การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลคาไลน์สำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง

Development of a controlled low strength material (CLSM) from waste glass powder activated by alkaline for pavement engineering application

ชุติปภา ดีตอ่ำ[1], อนุพงศ์ คำปลอด[2], ธนกฤต เทพอุโมงค์[2]*, และ ธนกร ชมภูรัตน์[3]

[1] นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[2] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[3] รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: thanakit.th@up.ac.th*

บทคัดย่อ

ประชากรประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 มีจำนวนประชากรทั้งหมด 69.8 ล้านคน ทำให้ทรัพยากรถูกใช้เพิ่มขึ้นและเกิดปริมาณของเสียมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2563 เกิดปริมาณของเสียทั้งหมด 25.37 ล้านตัน แต่มีเพียง 8.36 ล้านตัน ที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำของเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษแก้วกระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ วัสดุที่ใช้ประกอบไปด้วย เถ้าลอย และเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษแก้วจากขวดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ คอนกรีตรีไซเคิลจากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์เป็นตัวชะละลาย โดยใช้อัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนเถ้าหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุประสาน 1.5 อัตราส่วนเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 20 30 และ 40 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์ต่อวัสดุประสาน 0.015 ในการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำอ้างอิงแนวทางตามเอกสาร ACI229R-99 และเกณฑ์มาตรฐานงานก่อสร้างชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงประเทศไทย โดยการทดสอบประกอบไปด้วย การทดสอบการไหล การไหลแผ่ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น และกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว สุดท้ายในวิจัยนี้จะนำเสนอค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางต่อไป

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, เถ้าลอย, เศษแก้ว, คอนกรีตรีไซเคิล, กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

Abstract

Thailand population in 2020 have 69.8 million people. In the past decade, the increase of 2.6 million people cause to more resources use and waste, resulting in 2020 amount of waste 25.37 million tons but only 8.36 million tons are recycled. This paper has concept to use the waste from industrial processes as raw materials. This study was conducted to determine the control low strength materials (CLSM) mixtures produced from fly ash (FA) and bottom ash (BA) collected from the Mae Moh power plant, waste glass powder (WGP) from beer bottles recycled concrete aggregate (RCA) from demolition and alkaline activator chosen is sodium hydroxide (NaOH). The mixture sodium hydroxide solution of 10 molar, the ratio of BA or RCA to the binder of 1.5 and the ratio of WGP to the binder of 0, 20, 30 and 40 and the ratio of sodium hydroxide solution to binder 0.015 in determining the properties of control low strength materials refer to document ACI229R-99 and construction structure subbase of the Department of Highways of Thailand. Experimental outcomes on fresh and hardened properties composed of slum test, slum flow test, setting time and unconfine compressive strength (UCS). Finally, in this research, the optimal wages of control low strength materials are presented for use as pavement materials.

Keywords: Controlled low-strength materials, Fly ash, Waste glass powder, Recycled concrete aggregate, Compressive Strength

1. บทนำ

ปัจจุบันประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลสำนักงานสถิติแห่งชาติในปี พ.ศ. 2563 มีจำนวนประชากรทั้งหมด 66.19 ล้านคน (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2563) ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้นและมีปริมาณของเสียเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณของเสียทั้งหมด 25.37 ล้าน

