

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างโดยการแทนที่วัสดุธรรมชาติด้วย  
เศษหินปูนเหลือทิ้ง

นาย เจตณัฐ จิโรจดำรงค์ชัย 6331804921

นาย ศุภกร ชิวงค์เงิน 6331810621

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชาโครงการวิศวกรรมโยธา

ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2566

Development of Alkali-activated Controlled Low-Strength Material  
by Replacing Natural Materials with Limestone Waste

Mr. Jettanat Jirojdamrongchai 6331804921

Mr. Supakorn Thiwongngoen 6331810621

A Senior Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Degree of Bachelor of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2023

หัวข้อโครงการ	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างโดยการแทนที่วัสดุธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง
โดย	นาย เจตณัฐ จิโรจดำรงค์ชัย นาย ศุภกร ธิววงศ์เงิน
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จงจวิวัฒน์สกุล

### บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการทำเหมืองผลิตหินปูน ได้เกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทหนึ่ง จากกระบวนการผลิตนั่นก็คือเศษหินปูนเหลือทิ้งซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จนเห็นเป็นรูปธรรม และเป็นสาเหตุหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และต้องการพื้นที่สำหรับการฝังกลบ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali-activated CLSM) ที่เศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด คุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ หน่วยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิ การทดสอบโมดูลัสคั้นตัว ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค และ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง ในขณะที่หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิ และค่าโมดูลัสคั้นตัว มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนในช่วง ร้อยละ 20 ถึง 40 และค่าลดลง เมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 และ 80 ตามลำดับเนื่องด้วยลักษณะการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่มีช่องว่างลดลงเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งและจากสัดส่วนผสมทั้งหมดพบว่า วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตรมีคุณสมบัติผ่านตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ; วัสดุกระตุ้นด้วยต่าง; เศษหินปูนเหลือทิ้ง; วัสดุพื้นทาง

Title	Development of Controlled Low-Strength Material by replacing natural materials with limestone waste
Students	Jettanat Jirojdamrongchai Supakorn Thiwongngoen
Advisor	Associate Professor Pitcha Jongvivatsakul, Ph.D.

---

### **Abstract**

In mining of limestone, waste is generated in the form of limestone waste, leading to several environmental problems such as air pollution and the need for additional landfill space for storage. The purpose of this research is to study the properties of Alkali-activated Controlled Low Strength Material (CLSM) made from limestone waste as a substitute for fine aggregate in proportions of 20, 40, 60, and 80 percent by volume of fine aggregate. A series of experimental programs was performed, assessing properties such as flowability, unit weight, unconfined compressive strength, primary and secondary wave velocity, resilience modulus, the relationship between unconfined compressive strength and wave velocity, microstructural analysis, the environmental impact and cost. The results showed that flowability increased when fine aggregate was replaced with limestone waste, while unit weight slightly decreased. The unconfined compressive strength, primary and secondary wave velocities, and resilience modulus increased with fine aggregate replacement at 20% to 40% but gradually decreased when the replacement increased to 60% and 80%. This trend is due to the packing characteristics of the aggregate mix, where void content decreases as fine aggregate is replaced with limestone waste. From the overall mix proportions, it was found that Alkali-activated Controlled Low Strength Material, with 40% of natural sand replaced by limestone waste by volume, meets the relevant standards for Controlled Low Strength Material.

Key words: Controlled low-strength material; Alkali-activated; Limestone waste; Pavement base material

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนอย่างเต็มที่ตลอดจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ดร.ภัทรพล จินดาศิริพันธ์ และคณะกรรมการ รศ.ดร. ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์ ผศ.ดร.ชยุตม์ งามโขนนง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำ และช่วยชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณอาจารย์ ยุทธกาล สุวรรณเวช ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆในการทดสอบทางด้านเทคนิคธรณี

ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material) .....	3
2.2 มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) .....	5
2.3 เศษหินปูนเหลือทิ้ง.....	6
2.4 แก้วลอย.....	6
2.5 วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง.....	7
2.6 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) .....	8
2.7 การทดสอบความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ (Free-free resonance, FFR).....	8
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.8.1 วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง.....	9
2.8.2 เศษหินปูนเหลือทิ้ง.....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	13

3.1 วัสดุและสารเคมี .....	13
3.2 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ .....	15
3.3 ขั้นตอนการผสมวัสดุควบคุมกำลังต่ำ.....	16
3.4 รายละเอียดการทดสอบ.....	17
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน .....	17
3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและการไหลได้ .....	17
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	21
4.1 ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ .....	21
4.2 หน่วยน้ำหนัก.....	22
4.3 การทดสอบกำลังรับอัดแกนเดียว .....	23
4.4 การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีเรโซแนนซ์อิสระ .....	27
4.5 การทดสอบโมดูลัสคลื่นตัว .....	29
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น .....	33
4.7 ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure).....	35
4.8 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ.....	37
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 สรุปผลการทดสอบ .....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	40
ภาคผนวก.....	41
เอกสารอ้างอิง .....	47

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 องค์ประกอบของ CLSM ที่ใช้ทดลอง (Ghanad et al., 2021)	9
รูปที่ 2 Flowability จากการทดสอบตัวอย่าง CLSM (Ghanad et al., 2021)	10
รูปที่ 3 %Absorption จากการทดสอบตัวอย่าง CLSM (Ghanad et al., 2021)	10
รูปที่ 4 อิทธิพลของ slag, NaOH, w/b ratio และ bottom ash ต่อ flowability ของ CLSM (Lee et al., 2013)	11
รูปที่ 5 Result of the compressive strength specimens (Omar et al., 2012)	11
รูปที่ 6 Effect of 25%, 50% and 75% LSW as a replacement from sand, as compared to normal strength concrete (350 kg/m <sup>3</sup> ) (Omar et al., 2012)	12
รูปที่ 7 Properties of river sand DLSW and DLCS and Chemical constituents of DLW and river sand (Chouhan et al., 2019)	12
รูปที่ 8 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ และ เศษหินปูน	15
รูปที่ 9 ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง	21
รูปที่ 10 หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่	22
รูปที่ 11 ค่ากำลังอัดรับแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่	23
รูปที่ 12 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดรับแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่เมื่อเทียบกับ LS0 (a) 7 วัน (b) 14 วัน (c) 28 วัน (d) 60 วัน	24
รูปที่ 13 ลักษณะการวิบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน (a) LS0 (b) LS20 (c) LS40 (d) LS60 และ (e) LS80	26
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับอายุบ่มของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ	28



จากการกระตุ้นด้วยต่างที่ (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิและ (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ	
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับอายุบ่มของวัสดุ	29
ควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง	
(a) โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (b) โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น	
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและความเค้นเปื่อยเบน	30
ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม	
(a) 7 วัน (b) 14 วัน และ (c) 28 วัน	
รูปที่ 17 โมดูลัสคืนตัวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการ	33
กระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน	
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น	34
(a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิและ (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ	
รูปที่ 19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจาก	35
การกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน ของส่วนผสม (a) LS0 (b) LS0 (c) LS0	
และ (d) LS40	

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ	4
ตารางที่ 2 กำหนดทางเคมีของวัสดุพอลิไซลันตามมาตรฐาน	7
ตารางที่ 3 คุณสมบัติเคมีของถ้ำลอย	13
ตารางที่ 4 คุณสมบัติมวลรวมละเอียด	14
ตารางที่ 5 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร	15
ตารางที่ 6 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ทำการทดสอบ	17
ตารางที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการไหลได้	17
ตารางที่ 8 ลำดับการให้แรงกระทำของการทดสอบโมดูลัสคั้นตัว	20
ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย $k_1$ $k_2$ และ $k_3$ ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ที่ได้จากแบบจำลองของ May and Witzczak (1981)	32
ตารางที่ 10 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้งานแต่ละวัสดุ	37
ตารางที่ 11 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้งาน แต่ละส่วนผสม	37
ตารางที่ 12 ต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามแต่ละส่วนผสม	38
ตารางที่ 13 ข้อมูลการทดสอบความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่	41
ตารางที่ 14 ข้อมูลหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ	41
ตารางที่ 15 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ	42
ตารางที่ 16 ข้อมูลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระของควบคุมกำลังต่ำ	44
ตารางที่ 17 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสคั้นตัวโดยเฉลี่ยของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ	46

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวงการก่อสร้างให้ความสำคัญเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างเป็นอย่างยิ่งโดยหนึ่งในสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างคือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเช่น ทราย ในจำนวนมากด้วยเหตุนี้จึงเริ่มมีการหาวัสดุเพื่อทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ โดยงานวิจัยนี้จะนำเศษหินทิ้งมาศึกษา

จากการศึกษาของ Omar et al. (2012) และ Choudhary et al. (2020) พบว่าเศษหินปูนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมหินปูนนั้นผลิตเศษหินปูนจำนวนมากในระหว่างไม่หินเพื่อผลิตมวลรวมหยาบ การจัดเก็บและการกำจัดเศษหินปูนเหลือทิ้งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้นี้ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนที่ดินในการกำจัด ต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น และปัญหาอื่นๆที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย ดังนั้นการใช้เศษหินปูนเหลือทิ้งจากเหมืองหินแทนทรายในวัสดุก่อสร้างจะช่วยแก้ไขปัญหามลภาวะที่เกิดจากการสูญเสียแหล่งธรรมชาติของแม่น้ำและทรายจากเหมืองในวงกว้าง

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น คือ มีความสามารถไหลเข้าที่แคบและอัดแน่นด้วยตัวเองได้ (Ling et al., 2018) จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุถม โดยถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น งานดินถม งานฝังกลบ งานปรับระดับ งานการขุดวางท่อระบบสาธารณสุขประเภทต่างๆ และการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อที่ฝังใต้ดิน เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้พื้นที่ที่จำกัดได้ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรและคนงานในการทำงานมากมายนัก ตามมาตรฐาน ACI 229R (2013) ได้ระบุค่าการยุบตัวไหลแผ่ของ CLSM ไว้ มากกว่า 200 มิลลิเมตร ขึ้นไป และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่เกิน 8.3 MPa เพื่อความสะดวกในการขุดหรือถอนในอนาคต ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต CLSM โดยทั่วไปประกอบไปด้วยวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส แล้วนำเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดจึงส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่บรรยากาศปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต CLSM ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) และเศษ

หินปูนเหลือทิ้ง โดยจะผสม CLSM ด้วยการใช้อัลลอยเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลาย sodium metasilicate pentahydrate ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเป็นตัวชะละลายสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิวของวัสดุประสาน ส่วนเศษหินปูนเหลือทิ้งจะถูกนำมาใช้แทนทรายธรรมชาติสำหรับ CLSM ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและความสามารถในการทำงานได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยด่างที่ผลิตจากเศษหินปูนเหลือทิ้งแทนที่ทรายธรรมชาติสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถช่วยลดปริมาณเศษหินปูนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมลงได้อีกทั้งยังทำให้เศษหินปูนเหลือทิ้งมีมูลค่าที่เพิ่มขึ้น

1.3.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำเศษหินปูนเหลือทิ้งใช้ในการผลิต CLSM ได้

1.3.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการใช้ทรายธรรมชาติในการผลิต CLSM ได้

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต นิยมนำไปใช้เป็นวัสดุถม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุถมชนิดอื่นคือมีความสามารถในการไหลเข้าที่แคบและอัดแน่นด้วยตัวเองได้ โดย CLSM ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น งานดินถม งานฝังกลบ งานปรับระดับ งานการขุดวางท่อสาธารณูปโภคต่างๆ งานถมชั้นรองฐานราก และการใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อที่ฝังใต้ดิน เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้พื้นที่ที่จำกัดได้ และไม่จำเป็นต้องใช้คนงานและเครื่องจักรในการทำงานมากนัก ซึ่งทำให้การทำงานมีความสะดวกรวดเร็วและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น รวมถึงการใช้ดินบดอัดต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการก่อนซึ่งทำให้ขั้นตอนในการปฏิบัติงานมีความยุ่งยากมากขึ้น

ตารางที่ 1 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ (Ling et al., 2018)

การใช้งาน	ข้อกำหนด
งานถมช่องว่างและถมโครงสร้างใต้ดิน	<ol style="list-style-type: none"> <li>ค่าการยุบตัวไหลแผ่มากกว่า 200 มิลลิเมตร</li> <li>ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน น้อยกว่า 0.5 เมกะปาสคาล</li> </ol>
งานดินถมสำหรับท่อใต้ดิน ท่อน้ำทิ้งและร่องถนน	<ol style="list-style-type: none"> <li>ค่าการยุบตัวไหลแผ่มากกว่า 200 มิลลิเมตร</li> <li>ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่า 2.1 เมกะปาสคาล</li> <li>ระยะเวลาในการก่อตัวเร็ว ทรุดตัวน้อย และสามารถขุดรื้อถอนได้</li> </ol>
งานถมโครงสร้าง เช่น สะพาน ฐานราก และกำแพงกันดิน	<ol style="list-style-type: none"> <li>ค่าการยุบตัวไหลแผ่อย่างน้อย 200 มิลลิเมตร</li> <li>ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 0.7 ถึง 8.3 เมกะปาสคาล</li> </ol>

การใช้งาน	ข้อกำหนด
งานถมทาง เช่น พื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินของเดิมผิวทางยึดหยุ่น	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าการยุบตัวไหลแผ่อย่างน้อย 200 มิลลิเมตร</li> <li>2. ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 2.8 ถึง 8.3 เมกะปาสคาล</li> <li>3. บดอัดแน่นด้วยตัวเองได้ ป้องกันการกัดกร่อน</li> </ol>
ฉนวนความร้อน	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าการยุบตัวไหลแผ่อย่างน้อย 200 มิลลิเมตร</li> <li>2. ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่า 2 เมกะปาสคาล</li> <li>3. มีความคงทน ความพรุนต่ำ</li> </ol>
ป้องกันกัดกร่อน	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าการยุบตัวไหลแผ่มากกว่า 200 มิลลิเมตร</li> <li>2. ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่า 2 เมกะปาสคาล</li> <li>3. มีความทนทานไฟฟ้าสูง</li> </ol>

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญของ CLSM ได้แก่ ความสามารถในการไหลได้ และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Ling et al., 2018) ตามมาตรฐาน ACI 229R (2013) ระบุค่าการยุบตัวไหลแผ่ของ CLSM ต้องมีค่ามากกว่า 200 มิลลิเมตร ขึ้นไป และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน ต้องไม่เกิน 8.3 MPa เพื่อความสะดวกต่อการชดเชยร่องรอยในอนาคต

การออกแบบส่วนผสมของ CLSM จะใช้วิธี Trial and error โดยทั่วไปส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต CLSM ประกอบไปด้วยวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยวัสดุประสานที่นิยมใช้มากที่สุดคือปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{AlO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ในอุณหภูมิสูง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส แล้วนำเข้าสู่กระบวนการบดละเอียด จึงทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สู่อากาศเป็นจำนวนมาก วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของ CLSM สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมและจุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน แต่ต้องคำนึงถึงความสามารถในการไหลได้และความสามารถในการรับแรงอัดแกนเดียวให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI 229R (2013) นอกจากนี้จากการศึกษาของ Kaliyavaradhan et al. (2019) พบว่าจากคุณสมบัติการไหลและความสามารถในการรับกำลังของ CLSM ทำให้ส่วนผสมของ CLSM

มีสัดส่วนของปูนซีเมนต์น้อยกว่าปริมาณมวลรวมและน้ำมาก จึงได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิต CLSM เพื่อต้องการควบคุมกำลังรับแรงอัดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.8 ถึง 8.3 MPa ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นทางตามเกณฑ์กำหนดของ ACI 229R (2013)

## 2.2 มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate)

คือวัสดุเฉื่อยอันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นที่สงสัยเลยว่า ทำไมคุณภาพของมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจเรื่องนี้อย่างมาก ในอดีตมวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานโดยกระจายอยู่ที่ซีเมนต์เพสต์เท่านั้น ในปัจจุบันนี้พบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีก

ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวม มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม

### 2.3 เศษหินปูนเหลือทิ้ง

จากการศึกษาพบว่าเศษหินปูนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมหินปูนนั้นผลิตเศษหินปูนจำนวนมาก ในระหว่างโม่หินเพื่อผลิตมวลรวมหยาบ การจัดเก็บและการกำจัดเศษหินปูนเหลือทิ้งที่อาจมีการฟุ้งกระจายในอากาศนี้ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนที่ดินในการกำจัด ต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น

