การพัฒนาการควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตรีไซเคิลโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

Development of controlled low-strength from recycled concrete activated by alkali for pavement engineering application

กิตติภพ ขวัญตน[1] อนุพงศ์ คำปลอด[2] ธนกฤต เทพอุโมงค์[2,*] และ ธนกร ชมภูรัตน์[3]

[1] นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

[2] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาลัยพะเยา จ.พะเยา

[3] รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์หาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: thanakit.th@up.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันขยะที่เกิดจากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้างมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low strength material, CLSM) โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วยเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ทรายธรรมชาติ คอนกรีตรีไซเคิลจากโครงสร้างอาคารที่เกิดจากการรื้อถอน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงเพื่อเป็นตัวชะละลาย สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมผิวทาง โดยจะศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI229R-99 และเกณฑ์มาตรฐานงานก่อสร้างทางของกรมทางหลวงประเทศไทย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นตัวชะละลายและใช้ทรายธรรมชาติกับคอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุมวลรวมละเอียดร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตัวอย่าง CLSM จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM ประกอบไปด้วย การทดสอบการยุบตัว การไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว การเยิ้มน้ำ หน่วยน้ำหนัก และนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียวซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักสำหรับใช้ในการออกแบบผิวทาง

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, เถ้าลอย, คอนกรีตรีไซเคิล, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

Abstract

Nowadays, the amount of waste generated from the demolition of buildings is increasing and tends to cause environmental problems in the future. Therefore, this research aims to study the mixture ratio of controlled low strength material (CLSM) using industrial waste materials. It consists of fly ash from Mae Moh Power Plant, natural sand, and recycled concrete from demolition building structures. and a solution of sodium hydroxide with high base properties as a solvent. for use in pavement engineering It will study the basic properties of engineering. And the power properties of the CLSM are in accordance with the ACI229R-99 standard and the road construction standards of the Department of Highways of Thailand. A solution of 10 molar sodium hydroxide was used as a leaching agent, and natural sand and recycled concrete were used as fine aggregate in the ratio of recycled concrete to 0, 25, 50, 75 and 100 percent of the CLSM samples . The basic CLSM engineering of the CLSM include slum loss, slum flow, setting time, bleeding, unit weight and unconfined compressive strength properties were tested. This is a key parameter for pavement design.

Keywords: Controlled low-strength material, Fly ash, Recycled concrete, Sodium hydroxide, Unconfined compressive strength

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพกันอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานและเพื่อลดปัญหาการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นการนำของเหลือใช้จากกระบวนการอุสาหกรรมหรือคอนกรีตรีไซเคิล (Recycle concrete, RC) มาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ปี 2560 ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2555-2559) จะต้องมีการใช้หินปูนสำหรับผลิตในอุตสาหกรรมซีเมนต์ เฉลี่ยประมาณ 70 ล้านเมตริกตันต่อปี โดยมีการ

ขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 3-4 ต่อปี นอกจากการใช้ทรัพยากรในปริมาณมากแล้ว การก่อให้เกิดขยะของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและการรื้อถอนทำลาย (Construction & Demolition Waste : C&DW) คิดเป็นร้อยละ 30-40 ของขยะในระบบฝังกลบทั่วโลก (Chen, Z. et al., 2002) จากปริมาณขยะของเสียจำนวนมากดังกล่าวทำให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ส่งเสริมให้มีการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ในรูปแบบต่างๆ และส่งเสริมให้มีการประยุกต์ใช้หลัก 3Rs (Reduce Reuse Recycle) ลดการใช้ นำกลับมาใช้ซ้ำ นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อใช้ทรัพยากรที่มีอย่างคุ้มค่าและสามารถลดปริมาณขยะลง(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) การนำของเสียจากอุสาหกรรมและการก่อสร้างกลับมาใช้ใหม่คือทางเลือกที่จะช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ทรัพยากรธรรมชาติและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมไปพร้อมๆกัน จากสาเหตุดังกล่าวผู้วิจัยจึงต้องการนำขยะของเสียจากอุสาหกรรมและการก่อสร้างมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานด้านวิศวกรรม

