

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตไร้เหล็กโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์
สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง



กิตติภพ ขวัญตน

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

เมษายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตไร้เหล็กโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์
สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
เมษายน 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

DEVELOPMENT OF CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIALS FROM RECYCLED
CONCRETE ACTIVATED BY ALKALI FOR PAVEMENT ENGINEERING APPLICATION



KITTIPOP KWANTON

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

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตรีไซเคิลโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์
สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง

ของ กิตติภพ ขวัญตน

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชนกร ชมภูรัตน์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บัวกล้า)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

เรื่อง:	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตรีไซเคิลโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมผิวทาง
ผู้วิจัย:	กิตติภพ ขวัญตน, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2567
อาจารย์ที่ปรึกษา:	รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ บัวกล้า
คำสำคัญ:	วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, เถ้าหนัก, ทรายธรรมชาติ, คอนกรีตรีไซเคิล

บทคัดย่อ

วัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนผสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low strength material, CLSM) โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วยเถ้าลอย และเถ้าหนักจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ คอนกรีตรีไซเคิลจากขยะโครงสร้างอาคารที่เกิดจากการรื้อถอน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงเพื่อเป็นตัวชะละลายสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมผิวทาง โดยจะศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นตัวชะละลาย และใช้วัสดุผสมรวมตั้งต้นคือ ทรายธรรมชาติ และเถ้าหนัก แทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 100 และใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ตัวอย่าง CLSM จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานประกอบไปด้วย การยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว การเยิ้ม น้ำ หน่วงน้ำหนัก และทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังประกอบไปด้วย กำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสคั้นตัว และค่าความเร็วคลื่นที่เดินทางผ่านตัวอย่างด้วยวิธีการสั่นพ้องอิสระ จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน พบว่า การแทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลกระทบต่อค่าไหล และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM ส่วนผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง พบว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดียว และโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM ลดลงตามปริมาณร้อยละคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น และการทดสอบความเร็วคลื่นของ CLSM พบว่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังสรุปได้ว่าตัวอย่าง AA10/BA75/RCA25 ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มวลรวมเถ้าหนักแทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิลอัตราส่วนร้อยละ 25 เป็นตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ในการก่อสร้างเป็นชั้นโครงสร้างทาง โดยมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 7 วันเท่ากับ 1,857 kPa ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับพื้นทางดินซีเมนต์ (DOH, 2013) ที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1,724 kPa และกำลังแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 2.2 MPa ผ่านมาตรฐาน ACI229R-99 (1999) ซึ่งระบุค่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM ที่อายุ 28 วันต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.3 MPa สำหรับงานถมที่อาจจะต้องมียานรื้อถอนในภายหลัง ส่วนค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 443 MPa ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางประเภทหินคลุกแบบปกติ (Austroad, 2017) ที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 350 MPa

Title: DEVELOPMENT OF CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIALS FROM RECYCLED CONCRETE ACTIVATED BY ALKALI FOR PAVEMENT ENGINEERING APPLICATION

Author: Kittipop Kwanton, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2024

Advisor: Associate Professor Dr. Thanakorn Chompoorat Co-advisor Assistant Professor Dr. Apichat Buakla

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

ABSTRACT

The study of construction materials improvement and development have never been stopped in order to reduce the problems caused, improve the advantage of their properties, decrease cost or save the environment. It creates more value when the waste material can be applied to any purposes above. The research aims to study the controlled low strength material (CLSM) mixtures produced from manufacturing waste. The composition selected for this study are fly ash (FA) and bottom ash (BA) collected from the Mae Moh power plant, and recycled concrete aggregate (RCA) from demolished structures. An alkaline activator chosen is sodium hydroxide (NaOH) which is a strong base to activate the CLSM properties. The CLSM is utilized as pavement materials. This study focuses on the basic properties and mechanical properties. Samples were prepared by 10 molar NaOH solution as an alkaline activator. natural sand and bottom ash as the starting aggregate, which will be replaced by recycled concrete at ratios of 0, 25, 50, 75, and 100. Each CLSM mixture was examined to observe basic properties of a slump, setting time, bleeding, and unit weight. The mechanical properties CLSM mixture were also tested to see the unconfined compressive strength (UCS), resilient modulus (M_R). Beside, p-wave and s-wave velocities were studied by free-free resonant (FFR) method. The results of the basic property tests showed that replacement of recycled concrete affected the flow and initial setting time of the CLSM. The results of the mechanical properties indicate that an increase in RCA leads to a reduction in UCS and M_R . The FFR test results, show that p-wave and s-wave velocities of CLSM increase in relation to longer curing time. From all tests, the mechanical properties can be concluded that the mixture of AA10/BA75/RCA25 using 10 molar NaOH solution, BA replaced with 25% RCA is the most suitable mixture for applying into the pavement construction. The UCS value at 7 days of mixture AA10/BA75/RCA25 is 1,857 kPa achieving Thailand Department of Highways standard of 1,724 kPa. The UCS value at 28 days is 2.2 MPa achieving the requirement of ACI229R which specific UCS at 28 days shall be <8.3 MPa for pavement backfilling. In addition, the M_R at 28 days of mixture AA10/BA75/RCA25 is 443 MPa reaching the recommendation of Austroad (2017) which shall be at least at 350 MPa.