ตัน แต่มีเพียง 8.36 ล้านตันที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณของเสียที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ประเภทแก้วมีเพียง 10.96 % จากปริมาณของเสียที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ (กรมมลพิษ, 2563) นอกจากนี้ยังมีของเสียอีกประเภทหนึ่งคือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (recycled concrete aggregate, RCA) ที่ได้จากการรื้อถอนบ้าน หรืออาคารก่อสร้าง โครงการก่อสร้าง ซึ่งแต่ละโครงการล้วนแต่ต้องใช้คอนกรีตในปริมาณมากด้วยหลากหลายสาเหตุส่งผลให้เกิดเศษคอนกรีตในปริมาณมาก จากปริมาณเศษคอนกรีตที่มีอยู่ทำให้นักวิจัยเริ่มมีแนวคิดในการนำเศษคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ในงานด้านวิศวกรรม เช่น งานก่อสร้าง งานถนน เป็นต้น ในหลากหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย อังกฤษ และฝรั่งเศส เป็นต้น (เทอดศักดิ์, 2554) จากปริมาณของเสียที่มีอยู่หลายล้านตันต่อปี ส่งผลให้ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ทดลองนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุถมและนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมหนึ่งในนั้นคือ วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM) เป็นวัสดุถม (fill material) ที่สามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง และใช้ทดแทนดินบดอัด มีลักษณะคล้ายคอนกรีตมักใช้กับงานที่ไม่สามารถบดอัดได้เนื่องจากลักษณะพื้นที่ เช่น การขุดวางท่อระบายน้ำ งานถมเพื่อเป็นโครงสร้าง งานปรับระดับและการใช้ในงานทางแทนหินคลุก (crush rock) โดยมาตรฐาน ACI 229R-99 (American Concrete Institute, 1999) กำหนดให้มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength, UCS) ของ CLSM เท่ากับ 8.3 MPa (1,200 psi) หรือน้อยกว่าที่อายุบ่มตัว 28 วัน โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะประกอบด้วยสารเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ ซึ่งวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ (cement) ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมีหลายด้านยกตัวอย่างเช่น ผลกระทบด้านอากาศเนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) การปนเปื้อนในอากาศจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ส่งผลให้ค่าฝุ่นละอองภายในโรงงานสูงเกินระดับมาตรฐาน เนื่องจากการระเบิดหิน การวิ่งของรถบรรทุก ผลกระทบทางน้ำคือ น้ำทิ้งมาจากน้ำหล่อเย็นที่ปล่อยจากโรงงาน สำนักงาน บ้านพักพนักงาน อาจมีน้ำมันและไขมันซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน และผลกระทบด้านสิ่งปฏิกูลคือ การทิ้งขยะมาจากเศษวัสดุที่อาจตกหล่นระหว่างการขนถ่านลิกไนต์หรือถ่านหิน ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำ (สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมาธิการแม่น้ำโขง, 2544) และมีราคาสูงกว่าวัสดุประสานตัวอื่น จึงได้มีการนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้แก่ เศษแก้ว (waste glass powder, WGP) ที่ได้มาจากของเสียเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ เถ้าลอย (fly ash, FA) และเถ้าหนัก (bottom ash, BA) ที่เป็นของเสียจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหิน และคอนกรีตรีไซเคิล (recycled concrete aggregate, RCA) จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิววัสดุประสาน เมื่อเศษแก้วและเถ้าลอยถูกชะละลายด้วยสารละลาย NaOH ได้แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) จนเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่นกับน้ำ ส่งผลให้เกิดขึ้นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) คล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์และลดการใช้ทรายธรรมชาติโดยใช้เถ้าหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่ จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีการนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำมาเป็นส่วนผสมในงานวิจัยนี้ จึงกลายเป็นวัสดุควบคุมกำลังต่ำแบบที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ (ธนกฤตและคณะ, 2563)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนา CLSM แบบไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ประกอบไปด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) และ เถ้าหนัก (bottom ash, BA) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษแก้ว (waste glass powder, WGP) จากขวดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ และคอนกรีตรีไซเคิล จากการรื้อถอนอาคารสิ่งก่อสร้าง มาใช้เป็นวัสดุ CLSM ที่ออกแบบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เป็นตัวชะละลาย จึงได้มีศึกษาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน โดยทดสอบค่าการยุบตัว ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ การหาระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น การเยิ้มน้ำ และคุณสมบัติด้านกำลัง โดยทำการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่นำมาใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การใช้ CLSM กับงานวิศวกรรม

Chompoorat et al. (2018) นำเสนอ CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมกับเถ้าลอยโดยในงานวิจัยได้ทำการออกแบบพื้นทางที่ใช้ CLSM พบว่า CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน สามารถทนทานต่อความเสียหายการเสื่อมสภาพการเสียหายแบบร่องล้อ และมีอายุการใช้งานที่ดีกว่าการใช้พื้นทางหินคลุก