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM) เป็นวัสดุถม (fill material) ที่มีลักษณะคล้ายคอนกรีตสามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เป็นวัสดุอีกชนิดที่ใช้ทดแทนดินบดอัด มีการไหลที่ดีและมากกว่า 650mm ตามมาตรฐานคอนกรีตที่สามารถอัดตัวได้ด้วยตัวเอง (EFNARC, 2002) ใช้ในงานที่ไม่สามารถบดอัดให้แน่นได้เนื่องในลักษณะพื้นที่การทำงานหรือต้องการลดต้นทุนในการบดอัด เช่น การสร้างท่อระบายน้ำ งานปรับระดับและการใช้ในงานพื้นทางแทนหินคลุก (crush rock) CLSM มีกำลังที่ต่ำโดยมาตรฐาน ACI 229R-99 (American Concrete Inslilute, 1999) ระบุค่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM เท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน สาเหตุที่ CLSM ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำเนื่องจากลักษณะของงานที่นำมาใช้อาจต้องทำการพัฒนาหรือมีการรื้อถอนในอนาคต จากงานวิจัยที่ผ่านมานี้ชี้ว่า CLSM ต้องมีความสามารถในการทำงานได้ดี (workability) มีความหนาแน่นต่ำ มีกำลังที่ต่ำ และสามารถแข็งตัวด้วยตัวเอง (Ling et al.,2018; Chompoorat et al., 2018)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำจะประกอบด้วย สารเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยทั่วไปสารเชื่อมประสานที่นิยมใช้ก็คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ ได้จากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิที่สูงประมาณ 1,400-1,600 °C แล้วนำมาเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมาก ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูงมากส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้จึงหลีกเลี่ยงการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่จะใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม คือ เถ้าลอย (fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และคอนกรีตรีไซเคิล (recycle concrete) จากโครงสร้างที่หมดอายุการใช้งานแล้ว โดยเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ เป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) (Chompoorat et al., 2021) ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงเพื่อเป็นตัวชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิวของวัสดุประสานและลดการใช้ทรายธรรมชาติโดยใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนที่ในอันตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ถือเป็นการนำเอาของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

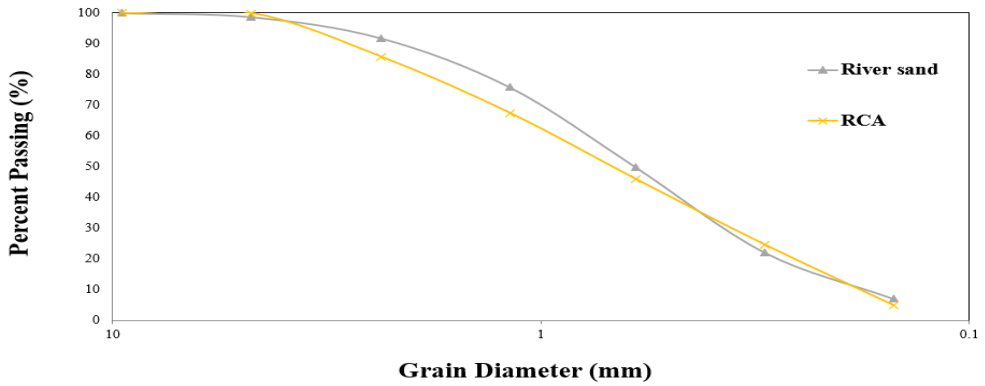
2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย เถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิลจากโครงสร้างอาคารที่เกิดจากการรื้อถอน โดยเถ้าลอยถูกนำมาใช้เป็นวัสดุประสาน ส่วนทรายธรรมชาติและคอนกรีตรีไซเคิลถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวม และสารละลาย NaOH ถูกนำมาใช้เป็นตัวชะละลาย คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมมีตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

วัสดุมวลรวม	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (%)	โมดูลัสความละเอียด
ทรายธรรมชาติ	1685	2.62	0.43	2.54
คอนกรีตรีไซเคิล	1584	2.51	3.92	2.71



รูปที่ 1 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและคอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 2 เถ้าลอย



รูปที่ 4 คอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 3 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ 5 โซเดียมไฮดรอกไซด์

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสม CLSM ที่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยถูกใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิลถูกใช้แทนที่มวลรวมโดยใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนที่ทรายธรรมชาติ อัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ และใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นตัวชะละลาย

การเตรียมตัวอย่างทำโดย ผสมเถ้าลอยและวัสดุมวลรวมให้เข้ากันก่อน จากนั้นเติมสารละลาย NaOH และน้ำตามจากนั้นเทส่วนผสมลงในแบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 cm (1 ¼ in) สูง 7.00 (2 ½ in) ทิ้งตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน และหุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น ตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างครบ 7 วัน

2.3 ผลการทดสอบของ CLSM

2.3.1 การทดสอบค่าการยุบตัว

ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าการยุบตัวหลังจากผสม CLSM เสร็จทันทีของตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่าง 27-28 cm หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทั้ง 5 ตัวอย่างมีค่าการยุบตัวที่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น (polymerization) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้ปริมาณน้ำใน CLSM ลดลง ส่งผลต่อค่าการยุบตัว โดยตัวอย่างที่ 5 มีค่าการยุบตัวน้อยที่สุด ในช่วงเวลาหลังผสมเสร็จทันที และตัวอย่างที่ 1 มีค่าการยุบตัวมากที่สุดในทุกช่วงเวลา

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของ CLSM ต่อปริมาตร 1 ลบ.ม.

