



การศึกษาสมบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผสมด้วยเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

**A STUDY OF PROPERTIES OF CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIAL MADE FROM FLY ASH
UTILISED AS PAVEMENT BASE MATERIAL**

วิทยา บำรุงพงษ์¹ นิธิกร เชื้อเจ็ดตน¹ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง² พิชชา จงวิวัฒน์สกุล³ และธนกร ชมภูรัตน์^{4*}

¹นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้เถ้าลอยในวัสดุควบคุมกำลังต่ำในงานก่อสร้างทาง โดยเป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางทางแทนหินคลุก ปัจจุบันพบว่า การควบคุมมาตรฐานการทำงานก่อสร้างทางค่อนข้างลำบาก รวมทั้งค่าใช้จ่ายจากการบดอัดและทดสอบภาคสนามค่อนข้างสูง สำหรับหลักเกณฑ์พิจารณาจะนำผลทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติด้านงานทางของอัตราส่วนผสมของส่วนผสมที่ออกแบบไว้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยอ้างอิงแนวทางตามเอกสาร ACI229R-99 และเกณฑ์มาตรฐานงานก่อสร้างชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงประเทศไทย โดยพิจารณาคูสมบัตินี้ด้านการแทรกทำงานและสมบัติด้านการรับกำลังเช่น กำลังอัดแกนเดี่ยว ค่าซีบีอาร์และค่าโมดูลัสคืนตัว ผลการศึกษาแนะนำค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, เถ้าลอย, กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว, โมดูลัสคืนตัว, วัสดุพื้นทาง

ABSTRACT

This paper presents an application of a controlled low-strength material (CLSM) made from fly ash in pavement construction. The study aims to find an optimal mixing portion of the CLSM in order to replace a conventional crushed rock used for pavement base. This is because the quality controls are rather difficult and the costs of compaction and field testing are relatively high. The basic engineering properties and pavement engineering properties are tested and analysed to determine the optimal mixing portion of CLSM. The required workability and strength properties including an unconfined compressive strength, CBR and resilient modulus are referred to ACI229R-99 and the material standards of the Thailand Department of Highways. In this study, the results suggest an optimum mix of CLSM mixture utilised as pavement base material.

KEYWORDS: controlled low-strength material; fly ash; unconfined compressive strength; resilient modulus; base material

Witaya bamrungpong¹ Nitikom Chuejedton¹ Suched Likitlersuang² Pichha Jongvivatsakul³ and Thanakorn Chompoorat⁴

¹Bachelor student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

²Professor, Geotechnical Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

⁴Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Phayao.

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างชั้นพื้นทางของถนนในประเทศไทย อ้างอิงมาตรฐานกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท หรือกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยมักเลือกใช้หินคลุก (crush rock) เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง และใช้กระบวนการบดอัดและเกลี่ยแต่งผิวให้ได้ระดับ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมวัสดุหินคลุกนั้นอาจประสบปัญหาหลายอย่างที่ไม่สอดคล้องกับตามมาตรฐานกำหนด เช่น ปริมาณการพ่นน้ำให้ใกล้เคียงค่าความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (optimum moisture content) รวมทั้งค่าใช้จ่ายสำหรับการบดอัดและการทดสอบภาคสนามค่อนข้างสูง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว การนำเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีราคาต้นทุนค่อนข้างต่ำมาผสมร่วมกับคอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการควบคุมคุณภาพที่ได้มาตรฐาน รวมกันเรียกว่า วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM) จึงจะนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับใช้พื้นทางโดยเฉพาะในแหล่งที่ขาดแคลนหินคลุกที่มีคุณภาพได้ โดยมาตรฐาน ACI229R-99 [1] ระบุค่ากำลังอัดของ CLSM มีค่าเท่ากับ 8.3 MPa (1,200 psi) หรือน้อยกว่าสำหรับการขุดในอนาคต ในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่พยายามนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ผสมเพื่อทำเป็นวัสดุ CLSM ยกตัวอย่างเช่น ผงฝุ่นจากโรงงานแอสฟัลต์ [2] มวลรวมละเอียดที่นำกลับมาใช้ใหม่ [3] เศษคอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ [4] และเศษกระดาษเหลือใช้ [5] เป็นต้น สำหรับประเทศไทย วัสดุ CLSM นิยมนำมาใช้กับงานฝังท่อประปาและท่อร้อยสายไฟใต้ดิน ซึ่งส่วนผสมหลักและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานแตกต่างกับงานก่อสร้างทางค่อนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนผสมของ CLSM สำหรับนำไปใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง (base course) ของโครงสร้างถนนในประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ CLSM สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
2. ศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ CLSM ที่ออกแบบดังตารางที่ 1 สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

