

คุณสมบัติของ Mortar ที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยผงกระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์

Properties of Mortar with Partial Replacement of Solar Panel Glass Powder

ครองขวัญ ขว่งบุญ¹

Khronghwan Khuangbun¹

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์^{2*}

Associate Professor Dr. Pichaya Rachdawong^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

¹Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน

กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

²Department of Environment Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : Pichaya.R@chula.ac.th

(Received: June 4, 2022, Revised: July 14, 2022, Accepted: July 25, 2022)

บทคัดย่อ : ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำลังจะเกิดขึ้นภายในระยะ 20-30 ปีจากการติดตั้งช่วง พ.ศ. 2545-2558 อาจจะเป็นน้ำหนักได้ถึง 235,954 ตัน โดยส่วนใหญ่ประเทศไทยนิยมใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ซึ่งแผงประเภทนี้มีปริมาณกระจกมากถึงร้อยละ 70-80 การจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยในขณะนี้มีการกำจัดด้วยการนำไปทิ้งที่หลุมฝังกลบอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการจัดการที่ไม่ยั่งยืนเพราะเป็นการสูญเสียทรัพยากรอย่างไร้ประโยชน์ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำกระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยทำการศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติของ Mortar ที่มีการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยกระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดขนาด d_{50} ที่ 4.97 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกระจกจะทำให้ค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์สั้นลง ค่าการไหลแผ่ของ Mortar มีค่าลดลง สำหรับกำลังรับแรงอัด Mortar ช่วงอายุต้น พบว่า Mortar ที่มีปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกร้อยละ 0 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด แต่ที่อายุ 90 วัน Mortar ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกร้อยละ 10 ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกใช้เวลานานกว่าจะเกิดปฏิกิริยา

คำสำคัญ: กระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Mortar

Abstract : The amount of solar panel waste generated during the next 20-30 years from the installation during 2002-2015 could be up to 235,954 tons. Most of them are crystalline silicon solar panel. This type of solar panel contains up to 70-80% of glass by weight. The current management of solar panel waste in Thailand is disposal in landfills, which is not sustainable since the resource is wasted, not recycled. This research focuses on the recycling of crystalline silicon solar panel glass. To study the effects on the properties of mortar whose cement contents were partially replaced by ground solar panel glass with the d_{50} of 4.97 micrometer. The replacements were performed at 0%, 10%, 20% and 30%. The results showed that when glass powder addition was increased, expansion of cement paste subsequently increased, initial setting time and final setting time of cement paste, on the other hand, shorten, and percent flow of mortar decreased. Compressive strength of mortar at the early age of 7, 28 and 56 days showed that the mortar with 0% of glass powder had the highest compressive strength. At 90 days, the mortar with 10% of glass powder had the highest compressive strength. This was because the pozzolanic reaction took a long time to react.

Keywords: crystalline silicon solar panel glass, Portland cement, mortar

1. บทนำ

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ประเทศไทยได้มีการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเดิม ภายในปี พ.ศ. 2579 จะให้มีการติดตั้งได้รวม 6,000 เมกะวัตต์ จากข้อมูล ณ ปี พ.ศ. 2560 พบว่าได้มีการดำเนินการแล้ว 2,849 เมกะวัตต์ แต่ในแผนพัฒนาใหม่จะให้ทำการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอีก 12,725 เมกะวัตต์ โดยในช่วงปี พ.ศ. 2561-2580 รวมจนถึงปลายปี พ.ศ. 2580 จะมีการติดตั้งรวม 15,574 เมกะวัตต์ [1]

จากข้อมูลการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2558 สามารถคาดการณ์ปริมาณซากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอีก 20-30 ปี ข้างหน้าได้ พบว่ามีปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมถึง 2,621.71 เมกะวัตต์ (ไม่รวมแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหลังปี พ.ศ. 2558) หรือคิดเป็นน้ำหนัก 235,954 ตัน [2]

ของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดสภาพการใช้งานจัดเป็นขยะประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic waste) ซึ่งขยะประเภทนี้จะต้องมีการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ เนื่องจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีองค์ประกอบของโลหะหนัก [3]

สำหรับประเทศที่มีความก้าวหน้าในการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีมีความตื่นตัวในการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการบริหารจัดการซากหรือของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประเทศที่มีการจัดการที่โดดเด่นที่สุดคือประเทศเยอรมนีและประเทศญี่ปุ่น โดยประเทศเยอรมนีอยู่ภายใต้การควบคุมของสำนักทะเบียนผู้ก่อขยะอิเล็กทรอนิกส์ National Register for Waste Electrical Equipment (Stiftung Elektro-Altgeräte Register หรือ Stiftung EAR) ที่เป็นหน่วยงานรับผิดชอบขึ้นทะเบียนและออกเลขทะเบียนให้แก่ผู้ผลิตที่จะต้องเป็นผู้รับผิดชอบแผงหลังหมดอายุการใช้งาน โดยจะต้องทำการเรียกคืนและ

ทำการรีไซเคิล สำหรับการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศญี่ปุ่นนั้น มีเพียงกฎหมายที่ใช้ในการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นกฎหมายที่ส่งเสริมให้ลดการเกิดขยะจำพวกอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีศูนย์รวบรวมจำนวน 380 แห่งทั่วประเทศเพื่อรวบรวมและส่งต่อไปทำการรีไซเคิลตามกฎหมายต่อไป [4] ในปัจจุบันศักยภาพของประเทศไทยในการจัดการกับของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ โดยทำการกำจัดซากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีการกำจัดอย่างง่าย ซึ่งใช้การคัดแยกอย่างง่ายแล้วนำส่วนที่เหลือไปบดย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนนำเข้ากระบวนการปรับเสถียรแล้วนำไปทิ้งที่หลุมฝังกลบอุตสาหกรรม (secured landfill) [3]

กระจกเป็นวัสดุที่หลอมรวมระหว่าง ทราายแก้ว หินปูน หินฟอสเฟต หินโดโลไมต์ เศษกระจก และโซดาแอช หลอมด้วยความร้อน 1,500-1,600 องศาเซลเซียส จนหลอมละลายเป็นน้ำแก้วผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการ สามารถจำแนกออกได้เป็น 6 ประเภทตามกระบวนการผลิต ได้แก่ กระจกแผ่น (Sheet glass) กระจกโฟลต (Float glass) กระจกอบความร้อน (Heat treated glass) กระจกเคลือบผิว (Surface coated glass) กระจกดัดแปลง (Processed glass) และกระจกเพื่อการใช้งานเฉพาะทาง (Application glass) [5]

กระจกที่ใช้ในการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ จัดเป็นกระจกประเภท กระจกอบความร้อน โดยเป็นกระจกที่มีธาตุเหล็กต่ำ (Low iron) และผลิตด้วยการรีดด้วยลวดลายบนพื้นผิวหนึ่งด้าน เพื่อช่วยจับแสงสะท้อนและเพิ่มการส่งผ่านแสง (Light transmission) โดยแสงอาทิตย์จะสามารถส่องผ่านได้ถึงร้อยละ 91 กระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับแก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) แต่กระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์จะมีความแข็งแรงมากกว่ากระจกทั่วไป ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเกิดการแตกจะแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ มีความแหลมคมน้อย [6]

มอร์ตาร์เป็นส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ น้ำ และทราย โดยการทดสอบมอร์ตาร์สามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของปูนซีเมนต์และคุณสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ สามารถใช้ทำนายแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกัน [7]

ปอซโซลาน (Pozzalan) หมายถึงวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ หรือซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดและมีความชื้นจะทำให้ปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) เกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน [8] โดยวัสดุปอซโซลานจะทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังเนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) อย่างช้า ๆ ทำให้ต้องบ่มช้้นานกว่าปกติเพราะต้องรอให้ซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงพอที่จะละลายซิลิกอนไดออกไซด์ในปอซโซลาน สัดส่วนของปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 [9], [10]