### 2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าที่มีขนาดใหญ่จะตกลงกันเตาเผาซึ่งจะถูกเรียกว่า เถ้าถ่านหิน (Bottom ash) ส่วนเถ้าที่มีขนาดเล็ก กล่าวคือ มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 200 ไมโครเมตร จะลอยขึ้นไปเหนือเตาพร้อมกับอากาศร้อนซึ่งจะถูกเรียกว่า เถ้าลอย ซึ่งจะถูกระบายด้วยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitators) เพื่อป้องกันไม่ให้หลุดออกสู่บรรยากาศ เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกาและลูมินา โดยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสกับน้ำจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious substance) ได้ โดยทั่วไปนิยมนำเถ้าลอยมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต เพื่อต้องการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต รวมถึงการนำไปใช้เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์หรือซัลเฟต และปรับปรุงคุณสมบัติการไหลของคอนกรีต เป็นต้น อนุภาคของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมทึบหรือบางครั้งพบว่ามีลักษณะกลวงโดยรูปร่างของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหิน สีของเถ้าลอยจะเป็นสีดำหรือน้ำตาลขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในเถ้าลอย มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 3.0 มิลลิเมตร ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงระหว่าง 170 ถึง 1,000 ตารางเมตร/กิโลกรัม องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์จากธาตุต่างๆ ได้แก่ซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ), แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น โดยปริมาณของธาตุดังกล่าวจะแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของถ่านหิน ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหิน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019) ได้แบ่งประเภทของเถ้าลอยตามปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เถ้าลอย Class N เถ้าลอย Class F และ เถ้าลอย



Class C ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะจัดอยู่ในประเภทถ้ำลอย Class C มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 150 ไมโครเมตร และมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.60

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019)

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของปริมาณ $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ อย่างน้อยร้อยละ	70	50	50
ปริมาณ CaO ไม่เกินร้อยละ	ใช้ค่าจากการทดสอบวัสดุ	$\leq 18.0$	$> 18.0$
ปริมาณ $\text{SO}_3$ ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ	3	3	3
น้ำหนักสูญเสียจากการเผาไม่เกินร้อยละ	10	6	6

จากมาตรฐาน ASTM C618 (2019) ผลรวมปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กของถ้ำลอยทั้งสามประเภทจะต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 50 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าถ้ำลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวอีกด้วย สำหรับร้อยละของซิลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 4 สำหรับถ้ำลอย Class N และ Class F และไม่เกินร้อยละ 5 สำหรับถ้ำลอย Class C เนื่องจากซิลเฟอร์ส่งผลเสียต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดและระยะเวลาก่อตัว

## 2.5 วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง

คือ วัสดุจากการกระตุ้นต่างถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานที่มีความแข็งแรง มีการซึมผ่านของน้ำต่ำ มีความต้านทานต่อสารเคมี และสามารถทนไฟได้ดี จึงทำให้วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่างได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อย ๆ (Ameri et al., 2021; Duxson et al., 2007; Fernandez-jimenez et al., 2008) โดยวัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่างสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาของวัสดุตั้งต้นที่มีธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) เป็นส่วนประกอบหลัก เช่น ตะกรันเตาถลุง (Blast furnace slag) กับสารละลายต่าง (Alkaline

solution) เช่น อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxides) ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น และอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicates) ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{NaSiO}_3$ ) และสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) เป็นต้น

## 2.6 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR)

แนวความคิดเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืนตัวของผิวทาง (Resilient behavior) ถูกเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1948 โดย Hveem และ Carmany ต่อมาในปี ค.ศ. 1955 Seed ศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวของวัสดุผิวทางโดยใช้การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1962 Seed ได้นิยามโมดูลัสคืนตัวตามรูปแบบของแรงกระทำกับความเครียดแบบไม่คืนตัว (Irrecoverable) หรือความเครียดแบบพลาสติกได้ (Plastic strain) เนื่องจากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ความเค้นแบบพลวัต (Dynamic stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางจะมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของวัสดุผิวทาง ดังนั้นวัสดุจึงมีความสามารถในการคืนตัวสู่สภาพเดิมได้มาก แม้ว่าโดยปกติแล้ววัสดุผิวทางจะมีพฤติกรรมแบบอลาสติกที่ไม่สมบูรณ์จากความเครียดถาวรหรือความเครียดแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นจากการถูกแรงกระทำ

## 2.7 การทดสอบความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ (Free-free resonance, FFR)

การทดสอบความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระเป็นวิธีหนึ่งสำหรับการตรวจวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus,  $E_0$ ) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus,  $G_0$ ) ของดินที่มีความเชื่อมโยงแน่น ซึ่งพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดจะซับซ้อนและมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงโดยค่าความเกร็ง (stiffness) จะมีค่ามากเมื่อความเครียดมีค่าน้อย ในขณะที่ค่าความแกร่งจะลดลงเมื่อความเครียดเริ่มเข้าใกล้จุดวิบัติ แต่พฤติกรรมดังกล่าวจะคงที่และมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงเมื่อพิจารณาจากความเครียดในช่วงต่ำกว่าร้อยละ 0.001 (Clayton, 2011) ดังนั้นความเครียดในช่วงนี้จึงสามารถหาได้โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสเฉือนจากการส่งสัญญาณคลื่นสั้นสะเทือน (Wave propagation-based method)

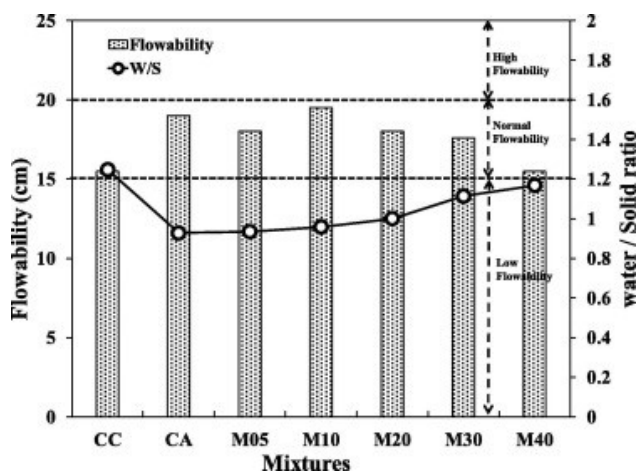
## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง

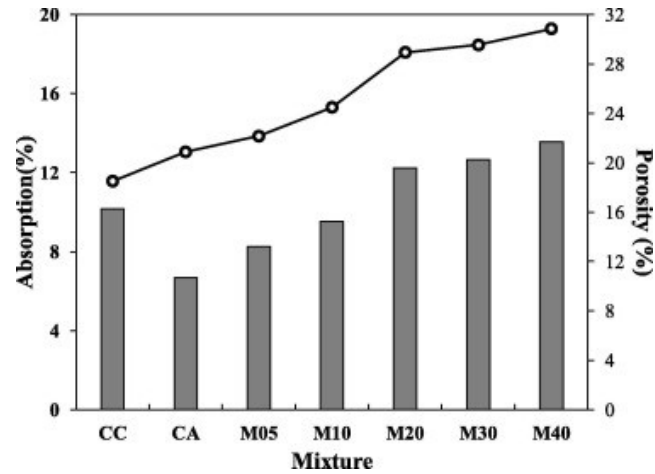
Ghanad et al. (2021) ได้นำของเสียจากทางเกษตรกรรม (เศษไม้สปรูซตำละเอียด) มาแทนที่มวลรวมละเอียดในวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง (CLSM) ซึ่งได้ข้อสรุปที่น่าสนใจคือ ถ้าลดช่วยพัฒนา flowability และลดการใช้น้ำของ CLSM ได้ แต่อย่างไรก็ตามขยะทางการเกษตรจะเพิ่มความต้องการน้ำมากขึ้นเพราะมีการดูดซึมน้ำมากและพื้นที่ผิวมาก

Mixture*	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Slag (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Waste** (%)	NaOH (kg/m <sup>3</sup> )
CC	90	148	0	1655	297	0	0
CA	0	190	50	1655	276	0	57
M05	0	190	50	1572	278	5	58
M10	0	190	50	1490	287	10	59
M20	0	190	50	1325	303	20	63
M30	0	190	50	1160	348	30	73
M40	0	190	50	995	370	40	77

รูปที่ 1 องค์ประกอบของ CLSM ที่ใช้ทดลอง (Ghanad et al., 2021)

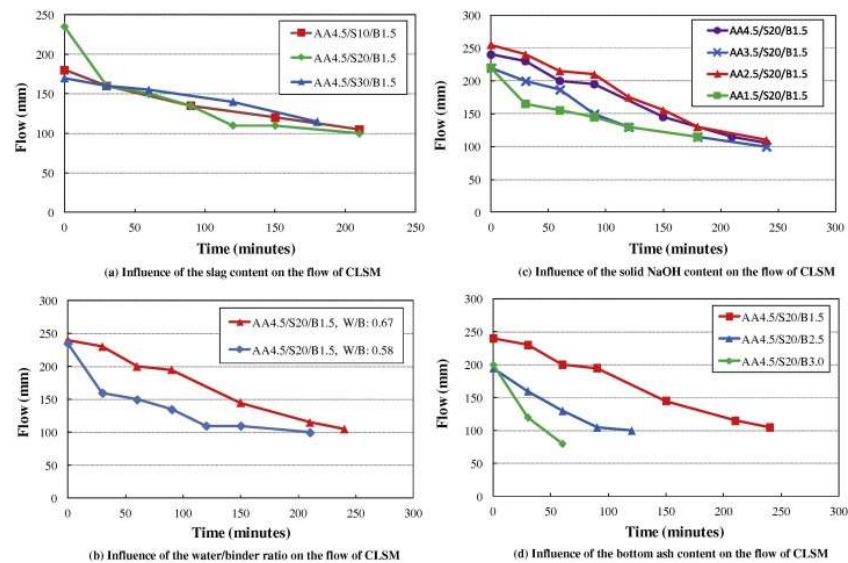


รูปที่ 2 Flowability จากการทดสอบตัวอย่าง CLSM (Ghanad et al., 2021)



รูปที่ 3 %Absorption จากการทดสอบตัวอย่าง CLSM (Ghanad et al., 2021)

Lee et al. (2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติของ Alkali-activated CLSM โดยมี fly ash, slag เป็นวัสดุตั้งกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH และใช้เถ้าหนัก (bottom ash) เป็นมวลรวมละเอียด (fine aggregate) โดยได้ข้อสรุปคือ สารละลาย NaOH มีผลน้อยมากต่อความสามารถในการไหลของของผสม CLSM ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าหนักส่งผลให้ Flowability ของ CLSM ลดลงอย่างมาก ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ Flowability ของ CLSM คือ water/binder ratio และ the bottom ash/binder ratio



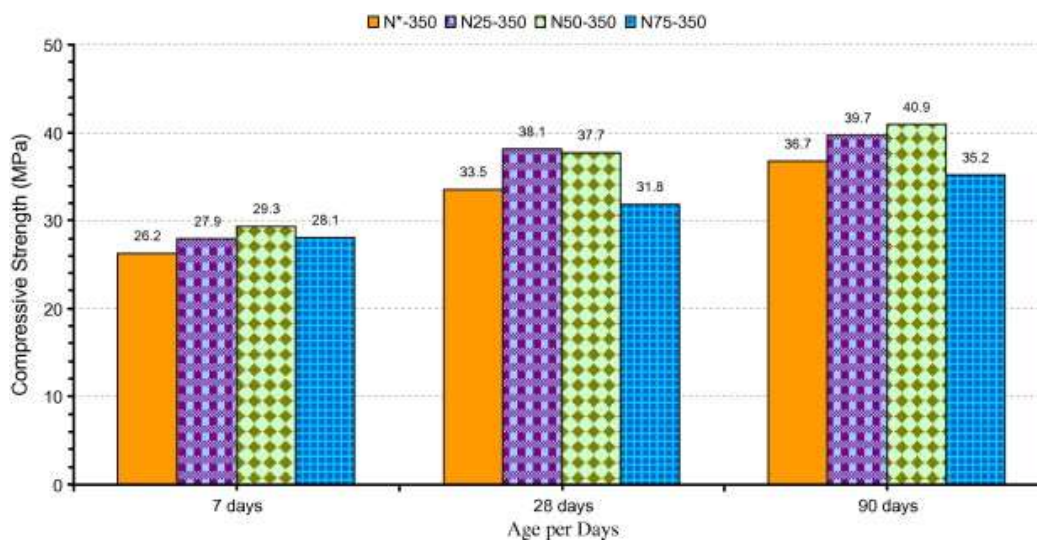
รูปที่ 4 อิทธิพลของ slag, NaOH, w/b ratio และ bottom ash ต่อ flowability ของ CLSM ตามลำดับ (Lee et al., 2013)

### 2.8.2 เศษหินปูนเหลือทิ้ง

Omar et al. (2012) ศึกษาเชิงทดลองที่ดำเนินการเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของการทดแทนทรายบางส่วนด้วยเศษหินปูน (LSW) ที่ cement content  $350 \text{ kg/m}^3$  โดยได้ข้อสรุปดังนี้ ร้อยละของเศษหินปูนไม่ได้ส่งผลต่อ workability ของ green concrete การใช้เศษหินปูน (LSW) ทดแทนทรายมากกว่าร้อยละ 50 เพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตถึงร้อยละ 6 ที่อายุ 28 วัน

Mix symbol	% (LSW)	% (M.P)	Compressive strength (MPa)		
			7days	28days	90days
N <sub>0-350</sub>	0.0	0.0	26.2	33.5	36.7
N <sub>25-350</sub>	25		27.9	38.1	39.7
N <sub>50-350</sub>	50		29.3	37.7	40.9
N <sub>75-350</sub>	75		28.1	31.8	35.2

รูปที่ 5 Result of the compressive strength specimens (Omar et al., 2012)



รูปที่ 6 Effect of 25%, 50% and 75% LSW as a replacement from sand, as compared to normal strength concrete, phase I ( $350 \text{ kg/m}^3$ ) (Omar et al., 2012)

Chouhan et al. (2019) ได้ศึกษาการใช้ Dimensional limestone waste (DLW) ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดและขัดเงาโดยใช้ 2 รูปแบบคือ dimensional limestone slurry (DLSS) และ manufactured dimensional limestone crushed sand (DLCS) แทนที่มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) ในมอดาร์ จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าขนาดของ Lime stone waste สามารถใช้ได้ ในมอดาร์อีกทั้งช่วยในการลดจำนวนการใช้วัสดุธรรมชาติที่นำกลับมา recycle ไม่ได้

Table 1. Properties of river sand DLSW and DLCS.

Property	River sand	DLSW	DLCS
Specific gravity	2.65	2.7	2.7
Bulk density (Loose) (kg/m <sup>3</sup> )	1552	956	1291
Fineness modulus	1.90	1.29	1.99
Water absorption (%)	2.49	8.80	3.5

Table 2. Chemical constituents of DLW and river sand.

