

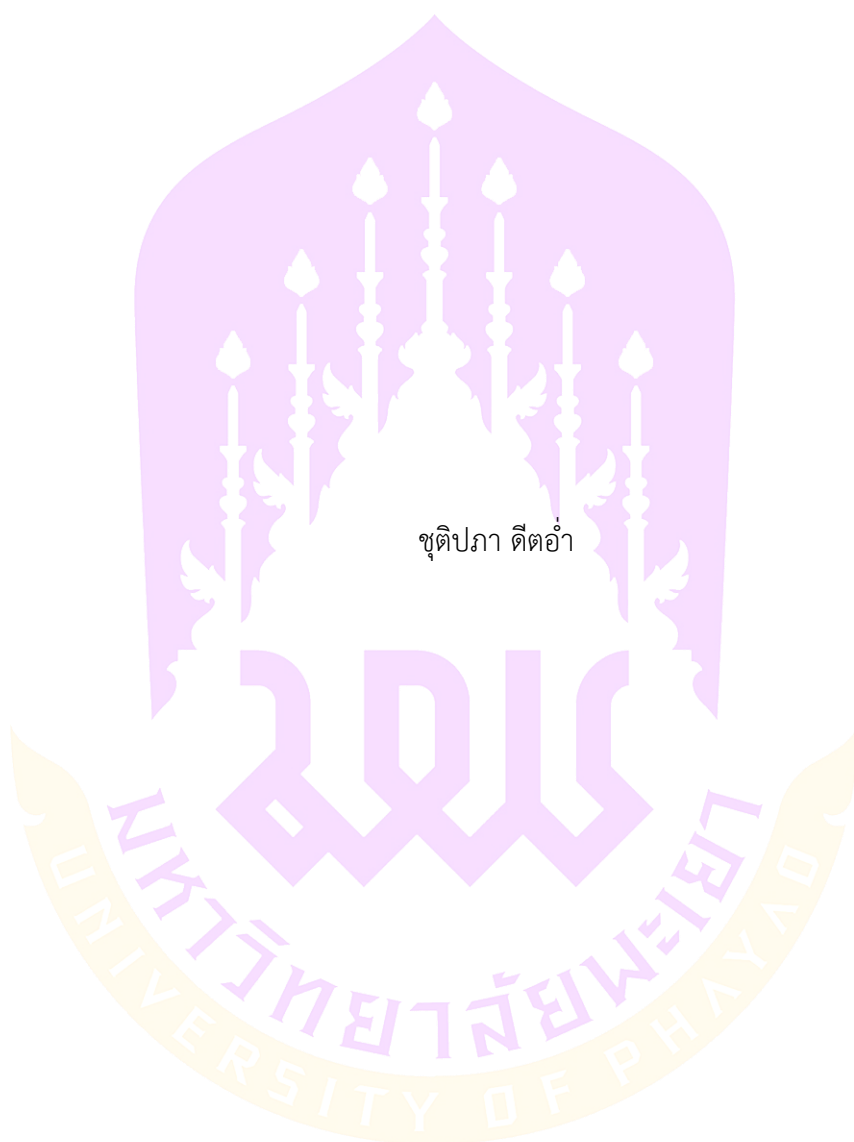
การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก
สำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง



ชุตติภา ตีตอ

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
กันยายน 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก
สำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง



ชุดิปปา ดีตอ้า

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
กันยายน 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

DEVELOPMENT OF A CONTROLLED LOW STRENGTH MATERIAL (CLSM) FROM WASTE
GLASS POWDER ACTIVATED BY ALKALI FOR PAVEMENT ENGINEERING APPLICATION



A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering
September 2025
Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก
สำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง

ของ ชุติปภา ดีต่ออำ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

เรื่อง:	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ สำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง
ผู้วิจัย:	ชุตติภา ตีตอ้า, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2568
อาจารย์ที่ปรึกษา:	รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรง วิริยะนภาพ
คำสำคัญ:	วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, แก้วลอย, แก้วหนัก, เศษแก้ว, คอนกรีตรี ไซเคิล

บทคัดย่อ

วัสดุก่อสร้างมักมีการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low strength material, CLSM) โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วย แก้วลอย และแก้วหนัก จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ คอนกรีตรีไซเคิล จากขยะโครงสร้างอาคารที่เกิดจากการรื้อถอน เศษแก้ว จากชุดเครื่องมือแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูง เพื่อเป็นตัวชะละลายสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมผิวทาง โดยจะศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นตัวชะละลาย และแทนที่ทรายด้วยแก้วหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิล ในอัตราส่วน 1.5 และใช้แก้วลอยและเศษแก้วเป็นวัสดุประสาน ในอัตราส่วนเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 20 30 และ 40 ตัวอย่าง CLSM จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ประกอบด้วย การยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น การเย็นน้ำ หน่วยน้ำหนัก และทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสคั้นตัว และค่าความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านตัวอย่างด้วยวิธีการสั่นพ้องอิสระ จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน พบว่า การเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วส่งผลกระทบต่อค่าการไหล และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น CLSM ส่วนผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง พบว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดียว และโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM ลดลงตามปริมาณร้อยละเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น และการทดสอบความเร็วคลื่นของ CLSM พบว่า ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังสรุปได้ว่า ตัวอย่าง AA10/WGP20/RCA1.5 ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน ร้อยละ 20 และมวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิล อัตราส่วนร้อยละ 1.5 โดยมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 7 วัน เท่ากับ 1,847 kPa ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับพื้นทางดินซีเมนต์ (DOH, 2013) ที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1,724 kPa และกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 2.2 MPa ผ่านมาตรฐาน ACI229R-99 (1999) ซึ่งระบุค่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM ที่อายุ 28 วัน ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.3 MPa สำหรับงานถมที่อาจจะต้องมียานรื้อถอนในภายหลัง ส่วนค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 443 MPa ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางประเภทกรดคุณภาพ (Austroad, 2017) ที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 300 MPa

Title: DEVELOPMENT OF A CONTROLLED LOW STRENGTH MATERIAL (CLSM) FROM WASTE GLASS POWDER ACTIVATED BY ALKALI FOR PAVEMENT ENGINEERING APPLICATION

Author: Chutipapa Deet-am, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2025

Advisor: Associate Professor Dr. Thanakorn Chompoorat Co-advisor Associate Professor Dr.Nattapong Damrongwiriyanupap

Keywords: Controlled low-strength materials, Sodium hydroxide solution, Fly ash, Bottom ash, Waste Glass Powder, Recycled concrete

ABSTRACT

The improvement and development of construction materials has never ceased, aiming to reduce problems, enhance material properties, decrease costs, and protect the environment. Greater value is created when waste materials can be applied to these purposes. This research aims to study controlled low-strength materials (CLSM) produced from manufacturing waste. The selected composition includes fly ash and bottom ash collected from the Mae Moh power plant, recycled concrete aggregate (RCA) from demolished structures, and waste glass powder (WGP) from beer bottles. The alkaline activator used is sodium hydroxide (NaOH), a strong base that activates the CLSM properties. CLSM is utilized as a pavement material. This study focuses on the basic and mechanical properties of CLSM. Samples were prepared using a 10 molar NaOH solution as the activator. BA or RCA replaced sand at a ratio of 1.5 (BA/RCA to binder). WGP and FA were used as binders at WGP to binder ratios of 0, 20, 30, and 40%. Each CLSM mixture was tested for basic properties including slump, setting time, bleeding, and unit weight. Mechanical properties such as unconfined compressive strength (UCS) and resilient modulus (M_R) were also evaluated. Additionally, p-wave and s-wave velocities were measured using the free-free resonant (FFR) method. The results of the basic properties tests reveal that increasing WGP content reduces flowability and shortens the initial setting time of CLSM. Mechanical properties test results show that increasing the WGP to binder ratio leads to a reduction in UCS and M_R . FFR test results also indicate that p-wave and s-wave velocities of CLSM increase with curing time. Overall, the mechanical properties suggest that the mixture of AA10/WGP20/RCA1.5 with 10 molar NaOH, RCA to binder ratio of 1.5, and WGP to binder ratio of 20% is the most suitable for pavement applications. The UCS at 7 days was 1,847 kPa, achieving the Thailand Department of Highways standard of 1,142 kPa. The UCS at 28 days was 2.2 MPa, meeting the ACI-229R requirement (<8.3 MPa for pavement backfilling). Moreover, the resilient modulus at 28 days of the AA10/BA75/RCA25 mixture reached 443 MPa, satisfying the Austroads (2017) recommendation of at least 300 MPa.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคลากรหลายท่าน และหลายหน่วยงาน รศ.ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่มอบโอกาส และความเชื่อมั่นแก่ดิฉันเสมอมา ช่วยแก้ไขในสิ่งที่บกพร่อง ทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะกรรมการ ศ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิเลอสรวง และ รศ.ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำเพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย เหมือนไฟฟ้าผ่านหินแม่เมาะ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนเก้าอี้ และเก้าอี้เหล็ก และห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์คอนกรีตรีไซเคิล โดยที่ไม่คิดค่าใช้จ่าย เพื่อน พี่ และน้อง ที่คอยช่วยเหลือกันมา ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้มีแรงผลักดันเสมอมา และท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เสมอมา

ชุตติภา ตีตอ้า



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการทำวิจัย.....	4
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
วัสดุควบคุมกำลังต่ำ.....	8
วัสดุพอลิซิลาน.....	13
วัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	18
แก้ว (Waste Glass).....	24
วัสดุมวลรวม (Aggregates).....	27
องค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างผิวทาง.....	30
องค์ประกอบพื้นฐานของผิวทางยึดหยุ่นหรือผิวทางแอสฟัลต์.....	32

องค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างผิวทางผสม	33
ความสำคัญของกลศาสตร์ในงานวิศวกรรมผิวทาง	33
การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus test, AASTO T307)	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	41
วัสดุและสารเคมี	41
การเตรียมสารเคมี	41
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านกำลัง	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	53
คุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรีไซเคิล	53
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM	57
การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM	62
ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM	76
การคำนวณประมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM	81
การเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM	82
บทที่ 5 บทสรุป	84
สรุปผลการวิจัย	84
ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	88
ประวัติผู้วิจัย	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
ตาราง 2 ข้อกำหนดของ CLSM ตามประเภทการใช้งาน	11
ตาราง 3 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีนตามมาตรฐาน ASTM C618	16
ตาราง 4 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุพอลิโพรพิลีน ตามมาตรฐาน ASTM C618	16
ตาราง 5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว	23
ตาราง 6 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์	26
ตาราง 7 สมบัติของแก้วโซดาไลม์	27
ตาราง 8 ออกแบบน้ำหนักกระทำซ้ำ และอายุการใช้งาน	35
ตาราง 9 คุณสมบัติของตัวอย่าง RCA/SCM แบบละเอียด	36
ตาราง 10 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุโพลิเมอร์	37
ตาราง 11 คุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM	39
ตาราง 12 อัตราส่วนผสม CLSM ต่อปริมาตรส่วนผสม 1 ลบ.ม	43
ตาราง 13 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	47
ตาราง 14 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้าง ทาง จุลภาคของ CLSM	49
ตาราง 15 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรีไซเคิล....	54
ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรี ไซเคิล	55
ตาราง 17 การยู่บตัวของ CLSM	58
ตาราง 18 การยู่บตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM	59
ตาราง 19 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM	62

ตาราง 20 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 และ 8.....	64
ตาราง 21 ผลการทดสอบ EDS	69
ตาราง 22 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CJSM.....	82
ตาราง 23 ราคาของ CJSM	82
ตาราง 24 ราคาของ CJSM อ้างอิงข้อมูลจากกรมบัญชีกลาง.....	83



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 แผนแนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	6
ภาพ 2 การใช้งาน CLSM.....	9
ภาพ 3 การใช้งาน CLSM.....	9
ภาพ 4 สัดส่วนผสมโดยทั่วไปของ CLSM.....	10
ภาพ 5 การใช้ CLSM เป็นวัสดุเทขึ้นพื้นทางในรัฐอิลลินอยส์ (www.irmca.org).....	12
ภาพ 6 แก้วถ่านหินหรือถ่านลอย.....	14
ภาพ 7 แก้วกลบ.....	14
ภาพ 8 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ่านลอยขยาย (1,000 เท่า).....	17
ภาพ 9 โครงสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์.....	19
ภาพ 10 ลักษณะการดูลประจุระหว่างโพแทสเซียมไอออน (K+) กับอะลูมิเนียมไอออน (Al ³⁺) ของ โพลีไฮดรอกซีเลตโซลโคโซ.....	20
ภาพ 11 กระบวนการทางเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอร์.....	21
ภาพ 12 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง.....	22
ภาพ 13 แผนผังการผลิตจีโอโพลิเมอร์.....	24
ภาพ 14 ลักษณะอสังฐานควอตซ์และแก้ว.....	25
ภาพ 15 ชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม.....	29
ภาพ 16 ตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม.....	30
ภาพ 17 รูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต.....	31
ภาพ 18 ภาพตัดขวางโครงสร้างผิวทางยืดหยุ่น.....	32
ภาพ 19 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM: (a) RCA แบบละเอียด และ (b) RCA แบบ ละเอียด/หยาบ.....	36
ภาพ 20 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่ใช้ตะกรันเหล็กและถ่านลอยเป็นวัสดุประสาน.....	37

ภาพ 21 สัดส่วนทางการตลาดของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559	38
ภาพ 22 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่ใช้ตะกรันเหล็กและเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน.....	39
ภาพ 23 ค่ากำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำกับ ร้อยละของของเสียที่ต่างกัน	40
ภาพ 24 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่มตัว ต่างกันกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย	40
ภาพ 25 วัสดุและสารเคมี (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก (c) เศษแก้ว (d) เศษคอนกรีตรีไซเคิล (e) โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	42
ภาพ 26 การนำเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตเข้าเตาอบ.....	44
ภาพ 27 เตรียม เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	44
ภาพ 28 การผสมเถ้าลอย และเศษแก้ว.....	45
ภาพ 29 การผสมส่วนผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน	45
ภาพ 30 การทดสอบการไหลแผ่.....	46
ภาพ 31 การทดสอบการเยิ้ม.....	46
ภาพ 32 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น	48
ภาพ 33 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว.....	51
ภาพ 34 การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรชันแนลชีส.....	51
ภาพ 35 การทดสอบหาขนาดของ เถ้าลอย เถ้าหนัก คอนกรีตรีไซเคิล และเศษแก้ว	54
ภาพ 36 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง SEM ของ เถ้าลอย (a) เถ้าหนัก (b) คอนกรีตรีไซเคิล (c) และเศษแก้ว (d).....	57
ภาพ 37 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM.....	60
ภาพ 38 หน่วยน้ำหนักของ CLSM	60
ภาพ 39 เปอร์เซนต์การเยิ้มของ CLSM	61
ภาพ 40 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM.....	64
ภาพ 41 ภาพถ่าย SEM (a) AA10/WGP00/BA1.5 (b) AA10/WGP20/BA1.5 (c) AA10/WGP30/BA1.5 (d) AA10/WGP40/BA1.5 (e) AA10/WGP00/RCA1.5 (f)	

AA10/WGP20/RCA1.5 (g) AA10/WGP00/ RCA1.5 (h) AA10/WGP00/ RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน.....	66
ภาพ 42 ผลการทดสอบ EDS(a) AA10/WGP00/BA1.5 (b) AA10/WGP20/BA1.5 c) AA10/WGP30/BA1.5 (d) AA10/WGP40/BA1.5 (e) AA10/WGP00/RCA1.5 (f) AA10/WGP20/RCA1.5 (g) AA10/WGP00/ RCA1.5 (h) AA10/WGP00/ RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน.....	68
ภาพ 43 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับระยะเวลาบ่มของตัวอย่าง CLSM (a) v_p (b) v_s	72
ภาพ 44 ความสัมพันธ์ของโมดูลัส กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่าง CLSM (a) E_0 (b) G_0	73
ภาพ 45 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคืนตัวและความเค้นเปื่อยเบนตัวอย่าง CLSM (a) 7 วัน (b) 14 วัน (c) 28 วัน.....	75
ภาพ 46 โมดูลัสคืนตัวตัวอย่าง CLSM	76
ภาพ 47 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืนตัว และความเร็วคลื่นของ CLSM (a) v_p (b) v_s	77
ภาพ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัว และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM	79
ภาพ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของ CLSM	79
ภาพ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัว และค่าโมดูลัสของแรงเฉือนเริ่มต้นของ CLSM	80
ภาพ 51 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM (a) v_p (b) v_s	81

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลสำนักงานสถิติแห่งชาติ ในปี พ.ศ. 2563 มีจำนวนทั้งหมด 66.19 ล้านคน (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2563) ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้นและมีปริมาณของเสียเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณของเสียทั้งหมด 25.37 ล้านตัน แต่มีเพียง 8.36 ล้านตัน ที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ แต่ยังคงมีปริมาณของเสียที่ตกค้างอีก 4.25 ล้านตัน (กรมมลพิษ, 2563) ซึ่งของเสียที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วัสดุรีไซเคิล (Recycled materials) มีหลายหลากประเภท เช่น แก้ว กระดาษ พลาสติก และโลหะ อีกทั้งยังมีของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เถ้าลอย เถ้าหนัก จากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า ตะกรันเหล็ก จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก เศษคอนกรีต จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง จากปริมาณของเสียที่มีอยู่ กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมมีแนวคิดในการจำกัดขยะดังกล่าวด้วย การนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในหลัก 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2563) ซึ่งปริมาณของเสียที่มากหลายล้านตันต่อปี ส่งผลให้ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ทดลองนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุถมและนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมหนึ่งในนั้นคือ วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM)

จากข้อมูลของเสียปี พ.ศ. 2563 ในประเทศไทยมีปริมาณของเสียทั้งหมด 25.37 ล้านตัน แต่ปริมาณของเสียที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ประเภทแก้วมีเพียง 10.96 % (กรมมลพิษ, 2563) ซึ่งของเสียประเภทแก้วเป็นของเสียที่พบได้ทั่วไป สังเกตได้จากผลการสำรวจของบริษัทสำรวจข้อมูลทางการตลาดระดับโลก (Euromonitor International, 2016) ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตลาดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ พบว่า ตลาดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์มีแนวโน้มในการบริโภคสูงขึ้น และเบียร์ที่ได้รับความนิยมมากเป็นลำดับที่ 2 ในปี พ.ศ. 2559 คือ เบียร์ช้าง โดยมีส่วนแบ่งทางการตลาดที่ 38% ของเสียประเภทแก้วมีข้อได้เปรียบ คือ แก้วเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อแรงกด แรงดันภายในสูง ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

นอกจากนี้ยังมีของเสียอีกประเภทหนึ่งคือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (recycled concrete aggregate, RCA) ที่ได้จากการรื้อถอนบ้าน หรืออาคารก่อสร้างต่าง ๆ เนื่องจากในปัจจุบันมีโครงการก่อสร้างต่าง ๆ มากมาย แต่ละโครงการล้วนแต่ต้องใช้คอนกรีตในปริมาณมาก ด้วยหลากหลายสาเหตุ ส่งผลให้เกิดเศษคอนกรีตในปริมาณมาก เช่น เสาค้ำยันหัก เสาค้ำยันไม่ได้มาตรฐาน หรือการรื้อถอน

อาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง จากปริมาณเศษคอนกรีตที่มีอยู่ทำให้นักวิจัยเริ่มมีแนวคิดในการนำเศษคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ในงานด้านวิศวกรรม เช่น งานก่อสร้าง งานถนน เป็นต้น ในหลากหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย อังกฤษ และฝรั่งเศส เป็นต้น การนำเศษคอนกรีตรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่มีข้อได้เปรียบ คือ ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ลดปริมาณการใช้วัสดุธรรมชาติ ลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นการพัฒนาการใช้วัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน (เทอดศักดิ์ สายสุทธิ, 2554)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM) เป็นวัสดุถม (fill material) ที่สามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง และใช้ทดแทนดินบดอัด โดยมีลักษณะคล้ายคอนกรีต ทำให้มีความสามารถในการทำงานได้ดี มักใช้กับงานที่ไม่สามารถบดอัดได้เนื่องจากลักษณะพื้นที่แคบยากต่อการเข้าถึง หรือต้องการลดค่าใช้จ่ายในการบดอัด เช่น การขุดวางท่อระบายน้ำ งานถมเพื่อเป็นโครงสร้าง งานปรับระดับและการใช้งานทางแทนหินคลุก (crush rock) โดยมาตรฐาน ACI 229R-99 (American Concrete Institute, 1999) กำหนดให้มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength, UCS) ของ CLSM เท่ากับ 8.3 MPa (1,200 psi) หรือน้อยกว่า ที่อายุบ่มตัว 28 วัน สาเหตุที่ CLSM ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำเนื่องจากลักษณะงานที่นำมาใช้อาจทำให้ต้องมีการพัฒนาหรือมีการรื้อถอนในอนาคต

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยที่พยายามศึกษาเกี่ยวกับการนำของเสียกลับมาใหม่ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chompoorat, et al. ปี ค.ศ. 2018 ทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในการผลิตวัสดุ CLSM สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง เนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ทำวัสดุ CLSM ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (greenhouse effect) ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณมาก ทำให้นักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษาพัฒนา CLSM ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีการใช้สารอัลคาไลน์ (Alkaline solution) มาเป็นตัวกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chompoorat, et al. ปี ค.ศ. 2021 ทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยและตะกอนเหล็กมาทำเป็นวัสดุ CLSM ที่กระตุ้นด้วยสารอัลคาไลน์ สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง งานวิจัยของ Tawatchai, et al. ปี ค.ศ. 2017 มีการศึกษาการใช้เศษแก้วฟลูออเรสเซนต์ผสมเถ้าลอย (ground fluorescent lamp glass, FP) และเศษแก้วภาชนะผสมเถ้าลอย (ground container glass, CP) มาใช้ทำ CLSM อีกทั้งยังมีงานวิจัยของ Etxeberria, et al. ปี ค.ศ. 2013 ทำการศึกษาการนำคอนกรีตรีไซเคิลที่เคยใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่มาผสมใช้เป็น CLSM งานวิจัยของ Lee, et al. ปี ค.ศ. 2013 ที่ศึกษาการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเถ้าลอยและตะกอนเหล็กมาทำเป็น CLSM

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนา CLSM แบบไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ประกอบไปด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) และเถ้าหนัก (bottom

ash, BA) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษแก้ว (waste glass powder, WGP) จากขวด เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ และ คอนกรีตรีไซเคิล จากการรื้อถอนอาคารสิ่งก่อสร้าง วัสดุ CLSM ที่ออกแบบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เป็นตัว ละลาย ได้นำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังแบบสถิตย และแบบพลศาสตร์ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) การทดสอบวิธีเรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant, FFR) นอกจากนั้น การวิเคราะห์หอนุภาคจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี เอกซเรย์ฟลูออ- เรสเซนซ์ (X-ray fluorescence analysis, XRF)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากวัสดุของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก มาผลิตเป็น CLSM สำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทาง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำของเสีย ประกอบด้วย เศษแก้ว คอนกรีตรีไซเคิล แก้วหนัก และแก้วลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวละลายสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นทาง
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติด้านกำลังแบบสถิตยแบบ พลศาสตร์ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) โมดูลัสคืนตัว (M_R) และเรโซแนนซ์อิสระ (FFR) ของ CLSM
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ โดยการทดสอบการวิเคราะห์หอนุภาคจาก ภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของ แร่ธาตุด้วยวิธี เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)
4. เพื่อหาแนวทางในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงนำมาซึ่ง การประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิศวกรรมกับของเสีย

ขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากวัสดุของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก มาผลิตเป็น CLSM สำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทาง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางมีขั้นตอน การทำวิจัยดังต่อไปนี้

1. รวบรวมงานวิจัย และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการนำของเสียประกอบด้วย เศษแก้ว คอนกรีตรีไซเคิล แก้วหนัก และแก้วลอย ที่นำมาเป็น CLSM

2. วัสดุที่ใช้ คือ แก้วลอย และแก้วหนัก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง คอนกรีตรีไซเคิล จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง และเศษแก้ว จากขวดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ โดยที่ แก้วลอย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 แก้วหนักกับคอนกรีตรีไซเคิลร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเศษแก้ว ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

3. สารละลายที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์

4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหล กำลังรับแรงอัด ของ CLSM ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวชะละลายที่มีการแทนที่ทรายด้วยแก้วหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้อัตราส่วน แก้วหนักหรือคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุประสาน 1.5 อัตราส่วนเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 0.20 0.30 และ 0.40 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อวัสดุประสาน 0.015 และหาปริมาณน้ำ ที่เหมาะสมต่อ CLSM (วัสดุประสาน หมายถึง แก้วลอยรวมกับเศษแก้ว)

5. ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ CLSM ประกอบด้วย การยุบตัว (slump test)(ASTM C1611) ระยะเวลาการก่อตัว (setting time)(ASTM C403) หน่วยน้ำหนัก (unit weight)(ASTM C138) การยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow test)(ASTM C1611) การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test, USC)(ASTM D2166) และการทดสอบ โมดูลัสยืดหยุ่น (M_R)(AASHTO T307) วิธีเรโซแนนซ์อิสระ (FFR)

6. ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างของ CLSM ประกอบด้วย การวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) การวิเคราะห์อนุภาคจากภาพถ่ายกำลังขยาย สูง ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และการวิเคราะห์ องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence analysis, XRF)

ขั้นตอนการทําวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังแสดงในหัวข้อด้านล่าง และภาพ 1 ดังต่อไปนี้

1. ทบทวนการศึกษางานวิจัย ศึกษาเอกสารรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเตรียมวัสดุ ที่ใช้ในงานวิจัย

2. เตรียมตัวอย่างวัสดุ เศษแก้ว คอนกรีตรีไซเคิล แก้วหนัก และแก้วลอย เพื่อหาคุณสมบัติ พื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางเคมี

3. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM โดยการทดสอบค่าการยุบตัว โดยจะทำการ ทดสอบหลังจาก CLSM สัมผัสกับน้ำที่เวลา 0 30 60 90 และ 120 นาที ทดสอบค่าการยุบตัวแบบ ไหลแผ่ โดยจะทำการทดสอบหลังจาก CLSM สัมผัสกับน้ำที่เวลา 0 30 60 90 และ 120 นาที

ทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (setting time) หลังจากผสม CLSM ครบ 4 ชั่วโมง ทดสอบโดยเพิ่มมาทดสอบระยะเวลาการก่อตัว ทดสอบการแข็ง (bleeding test) หลังจาก ผสม 30 นาที ทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weight)

4. ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่อายุการบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน ทดสอบโมดูลัสคั้นตัว เพื่อหาโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM ที่อายุการบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน ทดสอบหาความเร็วเหือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ เพื่อทดสอบหาความเร็วเหือนของ CLSM ที่อายุการบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน

5. ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของ CLSM โดยการทดสอบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRF) เพื่อหาองค์ประกอบธาตุทางเคมีของวัสดุทดสอบการวิเคราะห์หอนุภาคจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อหาลักษณะสัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี เอกเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์ (EDS) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยจะนำตัวอย่างที่ดีที่สุดไปทำการทดสอบ

6. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

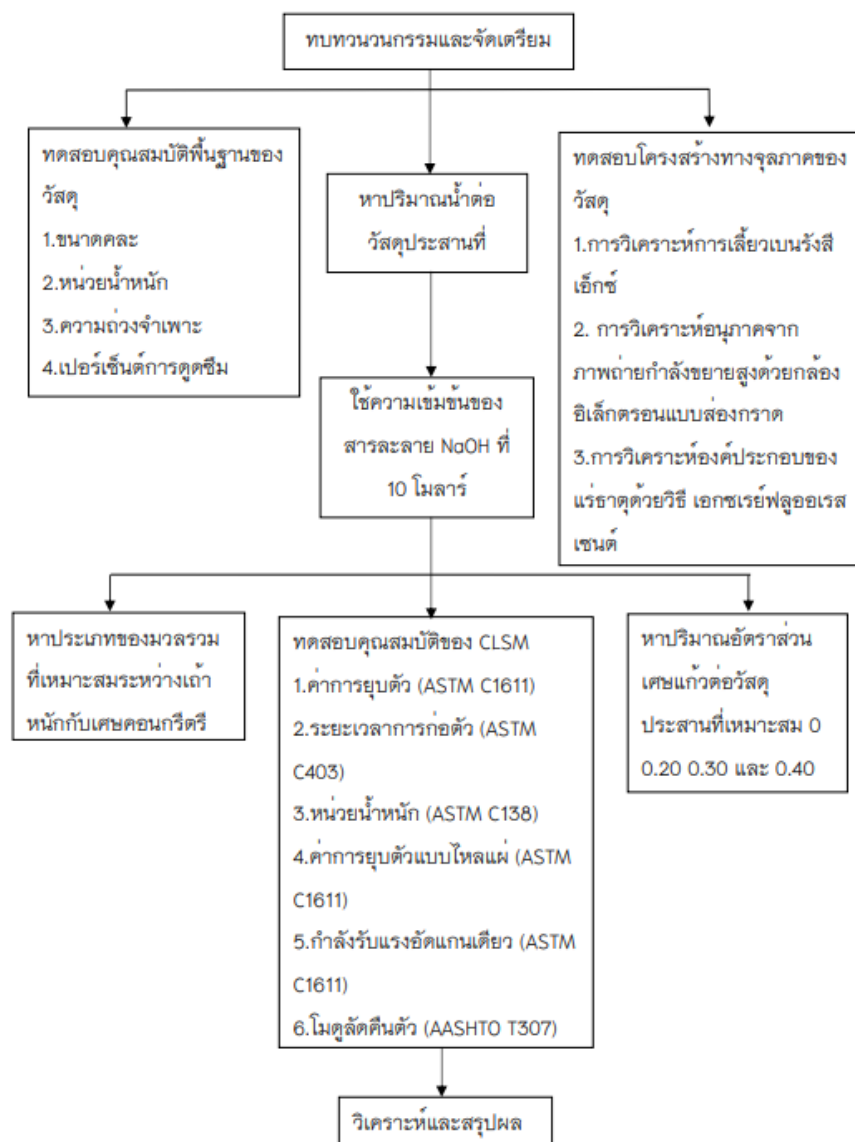
7. จัดทำรูปแบบรายงานงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย

ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ค้นคว้าข้อมูลเพื่อทำงานวิจัย	■											
2	เตรียมตัวอย่างวัสดุ เศษแก้ว คอนกรีต รีไซเคิล เถ้าหนัก และเถ้าลอย		■										
3	ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM			■									
4	ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM				■								
5	ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของ CLSM					■							
6	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ						■						
7	จัดทำรูปแบบรายงานงานวิจัย							■					

*** ระยะเวลาการดำเนินการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



ภาพ 1 แผนแนวทางการดำเนินงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงอัตราส่วนผสมของของเสียที่นำมาผลิตเป็น CLSM ประกอบด้วย เศษแก้ว คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าหนัก และเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมพื้นทาง
2. ทราบถึงคุณสมบัติด้านกำลังด้วยการให้แรงกระทำแบบสถิตศาสตร์และแบบพลศาสตร์ของ CLSM ที่ผลิตมาจากของเสียสำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

3. ทราบถึงคุณสมบัติด้านเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM ที่ผลิตมาจากของเสีย สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง
4. เป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ที่การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทางวิศวกรรม เพื่อนำของเสียตกค้างที่มีอยู่กลับมาใช้งานใหม่
5. เป็นแนวทางในการนำของเสียมาประยุกต์ใช้เป็น CLSM ที่ผลิตมาจากของเสีย เพื่อลดปริมาณการใช้ทรัพยากรชาติ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุแบบอัดแน่นด้วยตัวเองหรือมีชื่อภาษาอังกฤษว่า flowable flow หรือ flowable fill material คือวัสดุที่สามารถใช้แทนวัสดุธรรมชาติ เช่น หิน ดิน และทราย เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีความสามารถในการไหลของวัสดุเข้าไปในที่แคบและอัดตัวแน่นได้ดีจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำประกอบด้วย สารเชื่อมประสาน สารผสมเพิ่มมวลรวม และน้ำเป็นหลัก โดยวัสดุประสานที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของคอนกรีต และมอร์ตาร์ ซึ่งในกระบวนการเผาสารออกไซด์หลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิ 1,400–1,600°C จากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดโดยในกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้พลังงานสูง เป็นเหตุให้กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมากส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ เป็นวัสดุแบบอัดแน่นด้วยตัวเองลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีความสามารถในการไหลของวัสดุเข้าไปในที่แคบ และสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น การขุดวางท่อระบายน้ำ การฝังกลบ การถมเพื่อเป็นโครงสร้าง การปรับระดับและการทำงานขุดวางสาธารณูปโภคต่าง ๆ การถมช่องว่างใต้ดินหรือใช้เติมโพรงใต้ถนนให้เต็ม เป็นต้น ดังแสดงในภาพ 2 และ 3 อีกทั้ง CLSM ยังช่วยการใช้แรงงาน เวลาในการก่อสร้าง และการใช้เครื่องจักรในการบดอัด ไม่ว่าจะเป็นรถบดอัด รถดักรถบรรทุกน้ำ และยังมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่ต้องมีคนงานในบริเวณกันหลุมที่เสี่ยงต่อการพังทลายของดินโดยรอบ นอกจากนี้ CLSM ยังมีข้อได้เปรียบคือ CLSM มีต้นทุนต่ำกว่าดินถมหรือหินคลุก เนื่องจาก CLSM มีความสามารถในการไหลและบดอัดได้เอง ลดการใช้คนงานในการก่อสร้าง ลดการใช้เครื่องจักรในการบดอัด อีกทั้งวิธีการทำงานที่ใช้วัสดุแบบอัดแน่นด้วยตัวเองมักใช้รถขนส่งคอนกรีตทั่วไปลำเลียงวัสดุแล้วปล่อยให้ตกอย่างอิสระได้โดยไม่มีการแยกตัว ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุนี้ ส่วนข้อได้เปรียบอีกประการคือ สามารถใช้ถมในที่ที่ไม่สามารถถมด้วยวัสดุถมทั่วไปอื่น ๆ ได้ เช่น ทางค้ำใต้ดิน เป็นต้น



ภาพ 2 การใช้งาน CLSM

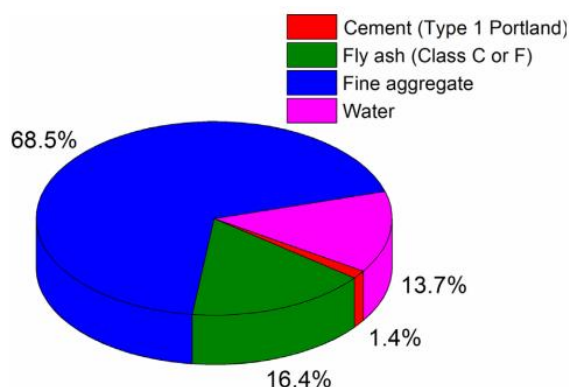


ภาพ 3 การใช้งาน CLSM

1. การออกแบบคุณสมบัติ และมาตรฐาน CLSM

มาตรฐานที่ใช้ควบคุมคุณภาพของ CLSM จัดตั้งขึ้นโดยองค์กร American concrete institute (ACI) ในปี ค.ศ. 1985 และมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ. 1999 เพื่อเกณฑ์ในการออกแบบ

1.1 การออกแบบ CLSM โดยทั่วไปมักออกแบบจากประสบการณ์ โดยการออกแบบจากการใช้ค่าของ การไหลแผ่ (slump flow) มีค่ามากกว่าหรือเท่า 200 mm ตามมาตรฐาน ASTM D6203 และมีค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) ไม่เกิน 8.3 MPa สำหรับงานถมที่อาจจะเป็นต้องมีการรื้อถอนใหม่อีกครั้งดังแสดงในภาพที่ 4 เป็นการแสดงอัตราส่วนผสมของ CLSM โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักรวมทั้งหมด โดย CLSM ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย มวลละเอียด (วัสดุเหลือใช้) และสารเคมีผสมเพิ่ม



ภาพ 4 สัดส่วนผสมโดยทั่วไปของ CLSM

ที่มา: Plerce and Blackwell, 2003

1.2 มาตรฐาน CLSM ข้อยได้เปรียบของ CLSM มีมากกว่าดินบดอัดคือ CLSM มีความสามารถในการไหล การอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เหมาะกับงานที่มีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น งานก่อสร้างในพื้นที่แคบ งานก่อสร้างรางระบายน้ำ เป็นต้น ข้อกำหนดของ CLSM แสดงในตาราง 1

2. การประยุกต์ใช้งานของ CLSM

2.1 วัสดุถมทั่วไป

CLSM สามารถใช้ในงานถมทั่วไป เช่น รางน้ำ หลุม หรือโพรงต่าง ๆ โดยไม่ต้องบดอัดหรือจี้เขย่าสามารถทำงานในที่แคบได้ CLSM ในงานถมที่มีความหนาหรือใช้ถมเป็นกำแพงกันดิน จะทำให้เกิดแรงดันด้านข้างในขณะที่เท ดังนั้นจึงต้องเททีละชั้นและรองจนกว่าชั้นก่อนหน้าจะเริ่มมีการเซตตัวจึงจะทำการเทชั้นถัดไปได้ เช่น Bill (1988) มีการใช้ CLSM เป็นวัสดุถมโดยเทในรางน้ำที่มีความลึก 2.7 เมตร เพื่อแก้ปัญหาการทรุดตัวของรางน้ำสาธารณะในเมือง Peoria รัฐ Illinois พบว่า รางน้ำสามารถรับน้ำหนักได้ภายใน 2-3 ชั่วโมง ภายหลังการเท และมีรอยแตกที่เกิดจากการหดตัวน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีการนำ CLSM มาใช้เป็นวัสดุเทชั้นผิวทางดังภาพ 5 ซึ่งสามารถใช้งานได้ใน 3-4 ชั่วโมง

ตาราง 2 ข้อกำหนดของ CLSM ตามประเภทการใช้งาน

ประเภทการใช้งาน	ข้อกำหนด
งานถมทั่วไป (ถมช่องว่าง และถมโครงสร้างใต้ดิน)	การไหลผ่าน ≥ 200 mm กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 0.5 MPa
งานถมดินชุด (ท่อใต้ดิน ท่อน้ำทิ้ง และร่องถนน)	การไหลผ่าน > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง การทรุดตัวน้อย มีระยะเวลาก่อตัวเร็ว สามารถ ขุดซ้ำได้ และกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 2.1 MPa
งานถมโครงสร้าง (สะพาน ฐานราก และกำแพงกันดิน)	การไหลผ่านอย่างน้อย 200 mm อัดแน่นได้ด้วย ตัวเอง กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 0.7-8.3 MPa (ขึ้นอยู่กับประเภทงาน)
งานถมทาง (พื้นทาง รองพื้นทางและชั้นดินเดิมผิวทาง ยึดหยุ่น)	การไหลผ่านอย่างน้อย 200 mm อัดแน่นได้ด้วย ตัวเอง ป้องกันการกัดกร่อนได้ คงทน กำลังรับ แรงอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 2.8-8.3 MPa (ขึ้นอยู่กับประเภทงาน)
งานถมเพื่อทนความร้อน (สายไฟใต้ดิน)	การไหลผ่าน > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง คงทน ความพรุนต่ำ การนำความร้อนสูง กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 2 MPa
งานป้องกันการกัดกร่อน (ท่อโลหะใต้ดิน)	การไหลผ่าน > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ความทนทานไฟฟ้าสูง กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 2 MPa

ที่มา: แปลงจาก: Ling, et al., 2018



ภาพ 5 การใช้ CLSM เป็นวัสดุชั้นพื้นทางในรัฐอิลลินอยส์ (www.irmca.org)

2.2 วัสดุถมใต้โครงสร้าง

CLSM มีค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 0.7-8.3 MPa สามารถใช้เทเพื่อรองรับฐานรากได้ในกรณีที่ดินใต้ฐานรากอ่อนได้ ซึ่งช่วยให้มีการกระจายแรงของโครงสร้างได้มากขึ้น นอกจากนั้น หากดินชั้นรองใต้ฐานรากหรือพื้นไม่ราบเรียบก็สามารถใช้ CLSM เทเพื่อปรับให้เรียบและได้ระนาบ เช่น ใช้ CLSM ในงานถมใต้ฐานราก Larsen (1988) มีการประยุกต์ใช้ CLSM ปริมาณ 2,141 ลูกบาศก์เมตร เทเพื่อรองรับกำลังแบกทานของฐานรากลิฟท์ เป็นต้น

2.3 วัสดุรองพื้นทาง

ส่วนผสมของ CLSM สามารถถูกนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง รองพื้นทางและชั้นดินถมคันทางในโครงสร้างถนนได้ สำหรับการออกแบบชั้นพื้นทางในถนนที่มีผิวทางแบบยืดหยุ่น (flexible pavement) ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างจะแตกต่างกับขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงของ CLSM ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 0.16-0.28 สำหรับค่ากำลังของ CLSM ควรจะมีค่ากำลังรับแรงอัด 2.8-8.3 MPa

2.4 วัสดุถมโพรงหรือช่องว่าง

อุโมงค์หรือรางน้ำเก่าที่ยกเลิกการใช้งานจะต้องมีการถมเพื่อป้องกันอันตราย และเนื่องจากช่องว่างของอุโมงค์หรือรางน้ำเก่ามีขนาดและความยาวมาก ดังนั้นการใช้วัสดุถมที่มีคุณสมบัติการไหลที่ดี เช่น CLSM จึงช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น Naik et al. (2019) แสดงตัวอย่างการใช้ CLSM เพื่อถมอุโมงค์เก่าใต้แม่น้ำ Menomonee river ในเมือง Milwaukee เป็นระยะทางมากกว่า 71.6 เมตร และอีกโครงการในเมือง Milwaukee มีการใช้ CLSM จำนวน 635 ลูกบาศก์เมตร เพื่อถมรางน้ำเก่า

2.5 วัสดุถมชั้นใต้ดินหรือใต้โครงสร้างเก่า

โครงการปรับปรุงโรงงานใน LaSalle, Ill จำเป็นต้องมีการถมชั้นใต้ดินเพื่อรับการขยายพื้นที่ใช้งาน ตอนเริ่มต้นมีการพิจารณาใช้ดินถมแบบปกติแต่เนื่องจากการเข้าถึงพื้นที่มีความยากลำบากจึงเลือกใช้ CLSM ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวแทน เพราะ CLSM สามารถใช้ปั๊มสูบหรือใช้สายพานลำเลียงได้สะดวกกว่า รวมถึงคุณสมบัติอัดแน่นได้ด้วยตัวเองของ CLSM ด้วย (Illinois Ready Mixed Concrete Association Newsletter, 1991) นอกจากนี้ยังมีการใช้ CLSM ในการถมเหมืองแร่ร้างในภาคตะวันออกของสหรัฐอเมริกาด้วย (Petrzick, 1997)

2.6 วัสดุรองแนวท่อ

CLSM เป็นวัสดุที่ดีสำหรับรองแนวท่อไฟฟ้าหรือท่อร้อยสายอื่น ๆ เพราะลักษณะการไหลของ CLSM จะช่วยให้สามารถเติมเต็มช่องว่างใต้ท่อและทำให้เกิดความสม่ำเสมอได้ดี ในปี ค.ศ. 1964 The U.S. Bureau of Reclamation ได้มีการเริ่มใช้ CLSM เป็นวัสดุรองแนวท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 380-2,400 มิลลิเมตร ตามแนวแม่น้ำแคนาดาเป็นระยะทางประมาณ 518 กิโลเมตร การใช้ CLSM ในโครงการนี้แทนคอนกรีตสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างได้ถึง 40% และในตั้งแต่กลางปี ค.ศ. 1970 มีการใช้ CLSM เป็นวัสดุรองแนวท่อมากขึ้นเพราะนอกจากจะทำให้จัดวางท่อได้ง่ายแล้วยังป้องกันน้ำที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับท่อและสามารถขุดเพื่อแก้ไขได้ในอนาคต (Larsen, 1990)

วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือในคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ส่งผลทำให้ลดต้นทุนของคอนกรีต อีกทั้งยังปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสด เพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าแกลบ ดังแสดงในภาพ 6 และ 7



ภาพ 6 เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย

ที่มา: <https://www.egat.co.th/egattoday/index.php?option.com>

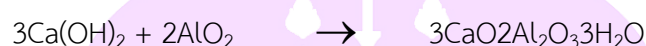
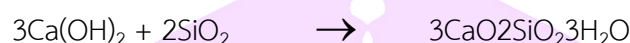


ภาพ 7 เถ้าแกลบ

ที่มา: <https://www.coachnong.com/archives/1375/8u>

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินจะถูกบดละเอียดแล้วจะถูกเผาเพื่อให้พลังงานความร้อนแก่หม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยจะถูกดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยออกไปกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะในพื้นที่โดยรอบโรงไฟฟ้า ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยมีอนุภาคที่ละเอียดเป็นผงสีน้ำตาลเนื่องจากมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยปกติมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.5-100 μm และองค์ประกอบทางเคมีส่วนมากประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 โดยอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าลอยจะอยู่รูปแบบของผลึก (Crystal) ผสมอยู่กับแบบไม่เป็นผลึก (Amorphous)

เถ้าลอยสามารถนำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) คล้ายปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) แต่ปฏิกิริยานี้ จะเกิดช้ากว่าจึงทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกช้ากว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์



1. คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยมีเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบ มีหลายหน่วยงานวิจัยได้กล่าวถึง คุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) โดยคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย ตาม ASTM C-618 และ ASTM C593 เพื่อควบคุมคุณภาพ และคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียม ออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีดังกล่าวจะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของ ถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM C618 แยกเถ้าลอยเป็น 3 ชนิด ตามองค์ประกอบทางเคมีและ องค์ประกอบทางกายภาพ ดังแสดงในตาราง 3 และ 4 ตามลำดับ

ตาราง 3 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่เกินร้อยละ	70 ¹	70 ²	50
SO_3 ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้น ไม่เกินร้อยละ	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ไม่เกินร้อยละ	10	6	6
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบกับ Na_2O ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ: 1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ

2. สามารถใช้ถัอลอย ชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาส่งถึงร้อยละ

12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งาน หรือผลการทดสอบที่เชื่อถือได้

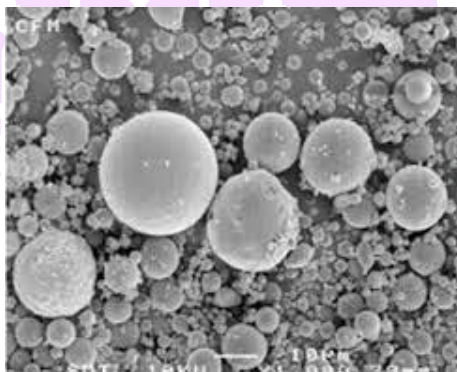
ตาราง 4 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด:			
ปริมาณที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ¹ ร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลังเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
1. ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ²	75 ²	75 ²
2. ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ²	75 ²	75 ²
3. ความต้องการน้ำสูงสุดร้อยละของร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
ความคงตัว (Soundness)³			
การขยายตัวหรือหดตัวออโตเคลฟ (autoclave) ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ⁴			
ข้อกำหนดด้านการสม่ำเสมอ			
1. ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
2. ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ: 1) ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนตะแกรง 2) เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วันหรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด 3) ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์โรคอนกรีตชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวออโตเคลฟควรมีสารปอซโซลาน อยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น และ 4) ความหนาแน่นและความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย

2. ลักษณะของเถ้าลอย

โดยทั่วไปอนุภาคของเถ้าลอยจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหิน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหิน ลิกไนต์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังภาพ 8 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (Chindapsirt, et al., 2009)



ภาพ 8 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย (1,000 เท่า)

ที่มา: Chindapsirt, et al., 2009

3. เถ้าหนัก

เถ้าหนัก เป็นหนึ่งผลพลอยได้ที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหิน ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อเดินเครื่องเต็มที่จะใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประมาณวันละ 40,000 ตัน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การเผาถ่านหินจะใช้อุณหภูมิประมาณ 900-1000° C โดยเถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite Fly Ash) จะมีลักษณะเป็นฝุ่นลอยปนไปกับก๊าซร้อน ซึ่งสามารถดักจับได้ด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) โดยทำการแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อนก่อนปล่อยจากปล่องควันส่วนเถ้าหนักเกิดจากอนุภาคเล็กๆ ปะทะกันเองหรือปะทะกับผนังเตาแล้วหลอมติดกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่เรียกว่า Slag เมื่อน้ำหนักมากขึ้น Slag จะหล่นลงมาสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า เถ้าหนัก

สุดท้ายนี้วัสดุปอซโซลานหากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลในด้านของกำลังรับแรงอัดและความทนทานของคอนกรีต และยังเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์อีกด้วย ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยที่ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) ที่ได้มาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้สารประกอบเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งสารทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตมีการพัฒนา คุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดีขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุประมาณ 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลาน” เป็นวัสดุที่มีซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน และมาตรฐาน ASTM C618 ยังได้แบ่งวัสดุปอซโซลาน ออกเป็น 3 ชนิดตามองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางกายภาพ ดังแสดงในตาราง 3 และ 4

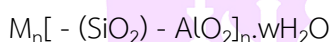
วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (geopolymer concrete) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เป็นนวัตกรรมของวัสดุที่ค้ำึงถึงสิ่งแวดล้อม มีส่วนประกอบของสารประกอบโพลิเมอร์อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminasilicate, Al-Si) ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (fly ash) และกากแร่ (slag) เป็นต้น โดยเฉพาะเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า นักวิจัยจาก Trenchless Technology Center (TCC) ของ Louisiana Technology University ได้คิดค้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า สามารถทนความร้อนสูงสุด 1,315 องศาเซลเซียส ทนต่อแรงกดและแรงดึงสูง แข็งตัวเร็ว และหดตัวได้น้อยกว่า นอกจากนี้กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีองค์ประกอบด้วยอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และธาตุในกลุ่มอัลคาไล เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วัสดุอะลูมิโนซิลิเกต ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{H}_2\text{O}$) ที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียตจากนั้นต่อมาในปี ค.ศ. 1970 Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นครั้งแรกไว้ว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อม

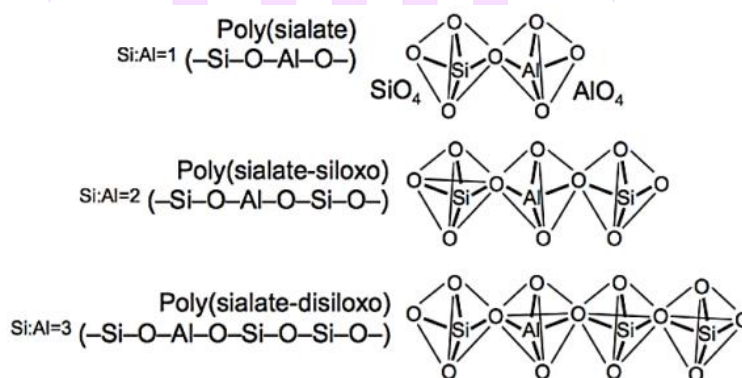
ประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในรูปอสัณฐานเป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) แล้วเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะสามารถทำให้เกิดการก่อตัวแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้”

การเชื่อมประสานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ (chainmolecular structure) คล้ายกับวัสดุโพลิเมอร์ มีลักษณะโซ่ที่เชื่อมกันระหว่างธาตุซิลิกอน (Si) กับออกซิเจน (O) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตทราฮีดรา (tetrahedra, SiO_4) หรือแบบรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า และลักษณะสายโซ่ที่เชื่อมกันระหว่างธาตุอะลูมิเนียม (Al) กับออกซิเจน (O) ที่มีโครงสร้างเป็นรูปเหลี่ยมสี่หน้า จากนั้นโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์จะเกิดการควบแน่น (polycondensation) เป็นพันธะลูกโซ่ของโครงสร้างซิลิโกอะลูมิเนต (silicoaluminate structure) ซึ่งมีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำ ๆ จนมีลักษณะเป็นแบบโครงข่าย 3 มิติ มีสูตรโมเลกุลพื้นฐานของจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงในภาพ 9 และสมการที่ 1