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากหลายท่านและหลายหน่วยงาน รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสและความเชื่อมั่นแก่ผมเสมอมา ช่วยแก้ไข ในสิ่งที่บกพร่อง ทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะกรรมการ ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิเลอสรวง, ผศ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า และ รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำเพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย เหมือนไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนเก้าอี้ และเก้าอี้เหล็ก และห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์คอนกรีตรีไซเคิล โดยที่ไม่คิดค่าใช้จ่าย เพื่อน พี่ และน้อง ที่คอยช่วยเหลือกันมา ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้ผมแรงผลักดันเสมอมา และท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณพ่อและแม่ที่เป็นกำลังใจทุกครั้งที่อยู่สีกท้อ

กิตติภพ ขวัญตน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการทำวิจัย	3
แผนการดำเนินการวิจัย	4
ประโยชน์ที่จะได้รับการจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
วัสดุควบคุมกำลังต่ำ.....	6
วัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	11
วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	18
วัสดุผสมรวม.....	22
ประเภทและลักษณะโครงสร้างผิวทาง.....	29
ความสำคัญของกลศาสตร์ในงานวิศวกรรมผิวทาง	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CLSM.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	42

วัสดุและสารเคมี	42
การเตรียมสารเคมี	42
การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	47
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านกำลัง.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	55
คุณสมบัติเบื้องต้นของ แก้วลอย แก้วหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล.....	55
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม CLSM.....	59
การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM	67
ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM	78
การคำนวณปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM.....	84
การเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM.....	84
บทที่ 5 บทสรุป	86
สรุปผลการวิจัย.....	86
ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม.....	89
ประวัติผู้วิจัย.....	93

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงตารางแผนการดำเนินงานวิจัย	4
ตาราง 2 แสดงข้อกำหนดของ CLSM ตามประเภทการใช้งาน.....	9
ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว	17
ตาราง 4 แสดงข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุ پوشโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618.....	21
ตาราง 5 แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุ پوشโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618.....	21
ตาราง 6 แสดงคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลตามมาตรฐาน BCSJ.....	29
ตาราง 7 แสดงการออกแบบน้ำหนักกระทำซ้ำ และอายุการใช้งาน	34
ตาราง 8 แสดงผลการทดสอบการเปรียบเทียบส่วนผสม CLSM โดยใช้ ตะกรันเหล็ก และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน	37
ตาราง 9 แสดงอัตราส่วนผสม CLSM ต่อปริมาตรส่วนผสม 1 ลบ.ม.....	47
ตาราง 10 แสดงการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล.....	51
ตาราง 11 แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM	52
ตาราง 12 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล.....	57
ตาราง 13 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย เถ้าหนัก และคอนกรีตรีไซเคิล .	58
ตาราง 14 แสดงการยู่บตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM	61
ตาราง 15 แสดงการยู่บตัว CLSM	62
ตาราง 16 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM.....	67
ตาราง 17 แสดงตารางรับกำลังอัดแกนเดียวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9	69
ตาราง 18 แสดงผลการทดสอบ EDS.....	71

ตาราง 19 แสดงผลการทดสอบโมดูลส์คืบตัวของ CLSM.....	77
ตาราง 20 แสดงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CLSM	84
ตาราง 21 แสดงราคาของ CLSM.....	85
ตาราง 22 แสดงการเปรียบเทียบราคากับชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์.....	85



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แสดงแผนภาพการดำเนินงานวิจัย	5
ภาพ 2 แสดงการใช้งาน CLSM	7
ภาพ 3 แสดงการใช้งาน CLSM	7
ภาพ 4 แสดงสัดส่วนผสมโดยทั่วไปของ CLSM.....	8
ภาพ 5 แสดงการใช้ CLSM เป็นวัสดุเทขึ้นพื้นทางในรัฐอิลลินอยส์ (www.irmca.org)	10
ภาพ 6 แสดงโครงสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์	13
ภาพ 7 แสดงลักษณะการดูลประจุระหว่างโพแทสเซียมไอออน (K+) กับอะลูมิเนียมไอออน (Al ³⁺) ของโพลิไซอะเลตไฮลีโอโซ	14
ภาพ 8 แสดงกระบวนการทางเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอร์	15
ภาพ 9 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง	16
ภาพ 10 แสดงแผนผังการผลิตจีโอโพลิเมอร์	18
ภาพ 11 แสดงเก้าอี้กันหินหรือเก้าอี้ลอย	19
ภาพ 12 แสดงเก้าอี้กลับ	19
ภาพ 13 แสดง Scanning Electron Microscope (SEM) เก้าอี้ลอยขยาย (1,000 เท่า).....	22
ภาพ 14 แสดงชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม	25
ภาพ 15 แสดงตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม	26
ภาพ 16 แสดงภาพตัดชั้นหน้าดิน	27
ภาพ 17 แสดงเก้าอี้หนัก	28
ภาพ 18 แสดงรูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต	30
ภาพ 19 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างผิวทางยึดหยุ่น	31
ภาพ 20 แสดงการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน	34
ภาพ 21 แสดงการทดสอบโมดูลัสการคืบตัวที่ 7 วัน	35
ภาพ 22 การทดสอบโมดูลัสการคืบตัวที่ 14 วัน	35
ภาพ 23 การทดสอบโมดูลัสการคืบตัวที่ 28 วัน	36
ภาพ 24 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไร้ไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วย จีโอโพลิเมอร์ที่มีเก้าอี้ลอยและเก้าอี้กลับเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน	38
ภาพ 25 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไร้ไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วย จีโอโพลิเมอร์ที่มีเก้าอี้ลอยและเก้าอี้กลับเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	38

