

## สมบัติของคอนกรีตผสมเศษมวลรวมและน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์

### Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate and Polymeric Coating Agent

ปณณัฏร์ เสงเติม<sup>1</sup>, ณัฐธ์ มากุล<sup>2\*</sup>, และ ประกาศิต โสไกร<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: natt@pnru.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของคอนกรีตผสมเศษมวลรวมจากเศษคอนกรีตและน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ โดยใช้เศษมวลรวมจากเศษคอนกรีตซึ่งผ่านการบดในช่วงขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.15 ถึง 25.0 มม. มาทำการผสมเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.34 และใช้ทั้งเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมทรายแม่น้ำ (NAR) และหินปูนบด (NCA) ตามมาตรฐาน ASTM C33 และผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต สมบัติของคอนกรีตที่ทำการทดสอบได้แก่ กำลังอัดและความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยคลื่นความถี่สูงจากผลการทดสอบพบว่าน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์มีผลต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้นจนถึงที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม แต่อย่างก็ตามคอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.26

**คำสำคัญ:** เศษมวลรวมคอนกรีต, น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์, คอนกรีตสมรรถนะสูง, กำลังอัด

#### Abstract

This study investigates the properties of concrete blended with concrete scrap aggregate and polymer impregnation. In order to create high-performance concrete with a water-cement ratio (w/c) by weight of 0.34 and aggregates from crushed concrete scraps with particle sizes ranging from 0.15 to 25.0 mm were used. According to ASTM C33, concrete containing river sand (NAR), crushed limestone (NCA), and polymer impregnation at 5 wt% of the water used in the concrete mix were compared to fine aggregates and coarse aggregates. The concrete under test includes compressive strength and integrity and as measured by ultrasonic pulse velocity. Based on the test results, it was revealed that the polymer impregnation had a lower rate

of developing compressive strength than the control concrete. This rate significantly decreased at 28 days; the control concrete's compressive strength had decreased. However, when combined with a polymeric coating agent type 1, recycled fine concrete aggregate (RCAF) and natural crushed limestone (NCA) increased compressive strength by 10.26%.

**Keywords:** Recycled concrete aggregate, polymeric coating agent, high performance concrete, compressive strength

#### 1. คำนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในปี ค.ศ.2022 มีการใช้ปูนซีเมนต์อยู่ที่ 32.7 ล้านตัน และส่งออกปูนซีเมนต์และปูนเม็ด (Clinker) มีแนวโน้มอยู่ที่ 3.1 ล้านตัน [1] แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่เป็นประเด็นปัญหาสำคัญของการผลิตคอนกรีตคือความขาดแคลนมวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการผสมทำเป็นคอนกรีต [2] ดังนั้นการนำเศษคอนกรีตกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมใหม่ถือเป็นทางเลือกที่มีความสำคัญยิ่งของประเทศไทยซึ่งนอกจากจะแก้ปัญหาที่มีได้ส่วนหนึ่งแล้ว การนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ถือเป็นวาระเร่งด่วนของโลกในยุคปัจจุบันที่ความต้องการใช้สูงแต่วัสดุพื้นฐานที่ใช้ในงานก่อสร้างกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [3,4] ยิ่งในประเทศไทยที่โครงสร้างคอนกรีตก้าวข้ามยุคที่โครงสร้างคอนกรีตสมัยเก่าจำเป็นอย่างยังต้องมีการรื้อถอนและถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เพียงการถมที่ (Landfill) เท่านั้น แต่ด้วยข้อจำกัดของการเศษคอนกรีตที่ต้องผ่านกระบวนการบดให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่ทำให้ผลของความพรุนที่มีอยู่จากเนื้อคอนกรีตเดิมผนวกกับการบดที่เพิ่มรอยแตกกว้างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้ต้องมีการปรับปรุงสมบัติของมวลรวมให้มีความเหมาะสมหรือโดยนัยยะคือ เพิ่มความแข็งแรงและลดความพรุนที่มีอยู่ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการลดเพิ่มสมบัติของมวลรวมที่ผ่านบดและสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมเพื่อการผลิตคอนกรีตด้วยกันหลายวิธีเช่น การบดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ [5,6] การใช้สารพอลิไซลัน [7] เป็นต้น ซึ่งการเคลือบผิวของมวลรวมบดก็นับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบในเชิงการปฏิบัติ ดังนั้น งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาสมบัติของคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตและน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ โดยศึกษาทั้งเศษมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตในช่วงขนาดตั้งแต่ 0.15

