

ลักษณะการยึดเกาะของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมละเอียดต่างชนิดกัน

Interfacial transition zone between geopolymer paste and several fine aggregates

ธวัชชัย โทอินทร์^{1,*} แสงสุรีย์ พังแดง² สุบรร ผลกะลิ³ สมหมาย สงบาง⁴ และ สิทธิศักดิ์ อันทะมาลา⁵

^{1,3,4,5} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม จ.นครพนม

*Corresponding author; E-mail address: tawatchai.to@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของการยึดเกาะกันระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และผิวของมวลรวมเป็นสิ่งที่สำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการยึดเกาะระหว่างเพสต์กับมวลรวมละเอียดหรือมวลรวมหยาบล้วนส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมครั้งนี้ ได้ทำการรวบรวมลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และมวลรวมละเอียดที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ทรายแม่น้ำ เศษคอนกรีตรีไซเคิล เศษหินปูนย่อย และเศษแก้ว โดยทำการตรวจสอบรอยต่อระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และผิวมวลรวมละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micro Scope) จากการตรวจสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสมให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมละเอียดและจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความที่บแน่นซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, วัสดุรีไซเคิล, โครงสร้างทางจุลภาค, แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวมวลรวม

Abstract

The study of the adhesion between geopolymer paste and the surface of aggregates, whether the adhesion between the paste and the fine or coarse aggregate is important and affects the compressive strength of geopolymer mortar or geopolymer concrete. In this test, the adhesion ability of geopolymer paste with total adhesion characteristics between geopolymer paste and different types of fine aggregates fragments, including river sand, recycled concrete, crushed limestone and crushed container glass by investigated the joints between geopolymer paste and fine aggregates surfaces using Scanning Electron Micro Scope. From the investigation, it was found that geopolymer

mortar with river sand as the mixture, providing the highest compressive strength. Because the adhesion between the fine aggregate and geopolymer paste is dense, which is consistent with the results of scanning electron microscopy.

Keywords: Geopolymer, Recycled aggregates, Microstructure, Interfacial transition zone

1. คำนำ

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ที่สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานก่อสร้างได้ ไม่ว่าจะเป็นงานผนังธรรมดา ผนังมวลเบา งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น คาน เสา พื้นจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากประโยชน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถให้กำลัง ความทนทาน และขึ้นรูปตามแบบหล่อได้เช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์ แต่วัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสาเหตุของสภาวะโลกร้อนได้ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้วัสดุตั้งต้นจากกระบวนการผลิต (By-product) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นอัญฐานของซิลิกาและอลูมินา เช่น ถ่านลอย ตะกรัน ถลุงเหล็ก ทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง เช่น สารละลายไฮดรอกไซด์ สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ได้วัสดุประสานที่เป็นผลจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน [1] ยึดเหนี่ยวกับมวลรวม ในขณะที่วัสดุประสานประเภทซีเมนต์เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เห็นได้ชัดเจนว่าความสามารถในการยึดเกาะของเพสต์กับมวลรวมมีความสำคัญต่อความแข็งแรงและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตธรรมดา ในการศึกษาความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเพสต์และมวลรวมนั้น โดยทั่วไปมีการศึกษาในระดับโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณที่เรียกว่า Interfacial transition zone หรือ ITZ วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีการศึกษาการยึดเหนี่ยวบริเวณ ITZ ไม่มากนัก เช่นมีการศึกษาเปรียบเทียบการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และมวลรวมที่เป็นหินปูนย่อยและหินแกรนิต พบว่ามีการสะสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์บริเวณ ITZ ที่มีความพรุน [2] ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อความที่บแน่น (Densed) ของจีโอโพลิเมอร์เจลบริเวณ ITZ เพิ่มขึ้น [3] และการที่บริเวณ ITZ ไม่ถูกทำลายทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความแข็งแรงเช่นเดียวกัน [4, 5] อย่างไรก็ตามสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพรุนความแข็งแรงไม่ได้

ขึ้นตรงต่อการยึดเหนี่ยวบริเวณ ITZ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมวลรวมที่เป็นเศษคอนกรีตเนื่องจากการแตกร้าวทะลุผ่านเนื้อมวลรวมไม่ได้แตกร้าวตามแนวของผิวมวลรวม [6]