Sasha et al. (2009) นำเสนอ CLSM โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีการนำคอนกรีตรีไซเคิลกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมที่ใช้ตะกรันเหล็ก และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน โดยในงานวิจัยได้มีทดสอบการไหล และทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่า CLSM ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 150 mm ผ่านมาตรฐาน ACI 229R-99 พบว่ามีเพียงอัตราส่วนผสมของตะกรันเหล็กที่ร้อยละ 10 และ 20 ที่มีค่าการไหลผ่านมาตรฐาน และมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามอายุการบ่ม

Tawatchai et al. (2017) นำเสนอเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เศษแก้วและเถ้าลอย โดยเศษแก้วที่นำมาใช้ในงานวิจัยจะใช้เศษแก้วจากหลอดฟลูออริเซนและภาชนะแก้วทั่วไป โดยในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากำลังรับ

แรงอัดมีค่าระหว่าง 33.3-47.6 MPa และพบว่าอัตราส่วนที่สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุดคือ 20CP สามารถรับกำลังได้ 47.6 MPa

Chompoorat et al. (2021) นำเสนอ CLSM โดยปราศจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ตะกรันเหล็กกับเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน โดยในงานวิจัยได้มีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น โดยมีอัตราส่วนร้อยละตะกรันเหล็กต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 10 20 และ 30 จากการทดสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงของร้อยละตะกรันที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการไหล ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มตัว การเยิ้มน้ำลดลง และค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่มตัว 28 วัน พบว่ามีเพียงร้อยละตะกรันเหล็กต่อวัสดุประสานเท่ากับ 20 และ 30 ที่ผ่านมาตรฐาน ACI 229R ที่ระบุกำลังรับแรงอัดต้องมีค่าเท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่า

2.2 สารละลายอัลคาไลน์

อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารละลายเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิด สามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอโพลิเมอร์คุณภาพดีกว่า แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

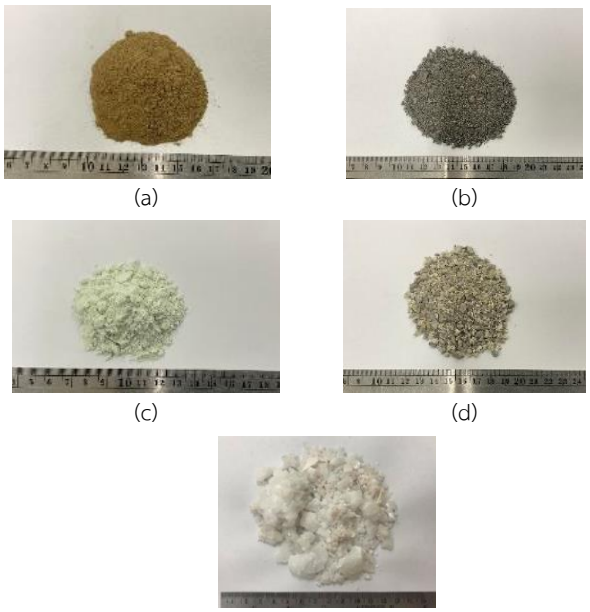
1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวไม่มีสี

2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดของแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งมีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ดลักษณะทั่วไปเป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ซึ่งสามารถนำสารละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย เศษแก้ว (waste glass powder) เถ้าหนัก (bottom ash) เถ้าลอย (fly ash) และคอนกรีตรีไซเคิล (recycled concrete aggregate) โดยวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ เถ้าหนัก และเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังรูปที่ 1(a) และ 1(b) เศษแก้วที่ได้มาจากเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ ดังรูปที่ 1(c) เศษคอนกรีตรีไซเคิล ที่ได้จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง ดังรูปที่ 1(d) โดยใช้เถ้าลอย และเศษแก้ว เป็นวัตถุประสาน เถ้าหนักและคอนกรีตรีไซเคิลนำมาใช้เพื่อทดแทนมวลรวมส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังรูปที่ 1(e) เป็นตัวชะละลาย



(a) (b) (c) (d) (e)

รูปที่ 1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก (c) เศษแก้ว (d) คอนกรีตรีไซเคิล (e) โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ด