Material	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Loss of ignition
DLW (%)	23.5	37.85	3.1	1.94	31.4
River sand (%)	97.4	0.56	-	1.20	0.40

รูปที่ 7 Properties of river sand DLSW and DLCS and Chemical constituents of DLW and river sand (Chouhan et al., 2019)

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated CLSM) ประกอบไปด้วย ใ้ล้าลอย ทรายธรรมชาติ โซเดียมเมทาซิลิเกตและเศษหินปูนจากโรงโม่หิน ซึ่งนำมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติโดยมีรายละเอียดของส่วนผสมดังต่อไปนี้

1. ใ้ล้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.30 และ คุณสมบัติเคมีแสดงดังตารางที่ 3
2. ทรายธรรมชาติที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 (2013) ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4
3. โซเดียมเมทาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )
4. เศษหินปูน คุณสมบัติดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเคมีของใ้ล้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ใ้ล้าลอย
CaO	23.0%
SiO <sub>2</sub>	33.3%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.0%
SO <sub>3</sub>	4.54%
MgO	2.59%
Na <sub>2</sub> O	2.24%

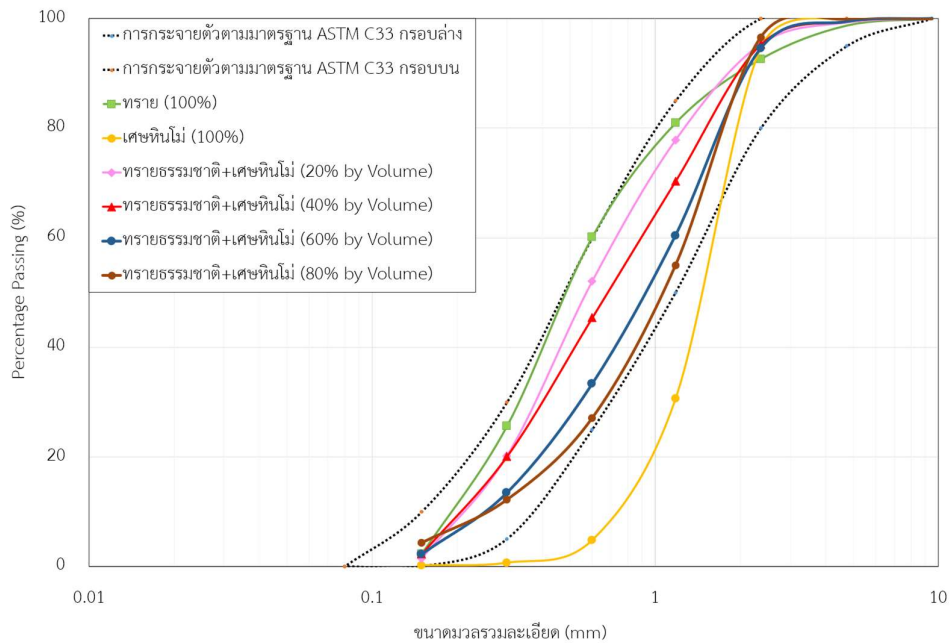
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
K <sub>2</sub> O	2.42%
TiO <sub>2</sub>	0.412%

ตารางที่ 4 คุณสมบัติมวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด	ความถี่จำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด	การดูดซึมน้ำ
ทรายธรรมชาติ	2.65	2.85	0.65
เศษหินปูน	2.43	3.69	0.36

การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินปูนแสดงดังรูปที่ 8 จากผลการทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 (2013) พบว่า เศษหินปูนมีการกระจายตัวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 (2013) แต่เมื่อนำ เศษหินปูนมาแทนที่ทรายธรรมชาติ ในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 โดยปริมาตร การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 (2013) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างได้





รูปที่ 8 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ และ เศษหินปูน

### 3.2 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง

ในงานวิจัยนี้เศษหินปูนถูกนำมาแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดสำหรับผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ชื่อ ส่วนผสม	เถ้า ลอย (กก.)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (กก.)	ทราย ธรรมชาติ (กก.)	เศษ หินปูน (กก.)	น้ำ (กก.)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน
LS0	360	21.6	1440	0	288	0.8
LS20	360	21.6	1152	264.1	288	0.8

ชื่อ ส่วนผสม	แก้ว ลอย (กก.)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (กก.)	ทราย ธรรมชาติ (กก.)	เศษ หินปูน (กก.)	น้ำ (กก.)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน
LS40	360	21.6	864	528.2	288	0.8
LS60	360	21.6	576	792.3	288	0.8
LS80	360	21.6	288	1056.4	288	0.8
LS100	360	21.6	0	1320.5	288	0.8

### 3.3 ขั้นตอนการผสมวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง

1. ปรับอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่ออกแบบต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ให้เป็นอัตราส่วนต่อปริมาตรที่ต่อการใช้งานในการทดสอบ
2. เตรียมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ แก้วลอย โซเดียมเมทาซิลิเกต ทรายธรรมชาติ น้ำ และ เศษหินปูน ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้
3. นำแก้วลอยที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมและเริ่มทำการผสมโดยใช้เวลา 30 วินาที
4. ใส่โซเดียมเมทาซิลิเกตลงในเครื่องผสมร่วมกับแก้วลอยและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที
5. เททรายและเศษหินปูนลงในเครื่องผสมผสมต่ออีก 3 นาที
6. ใส่น้ำลงในเครื่องผสมและผสมต่ออีก 3 นาที จากนั้นหยุดพัก 15 วินาที
7. ใช้เกรียงเหล็กปาดส่วนผสมทางด้านข้างและด้านล่างขึ้นมาจากนั้นทำการผสมต่ออีก 30 วินาที และจึงทำการหยุดผสม
8. นำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อ
9. แกะตัวอย่างจากแบบหล่อรูปทรงกระบอกหลังจากผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่าง ไปบ่ม ที่ไว้ เป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน

### 3.4 รายละเอียดการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย เศษหินปูน และ ทรายธรรมชาติ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ทำการทดสอบ

การทดสอบ	วัสดุที่ทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
ขนาดคละของมวลรวม	ทรายธรรมชาติและเศษหินปูน	ASTM C136 (2018)
หน่วยน้ำหนัก	เศษหินปูน	ASTM C29 (2017)
ความถ่วงจำเพาะ	เศษหินปูน	ASTM C128 (2015)
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	เศษหินปูน	ASTM D570 (2018)

#### 3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและการไหลได้

การทดสอบคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการทำงานได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากเศษหินปูนในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ (Slump flow), หน่วยน้ำหนัก (Density), กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength), การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีเรโซแนนซ์อิสระ ( FFR ) และ โมดูลัสคืนตัว ( RM ) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการไหลได้

การทดสอบ	ขนาดตัวอย่าง	อายุ ตัวอย่าง	มาตรฐานอ้างอิง
ความสามารถในการยุบตัว ไหลแผ่	-	-	ASTM C1611 (2014)

การทดสอบ	ขนาดตัวอย่าง	อายุ ตัวอย่าง	มาตรฐานอ้างอิง
หน่วยน้ำหนัก	-	-	ASTM C138 (2017)
กำลังรับแรงอัดแกนเดียว	ทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14, 28 และ 60 วัน	ASTM D2166 (2016)
โมดูลัสคั้นตัว	ทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14 และ 28 วัน	Chompoorat et al. (2019)
การทดสอบความเร็วคลื่น ปฐมภูมิ และทุติยภูมิด้วย วิธีเรโซแนนซ์อิสระ	ทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14 และ 28 วัน	AASHTO T307- 99 (2017)

#### 3.4.2.1 ความสามารถในการทำงานได้

ความสามารถในการทำงานได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างจะทดสอบจากความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่โดยในการทดสอบความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่จะทำการทดสอบหลังจากที่วัสดุควบคุมกำลังต่ำสัมผัสกับน้ำที่ 0 นาที

#### 3.4.2.2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้างมาเกี่ยวข้อง ทำได้โดยนำตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร ความสูง 110 มิลลิเมตร ที่มีอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ไปกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตราเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่อายุ 28 วันจะต้องมีค่าไม่เกิน 8.3 เมกกะปาสคาล ตามมาตรฐาน ACI 229R (2013)

### 3.4.2.3 การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีการแรโซแนนซ์อิสระ

การทดสอบความเร็วเฉือนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำสามารถทำการทดสอบได้โดยแขวนตัวอย่างทดสอบที่มีอายุการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน กับโครงเหล็กโดยให้ตัวอย่างลอยอยู่เหนือพื้น จากนั้นทำการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วที่ปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างแล้วใช้น็อตตัวเมียเคาะอีกปลายด้านหนึ่งของตัวอย่าง เพื่อเป็นการส่งสัญญาณให้กับเซ็นเซอร์วัดความเร็ว ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการเคาะจำนวน 50 ครั้ง จากนั้นบันทึกค่าความถี่ของคลื่นปฐมภูมิ p-wave และ คลื่นทุติยภูมิ s-wave

$$E_0 = \rho v_p^2 = \rho(2Lf_L^2) \quad (1)$$

$$G_0 = \rho v_s^2 = \rho(2Lf_T^2) \quad (2)$$

สมการ (1) ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับคลื่นปฐมภูมิและสมการ

สมการ (2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนกับคลื่นทุติยภูมิ โดย

$E_0$	คือ โมดูลัสยืดหยุ่น
$G_0$	คือ โมดูลัสเฉือน
$\rho$	คือ ความหนาแน่น
$v_p$	คือ ความเร็วคลื่นตามแนวยาว
$v_s$	คือ ความเร็วคลื่นตามแนวขวาง
$L$	คือ ความยาวของตัวอย่างทดสอบ
$f_L$	คือ ความถี่ของคลื่นตามแนวยาว
$f_T$	คือ ความถี่ของคลื่นตามแนวขวาง

### 3.4.2.4 การทดสอบโมดูลัสคีนตัว

การทดสอบโมดูลัสคีนตัวสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างทดสอบที่มีอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน วางบนแท่นรองที่มีผิวขรุขระประกบทั้งด้านบนและด้านล่าง ท่อตัวอย่างด้วยเยื่อหุ้ม จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องวัดระยะ (linear variable differential transformer, LVDT) จำนวน 2 ตัว ให้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเดียวกัน เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้มีลักษณะคองที่ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดแกนสามแกนแบบกระทำซ้ำ โดยเริ่มจากลำดับการให้แรงกระทำที่ 0 จนถึงลำดับที่ 15 ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งค่าความเค้นโอบอร์ด, ค่าความเค้นเบี่ยงเบนและ

ความเค้นสัมผัสจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละลำดับการให้แรงกระทำ โดยการให้แรงกระทำแต่ละลำดับ จะถูกให้แรงและถอนแรง จำนวน 100 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 8 ลำดับการให้แรงกระทำของการทดสอบโมดูลัสคืบตัว Chompoorat et al. (2019)

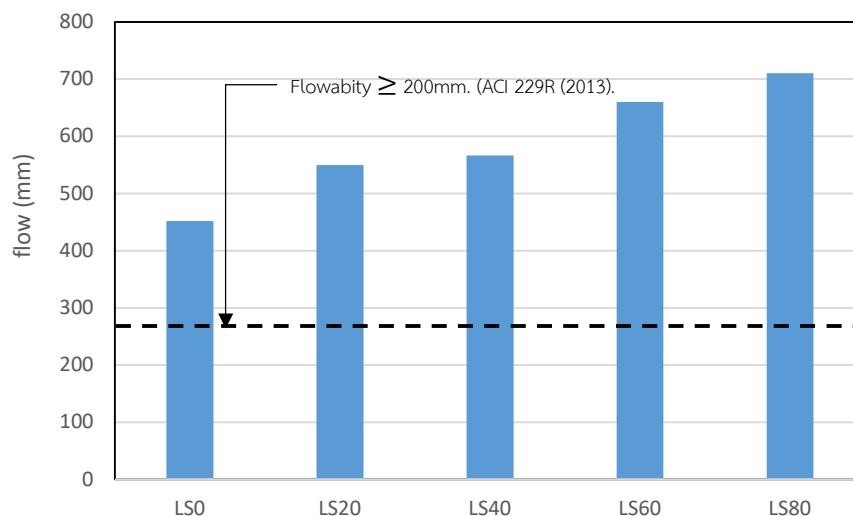
ลำดับการให้แรง	ความเค้นโอบรัด (กิโลปาสคาล)	ความเป็ยงเบน (กิโลปาสคาล)	จำนวนครั้งการให้และถอนแรง
0	103.4	103.4	500
1	207	20.7	100
2	20.7	41.4	100
3	20.7	62.1	100
4	34.5	34.5	100
5	34.5	68.9	100
6	34.5	103.4	100
7	68.9	68.9	100
8	68.9	137.9	100
9	68.9	206.8	100
10	103.4	68.9	100
11	103.4	103.4	100
12	103.4	206.8	100
13	137.9	103.4	100
14	137.9	137.9	100
15	137.9	275.8	100

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่

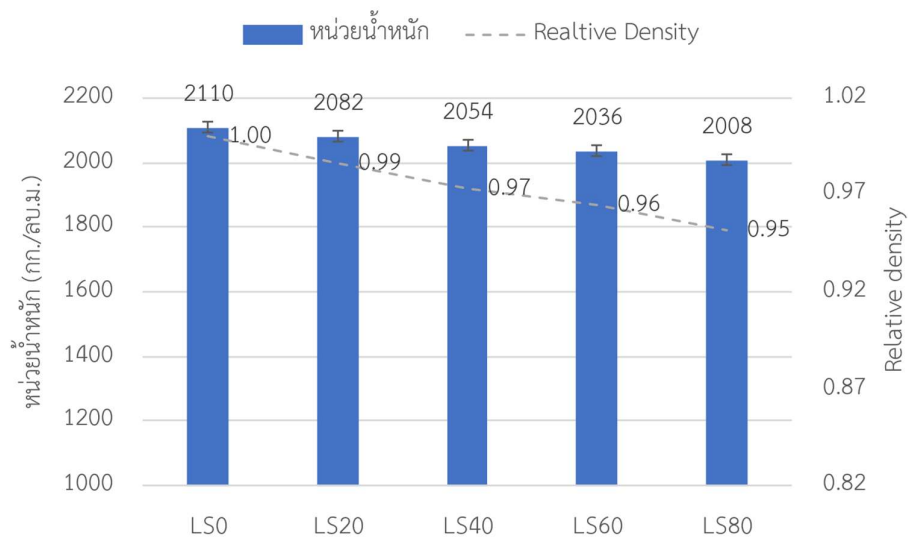
ความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่ผลิตจากเศษหินปูนที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน ASTM C 1611 (2014) แสดงดังรูปที่ 9 ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 452 ถึง 710 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 21.7, 3.0, 16.5 และ 7.6 ตามลำดับ เนื่องจากโมดูลัสความละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติ รวมถึงการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าทรายธรรมชาติ ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมากขึ้น



รูปที่ 9 ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง

#### 4.2 หน่วยน้ำหนัก

รูปที่ 10 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง โดยหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างอยู่ในช่วงระหว่าง 2008 ถึง 2110 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรโดยหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งเนื่องจากโมดูลัสความละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติ รวมถึงการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าทรายธรรมชาติ ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างลดลงโดยมีค่า Relative density อยู่ที่ 0.99, 0.97, 0.96 และ 0.95 ตามลำดับ

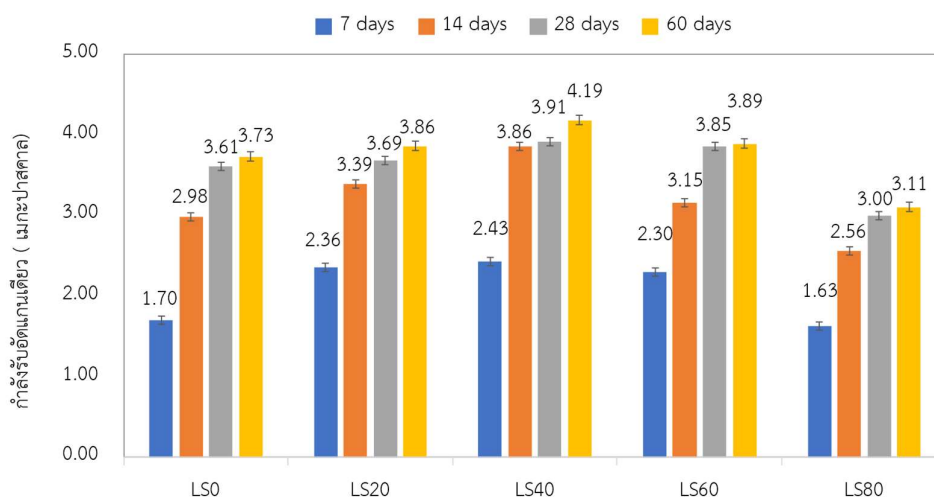


รูปที่ 10 หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง



### 4.3 การทดสอบกำลังรับอัดแกนเดียว

จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุบ่มที่มากขึ้น ในขณะที่ค่ากำลังอัดรับแกนเดียวจะมีค่าต่างกันไปเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของส่วนผสม LS40 มีค่าเท่ากับ 2.43, 3.86, 3.91 และ 4.19 ตามลำดับ เมื่อมีอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วันตามลำดับ โดยพบว่าทุกส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดเดียวที่ 28 วัน ไม่เกิน 8.3 เมกะปาสคาลตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ACI 229R (2013)