2

โดยที่ M คือ ไอออนบวก เช่น โพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และแคลเซียม (Ca^{2+}) - คือ การยึดเกาะพันธะ 2 คือ จำนวนโมเลกุล n คือ ดิกรีของกระบวนการพอลิคอนเดนเซชัน และ w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำในส่วนผสม

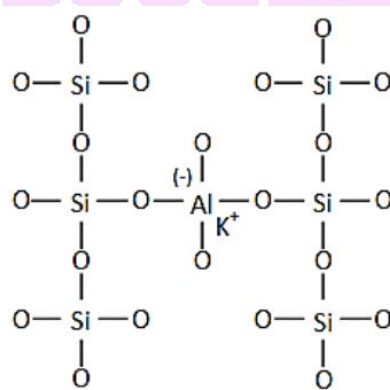


ภาพ 9 โครงสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Davidovits, 1999

จากการศึกษาของ Davidovits (1999) สามารถสรุปชนิดพันธะลูกโซ่ของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. โพลีไซอะเลต (Poly (sialate)) ตัวย่อคือ PS ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 2
2. โพลีไซอะเลต ไฮลิกโซ (Poly (sialate-siloxo)) ตัวย่อคือ PSS ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 4
3. โพลีไซอะเลต ไดไฮลิกโซ (Poly (sialate-disiloxo)) ตัวย่อคือ PSDS ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 6 ซึ่งรูปแบบของพันธะและจากการศึกษาของ Bakharev พบว่าที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2:1 จะทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวมีกำลังรับแรงอัดที่สูง ซึ่งลักษณะพันธะลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงในภาพ 10

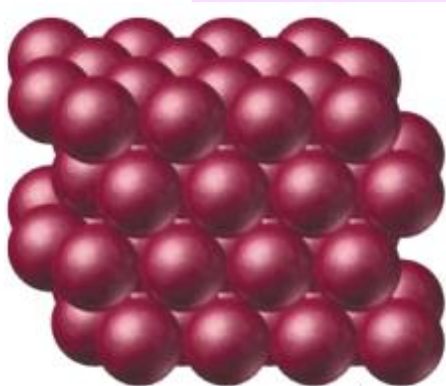


ภาพ 10 ลักษณะการดูลประจุระหว่างโพแทสเซียมไอออน (K^+) กับอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ของโพลีไซอะเลตไฮลิกโซ

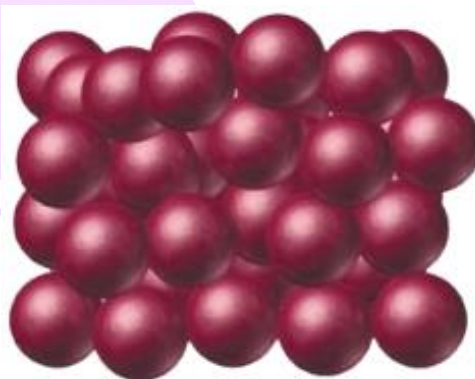
ที่มา: Davidovits, 1999

กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีชื่อว่า จีโอโพลิเมอไรเซชัน (geopolymerization) มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ เริ่มจากขั้นตอนที่หนึ่งเป็นกระบวนการชะละลายของวัสดุผสมโดยการผสมวัสดุประสานกับสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยสารละลายดังกล่าวจะเป็นตัวชะละลายซิลิกา และอะลูมินาออกจากผิววัสดุประสานที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ขั้นตอนที่สองหลังจากทำการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมเพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นจะเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมิเนียมกับสารละลายเบส (สารละลายโซเดียมซิลิเกต) จนเกิดการก่อตัวเป็นเจล

ของแข็งอสัณฐาน (amorphous solid) หรือของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก อนุภาคเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว โพลีเมอร์ ฯลฯ มีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายผลึกแตกต่างกันที่ไม่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนดังแสดงในภาพ 12.2 สมบัตินี้เรียกว่า isotropy คือ ค่าดัชนีหักเห การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติอื่น ๆ จะเหมือนกันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ของแข็งอสัณฐานจะมีจุดหลอมเหลวไม่เด่นชัด เมื่อได้รับความร้อนจะค่อย ๆ อ่อนตัวจนกระทั่งไหลได้ อุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวจึงอยู่ในช่วงที่ยาว ต่างจากผลึกซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัดและอุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวอยู่ในที่แคบ (คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)



ภาพ 12.1 crystalline solid



ภาพ 12.2 amorphous solid

ภาพ 12 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง

ที่มา: <http://www.scimath.org>

การสังเคราะห์ซีโอโพลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. สารปอซโซลาน (pozzolanic) คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา ที่สามารถชะละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์ที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินไดอะตอมลัมป้าง (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารละลายเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิด สามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอโพลิเมอร์คุณภาพดีกว่า แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจาก ราคาไม่แพง หาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518) ได้แก่

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลว ไม่มีสี

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดของแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ซึ่งสามารถนำสารละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

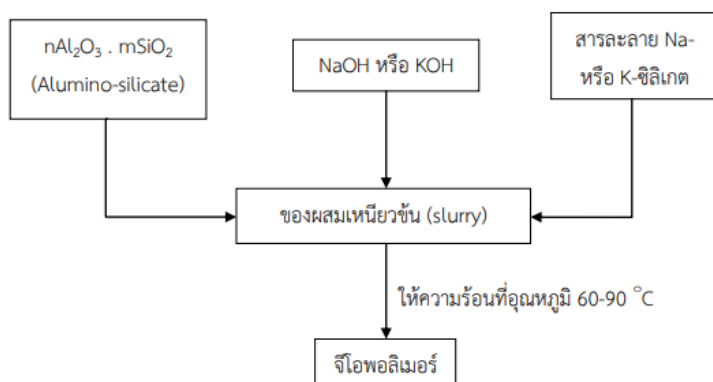
3. สารประกอบซิลิเกต สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้ม โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากนั้นน้อยไปมากออกเป็น 3 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539) ดังแสดงตาราง 5

ตาราง 5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อ	1:1.97 ถึง	1:2.34 ถึง	1:3.18 ถึง
ซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:2.17	1:2.58	1:3.59
เหล็ก ไม่เกินร้อยละ	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ไม่เกินร้อยละ	0.21	0.21	0.21

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานการผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539

4. น้ำ สารจีโอโพลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง โดยแผนผังการผลิตจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงในภาพ 13

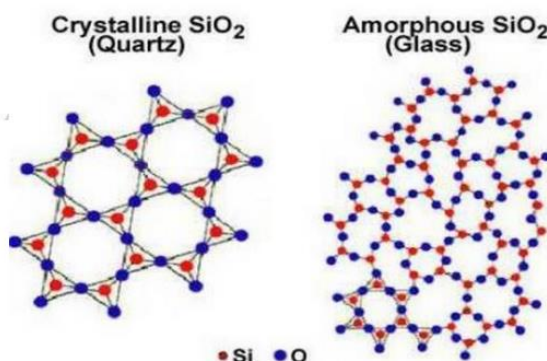


ภาพ 13 แผนผังการผลิตจีโพลิเมอร์

ที่มา: ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549

แก้ว (Waste Glass)

แก้วเป็นของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่รวมกันโดยไม่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า อสัณฐาน (Amorphous) ดังภาพ 14 โดยแก้วจะได้จากการหลอมอินทรีย์สารที่อุณหภูมิสูงได้แก่ ซิลิกา (Silica) กับสารโลหะออกไซด์ จนวัตถุดิบหลอมเป็นน้ำอยู่ในสถานะเป็นของเหลว จากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนองค์ประกอบของโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบหรือไม่มีการตกผลึก (Crystallization) โดยของแข็งที่ได้จากการขึ้นรูปจากแก้วหลอมมีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีเหล็ก (Silicon Dioxide, SiO_2) โบรอนออกไซด์ (Boron Oxide, B_2O_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate, Na_2CO_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate, MgCO_3)



ภาพ 14 ลักษณะอสังฐานควอตซ์และแก้ว

ที่มา: ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP, 2560)

จากภาพแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของควอตซ์ (Quartz) มีความเป็นระเบียบสูง มีการเชื่อมต่อกันอย่างสวยงาม แต่เมื่อนำควอตซ์มาผลิตแก้ว โครงสร้างที่เคยเป็นระเบียบจะเกิดการกระจัดกระจายตัวเกิดโครงสร้างใหม่ที่ไม่เป็นระเบียบ

ลักษณะทางกายภาพของแก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hard) โปร่งใส (Transparent) เปราะ (Brittle) มีความแวววาว (Relative) มีจุดหลอมละลายสูง (High Softening Point) ไม่ละลายในน้ำ และในสารละลายใด ๆ (Insoluble in Water and Organic Solvents) อีกทั้งยังไม่ติดไฟ (Non Inflammable) สมบัติทั่วไปของแก้วดังนี้ (ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP, 2560)

1. มีโครงสร้างทางเคมีไม่แน่นอน แต่จะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกัน ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) เป็นหลัก
2. มีความแข็งแต่เปราะทำให้แตกหักง่าย
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องไม่ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
4. มีลักษณะโปร่งใส (Transparency)
5. สามารถทำให้หลอมละลายได้ด้วยความร้อน
6. เมื่ออุณหภูมิขึ้นสมบัติของแก้วจะเปลี่ยนไปทั้งลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี
7. มีช่วงการหลอมละลายกว้าง
8. สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถสังเกตเห็นได้

1. แก้วโซดาไลม์ (Soda Lime Glass)

แก้วโซดาไลม์ เป็นแก้วชนิดที่พบได้ทั่วไปและถูกนำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมแก้ว วัตถุดิบหลัก ได้แก่ ททรายซิลิกา (SiO_2) ประมาณ 70-74% แคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว (CaO) ประมาณ 5-11% โซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2O_3) ประมาณ 12-16% โดยใช้โซดาแอชเป็นสารช่วยหลอมละลาย เพื่อลดจุดหลอมให้ต่ำลง ลดความหนืดให้สะดวกในการขึ้นรูป นอกจากนี้ ยังมีแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide, MgO) ประมาณ 1-3% และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al_2O_3) ประมาณ 1-3% ปนอยู่เล็กน้อย เพื่อให้แก้วมีความคงทนต่อสารเคมี โดยจะมีส่วนประกอบมากน้อยต่างกันไปตามการใช้งานที่ต่างกัน จะใช้อุณหภูมิปานกลางในการหลอม ประมาณ 1,300-1,400 องศาเซลเซียส แก้วชนิดนี้มีความทนทานอยู่ในระดับกลาง ถ้าขึ้นรูปให้บาง จะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกะทันหันได้ (Thermal Shock) นิยมใช้ทำขวด กระชกหน้าต่าง กระชกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน (Bullet Proof Glass) แก้วกระจกรถยนต์ เป็นต้น (อุตสาหกรรม, 2527) โดยองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของแก้วโซดาไลม์ ดังแสดงในตาราง 5 และ 6 ตามลำดับ

ตาราง 6 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)	
	A	B
SiO_2	70.60	72.40
Al_2O_3	2.10	1.40
CaO	11.50	8.60
MgO	1.90	4.00
Na_2O	13.40	13.6

ที่มา: A เมทนี อ้วนแสง, 2559; B วรพงษ์ เทียมสอน, 2554

ตาราง 7 สมบัติของแก้วโซดาไลม์

สมบัติ	ค่า
Density	2.50 g/cm ³
Thermal Expansion Coefficient	92 X 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Heat Conductivity at 100°C	1.1 W/(m.k)
Specific Heat at 100°C	0.87 kJ/(kg.K)
Young's Modulus	10 ⁹ Pa
Glass Process Temperatures	
- Working Point	990°C
- Softening Point	700°C
- Annealing Point	520-540°C

ที่มา: Mclellan and Shand, 1984

จากองค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นวัสดุที่มีความแข็ง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอิฐคอนกรีต

วัสดุมวลรวม (Aggregates)

วัสดุมวลรวมหรือวัสดุผสม คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ยึดเข้าไว้ด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมนี้จะได้จากธรรมชาติเป็นแร่ธาตุเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยาที่ใช้งานทั่วไปได้แก่ หินอ่อน หินกรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทนและแข็งแรงการเลือกใช้วัสดุมวลรวม มีส่วนสำคัญที่ช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดี

ประเภทของวัสดุมวลรวม

สามารถแบ่งตามลักษณะขนาดได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือเป็นเม็ดที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร วัสดุมวลรวมที่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ทั่วไปคือ ทรายหยาบ

2. วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หิน กรวด การเลือกใช้มวลรวมหยาบ อาจกำหนดขนาดเพื่อให้

เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ เช่น ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบอาจเป็น 1 ใน 5 ของความหนา คาน หรือ 1 ใน 3 ของความหนาของแผงพื้น

หน้าที่หลักของมวลรวม คือ เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นองค์ประกอบหลักของคอนกรีต ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมจึงมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตโดยตรง คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวมมีดังต่อไปนี้

1. กำลัง (Strength)

วัสดุมวลรวมต้องมีความสามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต โดยทั่วไปหินจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมาก กำลังรับแรงอัดของหินมีค่าประมาณ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasive Resistance)

หินที่นำผสมคอนกรีตในงานต้องทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีได้ โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้ทำพื้นหรือถนน ซึ่งต้องเจอการเสียดสีอยู่ตลอดเวลา

3. ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Resistance)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและหดตัว หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง ๆ ซ้ำ ๆ ตลอดเวลา จะทำให้เกิดแรงมากพอที่จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ วัสดุผสมจึงควรทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี คือ ไม่ขยายหรือหดตัวมาก และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง ๆ ซ้ำ ๆ ได้ดี

4. ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

วัสดุมวลรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์

5. รูปร่าง และผิว (Particle Shape and Surface Texture)

มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ และความสามารถเทได้ของคอนกรีต ดังนั้น วัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นแฉะเหลี่ยมคม และผิวหยาบเพื่อช่วยในการยึดเกาะ และไม่ควรมีรูปทรงเป็นแผ่นแบน ๆ หรือเป็นชิ้นยาว ๆ เพราะจะทำให้เทได้ยาก ควรมีรูปทรงก้อนกลม หรือ ลูกบาศก์

6. ความสะอาด (Cleanliness)

วัสดุมวลรวมต้องสะอาดมีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อคอนกรีตน้อยที่สุด สารเหล่านี้ ได้แก่ เปลือกหอย ชานอ้อย ถ่านหิน เศษไม้ เศษกระดาษ ก้อนหิน โคลนเลน ฝุ่น หรือผงละเอียด (Slit) ฝุ่นพลาสติก ไขมัน เป็นต้น สิ่งดังกล่าวนี้ทำให้ความทนทาน และแรงยึด-เหนี่ยวลดลง บางครั้งทำให้คอนกรีตร้าว มีกำลังต่ำ และแข็งตัวช้า

7. ความลดหลั่นของขนาด หรืออัตราส่วนขนาดคละ (Gradation)

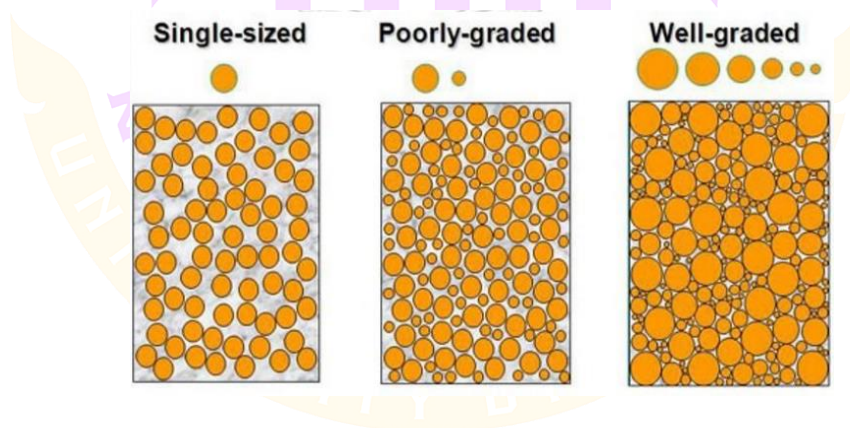
วัสดุมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตจะต้องมีความลดหลั่นของขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยในเรื่องตัวกันแน่น และมีช่องว่างน้อย ทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น ทั้งยังช่วยให้ทำงานได้ง่าย (วินิต ช่อวิเชียร, 2557)

ขนาดคละ คือ การกระจายของขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละอนุภาคของวัสดุมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่าวัสดุมวลรวมนั้นจะเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้วัสดุมวลรวมจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมกัน เพื่อให้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน และลดช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม

มวลรวมที่คละขนาดดี (Well Graded) ประกอบด้วย มวลรวมที่มีมวลรวมหลาย ๆ ขนาด คละหรือปะปนกันให้เหลือช่องว่างน้อยที่สุด

มวลรวมที่ไม่คละขนาดกัน (Poorly Graded) ประกอบด้วย มวลรวมที่ขนาดขาดช่วง (Gap graded soil)

มวลรวมที่มีขนาดใกล้เคียง หรือพอ ๆ กัน (Uniform Graded or Single Sized) ดังแสดงในภาพ 15



ภาพ 15 ชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม

สัมประสิทธิ์บ่งชี้การกระจายขนาด ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์ของโค้งการกระจายขนาดของมวลรวม (Coefficient of Curvature, C_c)

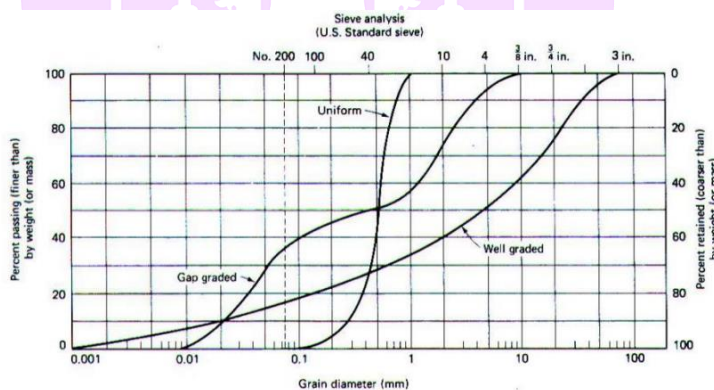
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของขนาดมวลรวม (Coefficient of Curvature, C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

เมื่อ D_{10} , D_{30} , D_{60} เป็นขนาดมวลรวมที่มีส่วนละเอียดกว่า (Percent Finer) ร้อยละ 10, 30 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

สำหรับการกระจายขนาดที่ดี C_c จะมีค่าระหว่าง 1-3 และ C_u มากกว่า 4 (สำหรับกรวด) หรือ C_u มากกว่า 6 (สำหรับทราย) (สถาพร โภคา, 2555) โดยสามารถหาค่า C_c , C_u และรูปแบบของขนาดคละ ได้จากกราฟดังแสดงในภาพ 16



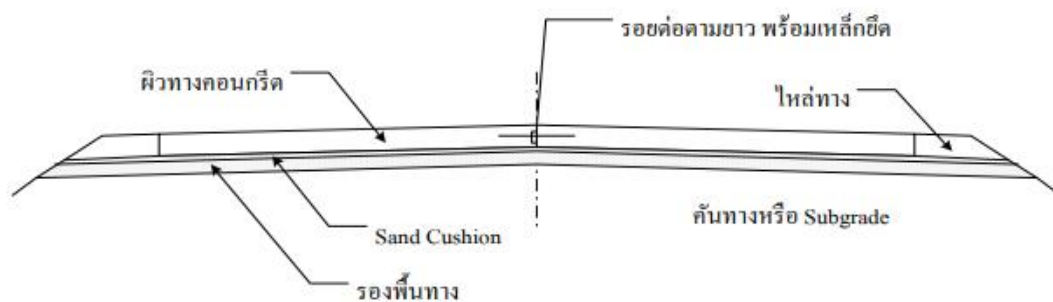
ภาพ 16 ตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม

ที่มา: Atkins, 1997

องค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างผิวทาง

องค์ประกอบพื้นฐานของผิวทางแข็งเกร็งหรือผิวทางคอนกรีต

ถนนคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีรูปตัดขวาง (Typical Cross Section) ดังแสดงในภาพ 17 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย



ภาพ 17 รูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต

ที่มา: <https://engfanatic.tumcivil.com>)

ผิวทางคอนกรีต (Concrete Slab) ทำจากคอนกรีต หรือเรียกว่า พื้นทางคอนกรีต (Concrete Base) เนื่องจากเป็นชั้นทางหลักที่ทำหน้าที่รับแรงกระทำจากยานพาหนะ และถ่ายแรงลงสู่ชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมต่อไป นอกจากนี้ผิวทางคอนกรีต ยังทำหน้าที่ให้คุณภาพการขับขี่ และ Skid Resistance อีกด้วย ถนนคอนกรีตจะมีค่าอยู่ในช่วง 20,000-40,000 MPa ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Huang, 2004)

ทรายบดอัด เป็นทรายหยาบมีขนาดเม็ดใหญ่สุดไม่เกิน 9.5 mm แข็ง ทนทาน และสะอาด ปราศจากดินเหนียวและวัชพืชต่าง ๆ ในระหว่างก่อสร้างจะต้องเกลี่ยและบดอัดให้ได้ระดับและความแน่นที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ชั้นทรายปรับระดับยังมีหน้าที่ช่วยระบายน้ำใต้ดิน อีกด้วย

ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ในการก่อสร้างผิวทางโดยทั่วไปอาจจะมีหรือไม่มีชั้นพื้นทางก็ได้ ผิวทาง คอนกรีตทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากยานพาหนะลงสู่ชั้นดินเดิมและจะทำหน้าที่เป็นชั้นพื้นทางไปในตัว เพราะกำลังของคอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังของชั้นพื้นทางมาก กล่าวคือ คอนกรีตสามารถรับความเค้นวิกฤติ (critical stress) ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีชั้นทางอยู่แล้ว ชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีต มีหน้าที่รองรับแผ่นคอนกรีตให้มีความเรียบ และสม่ำเสมอ ช่วยลดการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต และป้องกันการเกิดการอัดทะลัก (pumping and blowing) บริเวณรอยต่อ

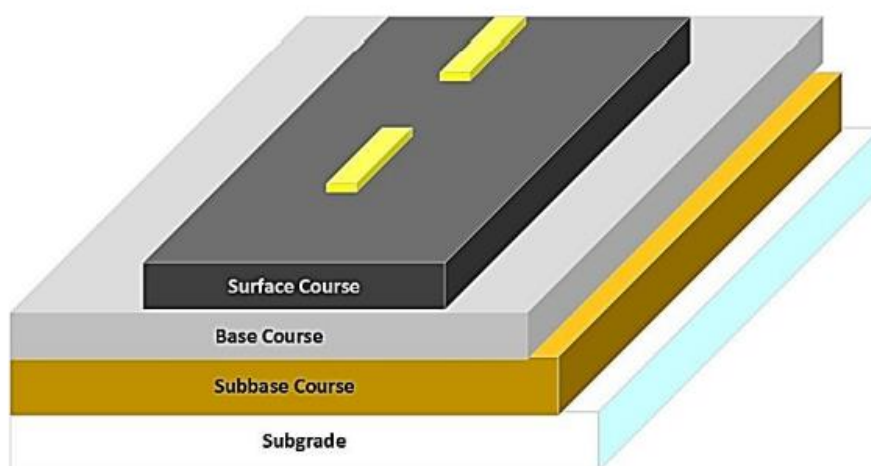
ชั้นดินเดิม (Subgrade) คือ ดินเดิมหรือดินคันทาง (Embankment) ปกติแล้วการออกแบบถนนคอนกรีต ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินเดิมจะวัดในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า k ซึ่งได้จากการทดสอบ Plate Bearing Test (ASTM) แต่อาจจะเทียบค่า k กับค่า CBR ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันมากกว่าก็ได้

รอยต่อ (Joint) ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีการทำรอยต่อบนผิวคอนกรีตเป็นช่วง ๆ ตามยาว และตามขวางของถนน แบ่งผิวคอนกรีตออกเป็นแผ่น ๆ รอยต่อเหล่านี้จะทำหน้าที่ควบคุม

การเกิดรอยแตก (Crack) เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ป้องกันการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต เมื่อคอนกรีตขยายตัว และเป็นรอยต่อเนื่องจากการหยุดพักงานก่อสร้างแรงกระทำจะถ่ายจากแผ่นคอนกรีตแผ่นหนึ่งไปสู่อีกแผ่นหนึ่งโดย เหล็กเดือย (Dowel Bar) และเหล็กยึด (Tie Bar)

องค์ประกอบพื้นฐานของผิวทางยึดหยุ่นหรือผิวทางแอสฟัลต์

ส่วนประกอบของผิวทางแบบยึดหยุ่นนั้นสามารถแบ่งออกเป็นชั้นดังแสดงในภาพ 18 ดังนี้



ภาพ 18 ภาพตัดขวางโครงสร้างผิวทางยึดหยุ่น

ที่มา: Chompoorat, et al., 2018

ชั้นผิวทาง (Surface Course or Surface Treatment) การก่อสร้างผิวจราจรหรือผิวไหล่ทาง ด้วยการลาดยางมะตอย (Asphalt) และเกลี่ยวัสดุหินย่อยปิดทับ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้น บนชั้นพื้นทางที่ได้ลาดยางมะตอย ไพรมโคท (Prime Coat) แล้ว หรือบนพื้นที่อื่นใดที่ได้เตรียมไว้

ชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ (binder course or asphalt base course) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างของชั้นผิวทาง มีเหตุผลหลักสองประการที่จำเป็นต้องมีชั้นทางนี้คือ ประการแรก เพื่อเป็นไปตามมาตรฐานชั้นผิวทางที่ก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมร้อน โดยจะถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นมาก ดังนั้นการบดอัดแอสฟัลต์ผสมร้อนให้แน่นภายในครั้งเดียวมักทำได้ยาก ทำให้ต้องแบ่งชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนออกเป็นสองชั้น ประการที่สอง เพื่อความประหยัดในพื้นที่แอสฟัลต์ผสมร้อนนี้อาจใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ด้อยลง เพื่อให้การออกแบบนั้นมีความประหยัดมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าชั้นพื้นทาง

แอสฟัลต์ มีความหนาไม่เกินกว่า 7.5 เซนติเมตร แล้วจำเป็นที่จะต้องแบ่งชั้นพื้นทางแอสฟัลต์นี้ออกเป็นอีกสองชั้นย่อย

ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (base course and subbase course) ชั้นพื้นทาง เป็นชั้นของวัสดุที่อยู่ต่ำกว่าชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ชั้นพื้นทางประกอบไปด้วยหิน หรือกากโลหะที่ถูกทำให้แตกละเอียด หรือวัสดุผสมซีเมนต์ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งแรงคงทน ในส่วนของชั้นรองพื้นทาง จะอยู่ใต้ชั้นพื้นทาง ซึ่งเหตุผลในการใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดนี้ก็เพื่อความคุ้มค่า แทนที่จะใช้วัสดุที่มีราคาแพงในการทำชั้นพื้นทาง เราสามารถใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าในการทำชั้นรองพื้นทางที่อยู่ด้านบนชั้นดินเดิม

ชั้นดินเดิม (subgrade course) หรือดินคันทาง (embankment) ส่วนบนสุดของชั้นดินเดิม ในการก่อสร้างควรที่จะมีการบดอัดให้แน่นเสียก่อน เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของดินที่ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นสูงสุดที่เป็นไปได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยชั้นดินเดิมที่ถูกบดอัดนี้อาจเป็นชั้นของดินที่มีอยู่แล้วหรืออาจเป็นชั้นของวัสดุคัดเลือกก็ได้

องค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างผิวทางผสม

โครงสร้างผิวทางแบบผสมเป็นโครงสร้างผิวทางที่มีรูปแบบการผสมผสานกันระหว่างผิวทางยึดหยุ่นกับผิวทางแข็งเกร็ง โดยทั่วไปโครงสร้างผิวทางประเภทนี้มักนำไปใช้กับงานด้านการบูรณะผิวทางและปรับปรุงถนน เช่น การเสริมผิวทาง แอสฟัลต์บน ผิวทางคอนกรีต นอกจากนี้ในปัจจุบัน ปริมาณการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะเพิ่มขึ้นอย่างมากจนถนนเดิมรับน้ำหนักจากยานพาหนะมากเกินไปขอบเขตที่ออกแบบเอาไว้ ทำให้ถนนเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งถนนก็จะเกิดความเสียหาย ส่งผลให้การขยับเขยื้อนของยานพาหนะไม่สะดวก จึงจำเป็นต้องบำรุงรักษาดูแล ซึ่งการบำรุงรักษาดูแล เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน คือ การนำเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (pavement recycling) โครงสร้างทางที่ผ่านการบำรุงรักษาด้วยวิธีข้างต้นจะมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้น และมีความแข็งแรงทนทานยิ่งขึ้นเสมือนเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแข็งเกร็ง

ความสำคัญของกลศาสตร์ในงานวิศวกรรมผิวทาง

การออกแบบโครงสร้างผิวทางยึดหยุ่นและโครงสร้างผิวแข็งเกร็งในปัจจุบันเริ่มใช้วิธีการออกแบบที่เรียกว่า การออกแบบเชิงวิเคราะห์ (analytical design) ทางวิศวกรรมที่แท้จริงของวัสดุ นั่นคือ สมบัติด้านความเค้น ความเครียด และกำลัง (stress-strain-strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus value, M_R) เป็นต้น โดยสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางและวัสดุชั้นทางต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus test, AASTO T307)

Hveem and Carmany (1948); Hveem (1955) ได้นำเสนอแนวความคิดของพฤติกรรม การคืนตัว (resilient behaviour) ของผิวทางต่อมา Seed, et al. (1955) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม การคืนตัวของวัสดุผิวทางโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำตามแนวทางที่ Hveem เสนอแนะไว้ หลังจากนั้น Seed, et al. (1962) ได้นิยามโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) ตามรูปแบบของแรงกระทำกับความเครียดแบบไม่คืนตัว (Irrecoverable strain)

ในช่วงเวลาสั้น ๆ ความเค้นแบบพลวัต (dynamic stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางมีค่าไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับกำลังของวัสดุผิวทาง ดังนั้นวัสดุจึงสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้มาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chompoorat, et al. (2018) นำเสนอ CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสม กับเถ้าลอย โดยในงานวิจัยได้ทำการทดสอบการไหลแผ่ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 28 60 90 และ 120 วัน และโมดูลัสคืนตัวที่อายุ 7 วัน ผลการทดสอบพบว่า CLSM ที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 650 mm ผ่านมาตรฐาน EFNARC (2002) ที่ระบุไว้ว่า CLSM ต้องมีค่า การไหลแผ่มากกว่า 650 mm และมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามอายุการบ่ม และปริมาณปูนซีเมนต์ ที่เพิ่มขึ้น มีค่าโมดูลัสคืนตัวอยู่ในช่วง 800-850 MPa จากนั้นได้ทำการออกแบบพื้นที่ทางที่ใช้ CLSM พบว่า มีค่าจำนวนของแรงกระทำซ้ำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจะต่ำกว่าขีดจำกัดที่ยอมให้ของค่า การเสื่อมสภาพ และค่าการเสียหายแบบร่อนล้อ ดังแสดงในตาราง 8 อยู่ในช่วง $1.29-3.27 \times 10^6$ รอบ และ $6.92-7.29 \times 10^6$ รอบ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับพื้นที่ทางที่ใช้หินคลุกในการออกแบบซึ่งมีค่า เท่ากับ 3.27×10^5 รอบ และ 3.80×10^6 รอบ ตามลำดับ เมื่อทำออกแบบอายุการใช้งานพื้นที่ทางที่ใช้ CLSM มีอายุการใช้งาน 2-3 ปี และพื้นที่ทางที่ใช้หินคลุกมีอายุการใช้งาน 1 ปี จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน สามารถทนทานต่อความเสียหายการเสื่อมสภาพ การเสียหายแบบร่อนล้อ และมีอายุการใช้งานที่ดีกว่าการใช้พื้นที่ทางหินคลุก

ตาราง 8 ออกแบบน้ำหนักกระทำซ้ำ และอายุการใช้งาน

NO.	Material	Nf (ESALs)		Design life (year)
		Fatigue	Rutting	
1	Mix no.1	1.29×10^8	6.92×10^8	2
2	Mix no.2	1.37×10^8	7.05×10^8	2
3	Mix no.3	1.51×10^8	7.29×10^8	3
4	Crushed rock	3.27×10^8	3.80×10^8	1

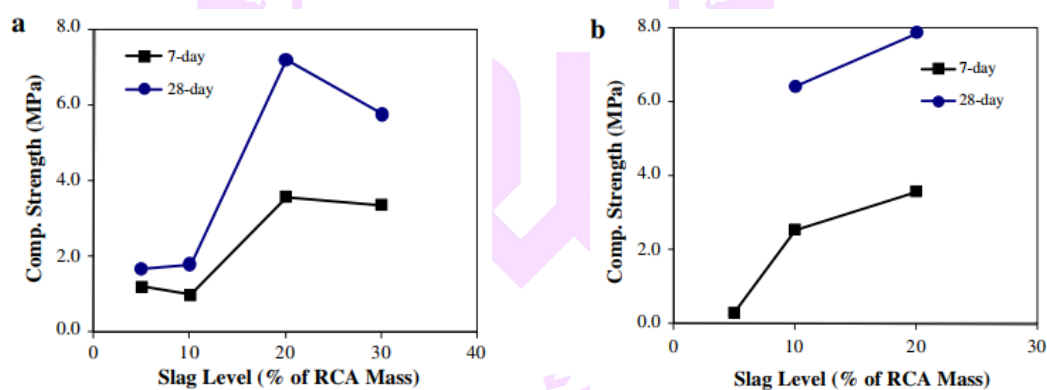
ที่มา: Chompoorat, et al., 2018

Sasha, et al. (2009) นำเสนอ CLSM โดยปราศจากปูนซีเมนต์ที่ได้มีการนำคอนกรีตรีไซเคิล กลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมที่ใช้ตะกรันเหล็ก และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน โดยในงานวิจัยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำคอนกรีตรีไซเคิลมาใช้แทนทราย แล้วนำมาผสมกับตะกรันเหล็กหรือเถ้าลอย และทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ทดสอบการไหล และทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่า CLSM ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 150 mm ผ่านมาตรฐาน ACI 229R-99 พบว่า มีเพียงอัตราส่วนผสมของตะกรันเหล็กที่ร้อยละ 10 และ 20 ที่มีค่าการไหลผ่านมาตรฐาน โดยที่อายุบ่มตัว 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตะกรันอยู่ในช่วง 0.70-6.54 MPa และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของเถ้าลอยอยู่ในช่วง 0.20-1.77 MPa ดังแสดงในตาราง 9 และที่อายุบ่มตัว 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตะกรันเหล็กที่ร้อยละ 10 และ 20 อยู่ที่ 6.4 และ 7.8 MPa ตามลำดับ และมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในภาพ 19

ตาราง 9 คุณสมบัติของตัวอย่าง RCA/SCM แบบละเอียด

Slag					Fly ash				
Slag	w/b	Flow	Strength		Fly ash	w/b	Flow	Strength	
(%)		(mm)	(MPa)		(%)		(mm)	(MPa)	
			3-day	7-day				3-day	7-day
5	3.00	118	0.70	0.55	5	2.65	120	0.36	0.20
10	1.63	165	1.44	2.10	10	1.25	119	0.81	0.56
15	1.00	135	3.08	4.98	15	0.83	132	0.93	0.74
20	0.75	152	4.67	5.84	20	0.63	108	1.21	1.54
30	0.54	135	5.21	6.54	30	0.50	141	1.17	1.77

ที่มา: Sasha, et al., 2009)

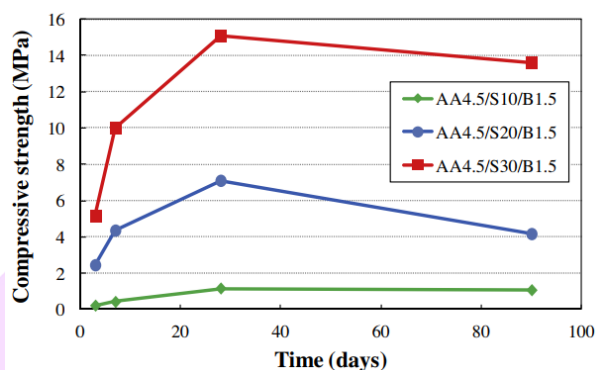


ภาพ 19 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM: (a) RCA แบบละเอียด และ (b) RCA แบบละเอียด/หยาบ

ที่มา: Sasha, et al., 2009

Lee, et al. (2013) นำเสนอ CLSM ใช้ตะกรันเหล็กกับเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานโดยมีอัตราส่วนร้อยละตะกรันเหล็กต่อวัสดุประสานเท่ากับ 10 20 30 ใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียด และใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของร้อยละ

ตะกรันเหล็กไม่ส่งผลต่อการไหลแผ่ แต่การเพิ่มขึ้นของร้อยละตะกรันเหล็กส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของ CLSM มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในภาพ 20



ภาพ 20 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่ใช้ตะกรันเหล็กและเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน

ที่มา: Lee, et al., 2013

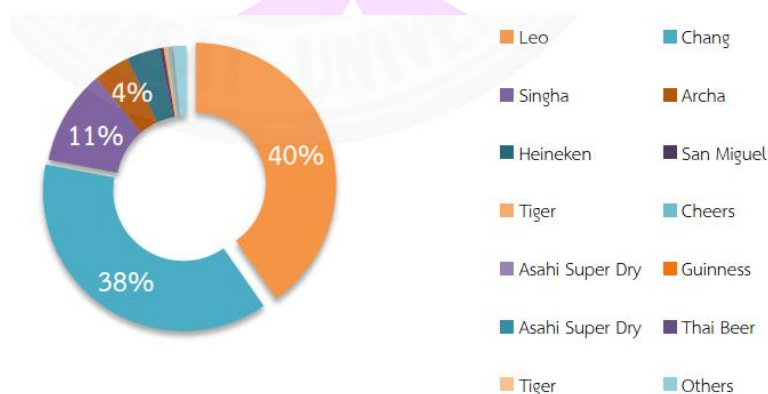
Tawatchai, et al. (2017) นำเสนอเกี่ยวกับการรบกําลังแรงอัดแกนเดียวของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เศษแก้วและเถ้าลอย โดยเศษแก้วที่นำมาใช้ในงานวิจัยจะใช้เศษแก้วจากหลอดฟลูออริเซน และภาชนะแก้วทั่วไป โดยในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกําลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากําลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 33.3-47.6 และพบว่าอัตราส่วนที่สามารถรับกําลังรับแรงอัดได้ดีที่สุดคือ 20CP สามารถรับกําลังได้ 47.6 MPa ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 ค่ากําลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

Sample	Compressive strength		
	MPa (min-max)	Std.	(%) ^a
100FA	45.7(43.5-47.35)	2.05	100
10FP	41.1(38.1-45.9)	4.20	90
20FP	40.7(38.5-43.5)	2.56	89
30FP	39.6(37.9-42.7)	2.82	87
40FP	33.3(29.6-39.9)	2.12	73
10CP	44.4(39.0-47.8)	5.30	97
20CP	39.9(37.5-43.8)	7.93	104
30CP	39.9(37.5-43.8)	9.24	87
40CP	39.9(37.3-43.0)	5.75	87

ที่มา: Tawatchai, et al., 2017

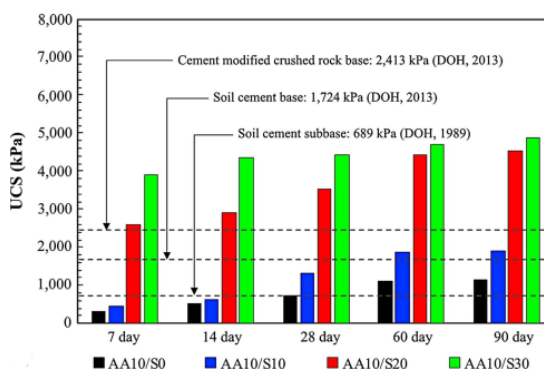
Euromonitor International (2016) นำเสนอเกี่ยวกับการสำรวจข้อมูลตลาดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ พบว่า จากผลสำรวจอัตราการเติบโตยังคงอยู่ในระดับที่คงที่ โดยเบียร์ที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ เบียร์ลิโอ คิดเป็น 40% ของตลาดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ รองลงมาจะเป็นเบียร์ช้าง ด้วยส่วนแบ่งทางการตลาดที่ 38% และอันดับที่ 3 คือ เบียร์สิงห์ คิดเป็น 11% ของส่วนแบ่งการตลาด ดังแสดงในภาพ 21



ภาพ 21 สัดส่วนทางการตลาดของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ในประเทศไทย
ปี พ.ศ. 2559

ที่มา: Euromonitor International from official statistics, trade associations, trade press, company research, store checks, trade interviews, trade sources

Chompoorat, et al. (2021) นำเสนอ CLSM โดยปราศจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ตะกรันหลักกับถั่วลันเตาเป็นวัสดุประสาน โดยในงานวิจัยได้มีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น โดยมีอัตราส่วนร้อยละตะกรันหลักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 10 20 30 จากการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงของร้อยละตะกรันที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการไหล ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น การเย็นน้ำลดลง ดังแสดงในตารางที่ 10 และค่ากำลังรับแรงอัด ที่อายุบ่มตัว 28 วัน พบว่า มีเพียงร้อยละตะกรันหลักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 20 และ 30 ผ่านมาตรฐาน ACI 229R ที่ระบุกำลังรับแรงอัดต้องมีค่าเท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่า ดังแสดงในภาพ 22



ภาพ 22 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ที่ใช้ตะกรันเหล็กและเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน

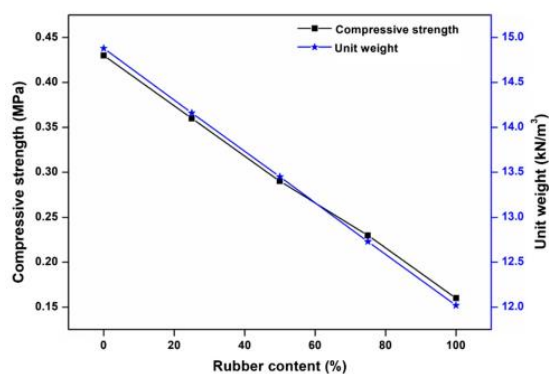
ที่มา: Chompoorat, et al., 2021

ตาราง 11 คุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM

Mixture	Slump flow(mm)	Setting time (h)		Bleeding		Unit weight (kg/m ³)
		Stiffening	Initial	Hour	Percent	
AA10/S0	660	12 ± 0.58	35 ± 0.58	3	1.15 ± 0.03	1,678 ± 8.19
AA10/S10	710	8 ± 0.33	25 ± 0.58	2	1.01 ± 0.02	1,687 ± 24.58
AA10/S20	700	7 ± 0.33	24 ± 0.58	2	0.07 ± 0.06	1,724 ± 31.02
AA10/S30	680	6 ± 0.58	23 ± 0.58	2	0.56 ± 0.03	1,758 ± 8.65

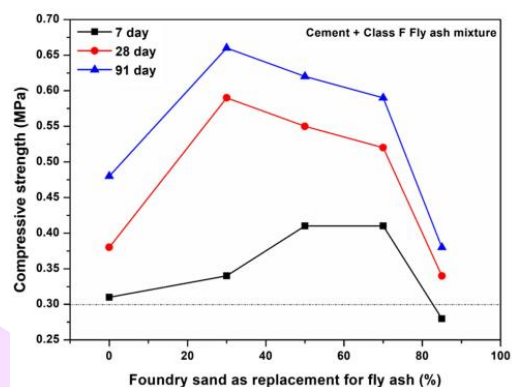
ที่มา: Chompoorat, et al., 2021

Kaliyavaradhan (2021) นำเสนอเกี่ยวกับการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่มาใช้ทำเป็น CLSM โดยในงานวิจัยได้มีการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้แก่ ของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหิน ของเสียจากฝุ่นเตาปูน ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ของเสียจากโรงหล่อทราย ของเสียจากขยะคอนกรีตรีไซเคิล เศษแก้ว และในงานวิจัยได้กล่าวถึงผลกระทบระหว่างชนิดของของเสียและค่ากำลังรับรับที่ของเสียชนิดนั้นสามารถรับได้ จากการผลทดสอบพบว่าเมื่ออัตราส่วนร้อยละของของเสียเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงแต่เมื่ออายุการบ่มตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างดังแสดงในภาพ 23 และ 24



ภาพ 23 ค่ากำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนัก
ร้อยละของของเสียที่ต่างกัน

ที่มา: Kim and Kang, 2011



ภาพ 24 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่มตัว
ต่างกันกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

ที่มา: Naik and Singh, 1997



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือ การเตรียมสารเคมี และส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขั้นตอนการจัดเตรียมตัวอย่าง และขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และทดสอบคุณสมบัติด้านงานทางของ CLSM ตามมาตรฐาน American society for testing and material (ASTM) และ American association of state highway and transportation officials (AASHTO)

วัสดุและสารเคมี

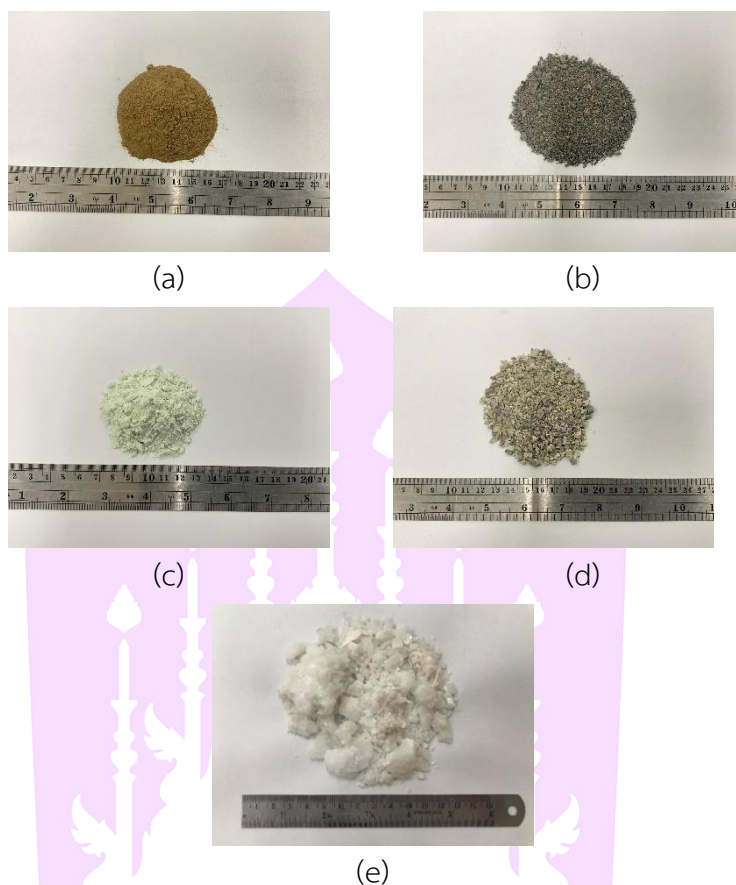
วัสดุและสารเคมีที่นำมาใช้ในการทดสอบสำหรับศึกษาวิจัยประกอบด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) เถ้าหนัก (bottom ash, BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ดังแสดงในภาพ 25 (a) และ (b) เศษแก้ว (waste glass powder, WGP) จากขวดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์ ดังแสดงในภาพที่ 25 (c) และคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate, RCA) จากการรื้อถอนอาคารสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ 25(d) โดยใช้เถ้าลอยกับเศษแก้วเป็นวัสดุประสาน และเถ้าหนักหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิลถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงในภาพ 25(e) เป็นตัวชะละลาย

การเตรียมสารเคมี

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ขายกันตามท้องตลาดจะอยู่ในรูปแบบเกล็ด จึงต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายและให้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ (Molar, M) อ้างอิงการเลือกความเข้มข้นจากงานวิจัย Pourakbar, et al., 2015 โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการที่ 1

$$g = (CMV/1000) \quad (1)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M) g คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปแบบเกล็ด (g) M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 40 (g/mol) และ V คือ ปริมาตรที่ต้องการ (ml)



ภาพ 25 วัสดุและสารเคมี (a) ถ่านลอย (b) ถ่านหนัก (c) เศษแก้ว (d) เศษคอนกรีตรีไซเคิล (e) โซเดียมไฮดรอกไซด์

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. คำนวณน้ำหนักหลักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบเกล็ดหน่วยเป็นกรัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการในงานวิจัย (10) ตามสมการที่ 1
2. เทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดตามที่คำนวณไว้ โดยให้ปริมาตรที่เทอยู่ต่ำกว่าขีดปริมาตรที่ต้องการเล็กน้อย
3. ใช้แท่งแก้วคนโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเกล็ดให้ละลายอยู่ในรูปแบบของสารละลายของเหลวและเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ให้ถึงปริมาณที่ต้องการ
5. นำแผ่นฟิล์มพลาสติกใสคลุมปิดปากบีกเกอร์แล้วเจาะรูเพื่อระบายความร้อนแล้วปล่อยให้เย็น จึงจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่ต้องการ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบประกอบด้วย ขั้นตอน โดยแสดงรายละเอียดอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 อัตราส่วนผสม CLSM ต่อปริมาตรส่วนผสม 1 ลบ.ม.