3.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการผสม

เริ่มทำการคำนวณน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (AA) ที่มีความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ (M) จากนั้นเทน้ำกลั่นลงในบิกเกอร์ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณไว้โดยให้อยู่ต่ำกว่าปริมาตรที่ต้องการเล็กน้อยแล้วใช้แท่งแก้วคนโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในบิกเกอร์ดังกล่าวให้ถึงปริมาตรที่ต้องการ ต่อมาใช้พลาสติกใสคลุมปากบิกเกอร์ และเจาะรูสำหรับระบายความร้อนถึงจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามความเข้มข้นที่ต้องการ (ธนกฤต และคณะ, 2563) โดยสามารคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (1)

$$g = \left(\frac{CMV}{1000}\right) \quad (1)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M) g คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ลักษณะเป็นเกล็ดผลึก (g) M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 40 (g/mol) V คือ ปริมาตรที่ต้องการ (ml) โดยมีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 20 30 และ 40 และอัตราส่วนเถ้าหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5 สำหรับเถ้าลอย (FA) เถ้าหนัก (BA) เศษแก้ว (WGP) และคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) แสดงดังตารางที่ 1 เริ่มการเตรียมตัวอย่างโดยนำวัสดุดังกล่าวเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

แล้วนำออกมาพักเป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิห้อง และไม่เกิดการดูดซึมน้ำเกินกว่าปกติ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสม CLSM ต่อปริมาตรส่วนผสม *1* ลบ.ม.

Mix	Symbol	NaOH	Bulk proportion (kg/m3)				Water	W/B
		(L/m^3)	WGP	FA	BA	RCA	(L/m^3)	
1	AA10/WGP00/BA1.5	20	-	535	802	-	350	0.65
2	AA10/WGP20/BA1.5	20	107	428	802	-	350	0.65
3	AA10/WGP30/BA1.5	20	161	374	802	-	350	0.65
4	AA10/WGP40/BA1.5	20	214	321	802	-	350	0.65
5	AA10/WGP00/RCA1.5	20	-	535	-	802	350	0.65
6	AA10/WGP20/RCA1.5	20	107	428	-	802	350	0.65
7	AA10/WGP30/RCA1.5	20	161	374	-	802	350	0.65
8	AA10/WGP40/RCA1.5	20	214		-	802	350	0.65

4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM

4.1.1 *การทดสอบการยุบตัว*

การทดสอบค่าการยุบตัว (slump test) พบว่า ค่าการยุบตัวของ CLMS หลังผสมเสร็จทันทีมีค่าการยุบตัวใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 25-29 cm. จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น (ครึ่งชั่วโมงขึ้นไป) ค่าการยุบตัวลดลงลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น (polymerization) ทำให้ปริมาณน้ำใน CLSM ลดลงส่งผลให้มีค่าการยุบตัวลดลง ดังตารางที่ 2

4.1.2. การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow test) พบว่าค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM หลังผสมเสร็จทันทีมีค่าดังตารางที่ 3 มีค่าประมาณ 67-91 cm. ใกล้เคียงกัน ตามมาตรฐาน EFNARC (2002) กล่าวคือ ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM หลังผสมเสร็จต้องมีค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่มากกว่า 65 cm. ผลการทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ทุกตัวอย่างผ่านมาตรฐาน และมีค่าลดลงตามระยะเวลา

ตารางที่ 2 ค่าการยุบตัวของ CLSM

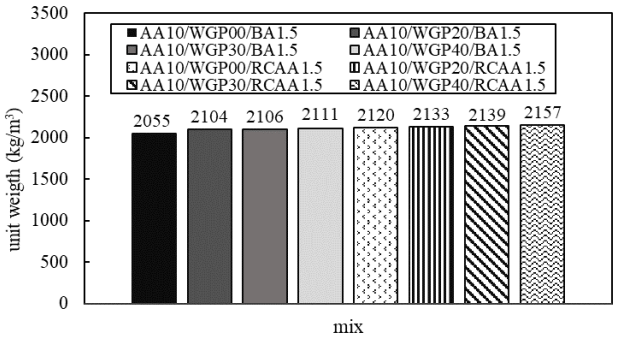
Mix	Slump (cm.)				
	0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	29	28	28	27	27
2	29	28	27	26.5	26
3	28	27	27	26.5	26
4	28	28	26.5	26	25
5	29	29	28	28	28
6	28	28	27	27	26
7	29	29	28	27	26
8	29	27.5	27	27	26

