สมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากขยะฝาขวดน้ำพลาสติกแทนที่มวลรวมละเอียด

Flowability and Compressive Strength of Controlled Low-Strength Material Made from Plastic Bottle Cap Waste as Fine Aggregate Replacement

ชญานิษฐ์ ปัญญสุทธิ์[1,*] ภีม เหนือคลอง[2] พิชชา จองวิวัฒสกุล[3] ธนกร ชมภูรัตน์[4] และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง[5]

[1,2,3] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[5] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: chayanit.p28@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดจากการใช้เพียงครั้งเดียวเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) ที่นำขยะพลาสติกจากฝาขวดน้ำมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดที่ปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย น้ำ ทรายธรรมชาติ และขยะพลาสติกจากฝาขวดน้ำ คุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย ความสามารถในการไหลแผ่ และกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่และความสามารถในการรับกำลังอัดแกนเดียวลดลง อย่างไรก็ตาม การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดในปริมาณ 30 40 และ 50% สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, ขยะพลาสติก, ฝาขวดพลาสติก, วัสดุพื้นทาง

Abstract

Nowadays, an increasing of single-used plastic waste amount becomes one of serious environmental issues. This research aims to investigate the mechanical properties of controlled low-strength material (CLSM) made from plastic bottle cap waste. Plastic bottle cap waste was used as fine aggregate replacement at 20%, 30%, 40%, and 50% by volume of fine aggregate. Raw materials used in CLSM consisted of cement, fly ash, water, natural sand, and plastic bottle cap waste. The experimental program includes flow test and unconfined compression test at curing time of 7, 14, and 28 days. The test results show that slump flow and unconfined compressive strength of CLSM mixes decreased with the increase in the plastic replacement content. However, mixtures with 30%, 40%, and 50% of plastic waste can still satisfy with the strength criteria of CLSM for using as pavement base material.

Keywords: Controlled low-strength material, Plastic waste, Plastic bottle cap, Pavement base material

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังเผชิญอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะปัญหาด้านขยะพลาสติก เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีราคาถูก น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน และสะดวกในการใช้งาน จึงทำให้พลาสติกมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจากวิถีชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่มีความนิยมในการสั่งซื้ออาหารแบบดิลิเวอรี่และการสั่งซื้อสินค้าออนไลน์ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 2013 พบว่ามีขยะพลาสติกปริมาณ 299 ล้านตัน ถูกผลิตขึ้นมาจากทั่วโลก แต่มีเพียง 25% เท่านั้นที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ [12] และจากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2563 [3] พบว่าในแต่ละครั้งของการสั่งซื้อจะก่อให้เกิดขยะพลาสติกไม่น้อยกว่า 5 ชิ้น หรือบางประเภทอาจมากถึง 10 ชิ้น ได้แก่ ถุงพลาสติก กล่องพลาสติกใส่อาหาร ซองพลาสติกแยกชนิดอาหาร ซองเครื่องปรุงรส แก้วพลาสติก ช้อนและส้อมพลาสติก โดยปริมาณขยะพลาสติกในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2562 มีจำนวนมากถึง 1.91 ล้านตัน แต่มีขยะพลาสติกปริมาณเพียง 0.36 ล้านตัน หรือคิดเป็น 19% เท่านั้น [3] ที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ ขยะพลาสติกส่วนที่เหลือจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การฝังกลบอย่างไม่ถูกหลักวิชาการ การเผากลางแจ้ง การเทกอง หรือการนำไปทิ้งลงทะเล เป็นต้น ซึ่งพลาสติกจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 450 ปี โดยพบว่ามีสถานที่

กำจัดขยะที่ดำเนินการกำจัดขยะอย่างไม่ถูกวิธีมากถึง 2,257 แห่ง [3] ดังนั้นการนำขยะพลาสติกมาประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างโดยการนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางแทนหินคลุกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกดังกล่าวและยังเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างอีกด้วย