Mixture	Water/ Binder	FA/ Binder	WGP/ Binder	RCA/ Binder	BA/ Binder	NaOH/ Binder	Bulk proportion (kg/m ³)				
							NaOH	FA	WGP	BA	RCA
AA10/WGP00/BA1.5	0.65	1.0	-	1.5	1.5	0.015	20	535	-	802	-
AA10/WGP20/BA1.5	0.65	0.8	0.2	1.5	1.5	0.015	20	428	107	802	-
AA10/WGP30/BA1.5	0.65	0.7	0.3	1.5	1.5	0.015	20	374	161	802	-
AA10/WGP40/BA1.5	0.65	0.6	0.4	1.5	1.5	0.015	20	321	214	802	-
AA10/WGP00/RCA1.5	0.65	1.0	-	1.5	1.5	0.015	20	535	-	-	802
AA10/WGP20/RCA1.5	0.65	0.8	0.2	1.5	1.5	0.015	20	428	107	-	802
AA10/WGP30/RCA1.5	0.65	0.7	0.3	1.5	1.5	0.015	20	374	161	-	802
AA10/WGP40/RCA1.5	0.65	0.6	0.4	1.5	1.5	0.015	20	321	214	-	802

หมายเหตุ: W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (แก้ล้อยและเศษแก้ว)

งานวิจัยนี้มีวัสดุประสานเป็นแก้ล้อยกับเศษแก้วและได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอัตราส่วนผสมของ CLSM ดังนี้ $AAX_1/WGPX_2/BAX_3$ หรือ $AAX_1/WGPX_2/RCAX_4$ โดยที่

AA หมายถึง การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย (alkali activated)

X_1 หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีหน่วยเป็นโมลาร์

WGP หมายถึง เศษแก้ว

X_2 หมายถึง ร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน

BA หมายถึง เถ้าหนัก

X_3 หมายถึง อัตราส่วนเถ้าหนักต่อวัสดุประสาน

RCA หมายถึง เศษคอนกรีตรีไซเคิล

X_4 หมายถึง อัตราส่วนเศษคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุประสาน

ยกตัวอย่างการเรียกชื่ออัตราส่วนผสม AA10/WGP20/BA1.5 หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ เศษแก้วต่อวัสดุประสานร้อยละ 20 และอัตราส่วนเถ้าหนักต่อวัสดุประสาน 1.5

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบประกอบด้วย 10 ขั้นตอน

1. เริ่มต้นด้วยการปรับอัตราส่วนผสมตัวอย่าง CLSM โดยปรับอัตราส่วนผสมที่ออกแบบจากต่อปริมาตร 1 ลบ.ม. เป็นต่อปริมาตร 0.011 ลบ.ม. ตามปริมาตรของโมลที่ใช้สำหรับการทดสอบ
2. นำเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิลเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 26 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำวัสดุออกมาพักเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุเย็นตัวลงและไม่ดูดซึมน้ำเกินกว่าปกติ เนื่องจากความร้อนในวัสดุ



ภาพ 26 การนำเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตเข้าเตาอบ

3. เตรียม เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิลตามอัตราสัดส่วนที่ได้คำนวณไว้ ดังแสดงในภาพ 27



ภาพ 27 เตรียม เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล

4. ทำการผสมถั่วลอ่ย และเศษแก้วให้เข้ากันเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน ดังแสดงในภาพ 28



ภาพ 28 การผสมถั่วลอ่ย และเศษแก้ว

5. นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เตรียมไว้เทใส่ในหม้อผสมรวมกับวัสดุประสาน ดังแสดงในภาพ 29 แล้วทำการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน และใส่ถั่วหนักรหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิล ลงในหม้อผสม



ภาพ 29 การผสมส่วนผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

6. เทน้ำลงในหม้อผสมแล้วปั่นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที แล้วพักอีก 15 วินาที จากนั้นทำการคนด้วยไม้พายไม่ให้ส่วนผสมติดหม้อผสม แล้วทำการปั่นผสมอีก 30 วินาที

7. นำส่วนผสมเทใส่ในโมลทรงกระบอก เพื่อหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของ CLSM และในแบบท่อ PVC ผ่าครึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 cm ($1\frac{1}{2}$ in) สูง 7.5 cm (3 in) เพื่อทำตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

8. ทำการทดสอบค่าการยุบตัวและการยุบตัวแบบไหลแผ่ หลังจากผสมที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที ดังแสดงในภาพ 30



ภาพ 30 การทดสอบการไหลแผ่

9. เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีหลังจากการผสมทำการดูน้ำบริเวณที่ผิวหน้าของ CLSM ดังแสดงในภาพ 31 เพื่อนำไปคำนวณการเอนเป็นขั้นตอนต่อไป



ภาพ 31 การทดสอบการเอนน้ำ

10. หลังจากผสมให้ทำการบ่มด้วยการแรพพลาสติกเป็นเวลา 7 14 28 60 และ 90 วัน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านกำลัง

1. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล

ก่อนทำการผสมวัสดุ CLSM เราจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยมีการทดสอบดังแสดงในตาราง 13

1.1 การหาขนาดคละ (grain size analysis) เป็นการหาขนาดของวัสดุ ซึ่งในมวลวัสดุปริมาณหนึ่งอาจจะประกอบด้วยมวลหลายขนาด มีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 cm จนถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0002 mm เนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการดูดซึม และการรับแรงอีกด้วย ส่วนการหาขนาดคละสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในวิธีที่นำมาปฏิบัติในงานวิจัยนี้ คือ วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) สำหรับทดสอบกับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 mm ขึ้นไป

1.2 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weught) ทดสอบโดยการนำวัสดุที่อยู่ในสภาพน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใส่ในแบบทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง จนมีระดับหนึ่งในสามของความสูงแบบจากนั้นกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กกระทุ้งให้ทั่วผิวหน้าจำนวน 25 ครั้ง ทำแบบเดียวกันจนเต็มความสูงแบบแล้วจึงนำไปชั่งทำอย่างน้อย 2 ครั้ง ผลการทดสอบที่ได้ไม่ควรต่างกันมากกว่า 1%

ตาราง 13 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
การหาขนาดคละ	ขนาดคละของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM D 442
หน่วยน้ำหนัก	หน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM C 29
ความถ่วงจำเพาะ	ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM C 128
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และเศษคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM C 128

1.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) คืออัตราส่วนของมวลวัสดุ (น้ำหนักของวัสดุ ที่ชั่งในอากาศ) ต่อมวลของน้ำ (น้ำหนักของน้ำ) ที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัสดุ ณ อุณหภูมิที่กำหนด

1.4 เพอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (absorption) หมายถึงการที่วัสดุมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากดูดน้ำเข้าสู่ช่องว่างในวัสดุแต่ไม่รวมถึงปริมาณน้ำที่ติดอยู่ที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบ เพื่อหาการดูดซึมน้ำของวัสดุจำเป็นต้องหาสภาพอิมมัวแห่งของวัสดุก่อน

2. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม คุณสมบัติทางเคมีของ CLSM

หลังจากผสมและเตรียมตัวอย่าง CLSM เรียบร้อยจึงทำการทดสอบคุณสมบัติทาง วิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM ดังในตาราง 14

2.1 การทดสอบค่าการยุบตัว (slump test) ใช้เพื่อทดสอบหาค่าความเข้มเหลวของ CLSM ในสภาพเหลวตามมาตรฐาน ASTM C 1611 เป็นมาตรฐานที่ใช้กับคอนกรีตที่สามารถอัดแน่น ด้วยตัวเองได้ (self compacting concrete) และทำการทดสอบหลังจาก CLSM สัมผัสกับน้ำที่เวลา 0 30 60 90 และ 120 นาที

2.2 การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow test) ใช้เพื่อทดสอบหาค่า ความสามารถในการไหลของ CLSM เนื่องจาก CLSM จำเป็นต้องมีคุณสมบัติการไหลการไหลที่ดีและ มากกว่า 650 mm ตามมาตรฐาน EFNARC (2002) ที่ใช้กับคอนกรีตที่สามารถอัดแน่นด้วยตัวเองได้ และทำการทดสอบหลังจาก CLSM สัมผัสกับน้ำที่เวลา 0 30 60 90 และ 120 นาที

2.3 ระยะเวลาการก่อตัว (setting time) ระยะเวลาการก่อตัวของ CLSM เริ่มตั้งแต่เริ่ม CLSM สัมผัสกับน้ำ การก่อตัวถือเป็นลักษณะทางกายที่แสดงถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ CLSM หลังจากผสม CLSM ครบ 30 นาที ทำการนำเข็มดังแสดงในภาพ 30 เพื่อหาระยะเวลาก่อตัว โดยกด ให้หัวกดจมในเนื้อคอนกรีตแล้วทำการจดบันทึกค่าที่อ่านได้ ทำซ้ำจนกว่าหัวกดไม่จมในเนื้อคอนกรีต โดยหัวกดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm



ภาพ 32 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

2.4 การเยิ้ม (bleeding test) คือการคายน้ำจากส่วนผสม CLSM ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยปรากฏการณ์นี้มีลักษณะสำคัญคือ น้ำบางส่วนจะถูกดันให้ลอยตัวขึ้นมาบนผิวของ CLSM เนื่องจากการจมลงของ เถ้าลอย เศษแก้ว เถ้าหนัก หรือคอนกรีตไรซ์เคล ซึ่งการเยิ้มเป็นรูปแบบหนึ่งของการแยกตัว จึงมีการทดสอบหลังจากที่ CLSM สัมผัสกับน้ำจากนั้นทำการดูดน้ำจากผิวหน้าของ CLSM

2.5 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weight) เป็นค่าน้ำหนักของมวลตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตร หาได้จากการวัดขนาดของตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนีย ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างอย่างน้อย 3 ค่า (บน กลาง และล่าง) และวัดความสูงของตัวอย่างอีก 3 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการชั่งตัวอย่าง

2.6 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวโดยไม่มีแรงด้านข้างมากระทำ ทดสอบโดยใช้เครื่องกด โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่ถูกเตรียมด้วยโมล PVC ทรงกระบอกผ่าครึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.56 cm (1 ¼ in) สูง 7.5 cm (2.76 in) ที่อายุการบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน ขณะที่ทำการทดสอบจะกดตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วคงที่ ที่ 1.0 mm/min

ตาราง 14 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM

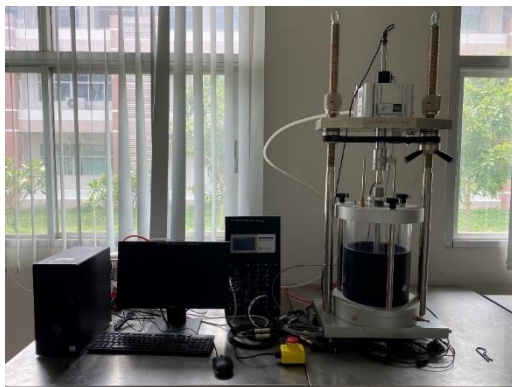
การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
ค่าการยุบตัว	การยุบตัวของ CLSM ที่ 0 30 60 และ 90 นาที่หลังจากผสม CLSM	ASTM C 1611
ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่	การไหลแผ่ของ CLSM ที่ 0 30 60 และ 90 นาที่หลังจากผสม CLSM	ASTM C 1611
ระยะเวลาการก่อตัว	การหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM	ASTM C 403
การเยิ้ม	การเยิ้มน้ำในผิวหน้าของ CLSM หลังจากผสม 30 นาที่	ASTM C 232
หน่วยน้ำหนัก	หน่วยน้ำหนักของ CLSM	ASTM C 138
กำลังรับแรงอัดแกนเดียว	กำลังอัดที่ 7 14 28 60 และ 90 วัน หลังจากผสม CLSM	ASTM D 2166

ตาราง 14 (ต่อ)

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
โมดูลัสคืนตัว	โมดูลัสคืนตัวของ CLSM ที่ 7 14 และ 28 วัน	AASHTO T 307
การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรโซแนนซ์อิสระ	ทดสอบหาความเร็วเฉือนของ CLSM ที่ 7 14 และ 28 วัน	มาตรฐาน/ งานวิจัย (Chompoorat, et al., 2019)
X-ray fluorescence (XDF) Scanning electron microscope (SEM) energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)	องค์ประกอบธาตุทางเคมีของวัสดุ ลักษณะสัณฐานและลักษณะพื้นผิว ของตัวอย่าง วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยจะนำ ตัวอย่างที่ดีที่สุดไปทำการทดสอบ	

2.7 โมดูลัสคืนตัว (resilient modulus test) เมื่อตัวอย่าง CLSM ครบอายุบ่มตัวที่ 7 14 และ 28 วัน วางบนแท่นรองที่มีความขรุขระประกบทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นทำการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยเยื่อห่อหุ้ม ดังแสดงในภาพ 33 แล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องวัดระยะ (linear variable differential transformer, LVDT) จำนวน 2 ตัว ซึ่งเครื่อง LVDT จะติดตั้งเป็นเส้นทแยงมุมระหว่างกัน ดังแสดงในภาพ 34 เพื่อตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้มีลักษณะคงที่ หลังจากติดตั้งเสร็จจึงเริ่มการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ การประมวลผลเริ่มจากลำดับการให้แรงกระทำที่ 1 ถึงลำดับที่ 15 โดยแต่ละลำดับการให้แรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า คือ ความเค้นโอบรัด (confining stress) ความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) และความเค้นสัมผัส (contact stress) การเปลี่ยนแปลงของการให้แรงแต่ละลำดับของเครื่องนั้นจะให้แรงและถอนแรง จำนวน 100 รอบ ใน 1 ลำดับการทดสอบจนถึงลำดับที่ 15 หรือตัวอย่างที่ทำการทดสอบเกิดการพังทลายจึงหยุดการทดสอบ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวนิยามจากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, σ_d) กับความเครียดคืนตัว (resilient strain, ϵ_r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_r \quad (2)$$



ภาพ 33 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว



ภาพ 34 การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ

2.8 การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant frequency method) นำตัวอย่าง CLSM ครบอายุบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน แขนงกับโครงเหล็ก โดยให้ตัวอย่างลอยขึ้นจากพื้น และทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นกับตัวอย่าง CLSM แล้วทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็ว โดยสามารถค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนจากสมการที่ 3 และ 4

$$E_0 = \rho v_p^2 = \rho(2Lf_L)^2 \quad (3)$$

$$G_0 = \rho v_s^2 = \rho(2Lf_r)^2 \quad (4)$$

เมื่อ E_0 คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น G_0 คือ ค่าโมดูลัสเฉือน L คือ ความยาวของตัวอย่าง f_L คือ ความถี่ตามแนวยาว และ f_r คือ ความถี่ตามแนวขวาง

2.9 การทดสอบ x-ray fluorescence (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ธาตุที่อยู่ใน CLSM โดยวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพด้วยการยิงรังสีเอ็กซ์เข้าสู่ตัวอย่าง ทำให้ธาตุตกกลืน

รังสีเอ็กซ์จากนั้นคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายออกมามีค่าพลังงานตรงกับธาตุนั้น ๆ ทำให้สามารถแยกได้ว่าตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

2.10 การทดสอบ scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค

2.11 การทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX) เป็นการวิเคราะห์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างด้วยสเปกโตรเมตรีหรือรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low strength material, CLSM) ด้วยวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างผิวทาง โดยทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด และโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์หลักสำหรับใช้ออกแบบผิวทาง นอกจากนี้ยังศึกษาความเร็วคลื่น (wave velocity) ด้วยวิธีเรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant, FFR) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นความเร็วใน CLSM กับกำลังรับแรงอัด และค่าโมดูลัสคืนตัว

คุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรีไซเคิล

1. คุณสมบัติทางกายภาพของ เถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรีไซเคิล

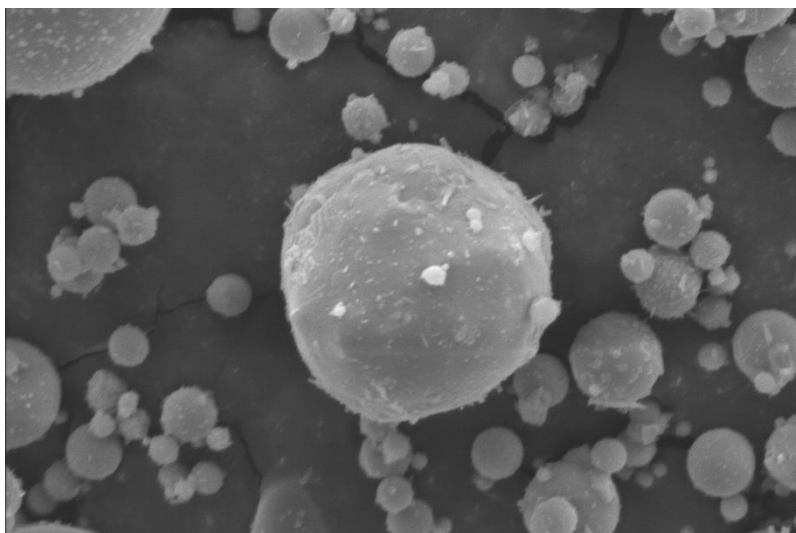
การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นตามมาตรฐาน สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Material, ASTM) โดยทดสอบการหาขนาดผลของวัสดุการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ การทดสอบหาความหนาแน่น และการทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำ ในการทดสอบหาขนาดของวัสดุ พบว่า เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก และร้อยละการดูดซึมน้ำ แสดงในตาราง 15 โดยเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ 2.51 เถ้าหนักมีความถ่วงจำเพาะ 2.65 เศษแก้ว 2.72 และคอนกรีตรีไซเคิล 2.69 เถ้าลอยมีหน่วยน้ำหนัก $1,343 \text{ kg/m}^3$ เถ้าหนักมีหน่วยน้ำหนัก $1,395 \text{ kg/m}^3$ เศษแก้วมีหน่วยน้ำหนัก $1,542 \text{ kg/m}^3$ และคอนกรีตรีไซเคิลมีหน่วยน้ำหนัก $1,645 \text{ kg/m}^3$ นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอยมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.36 เถ้าหนักมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.29 เศษแก้วมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.56 และคอนกรีตรีไซเคิลมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.91

(Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์(CaO) เท่ากับร้อยละ 7.08 1.31 0.00 และ 47.54 ตามลำดับ และคอนกรีตรีไซเคิลมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เพอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์(CaO) เท่ากับร้อยละ 28.92 10.42 7.93 และ 4.92 ตามลำดับ การวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี XRF ทำให้พบว่า เถ้าหนักมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงที่สุด

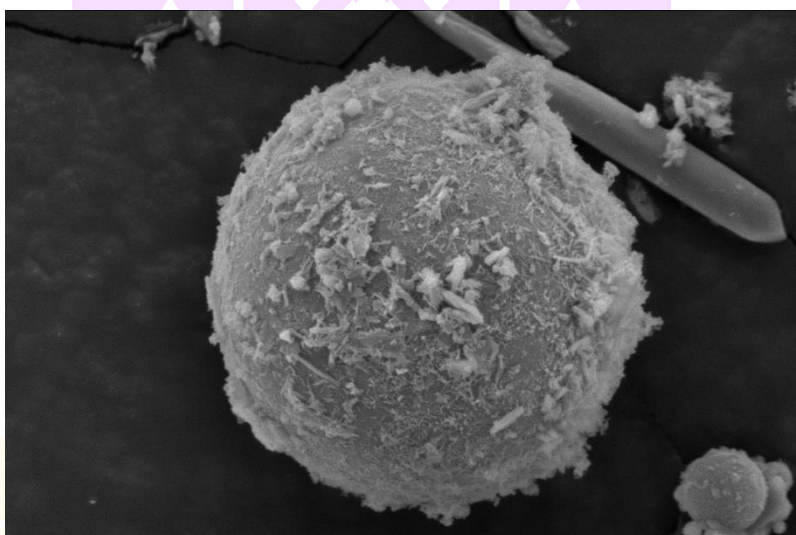
ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย เถ้าหนัก เศษแก้ว และคอนกรีตรีไซเคิล

	ร้อยละโดยมวล			
	เถ้าลอย	เถ้าหนัก	เศษแก้ว	คอนกรีต รีไซเคิล
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO ₂)	27.19	25.86	41.92	28.98
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, Al ₂ O ₃)	19.43	18.74	38.35	10.42
เพอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe ₂ O ₃)	13.49	15.85	0.00	7.93
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO)	25.64	25.81	7.91	47.74
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO)	2.18	2.74	2.60	0.68
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide, Na ₂ O)	4.58	3.88	8.66	1.79
โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide, K ₂ O)	6.06	5.86	0.56	0.00
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorous oxide, P ₂ O ₅)	1.43	1.26	0.00	2.46

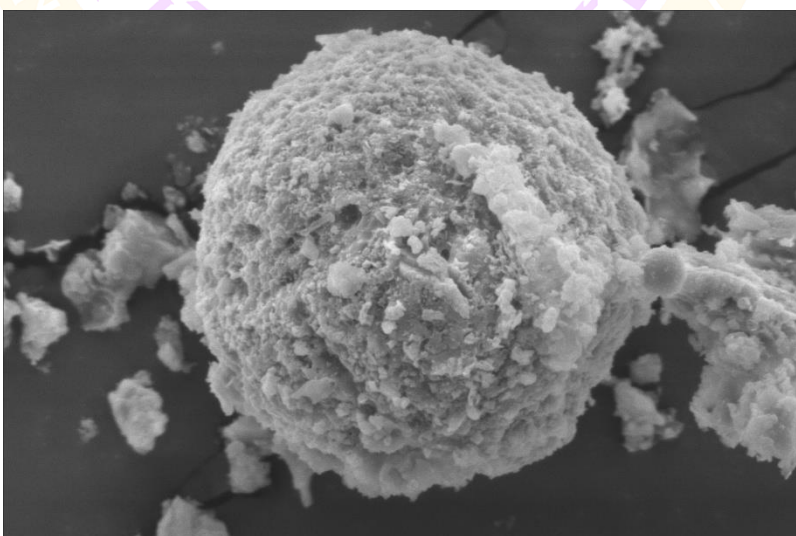
การวิเคราะห์อนุภาพของเถ้าลอย เถ้าหนัก และคอนกรีตรีไซเคิลจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) พบว่าอนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะค่อนข้างกลม และผิวเรียบ ดังแสดงภาพ 36(a) อนุภาคของเถ้าหนักที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะกลมผสมกับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผืนกึ่ง ดังแสดงที่ภาพ 36(b) อนุภาคของคอนกรีตรีไซเคิลที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะค่อนข้างกลม ผิวค่อนข้างขรุขระ ดังแสดงที่ภาพ 36 (c) และอนุภาคของเศษแก้วกำลังขยาย $\times 15,000$ เป็นรูปทรงผลึก ดังแสดงภาพ 36(d)



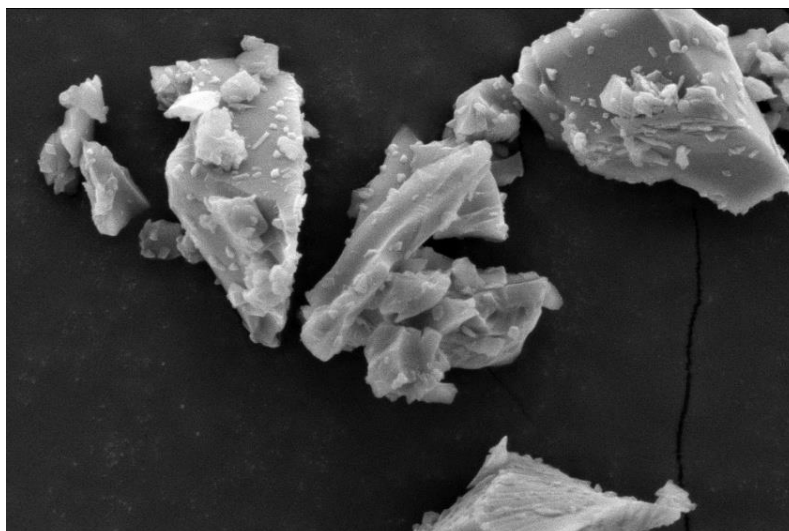
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพ 36 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง SEM ของ เถ้าลอย (a) เถ้าหนัก (b) คอนกรีตรีไซเคิล (c) และเศษแก้ว (d)

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM

การทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM เป็นไปตามสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (American association of state highway and transportation officials, AASHTO) และมาตรฐาน ASTM โดยได้ทำการทดสอบ การยุบตัว (ASTM C1611, 2014) การยุบตัวแบบไหลแผ่ (ASTM C1611, 2014) ระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C403, 2001) การเข้มน้ำ (ASTM C232, 2014)

1. การยุบตัว

ในการทดสอบการยุบตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2014) โดยตัวอย่างสำหรับการทดสอบ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน (เศษแก้วและเถ้าลอย) ที่ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ เพื่อหาอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม และกลุ่มที่ 2 ใช้มวลรวมที่แตกต่างกันระหว่างเถ้าหนักกับเศษคอนกรีตรีไซเคิล เพื่อหามวลรวมที่เหมาะสม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ที่เท่ากัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในตาราง 17 พบว่าช่วงเวลาหลังผสมเสร็จทันที (0.0 hr.) ของ CLMS กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างที่ 1 2 3 และ 4 เลือกใช้มวลรวมจากกลุ่มที่ 2 เป็นเถ้าหนักมีการยุบตัวอย่างระหว่าง 25-29 cm โดยตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีการยุบตัวมากกว่าตัวอย่างที่ 3 ประมาณ 1-2 cm และกลุ่มที่ 1 ตัวอย่างที่ 5 6 7 และ 8 เลือกใช้

มวบรวมจากกลุ่มที่ 2 เป็นเศษคอนกรีตไร้เหล็กมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 26-29 cm ซึ่งค่าการยุบตัวของแต่ละตัวอย่างใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 25-29 cm เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น (30 นาที ขึ้นไป) ค่าการยุบตัวลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) ทำให้ปริมาณน้ำใน CLSM ลดลง ส่งผลให้มีค่าการยุบตัวลดลง

ตาราง 17 การยุบตัวของ CLSM

Mix	Symbol	Slump (cm.)				
		0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	AA10/WGP00/BA1.5	29	28	28	27	27
2	AA10/WGP20/BA1.5	29	28	27	27	26
3	AA10/WGP30/BA1.5	28	27	27	27	26
4	AA10/WGP40/BA1.5	28	28	27	26	25
5	AA10/WGP00/RCA1.5	29	29	28	28	28
6	AA10/WGP20/RCA1.5	28	28	27	27	26
7	AA10/WGP30/RCA1.5	29	29	28	27	26
8	AA10/WGP40/RCA1.5	29	28	27	27	26

2. การยุบตัวแบบไหลแผ่

ในการทดสอบการยุบตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2014) โดยตัวอย่างสำหรับการทดสอบ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน (เศษแก้วและเถ้าลอย) ที่ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ เพื่อหาอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม และกลุ่มที่ 2 ใช้มวลรวมที่แตกต่างกันระหว่างเถ้าหนักรับกับคอนกรีตไร้เหล็ก เพื่อหามวลรวมที่เหมาะสม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ที่เท่ากัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 18 พบว่าช่วงเวลาหลังผสมเสร็จทันที (0.0 hr.) ของ CLMS กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างที่ 1 2 3 และ 4 เลือกใช้มวลรวมจากกลุ่มที่ 2 เป็นเถ้าหนักรับมีค่าการยุบแบบไหลแผ่ตัวอย่างระหว่าง 50-86 ส่วนตัวอย่างที่เลือกใช้มวลรวมจากกลุ่มที่ 2 เป็นเศษคอนกรีตไร้เหล็กมีค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่อย่างระหว่าง 49-91 cm จากมาตรฐานคอนกรีตที่สามารถบดได้ด้วยตัวเอง (EFNARC, 2002) ระบุว่าค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของคอนกรีตบดด้วยตัวเองต้องมีค่าการไหลแผ่หลังจากผสมเสร็จทันทีมากกว่า 65 cm

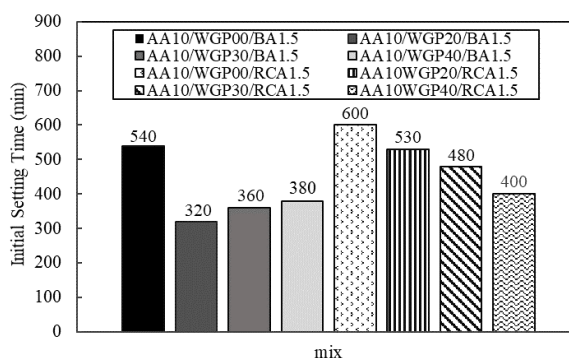
ตาราง 18 การยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM

Mix	Symbol	Slump (cm.)				
		0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	AA10/WGP00/BA1.5	86	78	75	72	71
2	AA10/WGP20/BA1.5	75	70	67	66	63
3	AA10/WGP30/BA1.5	72	67	62	57	53
4	AA10/WGP40/BA1.5	67	61	57	53	50
5	AA10/WGP00/RCA1.5	91	75	67	63	61
6	AA10/WGP20/RCA1.5	77	62	59	55	51
7	AA10/WGP30/RCA1.5	76	67	62	57	52
8	AA10/WGP40/RCA1.5	69	63	56	53	49

3. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM ตามมาตรฐาน ASTM C403 (2016) โดยมีการทดสอบอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน (เศษแก้วและเถ้าลอย) ที่ 0 0.20 0.30 และ 0.40 และใช้มวลรวมที่แตกต่างกันระหว่างเถ้าหนักกับคอนกรีตรีไซเคิล ผลการทดสอบแสดงดังภาพ 35 โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 ที่ใช้มวลรวมคือ เถ้าหนักหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิล มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 540 และ 600 นาที ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.20 ที่ใช้มวลรวมคือ เถ้าหนักหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิล มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 320 และ 530 นาที ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.30 ที่ใช้มวลรวมคือ เถ้าหนักหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิล มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 360 และ 480 นาที และตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ใช้มวลรวม คือ เถ้าหนักหรือเศษคอนกรีตรีไซเคิล มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 380 และ 400 นาที ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง และอัตราส่วนผสมที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มตุน้อยกว่าอัตราส่วนผสมที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิล เนื่องจากเถ้าหนักมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าคอนกรีตรีไซเคิล และเถ้าหนักมีปริมาณแคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) มากกว่าคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลต่อการทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium

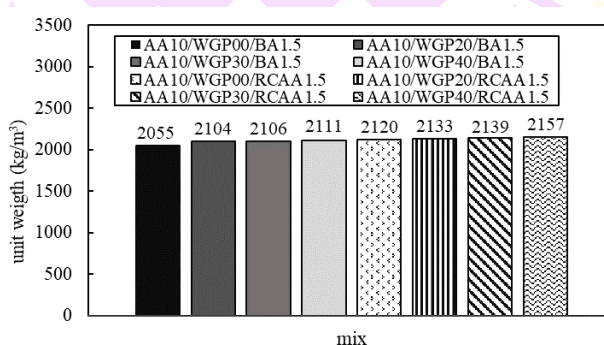
aluminosilicate, C-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, CSH) ในโครงสร้างของ CLSM (Fernandez-Jimenez and Puertas, 2001)



ภาพ 37 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM

4. หน่วยน้ำหนัก

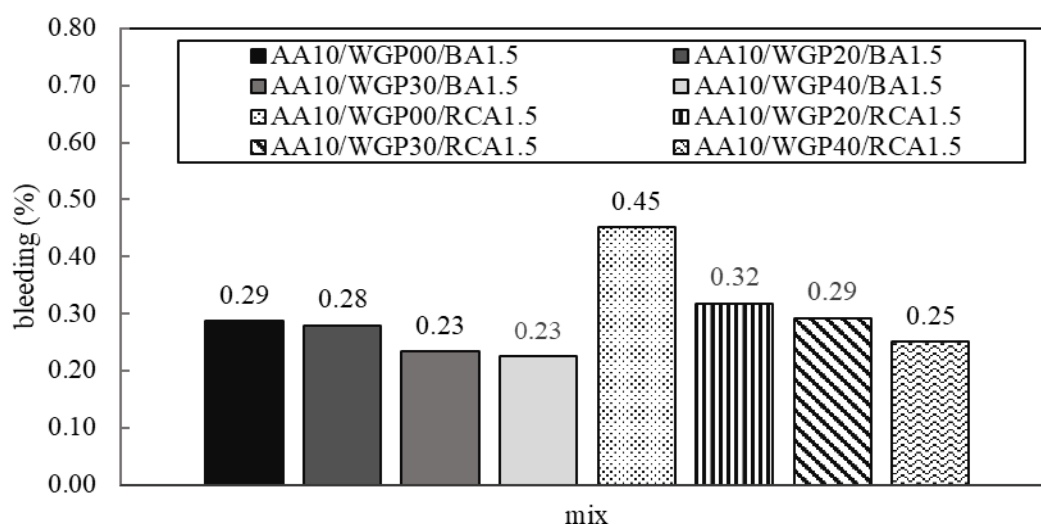
การหาค่าหน่วยน้ำหนักของ CLSM ตามมาตรฐานของ ASTM C138 (2001) ผลการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของ CLSM แสดงดังภาพ 38 มีค่าอยู่ระหว่าง 2,055-2,157 kg/m³ โดยตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้ว 0 0.20 0.30 และ 0.40 มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามลำดับ และกลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิล โดยตัวอย่างที่ใช้ อัตราส่วนร้อยละเศษแก้ว 0 ที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด



ภาพ 38 หน่วยน้ำหนักของ CLSM

5. การเยิ้ม

การทดสอบการเยิ้มของ CLSM อ้างอิงมาตรฐานของ ASTM C232 (2014) การเยิ้มคือการคายน้ำจากส่วนผสม CLSM ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาพบว่ามีส่วนบางส่วนจะถูกดันให้ลอยตัวขึ้นมาบนผิวของ CLSM เนื่องจากการจมลงของ เถ้าลอย เศษแก้ว เถ้าหนัก หรือคอนกรีตรีไซเคิล ผลการทดสอบการเยิ้มของ CLSM ซึ่งใช้เศษแก้วต่อวัสดุประสานที่แตกต่างเพิ่มกันร้อยละ 0 20 30 และ 0.40 ที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่าร้อยละการเยิ้มเท่ากับ 0.29 0.28 0.23 และ 0.23 และกลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าร้อยละการเยิ้มเท่ากับ 0.45 0.32 0.29 และ 0.25 ดังแสดงในภาพ 39 การเพิ่มเศษแก้วทำให้ผลของการเยิ้มน้ำลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันสูงขึ้น จึงทำให้การเยิ้มน้ำลดลง (Yip, 2004) ตัวอย่าง AA10/WGP00/BA1.5 ร้อยละการเยิ้มน้ำเท่ากับ 0.28 เมื่อทำการเทียบกับตัวอย่าง AA10/WGP30/BA1.5 ร้อยละการเยิ้มน้ำเท่ากับ 0.23 พบว่า เมื่อร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้การเยิ้มน้ำลดลง และตัวอย่าง AA10/WGP20/BA1.5 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ AA10/WGP20/RCA1.5 พบว่า มีค่าร้อยละการเยิ้มน้ำน้อยที่สุด เท่ากับ 0.23 เนื่องจากเถ้าหนักมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตรีไซเคิล และเถ้าหนักยังมีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) มากกว่าคอนกรีตรีไซเคิล



ภาพ 39 เปอร์เซนต์การเยิ้มน้ำของ CLSM

จากตาราง 19 แสดงถึงการสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM โดยตารางผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนร้อยละเศษแก้วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CLSM มีคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมดีขึ้น

ตาราง 19 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM

Mix	Symbol (water/binder)	Slump flow (cm.)	Setting time (min.)		Bleeding		Unit weight (kg/m ²)
			Initial	Final	Min.	%	
1	AA10/WGP00/BA1.5	86	540	720	30	0.29	2,055
2	AA10/WGP20/BA1.5	75	320	420	30	0.28	2,104
3	AA10/WGP30/BA1.5	72	360	390	30	0.23	2,106
4	AA10/WGP40/BA1.5	67	380	360	30	0.23	2,111
5	AA10/WGP00/RCA1.5	91	600	810	30	0.45	2,120
6	AA10/WGP20/RCA1.5	77	530	750	30	0.32	2,133
7	AA10/WGP30/RCA1.5	76	480	720	30	0.29	2,139
8	AA10/WGP40/RCA1.5	69	400	660	30	0.25	2,157

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังสำหรับนำไปใช้ในวิศวกรรมผิว (pavement engineering) ของ CLSM ประกอบไปด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ASTM D2166, 2016) โมดูลัสคั้นตัว (AASHTO T307, 2007) และโรโซแนนซ์อิสระ (Chompoorat, et al., 2019)

1. กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

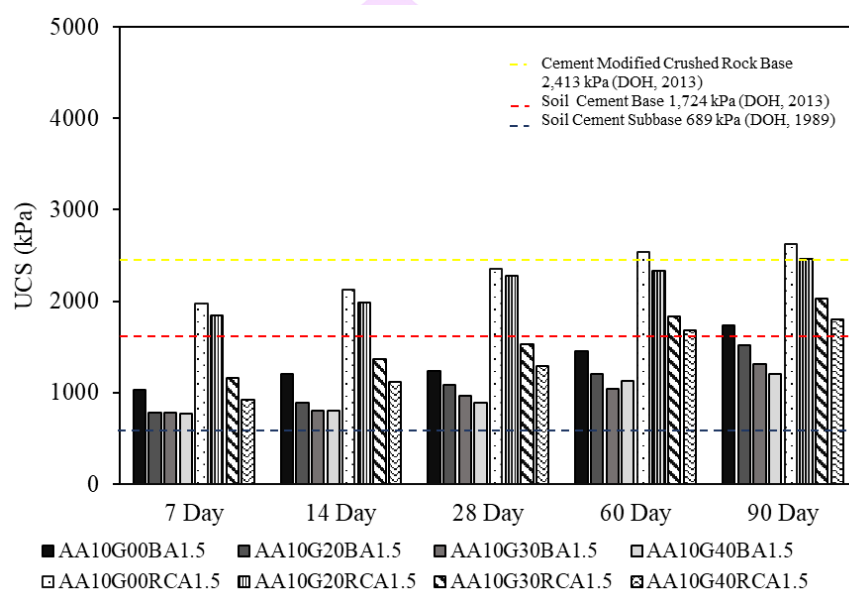
การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว อ้างอิงมาตรฐานของ ASTM D2166 (2016) โดยผลการทดสอบ กำลังรับแรงอัดของ CLSM ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ ที่อายุบ่มตัว 7 14 28 60 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 1,031 783 782 และ 765 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 1,210 885 804 และ 800 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 1,242 1,088 969 และ 887 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 1,451 1,205 1,046 และ 1,126 kPa ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 1,733 1,522 1,308 และ 1,203 kPa ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ใช้มวลรวม เป็นคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ ที่อายุบ่มตัว 7 14 28 60 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 1,977 1,847 1,159 และ 919 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 2,122 1,986 1,371 และ 1,121 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2,353 2,273 1,532 และ 1,287 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่

60 วัน มีค่าเท่ากับ 2,544 2,333 1,833 และ 1,677 kPa ตามลำดับ และกำลังแรงอัดที่ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 2,626 2,466 2,027 และ 1,804 kPa ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 40 และตาราง 20 กำลังรับแรงอัดของ CLSM ลดลงตามปริมาณอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 0.20 0.30 และ 0.40 กลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดลดลงเท่ากับ 1,031 783 782 และ 765 kPa ส่วนกลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นเศษคอนกรีตที่อายุบ่มตัว 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดลดลงเท่ากับ 1,977 1,847 1,159 และ 919 kPa ตามลำดับ และมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่มตัว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง (Tawatchai, et al., 2017) อีกทั้ง CLSM ยังเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นวัสดุยืดหยุ่นทางเลือกใหม่แทนซีเมนต์ ซึ่งผลิตขึ้นโดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของวัสดุอลูมิโนซิลิเกตด้วยสารละลายอัลคาไล (Davidovits, 1991) สารละลายอัลคาไลที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ โซเดียม (Na) หรือโพแทสเซียม (K) วัสดุต้นกำเนิดควรมีปริมาณซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียมสูง (Al) เช่น มาจากแหล่งธรณีวิทยาหรือวัสดุเหลือทิ้ง เถ้าลอย มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุแหล่งของจีโอโพลิเมอร์ โดยจีโอโพลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอลูมิโนซิลิเกต (Al-Si) ที่มีอยู่ในวัสดุ เช่น เถ้าลอยและสารละลายอัลคาไล (เช่น NaOH, Na₂SiO₃) โดยจะเกิดการละลายของอะลูมินา (Al³⁺) และซิลิกา (Si⁴⁺) ออกมาในรูปโมเลกุลเชิงซ้อน แล้วรวมตัวกันเป็นเจล N-A-S-H (Sodium-Alumino-Silicate Hydrate) หรือ C-A-S-H (Calcium-Alumino-Silicate Hydrate) ซึ่งเป็นโครงข่ายหลักที่ให้ความแข็งแรงแก่จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งแก้วเป็นวัสดุของเสียที่มีปริมาณซิลิกา (SiO₂) อยู่มาก มักอยู่ในรูปแบบแอมอร์ฟัส (amorphous silica) ซึ่งมีความไวต่อด่าง (alkaline reactivity) มากกว่าผงแร่คริสตัลไลน์ทั่วไป โดยเมื่อผงแก้วสัมผัสกับสารละลายด่าง (เช่น NaOH, Na₂SiO₃) จะเกิดเป็นไฮดรอกซิลิเกต SiO₂(amorphous)+2NaOH → Na₂SiO₃+H₂O อีกทั้งยังมีการควบแน่นของโพลิเมอร์ (Polycondensation) หลังจากซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ถูกชะละลายจะเกิดพันธะระหว่างไฮดรอกซิลิเกตและอะลูมิเนียม Si(OH)₄+Al(OH)₄⁻ → Si-O-Al ส่งผลให้เกิด C-A-S-H

กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 วันเดียวกันของ CLSM ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ มีค่าผ่านมาตรฐาน รองพื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 689 kPa และ 1,724 kPa ดังแสดงในภาพ 4.8

ภาพ 41(a) แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ของตัวอย่างที่ AA10/WGP00/RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน พบว่า บริเวณผิวของ CLSM มี CSH กระจายตัวอยู่และยังพบเอททริงไต์ (Ettringite, Et) มีลักษณะคล้ายเข็มเล็ก ๆ ก่อตัวขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของ CLSM อัดตัวแน่นขึ้น ภาพ 41 (b) แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ภาพ 41(c) แสดงภาพถ่าย SEM

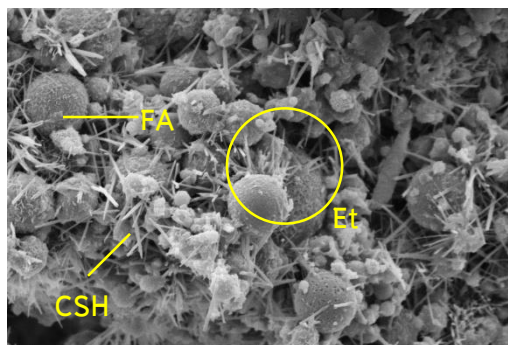
ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ของ AA10/WGP20/RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน พบ CSH และ Et ดังแสดงในภาพ 41(d) และตาราง 21 พบว่า AA10/WGP00/RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน มีค่า Ca/Si ลดลงจาก 2.41 เป็น 1.58 และมี Si/Al ลดลงจาก 1.04 เป็น 1.75 แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการเกิดปฏิกิริยาของ CLSM (El-Hassan and Elkholy, 2019)



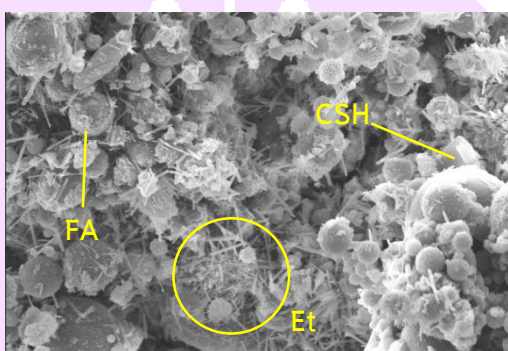
ภาพ 40 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM

ตาราง 20 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 และ 8

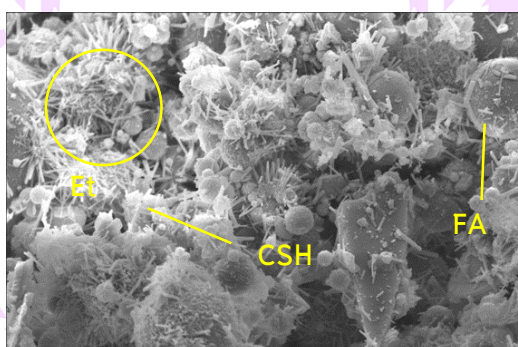
MIX	Symbol (water/binder)	Unconfined compression (kPa)				
		7 day	14 day	28 day	60 day	90 day
1	AA10G00BA1.5	1,031	1,210	1,242	1,451	1,733
2	AA10G20BA1.5	783	885	1,088	1,205	1,522
3	AA10G30BA1.5	782	804	969	1,046	1,308
4	AA10G40BA1.5	765	800	887	1,126	1,203
5	AA10G00RCA1.5	1,977	2,122	2,353	2,544	2,626
6	AA10G20RCA1.5	1,847	1,986	2,273	2,333	2,466
7	AA10G30RCA1.5	1,159	1,371	1,532	1,833	2,027
8	AA10G40RCA1.5	919	1,121	1,287	1,677	1,804



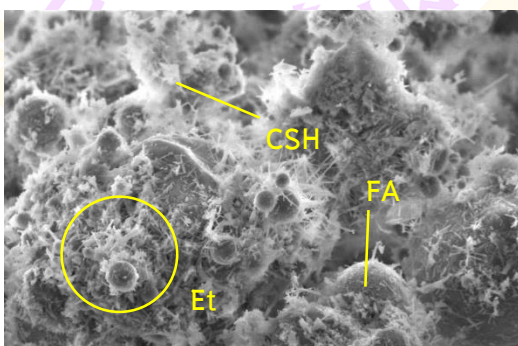
(a)



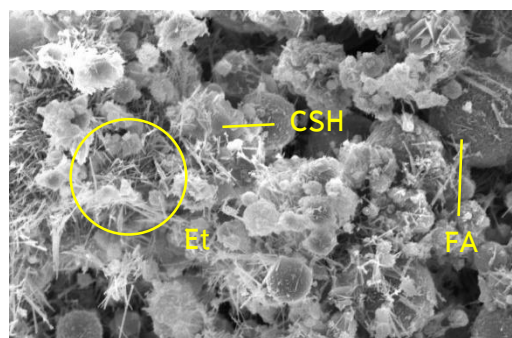
(b)



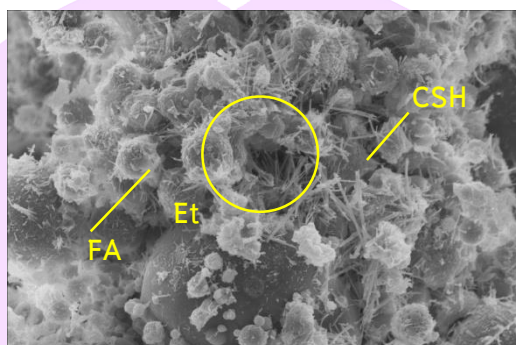
(c)



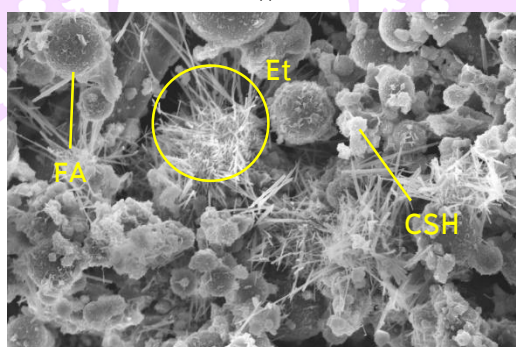
(d)



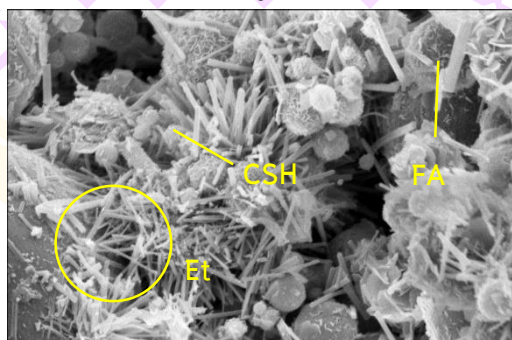
(e)



(f)

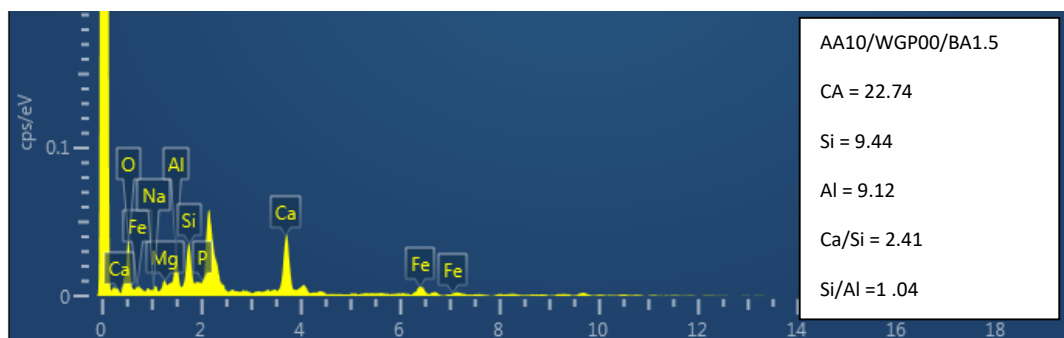


(g)

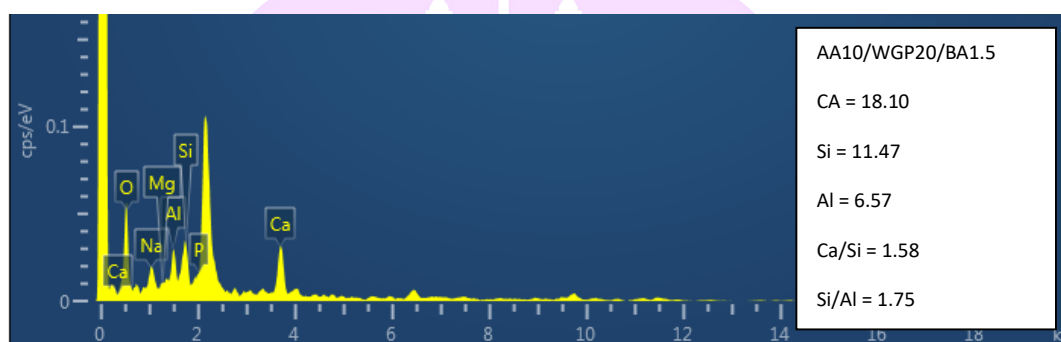


(h)

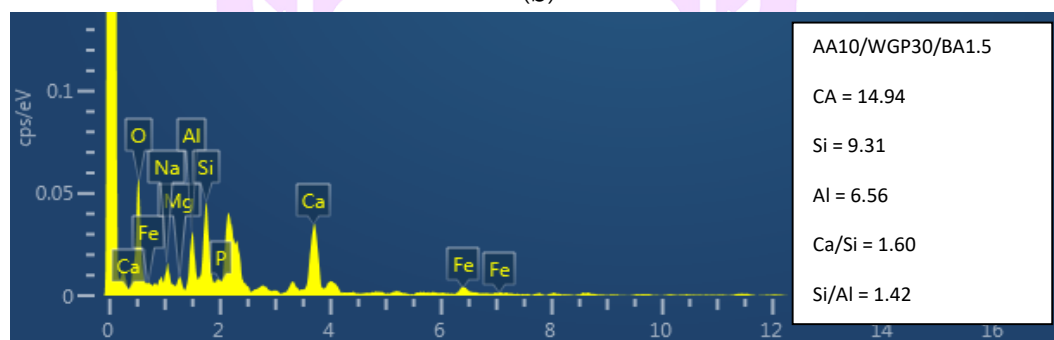
ภาพ 41 ภาพถ่าย SEM (a) AA10/WGP00/BA1.5 (b) AA10/WGP20/BA1.5
 (c) AA10/WGP30/BA1.5 (d) AA10/WGP40/BA1.5 (e)
 AA10/WGP00/RCA1.5 (f) AA10/WGP20/RCA1.5 (g) AA10/WGP00/
 RCA1.5 (h) AA10/WGP00/ RCA1.5 ที่อายุปมตัว 28 วัน



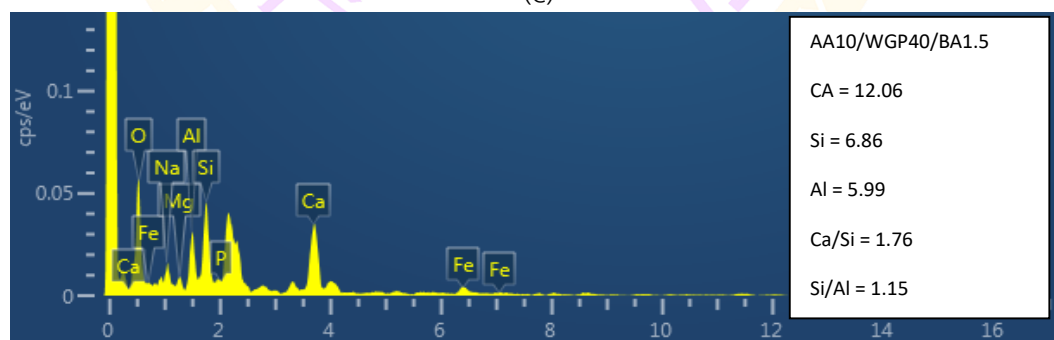
(a)



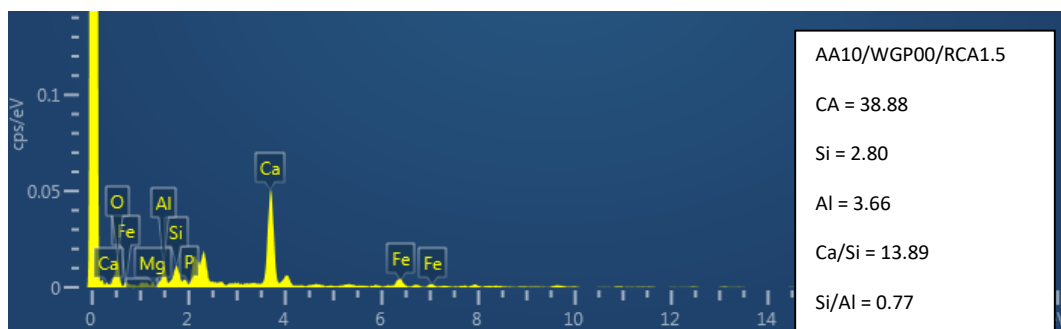
(b)