ตารางที่ 1 รายละเอียดอัตราส่วนผสมของ CLSM ที่ออกแบบ

ส่วนผสม	วัสดุประสาน (kg/m ³)	น้ำ (L/m ³)	ทราย (kg/m ³)	สารกักกระจาย ฟองอากาศ (% by Vol.)
MIX 1	300	200	1,400	0.004
MIX 2	450	190	1,365	0.004
MIX 3	600	200	1,330	0.004
MIX 4	280	240	1,500	0.004
MIX 5	265	240	1,500	0.004
MIX 6	240	240	1,500	0.004
MIX 7	265	240	1,500	0.002

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้ ปริมาณวัสดุดิบที่นำมาเป็นตัวแทนในการศึกษาประกอบไปด้วย วัสดุเชื่อมประสานที่มีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Portland cement type I) กับเถ้าลอยประเภท C น้ำ ทราย และสารกักกระจายฟองอากาศ

กระบวนการออกแบบส่วนผสม แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่ง (สูตรที่ 1 – 3) ใช้อัตราส่วนที่มีขายในท้องตลาด และกลุ่มที่สอง (สูตรที่ 4 – 7) ทำการออกแบบอัตราส่วนผสมใหม่ โดยอาศัยการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของ 3 สูตรส่วนผสมแรก จากนั้นทำการปรับปรุงอัตราส่วนของวัตถุดิบให้เหมาะสมขึ้น การเตรียมตัวอย่างและทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของส่วนผสมดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ส่วนการทดสอบคุณสมบัติด้านงานวิศวกรรมผิวทางดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง CLSM ที่นำมาใช้ทดสอบแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซ (California Bearing Ratio, CBR) ถูกเตรียมจากส่วนผสมที่ออกแบบ และขึ้นรูปตัวอย่างในแบบหล่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 นิ้ว (152.4 มม.) และสูง 4.5 นิ้ว (114.3 มม.) ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (unconfined compressive strength, UCS) และการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) ตัวอย่างทดสอบถูกเตรียมโดยใช้ท่อพีวีซีมาเป็นแบบหล่อเช่นเดียวกัน โดยแบบหล่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (50.8 มม.) และสูง 4 นิ้ว (101.6 มม.) (รูปที่ 1) ทั้งนี้เพื่อควบคุมอัตราส่วนของตัวอย่างให้ได้ 1:2



รูปที่ 1 อุปกรณ์แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ

3.2 กระบวนการผสม CLSM

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นจากการผสมตัวอย่าง CLSM โดยปรับอัตราส่วนผสมจากที่ออกแบบต่อปริมาตร 1 ลบ.ม. เป็นต่อ 0.075 ลบ.ม. โดยระยะเวลาที่ใช้ในการผสมประมาณ 1 นาที ขณะผสมจะทำการปรับปริมาณน้ำเพื่อให้ได้คุณสมบัติ CLSM เบื้องต้นที่เหมาะสม จากนั้นบันทึกปริมาณวัตถุดิบที่ใช้จริง ดังแสดงในตารางที่ 2 และทำการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าปริมาณวัตถุดิบที่ใช้จริงเป็นต่อปริมาตรส่วนผสมทั้งหมด 1 ลบ.ม. ดังตารางที่ 3 จากนั้นเทตัวอย่าง CLSM ลงในแบบหล่อท่อ PVC ที่อายุ 90 นาที และแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกและนำไปบ่มในกล่องโฟมเพื่อป้องกันมิให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามอายุที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดอัตราส่วนผสมของ CLSM ที่ผสมจริงต่อปริมาตรส่วนผสมทั้งหมด 0.075 ลบ.ม.

ส่วนผสม	วัสดุประสาน (kg)	น้ำ (L)	ทราย (kg)	สารกักกระจาย ฟองอากาศ (cm ³)
MIX 1	22.50	18.00	105.00	3.00
MIX 2	33.74	18.52	102.40	3.00
MIX 3	45.00	19.90	99.75	3.00
MIX 4	21.00	19.50	112.50	3.00
MIX 5	19.87	19.90	112.50	3.00
MIX 6	18.00	20.10	112.50	3.00
MIX 7	19.87	20.62	112.50	1.50

ตารางที่ 3 รายละเอียดอัตราส่วนผสมของ CLSM ที่ผสมต่อปริมาตรส่วนผสมทั้งหมด 1 ลบ.ม.