วัสดุควบคุมกำลังต่ำเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายคอนกรีต มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุถมชนิดอื่น คือ มีความสามารถไหลเข้าที่แคบได้ดีและอัดแน่นด้วยตัวเองได้ [4] จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุถม โดยถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น งานดินถม งานฝังกลบ งานปรับระดับ งานการขุดวางท่อระบบสาธารณูปโภคต่างๆ รวมถึงการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อที่ฝังใต้ดินได้อีกด้วย เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้พื้นที่จำกัดได้ ราคาต้นทุนถูกกว่าการบดอัดดิน และไม่ต้องการคนงานมากมายนักในการทำงาน มาตรฐาน ACI 229R [5] ได้ระบุค่าการยุบตัวไหลแผ่ไว้มากกว่า 200 มม. และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าไม่เกิน 8.3 MPa เพื่อความสะดวกในการขุดรื้อถอนในอนาคต ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำ เช่น เศษจอ LCD [6] เศษยางบด [7] มวลรวมละเอียดนำกลับมาใช้ใหม่ [8] เปลือกหอยนางรมบด [9] เศษกระดาษเหลือทิ้ง [10] ทรายหล่อ [11] ผงฝุ่นซีเมนต์ [12-15] และตะกรันเหล็ก [16] เป็นต้น

ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำโดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการเผาซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิสูง 1400 ถึง 1600 องศาเซลเซียส แล้วนำเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดจึงส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์สำหรับวัสดุประสานและการนำขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติสำหรับมวลรวมละเอียดมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำจึงถือเป็นวิธีหนึ่งในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้และคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากขยะฝาขวดน้ำพลาสติกแทนที่ทรายธรรมชาติ สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางแทนหินคลุก เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกและลดต้นทุนการบดอัดดินในงานก่อสร้างพื้นทาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากมวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย มวลรวม ได้แก่ ทรายธรรมชาติ วัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดจากขยะพลาสติกจากฝาขวดน้ำ และวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และเถ้าลอย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

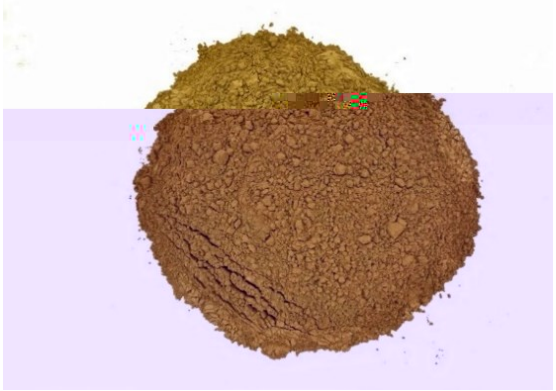
1) เถ้าลอยแคลเซียมสูง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1
2) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป
3) ทรายธรรมชาติ คุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2
4) ขยะพลาสติกจากฝาขวดน้ำบด จากเครื่องปั่นบดละเอียด (Cutting and Grinding machine) และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติทางเคมี	ปริมาณทางเคมี (%)
SiO_2	26.9
CaO	22.3
Fe_2O_3	14.3
Al_2O_3	13.4
SO_3	5.94
MgO	2.52
Na_2O	2.06
K_2O	1.79
TiO_2	0.33
P_2O_5	0.30
BaO	0.16
SrO	0.12
MnO	0.10