ภาพ 26 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วย จีโอฟิลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน.....	39
ภาพ 27 แสดงกำลังรับแรงอัดของ CLSM	40
ภาพ 28 การทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่ 7, 28 และ 120 วัน ของ CLSM.....	41
ภาพ 29 แสดงวัสดุและสารเคมี (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก (c) ทราบยธรรมชาติ (d) เศษคอนกรีต รีไซเคิล (e) โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43
ภาพ 30 แสดงชิ้นส่วนเสาและคานคอนกรีต	44
ภาพ 31 แสดงชิ้นส่วนเสา และคานคอนกรีต ย่อยโดยการใช้ค้อนปอน.....	45
ภาพ 32 แสดงชิ้นส่วนเสา และคานคอนกรีต ย่อยโดยการใช้ครกหิน.....	45
ภาพ 33 แสดงคอนกรีตรีไซเคิลที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4	46
ภาพ 34 แสดงภาชนะเก็บมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล	46
ภาพ 35 แสดงการนำ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทราบยธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิลเข้าเตาอบ.....	48
ภาพ 36 แสดงเถ้าลอย เถ้าหนัก ทราบย และคอนกรีตรีไซเคิล	49
ภาพ 37 แสดงการผสมส่วนผสมของ CLSM.....	49
ภาพ 38 แสดงการทดสอบการไหลแผ่.....	50
ภาพ 39 แสดงการทดสอบการเยิ้ม.....	50
ภาพ 40 แสดงการทดสอบหาขนาดของ (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก ทราบยธรรมชาติ และคอนกรีต รีไซเคิล.....	56
ภาพ 41 แสดงภาพถ่าย SEM (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก (c) คอนกรีตรีไซเคิล.....	59
ภาพ 42 แสดงการยู่ตัวแบบไหลแผ่ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	60
ภาพ 43 แสดงการยู่ตัว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	62
ภาพ 44 แสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	64
ภาพ 45 แสดงหน่วยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	65
ภาพ 46 แสดงการเยิ้ม ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	66
ภาพ 47 แสดงกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	68
ภาพ 48 แสดงภาพถ่าย SEM (a) BA100/RCA00 28 วัน x15,000 (b) BA75/RCA25 28 วัน x15,000.....	69
ภาพ 49 แสดงผลการทดสอบ EDS (a) BA100/RCA00 28 วัน (b) BA75/RCA25 28 วัน	70
ภาพ 50 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่น กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9	72
ภาพ 51 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัส กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ..	74

ภาพ 52 แสดงการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 (a) 7 วัน (b) 14 วัน (c) 28 วัน.....	76
ภาพ 53 แสดงโมดูลัสคืบตัวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน	77
ภาพ 54 แสดงความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืบตัว และความเร็วคลื่น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9	79
ภาพ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวและกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	81
ภาพ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น ตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	81
ภาพ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวและค่าโมดูลัสของแรงเฉือนตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	82
ภาพ 58 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9.....	83



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพกันอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานและเพื่อลดปัญหาการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นการนำของเหลือใช้จากกระบวนการอุตสาหกรรมหรือคอนกรีตรีไซเคิล (Recycle concrete, RC) มาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ปี 2560 ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2555-2559) จะต้องมีการใช้หินปูนสำหรับผลิตในอุตสาหกรรมซีเมนต์ เฉลี่ยประมาณ 70 ล้านเมตริกตันต่อปี โดยมีการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 3-4 ต่อปี นอกจากการใช้ทรัพยากรในปริมาณมากแล้ว การก่อให้เกิดขยะของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและการรื้อถอนทำลาย (Construction & Demolition Waste) คิดเป็นร้อยละ 30-40 ของขยะในระบบฝั่งกลบทั่วโลก (Chen, et al., 2002) จากปริมาณขยะของเสียจำนวนมากดังกล่าว ทำให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ส่งเสริมให้มีการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ในรูปแบบต่าง ๆ และส่งเสริมให้มีการประยุกต์ใช้หลัก 3Rs (Reduce Reuse Recycle) ลดการใช้ นำกลับมาใช้ซ้ำ นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อใช้ทรัพยากรที่มีอย่างคุ้มค่าและสามารถลดปริมาณขยะลง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) การนำของเสียจากอุตสาหกรรมและการก่อสร้างกลับมาใช้ใหม่คือทางเลือกที่จะช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ทรัพยากรธรรมชาติและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กัน จากสาเหตุดังกล่าวผู้วิจัยจึงต้องการนำขยะของเสียจากอุตสาหกรรมและการก่อสร้างมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานด้านวิศวกรรม

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (controlled low-strength material, CLSM) เป็นวัสดุถม (fill material) ที่มีลักษณะคล้ายคอนกรีตสามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เป็นวัสดุอีกชนิดที่ใช้ทดแทนดินบดอัด มีการไหลที่ดีและมากกว่า 650 mm ตามมาตรฐานคอนกรีตที่สามารถอัดตัวได้ด้วยตัวเอง (EFNARC, 2002) ใช้ในงานที่ไม่สามารถบดอัดให้แน่นได้เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่การทำงานหรือต้องการลดต้นทุนในการบดอัด เช่น ถมเพื่อเป็นโครงสร้างชั้นรองฐานราก การสร้างท่อระบายน้ำ งานปรับระดับ และการใช้ในงานพื้นทางแทนหินคลุก (crush rock) CLSM มีกำลังที่ต่ำโดยมาตรฐาน ACI 229R-99 (American Concrete Institute, 1999) ระบุค่ากำลังรับแรงอัดของ CLSM เท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน สาเหตุที่ CLSM ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำเนื่องจากลักษณะของงานที่นำมาใช้อาจต้องทำการพัฒนาหรือมีการรื้อถอนในอนาคต จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า CLSM ต้องมีความสามารถในการทำงานได้ดี (workability) มีความหนาแน่นต่ำ