ถึง 4.75 มม. (RCAF) ซึ่งเป็นช่วงรอยต่อเชิงขนาดระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบทั้งมวลรวมหยาบจากธรรมชาติและจากเศษคอนกรีต (RCAC)

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุ

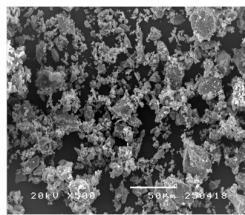
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [8] ทราายน้ํา (NAR) มีความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.32 เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) ที่ใช้ในงานวิจัยผ่านการบดด้วยเครื่องบดตั้งแสดงในรูปที่ 1 จนมีขนาดในช่วง 0.15 ถึง 4.75 มม. และมีลักษณะและขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเปรียบเทียบกับทรายน้ําดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในส่วนของมวลรวมหยาบใช้หินปูนบด (NCA) เปรียบเทียบกับเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) ที่มีขนาดใหญ่มากที่สุด 25 มม. และมีขนาดละเอียดในช่วงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] โดยมีลักษณะอนุภาคแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 1 เครื่องบดคอนกรีต

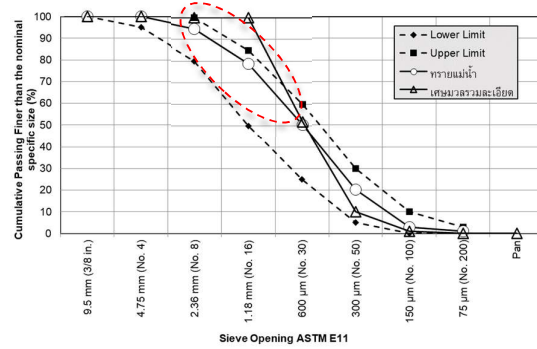


(ก) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ข) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (500x)



(ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 2 (ก) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ข) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (500x) เปรียบเทียบกับอนุภาคของ (ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (500x)



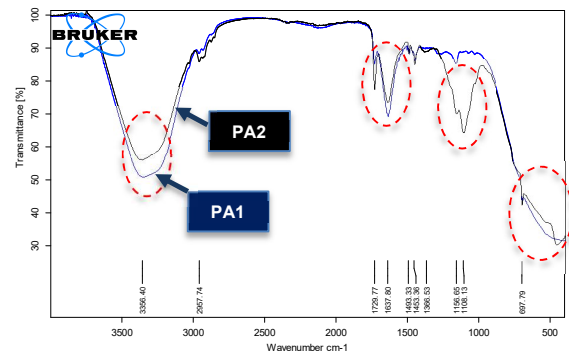
รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) เปรียบเทียบกับทรายน้ํา (NAR) กับมาตรฐาน ASTM C33 [9]



รูปที่ 4 เศษคอนกรีตบด (RCAC) ที่มีขนาดใหญ่มากที่สุด 25 มม.

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของน้ํายาเคลือบโพลีเมอร์ใช้ 2 ชนิดเปรียบเทียบกับน้ํายาประปาที่ใช้ในการผสมคอนกรีต [10] และน้ํายาลดชนิดพิเศษ (HRWRA) ตามมาตรฐาน ASTM C494 [11]

วัสดุ	ความเป็นกรดต่าง (pH)	ค่าการนำไฟฟ้า (µS/m)	ปริมาณของแข็ง (ppm)
น้ํายาประปา	8.69	468	231
HRWRA	6.43	5483	2766
น้ํายาเคลือบโพลีเมอร์ ชนิดที่ 1 (PA1)	7.86	7408	3582
น้ํายาเคลือบโพลีเมอร์ ชนิดที่ 2 (PA2)	10.22	12,425	6273



D:\Spectrum2023\2.0	2	Diamond ATR	15-Feb-23
D:\Spectrum2023\1.0	1	Diamond ATR	15-Feb-23

Page 1/1

Peak Position	Group	Class	Peak Details
697.79	C=C bending	alkene	strong
1108.13	C-O stretching	aliphatic ether	strong
1156.65	C-O stretching	tertiary alcohol	strong
1637.80	S-O stretching	sulforamibe	medium
1729.77	C=O stretching	alkame	strong
3356.40	N-H stretching	aliphatic primary amine	medium

รูปที่ 5 ทรูฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) สเปกโตรสโคปี (FTIR)

สำหรับน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ใช้ 2 ชนิด โดยมีสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 1 และผลทดสอบพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ในรูปที่ 5

### 2.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้แสดงในตารางที่ 2 โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.34 และใช้อัตราส่วนน้ำยาเคลือบพิเศษ (HRWRA) เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ใช้ 2 ชนิด (PA1/PA2) เท่ากับ 0.050 โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ (กก./ม. <sup>3</sup> )	มวลรวมละเอียด (กก./ม. <sup>3</sup> )	มวลรวมหยาบ (กก./ม. <sup>3</sup> )	ค่าการไหลแม่ (เฉลี่ย) เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม)
560	700 (NAR)	885 (NCA)	65.0 (No PA)
560	700 (NAR)	885 (NCA)	63.3 (PA1)
560	700 (NAR)	885 (NCA)	59.5 (PA2)
560	700 (RCAF)	885 (NCA)	58.0 (No PA)
560	700 (RCAF)	885 (NCA)	53.1 (PA1)
560	700 (RCAF)	885 (NCA)	52.4 (PA2)
560	700 (NAR)	885 (RCAC)	63.0 (No PA)
560	700 (NAR)	885 (RCAC)	60.8 (PA1)
560	700 (NAR)	885 (RCAC)	56.3 (PA2)
560	700 (RCAF)	885 (RCAC)	55.3 (No PA)
560	700 (RCAF)	885 (RCAC)	53.6 (PA1)
560	700 (RCAF)	885 (RCAC)	50.9 (PA2)

### 2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบสมบัติของคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตโดยการผสมในโมผสมดังแสดงด้วยตัวอย่างคอนกรีตในรูปที่ 6 หลังจากผสมทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตโดยการเทลงแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมง และบ่มในน้ำ โดยมีเวลาในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] และการทดสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) ตามมาตรฐาน ASTM C597 [13]



รูปที่ 6 ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะสด

## 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

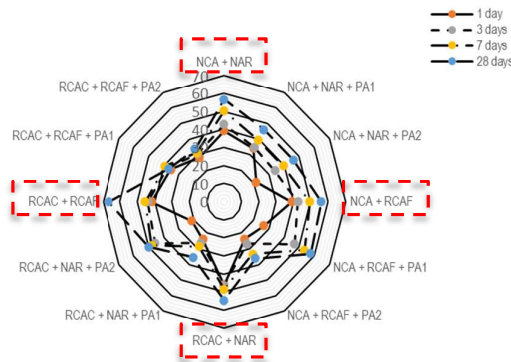
### 3.1 กำลังอัด

ผลการทดสอบอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมหินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR) ซึ่งเป็นคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และ เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) แสดงในรูปที่ 7 พบว่าทุกสัดส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นในช่วง 28 วันแรก โดยคอนกรีตควบคุม (NAR + NCA) มีค่ากำลังอัด 39.27, 42.64, 50.17 และ 56.60 เมกะปาสกาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ แต่อย่างก็ตามเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ใช้ 2 ชนิด คอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 18.04 และ 26.51 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม สำหรับน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์มีผลต่อก่อตัว (Formation) ของการเกาะยึดของรอยต่อ ช่วงเพสต์และมวลรวม (Interfacial Transition Zone, ITZ) โดยมาจากองค์ประกอบในหมู่ C=C bending ( $697.79 \text{ cm}^{-1}$ ) และ C=O stretching ( $1729.77 \text{ cm}^{-1}$ ) ที่มีผลต่อชั้นในชั้นที่ยึดกับมวลรวมละเอียดที่มีซิลิโคนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ของทรายแม่น้ำและแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในขณะที่คอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) โดยมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยตลอดอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.26, 8.66 และ 3.05 ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 1 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ซึ่งเป็นมาจากหมู่ฟังก์ชัน S-O stretching ( $1637.80 \text{ cm}^{-1}$ ) ที่มีส่วนในเพิ่มการเกาะยึดกับ RCAF แต่ด้วยความเป็นประจุไฟฟ้าจากการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำประปาจึงมีผลต่อโครงสร้างของความมีเสถียรภาพของรอยต่อ ITZ ในช่วงวันแรก [14-17] อีกประเด็นหนึ่งซึ่งช่วยทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นคือ มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นของ RCAF กับน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ซึ่งส่วนที่ละเอียดที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) เหลืออยู่เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะยึดอยู่ผิวและเสริมความแข็งแรงของ RCAF เพิ่มเติมด้วย ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2) มีผลต่ออัตราการลดลงสูงถึงร้อยละ 26.02 ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ( $1108.13 \text{ cm}^{-1}$ ) [17] ที่พันธะไม่เสถียรภาพในการยึดรอยต่อ ITZ ประกอบกับค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งที่สูงกว่าน้ำประปาถึง 30 เท่า ทำให้ความแข็งแรงของพันธะ (Strong) ในช่วง ITZ [18-19] มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมทรายแม่น้ำ (NAR) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) โดยคอนกรีตควบคุม (NAR + RCAC) มีค่ากำลังอัด 45.94, 46.15, 48.41 และ 54.51 เมกะปาสกาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดลดลง โดยมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยตลอดอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบ

โพลีเมอร์ร้อยละ 41.48 และ 15.52 ของคอนกรีตผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ตามลำดับ โดยมีผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่น้อยกว่าเนื่องจาก RCAC มีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตที่ผสมการ RCAF แต่ประเด็นหนึ่งคือน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) มีผลกระทบต่อ NCA ที่เกิดแต่ธรรมชาติซึ่งเป็นหินปูนชนิดโดโลไมต์ (CaMg (CO<sub>3</sub>)) [20] มากกว่าน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

สำหรับกรณีของคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) โดยคอนกรีตควบคุม (RCAC + RCAC) มีค่ากำลังอัด 41.59, 43.86, 45.53 และ 66.52 เมกะปาสกาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) มีลดลงร้อยละ 22.72 และ 35.94 ตามลำดับ



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 3 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

Mix	อายุ (วัน)			
	1	3	7	28
NCA + NAR	100.00	100.00	100.00	100.00
NCA + NAR + PA1	86.55	81.72	78.39	81.20
NCA + NAR + PA2	54.34	79.78	78.54	81.33
NCA + RCAF	100.00	100.00	100.00	100.00
NCA + RCAF + PA1	68.07	110.26	108.66	103.05
NCA + RCAF + PA2	60.57	62.73	67.60	65.00
RCAC + NAR	100.00	100.00	100.00	100.00
RCAC + NAR + PA1	52.50	57.23	59.23	65.10
RCAC + NAR + PA2	46.64	99.52	99.56	92.19
RCAC + RCAF	100.00	100.00	100.00	100.00
RCAC + RCAF + PA1	85.33	86.08	86.22	55.09
RCAC + RCAF + PA2	67.86	69.51	68.42	50.45

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นอายุ 28 วันแรก ( $Com^{28d}$ ) ในหน่วยเมกะปาสกาล (MPa) ของคอนกรีตทั้งที่ผสมและไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ในช่วง 28 วัน ทั้งกรณีผสม (ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR), (ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF), (ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR) และ (ง) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และ เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) แสดงในสมการที่ (1) – (12)

(ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์

$$Com_{NoPA}^{28d} = 50.413(1 - \exp^{-1.40t}) \quad (1)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

$$Com_{PA1}^{28d} = 40.232(1 - \exp^{-1.80t}) \quad (2)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

$$Com_{PA2}^{28d} = 42.826(1 - \exp^{-0.56t}) \quad (3)$$

(ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์

$$Com_{NoPA}^{28d} = 49.861(1 - \exp^{-1.44t}) \quad (4)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

$$Com_{PA1}^{28d} = 56.005(1 - \exp^{-0.62t}) \quad (5)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

$$Com_{PA2}^{28d} = 33.016(1 - \exp^{-1.10t}) \quad (6)$$

(ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์

$$Com_{NoPA}^{28d} = 49.717(1 - \exp^{-2.56t}) \quad (7)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

$$Com_{PA1}^{28d} = 30.474(1 - \exp^{-1.48t}) \quad (8)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

$$Com_{PA2}^{28d} = 50.273(1 - \exp^{-0.64t}) \quad (9)$$

(ง) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์

$$Com_{NoPA}^{28d} = 52.572(1 - \exp^{-1.45t}) \quad (10)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

$$Com_{PA1}^{28d} = 37.889(1 - \exp^{-2.76t}) \quad (11)$$

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

$$Com_{PA2}^{28d} = 31.763(1 - \exp^{-2.18t}) \quad (12)$$

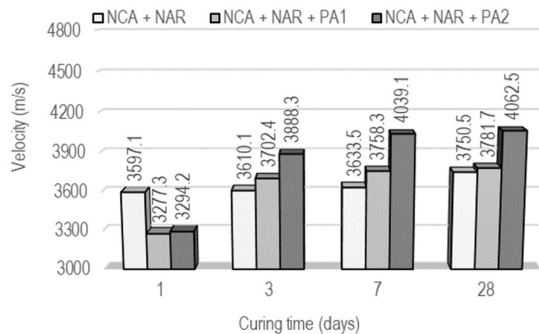
### 3.2 ความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยคลื่นความถี่สูง

ความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยความเร็วของคลื่นความถี่สูง (5.4 กิโลเฮิร์ตซ์, kHz) แสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 4 พบว่าแนวโน้มของความถี่คลื่นของคอนกรีตแต่ละประเภทได้แก่ (ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR) (ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR) และ (ง) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) สอดคล้องกับแนวโน้มของอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

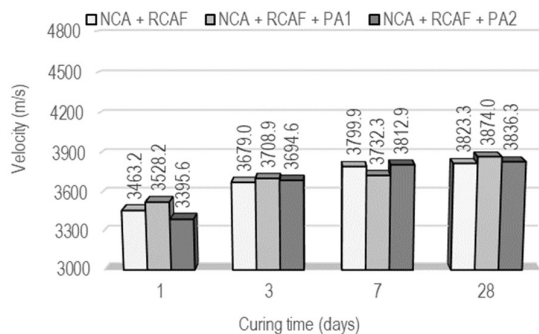
จากผลการทดสอบจะพบข้อสังเกตในส่วนของความถี่ของคลื่นที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ที่มีความเร็วของคลื่นที่สูงกว่าคอนกรีตปกติทั้งชนิดที่ผสม NCA, NAR, RCAF และ RCAC เนื่องจากน้ำยา



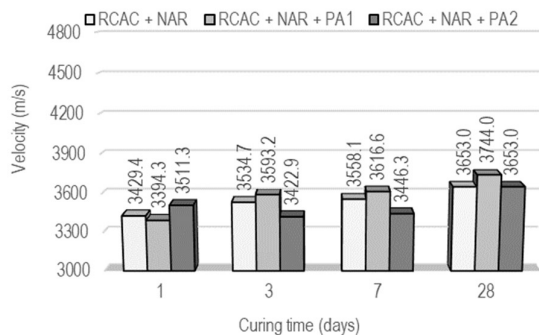
เติมเต็มรอยต่อระหว่างอนุภาคมวลรวมและยังเห็นผลได้กับมวลรวมผ่านการบดที่ช่วยในการอุดช่องว่างที่ผิวได้ดี



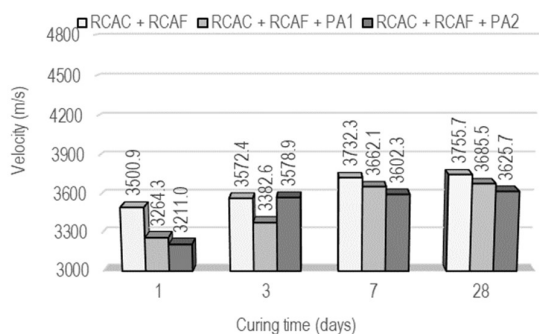
(ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR)



(ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF)



(ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR)



รูปที่ 8 ความเร็วของคลื่นผ่านเนื้อตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 4 ร้อยละความเร็วของคลื่นความถี่สูงของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

Mix	อายุ (วัน)			
	1	3	7	28
NCA + NAR	100.0	100.0	100.0	100.0
NCA + NAR + PA1	91.1	102.6	103.4	100.8
NCA + NAR + PA2	91.6	107.7	111.2	108.3
NCA + RCAF	96.3	101.9	104.6	101.9
NCA + RCAF + PA1	98.1	102.7	102.7	103.3
NCA + RCAF + PA2	94.4	102.3	104.9	102.3
RCAC + NAR	95.3	97.9	97.9	97.4
RCAC + NAR + PA1	94.4	99.5	99.5	99.8
RCAC + NAR + PA2	97.6	94.8	94.8	97.4
RCAC + RCAF	97.3	99.0	102.7	100.1
RCAC + RCAF + PA1	90.7	93.7	100.8	98.3
RCAC + RCAF + PA2	89.3	99.1	99.1	96.7

#### 4. บทสรุป

จากผลการศึกษารูปได้ดังต่อไปนี้

- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์มีผลต่อความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตผสม (ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR) (ข) คอนกรีตผสมหินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ค) คอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR) และ (ง) คอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) อย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 2 ที่มีความเป็นกรดต่าง ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งสูงกว่าน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 และมีผลต่อการลดของการไหลแผ่ของคอนกรีตทุกกลุ่ม
- น้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ใช้ 2 ชนิดมีผลต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตปกติ (หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR)) ที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงร้อยละ 18.04 และ 26.51 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม สำหรับน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลีเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)
- จากการประเมินความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) ของคอนกรีตแต่ละประเภทมีแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 วันแรก

#### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สัญญาเลขที่ N42A660379 นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.รัตมี แสงสิริมงคลยิ่ง และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ

พระนคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (FTIR)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Thailand: cement production and sales 2022. (n.d.). Statista. <https://www.statista.com/statistics/1172794/thailand-cement-production-and-sales/>
- [2] Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A. M., Murali, G., Vatin, N., ... & Vasilev, Y. (2021). Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review. *Crystals*, 11(3), 232.
- [3] Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796-810.
- [4] Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30-49.
- [5] Zadeh, A. H., Mamirov, M., Kim, S., & Hu, J. (2021). CO<sub>2</sub>-treatment of recycled concrete aggregates to improve mechanical and environmental properties for unbound applications. *Construction and Building Materials*, 275, 122180.
- [6] Gunning, P. J., Hills, C. D., Antemir, A., & Carey, P. J. (2011). Secondary aggregate from waste treated with carbon dioxide. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 164(5), 231-239.
- [7] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. *Journal of cleaner production*, 112, 466-472.
- [8] American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.01, PA, USA.
- [9] American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.02 PA, USA.
- [10] American Society for Testing and Materials. (2022). ASTM C1602/C1602M-22 Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.02 PA, USA.
- [11] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C494/C494M-17 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.02 PA, USA.
- [12] American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C39/C39M-21 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.02 PA, USA.
- [13] American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C597-16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 4.02 PA, USA.
- [14] Jain, B., Sancheti, G., & Jain, V. (2022). FTIR analysis of silica fume and iron dust added concrete. *Materials Today: Proceedings*, 60, 777-781.
- [15] Kashyap, V. S., Agrawal, U., Arora, K., & Sancheti, G. (2021, June). FTIR Analysis of Nanomodified Cement Concrete Incorporating Nano Silica and Waste Marble Dust. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 796, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- [16] Witkowski, H., & Koniorczyk, M. (2018). New sampling method to improve the reliability of FTIR analysis for Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 196-203.
- [17] Tararushkin, E. V., Shchelokova, T. N., & Kudryavtseva, V. D. (2020, September). A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 919, No. 2, p. 022017). IOP Publishing.
- [18] Jain, A., Chaudhary, S., & Gupta, R. (2022). Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste. *Construction and Building Materials*, 314, 125480.
- [19] Zayed, A. M., Masoud, M. A., Shahien, M. G., Gökçe, H. S., Sakr, K., Kansouh, W. A., & El-Khayatt, A. M. (2021). Physical, mechanical, and radiation attenuation properties of serpentine concrete containing boric acid. *Construction and Building Materials*, 272, 121641.
- [20] Ahmad Fauzi, A. A., Osman, A. F., Alrashdi, A. A., Mustafa, Z., & Abdul Halim, K. A. (2022). On the Use of Dolomite as a Mineral Filler and Co-Filler in the Field of Polymer Composites: A Review. *Polymers*, 14(14), 2843.