ส่วนผสม	วัสดุประสาน (kg/m ³)	น้ำ (L/m ³)	ทราย (kg/m ³)	สารกักกระจาย ฟองอากาศ (% by Vol.)	W/B	ทราย (S, % by Wt.)
MIX 1	300	240	1,400	0.004	0.80	82
MIX 2	450	247	1,365	0.004	0.55	75
MIX 3	600	265	1,330	0.004	0.44	69
MIX 4	280	260	1,500	0.004	0.93	84
MIX 5	265	265	1,500	0.004	1.00	35
MIX 6	240	268	1,500	0.004	1.12	86
MIX 7	265	275	1,500	0.002	1.04	85

หมายเหตุ W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย)



รูปที่ 2 การเก็บรักษาสภาพตัวอย่างทดสอบ

3.3 โปรแกรมการทดสอบคุณสมบัติ CLSM

โปรแกรมการทดสอบ CLSM ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และการทดสอบคุณสมบัติใช้งานทาง (รูปที่ 3) โดยโปรแกรมการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 โปรแกรมการทดสอบ

ลำดับ	การทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ	เวลาดทดสอบ
1	ค่าการยุบตัว (ASTM C1611 [6])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	0 30 60 และ 90 นาที หลังการผสม CLSM
2	ระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C403 [7])	2 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย
3	ปริมาณอากาศ (ASTM C231 [8])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	30 นาที หลังการผสม CLSM
4	หน่วยน้ำหนัก (ASTM C138 [9])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	30 นาที หลังการผสม CLSM
5	ค่าการยุบตัวแบบไหลแต่ (ASTM C1611 [6])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	0 30 60 และ 90 นาที หลังการผสม CLSM
6	การเชื่อม (ASTM C232 [10])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	เริ่ม 30 นาที หลังการผสม CLSM
7	เวลาในการไหล (ASTM C939 [11])	1 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	0 นาที หลังการผสม CLSM
8	แคลิฟอร์เนียเบร็กรโซ (ASTM D1883 [12])	6 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	ไม่แช่น้ำ 1 4 และ 7 วัน หลังการผสม CLSM แช่น้ำ 4 วัน หลังการผสม CLSM
9	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ASTM D2166 [13])	3 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	7 28 และ 60 วัน หลังการผสม CLSM
10	โมดูลัสคั้นตัว (AASHTO T307 [14])	3 ตัวอย่าง / 1 สูตรส่วนผสม	7 วัน หลังการผสม CLSM



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) การทดสอบ CBR (b) การทดสอบ M_r

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเชื่อมประสานและวัสดุมวลรวมละเอียด

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซึ่งประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าลอย และวัสดุมวลรวมละเอียด หรือทราย ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และทราย

วัสดุ	คุณสมบัติ	ผลทดสอบ	หน่วย
ปูนซีเมนต์	หน่วยน้ำหนัก	3.13	g/cm ³
ปูนซีเมนต์	ความละเอียด : Air permeability test	3,322	cm ² /g
เถ้าลอย	หน่วยน้ำหนัก	2.62	g/cm ³
เถ้าลอย	ความละเอียด : Air permeability test	2,250	cm ² /g
เถ้าลอย	ความละเอียด 45 μm (No.325)	28.7	%
ทราย	เปอร์เซ็นต์ผ่าน 75 μm (No.200)	1.22	%
ทราย	โมดูลัสความละเอียด	2.52	-
ทราย	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทราย	0.093	cm
ทราย	ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.63	-
ทราย	เปอร์เซ็นต์การดูดซึม	0.9	-

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM

4.2.1 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

มาตรฐาน ACI 229R-99 [1] กำหนดให้ค่าหน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าอยู่ระหว่าง 1,840 - 2,320 kg/m³ จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM พบว่า ตัวอย่างการทดสอบทั้ง 7 ส่วนผสม มีค่าหน่วยน้ำหนักที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ระหว่าง 1,785 - 1,912 kg/m³ ดังตารางที่ 6 สำหรับตัวอย่างที่มีค่าหน่วยน้ำหนักมากที่สุด คือ MIX 3 เท่ากับ 1,912 kg/m³ และตัวอย่างที่มีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุดคือ MIX 1 มีค่า 1,785 kg/m³ ดังนั้นผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM พบว่า MIX 2 3 4 5 6 และ 7 สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 6 ผลทดสอบหน่วยน้ำหนักและปริมาณอากาศ

ส่วนผสม	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	ปริมาณอากาศ (%)	
		การคำนวณ	การทดสอบ
MIX 1	1,785	19.0	17.0
MIX 2	1,870	15.1	14.0
MIX 3	1,912	12.7	12.0
MIX 4	1,847	15.7	14.5
MIX 5	1,843	15.6	14.0
MIX 6	1,844	15.2	14.0
MIX 7	1,892	12.9	12.0

