

Compressive Strength and Microstructure of Cement Paste Containing Car Glass Powder

กำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมผงกระจกรถยนต์

เปมิกา ทองฤทธิ์¹ อัมพล วงศ์ษา^{2*} วันชัย สะตะ³ ปริญา จินดาประเสริฐ⁴

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ARTICLE INFO:

Received July 2, 2021

Received Revised Form:

July 12, 2021

Accepted: July 19, 2021

ABSTRACT:

This research aims to study the effect of fineness and contents of car glass powder (CGP) on the properties of cement paste. Coarse and fine car glass powders with median particle sizes of 26.5 and 12.6 μm , respectively, were used to replace Portland cement at 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by weight. The water to binder ratio of 0.35 was used for all the blended cement paste mixtures. The properties of cement paste including setting time, flow, compressive strength, and microstructure analysis were studied. The compressive strengths increased with the increase in CGP fineness while the increase of CGP contents significantly reduced the 7- and 28-day compressive strengths. The microstructure analysis of cement pastes at 28 days pointed out that the denseness and homogeneity of cement pastes decreased with the increase in CGP contents. However, the cement pastes containing 10-40% CGP produced a similar 90-day compressive strength to the control cement paste.

KEYWORDS: Cement paste, Car glass powder, Compressive strength, Microstructure

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความละเอียดและปริมาณผงกระจกรถยนต์ที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้ผงกระจกรถยนต์หยาบและละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 26.5 และ 12.6 ไมโครเมตรแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ในทุกอัตราส่วนผสม ทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ ผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของผงกระจกรถยนต์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงกระจกรถยนต์ในส่วนผสมจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วันมีค่าลดลง จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วันพบว่า การเพิ่มขึ้นของผงกระจกรถยนต์ในส่วนผสมจะส่งผลให้ความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของซีเมนต์เพสต์ลดลง อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกรถยนต์ละเอียดร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

*Corresponding Author,

Email address: ampowo@kku.ac.th

คำสำคัญ: ซีเมนต์เพสต์, ผงกระจกรถยนต์, กำลังรับแรงอัด, โครงสร้างทางจุลภาค

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้เป็นตัวยึดประสานวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในการผลิตเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 0.7-1.0 ตัน [1] ซึ่งส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากมาย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะวิจัยและพัฒนาวัสดุทดแทนใหม่ ๆ มาใช้งานแทนปูนซีเมนต์บางส่วนและเป็นแนวทางในการลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมให้น้อยลง

กระจกเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีการผลิตเพื่อนำมาใช้ในงานในด้านต่างๆ ในชีวิตประจำวัน รวมถึงในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ได้มีการนำกระจกมาเป็นส่วนประกอบที่พบเห็นได้ทั่วไปคือกระจกรถยนต์หรือกระจกนิรภัย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ กระจกเทมเปอร์ (Tempered Glass) และกระจกลามิเนต (Laminate Glass) โดยกระจกเทมเปอร์เกิดจากการนำกระจกธรรมดาตามอบด้วยความร้อนและทำให้เย็นลงด้วยการเป่าลม ส่วนกระจกลามิเนตประกอบไปด้วยกระจกเทมเปอร์ 2 แผ่นมาประกบกันแล้วขึ้นกลางด้วยแผ่นฟิล์ม PVB (Poly Vinyl Butyral) [2] เมื่อกระจกรถยนต์เหล่านั้นได้รับความเสียหาย มักจะถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม [3] เพราะกระจกเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยตัวเองตามธรรมชาติ [4] นอกจากนี้สถานการณ์ขยะมูลฝอยในปี 2557 ยังพบว่าประเทศไทยมีขยะมูลฝอยประเภทแก้วประมาณ 2.4 ล้านตันและมีเพียงร้อยละ 59 เท่านั้นที่ถูกนำมารีไซเคิล [5] จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำเศษกระจกรถยนต์เหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ใหม่อีกครั้ง เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณให้น้อยลง และเพิ่มมูลค่าเศษกระจกรถยนต์ให้มากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผงแก้วที่ได้จากขวดภาชนะสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้สูงที่สุดที่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก [6-8] โดยวัสดุซีเมนต์ที่มีผงแก้วเป็นส่วนผสมมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น [9] เนื่องจากผงแก้วบดละเอียดมีปริมาณของซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและอยู่ในรูปอสัณฐานในปริมาณที่สูง จึงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ง่าย ส่งผลให้วัสดุซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น [10]