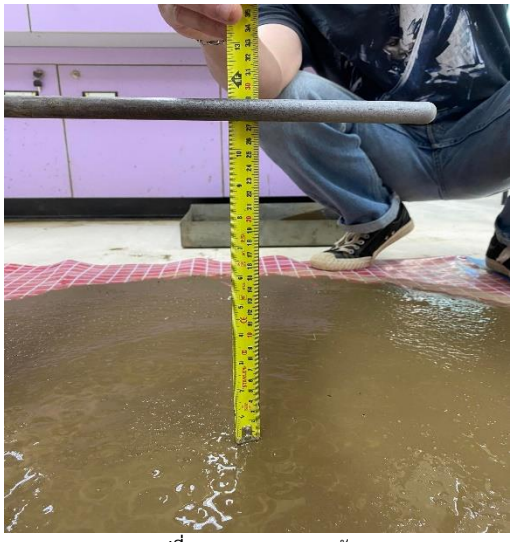
Mix	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	เถ้าลอย (kg/m^3)	น้ำ (kg/m^3)	NaOH (10M) (kg/m^3)	ทราย ธรรมชาติ (kg/m^3)	คอนกรีตรีไซเคิล (kg/m^3)
1	AA10/S100/RCA00	0.54	535	290	20	802	0
2	AA10/S75/RCA25	0.54	535	290	20	601.5	200.5
3	AA10/S50/RCA50	0.54	535	290	20	401	401
4	AA10/S25/RCA75	0.54	535	290	20	200.5	601.5
5	AA10/S00/RCA100	0.54	535	290	20	0	802

ตารางที่ 2 ค่าการยุบตัว

Mix	Slump loss (cm)				
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min
1	28	28	27	26	26
2	28	28	27	26	26
3	28	28	27	27	26
4	28	27	27	27	26
5	27	28	26	26	26

ตารางที่ 3 ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

Mix	Slump flow (cm)				
	0.0 hr	0.3 hr	1.0 hr	1.3 hr	2.0 hr
1	28	28	27	26	26
2	28	28	27	26	26
3	28	28	27	27	26
4	28	27	27	27	26
5	27	28	26	26	26



รูปที่ 6 การทดสอบการยุบตัว



รูปที่ 7 การทดสอบการยุบตัวแบบไหลแผ่

2.3.2 การทดสอบเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C403 จากผลการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 1 ถึง 5 มีระยะเวลาการ ก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 390 ถึง 445 นาที ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง

2.3.3 การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

ผลการทดสอบการยุบตัวแบบไหลแผ่ดังตารางที่ 3 พบว่า หลังจากผสม CLSM เสร็จทันที (0 min.) ตัวอย่างมีค่าการ ไหลแผ่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 66-95 cm จากมาตราฐาน EFNARC (2002) ระบุว่า การยุบตัวแบบไหลแผ่ ของคอนกรีตอัดตัวด้วยตัวเองต้องมีค่าการไหลแผ่หลังจาก ผสม CLSM เสร็จทันที (0 min.) มากกว่า 65 cm จากการทดลองพบว่าตัวอย่างที่ 1 (AA10/S100/RCA00) มีค่าการไหลแผ่มากที่สุดทุกช่วงเวลา หลังจากปรับอัตราส่วนผสมโดยการลดปริมาณทรายลงแล้วเพิ่ม RCA เข้าไปตามปริมาณทรายที่ลดลงร้อยละ 25 50 75 และ100 ตามลำดับ พบว่าค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่มีค่าลดลงเนื่องจาก RCA ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การไหลแผ่ลดลง

2.3.4 การทดสอบการเยิ้มน้ำ

จากผลการทดสอบการเยิ้มน้ำ ตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 ซึ่งอัตราส่วนวัสดุมวลรวมที่แตกต่างกันร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 มีร้อยละการเยิ้มน้ำเท่ากับ 1.11 0.93 0.77 0.56 และ 0.41 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลให้ปริมาณการเยิ้มน้ำลดลง



