แต่ละสัดส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ไม่ทำปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำลดลง การไหลแผ่ลดลง อนุภาคของนาโนแคลเซียมเองก็สามารถรองรับการทรุดตัวของเส้นพิมพ์ได้ดี จึงทำให้ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง

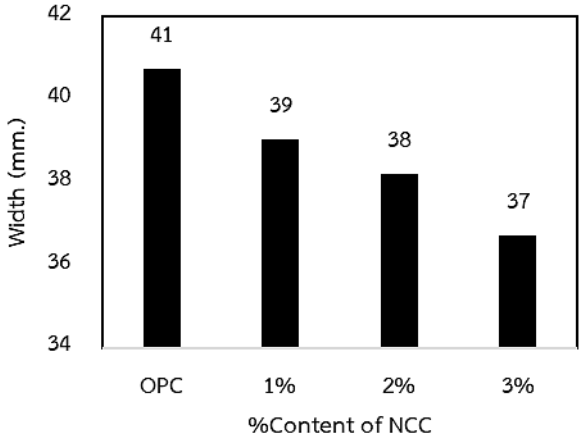
ในส่วนของระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์ พบว่า ทุกส่วนผสมสามารถทำการพิมพ์ต่อไปได้ไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อระยะเวลาในการทำงานแล้ว จึงทำการยุติการทดสอบเพื่อป้องกันการแข็งตัวของมอร์ตาร์ภายในระบบลำเลียงวัสดุของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทุกสัดส่วนผสมมีกรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง เหตุผลที่มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการทำงานได้นานนั้น มาจากการใส่สารลดน้ำชนิด G เนื่องจากสารลดน้ำชนิดนี้มีคุณสมบัติช่วยลดการใช้น้ำปริมาณสูงและหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเส้นพิมพ์กับเวลา



รูปที่ 17 ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์แต่ละสัดส่วนผสม



รูปที่ 18 ความกว้างที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์แต่ละสัดส่วนผสม

4. สรุป

1. ด้านการทดสอบค่าการยุบของคอนกรีตตัวพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นในส่วนผสมคอนกรีต

2. ด้านระยะเวลาก่อตัวพบว่า ทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสิ้นสุดได้ลดลง เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นในส่วนผสมคอนกรีต

3. ด้านกำลังรับแรงอัดพบว่า ปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 49.3 เมกะปาสคาล

4. ด้านกำลังรับแรงดัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

5. ด้านการซึมผ่านของน้ำพบว่า ปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 2% โดยน้ำหนักซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของน้ำน้อยสุดที่ 1.20 เซนติเมตร

6. ด้านหน่วยน้ำหนักคอนกรีตพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสมคอนกรีต

7. ด้านค่าการไหลแผ่ของการพิมพ์ซีเมนต์มอร์ตาร์ 3 มิติ พบว่า เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง แต่ทุกสัดส่วนผสมสามารถพิมพ์มอร์ตาร์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้

8. ด้านกรอบระยะเวลาการพิมพ์ของการพิมพ์ซีเมนต์มอร์ตาร์ 3 มิติ พบว่า ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์และความกว้างของเส้นพิมพ์ลดลง เมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นในส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ ในส่วนของระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์ พบว่า ทุกส่วนผสมสามารถทำการพิมพ์ต่อไปได้ไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อระยะเวลาในการทำงาน สรุปได้ว่า ทุกสัดส่วนผสมมีกรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุคนธสุขกุล อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนะแนวทางการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ยิ่งจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Al-Khaiat H, Haque MN. (1999). Strength and durability of lightweight and normal weight concrete. ASCE Mater J, 11(3), 231–5.

[2] Hughes DW, Hodgkinson L, Cullen D, Seaton H. (1999). Adjusted density concrete. Concr Eng Int, 3(7), 54–8.

[3] Cao, M., Ming, X., He, K., Li, L., & Shen, S. (2019). Effect of Macro-, Micro- and Nano-Calcium Carbonate on Properties of Cementitious Composites—A Review. Materials, 12(5), 781.

[4] ASTM C143/C143M-12. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[5] ASTM C191-12. (2021). Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[6] BS EN 12390-4:2000. (2019). Testing hardened concrete - Compressive strength - Specification for testing machines. British Standards Document.

[7] ASTM C78-09. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[8] DIN 1048-5. (1991). Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Germany.

[9] ASTM C138/C138M-17a. (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.