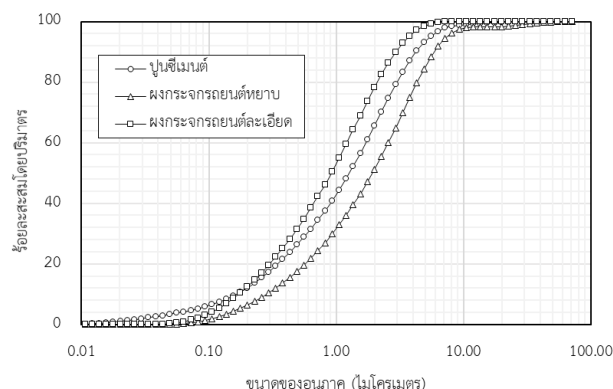
ในกรณีของการใช้ผงกระจกรถยนต์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือเป็นวัสดุทดแทนในการก่อสร้างยังมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ผงกระจกรถยนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตซีเมนต์เพสต์ เพื่อทดสอบระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ได้แก่ การกระจายขนาดของโพรงช่องว่าง ภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐาน องค์ประกอบแร่ และการตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลรวม โดยหวังว่าข้อมูลที่ได้จะเป็นแนวทางในการนำเศษกระจกรถยนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุ

ทางเลือกชนิดใหม่ทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของโลก อีกทั้งยังเป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าให้กับเศษกระจกรถยนต์อีกด้วย

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [11] และผงกระจกรถยนต์ที่ได้จากการนำกระจกรถยนต์ประเภทเทมเปอร์ (Tempered Glass) มาผ่านกระบวนการบดละเอียดด้วยเครื่องบอลมิลล์และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ให้มีความละเอียดต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ ผงกระจกรถยนต์หยาบ (C) และผงกระจกรถยนต์ละเอียด (F) ซึ่งมีปริมาณร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 25.0 และ 2.2 ตามลำดับ การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุทั้งสองแสดงในรูปที่ 1 พบว่าผงกระจกรถยนต์หยาบมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และผงกระจกรถยนต์ละเอียด ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 1

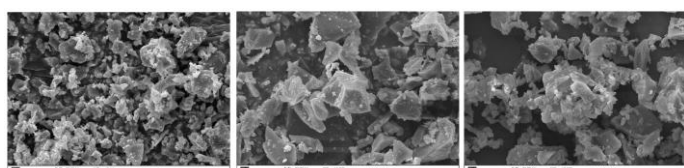


รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าผงกระจกรถยนต์หยาบ (C) และผงกระจกรถยนต์ละเอียด (F) มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน โดยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักและมี Na_2O และ CaO เป็นองค์ประกอบรอง โดยสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ N ของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 - 19 [12] เนื่องจากมีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 71.75 และ 70.52 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 10.0 แม้ว่าผงกระจกรถยนต์หยาบ (C) และผงกระจกรถยนต์ละเอียด (F) ในการศึกษาครั้งนี้จะมี Na_2O เป็นองค์ประกอบรองร้อยละ 15.05 และ 14.57 ตามลำดับ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali Silica Reaction) [13] ได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่าผงแก้วที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 300 ไมโครเมตรจะสามารถช่วยลดการขยายตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ [14] และถ้า

ผงแก้วที่มีความละเอียดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตรจะไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีต [15]

โครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์และผงกระจกกรดยนต์แสดงดังในรูปที่ 2 พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงกระจกกรดยนต์มีอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการบดเพื่อให้มีขนาดเล็กลง สำหรับโครงสร้างผลึกของสารประกอบในวัสดุแสดงดังในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปรากฏผลึก Calcium silicate (Ca_3SiO_5 ; CS) เป็นหลัก ในขณะที่ผงกระจกกรดยนต์จะมีความเป็นอสัณฐานสูง (Amorphous phase) [16-18] ซึ่งจะเห็นได้จากความโค้งของเส้นกราฟที่แสดงในช่วง $18-38^\circ 2\theta$ และปรากฏฟีกของผลึก Quartz (SiO_2) ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) ผงกระจกกรดยนต์หยาบ (ค) ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด

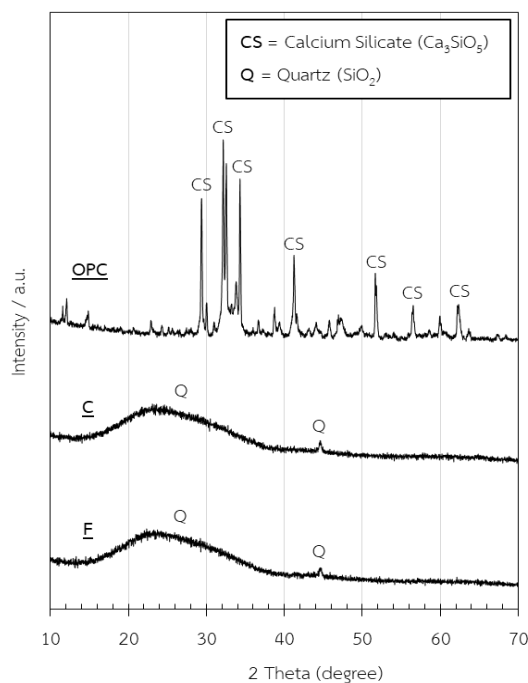
รูปที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ (OPC)	ผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C)	ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F)
ความถ่วงจำเพาะ	3.16	2.58	2.58
ร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325	2.0	25.0	2.2
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	17.4	26.5	12.6

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ (OPC)	ผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C)	ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F)
SiO_2	20.63	69.14	68.23
Al_2O_3	4.70	1.39	1.11
Fe_2O_3	4.09	1.22	1.18
CaO	62.35	8.39	8.26
MgO	1.21	4.17	4.06
SO_3	2.64	0.20	0.19
Na_2O	0.23	15.05	14.57
K_2O	0.49	0.25	0.21
TiO_2	0.24	0.06	0.05
P_2O_5	0.09	< 0.01	< 0.01
LOI	3.16	0.01	2.04



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบในปูนซีเมนต์ (OPC) ผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) และผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F)

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ (กรัม)

	ปูนซีเมนต์	ผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C)	ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F)	น้ำ
Control	100	-	-	35
10C	90	10	-	35
20C	80	20	-	35
30C	70	30	-	35
40C	60	40	-	35
10F	90	-	10	35
20F	80	-	20	35
30F	70	-	30	35
40F	60	-	40	35

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์แสดงดังตารางที่ 3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ในทุกส่วนผสม แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก นำปูนซีเมนต์และผงกระจกกรดยนต์ผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดให้เข้ากัน จากนั้นทำการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-99 [19] เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างเทลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น ทั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบ จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มน้ำปูนขาวอมตัวจนกระทั่งตัวอย่างถึงอายุวันทดสอบ

2.3 การทดสอบ

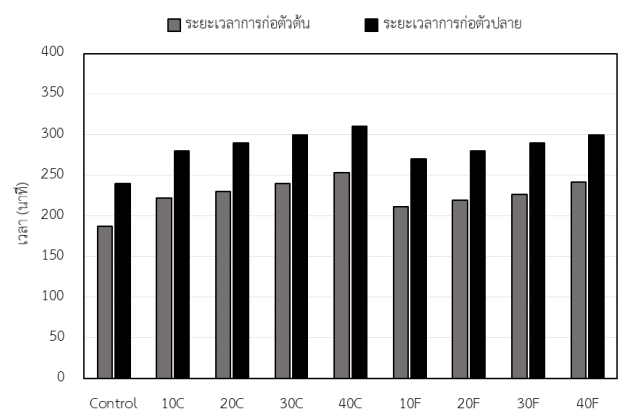
ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C191-99 [20] โดยใช้เครื่องทดสอบไวแคต (Vicat needle) การไหลแผ่ (flow table) ตามมาตรฐาน ASTM C1437-01 [21] กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [22] ทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย และการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ได้แก่ การกระจายขนาดของโพรงช่องว่าง ภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐาน องค์ประกอบแร่ และการตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลรวม

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์เป็นส่วนผสมแสดงในรูปที่ 4 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการแทนที่ผงกระจกกรดยนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดต่ำลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดร

ชันลดลงตามไปด้วย [23] ซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์เป็นส่วนผสมจึงมีระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มมากขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าในส่วนของผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 22 28 และ 35 ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 21 25 และ 29 ตามลำดับ ในขณะที่ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F) มีระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 17 21 และ 29 ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 13 17 21 และ 25 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผงกระจกกรดยนต์ละเอียดมีระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายที่น้อยกว่าผงกระจกกรดยนต์หยาบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Lu และคณะ [6] ที่ได้ทำการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วที่มีขนาดแตกต่างกัน และผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มลดลงตามขนาดของผงแก้วที่ละเอียดขึ้น

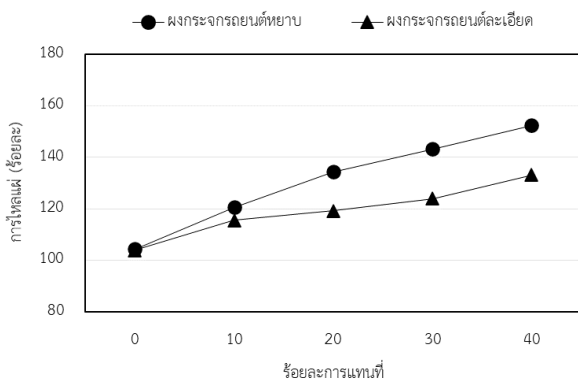


รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

3.2 การไหลแผ่ของซีเมนต์เพสต์

ความสามารถในการทำงานได้จากการทดสอบค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์เป็นส่วนผสมแสดงในรูปที่

5 พบว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าในส่วนของผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) มีค่าการไหลแผ่เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 16 29 38 และ 47 ตามลำดับ ในขณะที่ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F) มีค่าการไหลแผ่เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 11 15 19 และ 28 ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ผงกระจกกรดยนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลงและด้วยลักษณะผิวของผงกระจกกรดยนต์ที่มีความเรียบและไม่ดูดซึมน้ำ จึงทำให้มีน้ำในส่วนผสมมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Schwarz. และคณะ [24] นอกจากนี้ยังพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์หยาบเป็นส่วนผสมมีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสม เนื่องจากความละเอียดของผงกระจกกรดยนต์ที่มีมากกว่าและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีความต้องการน้ำไปเคลือบผิวมากขึ้น และประกอบกับความเป็นเกลี้ยงมุมของผงกระจกกรดยนต์ละเอียดที่มีเพิ่มขึ้น จึงเกิดการขัดกันของอนุภาคซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของผงกระจกกรดยนต์ละเอียดลดลง [25]

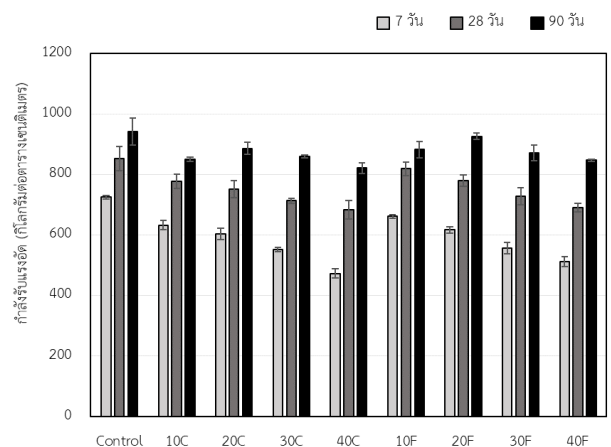


รูปที่ 5 การไหลแผ่ของซีเมนต์เพสต์

3.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์เป็นส่วนผสมแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ในระบบที่ลดลง ส่งผลให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามไปด้วย [23] โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าในส่วนของผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) มีค่ากำลังรับแรงอัดเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุ 7 วัน คิดเป็นร้อยละ 87 83 76 และ 65 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 91 88 84 และ 80 ตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 90 94 91 และ 87 ตามลำดับ ในขณะที่ผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F) มีค่ากำลัง

รับแรงอัดเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุ 7 วัน คิดเป็นร้อยละ 91 85 77 และ 71 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 96 91 85 และ 81 ตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 94 98 93 และ 90 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าซีเมนต์เพสต์มีการพัฒนากำลังมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F) มีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) เนื่องจากผงกระจกกรดยนต์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าผงกระจกกรดยนต์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และอนุภาคขนาดเล็กยังสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในเนื้อของซีเมนต์เพสต์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้น และส่งผลให้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้น [26] จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่าผงกระจกกรดยนต์ละเอียดสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม ซึ่งเป็นปริมาณที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนปูนซีเมนต์สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างได้

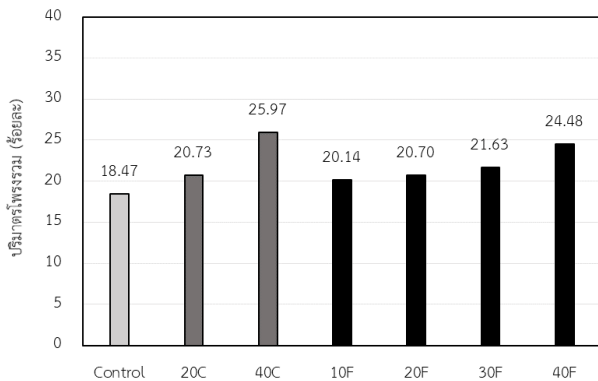


รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

3.4 ปริมาตรโพรงรวมและการกระจายขนาดโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

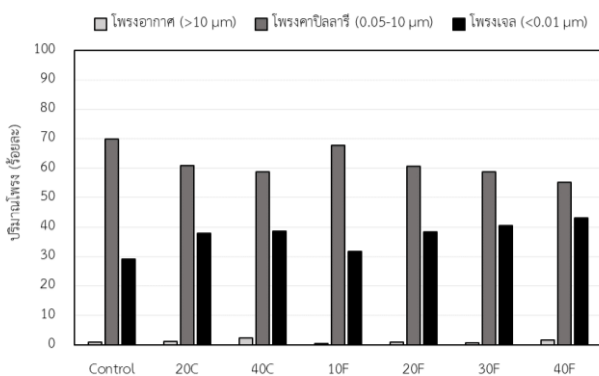
ปริมาตรโพรงรวมของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์เป็นส่วนผสมแสดงในรูปที่ 7 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาตรโพรงรวมเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์หยาบ (C) ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก มีปริมาตรโพรงรวมเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.2 และ 40.6 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ละเอียด (F) ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก มีปริมาตรโพรงรวมเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.1 12.1 17.1 และ 32.5ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในปริมาณการแทนที่ที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก การใช้ผงกระจกกรดยนต์ละเอียดจะมีปริมาตรของโพรงรวมที่น้อยกว่าการใช้ผงกระจก

รถยนต์หยาบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันในข้างต้นที่มีค่าลดลงตามปริมาณผงกระจกรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและการใช้ผงกระจกรถยนต์ละเอียดให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าการใช้ผงกระจกรถยนต์หยาบ



รูปที่ 7 ปริมาตรโพรงรวมของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบการกระจายขนาดโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าโพรงอากาศ โพรงคาปิลลารี และโพรงเจลของซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีปริมาตรร้อยละ 1.01, 69.96 และ 29.03 ของปริมาตรโพรงรวม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกรถยนต์หยาบ (C) และผงกระจกรถยนต์ละเอียด (F) ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้โพรงคาปิลลารีมีปริมาตรลดลง ในขณะที่โพรงเจลมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการพัฒนาของกำลังที่ดีขึ้น [27] แม้ว่าอนุภาคขนาดเล็กของผงกระจกรถยนต์ละเอียดจะสามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ส่งผลให้ปริมาตรโพรงคาปิลลารีลดลงได้ แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงอากาศและปริมาตรโพรงรวม จึงส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันลดลงตามไปด้วย