ตารางที่ 3 ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM

Mix	Slump flow (cm.)				
	0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	86	78	75	72	71
2	75	70	67	66	63
3	72	67	62	57	53
4	67	61	57	53	50
5	91	75	67	63	61
6	77	62	59	55	51
7	76	67	62	57	52
8	69	63	56	53	49

4.1.3. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

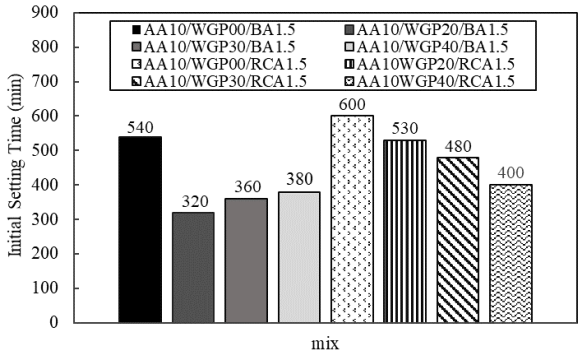
การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weight) พบว่าผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 2,055-2,157 kg/m^3 การเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วส่งผลทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน่วยน้ำหนักของ CLSM

4.1.4. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

กราฟแผ่นภูมิแท่งค่าการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (setting time) แสดงผลระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM ที่ใช้เถ้าหนักและคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 3

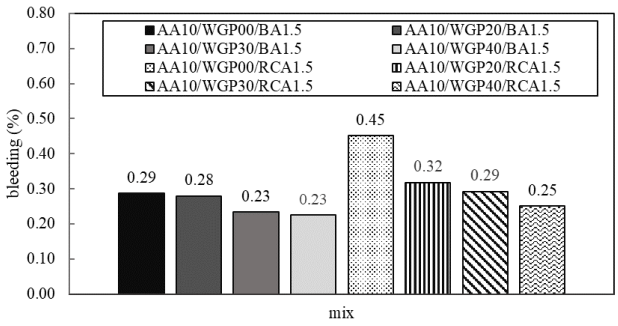


รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการแทนที่ทรายด้วยเถ้าหนักส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นก่อตัวได้เร็วกว่าการแทนที่ทรายด้วยคอนกรีตรีไซเคิล

4.1.5. การทดสอบการเยิ้ม

กราฟแผ่นภูมิแท่งค่าเปอร์เซ็นต์การเยิ้มน้ำ (bleeding test) ของ CLSM อ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM C232 (2014) ผลการทดสอบการเปอร์เซ็นต์การเยิ้มน้ำของ CLSM ที่ใช้เถ้าหนักและ CLSM ที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 4



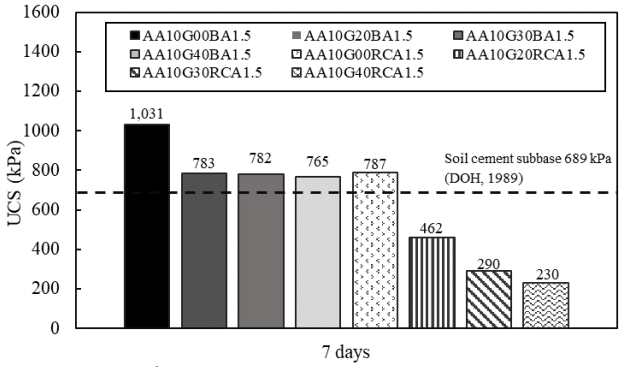
รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์การเยิ้มน้ำของ CLSM

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์การเยิ้มน้ำของ CLSM เมื่อแทนที่ทรายด้วยเถ้าหนัก ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเยิ้มน้ำน้อยกว่าการแทนที่ทรายด้วยคอนกรีตรีไซเคิล โดยอัตราส่วนผสมร้อยละเศษแก้ว 0 20 30 และ 40 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ CLSM ที่ใช้เถ้าหนักและ CLSM ที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวม มีค่าแตกต่างกันไม่มาก