4.2.2 การทดสอบปริมาณอากาศ

ผลการทดสอบหาปริมาณอากาศของ CLSM ดังตารางที่ 6 แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ผลคำนวณค่าย้อนกลับ (back calculation) จากค่าน้ำหนักและปริมาตรของ CLSM และผลที่อ่านได้จากชุดทดสอบหาปริมาณอากาศโดยตรง เมื่อพิจารณาข้อมูลผลการทดสอบจาก 2 วิธี พบว่าค่าปริมาณอากาศที่ได้ออกมามีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยตัวอย่างที่มีค่าปริมาณอากาศมากที่สุดคือตัวอย่างทดสอบ MIX 1 มีค่าปริมาณอากาศที่ได้คำนวณค่าย้อนกลับ และค่าที่อ่านได้จากชุดการทดสอบ อยู่ที่ 19% และ 17% ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบที่มีค่าปริมาณอากาศน้อยที่สุดคือตัวอย่างการทดสอบ MIX 3 ค่าปริมาณอากาศที่ได้คำนวณค่าย้อนกลับ และค่าที่อ่านได้จากชุดการทดสอบ อยู่ที่ 12.7% และ 12% ตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าพิจารณาผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ MIX 5 และ MIX 7 มาเปรียบเทียบกับ เพื่อสังเกตผลของสารกักฟองอากาศ พบว่าตัวอย่างทดสอบ MIX 5 มีค่าปริมาณอากาศมากกว่าตัวอย่างทดสอบ MIX 7 ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใส่สารกักกระจายฟองอากาศมากขึ้นจะทำให้ปริมาณอากาศของใน CLSM มีค่ามากขึ้นเช่นกัน

4.3 คุณสมบัติด้านการทำงานของ CLSM

4.3.1 การทดสอบการยุบตัว

ผลการทดสอบหาค่ากับยุบตัว พบว่า ค่าการยุบตัวหลังจากผสม CLSM เสร็จทันที ของตัวอย่างการทดสอบทั้ง 7 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 28 – 29 ซม. และหลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวอีก 3 ช่วงเวลา พบว่าค่าการยุบตัวมีค่าลดลง ตามลำดับ ตารางที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากการเริ่มก่อตัวของ CLSM และปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ที่เกิดขึ้น จึงทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุเริ่มลดลง ส่งผลให้ CLSM มีการยุบตัวที่น้อยลง แต่ค่าการยุบตัวก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้ง 7 ตัวอย่างการทดสอบมีคุณสมบัติการยุบตัวที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 7 ผลทดสอบการยุบตัวและการไหลแผ่

ส่วนผสม	การยุบตัว (ซม.)				การยุบตัวแบบไหลแผ่ (ซม.)			
	0:00 ซม.	0:30 ซม.	1:00 ซม.	1:30 ซม.	0:00 ซม.	0:30 ซม.	1:00 ซม.	1:30 ซม.
MIX 1	28.0	27.5	26.0	26.0	65.5	63.5	57.0	56.5
MIX 2	29.0	28.5	28.0	26.5	65.0	61.5	60.5	58.5
MIX 3	28.5	27.5	27.5	27.0	65.5	65.0	63.5	60.0
MIX 4	28.0	27.0	27.0	27.0	64.0	63.0	62.0	59.5
MIX 5	28.5	28.0	28.0	27.0	65.0	63.5	63.0	61.0
MIX 6	28.5	28.0	27.0	27.0	66.0	65.0	63.0	61.5
MIX 7	28.0	27.5	27.0	26.5	68.0	62.5	58.5	57.5

4.3.2 การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

ผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลของ CLSM พบว่า ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow) หลังจากผสม CLSM เสร็จทันทีที่มีค่าประมาณ ประมาณ 65 ซม. ดังตารางที่ 7 นอกจากนั้นถ้าพิจารณาค่าการไหลเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ค่าความสามารถในการไหลจะมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำถูกใช้ไปเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับตัวอย่างที่มีค่าความสามารถในการ

ไหล ที่เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังผสมน้อยที่สุด คือ ตัวอย่างการทดสอบ MIX 1 ส่วนตัวอย่างทดสอบ MIX 7 มีค่าผลต่างความสามารถในการไหลระหว่างหลังผสมทันทีกับที่เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังผสม มีค่าแตกต่างกันมากที่สุด โดยมีค่าลดลงจาก 68 ซม. เหลือ 57.5 ซม. และเมื่อพิจารณาผลของสารกักกระจายฟองอากาศ ระหว่างตัวอย่างการทดสอบ MIX 5 และ MIX 7 พบว่าสารกักกระจายฟองอากาศช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของ CLSM เนื่องจากตัวอย่างการทดสอบ MIX 5 มีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลน้อยกว่า ตัวอย่างการทดสอบ MIX 7