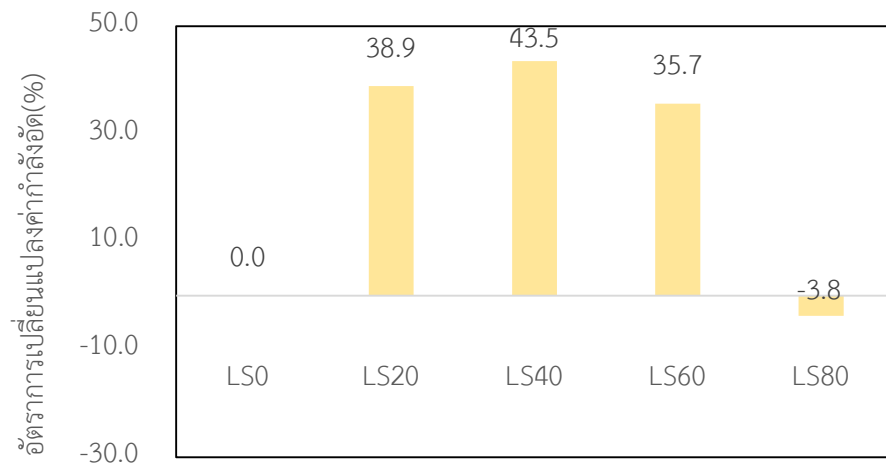


รูปที่ 11 ค่ากำลังอัดรับแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน

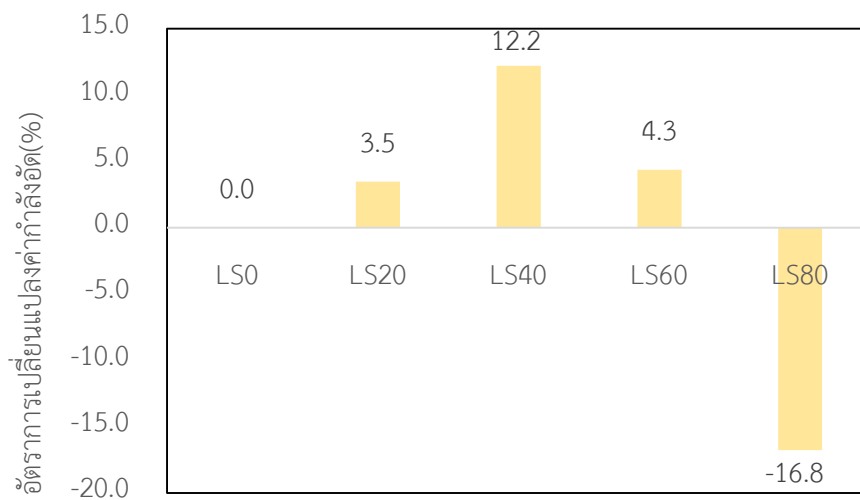
การนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาตินั้นพบว่าค่ากำลังรับอัดแรงแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

การกระจายตัวของมวลผลวัสดุที่เปลี่ยนไป โดยจะพบว่าจากการ sieve analysis ของมวลรวมในแต่ละสูตรทรายธรรมชาติที่นำมาใช้มีการกระจายตัวอยู่ที่ขอบบนของเกณฑ์ที่ ASTM ยอมให้ และการกระจายตัวของมวลรวมสูตร LS40 นั้นได้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างเส้น ขอบบน และขอบล่าง ซึ่งทำให้ช่องว่างในมวลรวมนั้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ทำให้กำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมีแนวโน้มเป็นรูปประซังคว่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Omar et al. (2012)

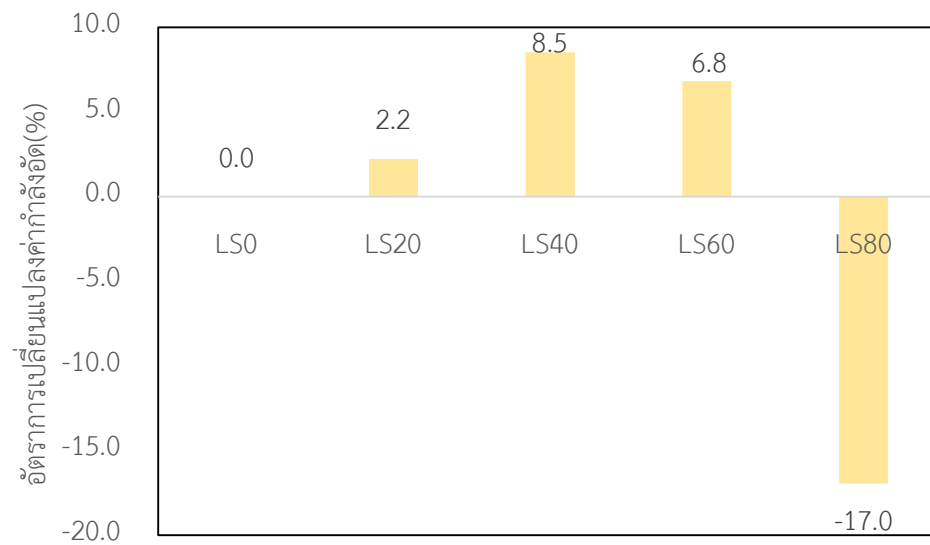
โดยจะเห็นจากอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว จากรูปที่ 12(c) ที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งในช่วงอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 40 จะพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากจนถึง 60 เป็นต้นไปพบว่า กำลังรับแรงอัดค่อยๆลดลงจนต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีการแทนที่ในสูตร LS80 ซึ่งลักษณะของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวในอายุบ่มอื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันดังจะเห็นจากรูปที่ 12(a), 12(b), 12(d)



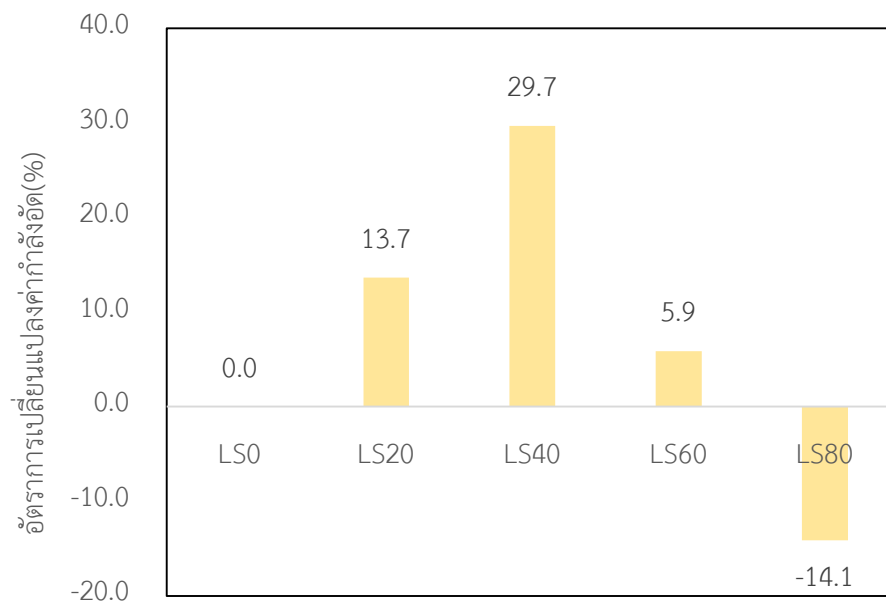
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 12 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดรับแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วย  
ต่างเมื่อเทียบกับ LS0

(a) 7 วัน (b) 14 วัน (c) 28 วัน (d) 60 วัน



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

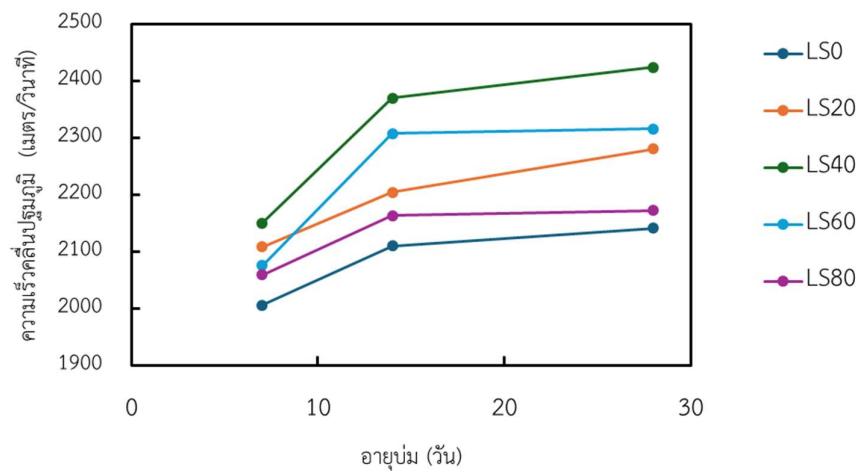
รูปที่ 13 ลักษณะการวิบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน

(a) LS0 (b) LS20 (c) LS40 (d) LS60 และ (e) LS80

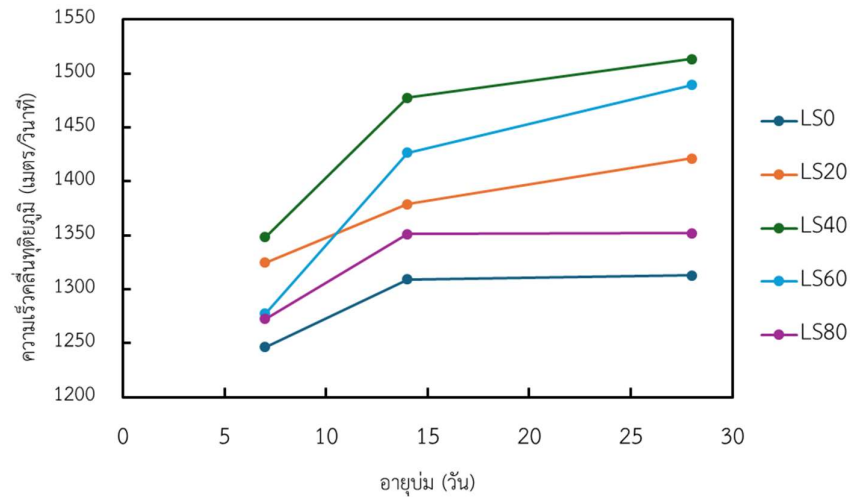
#### 4.4 การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีเรโซแนนซ์อิสระ

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นของวัสดุควบคุมกำลังต่ำแสดงดังรูปที่ 14 (a) และ รูปที่ 14 (b) พบว่าค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $v_p$ ) และค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $v_s$ ) มีค่าแปรผันตามความกำลังอัด กล่าวคือหากมีกำลังอัดที่สูงขึ้นค่าความเร็วทั้งสองก็จะมากขึ้นตาม

อีกทั้ง  $v_p$  และ  $v_s$  ของทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุบ่ม เนื่องจากการเกิดสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-A-S-H) จากการปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุบ่ม 28 วัน



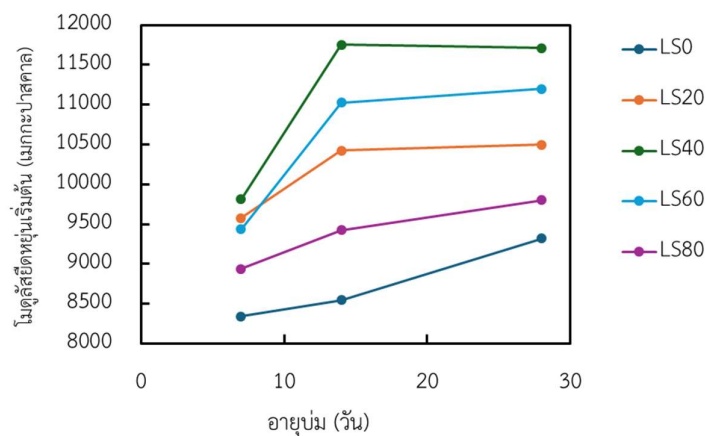
(a)



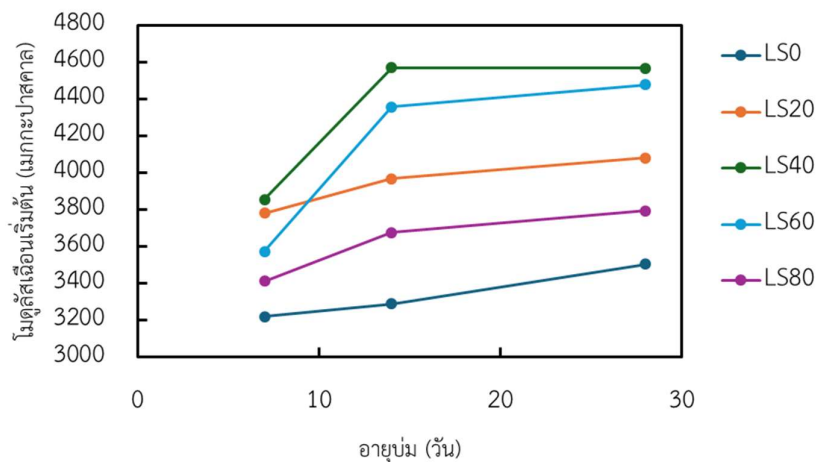
(b)

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลิ่นกับอายุบ่มของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง (a) ความเร็วคลิ่นปฐมภูมิ ( $v_p$ ) และ (b) ความเร็วคลิ่นทุติยภูมิ ( $v_s$ )

รูปที่ 15 (a) และรูปที่ 15 (b) แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น ( $E_0$ ) และค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น ( $G_0$ ) ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณสมการที่ (1) จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า  $E_0$  และ  $G_0$  มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเช่นเดียวกับค่าความเร็วคลิ่นของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง เนื่องจากสมการที่ (1) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่าความเร็วคลิ่นของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับค่ากำลังที่สองของความเร็วคลิ่น ดังนั้นค่า  $E_0$  และ  $G_0$  จึงมีค่าแปรผันตามกำลังอ้าววัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง



(a)

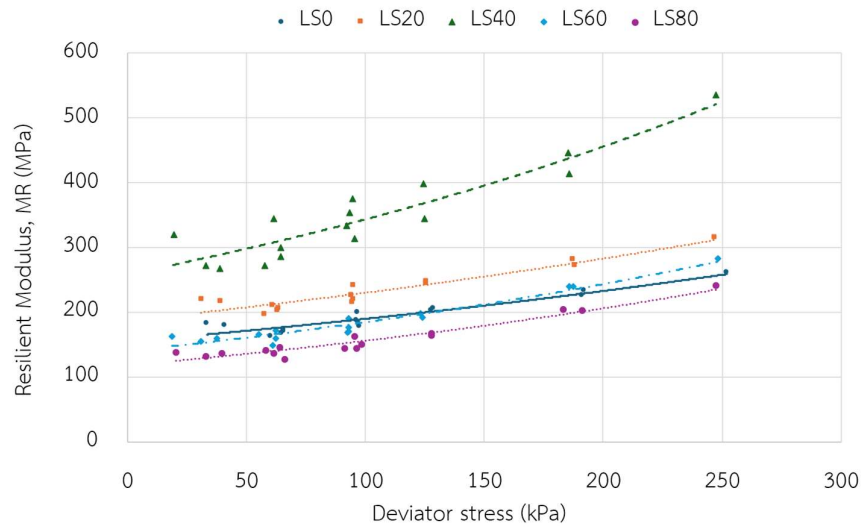


(b)

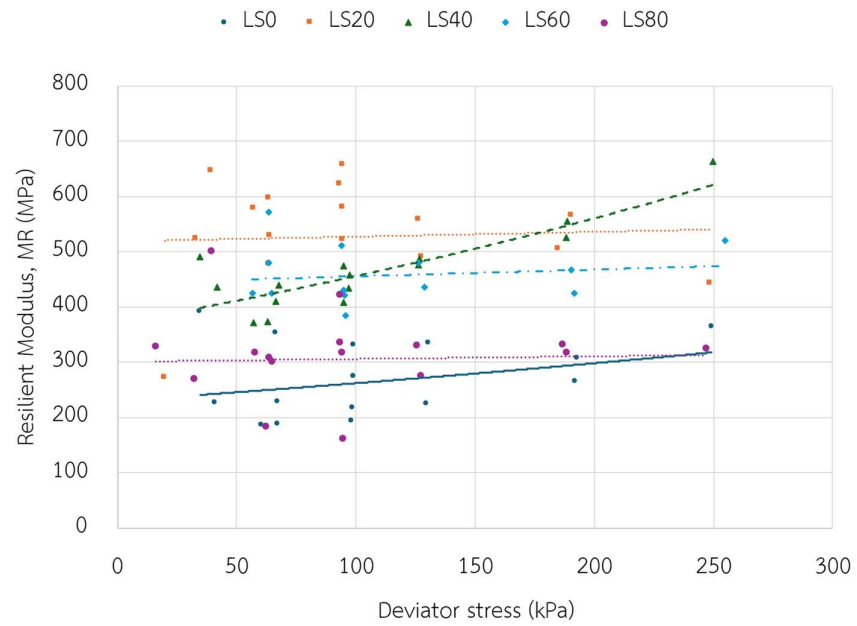
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับอายุบ่มของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง (a) โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (b) โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น