แก้วที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานต้องบดละเอียด โดยมีขนาดของผงแก้วที่ตัวอย่างของการกระจายขนาดของอนุภาคเมื่อถึงร้อยละ 50 สดสมที่สอดคล้องกับขนาดอนุภาค d_{50} ที่ 10-15 ไมโครเมตร และมีค่าความละเอียด (Blaine fineness) 4,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมหรือมากกว่า โดยในมาตรฐาน ASTM C1866 มาตรฐานการใช้แก้วเป็นวัสดุปอซโซลาน กำหนดให้มาตรฐานองค์ประกอบทางเคมีของแก้วให้มี ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไม่เกินร้อยละ 5 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 15 เหล็ก(III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่เกินร้อยละ 1 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 1 และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ไม่เกินร้อยละ 15 [11]

จากการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้น จึงมุ่งเน้นหาแนวทางในการนำของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำกระจกจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากเมื่อคิดเป็นสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า มีองค์ประกอบที่เป็นกระจกมากถึงร้อยละ 70-80 [12] อีกทั้งส่วนใหญ่ในประเทศไทยนิยมใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยงานวิจัยนี้ได้นำกระจกที่ผ่านการอบแยกออกจากตัวเซลล์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมาบดละเอียดใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการผลิตมอร์ตาร์ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานของกระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทั้งสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zheng Karen (2016) [13] พบว่าแก้วโซดาไลม์บดละเอียดจะมีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งเม็ดแก้วที่บดละเอียดจะไม่เกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกา (Alkali-silica reaction) ผงแก้วเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตบริเวณรอบ ๆ ขอบเม็ดแก้ว และทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตลดลงตามเวลา

Islam และคณะ (2017) [14] ศึกษาการนำเศษแก้วมาบดละเอียด ที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 10, 15, 20 และ 25 ทำการบ่มคอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28, 56, 90, 180

และ 365 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วร้อยละ 0 แต่ที่อายุการบ่ม 90 วัน คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วร้อยละ 10 ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด และที่อายุการบ่ม 180 และ 360 วัน คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่อายุการบ่มระยะแรกหากเพิ่มปริมาณผงแก้วจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง บ่งชี้ได้ว่าปูนซีเมนต์จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้เคลือบซิลิเกตไฮดรตได้ง่ายกว่าผงแก้ว โดยผงแก้วใช้เวลานานกว่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

Li และคณะ (2022) [15] ศึกษาผลกระทบของผงแก้วต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ ที่ขนาดแก้วบดที่ขนาดเฉลี่ย 112, 59 และ 32 ไมโครเมตร ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีผงแก้วขนาด 112 และ 59 ไมโครเมตร มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในทุกช่วงอายุ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วมากขึ้น เนื่องจากมีลักษณะเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกหรือเกิดน้อย ทำให้ไปลดปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ทำให้มีกำลังรับแรงอัดต่ำลง โดยมอร์ตาร์ที่ผงแก้วขนาด 32 ไมโครเมตร ที่อายุการบ่ม 7 วัน จะมีกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงแก้ว แต่กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่ม 28 และ 90 วัน โดยที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดที่มากที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ของผงแก้วขนาด 32 ไมโครเมตร ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นขึ้น ปรับปรุงการยึดระหว่างมวลรวมละเอียดและซีเมนต์เฟส

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ขั้นพื้นฐาน เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดขนาดอนุภาคที่ d_{50} ที่ 4.97 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 1 และทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100



ภาพที่ 1 ผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนบดละเอียด

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์

อัตราส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่	
	ปูนซีเมนต์	ผงกระจก
OPC1 ¹	100	0
OPC1+GP10 ²	90	10
OPC1+GP20 ³	80	20
OPC1+GP30 ⁴	70	30