4.3.3 การทดสอบเวลาในการไหลผ่านรูขนาดเล็ก

ผลการทดสอบเวลาในการไหลผ่านรูขนาดเล็ก (flow cone) ตามตารางที่ 8 สรุปผลได้ค่อนข้างยาก เพราะ CLSM ทั้ง 7 สูตร ส่วนผสม ไม่สามารถไหลผ่านกรวยได้หมด แต่จะพบว่าตัวอย่างการทดสอบ MIX 7 แทบจะไม่สามารถไหลผ่านกรวยได้เลย ส่วนตัวอย่างการทดสอบ MIX 1 MIX 2 และ MIX 3 ค่อนข้างจะให้ผลทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน คือ ยิ่ง CLSM มีอายุเพิ่มขึ้น การไหลยิ่งลดลง สังเกตได้จาก ระยะที่ CLSM ไหลได้ในกรวยที่ลดลงกับเวลาการไหลที่ CLSM ไหลได้ สำหรับตัวอย่างการทดสอบ MIX 4 MIX 5 MIX 6 และ MIX 7 แทบจะไม่มีกรวยไหลเลย อย่างไรก็ตามที่เวลา 1 ชั่วโมงตัวอย่าง MIX 5 กับที่เวลา 30 นาที ตัวอย่าง MIX 6 เกิดการไหลขึ้น เพราะน้ำส่วนเกินแยกตัวจาก CLSM

ตารางที่ 7 ผลทดสอบการไหลผ่านรูขนาดเล็ก การก่อตัว และการแข็ง

ส่วนผสม	ความลึก/การไหล (ซม./วินาที)				เวลาการก่อตัว (ชม.)			การแข็ง (%)
	0:00 ชม	0:30 ชม	1:00 ชม.	1:30 ชม.	เวลาเริ่มก่อตัว	เวลาก่อตัวเริ่มต้น	เวลาก่อตัวสุดท้าย	
MIX 1	14.0	7.0	1.0	0.0	4.30	7.35	10.45	6.77
MIX 2	20.0	9.0	7.0	0.0	5.45	9.25	13.20	8.16
MIX 3	31.0	27.0	16.0	0.0	6.35	11.05	15.45	8.42
MIX 4	9.5	1.0	1.0	0.5	5.25	10.55	16.40	11.51
MIX 5	4.0	2.0	12.5	3.5	5.40	10.45	16.10	11.51
MIX 6	2.0	30.5	0.0	5.5	4.55	10.50	17.05	14.21
MIX 7	0.0	1.5	0.0	0.0	5.25	9.10	13.05	14.20

4.3.4 การทดสอบเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบเวลาการก่อตัวของ CLSM ดังตารางที่ 8 โดยผลการทดสอบได้แยกเวลาการทดสอบการก่อตัวออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ เวลาเริ่มก่อตัว (stiffening setting time) เวลาก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และเวลาก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 8 ตัวอย่างการทดสอบที่มีค่าเวลาเริ่มก่อตัวมากที่สุดคือ ตัวอย่าง MIX 3 โดยมีค่าอยู่ที่ 6.35 ชั่วโมง และส่วนตัวอย่างการทดสอบ MIX 1 มีค่าเวลาเริ่มก่อตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 4.30 ชั่วโมง และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3 มาพิจารณาจะพบว่า ค่า W/B มีผลต่อเวลาการก่อตัวของ CLSM