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

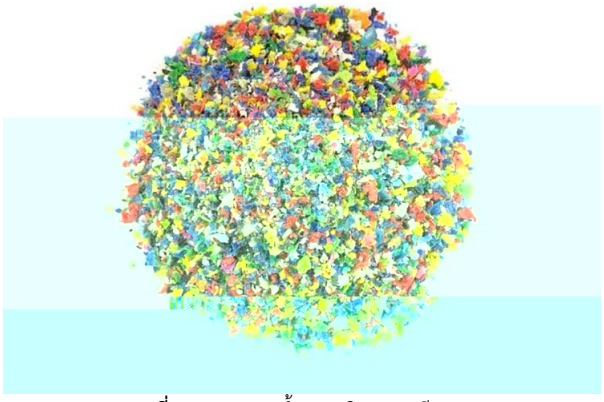
มวลรวมละเอียด	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด (FM)	การดูดซึมน้ำ (%)
ทรายธรรมชาติ	2.65	2.85	0.65
ขยะพลาสติกจากฝาขวดน้ำบด	0.95	4.67	0.01



รูปที่ 1 เถ้าลอย

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

ชื่อส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (kg/m^3)	เถ้าลอย (kg/m^3)	น้ำ (kg/m^3)	ทรายธรรมชาติ (kg/m^3)	ขยะฝาขวดน้ำพลาสติก (kg/m^3)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)
P00	143.86	288.14	345.60	1296.0	0	0.80
P20	143.86	288.14	345.60	1036.8	93.3	0.80
P30	143.86	288.14	345.60	970.2	140.0	0.80
P40	143.86	288.14	345.60	777.6	186.6	0.80
P50	143.86	288.14	345.60	648.0	233.3	0.80

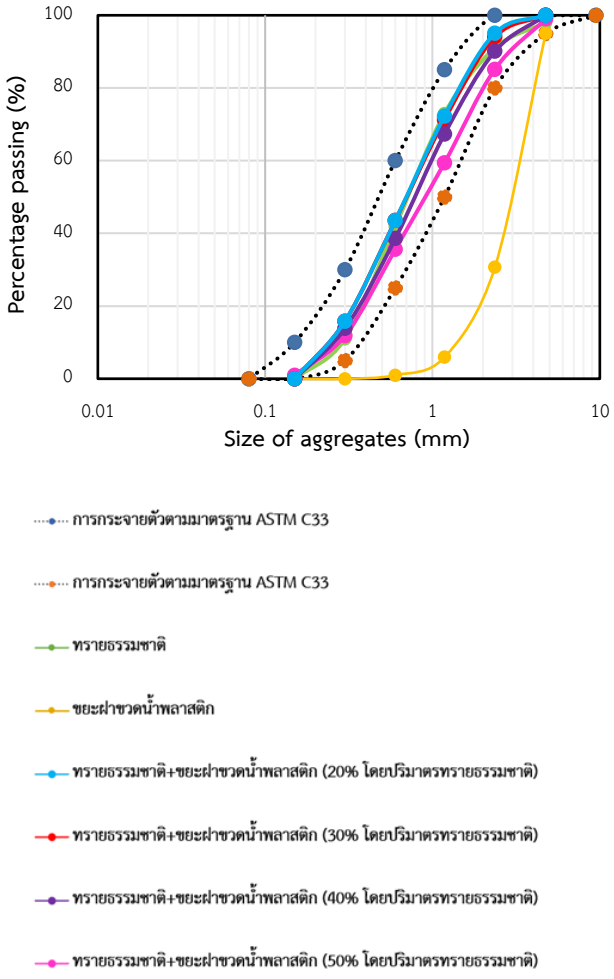


รูปที่ 2 ขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียด

การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดแสดงดังรูปที่ 3 จากผลการทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] พบว่าอนุภาคฝาขวดน้ำพลาสติกบดล้วนมีการกระจายตัวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] แต่เมื่อนำขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดมาแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตร การกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำได้

2.2 สัดส่วนผสมและวิธีการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการไหลและกำลังรับแรงอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากขยะฝาขวดน้ำพลาสติก โดยขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดจะถูกนำมาแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตร ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำดังแสดงในตารางที่ 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.80 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.50 ทุกส่วนผสม เพื่อต้องการควบคุมค่ากำลังรับแรงอัดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.8 ถึง 8.3 MPa ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางตามเกณฑ์กำหนดของมาตรฐาน ACI 229R [5]