¹ OPC1 คือ ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกร้อยละ 0

² OPC1+GP10 คือ ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกร้อยละ 10

³ OPC1+GP20 คือ ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกร้อยละ 20

⁴ OPC1+GP30 คือ ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงกระจกร้อยละ 30

4.2 วิธีกรวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ดังตารางที่ 1 โดยศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยการศึกษา 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ค่าความละเอียดโดยวิธีเบลน ค่าความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี 2) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งได้แก่ ค่าการขยายตัว ระยะก่อดำ 3) สมบัติของมอร์ตาร์ ซึ่งได้แก่ ค่าการไหลแผ่ และกำลังรับแรงอัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียด ทดสอบหาค่าความละเอียดโดยวิธีเบลนตามมาตรฐาน ASTM C204 [16] ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D854-14 [17] ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) หางค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) และตรวจสอบโครงสร้างของกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)

4.2.2 ค่าการขยายตัว (Soundness)

ทดสอบหาการขยายตัวของแท่งปูนซีเมนต์เพสต์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยผ่านการอบในหม้อไอน้ำร้อนแรงดันสูง (Autoclave) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยค่าการขยายตัวต้องไม่เกินร้อยละ 0.8 ตามที่มาตรฐาน ASTM C151 [18] กำหนดไว้

4.2.3 ระยะก่อดำ (Setting time)

ทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM C187 [19] เพื่อหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในซีเมนต์เพสต์แล้วนำเข็มไวแคตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนัก 300 กรัม ตกลงอิสระเป็นเวลา 30 วินาที และเข็มจมลงไปในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะทาง 10 ± 1

มิลลิเมตร เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ เพื่อให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้สำหรับทดสอบหาระยะเวลาการก่อดำระยะต้น (Initial setting time) และระยะเวลาการก่อดำปลาย (Final setting time) ด้วยวิธีของเข็มไวแคต (Vicat needle) ตามมาตรฐาน ASTM C191 [20] โดยนำเข็มไวแคตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ตกอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที ทำการทดสอบเพื่อหาระยะการจมของเข็มไวแคตทุก ๆ 15 นาที โดยระยะเวลาการก่อดำระยะต้น คือระยะเวลาที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะทาง 25 มิลลิเมตร เมื่อปล่อยให้ตกอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที และระยะเวลาการก่อดำปลาย คือระยะเวลาที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ เมื่อปล่อยให้ตกอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาทีดังภาพที่ 2 โดยทั่วไปพบว่าเวลาการก่อดำระยะต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าระหว่าง 75-105 นาที และระยะปลายมีค่าระหว่าง 150-200 นาที



ภาพที่ 2 การหาระยะก่อดำ

4.2.4 ค่าการไหลแผ่ (Percent flow)

ทดสอบหาค่าการไหลของมอร์ตาร์ โดยผสมปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทราย 2.75 ส่วน อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.54 เมื่อผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด ตักใส่แบบทดสอบที่วางอยู่บนโต๊ะการไหล จากนั้นยกแบบทดสอบขึ้น ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ซึ่งยกงานของโต๊ะการไหลขึ้นสูง 13 มิลลิเมตร และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที โดยมอร์ตาร์มีค่าการไหลเท่ากับ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [21] ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทดสอบการไหลแผ่

4.2.5 กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ โดยผสมปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทราย 2.75 ส่วน อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.54 เมื่อผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด ตักใส่แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง แกะแบบหล่อออก จากนั้นนำไปบ่มขึ้นเป็นระยะเวลา 7, 28, 56 และ 90 วัน เมื่อครบอายุการบ่มนำมอร์ตาร์ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ดังภาพที่ 4 คำนวณกำลังรับแรงอัดที่อ่านค่าได้จากเครื่องทดสอบมาตรฐานนำมาคำนวณดังสมการที่ (1) [22]

$$fm = P/A \quad (1)$$

โดยที่ fm คือ ค่ากำลังรับแรงอัด มีหน่วยเป็นเมกะปาสคัล หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

P คือ ค่าแรงอัดสูงสุด มีหน่วยเป็นนิวตัน หรือ ปอนด์-แรง

A คือ พื้นที่ผิวรับแรงอัด มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร หรือ ตารางนิ้ว



ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

5. ผลการศึกษา

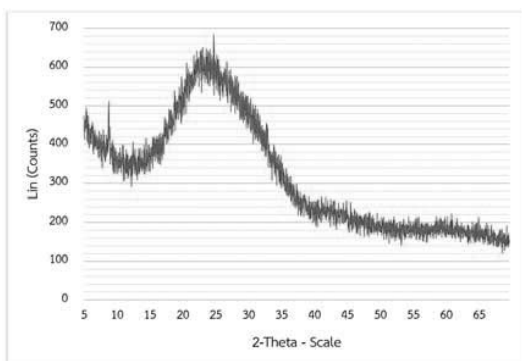
5.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์และกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษา ผลการทดสอบความละเอียดโดยวิธีเบลนความถี่เฉพาะ และองค์ประกอบทางเคมี พบว่าผงกระจกมีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์มีค่าความละเอียดที่ 3,631 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และผงกระจกมีค่าความละเอียดที่ 9,600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม สำหรับองค์ประกอบทางเคมีพบว่าผงกระจกมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 69.20 และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.95 ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 61.80 แสดงในตารางที่ 2 สำหรับภาพถ่ายขยายกำลังของอนุภาคโดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) โดยขยายกำลัง 200, 800 และ 3,000

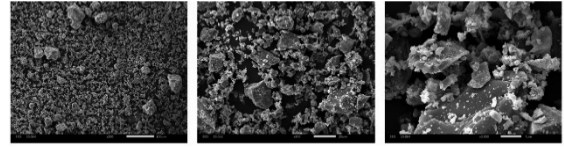
เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์และกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลากหลายขนาดปนกัน แต่ขนาดอนุภาคของกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 และภาพที่ 5 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างของผงกระจกด้วยวิธี X-ray diffraction พบว่ารูปแบบสัญญาณของ XRD มีช่วงพีคที่กว้าง $2\theta = 20^\circ$ ถึง 30° แสดงถึงการมีอยู่ของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์

องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ		ปูนซีเมนต์	ผงกระจก
องค์ประกอบ	SiO ₂	17.10	69.20
ทางเคมี (ร้อยละ)	Al ₂ O ₃	4.46	2.95
	Fe ₂ O ₃	3.33	0.06
	CaO	61.80	8.80
	MgO	1.63	3.46
	Na ₂ O	0.13	15.17
	SO ₃	3.28	0.15
สมบัติทางกายภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	2.98	2.39
	ค่าความละเอียดโดยวิธีเบรคคิน (cm ³ /g)	3,631	9,600

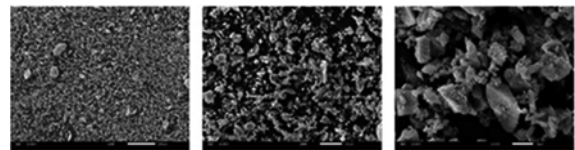


ภาพที่ 5 ผลการทดสอบโครงสร้างของผงกระจก ผงพลังงานแสงอาทิตย์บดละเอียดด้วยวิธี X-ray diffraction



ก) 200 เท่า ข) 800 เท่า ค) 3,000 เท่า

ภาพที่ 6 ภาพถ่ายขยายกำลังของปูนซีเมนต์ โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 200, 800 และ 3,000 เท่า



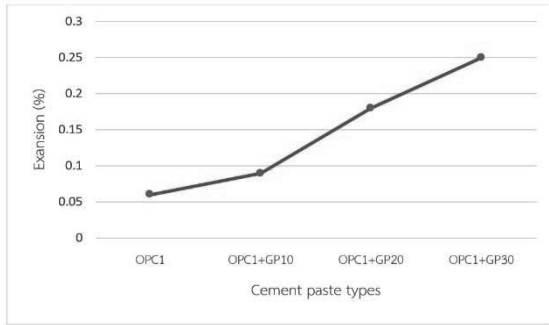
ก) 200 เท่า ข) 800 เท่า ค) 3,000 เท่า

ภาพที่ 7 ภาพถ่ายขยายกำลังของผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 200, 800 และ 3,000 เท่า

5.2 สมบัติของซีเมนต์เพสต์

5.2.1 ค่าการขยายตัว

ผลการศึกษาค่าการขยายตัว แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าค่าการขยายตัวของตัวอย่าง เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจก จะทำให้ค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงกระจกโดย OPC1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.06 OPC1+GP10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.09 OPC1+GP20 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.18 และ OPC1+GP30 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.25

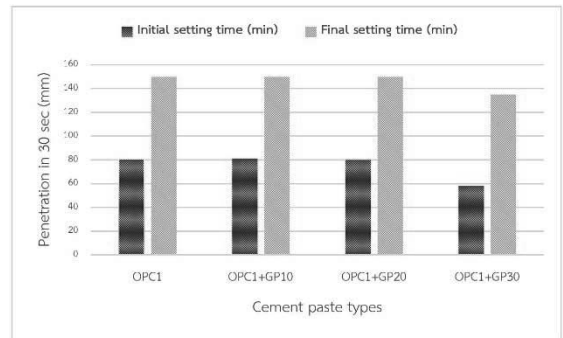


ภาพที่ 8 ผลการทดสอบค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์

5.2.2 ระยะก่อตัว

ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ในการทดสอบหาระยะก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่า OPC1 ใช้น้ำปริมาณ 165 มิลลิลิตร OPC1+GP10 ใช้น้ำปริมาณ 172 มิลลิลิตร OPC1+GP20 ใช้น้ำปริมาณ 194 มิลลิลิตร และ OPC1+GP30 ใช้น้ำปริมาณ 204 มิลลิลิตร กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกจะส่งผลให้ใช้ปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น

ผลการทดสอบระยะก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงกระจกจะทำให้ค่าการก่อตัวระยะต้นและการก่อตัวระยะปลายสั้นลง โดยระยะต้น OPC1 และ OPC1+GP10 มีค่าเท่ากับ 81 นาที OPC1+GP20 มีค่าเท่ากับ 80 นาที และ OPC1+GP30 มีค่าเท่ากับ 58 นาที ระยะปลาย OPC1, OPC1+GP10 และ OPC1+GP20 มีค่าเท่ากับ 150 นาที และ OPC1+GP30 มีค่าเท่ากับ 135 นาที ดังภาพที่ 9

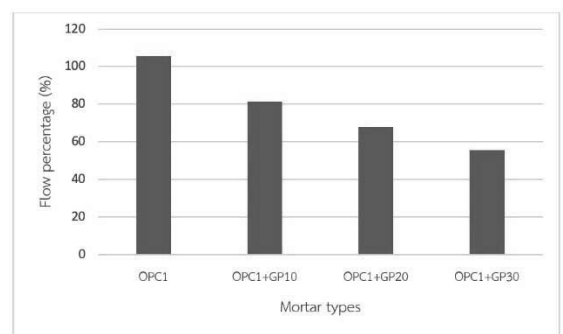


ภาพที่ 9 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลาย

5.3 สมบัติของมอร์ตาร์

5.3.1 ค่าการไหลแผ่

ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงกระจกจะทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง โดย OPC1 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 105.5 OPC1+GP10 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 81.3 OPC1+GP20 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 68.0 และ OPC1+GP30 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 55.7 ซึ่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจก จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C1437 กำหนด ดังภาพที่ 10

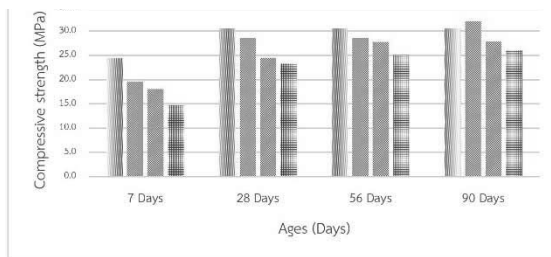


ภาพที่ 10 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่

5.3.2 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่การบ่มอายุ 7 วัน พบว่า มอร์ตาร์ OPC1 มีกำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด 24.4 MPa และกำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงกระจก ซึ่งในช่วงอายุการบ่ม 7 วัน สามารถเห็นถึงความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่การบ่มอายุ 28 และ 56 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ OPC1 ยังคงมีกำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด โดยที่มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจก เริ่มมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดมากขึ้น โดยจะเห็นถึงความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ลดลง

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่การบ่มอายุ 90 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ OPC1+GP10 มีกำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด ที่ 32.0 MPa ขณะที่ OPC1 มีค่าเท่ากับ 30.5 MPa OPC1+GP20 มีค่าเท่ากับ 27.8 MPa และ OPC1+GP30 มีค่าเท่ากับ 26.1 MPa ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

6. สรุปและอภิปรายผล

สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์และผงกระจกผงพลังงานแสงอาทิตย์พบว่าปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าผงกระจก ค่าความละเอียดของผงกระจกมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1866 กำหนดไว้โดยต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ถึง 3 เท่า สำหรับองค์ประกอบทางเคมีพบว่าผงกระจกมีองค์ประกอบทาง

เคมีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1866 ยกเว้นโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ที่มีค่าเกินมาตรฐานกำหนดไว้เพียงร้อยละ 0.17 การตรวจสอบโครงสร้างของผงกระจก พบว่ากระจกมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้

ค่าการขยายตัวพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจก จะทำให้ค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงกระจก โดยตัวอย่างทั้งหมดมีค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.8 ตามที่มาตรฐาน ASTM C151 กำหนด

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมซีเมนต์เพสต์ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจก จะทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกที่เพิ่มขึ้น และการทดสอบระยะการก่อตัว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจก จะทำให้ค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายสั้นลง โดยค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด มีค่าตามมาตรฐาน ASTM C191 ยกเว้น ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงกระจก ร้อยละ 30 มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C191

ค่าการไหลแผ่ พบว่ามีเพียงมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจกร้อยละ 0 ที่มีค่าการไหลแผ่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1437 เนื่องจากผงกระจกมีความละเอียดที่มากกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีความต้องการน้ำที่มากกว่า ซึ่งควรต้องมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้น เพื่อให้มีค่าการไหลแผ่เป็นไปตามมาตรฐาน

กำลังรับแรงอัด พบว่ามอร์ตาร์ที่อายุการบ่มระยะแรก เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงกระจก จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2022) เนื่องจากที่อายุการบ่มระยะแรก ผงกระจกลักษณะเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกหรือเกิดน้อย ทำให้ไปลดปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้แคลเซียม

ซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยที่ ผงกระจกจะใช้เวลาานกว่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam และคณะ (2017)

หมายเหตุ

ASTM C204 มาตรฐานการหาค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ โดยใช้เครื่องมือเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี

ASTM D854-14 มาตรฐานการหาค่าความถ่วงจำเพาะ

ASTM C151 มาตรฐานการวัดการขยายตัวของตัวอย่างโดยหม้อนึ่งไอน้ำร้อนแรงดันสูง (Autoclave)

ASTM C187 มาตรฐานการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผสมซีเมนต์เพสต์

ASTM C191 มาตรฐานการหาเวลาในการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายโดยเข็มไวแคต

ASTM C1437 มาตรฐานการทดสอบค่าการไหลแผ่นมอร์ตาร์

ASTM C109 มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์

ASTM C1866 มาตรฐานการใช้แก้วเป็นวัสดุปอซโซลาน

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องและสถานที่ในการทำการวิจัย โครงการพัฒนาระบบการรีไซเคิลของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในการสนับสนุนวัสดุดิบ และสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานในการสนับสนุนทุนวิจัย

8. บรรณานุกรม

- (1) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (3 ธันวาคม 2564). พพ. จับมือ แจงเป้าหมาย AEDP2018. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/index.php/en/component/k2/item/14928-news-03072562>
- (2) พิชญ รัชฎาวงศ์, สมชัย รัตนธรรมพันธ์, เดวิด บรรจงเจตพงศ์ชัย, รุติศักดิ์ บุญปราโมทย์, สันต์ สัมปัตตะวนิช. "การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า," สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพมหานคร, 2559.

- (3) นิชชา บุรณสิงห์. "แผงโซลาร์เซลล์: ขยะพิษที่ไม่ควรมองข้าม," สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, สำนักวิชาการ, กรุงเทพมหานคร, 2561.
- (4) บัญญู จันทร์ล่อ. (11 กรกฎาคม 2565). มาตรการทางกฎหมายในการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์". (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/gradlawtjournal/article/view/147832/108834>
- (5) พินัส เลิศเลื่อมใส, บุญพล แจ้งสว่าง. (12 มกราคม 2565). กระຈกและการเลือกใช้ที่เหมาะสม. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.eptg-acsc.co.th/mix-acsc/images/Column/column5.pdf>
- (6) M. H. Shubbak, "Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109383.
- (7) วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และคอนกรีต, กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2556.
- (8) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, "ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน," กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร, 2556.
- (9) วินิต ช่อวิเชียร, คอนกรีตเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ: บริษัท นิวไทยมิตรการพิมพ์ (1996) จำกัด, 2557.
- (10) ศุภานนท์ บรรจงเกลี้ยง, 2549. ศักยภาพของผงแก้วในการเป็นปอซโซลาน. ปรินทิพนิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (11) American society for Testing and Materials. "ASTM C1866 : Standard specification for Ground-Glass Pozzolan for use in concrete," Book of ASTM Standards, vol 04.02, pp. 5, 2020, doi: 10.1520/C1866_C1866M-20.
- (12) A. Paiano, "Photovoltaic waste assessment in Italy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 41, pp. 99-112, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.208.
- (13) K. Zheng, "Pozzolanic reaction of glass powder and its role on controlling alkali-silica reaction," *Cement and Concrete Composition*, vol 67, pp. 30-38, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008.
- (14) S. Islam, M. H. Rahman, N. Kazi, "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol 6, pp. 37-44, 2017, doi: 10.1016/j.ijbe.2016.10.005.
- (15) Q. Li, H. Qiao, A. Li, G. Li, "Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol 324, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126531.

- (16) American society for Testing and Materials. "ASTM C204 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 11, 2019, doi: 10.1520/C0204-18E01.
- (17) American society for Testing and Materials. "ASTM D854-14 : Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," *Book of ASTM Standards*, vol 04.08, p. 8, 2016, doi: 10.1520/D0854-14.
- (18) American society for Testing and Materials. "ASTM C151 : Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 4, 2018, doi: 10.1520/C0151_C0151M-18.
- (19) American society for Testing and Materials. "ASTM C187 : Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 3, 2016, doi: 10.1520/C0187-16.
- (20) American society for Testing and Materials. "ASTM C191 : Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 8, 2021, doi: 10.1520/C0191-21.
- (21) American society for Testing and Materials. "ASTM C1437 : Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 2, 2020, doi: 10.1520/C1437-20.
- (22) American society for Testing and Materials. "ASTM C109 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or (50 mm) Cube Specimens)," *Book of ASTM Standards*, vol 04.01, p. 12, 2021, doi: 10.1520/C0109_C0109M-21.