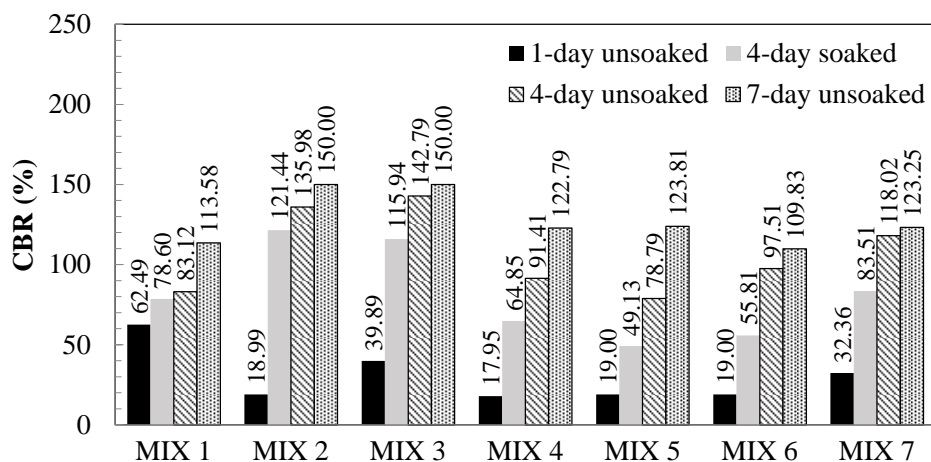
4.3.5 การทดสอบการเข้มน้ำ

ผลการทดสอบค่าการเข้มน้ำ ตามตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ค่าการเข้มน้ำจาก 7 สูตรส่วนผสม มีค่าแตกต่างกันมาก ค่าการเข้มน้ำน้อยที่สุดอยู่ที่ตัวอย่าง MIX 1 คือ 6.77% และตัวอย่างที่มีค่าการเข้มน้ำมากที่สุดคือตัวอย่าง MIX 6 คือ 14.21% เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมทั้งหมด เราพอจะสันนิษฐานได้ว่าปริมาณน้ำและทรายมีผลต่อการเข้มน้ำ กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำและทรายเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการเข้มน้ำเพิ่มขึ้น

4.4 คุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM

4.4.1 การทดสอบแคลิฟอร์เนียเบร็งเรโซ (CBR)

ผลการทดสอบ CBR รูปที่ 4 พบว่า เมื่อ CLSM มีอายุเพิ่มมากขึ้น ค่า CBR จะเพิ่มขึ้น ตัวอย่างการทดสอบ MIX 1 มีค่า CBR ที่อายุบ่ม 1 วันมากที่สุด คือ 62.49% แต่ที่อายุบ่ม 4 วัน กลับพบว่า ตัวอย่างการทดสอบ MIX 3 มีค่า CBR มากที่สุด คือ 142.79% และที่ อายุบ่ม 7 วัน ตัวอย่างการทดสอบ MIX 2 และ MIX 3 มีค่า CBR มากที่สุด คือ มากกว่า 150% จากการนำพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3 มาวิเคราะห์ผลการทดสอบ CBR จะพบว่า W/B และ S(%) มีผลต่อค่า CBR กล่าวคือ เมื่อค่า W/B และ S(%) เพิ่มขึ้น ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตามมาตรฐานกรมทางหลวง วัสดุชั้นพื้นทางต้องมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80% โดยผลการทดสอบทั้ง 7 สูตรส่วนผสม พบว่าที่อายุ 1 วัน ไม่มีตัวอย่างทดสอบที่มีค่า CBR ถึงเกณฑ์ แต่หากพิจารณาที่อายุ 4 วัน พบว่าสูตรส่วนผสม 2 3 4 6 7 มีค่า CBR ที่ถึงเกณฑ์ 80% และหากพิจารณาที่อายุ 7 วัน พบว่าทั้ง 7 สูตรส่วนผสม ถึงเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด



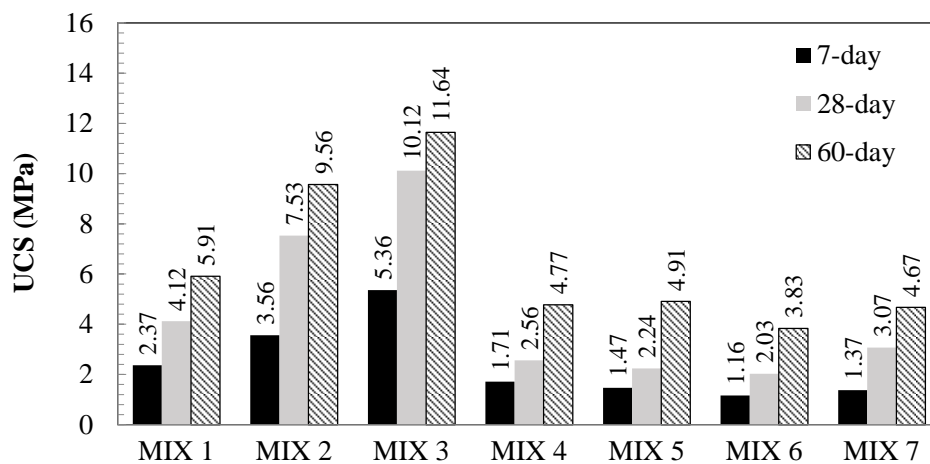
รูปที่ 4 ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนียเบร็งเรโซ (CBR)

4.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UC)

ผลการทดสอบ UC รูปที่ 5 พบว่า ตัวอย่างการทดสอบ MIX 3 มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength, UCS) มากที่สุด เท่ากับ 5.36 MPa ที่อายุ 7 วัน 10.12 MPa ที่อายุ 28 วัน และ 11.64 ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างการทดสอบ MIX 6 มีค่า UCS น้อยที่สุดเท่ากับ 1.17 MPa ที่อายุ 7 วัน 2.03 MPa ที่อายุ 28 วัน และ 3.83 MPa ที่อายุ 60 วัน สำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ เมื่ออายุของ CLSM เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันยิ่งสมบูรณ์มากขึ้น จึงทำให้