รูปที่ 8 การทดสอบการเยิ้มน้ำ

2.3.5 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

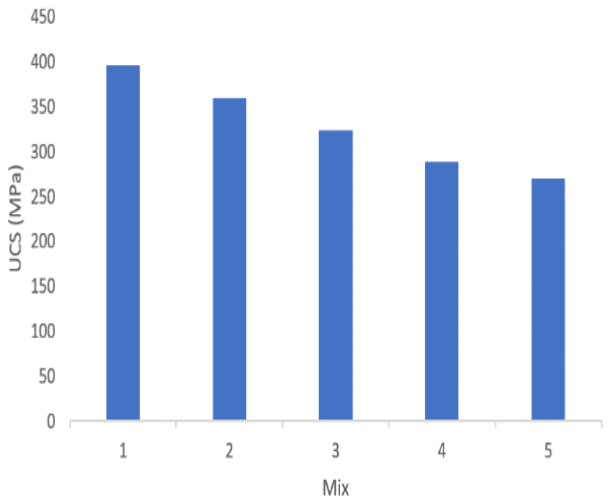
จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM ดังตารางที่ 4 พบว่าตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 มีค่าหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงอยู่ระหว่าง 1957-2167 kg/m^3 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนัก ร้อยละการเยิ้มน้ำและการก่อตัวเริ่มต้น

Mix	Unit weight (kg/m^3)	Bleeding (%)	Initial setting time (hr)
1	2167	1.11	7
2	2089	0.93	7
3	2075	0.77	7
4	2030	0.56	7
5	1957	0.41	6

2.3.6 การทดสอบแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM แสดงในรูปภาพที่ 9 พบว่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM ลดลงตามปริมาณ RCA ที่เพิ่มขึ้นโดยกำลังรับแรงอัดของ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 ซึ่งใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายธรรมชาติและคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 395 359 323 287 และ 269MPa ตามลำดับ พบว่าปริมาณร้อยละส่วนผสมมวลรวมที่เพิ่ม RCA มากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Nuaklong et al.,2021)



รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดของ CLSM

3. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดลองของ วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) ที่มีเถ้าลอย เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวม โดยมีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย มีผลสรุปดังนี้

[1] การใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายต่อคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 มีผลกระทบต่อการไหลแผ่ การเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลทำให้การไหล่แผ่ลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีการดูซึมน้ำที่มากกว่าทำให้ส่วนผสมที่เพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลมีความข้นหนืดมากกว่าทรายธรรมชาติ

[2] การใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายต่อคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 มีผลกระทบต่อระยะการก่อตัว พบว่าส่วนผสมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 100 มีระยะการก่อตัวเร็วที่สุด เนื่องจากการเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลให้ระยะการก่อตัวลดลง

[3] การใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายต่อคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 มีผลกระทบต่อการเยิ้มน้ำ การเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลให้การเยิ้มน้ำลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่าทรายธรรมชาติ

[4] การใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายต่อคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าการเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่อนุเคราะห์ เถ้าลอย

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 229. Controlled low strength materials (ACI 299R-99). American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA; 1999.

[2] ASTM International. ASTM Designation C 138: 2017. Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. Philadelphia. USA.

[3] ASTM International. ASTM Designation C 1611: 2014. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. Philadelphia. USA.

[4] ASTM International. ASTM Designation C 2166: 2016. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Philadelphia. USA.

[5] ASTM International. ASTM Designation C 232: 2014. Standard test method for bleeding of concrete. Philadelphia. USA.

[6] ASTM International. ASTM Designation C 403: 2016. Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance. Philadelphia. USA.

[7] Chompoorat T, Likitlersuang S, Jongvivatsakul P. The Performance of Controlled Low-strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement. KSCE journal of Civil Engineering 22(6):2055-2063. 2018.

[8] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete: Surrey, UK; 2002.

[9] Nuaklong P, Wongsa A, Boonserm K, Ngohpok C, Jongvivatsakul P, Sata V, Sukontasukkul P, Chindaprasirt P. Enhancement of mechanical properties of fly ash geopolymer containing fine recycled concrete aggregate with micro carbon fiber. Journal of Building Engineering 41. 2021.

[10] Chompoorat T, Thepumong T, Nuaklong P. Alkali-Activated Controlled Low-Strength Material Utilizing High-Calcium Fly Ash and Steel Slag for Use as Pavement Materials. Journal of Materials in Civil Engineering. 2021.

[11] Zhen Chen, Heng Li, Conrad T.C. Wong, An application of bar-code system for reducing construction wastes. Automation in Construction 11. 2002.

[12] Ling T, Kumar S, Poon C. Global perspective on application of control low-strength material (CLSM) for trench backfilling – An overview. Construction and Building Materials 158: 535-548. 2018