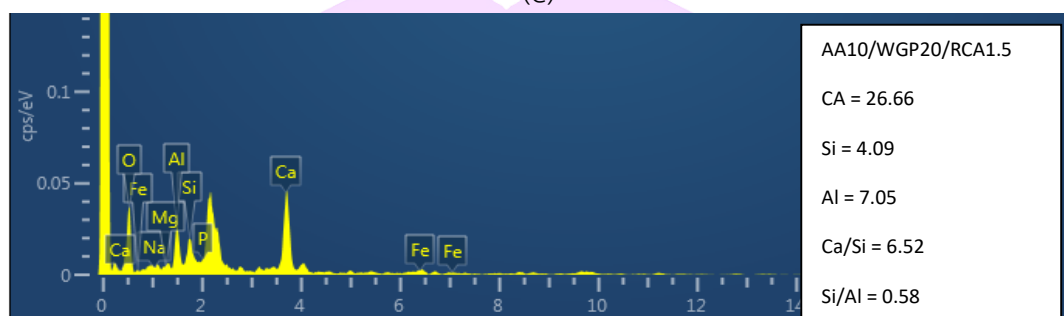
(c)



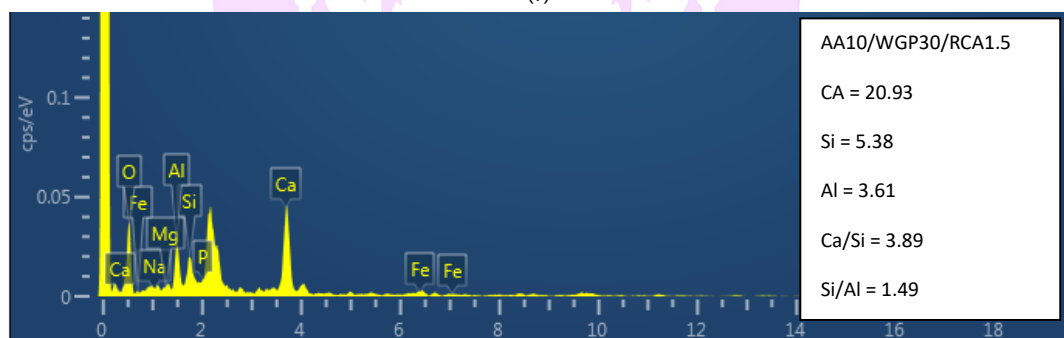
(d)



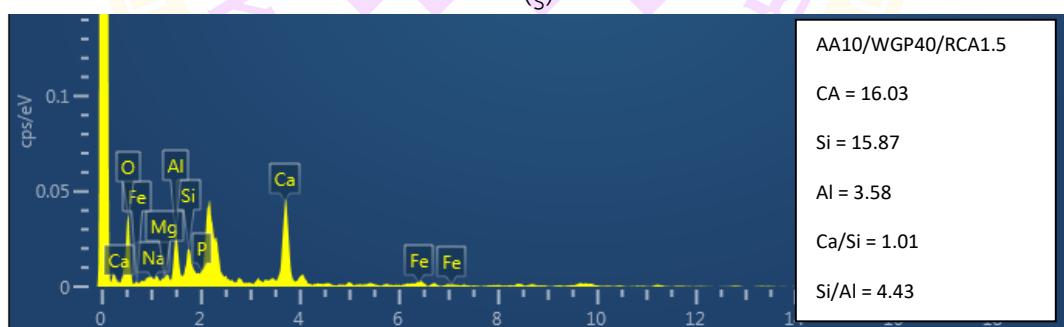
(e)



(f)



(g)



(h)

ภาพ 42 ผลการทดสอบ EDS(a) AA10/WGP00/BA1.5 (b) AA10/WGP20/BA1.5

c) AA10/WGP30/BA1.5 (d) AA10/WGP40/BA1.5 (e) AA10/WGP00/RCA1.5

(f) AA10/WGP20/RCA1.5 (g) AA10/WGP00/ RCA1.5 (h) AA10/WGP00/

RCA1.5 ที่อายุบ่มตัว 28 วัน

ตาราง 21 ผลการทดสอบ EDS

Mix	CaO	Si	Al	Ca/Si	Si/Al
AA10/WGP00/BA1.5	22.74	9.44	9.12	2.41	1.04
AA10/WGP20/BA1.5	18.10	11.47	6.57	1.58	1.75
AA10/WGP30/BA1.5	14.94	9.31	6.56	1.60	1.42
AA10/WGP40/BA1.5	12.06	6.86	5.99	1.76	1.15
AA10/WGP00/RCA1.5	38.88	2.80	3.66	13.89	0.77
AA10/WGP20/RCA1.5	26.66	4.09	7.05	6.52	0.58
AA10/WGP30/RCA1.5	20.93	5.38	3.61	3.89	1.49
AA10/WGP40/RCA1.5	16.03	15.87	3.58	1.01	4.43

2. การทดสอบโรโซแนนซ์อิสระ

การทดสอบโรโซแนนซ์อิสระเป็นการทดสอบหาความเร็วคลื่นของ CLSM โดยการใช้คลื่นสั้นพ้องอิสระเพื่อประเมินคุณสมบัติทางด้านการกำลั้ในรูปแบบพลศาสตร์ (dynamic) จากผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (compression wave velocity, V_p) ดังแสดงในภาพ 43(a) พบว่า ค่าคลื่นความเร็ว V_p ของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ต่างกันร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 373 400 และ 487 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 350 377 และ 439 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 322 363 และ 427 m/s ตามลำดับ และตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 305 332 และ 415 m/s ตามลำดับ ค่าความเร็วคลื่น V_p มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละเศษแก้ว และเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้เซลล์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 431 446 และ 503 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้เซลล์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 421 436 และ 498 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้เซลล์ที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 412

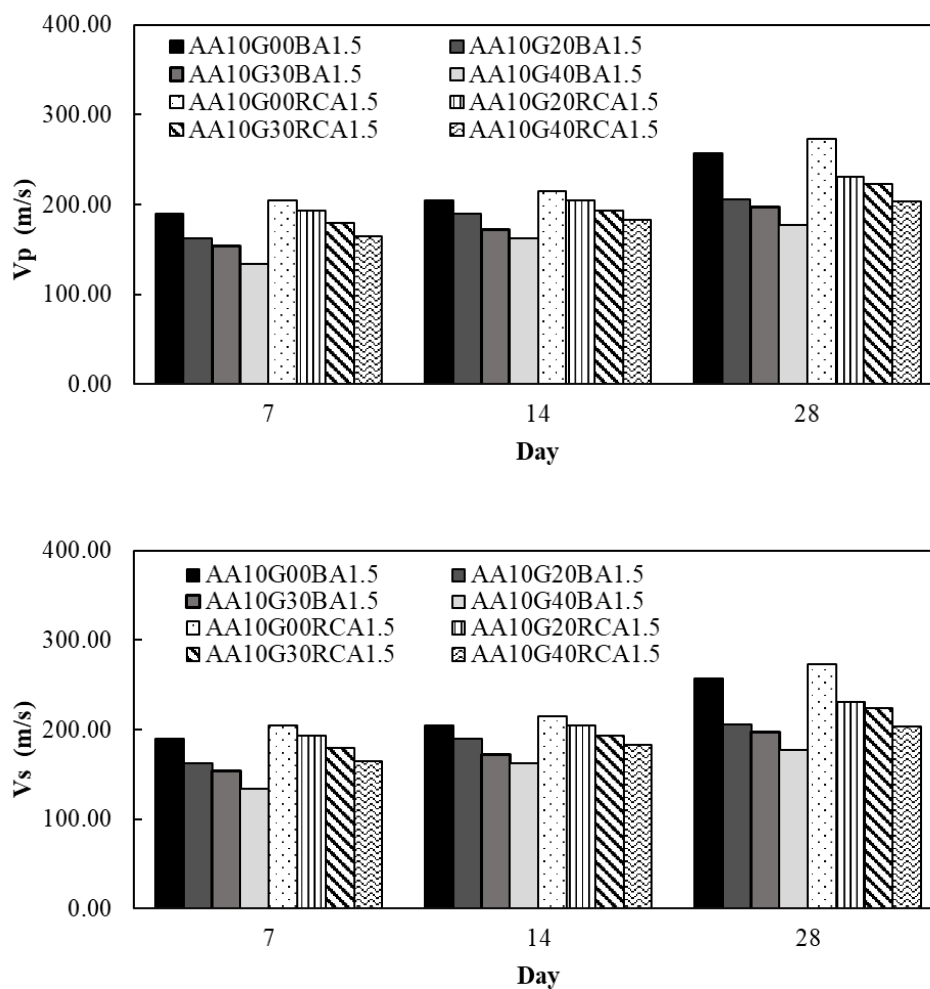
422 และ 486 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 407 414 และ 466 m/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างใช้ร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 0.20 0.30 และ 0.40 พบว่ามีค่าความเร็วคลื่น V_p ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 0.20 0.30 และ 0.40 และใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลมีค่าความเร็วคลื่น V_p มากกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนัก และการเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุ 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 305 332 และ 415 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเร็วคลื่น V_p น้อยที่สุด พบว่าการเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วทำให้ความเร็วคลื่น V_p มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (chompoorat, et al., 2021)

ผลการทดสอบค่าความเร็วทุดิยภูมิ (shear wave velocity, V_s) ดังแสดงในภาพ 43(b) พบว่า ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 190 204 และ 256 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 162 190 และ 205 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 154 172 และ 198 m/s ตามลำดับ และตัวอย่างใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 134 162 และ 177 m/s ตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 204 215 และ 273 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 193 204 และ 231 m/s ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 180 193 และ 223 m/s ตามลำดับ และตัวอย่างใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 165 182 และ 203 m/s ตามลำดับ พบว่าค่าความเร็วคลื่น V_s ลดลงตามปริมาณร้อยละเศษแก้ว และเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ค่าความเร็วคลื่น V_s ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 163 190 และ 205 m/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตริโซเคลที่อายุบ่มตัว

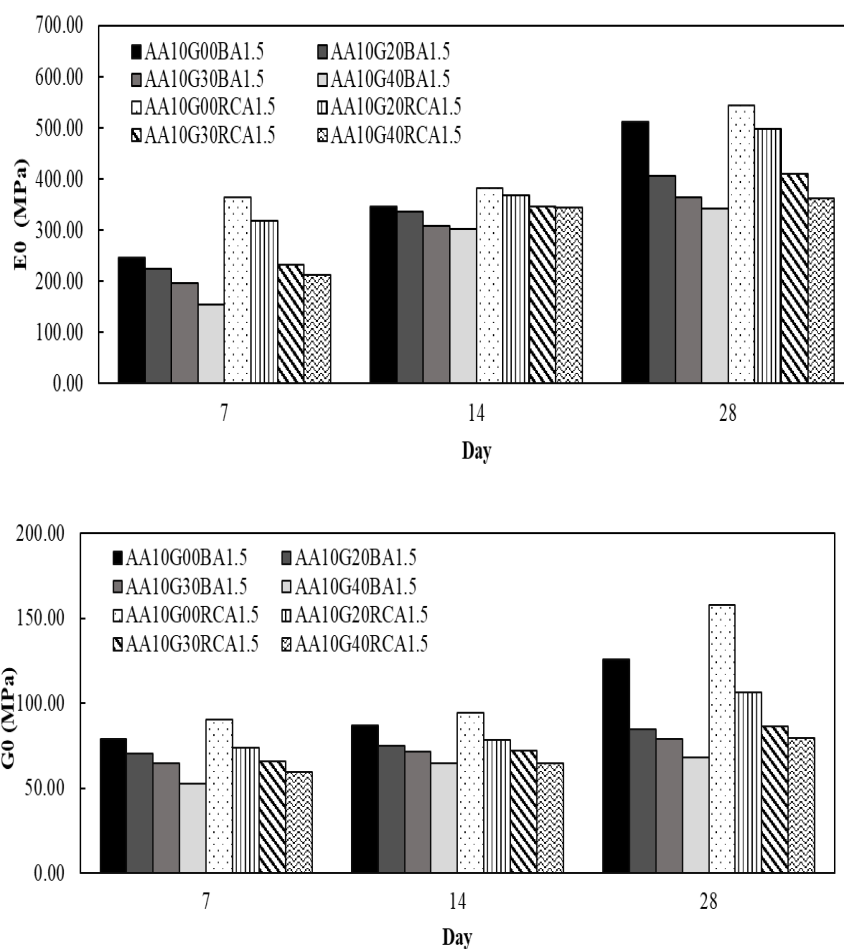
7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_s เท่ากับ 193 204 และ 231 m/s ตามลำดับ พบว่า มีค่าความเร็วคลื่น V_s ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลมากกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 20 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนัก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วทำให้ความเร็วคลื่น V_s ลดลง มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (chompoorat et al., 2021)

การทดสอบความเร็วคลื่น V_p ของ CLSM ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 ค่าความเร็วคลื่น V_p สามารถนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (initial young's modulus, E_0) ดังแสดงในภาพ 44(a) พบว่า E_0 ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 247 346 และ 512 MPa ตามลำดับ ค่า E_0 ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 224 336 และ 407 MPa ตามลำดับ ค่า E_0 ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 196 307 และ 364 MPa ตามลำดับ และ ค่า E_0 ของตัวอย่างใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 154 302 และ 343 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า E_0 ของกลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิล ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 364 381 และ 543 MPa ตามลำดับ ค่า E_0 ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 318 369 และ 497 MPa ตามลำดับ ค่า E_0 ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 233 347 และ 411 MPa ตามลำดับ และ ค่า E_0 ของตัวอย่างใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่า E_0 เท่ากับ 211 343 และ 362 MPa ดังแสดงในภาพ 44 ค่า E_0 มีค่าลดลงตามปริมาณอัตราส่วนร้อยละเศษแก้ว และเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัว ซึ่งสอดคล้องกับค่า V_p ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 431 446 และ 503 m/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่อายุบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน มีค่าความเร็วคลื่น V_p เท่ากับ 421 436 และ 498 m/s ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0 มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ

0.20 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเศษแก้วต่อวัสดุประสานผลส่งผลให้ค่า E_0 ลดลง อีกทั้งยังพบว่าที่อายุ 7 14 และ 28 ค่า E_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มตัว



ภาพ 43 ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับระยะเวลาบ่มของตัวอย่าง CLSM (a) v_p (b) v_s

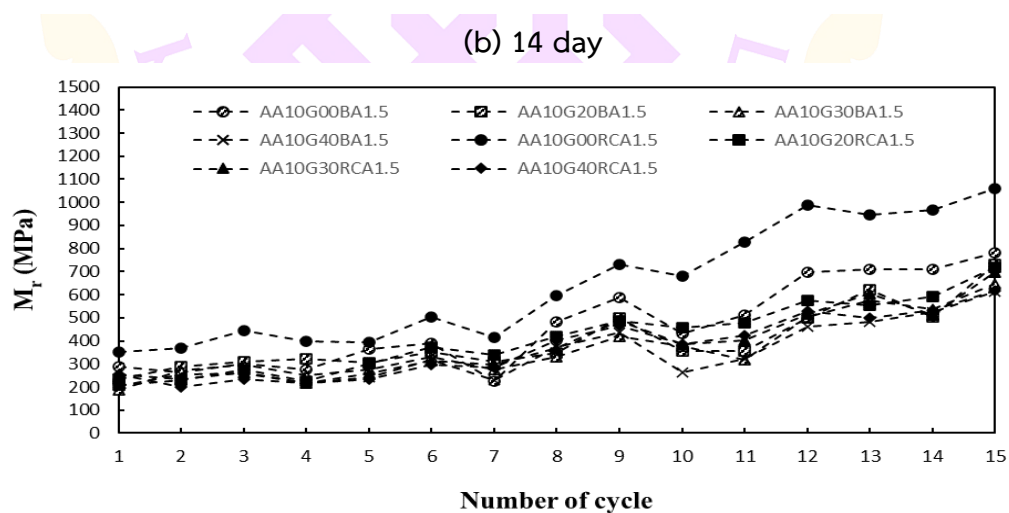
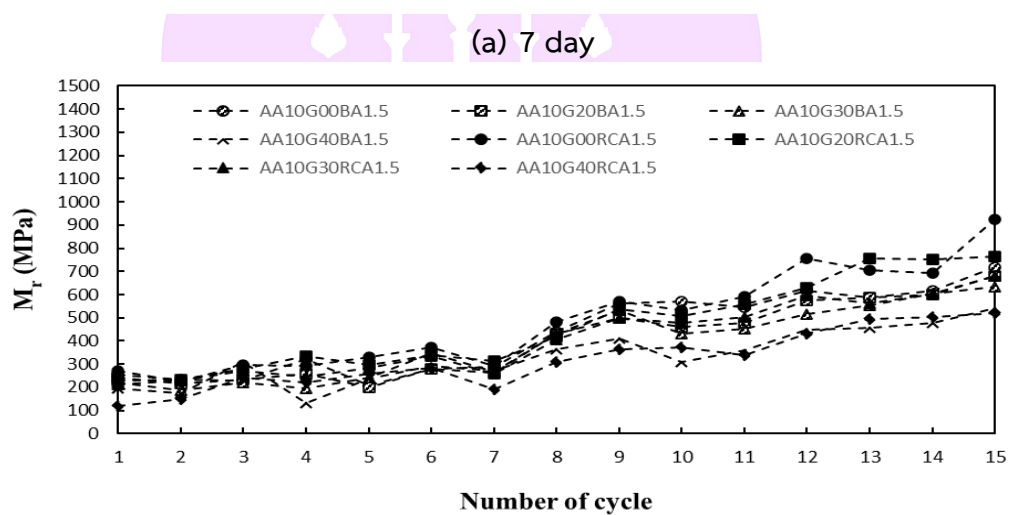
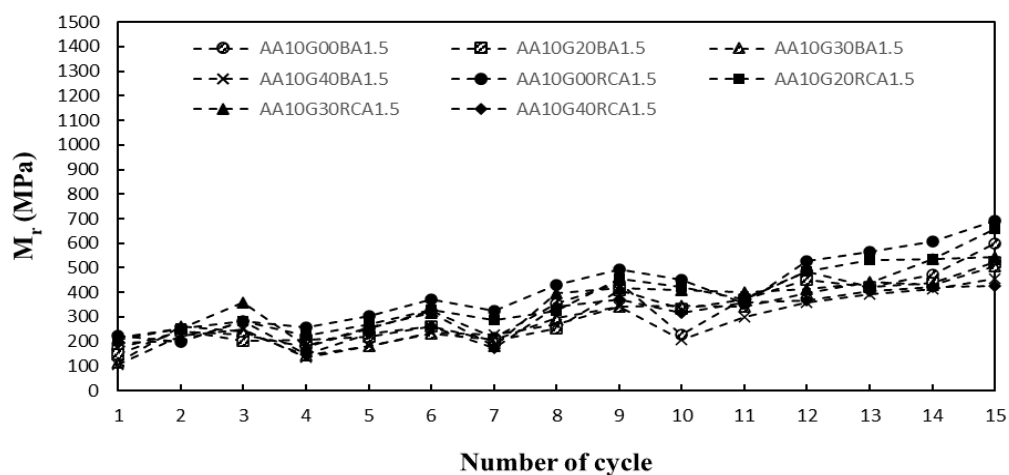


ภาพ 44 ความสัมพันธ์ของโมดูลัส กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่าง CLSM (a) E_0 (b) G_0

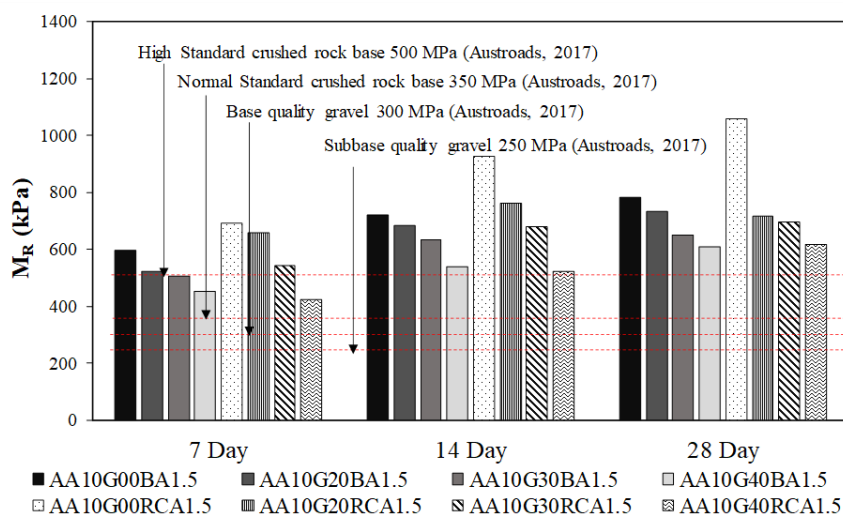
3. การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของ CLSM ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน ร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM มีการประมวลผลทั้งหมด 16 ลำดับ โดยลำดับที่ 1-15 ทำการทดสอบลำดับละ 100 รอบ โดยผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (deviator Stress,) และโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) จากผลการทดสอบ พบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพ 45(a) 45(b) และ 45(c) เนื่องจากความเค้นเบี่ยงเบนมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของ CLSM (chompoorat, et al., 2018)

จากภาพ 45(a) 45(b) และ 45(c) แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสคืบตัว และความเค้นเบี่ยงเบนที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน ของที่มีอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสานที่ต่างกันร้อยละ 0 0.20 0.30 และ 0.40 พบว่า ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 598 719 และ 782 MPa ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.20 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 523 682 และ 732 MPa ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.30 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 505 634 และ 649 MPa ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.40 ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 455 541 และ 611 MPa ตามลำดับ ส่วนกลุ่มของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิล มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 690 924 และ 1,059 MPa ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.20 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิล มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 657 763 และ 717 MPa ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.30 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิล มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 543 680 และ 696 MPa ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนร้อยละเศษแก้วต่อวัสดุประสาน 0.40 ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิล มีค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 425 522 และ 618 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์กับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิล พบว่ามีค่าโมดูลัสคืบตัวที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไร้ไซเคิลที่ค่าโมดูลัสคืบตัว มากกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ และการเพิ่มขึ้นของร้อยละเศษแก้วทำให้ค่าโมดูลัสคืบตัวน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการทดสอบโรโซแนนซ์อิสระ



ภาพ 45 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสคันทันตัวและความเค้นเบี่ยงเบนตัวอย่าง CLSM (a) 7 วัน
(b) 14 วัน (c) 28 วัน



ภาพ 46 โมดูลัสคินตัวตัวอย่าง CLSM

ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM

1. ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคินตัว และความเร็วคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัว M_R กับความเร็วคลื่น V_p พบว่า มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคินตัว มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ดังแสดงในภาพ 47(a) นั่นคือในช่วงแรกค่าโมดูลัสคินตัวมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยไปมากตามความเร็วคลื่น V_p ที่สูงขึ้น จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.1 ร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวกับความเร็วคลื่น V_p ของ Chompoorat et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM และ Chompoorat, et al. (2021) ที่ใช้ตะกรันและเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

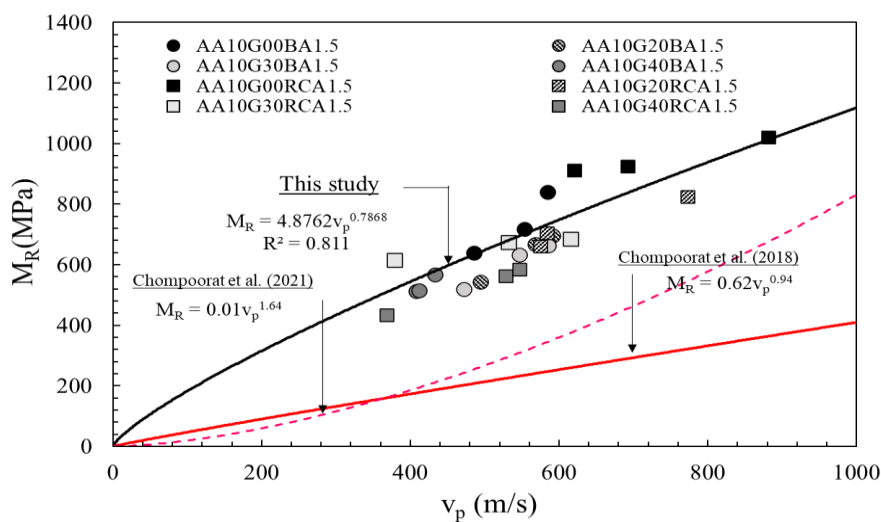
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวกับความเร็วคลื่น V_s พบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคินตัวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ ดังแสดงในภาพ 52(b) นั่นคือเมื่อค่าความเร็วคลื่น V_s มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าโมดูลัสคินตัวมีค่ามากขึ้นตาม โดยค่าโมดูลัสคินตัวในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.2 ร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวกับความเร็วคลื่น V_s ของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM และ Chompoorat, et al. (2021) ที่ใช้ตะกรันและเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

จากสมการที่ 4.1 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.811 และสมการที่ 4.2 มีค่าเท่ากับ 0.810 ค่าโมดูลัสคินตัวของ CLSM มีความสัมพันธ์ต่อค่าความเร็วคลื่น V_p ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะ

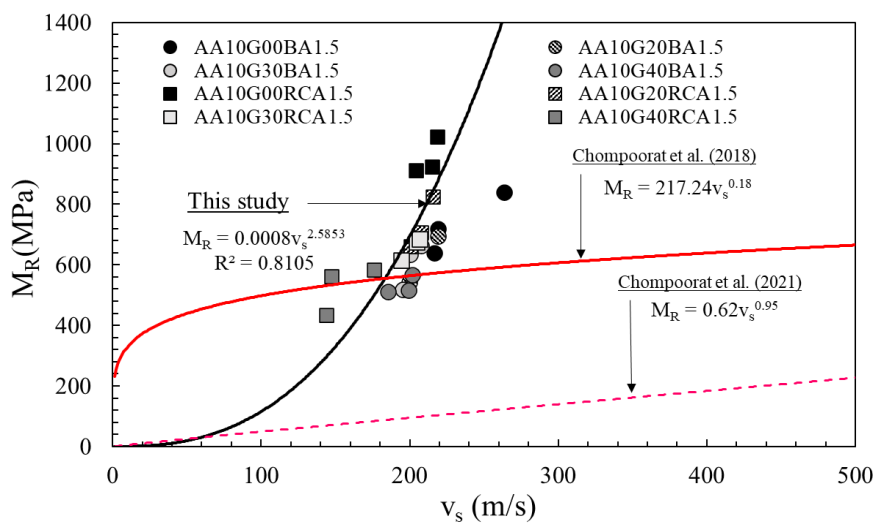
ขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (P-wave) มากกว่าค่าความเร็วคลื่น V_s ที่มีการวัดความเร็วคลื่น
ในลักษณะตั้งฉากไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (S-wave)

$$M_R = 4.8762v_p^{0.7868} \quad R^2 = 0.811 \quad (4.1)$$

$$M_R = 0.0008V_s^{2.5853} \quad R^2 = 0.810 \quad (4.2)$$



(a)



(b)

ภาพ 47 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคลื่นตัว และความเร็วคลื่นของ CLSM (a) v_p (b) v_s

2. ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสแรงเฉือน

ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D2166 กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (E_0) ที่ได้จากการนำค่าความเร็วคลื่น V_p มาวิเคราะห์ และค่าโมดูลัสแรงเฉือนเริ่มต้น (G_0) ที่ได้จากการนำค่าความเร็วคลื่น V_s มาวิเคราะห์ และค่าโมดูลัสคืนตัวกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสแรงเฉือนของ Chompoorat, et al. (2018) ดังแสดงในภาพที่ 48 49 และ 50 ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM

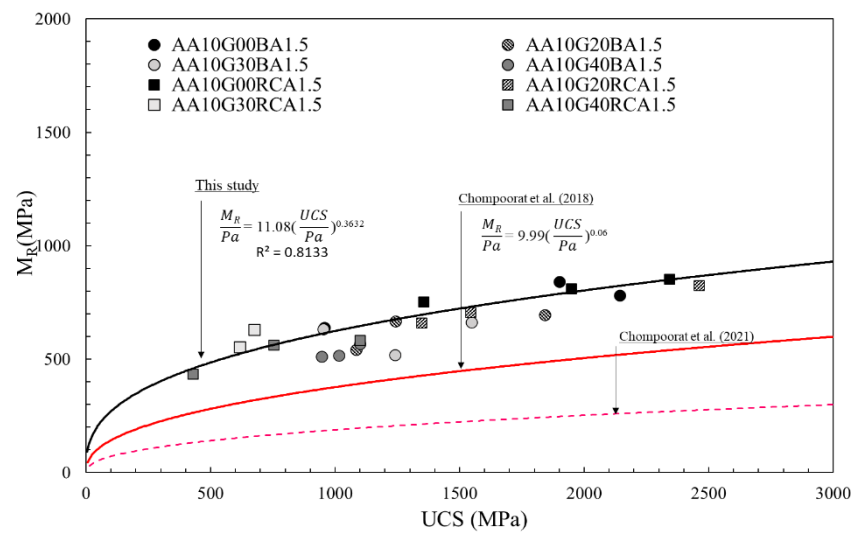
จากการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า USC E_0 และ G_0 ลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ ดังแสดงในภาพ 48 49 และ 50 สามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่าย ดังสมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

จากสมการที่ 4.3 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.68 สมการที่ 4.4 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.90 และสมการที่ 4.5 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.82 ค่าโมดูลัสคืนตัวของ CLSM มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_0 มากกว่าค่าโมดูลัสแรงเฉือน G_0 V_p มีความสอดคล้องกับค่าความเร็วคลื่น V_p และความเร็วคลื่น V_s ในหัวข้อที่ 4.4.1

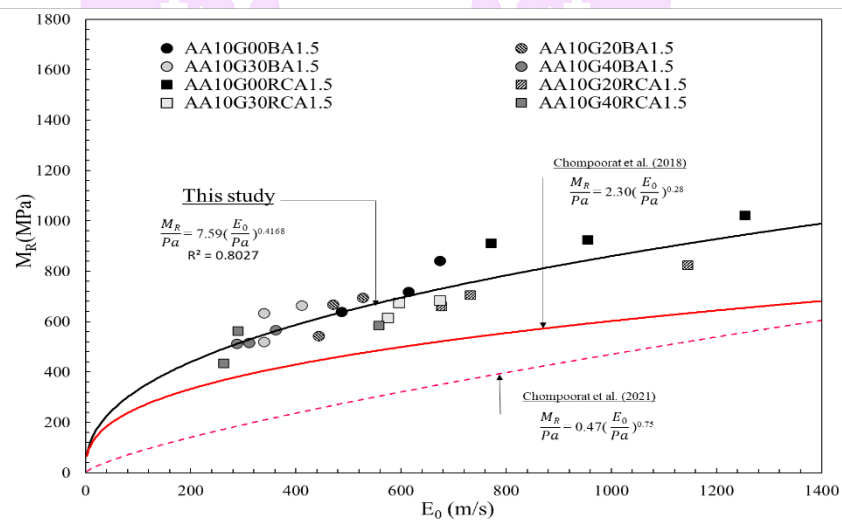
$$\frac{M_R}{Pa} = 11.08 \left(\frac{UCS}{Pa} \right)^{0.36} \quad R^2 = 0.81 \quad (4.3)$$

$$\frac{M_R}{Pa} = 7.59 \left(\frac{E_0}{Pa} \right)^{0.42} \quad R^2 = 0.80 \quad (4.4)$$

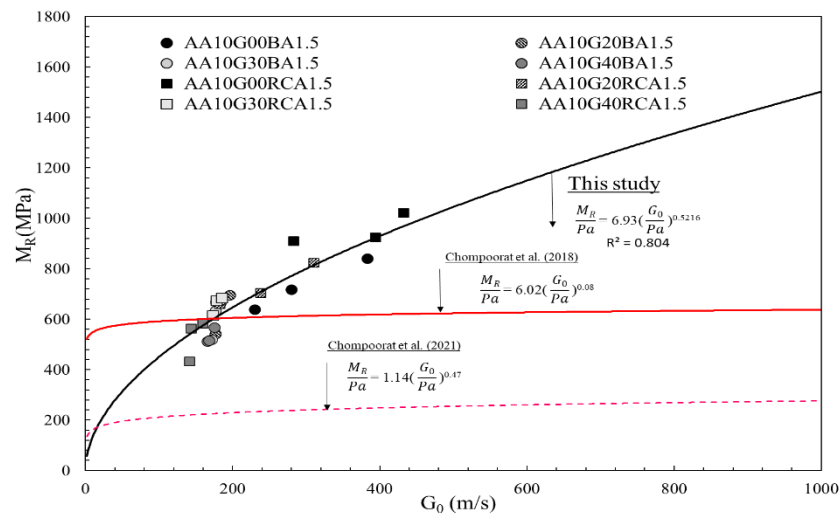
$$\frac{M_R}{Pa} = 6.93 \left(\frac{G_0}{Pa} \right)^{0.52} \quad R^2 = 0.80 \quad (4.5)$$



ภาพ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคั้นตัว และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM



ภาพ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคั้นตัว และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของ CLSM



ภาพ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัว และค่าโมดูลัสของแรงเฉือนเริ่มต้นของ CLSM

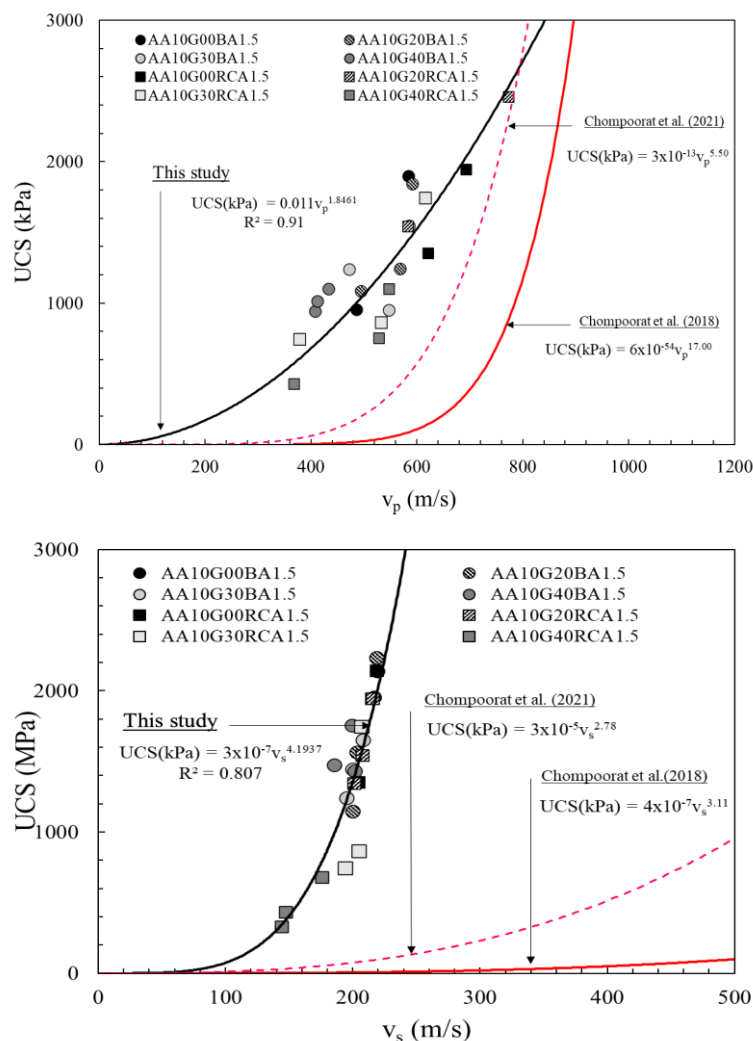
3. ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับความเร็วคลื่น V_p และ V_s พบว่าความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดแกนเดียวลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ดังแสดงในภาพ 51(a) และภาพ 51(b) เมื่อพิจารณาค่าความเร็วคลื่น V_p และ V_s ในช่วงแรกค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีอัตราเพิ่มขึ้นที่น้อย จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเร็วคลื่น V_p และ V_s ที่เพิ่มขึ้นจากกราฟสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 ร่วมกับความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่นของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM

จากสมการที่ 4.6 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.91 และสมการที่ 4.7 ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.81 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM มีความสัมพันธ์ต่อความเร็วคลื่น V_p ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (P-wave) มากกว่าค่าความเร็วคลื่น V_s ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะตั้งฉากไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (S-wave)

$$UCS(kPa) = 0.011v_p^{1.8461} \quad R^2 = 0.91 \quad (4.6)$$

$$UCS(kPa) = 3 \times 10^{-7}v_s^{4.1937} \quad R^2 = 0.81 \quad (4.7)$$



ภาพ 51 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM (a) v_p (b) v_s

การคำนวณประมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM

ข้อได้เปรียบของ CLMS นั้นคือ การนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียและลดการผลิตที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยจึงเสนอแนวทางการคำนวณประมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM ดังแสดงในตาราง 22 ค่า EEV ของ CLSM เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้พลังงานที่ใช้ในการผลิต (embodied energy value spent during production, EEV_p) คุณกับวัสดุที่ใช้ในการผลิต พบว่า แก้วลอย แก้วหนัก มีค่า EEV_p เท่ากับ 0 เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ จึงไม่มีการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการผลิต ส่วนเศษแก้ว มีค่า EEV_p เท่ากับ 0.10 MJ/kg และคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 0.016 MJ/kg อ้างอิงจาก Ittayepe, et al., 2020 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.5 MJ/kg อ้างอิงจาก Tempest, et al., 2009 ส่งผลให้ CLSM มีค่า EEV เท่ากับ 188 MJ/m³

การเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM

วัสดุ CLSM เมื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้าง โดยไม่คิดค่าขนส่ง ดังแสดงในตาราง 23 สามารถคำนวณราคาของวัสดุ และสารเคมีของพื้นทาง CLSM ดังตัวอย่างที่ 7 จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งได้ทำการอ้างอิงข้อมูลจากกรมบัญชีกลาง ดังแสดงในตาราง 24 พบว่า ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ มีราคาสูงกว่าพื้นทาง CLSM ร้อยละ 117 และร้อยละ 141

ตาราง 22 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CJSM

Embodied energy value of CLSM			
Material	Weight (kg/m ³)	EEV _p (MJ/kg)	EEV (MJ/m ³)
Fly Ash	428	0	0
Bottom Ash	802	0	0
Waste Glass Powder	107	0.10	10.7
Recycled concrete	802	0.016	12.83
Sodium hydroxide	8	20.5	164
sum			188

ตาราง 23 ราคาของ CJSM

Material	Weight (kg/m ³)	Material cost per unit volume (baht/kg)	Total material cost (baht)
Fly Ash	428	0.12	51.36
Bottom Ash	802	0.04	32.08
Waste Glass Powder	107	2	214
Recycled concrete	802	0	0
Sodium hydroxide	8	40	320
Water	350	0.02	7
sum			624

ตาราง 24 ราคาของ CJSM อ้างอิงข้อมูลจากกรมบัญชีกลาง

Material	Material cost per unit volume (kg/m ³)	Volume (m ³)	Machine rental (baht/day)	Total (baht/day)
CLSM baase	410	100	-	
Soil cement subbase	700	100	20,000	90,000
Soil cement base	800	100	20,000	100,000

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการทดลองวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) ที่มีเถ้าลอยและเศษแก้วเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าหนักและคอนกรีตรีไซเคิลถูกใช้ทดแทนมวลรวม โดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย มีผลสรุปดังนี้

คุณสมบัติเบื้องต้นของ เศษแก้ว เถ้าลอย เถ้าหนัก และเศษคอนกรีต

1. คุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ 2.51 เถ้าหนักมีความถ่วงจำเพาะ 2.65 เศษแก้วมีความถ่วงจำเพาะ 2.72 และคอนกรีตรีไซเคิลมีความถ่วงจำเพาะ 2.69 เถ้าลอยมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,343 \text{ kg/cm}^3$ เถ้าหนักมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,395 \text{ kg/cm}^3$ เศษแก้วมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,542 \text{ kg/cm}^3$ และเศษคอนกรีตมีหน่วยน้ำหนัก $1,645 \text{ kg/cm}^3$ นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอย มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.32 เถ้าหนัก มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.29 คอนกรีตรีไซเคิล มีร้อยละการดูดซึมน้ำ 3.91 และเศษแก้ว มีร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.56

2. คุณสมบัติทางเคมี พบว่า จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray Fluorescence, XRF) พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 17.50 12.18 และ 47.03 ตามลำดับ เถ้าหนักมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 1.57 4.74 และ 20.27 ตามลำดับ เศษแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 41.92 1.38 และ 7.91 ตามลำดับ คอนกรีตรีไซเคิลมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 4.09 2.06 และ 24.03 ตามลำดับ พบว่า เศษแก้ว มีสารประกอบแคลเซียมค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเถ้าลอย เถ้าหนัก และคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM

1. การยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM การเพิ่มเศษแก้วต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 20 30 และ 40 เศษแก้วที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การไหลแผ่ลดลง โดยกลุ่มตัวอย่างที่เลือกใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่น้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานเป็นคอนกรีตรีไซเคิล

2. การเพิ่มเศษแก้วต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 20 30 และ 40 ส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM ลดลง โดยกลุ่มตัวอย่างที่เลือกใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตรีไซเคิล

3. หน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าอยู่ในช่วง 2,055-2,157 kg/m³ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มร้อยละเศษแก้ว และหน่วยน้ำหนักของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตไรซ์เคลเป็นมวลรวม เนื่องจากคอนกรีตไรซ์เคลมีหน่วยน้ำหนักกว่าเถ้าหนัก

4. การยึมน้ำของ CLSM การแทนที่ด้วยมวลรวมของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตไรซ์เคลเป็นมวลรวม ทำให้ปริมาณน้ำลดลงส่งผลให้การไหลแผ่ลดลง และการยึมน้ำลดลงด้วย

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM

1. กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ลดลงตามปริมาณอัตราส่วนร้อยละเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น และมีกำลังอัดพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่มตัว เนื่องจากเศษแก้วมีธาตุองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (Si) หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide หรือ SiO₂) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อย การเพิ่มเศษแก้วในส่วนผสมส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง โดยกลุ่มตัวอย่างที่เลือกใช้มวลรวมเป็นเถ้าหนักมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้มวลรวมเป็นคอนกรีตไรซ์เคล เนื่องจากคอนกรีตไรซ์เคลมีความต้านทานการสึกกร่อนของคอมโพสิตจีโอโพลิเมอร์ จึงส่งผลให้ความแข็งแรง และกำลังรับแรงอัดมีค่ามากขึ้นตาม ตัวอย่างที่ AA10/WGP20/RCA1.5 และตัวอย่างที่ AA10/WGP30/RCA1.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 28 อยู่ในช่วง 2.8-8.3 MPa ตามมาตรฐาน ACI 229R-99 และสำหรับมาตรฐานกรมทางหลวง สำหรับรองพื้นทางดินซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 689 1,724 และ 2,413 kPa ที่อายุ 7 วัน ซึ่งตัวอย่างที่ AA10/WGP20/RCA1.5 และตัวอย่างที่ AA10/WGP30/RCA1.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 1,847 และ 1,159 kPa ซึ่งมีค่าผ่านมาตรฐาน

2. การทดสอบโรโซแนนซ์อิสระของ CLSM ด้วยวิธีการสั่นพ้องอิสระ พบว่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และความเร็วทุติยภูมิ (s-wave) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับกำลังรับแรงอัดของ CLSM

3. การทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM พบว่าความเค้นเบี่ยงเบนมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคั้นตัว โดยค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้น มาตรฐานสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทางอ้างอิงตามมาตรฐาน Austroad (2017) พบว่า ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ 28 วัน ของตัวอย่างที่ AA10/WGP20/RCA1.5 มีค่าเท่ากับ 717 MPa ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ และชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพที่มีค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่น้อยกว่า 250 และ 300 MPa ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ AA10/WGP30/RCA1.5 มีค่าเท่ากับ 696 MPa ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ ชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ และพื้นทางหินคลุกแบบปกติที่มีค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่น้อยกว่า 250 300 และ 350 MPa ตามลำดับ

4. ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R กับความเร็วคลื่น v_p และ v_s พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับ v_p มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย และความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับ v_s มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.811 และ 0.810 ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R กับ E_0 และ G_0 มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำทั้งสอง และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.80 และ 0.80 และความสัมพันธ์ระหว่าง UCS ต่อ v_p และ v_s ที่มีลักษณะเป็นคว่ำทั้งสอง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.81 และ 0.81 ละความสัมพันธ์ จะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง M_R ต่อ v_p M_R ต่อ E_0 UCS ต่อ v_p ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ มีความสัมพันธ์มากกว่า M_R ต่อ v_s M_R ต่อ G_0 UCS ต่อ v_s ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะตั้งฉากไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ และความสัมพันธ์ UCS ต่อ M_R มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.81

ปริมาณพลังงานสะสมรวม และต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM

1. ปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน AA10/WGP20/RCA1.5 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 188 MJ/m³
2. ต้นทุนการก่อสร้างโดยไม่คิดค่าขนส่งของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน AA10/WGP20/RCA1.5 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีที่สุด พบว่ามีต้นทุนการก่อสร้างน้อยกว่าชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอัตราส่วนผสมของ CLSM จากการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใหม่เป็นวัสดุในงานวิศวกรรมผิวทาง โดยทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของ CLSM อีกทั้งยังมีการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) จากผลการทดสอบสามารถนำมาศึกษาขยายผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเสียหายในชั้นทางที่ใช้อัตราส่วน CLSM นี้เป็นพื้นทางได้ โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENPAVE เพื่อหาเกณฑ์ความเสียหายแบบแตกร้าวเนื่องจากความล้า และเกณฑ์ความเสียหายแบบการเสีรूपอย่างถาวรได้

ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของ CLSM คือ การนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นการช่วยลดกระบวนการผลิตที่อาจก่อให้เกิดพลังงานที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และต่อสุขภาพของมนุษย์เอง ดังนั้น ข้อเสนอแนะนี้จึงได้ทำการคำนวณปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM แสดงดังตาราง 22 ค่า EEV ของ CLSM พิจารณาจากปริมาณการใช้พลังงานที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผลิต (embodied energy spent during production, EEV_p) คูณกับวัสดุที่ใช้ในการผลิต CLSM จะสังเกตว่า ใ้ล้อย ใ้ล้หนั และคอนกรีตรีไซเคิล มีค่า EEV_p เท่ากับ 0 เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่ทำการคำนวณพลังงานที่ใช้ในระหว่าง

กระบวนการผลิต ค่า EEV_p จึงมีแค่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.5 MJ/kg อ้างอิงมาจาก Tempest, et al., 2009 ทำให้ CLSM มีค่า EEV เท่ากับ 164 MJ/m³



บรรณานุกรม

- กรมมลพิษ. (2563). ข้อมูลขยะมูลฝอย. <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2563>
- กรมทางหลวง ทล.-ม. 206. (2532). *มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์*. กองวิเคราะห์และวิจัย
กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง ทล.-ม. 203. (2556). *มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์*. กองวิเคราะห์และวิจัย
กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง ทล.-ม. 204. (2556). *มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์*. กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). *3Rs*. สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- เทอดศักดิ์ สายสุทธิ. (2554). *RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต*. ใน การประชุมวิชาการ
แห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 (หน้า 1-11). นครปฐม:
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ธนภุต เทพอุโมงค์ และคณะ. (2563). *การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้
ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง*.
มหาวิทยาลัยพะเยา.
- ศิริพร สุกโตชะ. (2560). *ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์
ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล*. คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2563). ข้อมูลประชากร.
<http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx>
- ACI Committee 229 (1999). *Controlled low strength materials (ACI 229R)*, American
Concrete Institute. Farmington Hill. Michigan. USA.
- ASTM Designation D 422 (2014). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of
Soils*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/D0422-63R07
- ASTM Designation C 33 (2023). *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
Philadelphia.USA. DOI: 10.1520/C0033_C0033M-18
- ASTM Designation C 136 (2015). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and
Coarse Aggregates*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0136-06
- ASTM Designation C 29 (2023). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight")
and Voids in Aggregate*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0029_C0029M-23

- ASTM Designation C 128 (2023). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0128-22
- ASTM Designation C 1611 (2021). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C1611_C1611M-21
- ASTM Designation C 191 (2021). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0191-21
- ASTM Designation C 232 (2021). *Standard Test Method for Bleeding of Concrete*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0232_C0232M-21
- ASTM Designation C 138 (2021). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/C0138_C0138M-17A
- ASTM Designation D 2166 (2024). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/D2166_D2166M-16
- AASHTO T 307 (2007). *Standard method of test for determining the resilient modulus of soil and aggregate materials, American Association of State Highway and Transportation Officials*. Washington. D. C.. USA. DOI: 10.1520/STP12519S.
- Austroroad (2017). *Guide to pavement technology part 2: pavement structural design*. Sydney. Australia.
- Chompoorat, T., Likitlersuang, S. and Jongvivatsakul, P. (2018) The Performance of Controlled Low-Strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement. *KSCE Journal of Civil Engineer*, 22(6), 2055-2063. DOI: 10.1007/s12205-018-1527-1.
- Chompoorat, T., Likitlersuang, S., and Jongvivatsakul, P. (2019). Engineering properties of controlled low-strength material (CLSM) as an alternative fill material. In *Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering 16th*. Taipei. Taiwan.

- Chompoorat, T., Thepumong, T., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S. (2021). Development of controlled low strength material (CLSM) from alkaline-activated industrial by-products for pavement engineering application. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(8). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003798](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003798)
- Chen, Z., Li, H., Wong, C. (2002). *An application of bar-code system for reducing construction wastes*. Automation in Construction. 11. 521-533.
- Davidovits, J. (1999). *Chemistry of geopolymeric systems terminology*. International conference. France
- EFNARC. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. Surrey.
- El-Hassan, H., and Elkholy, S. (2019). Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Steel Fiber-Reinforced Alkali-Activated Slag Concrete Incorporating Fly Ash. *Journal of materials in civil engineer*, 31(10). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002872.
- Fernandez-Jimenez, A., and Puertas, F. (2001). Setting of alkali-activated slog cement Influence of activator nature. *Advances in cement research*, 13(3). 115-121. DOI: 10.1680/adcr.2001.13.3.115
- Ittyeipe, A., Thomas, A., and P, R. (2020). *Comparison of the energy consumption in the production of natural and recycled concrete aggregate: A case study in Kerala, India*. IPO Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 989 012011. DOI 10.1088/1757-899X/989/1/012011
- Lee, H.K., Lee, N.K., Kim, H.K., Park, I.S., (2013). Alkali-activated, cementless, controlled low-strenght materials (CLSM) utilizing industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 49, 738-746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.002
- Ling, T.C., Kaliyavaradhan, S. K., and Poon, C. (2018). Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling-An Overview. *Constructjion and building materials*, 158.535-548.DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.050.

- Nuaklong, P., Wongsu, A., Boonserm, K., Ngohpk, C., Jongvivatsakul, P., Sata, V., et al. (2021). Enhancement of mechanical properties of fly ash geopolymer containing fine recycled concrete aggregate with micro carbon fiber. *Journal of Building Engineering*, 41. 102403. DOI: <http://www.elsevier.com/locate/jobbe>
- Poltue, T., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., (2017). Strength of Recycled Concrete Aggregate Binding with Fly Ash-Rice Husk Ash based Geopolymer for Pavement Sub Bases Application. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 40(4), 567-581.
- Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., Chindaprasit, P., (2018). Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2892-2898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.125>
- Tempest, B., Sanusi, O., Gergely, J., Ogunro, O., and Weggel, D. (2009). *Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer concrete*. In Word of coal ash (WOCA) conference. Lexington. USA.
- Wu, H., Huang, B., Shu, X., and Yin, J. (2016). Utilization of solid wastes/byproducts from paper mills in Controlled Low Strength material (CLSM). *Construction and building materials*, 118, 155-163. DOI: 10.1016/J.conbuildmat.2016.05.005.
- Xu, H. and Van Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247-266. doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ชุตติปภา ดีตอ้า
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤศจิกายน 2540
สถานที่เกิด	จังหวัดแพร่
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2563 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	243/1 หมู่ที่ 1 ตำบลทุ่งกวาว อำเภอเมืองแพร่ จังหวัดแพร่ 54000
ผลงานตีพิมพ์	ชุตติปภา ดีตอ้า, อนุพงศ์ คำปลอด, ธนกฤต เทพอุโมงค์ และธนกร ชมภูรัตน์ (ผู้บรรยาย). (24-26 สิงหาคม 2565). การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากเศษแก้วเหลือใช้ที่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิกสำหรับประยุกต์ในงานวิศวกรรมผิวทาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 27 (หน้า GTE-20-1-6). เชียงราย: โรงแรม เดอะ เฮอริเทจ เชียงราย.
รางวัลที่ได้รับ	-