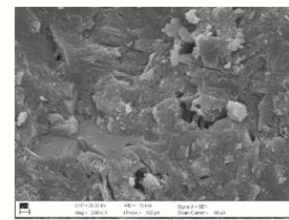


รูปที่ 8 การกระจายขนาดโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

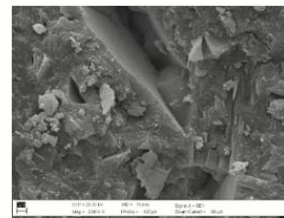
3.5 โครงสร้างทางสัณฐานของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกรถยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสม

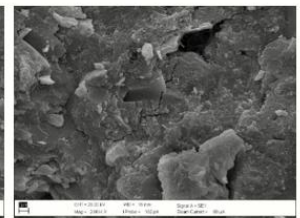
ที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าลักษณะเนื้อของซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีความแน่นตัวและเป็นเนื้อเดียวกันดี เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกรถยนต์ละเอียดในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซีเมนต์เพสต์จะมีลักษณะความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง สำหรับการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะปรากฏเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่มีความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ลดลง จะส่งผลให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย สอดคล้องกับความแข็งแรงที่ลดลงดังแสดงในผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน



(n) Control



(ข) 20F

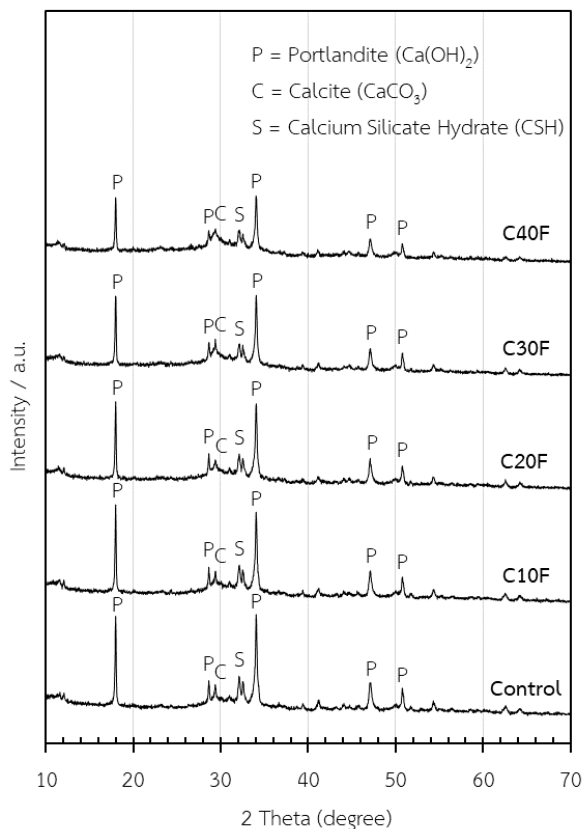


(ค) 40F

รูปที่ 9 โครงสร้างทางสัณฐานของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

3.6 โครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกรถยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมประกอบไปด้วยผลึกของ Portlandite (Ca(OH)_2 ; P), Calcium Silicate Hydrate (CSH; S) และ Calcite (CaCO_3 ; C) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจะปรากฏ Portlandite ที่ 18.29° , 34.47° และ 51.02° 2theta Calcium Silicate Hydrate ที่ 32.02° 2theta และ Calcite ที่ 29.02° 2theta สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกรถยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสมจะมีโครงสร้างผลึกที่คล้ายคลึงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกรถยนต์ละเอียดในซีเมนต์เพสต์พบว่า Portlandite และ Calcium Silicate Hydrate ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [28] มีปริมาณลดลงตามปริมาณการแทนที่ของผงกระจกรถยนต์ละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันที่มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของผงกระจกรถยนต์ละเอียด