CLSM มีค่า UCS เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ค่า UCS มีค่าเพิ่มมากขึ้นนั้นมีผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ของเถ้าลอยด้วย

เมื่อเรานำพารามิเตอร์ ตารางที่ 3 มาใช้ในพิจารณาพร้อมกับผลการทดสอบ UC พบว่า W/B และ S(%) มีผลต่อค่า UCS กล่าวคือ เมื่อ W/B และ S(%) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า UCS ลดลง ตามมาตรฐาน ACI22R-99 [1] ระบุไว้ว่า ค่า UCS ของ CLSM ที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่า แต่ที่นิยมนำมาใช้กับงานถนนดิน ควรมีค่า ไม่เกิน 2.1 MPa ที่ 28 วัน ดังนั้นพบว่า ตัวอย่าง MIX 6 มีค่า UCS เท่ากับ 2.03 MPa จึงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานถนนดินมากที่สุด อย่างไรก็ตามตามมาตรฐาน ACI22R-99 [1] ตัวอย่างการทดสอบทั้ง 7 ตัวอย่าง ผ่านมาตรฐานทั้งหมด ยกเว้นตัวอย่าง MIX 3 ที่มีค่า UCS เท่ากับ 10.12 MPa



รูปที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UC)

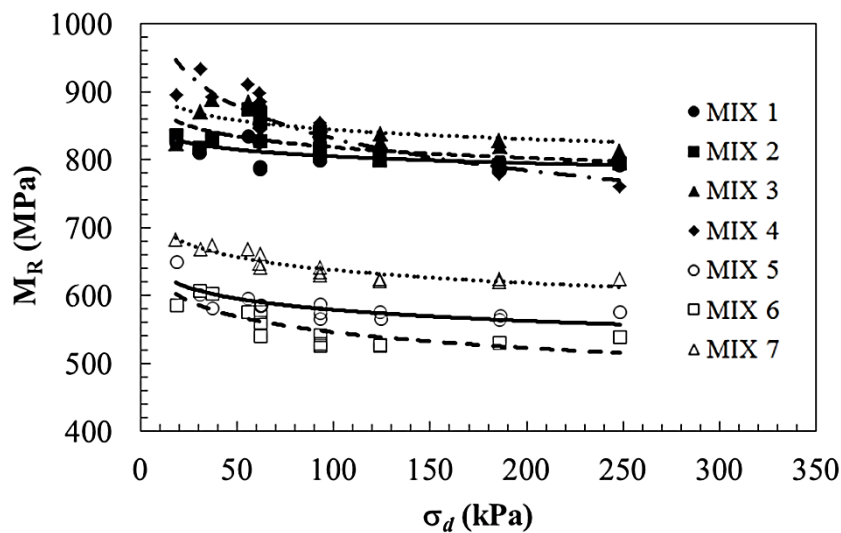
4.4.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (M_R)

เมื่อนำผลการทดสอบ M_R 7 ตัวอย่างทดสอบ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, σ_d) และค่า M_R ตามรูปที่ 6 พบว่า MIX 1 มีค่า M_R มากที่สุด โดยมีค่าระหว่าง 815.53 – 888.56 MPa และ MIX 6 มีค่า M_R น้อยที่สุด โดยค่าอยู่ระหว่าง 607.88 – 526.09 MPa จากเอกสาร Heukelom and Klomp (1962) [15] และ AASHTO (1993) [16] ได้ระบุค่าความสัมพันธ์ระหว่าง M_R ในหน่วย psi และค่า CBR ดังแสดงในสมการที่ 1

$$M_R \text{ (psi)} = 1,500 \times CBR \quad (1)$$

เมื่อเราแทนค่า CBR เท่ากับ 80% ลงในสมการดังกล่าวจะพบว่า ค่า M_R ที่ได้มีค่าเท่ากับประมาณ 800 MPa ซึ่งถ้าพิจารณาค่า M_R ที่ระดับค่าความเค้นเบี่ยงเบน เท่ากับ 150 kPa เราสามารถแยกผลการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ MIX 1 MIX 2 MIX 3 และ MIX 4 และกลุ่มที่ 2 ได้แก่ MIX 5 MIX 6 และ MIX 7

กลุ่มที่ 1 ให้ M_R มากกว่า 800 MPa และกลุ่มที่ 2 ค่า M_R ต่ำกว่า 800 MPa สำหรับหลักการออกแบบความหนาวัสดุที่เรานำมาใช้ในงานทางนั้น หากค่า M_R มีค่ายิ่งมาก จะทำให้ความหนาของ CLSM ที่เลือกใช้มีค่าน้อยลง ดังนั้นสูตรส่วนผสมที่ 1 2 3 และ 4 ผ่านเกณฑ์การออกแบบค่า M_R ตามเอกสาร AASHTO 1993 [16] เทียบเท่า ค่า CBR เท่ากับ 80%