#### 4.5 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

จากการทดสอบโมดูลัสคืนตัว ( $M_R$ ) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และค่าความเค้นโอบรัด ( $\theta$ ) พบว่าค่า  $M_R$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ( $\theta$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นโอบรัดมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Chompoorat et al., 2018) จากรูป 14 (a) ค่า  $M_R$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีอายุบ่ม 7 วัน มีค่า เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 159.1 ถึง 348.9 เมกะปาสคาล และจากรูป 14 (b) ค่า  $M_R$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีอายุบ่ม 14 วัน มีค่า เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 243.2 ถึง 467.2 เมกะปาสคาล และรูป 14 (c) ค่า  $M_R$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีอายุบ่ม 28 วัน มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 328.0 ถึง 615.9 เมกะปาสคาล โดยพบว่าค่า  $M_R$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุบ่มมากขึ้น โดยมีผลสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่มีค่าการรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มมากขึ้น

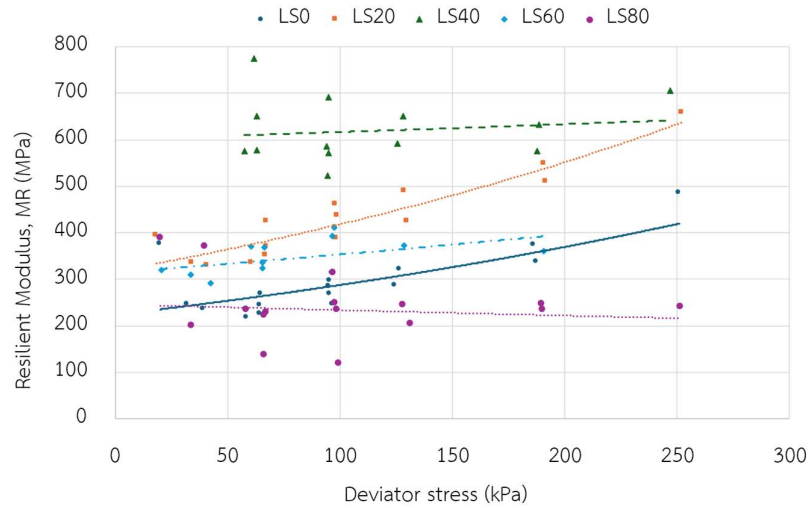


(a)



(b)





(c)

รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและความเค้นเบี่ยงเบนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการ  
กระดุนด้วยต่างที่อายุบ่ม

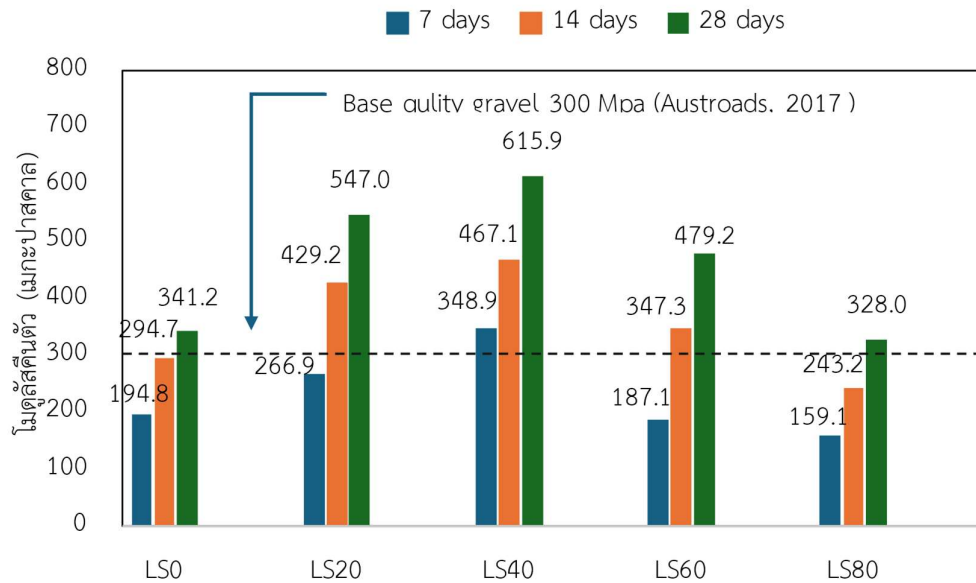
(a) 7 วัน (b) 14 วัน และ (c) 28 วัน

งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองของ May and Witczak (1981) มาประยุกต์ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear behavior) ที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกระทำกลับไปกลับมา โดยพิจารณาความเค้นเบี่ยงเบน ( $\sigma_d$ ) และความเค้นรอบข้าง ( $\theta$ ) เป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำค่า  $M_R$  ที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  จากสมการดังกล่าวได้ โดยตารางที่ 9 แสดงค่า  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตลอดอายุบ่ม จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์  $k_1$  มีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่า  $M_R$  กล่าวคือยิ่งค่า  $k_1$  ที่มากก็จะทำให้ค่า  $M_R$  มีค่ามากตามกัน ส่วนค่า  $k_2$  และ  $k_3$  ที่มีการแปรผัน บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และ  $\sigma_d$  กล่าวคือเมื่อค่า  $\sigma_d$  มีค่ามากขึ้น ค่า  $M_R$  ก็จะมีค่ามากขึ้นตาม เมื่อ ผลรวมของ  $k_2$  และ  $k_3$  เป็นบวก แต่ในขณะที่ ผลรวมของ  $k_2$  และ  $k_3$  เป็นลบจะทำให้ ค่า  $M_R$  ลดลงเมื่อ ค่า  $\sigma_d$  มีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย  $k_1$   $k_2$  และ  $k_3$  ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ได้จากแบบจำลองของ May and Witzczak (1981)

ส่วนผสม	อายุบ่ม	ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย		
		$k_1$	$k_2$	$k_3$
LS0	7	1000.56	1.01	-0.64
	14	2346.72	0.39	0.11
	28	5504.70	-2.37	-1.06
LS20	7	1227.09	0.99	-0.61
	14	4280.81	0.03	0.27
	28	6210.29	-0.24	0.11
LS40	7	3556.76	0.02	0.28
	14	4719.55	0.44	-0.74
	28	6523.39	-2.04	-1.26
LS60	7	1492.64	0.41	0.15
	14	6982.39	-0.28	0.67
	28	3203.46	0.39	-1.01
LS80	7	1260.74	0.41	0.15
	14	2456.36	-0.11	-0.16
	28	3596.26	-0.24	0.03

รูปที่ 17 แสดงค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง พบว่าค่า  $M_R$  ที่อายุบ่ม 28 วัน ของทุกส่วนผสม มีค่ามากกว่า 300 เมกะปาสคาลซึ่งผ่านเกณฑ์ชั้นพื้นทางหินคลุกปกติ (Normal standard crushed rock base) จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (Base quality gravel) ตามมาตรฐาน Austroads (2017) ได้



รูปที่ 17 โมดูลัสคืนตัวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน

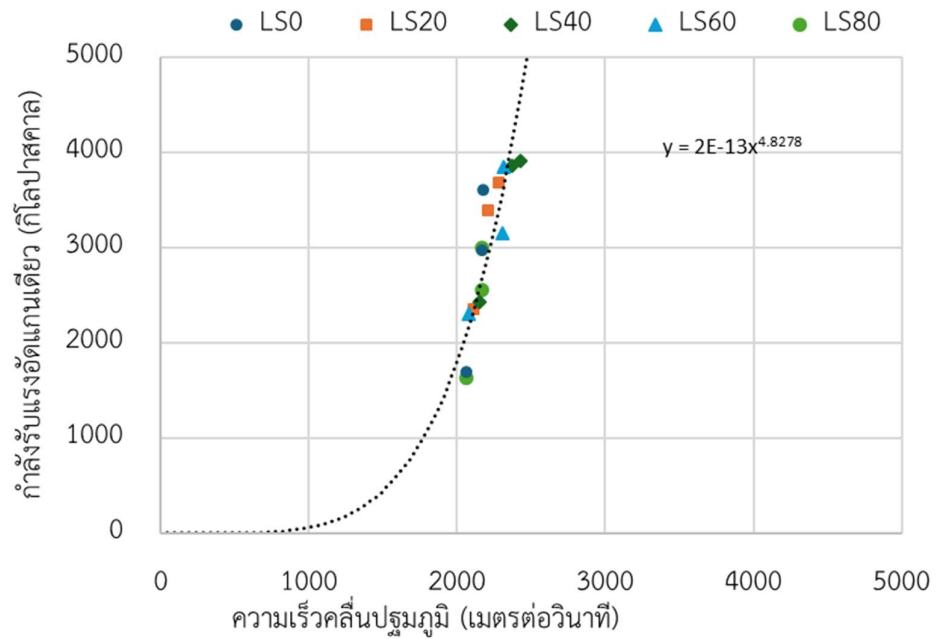
#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่นมาสร้างความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่ากำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $V_p$ ) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $V_s$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูป 18 และ 19 ตามลำดับโดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายจะได้สมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) ตามลำดับ

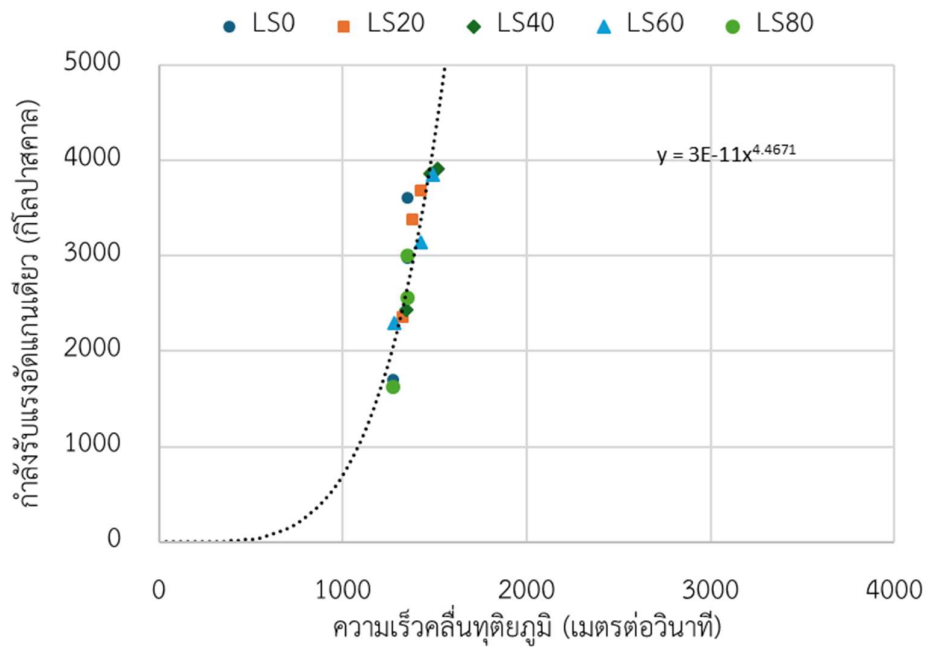
$$UCS_{CLSM} = 2 \times 10^{-13} \times V_p^{4.8278} \quad (1)$$

$$UCS_{CLSM} = 3 \times 10^{-11} \times V_s^{4.4671} \quad (2)$$

เมื่อ  $UCS_{CLSM}$  คือ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (กิโลปาสคาล),  $V_p$  = ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (เมตร/วินาที) และ  $V_s$  = ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เมตร/วินาที)



(a)

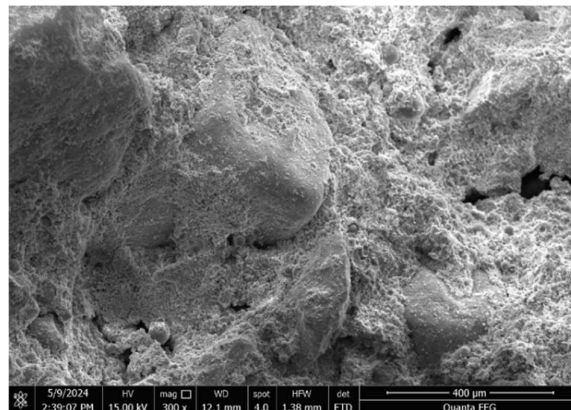


(b)

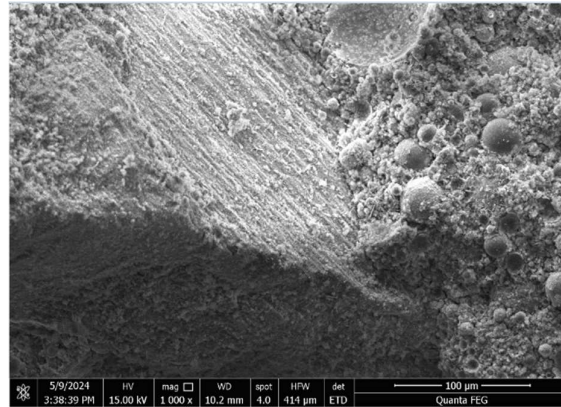
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น (a) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ และ (b) ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ

#### 4.7 ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

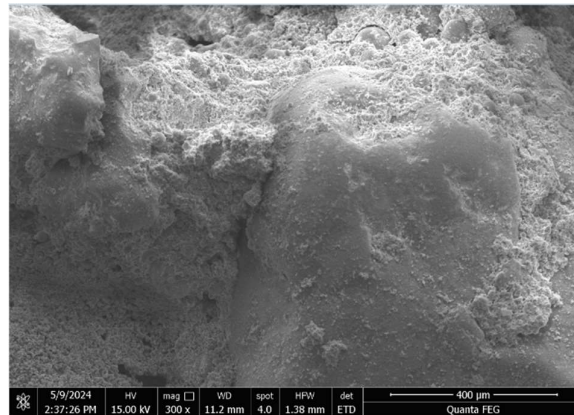
รูปที่ 19 (a) แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งที่อายุ 28 วัน จะเห็นได้ว่าการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL ระหว่างตัวเถ้าลอยและมวลรวม ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเพื่อยึดเกาะกันของตัวมวลรวมละเอียดได้ดีแต่มีช่องว่างอยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 19(b) จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งในปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร มีการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL เช่นเดียวกันแต่มีช่องว่างน้อยกว่าสูตรที่ไม่มีการแทนที่ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัด และผลการกระจายตัวของวัสดุที่ทำให้ช่องว่างของมวลรวมน้อยลง และจากรูปที่ 17(c) และ 17(d) ซึ่งแสดงภาพถ่าย SEM ของส่วนผสม LS40 โดย 17(c) จะเป็นการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL ที่ผิวทราย และ 17(d) จะเป็นการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL ที่ผิวของเศษหินปูนเหลือทิ้ง จะเห็นได้ว่าที่ผิวของหินปูนมีการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL ที่มากกว่าทรายเนื่องด้วยผิวที่ไม่เรียบเท่าเม็ดทรายซึ่งจะทำให้การใส่เศษหินปูนในปริมาณที่เหมาะสมจะเพิ่มกำลังของวัสดุควบคุมกำลังต่ำแต่หากใส่มากเกินไปจะเกิดช่องว่างระหว่างตัววัสดุมากขึ้นจนทำให้กำลังลดลง



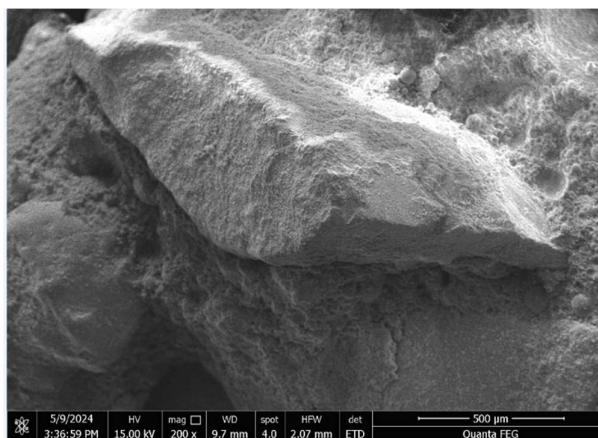
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน ของส่วนผสม (a) LS0 (b) LS0 (c) LS0 และ (d) LS40