รูปที่ 3 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียด

ขั้นตอนการผสมวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 1.30 นาที ขั้นตอนแรกใส่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เถ้าลอย และน้ำ ผสมกันเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 โดยใส่ทรายธรรมชาติและขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดละเอียดผสมกันอีก 1 นาที เมื่อผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 โดยการเทวัสดุควบคุมกำลังต่ำเข้าแบบหล่อ และนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ตามอายุการบ่ม

2.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

2.3.1 ค่าการยุบตัวไหลแผ่

การทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะทดสอบจากความสามารถในการไหลแผ่หลังจากผสมเสร็จทันทีตามมาตรฐาน ASTM C1611 [18]

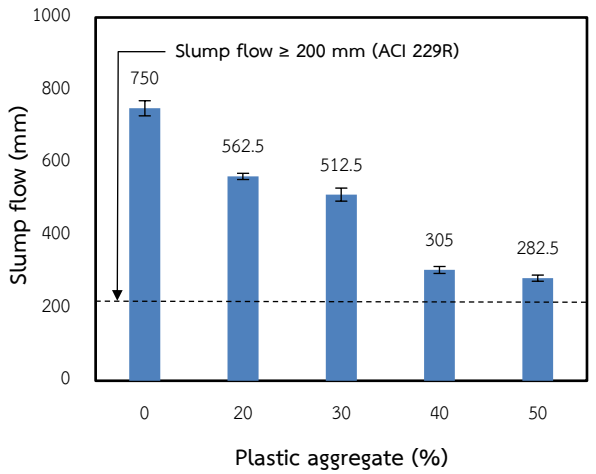
2.3.2 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D2166 [19] โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มม. ความสูง 110 มม. ที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ค่าการยุบตัวไหลแผ่

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากขยะฝาขวดน้ำพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM C1611 [18] เมื่อทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยขยะฝาขวดน้ำพลาสติกบดในปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตร พบว่าค่าการยุบตัวไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 750 563 513 305 และ 283 มม. ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 200 มม. ทุกส่วนผสม ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R [5] และพบว่าค่าการยุบตัวไหลแผ่จะลดลงเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยปริมาณขยะพลาสติกที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าการยุบตัวไหลแผ่ของส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยขยะพลาสติกกับส่วนผสมที่มีสัดส่วนผสมของขยะพลาสติกที่มากขึ้นพบว่าค่าการยุบตัวไหลแผ่ลดลงเท่ากับ 25 31.7 59.3 และ 62.3% เมื่อใช้พลาสติกบดในปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตร ตามลำดับซึ่งเป็นผลมาจากการที่ขยะฝาขวดน้ำพลาสติดบดละเอียดมีอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ทำให้ความสามารถในการทำงานได้มีค่าลดลง