มีกำลังที่ต่ำ และสามารถแข็งตัวด้วยตัวเอง (Ling et al., 2018) มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามศึกษาพร้อมกับลดต้นทุนโดยการใช้วัสดุเหลือทิ้งมาผสมเป็น CLSM เช่น การใช้กากตะกอนกระดาษของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตกระดาษผสมเพิ่มเข้าไปใน CLSM (Wu, et al., 2016) การนำมวลรวมละเอียดที่เคยใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ (Etxeberria, et al., 2013) การใช้เถ้าลอยใน CLSM ในการก่อสร้างทาง (Chompoorat, et al., 2018) การใช้รีไซเคิลคอนกรีตเพื่อทดแทนมวลรวมธรรมชาติ (Achtemichuk, et al., 2009) เป็นต้น

วัสดุควบคุมกำลังต่ำจะประกอบด้วย สารเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยทั่วไปสารเชื่อมประสานที่นิยมใช้ก็คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ได้จากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิที่สูงประมาณ $1,400-1,600^\circ\text{C}$ แล้วนำมาเข้าสู่กระบวนการบดละเอียด กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมาก ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูงมากส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้จึงหลีกเลี่ยงการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม คือ เถ้าลอย (fly ash) และเถ้าหนัก (bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และคอนกรีตรีไซเคิล (recycle concrete) จากโครงสร้างที่หมดอายุการใช้งานแล้ว โดยเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ใช้เป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงเพื่อเป็นตัวชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิวของวัสดุประสาน และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 75 100 ถือเป็นการนำเอาของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของ CLSM จากทรายธรรมชาติ วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม และคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับนำไปใช้ในการก่อสร้างพื้นทาง (base course) โดยมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม กำลังรับแรงอัด (Unconfined compression test, UC) ของ CLSM และโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) ตามลำดับ ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์หลักสำหรับใช้ในการออกแบบผิวทาง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเร็วเฉือน (shear wave velocity) ในระดับความเครียดต่ำ (small strain) ด้วยการใช้วิธีเรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant, FFR) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉือนใน CLSM กับกำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสคืนตัว และทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM คือ x-ray diffractometer (XRD) scanning electron microscope (SEM) และ x-ray fluorescence analysis (XRF)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำโดยใช้ของเหลือจากอุตสาหกรรมและของเสียจากวัสดุก่อสร้างกระตุ้นด้วยแอลคาไลน์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมพื้นทางมีวัตถุประสงค์ 4 ข้อดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำ CLSM จาก เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายแม่น้ำ และคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพื้นทาง
2. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติด้านกำลังในรูปแบบการให้แรงกระทำแบบสถิตย์โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UC) ของ CLSM
3. ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังในรูปแบบการให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ โดยการทดสอบโมดูลัสคีนตัว (M_R) และเรโซแนนซ์อิสระ (FFR) ของ CLSM
4. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างจุลภาพ (XRF, SEM, EDS) ของ CLSM

ขอบเขตของการทำวิจัย

การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำโดยใช้ของเหลือจากอุตสาหกรรมและคอนกรีตรีไซเคิล กระตุ้นด้วยแอลคาไลน์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมพื้นทางมีขั้นตอนการทำวิจัย 4 ข้อดังต่อไปนี้

1. รวบรวมงานวิจัย และศึกษามาตรฐานข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องในการทดสอบ CLSM
2. ตัวอย่างในการทดสอบ CLSM ใช้วัสดุ คือ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ คอนกรีตรีไซเคิล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเถ้าลอยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ คอนกรีตรีไซเคิลร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ความเข้มข้น 10 โมลาร์
3. ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ CLSM ประกอบไปด้วย การยุบตัว (ASTM C 1611) (ASTM, 2014) ระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C403) (ASTM, 2016) หนว้น้ำหนัก (ASTM C138) (ASTM International, 2017) การยุบตัวแบบไหลแผ่ (ASTM C1611) กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ASTM D2166) (ASTM, 2016) โมดูลัสคีนตัว (AASHTO T307) (AASHTO, 2007) และเรโซแนนซ์อิสระ (Chompoorat, et al., 2019)
4. ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM ประกอบไป การวิเคราะห์อนุภาคจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด scanning electron microscope (SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ x-ray fluorescence analysis (XRF)

แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำการแบ่งเป็น 8 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงตารางแผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อทำงานวิจัย	■											
2	สำรวจแหล่ง แก้วลอย คอนกรีตรีไซเคิล และหาคุณสมบัติพื้นฐาน ของวัสดุ	■	■										
3	หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของ CLSM		■										
4	ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ CLSM		■	■									
5	ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM			■	■	■							
6	ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของ CLSM				■	■	■						
7	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง							■	■				
8	จัดทำรูปแบบรายงาน และเตรียมนำเสนอ									■	■	■	■