มวลรวมในงานคอนกรีตเป็นส่วนผสมที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักได้ของคอนกรีตตลอดจนความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากอุณหภูมิ [7] ในขณะที่มวลรวมธรรมชาติมีความเสี่ยงต่อการขาดแคลน การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยวัสดุเหลือทิ้งหรือแม้กระทั่งขยะที่เกิดจากงานก่อสร้างเป็นสิ่งที่ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งใช้แทนที่ในมวลรวมบางส่วนและใช้เป็นมวลรวมทั้งจำนวน จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งหรือขยะจากงานก่อสร้างสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีได้ [8-10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีละเอียดยุทธศาสตร์ ได้แก่ทรายแม่น้ำ เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีมวลรวมละเอียดจากเศษวัสดุก่อสร้างต่างชนิดกัน ได้แก่ เศษคอนกรีตย่อยและเศษหินปูนย่อย เนื่องจากเศษวัสดุเหล่านี้เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในปริมาณมากในกระบวนการก่อสร้าง และมวลรวมละเอียดที่เป็นเศษขวดแก้วย่อย เนื่องจากเศษแก้วมีความแข็งแรงและมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาเช่นเดียวกับทรายแม่น้ำ โดยใช้ผลการศึกษากาการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

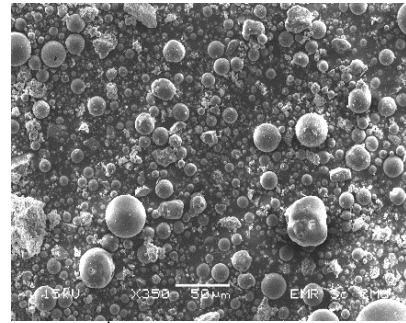
2. วัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุ

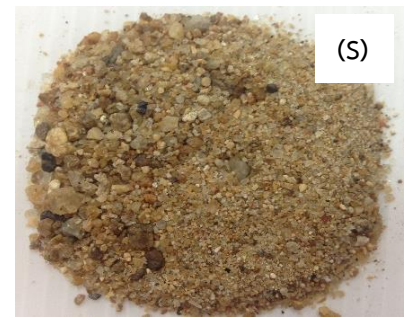
เถ้าลอย (Fly ash, FA) เป็นเถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูง แสดงดังตารางที่ 1 ลักษณะค่อนข้างกลม จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 45 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 1 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารชะละลายซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ส่วนมวลรวมละเอียดใช้เป็นทรายแม่น้ำ (S) และวัสดุรีไซเคิล ได้แก่ ทรายย่อยเศษคอนกรีตรีไซเคิล (C), เศษขวดแก้ว (G), และ เศษหินปูนย่อย (L) ดังรูปที่ 2 ให้มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus, FM) ใกล้เคียงกัน (FM=2.82 โดยประมาณ) โดยควบคุมการกระจายตัวให้อยู่ภายใต้เงื่อนไข ASTM C33 [11] ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

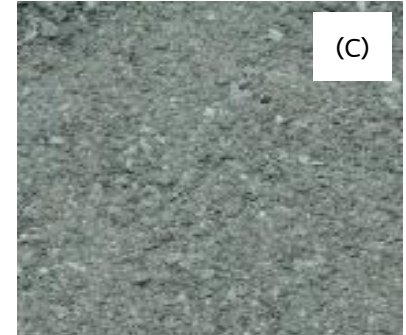
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%wt.)	องค์ประกอบ	ปริมาณ (%wt.)
SiO ₂	35.86	Fe ₂ O ₃	17.31
Al ₂ O ₃	15.05	SO ₃	5.94
MgO	2.34	P ₂ O ₅	0.30
CaO	17.16	TiO ₂	-
Na ₂ O	1.58	BaO	0.17
K ₂ O	3.12	LOI	0.10



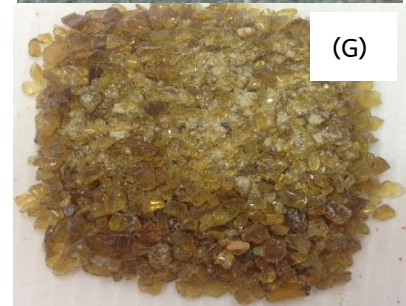
รูปที่ 1 ลักษณะของอนุภาคเถ้าลอย



(S)



(C)

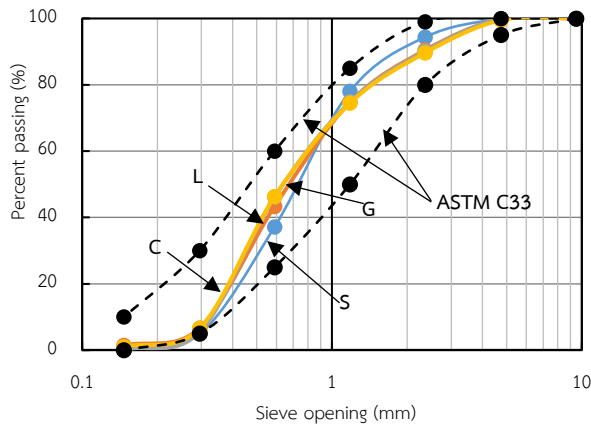


(G)



(L)

รูปที่ 2 ลักษณะของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 3 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียด

2.2 การทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถเตรียมได้จากสัดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 โดยคนที่อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถ้ำลอยและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1.00 และ 0.50 ตามลำดับ และอัตราส่วนถ้ำลอยต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดได้จากการผสมถ้ำลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 5 นาที เติมน้ำมวลรวมละเอียดที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมต่อเนื่องจนกระทั่งครบ 10 นาที นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ได้บรรจุลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิ 25-28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและนำเข้าตู้อบร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แกะแบบหล่อแล้วหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกอีกครั้งแล้วเก็บตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23-25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50% จนกระทั่งอายุครบ 28 วัน

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์**

ตัวอย่าง	ปริมาณ (กรัม)						
	FA	NH	NS	S	C	G	L
Control	250	156.25	93.75	687.5			
MC	250	156.25	93.75		687.5		
MG	250	156.25	93.75			687.5	
ML	250	156.25	93.75				687.5

** อัตราส่วนสารละลายต่อถ้ำลอยเท่ากับ 1.00 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.60

2.2.2 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [12]

2.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดำเนินการโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

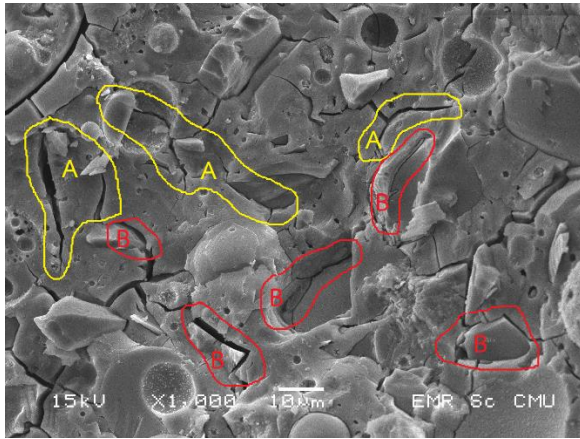
จากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีมวลรวมละเอียดต่างกัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 48 เมกะปาสคาล และค่าต่ำสุดเท่ากับ 36 เมกะปาสคาล ได้แก่ ตัวอย่าง Control และ MG ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 เนื่องจากลักษณะของเศษขูดแก้วย่อยมีความเรียบและลื่นทำให้การยึดเกาะของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และเศษขูดแก้วย่อยไม่ดีส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำที่สุดในขณะที่ตัวอย่าง MC และ ML มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันอย่างมาก มีนัยสำคัญ โดยมีค่าเท่ากับ 43 และ 41 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด มีผิวที่ค่อนข้างขรุขระมากกว่าเศษขูดแก้วย่อยทำให้มีการยึดเกาะกันระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และผิวมวลรวมละเอียดได้ดีและจากลักษณะทางกายภาพว่าเศษคอนกรีตมีพื้นผิวมากกว่าเศษหินปูนย่อย นอกจากนั้นอาจจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอีกครั้งจากเศษมอร์ตาร์เก่าที่เกาะบนผิวหินปูนย่อยเดิมกับน้ำที่มีอยู่ในสารละลายทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง MC มีค่ามากกว่า ML

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 28 วัน

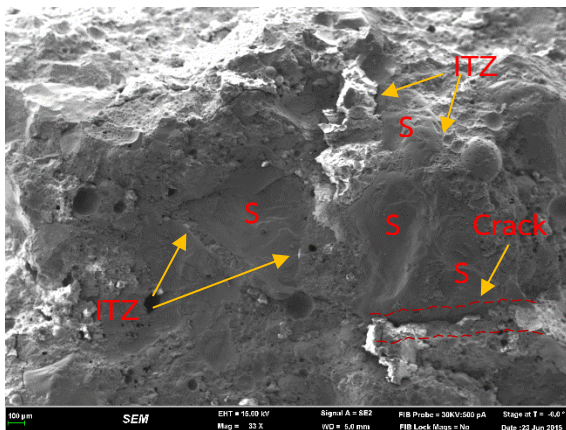
ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ร้อยละ**	แตกต่าง**
Control	48	100	0
MC	43	89.58	-10.42
MG	36	75.00	-25
ML	41	85.42	-14.58