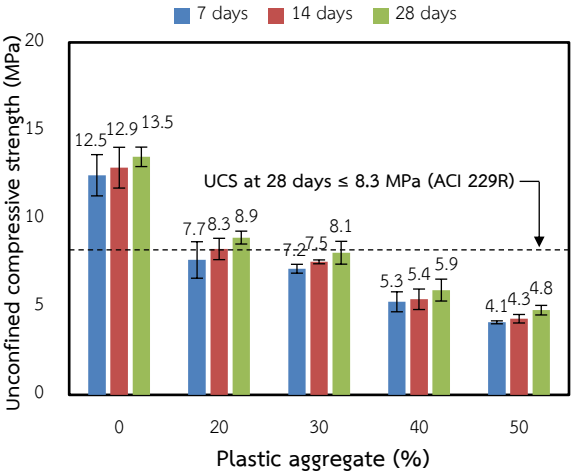


รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

3.2 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากขยะฝาขวดน้ำพลาสติกที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่าวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยปริมาณขยะฝาขวดน้ำพลาสติกที่มากขึ้นสำหรับทุกอายุบ่ม โดยเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยขยะพลาสติกกับส่วนผสมที่มีสัดส่วนผสมของขยะพลาสติกที่มากขึ้นพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันมีค่าลดลง 34.1 40 56.3 และ 64.4% เมื่อใช้พลาสติกบดในปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากพลาสติกมีความสามารถในการรับกำลังและมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้ลักษณะผิวของอนุภาคขยะฝาขวดน้ำพลาสติกที่มีความมันจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเพสต์และมวลรวมไม่แข็งแรง [20-22] รวมถึงพลาสติกมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าทรายธรรมชาติมากจึงทำให้เกิดการสะสมของน้ำที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเพสต์และมวลรวมที่มากเกินไปจึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง [21]

อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ของส่วนผสม P30 P40 และ P50 มีค่าเท่ากับ 8.1 5.9 และ 4.8 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของทั้งสามส่วนผสมมีค่าไม่เกิน 8.3 MPa ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R [5] ดังนั้นขยะพลาสติกสามารถนำมาใช้ทดแทนทรายธรรมชาติที่ปริมาตร 30 40 และ 50% เพื่อผลิตเป็นวัสดุควบคุมกำลังต่ำได้



รูปที่ 5 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าลดลงตามสัดส่วนของขยะฝาขวดน้ำพลาสติกที่มากขึ้น โดยมีค่าลดลงมากที่สุดถึง 62.3% และในส่วนของคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดแกนเดียวมีค่าลดลงตามสัดส่วนของขยะฝาขวดน้ำพลาสติกที่มากขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าลดลงมาก

เอกสารอ้างอิง

[1] Bajracharya, R.M., Manalo, A.C., Karunasena, W. and Lau, K.T. (2014). An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites. *Material and Design*, 62, pp. 98–112.

[2] Ragaert, K., Delva, L. and Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, pp. 24–58.

[3] กลุ่มงานติดตามประเมินสถานการณ์ กองติดตามประเมินผลสิ่งแวดล้อม. (2564). *รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2563*. สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, หน้า 219-220.

[4] Ling, T.C., Kaliyavaradhan, S.K. and Poon, C.S. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling – an overview. *Construction and Building Materials*, 158, pp. 535-548.

[5] ACI Committee 229. (1999). *Report on Controlled low strength materials (ACI 229R)*. American Concrete Institute.

[6] Wang Her-Yung. (2009). A study of the engineering properties of waste LCD glass applied to controlled low strength materials concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2127-2131.

[7] Kim, Y.T. and Kang, H.S. (2011). Engineering characteristics of rubber-added lightweight soil as a flowable backfill material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), pp. 1289-1294.

[8] Miren, E., Javier, A., Eugenia, P.M. and Alain, G. (2013). Use of recycled fine aggregates for control low strength materials (CLSM) production. *Construction and Building Materials*, 44, pp. 142-148.

[9] [illegible] compressive strength of controlled low strength materials. *Journal of Materials of Civil Engineering*, 14(6), pp. 485-495.

[12] Pierce, C.E., Tripathi, H. and Brown, T.W. (2003). Cement klin dust in controlled low-strength materials. *ACI Materials Journal*, 100(6), pp. 455-462.

[13] Katz, A. and Kovler, K. (2004). Utilizing of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM). *Waste Management*, 24, pp. 501-512.

[14] Lachemi, M., Hossain, K.M.A., Shehata, M. and Thaha, W. (2007). Characteristics of controlled low-strength materials incorporating t.27M)72s1.nt f

[20] Jacob-Vaillantcourt, R. and Sorelli, L. (2018). Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams. *Construction and Building Materials*, 182, pp. 561-572.

[21] Islam, J., Meherire, S. and Islam, R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, pp. 946-951.

[22] Gesoglu, M., Guneyisi, E., Hansu, O., Etli, S. ad Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, pp. 562-569.