4.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

4.2.1. กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวแกนเดียว

กราฟแผ่นภูมิแท่งค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของ CLSM ที่อายุบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของ CLSM มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละเศษแก้ว ซึ่งใช้เศษแก้วต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันร้อยละ 0 20 30 และ 40 โดย CLSM ที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 1,031 783 782 และ 765 kPa ตามลำดับ ส่วน CLSM ที่ใช้คอนกรีตเป็นมวลรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 787 462 290 และ 230 kPa ตามลำดับ โดยมาตรฐานชั้นรองพื้นทางได้ระบุกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าไม่น้อยกว่า 689 kPa (กรมทางหลวง, 2532) ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่ามีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้ว 20 30 และ 40 ที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมที่ไม่ผ่านมาตรฐานชั้นชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณร้อยละเศษแก้ว ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่ใช้เถ้าหนักและคอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

5. บทสรุป

ในงานวิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) ที่มีการใช้เถ้าลอยและเศษแก้วเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ เถ้าหนักและคอนกรีตรีไซเคิลใช้แทนมวลรวมโดยมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวชะละลาย สรุปได้ดังนี้

1. เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัว และค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ลดลงตามมาตรฐาน EFNARC (2002) ซึ่งค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ในแต่ละอัตราส่วนผสมผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น
2. CLSM ที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมและการเพิ่มขึ้นของปริมาณร้อยละเศษแก้ว ส่งผลให้การยุบตัว การยุบตัวแบบไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัวลดลงมากกว่า CLSM ที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวม
3. หน่วยน้ำหนักของ CLSM ที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวล มีค่าน้อยกว่า CLSM ที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวม

4. การเพิ่มขึ้นของปริมาณร้อยละเศษแก้ว ส่งทำให้ค่ากำลังรับแรงแกนเดียวของ CLSM ลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสันบสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา ภายใต้ทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษาปี 2565

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 229 (1999). *Controlled low strength materials (ACI 229R)*, American Concrete Institute. Farmington Hill. Michigan. USA.

[2] Achtemichuk, S., Hubbard, J., Sluce, R., and H.Shehata, M., (2009). *The utilization of recycled consrete aggregate to produce controlled low-sternath materials without using Portland cement*.

[3] ASTM Designation C 1611 (2014). *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*. Farmington Hill. Michigan. USA.

[4] ASTM Designation C 403 (2016). *Standard test method for time of setting of concrete mixtures bipenetration resistance.*Philadelphia USA.

[5] ASTM International. ASTM Designation D 2166 (2016). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. Philadelphia. USA.

[6] ASTM Designation C138 (2017). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Philadelphia. USA.

[7] Chompoorat, T., Jakpet, S., and Jongvivatsakul, P., (2018). *The Performance of Controlled Low-Strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement*. KSCE Journal of Civil Engineering. 22(6). 2055.2063.

[8] Chompoorat, T., Thepumong, T., and Likitlersuang, S., (2021). *Alkali-Activated Controlled Low-Strength Material Utilizing High-Calcium Fly Ash and Steel Slag for Use as Pavement Materials*. Article in Journal of materials in Civil Ehgineering. (2021).

[9] EFNARC. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete. Surrey*. UK.

[10] Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., and Chindaprasirt, P., (2017). *Compressive sternfth and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash*. Journal of Cleaner Production 172 (2018) 2892-2898.

[11] กรมทางหลวง ทล.-ม. 206. (2532). *มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์*. กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง

[12] กรมมลพิษ. (2563). ข้อมูลขยะมูลฝอย สืบค้นข้อมูลจาก https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2563

[13] เทอดศักด์ สายสุทธิ์. (2554). *RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต*. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9

[14] ธนกฤต เทพอุโมงค์ และคณะ. (2563). *การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง*. มหาวิทยาลัยพะเยา

[15] สำนักสถิติแห่งชาติ. (2563). สืบค้นจาก http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx