สมบัติของคอนกรีตผสมเศษมวลรวมและน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์

Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate and Polymeric Coating Agent

ปัณณภัสร์ เฮงเติม[1], ณัฏฐ์ มากุล[2,*], และ ประกาศิต โสไกร[2]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาลัยราชภัฏพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาลัยราชภัฏพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: natt@pnru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของคอนกรีตผสมเศษมวลรวมจากเศษคอนกรีตและน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ โดยใช้เศษมวลรวมจากเศษคอนกรีตซึ่งผ่านการบดในช่วงขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.15 ถึง 25.0 มม. มาทำการผสมเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.34 และใช้ทั้งเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมทรายแม่น้ำ (NAR) และหินปูนบด (NCA) ตามมาตรฐาน ASTM C33 และผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต สมบัติของคอนกรีตที่ทำการทดสอบได้แก่ กำลังอัดและความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยคลื่นความถี่สูง จากผลการทดสอบพบว่าน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์มีผลต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้นจนถึงที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม แต่อย่างก็ตามคอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.26

คำสำคัญ: เศษมวลรวมคอนกรีต, น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์, 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 various

cret, e ratio (w/c) by weight of 0.34 and aggregates from various concre au Bo Dà ð A € `ð B O •p B Q`ð `ð J N S F

ถึง 4.75 มม. (RCAF) ซึ่งเป็นช่วงรอยต่อเชิงขนาดระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบทั้งมวลรวมหยาบจากธรรมชาติและจากเศษคอนกรีต (RCAC)

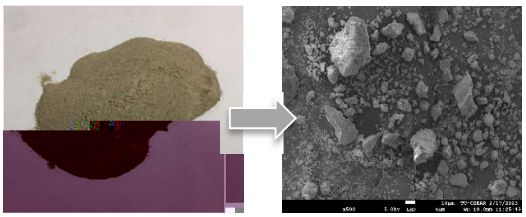
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

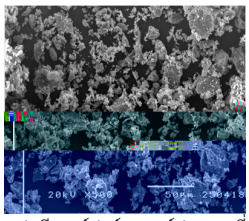
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [8] ทรายแม่น้ำ (NAR) มีความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดท่ากับ 2.32 เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) ที่ใช้ในงานวิจัยผ่านการบดร่อนด้วยเครื่องบดดังแสดงในรูปที่ 1 จนมีขนาดในช่วง 0.15 ถึง 4.75 มม. และมีลักษณะและขนาดคละการกระจายตัวของอนุภาคเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในส่วนของมวลรวมหยาบใช้หินปูนบด (NCA) เปรียบเทียบกับเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) ที่มีขนาดใหญ่สุด 25 มม. และมีขนาดคละในช่วงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] โดยมีลักษณะอนุภาคแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 1 เครื่องบดคอนกรีต

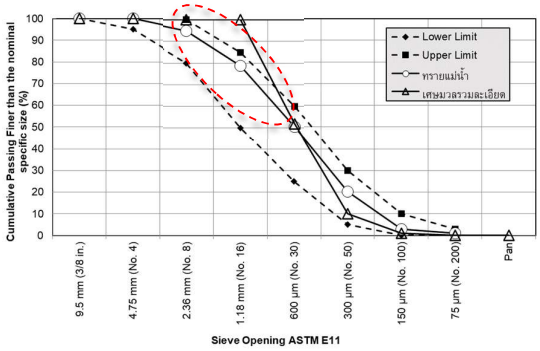


(ก) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ข) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (500x)

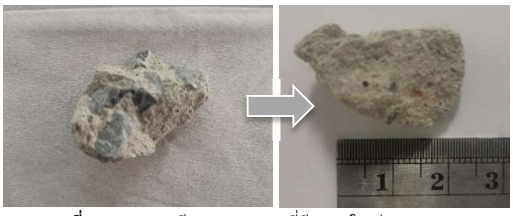


(ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

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



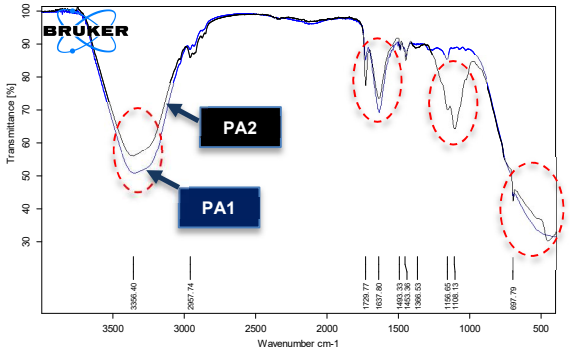
รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ (NAR) กับมาตรฐาน ASTM C33 [9]



รูปที่ 4 เศษคอนกรีตบด (RCAC) ที่มีขนาดใหญ่สุด 25 มม.

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ใช้ 2 ชนิดเปรียบเทียบกับน้ำประปาที่ใช้ในการผสมคอนกรีต [10] และน้ำยาลดชนิดพิเศษ (HRWRA) ตามมาตรฐาน ASTM C494 [11]

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



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

รูปที่ 5 หมู่ฟังก์ชั่นในโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (FTIR)

สำหรับน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ใช้ 2 ชนิด โดยมีสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 1 และผลทดสอบพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชั่นในโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ในรูปที่ 5

2.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

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

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ (กก./ม.^{3})	มวลรวมละเอียด (กก./ม.^{3})	มวลรวมหยาบ (กก./ม.^{3})	ค่าการไหลแผ่ (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

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตโดยการผสมในโม่ผสมดังแสดงตัวอย่างคอนกรีตในรูปที่ 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

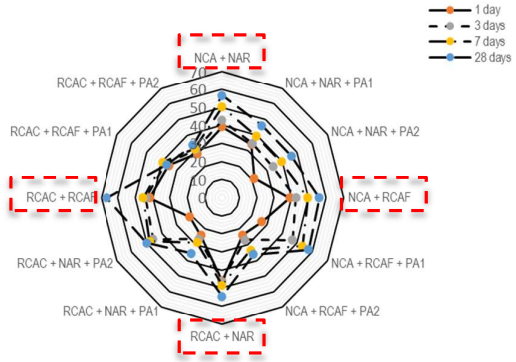
3.1 กำลังอัด

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 เมกะปาสคาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ แต่อย่างก็ตามเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ใช้ 2 ชนิด คอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 18.04 และ 26.51 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม สำหรับน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์มีผลต่อก่อตัว (Formation) ของการเกาะยึดของรอยต่อช่วงเพสต์และมวลรวม (Interfacial Transition Zone, ITZ) โดยมาจากองค์ประกอบในหมู่ C=C bending (697.79 cm^{-1}) และ C=O stretching (1729.77cm^{-1}) ที่มีผลต่อขั้วในด้านที่ยึดกับมวลรวมละเอียดที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของทรายแม่น้ำและแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในขณะที่คอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) โดยมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยตลอดอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.26, 8.66 และ 3.05 ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 1 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ซึ่งเป็นมาจากหมู่ฟังก์ชั่น S-O stretching (1637.80 cm^{-1}) ที่มีส่วนในเพิ่มการเกาะยึดกับ RCAF แต่ด้วยความเป็นประจุไฟฟ้าจากค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำประปาจึงมีผลต่อโครงสร้างของความมีเสถียรภาพของรอยต่อ ITZ ในช่วงวันแรก [14-17] อีกประเด็นหนึ่งที่ช่วยทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นคือ มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นของ RCAF กับน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ซึ่งส่วนที่ละเอียดที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เหลืออยู่เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะยึดอยู่ผิวและเสริมความแข็งแรงของ RCAF เพิ่มเติมด้วย ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2) มีผลต่ออัตราการลดลงสูงถึงร้อยละ 26.02 ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชั่น C-O stretching (1108.13 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 เมกะปาสคาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดลดลง โดยมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยตลอดอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยาเคลือบ

โพลิเมอร์ร้อยละ 41.48 และ 15.52 ของคอนกรีตผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ตามลำดับ โดยมีผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่น้อยกว่าเนื่องจาก RCAC มีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตที่ผสมการ RCAF แต่ประเด็นหนึ่งคือน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) มีผลกระทบต่อ NCA ที่เกิดแต่ธรรมชาติซึ่งเป็นหินปูนชนิดโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)$) [20] มากกว่าน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

สำหรับกรณีของคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) โดยคอนกรีตควบคุม (RCAC + RCAC) มีค่ากำลังอัด 41.59, 43.86, 45.53 และ 66.52 เมกะปาสคาล (MPa) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 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}) ในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) ของคอนกรีตทั้งที่ผสมและไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) ในช่วง 28 วัน ทั้งกรณีที่ผสม (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)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

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

(ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

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

(ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

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

(ง) เศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC)

- ไม่ผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)

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

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 (PA2)

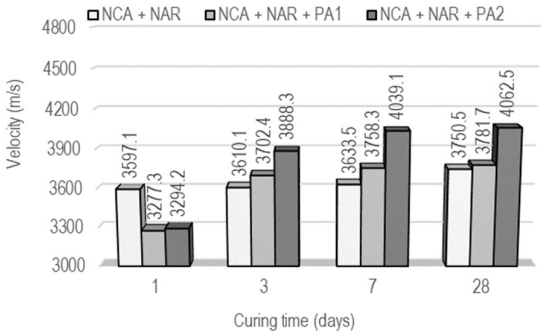
$$Com^{28d}_{PA2} = 31.763(1-\exp^{-2.18t}) \quad (12)$$

3.2 ความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยคลื่นความถี่สูง

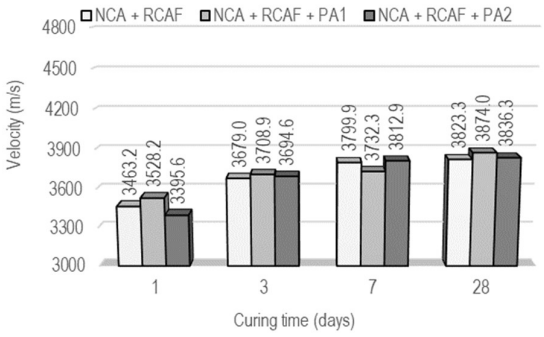
ความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยความเร็วของคลื่นความถี่สูง (5.4 กิโลเฮิรตซ์, kHz) แสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 4 พบว่าแนวโน้มของความเร็วคลื่นของคอนกรีตแต่ละประเภทได้แก่ (ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR) (ข) หินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ค) เศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR) และ (ง)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

จากผลการทดสอลจะพบข้อสังเกตในส่วนของความเร็วจองคลื่นที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ที่มีความเร็วของคลื่นที่สูงกว่าคอนกรีตปกติทั้งชนิดที่ผสม NCA, NAR, RCAF และ RCAC เนื่องจากน้ำยา

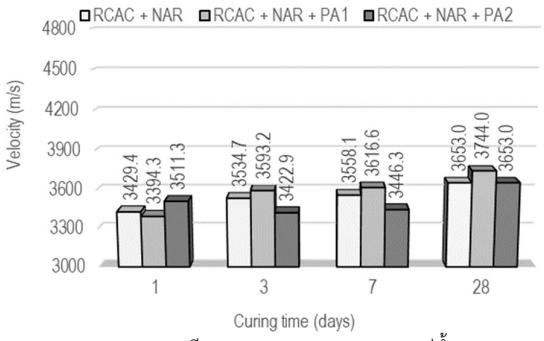
เติมเต็มรอยต่อระหว่างอนุภาคมวลรวมและยิ่งเห็นผลได้กับมวลรวมผ่านการบดที่ช่วยในการอุดช่องว่างที่ผิวได้ดี



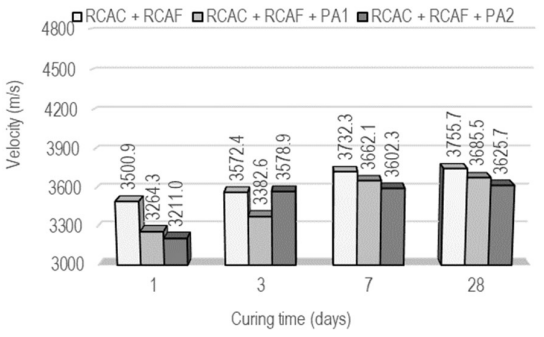
(ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR)



(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

จากผลการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์มีผลต่อความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตผสม (ก) หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR) (ข) คอนกรีตผสมหินปูนบด (NCA) และเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) (ค) คอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) และทรายแม่น้ำ (NAR) และ (ง) คอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และเศษคอนกรีตบดหยาบ (RCAC) อย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 2 ที่มีความเป็นกรดด่าง ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งสูงกว่าน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 และมีผลต่อการลดของการไหลแผ่ของคอนกรีตทุกกลุ่ม
- น้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ใช้ 2 ชนิดมีผลต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตปกติ (หินปูนบด (NCA) และทรายแม่น้ำ (NAR)) ที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงร้อยละ 18.04 และ 26.51 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม สำหรับน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1) และชนิดที่ 2 (PA2) แต่อย่างก็ตามคอนกรีตผสมเศษมวลรวมละเอียด (RCAF) และหินปูนบด (NCA) อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยาเคลือบโพลิเมอร์ชนิดที่ 1 (PA1)
- จากการประเมินความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) ของคอนกรีตแต่ละประเภทมีแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 28 วันแรก

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สัญญาเลขที่ N42A660379 นอกจากนั้นผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.รัศมี แสงสิริมงคลยิ่ง และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ

พระนคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (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). CO2-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.