ภาพ 1 แสดงแผนภาพการดำเนินงานวิจัย

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตด้วยการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน
2. ช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอย่างจำกัด
3. ช่วยลดปัญหาขยะสะสมที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมและการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง
4. เป็นแนวทางในการศึกษาองค์ความรู้ใหม่ ๆ ในด้านวิศวกรรม ที่เกี่ยวกับแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ เพื่อสนับสนุนการนำทรัพยากรเหลือใช้กลับมาใช้งาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุผสมแบบอัดแน่นด้วยตัวเอง หรือมีชื่อภาษาอังกฤษว่า flowable flow หรือ flowable fill material คือ วัสดุที่สามารถใช้แทนวัสดุธรรมชาติ เช่น หิน ดิน และทราย เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีความสามารถในการไหลของวัสดุเข้าไปในที่แคบและอัดตัวแน่นได้ดี จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำประกอบด้วย สารเชื่อมประสาน สารผสมเพิ่ม มวลรวม และน้ำเป็นหลัก โดยวัสดุประสานที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซึ่งในกระบวนการเผาสรออกไซด์หลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในอุณหภูมิ 1,400–1,600 °C จากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการบดละเอียดโดยในกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะใช้พลังงานสูง เป็นเหตุให้กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมากส่งผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ เป็นวัสดุผสมแบบอัดแน่นด้วยตัวเองลักษณะคล้ายกับคอนกรีต มีความสามารถในการไหลของวัสดุเข้าไปในที่แคบ และสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น การขุดวางท่อระบายน้ำ การฝังกลบ การถมเพื่อเป็นโครงสร้าง การปรับระดับและการทำงานขุดวางสาธารณูปโภคต่าง ๆ การถมช่องว่างใต้ดินหรือใช้เติมโพรงใต้ถนนให้เต็ม เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 อีกทั้ง CLSM ยังช่วยการใช้แรงงาน เวลาในการก่อสร้าง และการใช้เครื่องจักรในการบดอัด ไม่ว่าจะเป็นรถบดอัด รถตัก รถบรรทุกน้ำ และยังมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่ต้องมีคนงานในบริเวณกันหลุม ที่เสี่ยงต่อการพังทลายของดินโดยรอบ นอกจากนี้ CLSM ยังมีข้อได้เปรียบ คือ CLSM มีต้นทุนต่ำกว่าดินถมหรือหินคลุก เนื่องจาก CLSM มีความสามารถในการไหลและบดอัดได้เอง ลดการใช้คนงานในการก่อสร้าง ลดการใช้เครื่องจักรในการบดอัด อีกทั้งวิธีการทำงานที่ใช้วัสดุผสมแบบอัดแน่นด้วยตัวเอง มักใช้รถขนส่งคอนกรีตทั่วไปลำเลียงวัสดุแล้วปล่อยให้ตกอย่างอิสระได้โดยไม่ต้องมีการแยกตัว ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุนี้ ส่วนข้อได้เปรียบอีกประการคือ สามารถใช้ถมในที่ที่ไม่สามารถถมด้วยวัสดุผสมทั่วไปอื่น ๆ ได้ เช่น ทางค้ำใต้ดิน เป็นต้น



ภาพ 2 แสดงการใช้งาน CLSM

ที่มา: www.cincinnatiareadymix.com



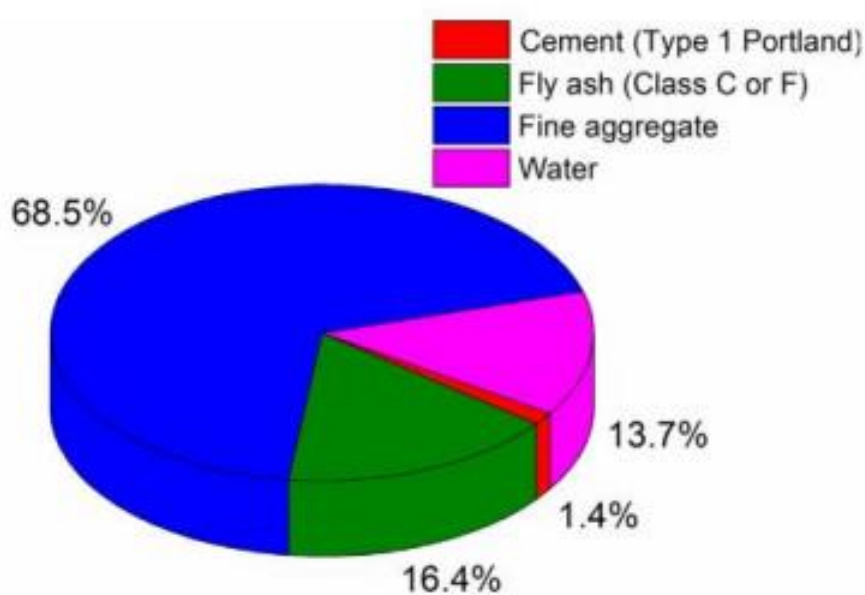
ภาพ 3 แสดงการใช้งาน CLSM

ที่มา: www.cincinnatiareadymix.com

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 โดยการออกแบบจากการใช้ค่าของการไหลแผ่ (slump flow) มีค่ามากกว่าหรือเท่า 200 mm ตามมาตรฐาน ASTM D 6203 และมีค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) ไม่เกิน 8.3 MPa สำหรับงานถมที่อาจจำเป็นต้องมีการรื้อถอนใหม่อีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4 เป็นการแสดงอัตราส่วนผสมของ CLSM โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักรวมทั้งหมด โดย CLSM ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย มวลละเอียด (วัสดุเหลือใช้) และสารเคมีผสมเพิ่ม