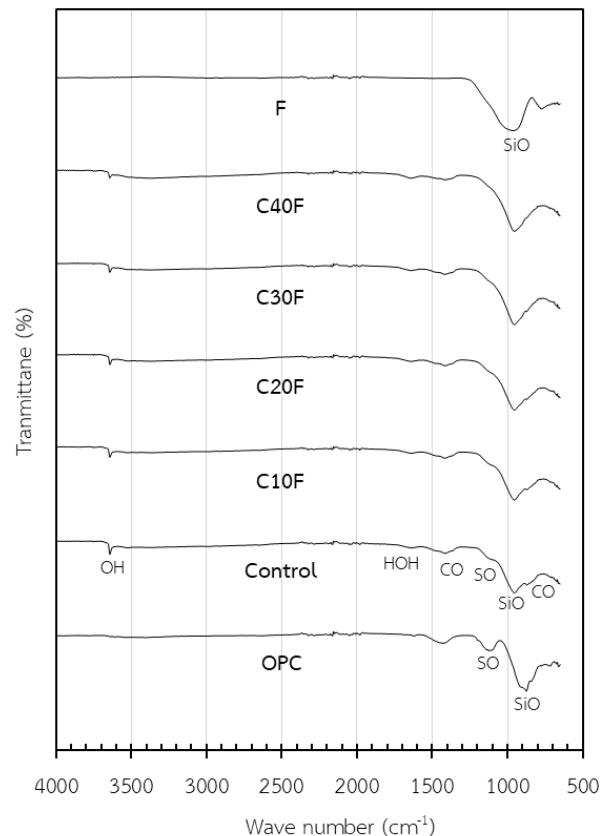


รูปที่ 10 โครงสร้างผลึกของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์
ที่อายุ 28 วัน

3.6 โครงสร้างผลึกของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลรวมของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงกระจกกรดยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วันแสดงดังรูปที่ 11 พบว่าในช่วงที่ 1700 – 1600 เซนติเมตร⁻¹ ปรากฏการสั่นแบบงอของพันธะ H – O – H (H – O – H bending) ซึ่งเป็นพันธะที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำ [29] และเมื่อพิจารณาพันธะที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์พบว่าปูนซีเมนต์ปรากฏพันธะ Si – O (Si – O asymmetric) ที่ช่วง 920 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นพันธะที่อยู่ในองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ในรูปของ C₃S และ C₂S โดยพันธะได้เกิดการเปลี่ยนแปลงและปรากฏที่ช่วง 950 เซนติเมตร⁻¹ ในรูปของ CSH ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ [30] สำหรับพันธะ S – O (S – O band) ที่ปรากฏในช่วง 1100 – 1160 เซนติเมตร⁻¹ นั้นมีอยู่ในโมเลกุลของ SO₄²⁻ ซึ่งมากจากยิปซัมที่อยู่ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และพันธะ C – O (C – O stretching) ที่ปรากฏในช่วง 1420 และ 880 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งมาจาก CO₃²⁻ ในคาร์บอนेटที่อยู่รูป CaCO₃ [31] สำหรับช่วง 3641 เซนติเมตร⁻¹ ปรากฏพันธะของ O – H stretching ที่อยู่ในโมเลกุลของ Ca(OH)₂ [32] มีปริมาณลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ลดลง ส่งผลให้

ความสามารถในการรับแรงลดลงสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 11 โครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลรวมของ
ปูนซีเมนต์ ผงกระจกกรดยนต์ละเอียดและซีเมนต์เพสต์
ที่อายุ 28 วัน