**เมื่อเปรียบเทียบกับ Control

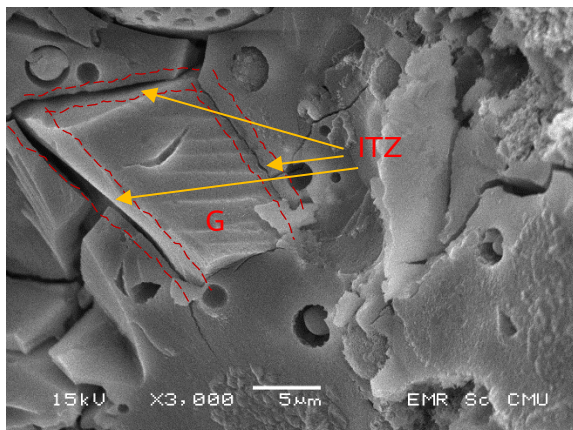
นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคเบื้องต้นบริเวณรอยต่อระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และผิวของมวลรวมละเอียด (Interfacial transition zone, ITZ) ด้วยวิธี SEM พบว่าการแตกร้าวของตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การแตกร้าวที่จีโอโพลิเมอร์เพสต์ (A) และการแตกร้าวที่บริเวณ ITZ (B) ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าการแตกร้าวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทั้งหมดเกิดขึ้นทั้งสองลักษณะ โดยการแตกร้าวของ control พบได้น้อยที่สุด ดังรูปที่ 5 ในขณะที่ MC, ML และ MG มีปริมาณรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามลำดับ สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งรอยร้าวบริเวณ ITZ ของ MG ลักษณะของการหลุดร่อนที่เป็นตลอดทั้งผิวของเศษขูดแก้วย่อย ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไม่สามารถยึดเกาะกับมวลรวมละเอียดที่เป็นเศษขูดแก้วได้ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4 การแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 5 ITZ ระหว่างทรายแม่น้ำและจีโอโพลิเมอร์เพสต์



รูปที่ 6 ITZ ระหว่างเศษขวดแก้วและจีโอโพลิเมอร์เพสต์

สำหรับ MC และ ML พบว่าการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันกับ Control แต่มีปริมาณรอยแตกร้าวบริเวณ ITZ มากกว่า มีความเป็นไปได้ว่าเศษมอร์ตาร์เก่าจากคอนกรีตเก่ามีความไม่แข็งแรงแม้จะมีพื้นที่ผิวมาก แต่อาจเกิดการแตกและหลุดร่อนออกจากหินปูนย่อยเดิมทำให้มีการเพิ่มขึ้นของส่วนละเอียดที่ไม่แข็งแรงจากเศษมอร์ตาร์เก่าที่มีความพรุน ในขณะที่ ML การแตกร้าวบริเวณ ITZ เป็นผลจากการเกิดช่องว่างใต้แผ่นของเศษ

หินปูนย่อยเนื่องจากมีน้ำคั่งค้างได้มวลรวมรวมที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนจำนวนมาก

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และมวลรวมละเอียดต่างชนิดกัน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมรวมและการยึดเหนี่ยวบริเวณ Interfacial transition zone ที่แข็งแรง
- ปริมาณการแตกร้าวที่ Interfacial transition zone เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
- ความแข็งแรงของเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์และผิวมวลรวมละเอียด
- เศษคอนกรีตย่อย เศษขวดแก้วย่อยและเศษหินปูนย่อย สามารถใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและฝึกอบรมระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J., ed. *Proceedings of the World Congress Geopolymer*. 2005: Saint Quentin, France 69-73.
- [2] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S. (2007). Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cement and Concrete Research*. 37(6): pp. 933-941.
- [3] Wang, Q. and Gu, W.W. (2009). Advances in research on nanotechnology for enhancing the absorption of poorly water-soluble drugs. *Pharmaceutical Care and Research*. 9(1): pp. 48-51.
- [4] Embong, R., Kusbiantoro, A., Shafiq, N., and Nuruddin, M.F. (2016). Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 112: pp. 816-822.
- [5] Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J. (2004). The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers. *Cement and Concrete Research*. 34(2): pp. 195-206.

- [6] Sata, V., Wongs, A., and Chindapasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 42: pp. 33-39.
- [7] Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* Pearson Education Limited, pp.
- [8] Mesgari, S., Akbarnezhad, A., and Xiao, J.Z. (2020). Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 236: pp. 117571.
- [9] Nuaklong, P., Sata, V., and Chindapasirt, P. (2018). Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*. 161: pp. 365-373.
- [10] Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., and Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*. 164: pp. 179-190.
- [11] ASTM C33 / C33M-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International West Conshohocken, PA.
- [12] ASTM C109 / C109M-20a. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International: West Conshohocken, PA.