ภาพ 4 แสดงสัดส่วนผสมโดยทั่วไปของ CLSM

ที่มา: Plerce and Blackwell, 2003

1.2 มาตรฐาน CLSM ข้อได้เปรียบของ CLSM มีมากกว่าดินบดอัดคือ CLSM มีความสามารถในการไหล การอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เหมาะกับงานที่มีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น งานก่อสร้างในพื้นที่แคบ งานก่อสร้างวางระบายน้ำ เป็นต้น ข้อกำหนดของ CLSM แสดงในตาราง 2

2. การประยุกต์ใช้งานของ CLSM

2.1 วัสดุถมทั่วไป

CLSM สามารถใช้ในงานถมทั่วไป เช่น รางน้ำ หลุม หรือโพรงต่าง ๆ โดยไม่ต้องบดอัดหรือจี้เขย่า สามารถทำงานในที่แคบได้ CLSM ในงานถมที่มีความหนาหรือใช้ถมเป็นกำแพงกันดิน จะทำให้เกิดแรงดันด้านข้างในขณะที่เท ดังนั้นจึงต้องเททีละชั้นและรอจนกว่าชั้นก่อนหน้าจะเริ่มมีการเซตตัวจึงจะทำการเทชั้นถัดไปได้ เช่น Bill (1988) มีการใช้ CLSM เป็นวัสดุถมโดยเทในรางน้ำที่มีความลึก 2.7 เมตร เพื่อแก้ปัญหการทรุดตัวของรางน้ำสาธารณะในเมือง Peoria รัฐ Illinois พบว่า รางน้ำสามารถรับน้ำหนักได้ภายใน 2-3 ชั่วโมง ภายหลังการเท และมีรอยแตกที่เกิดจากการหดตัวน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีการนำ CLSM มาใช้เป็นวัสดุเทชั้นผิวทางดังภาพที่ 5 ซึ่งสามารถใช้งานได้ใน 3-4 ชั่วโมง

ตาราง 2 แสดงข้อกำหนดของ CLSM ตามประเภทการใช้งาน

ประเภทการใช้งาน	ข้อกำหนด
งานถมทั่วไป (ถมช่องว่าง และถมโครงสร้างใต้ดิน)	การไหลแผ่ ≥ 200 mm กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 0.5 MPa
งานถมดินชุด (ท่อใต้ดิน ท่อน้ำทิ้ง และร่องถนน)	การไหลแผ่ > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง การ ทรุดตัวน้อย มีระยะเวลาก่อตัวเร็ว สามารถขุดซ้ำ ได้ และกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 2.1 MPa
งานถมโครงสร้าง (สะพาน ฐานราก และกำแพงกันดิน)	การไหลแผ่น้อย 200 mm อัดแน่นได้ด้วย ตัวเอง กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 0.7-8.3 MPa (ขึ้นอยู่กับประเภทงาน)
งานถมทาง (พื้นทาง รองพื้นทางและชั้นดินเดิมผิวทางยึดหยุ่น)	การไหลแผ่น้อย 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ป้องกันการกัดกร่อนได้ คงทน กำลังรับ แรงอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 2.8-8.3 MPa (ขึ้นอยู่กับ ประเภทงาน)
งานถมเพื่อทนความร้อน (สายไฟใต้ดิน)	การไหลแผ่ > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง คงทน ความพรุนต่ำ การนำความร้อนสูง กำลังรับแรงอัด ที่ 28 วัน ≤ 2 MPa
งานป้องกันการกัดกร่อน (ท่อโลหะใต้ดิน)	การไหลแผ่ > 200 mm อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ความทนทาน ไฟฟ้าสูง กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ≤ 2 MPa

ที่มา: แปลจาก: Ling, et al., 2018



ภาพ 5 แสดงการใช้ CLSM เป็นวัสดุเทขึ้นพื้นทางในรัฐอิลลินอยส์ (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 สามารถนำถูกมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง รองพื้นทางและชั้นดินถมคันทางในโครงสร้างถนนได้สำหรับการออกแบบชั้นพื้นทางในถนนที่มีผิวทางแบบยืดหยุ่น (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 Tikalsky, et al. (2000) 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 จำเป็นต้องมีการถมชั้นใต้ดินเพื่อการขยายพื้นที่ใช้งาน ตอนเริ่มต้นมีการพิจารณาใช้ดินถมแบบปกติแต่เนื่องจากการเข้าถึงพื้นที่มีความยากลำบากจึงเลือกใช้ CLSM ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวแทน เพราะ CLSM สามารถใช้ปั๊มสูบหรือใช้สายพานลำเลียงได้สะดวกกว่า รวมถึงคุณสมบัติอัดแน่นได้ด้วยตัวเองของ CLSM ด้วย (Illinois Ready Mixed Concrete Association Newsletter, 1991) นอกจากนั้นยังมีการใช้ CLSM ในการถมเหมืองแร่ร้างในภาคตะวันออกของสหรัฐอเมริกาด้วย (Petzrick, 1997)

2.6 วัสดุรองแนวท่อ

CLSM เป็นวัสดุที่ดีสำหรับรองแนวท่อไฟฟ้าหรือท่อร้อยสายอื่น ๆ เพราะลักษณะการไหลของ CLSM จะช่วยให้สามารถเติมเต็มช่องว่างใต้ท่อและทำให้เกิดความสม่ำเสมอได้ดี ในปี ค.ศ. 1964 The U.S. Bureau of Reclamation ได้มีการเริ่มใช้ CLSM เป็นวัสดุรองแนวท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 380-2400 มิลลิเมตร ตามแนวแม่น้ำแคนาดาเป็นระยะทางประมาณ 518 กิโลเมตร การใช้ CLSM ในโครงการนี้แทนคอนกรีตสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างได้ถึง 40% และในตั้งแต่กลางปี ค.ศ. 1970 มีการใช้ CLSM เป็นวัสดุรองแนวท่อมากขึ้น เพราะนอกจากจะทำให้จัดวางท่อได้ง่ายแล้วยังป้องกันน้ำที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับท่อและสามารถขุดเพื่อแก้ไขได้ในอนาคต (Larsen, 1990)

วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายต่างความเข้มข้นสูงและสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) เป็นหลัก ซึ่งสารตั้งต้นสามารถได้จากธรรมชาติหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อาทิ แก้วลอยจากโรงงานไฟฟ้า แก้วกลบจากการเผาข้าวหรือกลบเพื่อทำถ่าน เป็นต้น โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันมีความแข็งแรง สามารถก่อตัว และมีความเสถียร รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานน้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังมีความสมบัติที่ดีกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในหลายประการ เช่น มีคุณสมบัติในการตรึงโลหะที่ดี มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง มีการแข็งตัวที่รวดเร็วและมีความแข็งแรงที่ดี มีการทนกรดและซัลเฟตที่ดี มีการหดตัวต่ำ ใช้พลังงานต่ำในการผลิต และมีราคาถูก จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างและทำให้ต้นทุนในงานก่อสร้างถูกลง

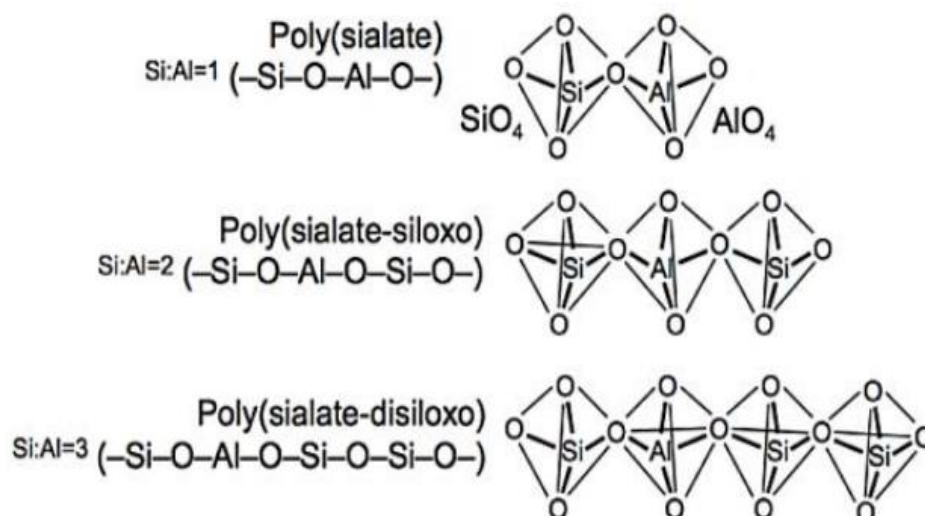
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยศาสตราจารย์โจเซฟ เดวิดคอฟ (Prof. Joseph Davidovits) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส โดยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำ

ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก ได้แก่ ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าลอย (Fly ash) หรือ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวอาจผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) และถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อชะอะลูมินาและซิลิกาออกมาจากสารตั้งต้น แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถเชื่อมประสาน ก่อตัว และให้กำลังอัดได้

การเชื่อมประสานของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ (chainmolecular structure) คล้ายกับวัสดุพอลิเมอร์ มีลักษณะโซ่ที่เชื่อมกันระหว่างธาตุซิลิกอน (Si) กับออกซิเจน (O) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตทราฮีดรา (tetrahedra, SiO_4) หรือแบบรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า และลักษณะสายโซ่ที่เชื่อมกันระหว่างธาตุอะลูมิเนียม (Al) กับออกซิเจน (O) ที่มีโครงสร้างเป็นรูปเหลี่ยมสี่หน้า จากนั้นโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จะเกิดการควบแน่น (polycondensation) เป็นพันธะลูกโซ่ของโครงสร้างซิลิโกอะลูมิเนต (silicoaluminate structure) ซึ่งมีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำ ๆ จนมีลักษณะเป็นแบบโครงข่าย 3 มิติ มีสูตรโมเลกุลพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ดังแสดงในภาพที่ 6 และสมการที่ 2.1

$$M_n = [-(\text{SiO}_2) - \text{AlO}_2]_n w\text{H}_2\text{O} \quad 2.1$$

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

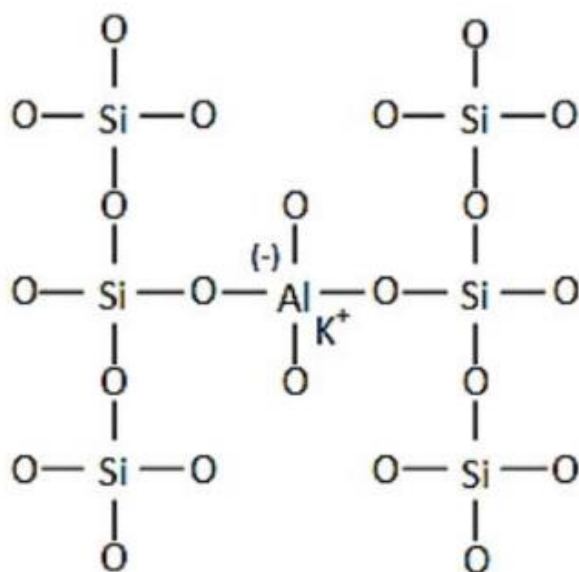


ภาพ 6 แสดงโครงสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์

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 ซึ่งลักษณะพันธะลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพ 7 แสดงลักษณะการดุลประจุระหว่างโพแทสเซียมไอออน (K^+) กับอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ของโพลิไซอะเลตไฮลีโอคโซ