4. สรุปผล

จากการศึกษาพบว่าความละเอียดของผงกระจกกรดยนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและการไหลแผ่ลดลง ในขณะที่กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของผงกระจกกรดยนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและการไหลแผ่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วันมีแนวโน้มลดลง โดยการศึกษาโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของซีเมนต์เพสต์ลดลง และผลึกของ Ca(OH)₂ และ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่อายุต้นของซีเมนต์เพสต์ลดลง อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกกรดยนต์ละเอียดในปริมาณร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังรับแรงอัดที่อายุปลาย (90 วัน) มีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ทุนอัจฉริยะภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ (สัญญาเลขที่ N41A640107) ทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนในการจัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบและศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Humphreys, and M. Mahasen, "Toward a Sustainable Cement Industry. Substudy 8, Climate Change", in World Business Council for Sustainable Development. 2002.
- [2] One Stock Home, "The difference of safety glass," [Online]. Available: https://www.onestockhome.com/th/homemap_contents/18024258/laminated-and-tempered-glass
- [3] L. Pereira-De-Oliveira, J. Castro-Gomes, and P. Santos, "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components," Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 192-203, 2012.
- [4] Clean up Australia, "Glass Recycling Fact Sheet," [Online]. Available: https://irp-cdn.multiscreensite.com/ed061800/files/uploaded/clean_up_australia_glass_recycling_factsheet-2017.pdf
- [5] Pollution control department, "Pollution situation of Thailand in 2014 Report," [Online]. Available: <https://www.pcd.go.th/publication/8387/>
- [6] J. Lu, Z. Duan, and C. Poon, "Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet," Construction and Building Materials, vol. 131, pp. 793-799, 2017.
- [7] A. Korjakins, G. Shakhmenko, D. Bajare, and G. Bumanis, "Effect of Ground Glass Fineness on Physical and Mechanical Properties of Concrete," In Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), 2012.
- [8] A. Aliabdo, A. Abd Elmoaty, and A. Aboshama, "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete," Construction and Building Materials, vol. 124, pp. 866-866, 2016.
- [9] V. Veena Bhat, and N. Bhavanishankar Rao, "Influence of Glass Powder on the Properties of Concrete," International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), vol. 16, pp. 196-199, 2014.
- [10] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 987-993, 2005.
- [11] Standard Specification for Portland Cement, ASTM C150-00, 2001.
- [12] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw of Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618-19, 2019.
- [13] A. Karamberi, and A. Moutsatsou, "Participation of coloured glass cullet in cementitious materials," Cement and Concrete Composites, vol. 27, pp. 319-327, 2005.
- [14] C. Meyer, S. Baxter, and W. Jin, "Alkali-silica reaction in concrete with waste glass as aggregate, in Chong KP, editor, Materials for a new millennium, Proceedings of ASCE materials engineering conference," Washington, DC, pp. 1388-1394, 1996.
- [15] C. Johnston, "WASTE GLASS AS COARSE AGGREGATE FOR CONCRETE," Journal of Testing and Evaluation, vol. 2, pp. 344-350, 1974.
- [16] J. Ortega, V. Letelier, M. Miró, G. Moriconi, M. Ángel Climent, and I. Sánchez, "Influence of waste glass powder addition on the pore structure and service properties of cement mortars," Sustainability, Switzerland, vol. 10, 2018.
- [17] S. Kim, and H. Yang, "Utilization of liquid crystal display (LCD) waste glass powder as cementitious binder in mortar for enhancing neutron shielding performance," Construction and Building Materials, vol. 270, 121859, 2021.
- [18] M. Kamali, and A. Ghahremaninezhad, "Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials," Construction and Building Materials, vol. 98, pp. 407-416, 2015.
- [19] Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM C305-99, 2002.

- [20] *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-99, 2001.
- [21] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM C1437-07, 2007.
- [22] *Standard Test Method Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M, 2021.
- [23] G. Bye, "Introduction and composition of Portland cement," *Portland Cement: Composition, Production and Properties*, 2nd Edition, 1999.
- [24] N. Schwarz, M. DuBois, and N. Neithalath, "Electrical conductivity-based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 656-666, 2007.
- [25] S. Banjongliang, "Potential of glass powder as pozzolanic materials," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2006.
- [26] A. Khmiri, M. Chaabouni, and B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 74-80, 2013.
- [27] L. Lam, Y. Wong, and C. Poon, "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 747-756, 2000.
- [28] A. Elahi, Q. Khan, S. Barbhuiya, P. Basheer, and M. Russell, "Hydration Characteristics of Cement Paste Containing Supplementary Cementitious Materials," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 37, pp. 535-544, 2012.
- [29] D. Vaičiukyniene, G. Skripkiunas, M. Daukšys, and V. Sasnauskas, "Cement hydration with zeolite-based additive," *Chemija*, vol. 24, 2013.
- [30] K. Kupwade-Patil, S. Palkovic, A. Bumajdad, C. Soriano, and O. Büyükköztürk, "Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography," *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 574-590, 2018.
- [31] A. Loykaew, and S. Utara, "Effect of acidic and sulfated environments on phase transformation, compressive strength and microstructure of natural rubber latex-modified cement pastes," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, pp. 15496-15512, 2020.
- [32] R. Lin, X. Wang, H. Lee, and H. Cho, "Hydration and microstructure of cement pastes with calcined Hwangtoh Clay," *Materials*, vol. 12, 2019.