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัว (M_R)

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

สำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางนั้น มีความเป็นไปได้สูง ด้วยความได้เปรียบทางด้าน การก่อสร้างที่ไม่ต้องการการบดอัด จึงสามารถประหยัดค่าแรงและค่าเครื่องจักรในกระบวนการบดอัดดินได้ ตลอดจนสามารถควบคุมความสม่ำเสมอของส่วนผสมวัสดุได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ค่าต้นทุนวัสดุยังมีราคาสูงอยู่บ้าง จึงอาจจะเหมาะกับสถานที่ก่อสร้างที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งวัสดุหินคลุกคุณภาพดี หรืองานก่อสร้างพิเศษเฉพาะที่ไม่ต้องการการบดอัด หรืองานซ่อมแซมเฉพาะจุดที่ไม่สามารถนำเครื่องจักรบดอัดเข้าไปบริเวณหน้างานได้ ซึ่งในอนาคตอาจมีการปรับปรุงและพัฒนาส่วนผสมเพื่อลดต้นทุน เช่น การนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเข้ามาแทนที่ซีเมนต์และมวลรวมละเอียดมากขึ้น

จากการศึกษาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล พบว่า MIX 4 มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นวัสดุพื้นทางสำหรับงานก่อสร้างผิวทาง อัตราส่วนผสมแสดงตามตารางที่ 9 ซึ่งมีสมบัติดังนี้ ค่าหน่วยน้ำหนัก $1,847 \text{ kg/m}^3$ ค่าปริมาณอากาศ 15.7% จากการคำนวณ และ 14.5% จากชุดอุปกรณ์ทดสอบ ค่าการยุบตัว 27 ซม. ที่ 1.30 ชั่วโมง ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ 59.4 ซม. ที่ 1.30 ชั่วโมง ค่าระยะเวลาการไหล Marsh cone ไหลลึก 9.5 ซม. และ 89.5 วินาที ทันทีหลังผสม CLSM ค่าการเข้มน้ำ 2.10 ชั่วโมง 11.51% เวลาเริ่มก่อตัว 5.25 ชั่วโมง เวลาก่อตัวเริ่มต้น 10.55 ชั่วโมง และเวลาก่อตัวสุดท้าย 16.40 ชั่วโมง ค่า CBR 122.80% ที่ 7 วัน ค่า UCS 2.56 MPa ที่ 28 วัน ค่า M_R มากที่สุด 934 MPa และ 800 MPa ที่ความเค้นเบี่ยงเบน 150 kPa

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2559 มหาวิทยาลัยพะเยา สัญญาเลขที่ RD59048 มหาวิทยาลัยพะเยา ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ระหว่างการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute. ACI Committee 229: 1999. Controlled low strength materials (ACI 229R). Farmington Hill. Michigan. USA.
- [2] Katz, A. and Kovler, K. Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM). *Waste Management*, 2004, 24(5), pp. 501–512. DOI: 10.1016/S0361-3682(02)00026-0
- [3] Miren, E., Javier, A., Eugenia, P.M., and Alain, G. Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 44, pp. 142–148. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.059>
- [4] Achtemichuk, S., Hubbard, J., Sluce, R., Shehata, M.H. The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low-strength materials without using Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(8), pp. 564–569. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.011>
- [5] Wu, H., Huang, B., Shu, X., Yin, J. Utilization of solid wastes/by products from paper mills in Controlled Low Strength Material (CLSM). *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 118, pp. 155–163. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.005>
- [6] ASTM International. ASTM Designation C 1611: 2014. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. Philadelphia. USA.
- [7] ASTM International. ASTM Designation C 403: 2016. Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance. Philadelphia. USA.
- [8] ASTM International. ASTM Designation C 231: 2017. Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method. Philadelphia. USA.
- [9] ASTM International. ASTM Designation C 138: 2017. Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. Philadelphia. USA.
- [10] ASTM International. ASTM Designation C 232: 2014. Standard test methods for bleeding of concrete. Philadelphia. USA.
- [11] ASTM International. ASTM Designation C 939: 2016. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method). Philadelphia. USA.
- [12] ASTM International. ASTM Designation D 1883: 2016. Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. Philadelphia. USA.
- [13] ASTM International. ASTM Designation D 2166: 2016. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Philadelphia. USA.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 307: 2007. Standard method of test for determining the resilient modulus of soil and aggregate materials. Washington, D. C. USA.
- [15] Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, 1962, Pages 667-679.
- [16] AASHTO *The AASHTO guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 1993.