#### 4.8 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำกระตุ้นด้วยต่าง

ตารางที่ 10 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้งานแต่ละวัสดุ

Materials	CO <sub>2i-x</sub> (kgCO <sub>2</sub> /kg)	Reference
Fly ash	0.0213	Haruna et al. (2021)
Sodium metasilicate	0.7478	Haruna et al. (2021)
Natural sand	0.00471	Haruna et al. (2021)
Limestone waste	0.00276	Suthirat et al. (2017)
Water	0	Haruna et al. (2021)

ตารางที่ 11 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้งานแต่ละส่วนผสม

Materials	CO <sub>2i-x</sub> (kgCO <sub>2</sub> /kg)	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )				
		LS0	LS20	LS40	LS60	LS80
Fly ash	0.0213	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67
sodium silicate	0.7478	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15
sand	0.00471	6.78	5.42	4.07	2.71	1.36
Limestone waste	0.00276	0	0.73	1.46	2.19	2.92
water	0	0	0	0	0	0
total CO <sub>2</sub>		30.6	29.97	29.35	28.72	28.1

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำกระตุ้นด้วยต่างในส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้นซึ่งจะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 12 ต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามแต่ละส่วนผสม

Materials	Cost of material	Cost of mixture (THB/m <sup>3</sup> )				
		LS0	LS20	LS40	LS60	LS80
Fly ash	1000 บาท/m <sup>3</sup>	153	153	153	153	153
sodium silicate	358 USD/tons	194.22	194.22	194.22	194.22	194.22
sand	495 บาท/m <sup>3</sup>	270.76	216.81	162.36	108.40	53.96
Limestone waste	0 บาท/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	0
water	8.5 บาท/m <sup>3</sup>	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
total cost (THB/m <sup>3</sup> )		620.43	566.48	512.03	458.07	403.63

จากตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่าต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำกระตุ้นด้วยต่างในส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ประหยัดต้นทุนในการนำไปใช้งาน



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการไหลได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่ผลิตจากการนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ด้วยทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุถมทางโดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 200 มิลลิเมตรตามเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ (Ling et al., 2018) โดยค่าการยุบตัวไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งในปริมาณที่มากขึ้น

2. เมื่อมีปริมาณเศษหินปูนเหลือทิ้งแทนที่ทรายธรรมชาติในส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมีค่าน้อยลง เนื่องจากเศษหินปูนมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายธรรมชาติ

3. กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการนำเศษหินปูนมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นในช่วงที่แทนที่ร้อยละ 0-40 โดยปริมาตร แต่มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงในช่วงที่แทนที่ร้อยละ 60-80 โดยปริมาตร โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณร้อยละ 0 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอายุบ่ม 28 วัน ไม่เกิน 8.3 เมกะปาสคาล ตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (ACI 229R, 2013)

4. ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ และค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะแปรผันตรงกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวในแต่ละส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามความเร็วคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุบ่ม

5. วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนร้อยละ 40 โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสคลื่นตัวที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 615.8 เมกะปาสคาล ซึ่งผ่าน

มาตรฐานชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (Base quality gravel) และชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (Subbase quality gravel) ตามมาตรฐาน Austroads (2017)

6. การใช้วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนจะทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ทรายเพียงอย่างเดียวและมีต้นทุนที่ลดลงเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุควบคุมกำลังต่ำทั่วไป

7. การนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างไปประยุกต์ใช้เมื่อดูจากค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ไปเทียบกับเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ พบว่า สามารถนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง ไปใช้ในงานถมโครงสร้าง ฐานราก และงานถมทาง เช่น พื้นทางได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณเศษหินปูนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตหินปูนจากผลการทดสอบพบว่าการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร เป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติการเชิงกลดีที่สุดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำเนื่องจากมีค่าการยุบตัวไหลแผ่ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 และค่าโมดูลัสคืนตัวที่อายุบ่ม 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด อย่างไรก็ตามการปรับปรุงส่วนผสมและการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติควรได้รับการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

**ภาคผนวก**  
**ผลการทดสอบวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง**

ตารางที่ 13 ข้อมูลการทดสอบความสามารถในการยุบตัวไหลแผ่ (ASTM C1611, 2014)

ส่วนผสม	ค่าการยุบตัวไหลแผ่ (มม.)
LS0	451.67
LS20	550
LS40	566.67
LS60	660
LS80	710

ตารางที่ 14 ข้อมูลหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

ส่วนผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	เฉลี่ย
LS0	1	549.12	260	2112.6	2110
	2	549.9	260	2115.5	
	3	546.78	260	2101.9	
LS20	1	541.87	260	2084.1	2081.6
	2	540.28	260	2078	
	3	541.50	260	2082.7	

ส่วนผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	เฉลี่ย
LS40	1	531.96	260	2046.0	2053.6
	2	534.46	260	2055.6	
	3	535.39	260	2059.2	
LS60	1	528.63	260	2033.2	2035.6
	2	529.98	260	2038.4	
	3	529.15	260	2035.2	
LS80	1	521.46	260	2005.6	2008.2
	2	522.73	260	2010.5	
	3	522.21	260	2008.5	

ตารางที่ 15(a) ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีอายุบ่ม 7 วัน (ASTM D2166, 2016)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน (เมกะปาสคาล)			
	1	2	3	เฉลี่ย
LS0	1.73	1.76	1.60	1.70
LS20	2.49	2.49	2.09	2.36
LS40	2.62	2.21	2.48	2.43
LS60	2.28	2.45	2.17	2.30
LS80	1.64	1.59	1.66	1.63

ตารางที่ 15(b) ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีอายุบ่ม 14 วัน (ASTM D2166, 2016)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 14 วัน (เมกะปาสคาล)			
	1	2	3	เฉลี่ย
LS0	2.90	3.05	3.06	2.98
LS20	3.29	3.21	3.38	3.39
LS40	3.93	3.76	3.91	3.86
LS60	3.04	3.27	3.16	3.15
LS80	2.52	2.41	2.97	2.56

ตารางที่ 15(c) ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีอายุบ่ม 28 วัน (ASTM D2166, 2016)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน (เมกะปาสคาล)			
	1	2	3	เฉลี่ย
LS0	3.76	3.40	3.50	3.61
LS20	3.59	3.68	3.80	3.69
LS40	3.82	3.97	3.90	3.91
LS60	4.14	3.74	3.67	3.85
LS80	3.13	2.81	3.05	3.00

ตารางที่ 15(d) ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีอายุบ่ม 60 วัน (ASTM D2166, 2016)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 60 วัน (เมกะปาสคาล)			
	1	2	3	เฉลี่ย
LS0	3.87	3.50	3.82	3.73
LS20	3.95	3.60	3.90	3.86
LS40	4.16	4.28	4.14	4.19
LS60	3.79	3.89	3.95	3.89
LS80	2.94	3.19	3.09	3.11

ตารางที่ 16(a) ข้อมูลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระของควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $v_p$ ) (เมตร/วินาที)	ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $v_s$ ) (เมตร/วินาที)	โมดูลัสยืดหยุ่น เริ่มต้น (EO) (จิกกะปาสคาล)	โมดูลัสเฉือน เริ่มต้น (GO) (จิกกะปาสคาล)
LS0	2006.105	1246.334	8.34	3.22
LS20	2108.659	1324.724	9.58	3.78
LS40	2150.761	1348.162	9.81	3.86
LS60	2075.78	1277.357	9.43	3.57
LS80	2059.438	1272.251	8.94	3.41

ตารางที่ 16(b) ข้อมูลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระของควมคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุ  
ปม 14 วัน

ส่วนผสม	ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $v_p$ ) (เมตร/วินาที)	ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $v_s$ ) (เมตร/วินาที)	โมดูลัสยืดหยุ่น เริ่มต้น (E0) (จิกกะปาสคาล)	โมดูลัสเฉือน เริ่มต้น (G0) (จิกกะปาสคาล)
LS0	2109.974	1309.089	8.55	3.29
LS20	2204.42	1378.7	10.42	3.97
LS40	2369.658	1477.492	11.76	4.57
LS60	2307.349	1426.52	11.03	4.36
LS80	2163.82	1351.077	9.43	3.68

ตารางที่ 16(c) ข้อมูลการทดสอบเรโซแนนซ์อิสระของควมคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่อายุ  
ปม 28 วัน

ส่วนผสม	ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $v_p$ ) (เมตร/วินาที)	ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $v_s$ ) (เมตร/วินาที)	โมดูลัสยืดหยุ่น เริ่มต้น (E0) (จิกกะปาสคาล)	โมดูลัสเฉือน เริ่มต้น (G0) (จิกกะปาสคาล)
LS0	2141.624	1312.844	9.32	3.50
LS20	2280.56	1421.468	10.50	4.08
LS40	2423.8	1513.4	11.71	4.57
LS60	2315.821	1489.349	11.20	4.48
LS80	2172.895	1351.953	9.80	3.79

ตารางที่ 17 ข้อมูลการทดสอบ โมดูล์สกินตัวโดยเฉลี่ยของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วย  
ต่าง

ส่วนผสม	อายุป่ม	ค่าโมดูล์สกินตัว (เมกะปาสคาล)
LS0	7	194.79
	14	294.71
	28	341.21
LS20	7	266.88
	14	429.18
	28	547.00
LS40	7	348.94
	14	467.15
	28	615.88
LS60	7	187.12
	14	347.33
	28	479.19
LS80	7	159.05
	14	243.20
	28	328.00



## เอกสารอ้างอิง

- AASHTO T307-99, A. (2017). Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. In: American Association of State Highway and Transportation Officials
- ACI 229R, A. (2013). Report on controlled low-strength materials. In: ACI Committee 229, American Concrete Institute (ACI) Farmington Hills, MI.
- ASTM C33, A. (2013). ASTM C33 standard specifications for concrete aggregates. ASTM Standard Book.
- ASTM C127, A. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and 38 Absorption of Coarse Aggregate. In: American Society for Testing and Materials: West.
- ASTM C128, A. (2015). Standard Test Method for Density, Relative density (Specific gravity) and Absorption of Fine Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C131, A. (2014). Resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine. ASTM Designation.
- ASTM C136/C136M, A. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- ASTM C138/C138M, A. (2017). Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. In: ASTM International West Conshohocken, PA.
- ASTM C618, A. (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM international.

- ASTM C1611, A. (2014). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM international, 6.
- ASTM D570-98, A. (2018). Standard test method for water absorption of plastics. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D2166, A. (2016). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. West Conshohocken, PA, United States.
- Austrosds. (2017) Guide to pavement technology: Part 2: Pavement structural design.
- Abbagana Mohammed, Tim G. Hughes, Aliyu Abubakar (2015). Importance of Sand Grading on the Compressive Strength and Stiffness of Lime Mortar in Small Scale Model Studies. *Open Journal of Civil Engineering*, 2015, 5, 372-378
- D. Ahadzadeh Ghanad, A.M. Soliman (2021). Bio-based alkali-activated controlled low strength material: *Engineering properties Construction and Building Materials*, 279, 3-7
- Harshwardhan Singh Chouhan, Pawan Kalla, Ravindra Nagar, Pradeep Kumar Gautam (2019). Gainful utilization of dimensional limestone waste as fine aggregate in cement mortar mixes. *Construction and Building Materials* 221 (2019), 363–374.
- Lee, N. K., Kim, H. K., Park, I., & Lee, H. K. (2013). Alkali-activated, cementless, controlled. low-strength materials (CLSM) utilizing industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 49, 738-746.
- Ling, T.-C., Kaliyavaradhan, S. K., & Poon, C. S. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling-An overview. *Construction and Building Materials*, 158, 535-548.
- Omar M. Omar, Ghada D. Abd Elhameed , Mohamed A. Sherif , Hassan A. Mohamadien (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal* (2012) 8, 193–203

- R.D. Verástegui-Flores, G. Di Emidio, A. Bezuijen, J. Vanwalleghem, M. Kersemans (2015). Evaluation of the free-free resonant frequency method to determine stiffness moduli of cement-treated soil. *Soils and Foundations* 2015;55(5):943–950
- Chompoorat,T., Likitlersuang, S.,, & Jongvivatsakul, P. (2018). The performance of controlled low-strength material base supporting a high-volume asphalt pavement. *KSCE journal of Civil Engineering*, 22, 2055-2063.
- May, R. W., & Witczak, M. W. (1981). Effective granular modulus to model pavement responses. *Transportation research record*, 810, 1-9.
- Sani Haruna, Pitcha Jongvivatsakul, Kantipok Hamcumpai, Hafiz Waheed Iqbal, Peem Nuaklong, Suched Likitlersuang, Mitsuyasu Iwanami (2021). Multiscale investigation of the impact of recycled plastic aggregate as a fine aggregate replacement on one-part alkali-activated mortar performance. *Journal of Building Engineering* 86 (2024) 108768
- Suthirat KITTIPONGVISES (2017). Assessment of Environmental Impacts of Limestone Quarrying Operations in Thailand. *Environmental and Climate Technologies* Nov. 2017, vol. 20, pp. 67–83

# การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างโดยการแทนที่วัสดุธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง

## Development of Alkali-activated Controlled Low-Strength Material by Replacing Natural Materials with Limestone Waste

เจตณัฐ จิโรจดำรงชัย<sup>1</sup> ศุภกร ธิวศ์เงิน<sup>2</sup> และ พิชชา จองวิวัฒน์สกุล<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

### บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการทำเหมืองผลิตหินปูน ได้เกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทหนึ่ง จากกระบวนการผลิตนั้นก็คือเศษหินปูนเหลือทิ้งซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จนเห็นเป็นรูปธรรมและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และต้องการพื้นที่สำหรับการฝังกลบ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง ที่นำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง ในขนาดที่หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิ และค่าโมดูลัสคลื่นตัว มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 และค่าลดลง เมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 และ 80 ตามลำดับเนื่องด้วยลักษณะการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่มีช่องว่างลดลงเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งและจากสัดส่วนผสมทั้งหมดพบว่า วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตรมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง, การแทนที่วัสดุธรรมชาติ

### Abstract

In mining of limestone, waste is generated in the form of limestone waste, leading to several environmental problems such as air pollution and the need for additional landfill space for storage. The purpose of this research is to study the properties of Alkali-activated Controlled Low Strength Material

(CLSM) made from limestone waste as a substitute for fine aggregate in proportions of 20, 40, 60, and 80 percent by volume of fine aggregate. The results showed that flowability increased when fine aggregate was replaced with limestone waste, while unit weight slightly decreased. The unconfined compressive strength, primary and secondary wave velocities, and resilience modulus increased with fine aggregate replacement at 20% to 40% but gradually decreased when the replacement increased to 60% and 80%. This trend is due to the packing characteristics of the aggregate mix, where void content decreases as fine aggregate is replaced with limestone waste. From the overall mix proportions, it was found that Alkali-activated Controlled Low Strength Material, with 40% of natural sand replaced by limestone waste by volume, meets the relevant standards for Controlled Low Strength Material.

Key words: Controlled low-strength material; Alkali-activated ; Limestone waste ; Pavement base material ; Reduce the usage of sand

### 1. คำนำ

ในปัจจุบันวงการก่อสร้างให้ความสำคัญเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างเป็นอย่างยิ่งโดยหนึ่งในสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างคือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่อากาศเป็นจำนวนมาก และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเช่น ทราย ในจำนวนมากด้วยเหตุนี้จึงเริ่มมีการหาวัสดุเพื่อทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ โดยงานวิจัยนี้จะนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของการพัฒนาวัสดุกำลังต่ำ (CLSM) จากการศึกษาพบว่าเศษหินปูนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมหินปูนนั้นผลิตเศษหินปูนจำนวนมากในระหว่างไม่หินเพื่อผลิต

มวลรวมหยาบ การจัดเก็บและการกำจัดเศษหินปูนเหลือทิ้งที่อาจมีการฟุ้งกระจายในอากาศทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนที่ดินในการกำจัด ดันทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น และปัญหาอื่นๆที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย [1-2] ดังนั้นการใช้เศษหินปูนเหลือทิ้งจากเหมืองหินแทนทรายในวัสดุก่อสร้างจะช่วยแก้ไขปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการสูญเสียแหล่งธรรมชาติของแม่น้ำและทรายจากเหมืองในวงกว้าง

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุผสมชนิดอื่น คือ มีความสามารถไหลเข้าที่แคบและอัดแน่นด้วยตัวเองได้ [3] จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุถม โดยถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น งานดินถม งานฝังกลบ งานปรับระดับ งานการขุดวางท่อระบบสาธารณูปโภคต่างๆ และการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อที่ฝังใต้ดิน เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้พื้นที่ที่จำกัดได้ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรและคนงานในการทำงานมากมายนัก ตามมาตรฐาน ACI 229R(2013) ได้ระบุค่าการยุบตัวไหลแผ่ของ CLSM ไว้ มากกว่า 200 มิลลิเมตร ขึ้นไป และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่เกิน 8.3 MPa เพื่อความสะดวกในการขุดรื้อถอนในอนาคต ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต CLSM โดยทั่วไปประกอบไปด้วยวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการเผาซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ในอุณหภูมิ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียสแล้วนำเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดจึงส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สู่อากาศปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต CLSM ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) และเศษหินปูนเหลือทิ้ง โดยจะผสม CLSM ด้วยการใส่เถ้าลอยเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลาย sodium metasilicate pentahydrate ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเป็นตัวชะละลายสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิวของวัสดุประสาน ส่วนเศษหินปูนเหลือทิ้งจะถูกนำมาใช้แทนทรายธรรมชาติสำหรับ CLSM ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย

## 2. ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุถม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุผสมชนิดอื่นคือมีความสามารถในการไหลเข้าที่แคบและอัดแน่นด้วยตัวเองได้ โดย CLSM ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น งานดินถม งานฝังกลบ งานปรับระดับ งานการขุดวางท่อสาธารณูปโภคต่างๆ งานถมชั้นรองฐานราก และการใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อที่ฝังใต้ดินเป็นต้น เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้พื้นที่ที่จำกัดได้ และไม่จำเป็นต้องใช้คนงานและเครื่องจักรในการทำงานมากนัก

ซึ่งทำให้การทำงานมีความสะดวกรวดเร็วและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น รวมถึงการใช้ดินบดอัดต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการก่อนซึ่งทำให้ขั้นตอนในการปฏิบัติงานมีความยุ่งยากมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญของ CLSM ได้แก่ ความสามารถในการไหลได้และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว [3] ตามมาตรฐาน ACI 229R (2013) [4] ระบุค่าการยุบตัวไหลแผ่ของ CLSM ต้องมีค่ามากกว่า 200 มิลลิเมตร ขึ้นไป และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วัน ต้องไม่เกิน 8.3 MPa เพื่อความสะดวกต่อการขุดรื้อถอนในอนาคต

### 2.2 มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate)

คือวัสดุเฉื่อยอันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ด้วยเหตุนี้คุณภาพของมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเรื่องการควบคุมคุณภาพอย่างมาก ในงานวิจัยยุคบุกเบิกมวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานโดยกระจายอยู่ที่ผิวสัมผัสเท่านั้น ในปัจจุบันพบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีกหลายอย่าง

ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ด้านทานน้ำหนักที่ตกลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวม มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ติดตั้งนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดการย่อยแปรสภาพของมวลรวม

### 2.3 เศษหินปูนเหลือทิ้ง

จากการศึกษาพบว่าเศษหินปูนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมหินปูนนั้นผลิตเศษหินปูนจำนวนมากในระหว่างไม่หินเพื่อผลิตมวลรวมหยาบ การจัดเก็บและการกำจัดเศษหินปูนเหลือทิ้งที่อาจมีการฟุ้งกระจายในอากาศทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนที่ดินในการกำจัด ดันทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น

### 2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าที่มีขนาดใหญ่จะตกลงกันเตาเผาซึ่งจะถูกเรียกว่า เถ้าถ่านเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าที่มีขนาดเล็ก กล่าวคือ มีขนาด

ตั้งแต่ 1 ถึง 200 ไมโครเมตร จะลอยขึ้นไปเหนือเตาพร้อมกับอากาศร้อนซึ่งจะถูกเรียกว่า เถ้าลอย ซึ่งจะถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitators) เพื่อป้องกันไม่ให้หลุดออกสู่บรรยากาศ เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกาและลูมินา โดยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสกับน้ำจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious substance) ได้ เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 3.0 มิลลิเมตร ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงระหว่าง 170 ถึง 1,000 ตารางเมตร/กิโลกรัมองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์จากธาตุต่างๆ ได้แก่ซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อะลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), เหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) เป็นต้น โดยปริมาณของธาตุดังกล่าวจะแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของถ่านหิน ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหิน

ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019) [5] ได้แบ่งประเภทของเถ้าลอยตามปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เถ้าลอย Class N เถ้าลอย Class F และ เถ้าลอย Class C ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019) [5]

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของปริมาณ SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> และ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> อย่างน้อยร้อยละ	70	50	50
ปริมาณ CaO ไม่เกินร้อยละ	ใช้ค่าจากการทดสอบวัสดุ	≤18.0	>18.0
ปริมาณ SO <sub>3</sub> ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ	3	3	3
น้ำหนักสูญเสียจากการเผาไหม้เกิน ร้อยละ	10	6	6

## 2.5 วัสดุจากการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated material)

คือ วัสดุจากการกระตุ้นด้วยด่างถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานที่มีความแข็งแรง มีการซึมผ่านของน้ำต่ำ มีความต้านทานต่อสารเคมีและสามารถทนไฟได้ดี จึงทำให้วัสดุจากการกระตุ้นด้วยด่างได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ (Ameri et al., 2021; Duxson et al., 2007; Fernandez-jimenez et al., 2008) โดยวัสดุจากการกระตุ้นด้วยด่างสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาของวัสดุตั้งต้นที่มีธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) เป็นส่วนประกอบหลัก เช่น ตะกรันเตาถลุง

(Blast furnace slag) กับสารละลายด่าง (Alkaline solution) เช่น อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxides) ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น และอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicates) ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NaSiO<sub>3</sub>) และสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) เป็นต้น

## 2.6 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR)

แนวความคิดเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืนตัวของผิวทาง (Resilient behavior) ถูกเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1948 โดย Hveem และ Carmany ต่อมาในปี ค.ศ. 1955 Seed ศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวของวัสดุผิวทางโดยใช้การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1962 Seed ได้นิยามโมดูลัสคืนตัวตามรูปแบบของแรงกระทำกับความเครียดแบบไม่คืนตัว (Irrecoverable) หรือความเครียดแบบพลาสติกได้ (Plastic strain) เนื่องจากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ความเค้นแบบพลวัต (Dynamic stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางจะมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของวัสดุผิวทาง ดังนั้นวัสดุจึงมีความสามารถในการคืนตัวสู่สภาพเดิมได้มาก แม้ว่าโดยปกติแล้ววัสดุผิวทางจะมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกที่ไม่สมบูรณ์จากความเครียดถาวรหรือความเครียดแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นจากการถูกแรงกระทำ

## 2.7 การทดสอบความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ (Free-free resonance, FFR)

การทดสอบความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระเป็นวิธีหนึ่งสำหรับการตรวจวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E<sub>y</sub>) และค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G<sub>s</sub>) ของดินที่มีความเชื่อมแน่น ซึ่งพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดจะซับซ้อนและมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงโดยค่าความเกร็ง (stiffness) จะมีค่ามากเมื่อความเครียดมีค่าน้อย ในขณะที่ค่าความเกร็งจะลดลงเมื่อความเครียดเริ่มเข้าใกล้จุดวิบัติ แต่พฤติกรรมดังกล่าวจะคงที่และมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงเมื่อพิจารณาจากความเครียดในช่วงต่ำกว่าร้อยละ 0.001 [6] ดังนั้นความเครียดในช่วงนี้จึงสามารถหาได้โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสเฉือนจากการส่งสัญญาณคลื่นสั้นสะเทือน (Wave propagation-based method)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 วัสดุควบคุมกำลังด่างจากการกระตุ้นด้วยด่าง

Ghanad et al. (2021) [7] ได้นำมาของเสียจากทางเกษตรกรรม (เศษไม้สปรูซตาละเอียด) มาแทนที่มวลรวมละเอียดในวัสดุควบคุมกำลังด่างจากการกระตุ้นด้วยด่าง (CLSM) ซึ่งได้ข้อสรุปก็คือ เถ้าลอยช่วยพัฒนา flowability และลดการใช้น้ำของ CLSM ได้ แต่อย่างไรก็ตามขยะทางการเกษตรจะเพิ่มความต้องการน้ำมากขึ้นเพราะมีการดูดซึมน้ำมากและพื้นที่ผิวมาก

Lee et al. (2013) [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติของ Alkali-activated CLSM โดยมี fly ash, slag เป็นวัสดุตั้งกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH และใช้เถ้าหนัก (bottom ash) เป็นมวลรวมละเอียด (fine aggregate) โดยได้ข้อสรุปคือ สารละลาย NaOH มีผลน้อยมากต่อ

ความสามารถในการไหลของของผสม CLSM ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าหนักส่งผลให้ Flowability ของ CLSM ลดลงอย่างมาก ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ Flowability ของ CLSM คือ water/binder ratio และ the bottom ash/binder ratio

### 2.8.2 เศษหินปูนเหลือทิ้ง

Omar et al. (2012) [1] ศึกษาเชิงทดลองที่ดำเนินการเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของการทดแทนทรายบางส่วนด้วยเศษหินปูน (LSW) ที่ cement content 350 kg/m<sup>3</sup> โดยได้ข้อสรุปตั้งนี้ร้อยละของเศษหินปูนไม่ได้ส่งผลต่อ workability ของ green concrete การใช้เศษหินปูน (LSW) ทดแทนทรายมากกว่าร้อยละ 50 เพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตถึงร้อยละ 6 ที่อายุ 28 วัน

Chouhan et al. (2019) [9] ได้ศึกษาการใช้ Dimensional limestone waste (DLW) ที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดและขัดเงาโดยใช้ 2 รูปแบบคือ Dimensional limestone slurry และ Manufactured dimensional limestone crushed sand แทนที่มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) ในมอดาร์ จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าขนาดของ Limestone waste สามารถใช้ได้ ในมอดาร์อีกทั้งช่วยในการลดจำนวนการใช้วัสดุธรรมชาติที่นำกลับมา recycle ไม่ได้

## 3. การดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุใช้ในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Cement-based CLSM) และ วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated CLSM) ประกอบไปด้วย เถ้าลอย ทรายธรรมชาติ โซเดียมเมทาซิลิเกตและเศษหินปูนจากโรงไหมหิน ซึ่งนำมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติ โดยมีรายละเอียดของส่วนผสมดังต่อไปนี้

1. เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ประเทศไทยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.30 และ คุณสมบัติเคมีแสดงดังตารางที่ 3
2. ทรายธรรมชาติที่มีขนาดคละที่ดีตามมาตรฐาน ASTM C33 (2013) [10] ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4
3. โซเดียมเมทาซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)
4. เศษหินปูน คุณสมบัติดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	อัตราส่วนขององค์ประกอบ
CaO	23.0%
SiO <sub>2</sub>	33.3%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.0%
SO <sub>3</sub>	4.54%
MgO	2.59%
Na <sub>2</sub> O	2.24%
K <sub>2</sub> O	2.42%
TiO <sub>2</sub>	0.412%

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเศษหินปูน และ ทรายธรรมชาติ

มวลรวมละเอียด	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด (FM)	การดูดซึมน้ำ (%)
เศษหินปูน	2.43	3.69	0.36
ทรายธรรมชาติ	2.65	2.85	0.65

### 3.2 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

ในงานวิจัยนี้เศษหินปูนถูกนำมาแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 20, 40, 60, และ 80 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดสำหรับผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ชื่อส่วนผสม	เถ้าลอย (กก.)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (กก.)	ทรายธรรมชาติ (กก.)	เศษหินปูน (กก.)	น้ำ (กก.)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
LS0	360	21.6	1440	0	288	0.8
LS20	360	21.6	1152	264.1	288	0.8
LS40	360	21.6	864	528.2	288	0.8
LS60	360	21.6	576	792.3	288	0.8
LS80	360	21.6	288	1056.4	288	0.8

### 3.3 ขั้นตอนการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

1. ปรับอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ออกแบบต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ให้เป็นอัตราส่วนต่อปริมาตรที่ต้องการใช้ในการทดสอบ
2. เตรียมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ เถ้าลอย โซเดียมเมทาซิลิเกต ทรายธรรมชาติ น้ำ และ เศษหินปูน ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้
3. นำเถ้าลอยที่เตรียมไว้ เทลงในเครื่องผสมและพร้อมทำการผสมโดยใช้เวลา 30 วินาที
4. ใส่โซเดียมเมทาซิลิเกตลงในเครื่องผสมร่วมกับเถ้าลอย และส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที
5. เททรายและเศษหินปูนลงในเครื่องผสมผสมต่ออีก 3 นาที
6. ใส่น้ำลงเครื่องผสมและผสมต่ออีก 3 นาที จากนั้นหยุดพัก 15 วินาที
7. ใช้เกรียงเหล็กปาดส่วนผสมทางด้านข้างและด้านล่างขึ้นมาจากนั้นทำการผสมต่ออีก 30 วินาที และจึงทำการหยุดผสม
8. นำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อ
9. แกะตัวอย่างจากแบบหล่อรูปทรงกระบอกหลังจากผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่าง ไปบ่ม ทั้งไว้ เป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน

### 3.4 รายละเอียดการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย เศษหินปูน และ ทรายธรรมชาติ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6 ตารางที่ 6 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ทำการทดสอบ

การทดสอบ	วัสดุที่ทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
ขนาดกะของมวลรวม	ทรายธรรมชาติ และเศษหินปูน	ASTM C136 (2018) [11]
หน่วยน้ำหนัก	เศษหินปูน	ASTM C29 (2017) [12]
ความถ่วงจำเพาะ	เศษหินปูน	ASTM C128 (2015) [13]
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	เศษหินปูน	ASTM D570 (2018) [14]

#### 3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและการไหลได้

การทดสอบคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการทำงานได้ของ วัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากเศษหินปูนในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย ความสามารถในการยุบตัวไหลแม่ (Slump flow), หน่วยน้ำหนัก (Density), กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength), การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีโรเซนเนสซ์อิสระ ( FFR ), โมดูลัสคืนตัว ( RM ) และ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7

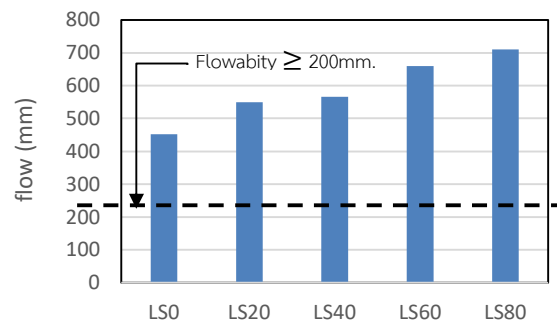
ตารางที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการไหลได้

การทดสอบ	ขนาดตัวอย่าง	อายุ ตัวอย่าง	มาตรฐานอ้างอิง
ความสามารถในการยุบตัวไหลแม่	-	-	ASTM C1611 (2014) [15]
หน่วยน้ำหนัก	-	-	ASTM C138 (2017) [16]
กำลังรับแรงอัดแกนเดียว	ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14, 28 และ 60 วัน	ASTM D2166 (2016) [17]
โมดูลัสคืนตัว	ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14 และ 28 วัน	Chompoorat et al. (2019) [18]
การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ด้วยวิธีโรเซนเนสซ์อิสระ	ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร และสูง 110 มิลลิเมตร	7, 14 และ 28 วัน	AASHTO T307-99 (2017) [19]

### 4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

#### 4.1 ความสามารถในการยุบตัวไหลแม่

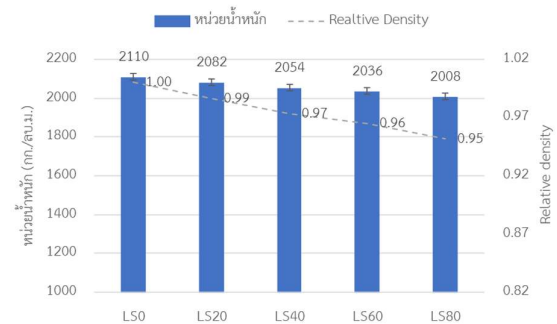
ความสามารถในการยุบตัวไหลแม่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจาก เศษหินปูนที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน ASTM C1611 (2014) [15] แสดงดังรูปที่ 1 ค่าการยุบตัวไหลแม่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 452 ถึง 710 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการยุบตัวไหลแม่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ ร้อยละ 21.77 3.03 16.47 และ 7.58 ตามลำดับ เนื่องจากโมดูลัสความ ละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติ รวมถึงการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าทราย ธรรมชาติ ส่งผลให้การความสารถในการทำงานได้ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ มากขึ้น



รูปที่1 ค่าการยุบตัวไหลแม่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

#### 4.2 หน่วยน้ำหนัก

รูปที่ 2 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีการแทนที่ ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง โดยหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุม กำลังต่ำอยู่ในช่วงระหว่าง 2008 ถึง 2110 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรโดย หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการแทนที่ ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง เนื่องจากโมดูลัสความละเอียดที่ มากกว่าทรายธรรมชาติ รวมถึงการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าทรายธรรมชาติ ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำลดลง



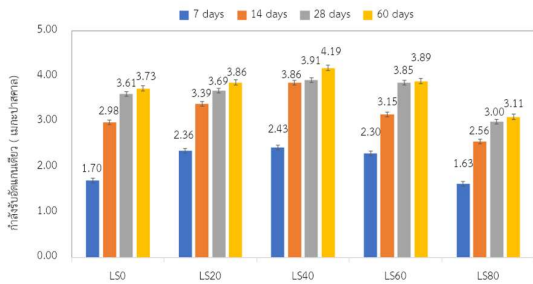
รูปที่ 2 หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ



#### 4.3 การทดสอบกำลังรับอัดแกนเดียว

จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุบ่มที่มากขึ้น ในขนาดที่ที่ค่ากำลังอัดรับแกนเดียวจะมีค่าต่างกันไปเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของส่วนผสม LS40 มีค่าเท่ากับ 2.43 3.86 3.91 และ 4.19 ตามลำดับ เมื่อมีอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วันตามลำดับ โดยพบว่าทุกส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 28 วัน ไม่เกิน 8.3 เมกะปาสคาลตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ACI 229R (2013) [4]

การนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาตินั้นพบว่าค่ากำลังรับอัดแรงแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ เนื่องมาจากการกระจายตัวของมวลคละวัสดุที่เปลี่ยนไป โดยจะพบว่าจากผลการ sieve analyze ของมวลรวมในแต่ละสูตร ทรายธรรมชาติที่นำมาใช้ มีการกระจายตัวอยู่ที่ ขอบบนของเกณฑ์ ที่ ASTM C33, A. (2013). ยอมให้ และการกระจายตัวของมวลรวมสูตร LS40 นั้นได้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างเส้น ขอบบน และขอบล่าง ซึ่งทำให้ช่องว่างในมวลรวมนั้นน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสูตรอื่น ทำให้กำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำมีแนวโน้มเป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Omar et al. (2012) [1]

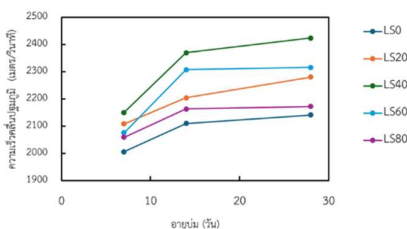


รูปที่ 11 ค่ากำลังอัดรับแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน

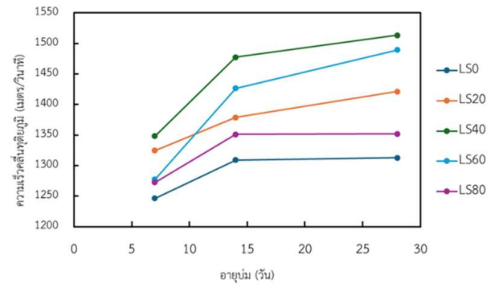
#### 4.4 การทดสอบความเร็วคลื่นปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยวิธีเรโซแนนซ์อิสระ

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นของวัสดุควบคุมกำลังต่ำแสดงดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 พบว่าค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $V_p$ ) และค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $V_s$ ) มีค่าแปรผันตามความกำลังอัดกล่าวคือหากมีกำลังอัดที่สูงขึ้นค่าความเร็วทั้งสองก็จะมากขึ้นตาม

อีกทั้ง  $V_p$  และ  $V_s$  ของทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุบ่ม เนื่องจากการเกิดสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) จากการปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาการบ่มที่มากขึ้น



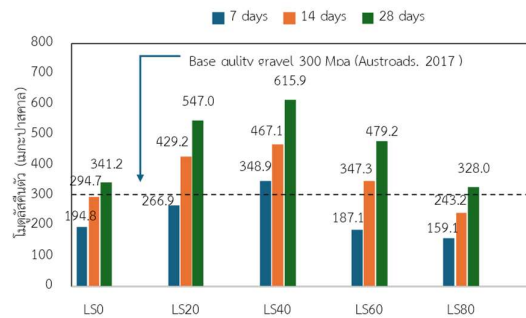
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นปฐมภูมิกับอายุบ่มของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นทุติยภูมิกับอายุบ่มของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

#### 4.5 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวจากรูปที่ 14 แสดงค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ พบว่าค่า  $M_R$  ที่อายุบ่ม 28 วัน ของทุกส่วนผสม มีค่ามากกว่า 300 เมกะปาสคาลซึ่งผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำทางหินคลุกปกติ (Normal standard crushed rock base) จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นพื้นทางประเภทรวดคุณภาพ (Base quality gravel) ตามมาตรฐาน Austroads (2017) [21] ได้ จากผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่าตัวอย่าง LS40 ให้ผล  $M_R$  สูงสุดจากทุกตัวอย่างในกลุ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของมวลละเอียดที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ช่องว่างภายในตัวอย่างมีค่าลดลง



รูปที่ 14 โมดูลัสคืนตัวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน

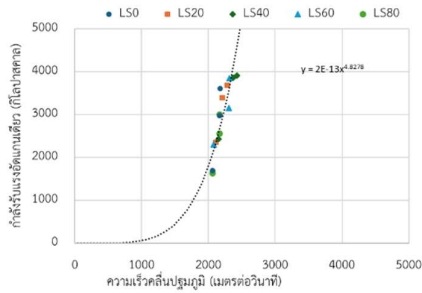
#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่น

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่นมาสร้าง ความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วคลื่นปฐมภูมิ ( $V_p$ ) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ( $V_s$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูป 15 และ 16 ตามลำดับโดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายจะได้สมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ

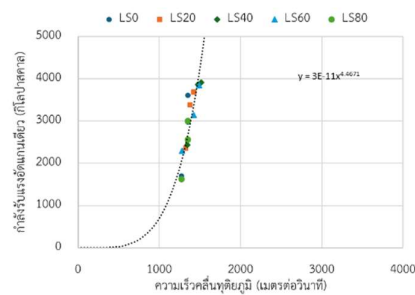
$$UCS_{CLSM} = 2 \times 10^{-13} \times V_p^{4.8278} \quad (1)$$

$$UCS_{CLSM} = 3 \times 10^{-11} \times V_s^{4.4671} \quad (2)$$

$UCS_{CLSM}$  คือ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (กิโลปาสกาล),  $V_p$ = ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (เมตร/วินาที) และ  $V_s$ = ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (เมตร/วินาที)



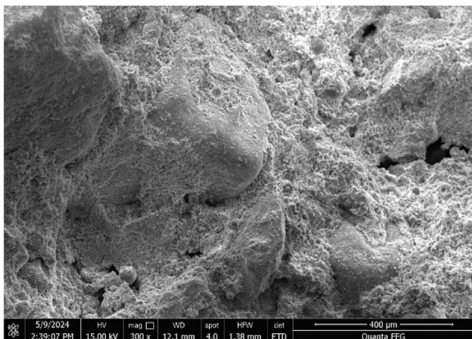
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่นปฐมภูมิ



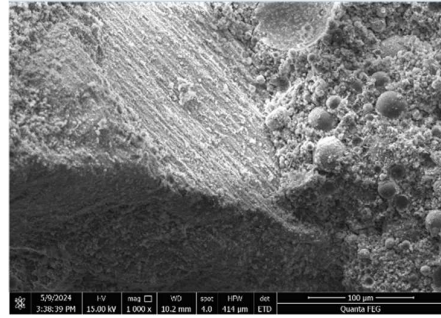
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความเร็วคลื่นทุติยภูมิ

#### 4.7 ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

รูปที่ 17 แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งที่อายุ 28 วัน จะเห็นได้ว่าการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL ระหว่างตัวเม็ดลอยและมวลรวม ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเพื่อยึดเกาะกันของตัวมวลรวมละเอียดได้ดีแต่มีช่องว่างอยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งในปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร มีการเกาะตัวของ C-A-S-H GEL เช่นเดียวกันแต่มีช่องว่างน้อยกว่าสูตรที่ไม่มีมีการแทนที่ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัด และผลการกระจายตัวของวัสดุที่ทำให้ช่องว่างของมวลรวมน้อยลง



รูปที่ 17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยด่างที่อายุบ่ม 28 วันของส่วนผสม LS0



รูปที่ 18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยด่างที่อายุบ่ม 28 วันของส่วนผสม LS40

#### 4.8 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

ตารางที่ 8 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้งานแต่ละวัสดุ

Materials	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Reference
Fly ash	9.06383 x10 <sup>-6</sup>	Haruna et al., 2021 [22]
Sodium metasilicate	5.45839 x10 <sup>-4</sup>	Haruna et al., 2021 [22]
Natural sand	1.77736 x10 <sup>-6</sup>	Haruna et al., 2021 [22]
Limestone waste	1.1358 x10 <sup>-6</sup>	Suthirat et al., 2017 [23]

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของเศษหินปูนเหลือทิ้งมีค่าน้อยกว่าทรายซึ่งแสดงถึงว่าเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเศษหินปูนแล้วนอกจากจะช่วยเรื่องกำลังรับแรงแล้วยังลดอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำอีกด้วย

ตารางที่ 9 ต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามแต่ละส่วนผสม

Materials	Cost of mixture (THB/m <sup>3</sup> )				
	LS0	LS20	LS40	LS60	LS80
Fly ash	153	153	153	153	153
Sodim silicate	194.22	194.22	194.22	194.22	194.22
sand	270.76	216.81	162.36	108.40	53.96
Limestone waste	0	0	0	0	0
water	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
total cost	620.43	566.48	512.03	458.07	403.63

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าต้นทุนของวัสดุควบคุมกำลังต่ำในส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ประหยัดต้นทุนในการนำไปใช้งาน

## 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการไหลตัวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่ผลิตจากการนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ด้วยทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุถมทางโดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1.ค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำและวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 200 มิลลิเมตรเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ โดยค่าการยุบตัวไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนเหลือทิ้งในปริมาณที่มากขึ้น

2.เมื่อมีปริมาณเศษหินปูนเหลือทิ้งแทนที่ทรายธรรมชาติในส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างมีค่าลดลง เนื่องจากเศษหินปูนมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายธรรมชาติ

3.กำลังรับแรงอัดแกนเดียรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการนำเศษหินปูนมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นในช่วงที่แทนที่ร้อยละ 0-40 โดยปริมาตร แต่มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงในช่วงที่แทนที่ร้อยละ 60-80 โดยปริมาตรโดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่มีส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณร้อยละ 0 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวยูบ่ม 28 วัน ไม่เกิน 8.3 เมกะปาสคาล ตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำ

4.ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ และค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะแปรผันตรงกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวนในแต่ละส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามความเร็วคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุบ่ม

5.วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนร้อยละ 40 โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสคืนตัวที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 615.8เมกะปาสคาล ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (Base quality gravel) และชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (Subbase quality gravel) ตามมาตรฐาน Austroads (2017)

6.การใช้วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนจะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนที่ประหยัดยิ่งขึ้นอีกด้วยเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุควบคุมกำลังต่ำทั่วไป

7.การนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่างไปประยุกต์ใช้ในชีวิตเมื่อดูจากค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการยุบตัวไหลแผ่ของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ ไปเทียบกับเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของ CLSM สำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ พบว่า สามารถนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นด้วยต่าง ไปใช้ในงานถมโครงสร้าง ฐานราก และงานถมทาง เช่น พื้นทางได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำเศษหินปูนเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในการผลิตวัสดุควบคุมกำลังต่ำเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณเศษหินปูนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตหินปูนจากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินปูนในปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร เป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติการเชิงกลที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุควบคุมกำลังต่ำเนื่องจากมีการยุบตัวไหลแผ่ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวยูบ่ม 28 และค่าโมดูลัสคืนตัวที่อายุบ่ม 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด อย่างไรก็ตามการปรับปรุงส่วนผสมและการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติควรได้รับการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนอย่างดีมาตลอดจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. พิษชา จงวิวัฒน์สกุล ดร.ภัทรพล จินดาศิริพันธ์ และคณะกรรมการ รศ.ดร. ธิตารัตน์ วิสุทธิ์เสวีวงศ์ ผศ.ดร.ชยุตม์ งามโขงง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำ และช่วยชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไข ปัญหาต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ ยุทธกาล สุวรรณเวช ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ในการทดสอบทางด้านเทคนิคครณี ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Omar M. Omar , Ghada D. Abd Elhameed , Mohamed A. Sherif, Hassan A Mohamadien (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. HBRC Journal (2012) 8, 193–203
- [2] Choudhary. Long-term tillage and irrigation management practices: Strategies to enhance crop and water productivity under rice-wheat rotation of Indian mid-Himalayan Region, 2020.
- [3] Ling, T.-C., Kaliyavaradhan, S. K., & Poon, C. S. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling-An overview. Construction and Building Materials, 158, 535-548.ACI 229R (2013)
- [4] ASTM C618, A. (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM international.
- [5] Clayton, C. (2011). Stiffness at small strain: research and practice. Géotechnique, 61(1), 5-37.
- [6] D. Ahadzadeh Ghanad, A.M. Soliman (2021). Bio-based alkali-activated controlled low strength material:

- Engineering properties Construction and Building Materials, 279, 3-7 Lee et al. (2013)
- [7] Harshwardhan Singh Chouhan , Pawan Kalla , Ravindra Nagar , Pradeep Kumar Gautam (2019). Gainful utilization of dimensional limestone waste as fine aggregate in cement mortar mixes. Construction and Building Materials 221 (2019) ,363–374
- [8] ASTM C33, A. (2013). ASTM C33 standard specifications for concrete aggregates. ASTM Standard Book.
- [9] ASTM C136/C136M, A. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- [10] ASTM C29/C29M, A. (2017). Standard Test Method for Bulk Density (unit weight) and voids in Aggregate
- [11] ASTM C128, A. (2015). Standard Test Method for Density, Relative density (Specific gravity) and Absorption of Fine Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.
- [12] ASTM D570-98, A. (2018). Standard test method for water absorption of plastics. Annual Book of ASTM Standards.
- [13] ASTM C1611, A. (2014). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM international, 6.
- [14] ASTM C138/C138M, A. (2017). Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. In: ASTM International West Conshohocken,PA.
- [15] ASTM D2166, A. (2016). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. West Conshohocken, PA, United States.
- [16] Chompoorat, T., Likitlersuang, S., & Jongvivatsakul, P. (2019). Engineering properties of controlled low-strength material (CLSM) as an alternative fill material. The 16<sup>th</sup> Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering (16ARC). Taipei, Taiwan: Taipei International Convention Center,
- [17] AASHTO T307-99, A. (2017). Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. In: American Association of StateHighway and Transportation Officials
- [18] Chompoorat,T., Likitlersuang, S, & Jongvivatsakul, P. (2018). The performance of controlled low-strength material base supporting a high-volume asphalt pavement. KSCE journal of Civil Engineering, 22, 2055-2063.
- [19] Austroads. (2017) Guide to pavement technology: Part 2: Pavement structural design.
- [20] Sani Haruna, Pitcha Jongvivatsakul, Kantipok Hamcumpai, Hafiz Waheed Iqbal, Peem Nuaklong , Suched Likitlersuang, Mitsuyasu Iwanami (2021). Multiscale investigation of the impact of recycled plastic aggregate as a fine aggregate replacement on one-part alkali-activated mortar performance. Journal of Building Engineering 86 (2024) 108768
- [21] Suthirat KITTIPONGVISES (2017). Assessment of Environmental Impacts of Limestone Quarrying Operations in Thailand. Environmental and Climate Technologies Nov. 2017, vol. 20, pp. 67–83