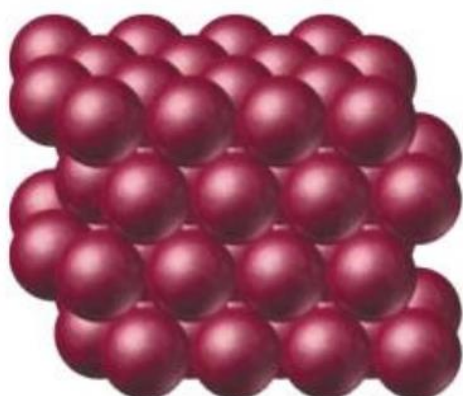
ที่มา: Daviodvots, 1999

กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีชื่อว่า จีโอโพลิเมอไรเซชัน (geopolymerization) มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ เริ่มจากขั้นตอนที่หนึ่งเป็นกระบวนการชะละลายของวัสดุฐานโดยทำการผสมวัสดุประสานกับสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยสารละลายดังกล่าวจะเป็นตัวชะละลายซิลิกา และอะลูมินาออกจากผิววัสดุประสานที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ขั้นตอนที่สอง หลังจากทำการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมเพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา พร้อมทั้งทำปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นจะเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และอะลูมิเนียมกับสารละลายเบส (สารละลายโซเดียมซิลิเกต) จนเกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของประสาน ขั้นตอนต่อมาจะเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerization) ในรูปแบบลักษณะของไอออนซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะละลายจะเกิดการรวมตัวกันกับไอออนของออกซิเจนอยู่ในรูปทรงแบบเหลี่ยมสี่หน้า และเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของซิลิกาและอะลูมินาได้เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต $[Si - O - Al - O]$ จะมีลักษณะดังแสดงภาพที่ 8 และมีลักษณะของโครงสร้างแบบสายโซ่ 3 มิติที่มีโครงข่ายขนาดใหญ่ (Davidovits, 2000)

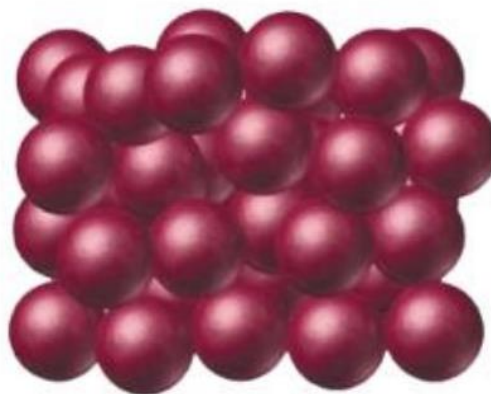
ที่มา: Xu and Van, 2000

1. ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึก (crystalline solid) เป็นของแข็งที่มีพื้นผิวที่ทำมุมกันด้วยค่าที่แน่นอน ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงเป็นระเบียบของอนุภาคของของแข็งดังแสดงในภาพที่ 9.1 ผลึกที่มีขนาดใหญ่เมื่อทำให้เล็กลงก็ยังคงรักษาลักษณะรูปผลึกเดิมอยู่ สารบางอย่างอาจมีรูปผลึกได้หลายแบบ เรียกว่า ปรากฏการณ์อัญรูป (polymorphism) เช่น เพชร แกรไฟต์ สารบางชนิดอาจจะมีรูปร่างเป็นผลึกที่เหมือนกันได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ภาวะรูปร่างเหมือน (isomorphism) เช่น NaCl, KCl, RbBr และ CaS นอกจากนี้ผลึกยังมีสมบัติที่เรียกว่า anisotropy ได้แก่ ความแข็งแรงทนทานทางกล ดัชนีหักเห และการนำไฟฟ้า ถ้าวัดในทิศทางที่ต่างกันค่าที่ได้จะไม่เท่ากัน

2. ของแข็งอสัณฐาน (amorphous solid) หรือของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก อนุภาคเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว โพลีเมอร์ ฯลฯ มีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายผลึกแตกต่างกันที่ไม่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนดังแสดงในภาพที่ 9.2 สมบัตินี้เรียกว่า isotropy คือ ค่าดัชนีหักเห การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติอื่น ๆ จะเหมือนกันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ของแข็งอสัณฐานจะมีจุดหลอมเหลวไม่เด่นชัดเมื่อได้รับความร้อนจะค่อย ๆ อ่อนตัวจนกระทั่งไหลได้ อุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวจึงอยู่ในช่วงที่ยาว ต่างจากผลึกซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัดและอุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวอยู่ในที่แคบ (คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)



ภาพ 9.1 crystalline solid



ภาพ 9.2 amorphous solid

ภาพ 9 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง

ที่มา: <http://www.scimath.org>

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. สารปอซโซลาน (pozzolanic) คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์ที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลาน ที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินไดอะตอมลัมปาลัง (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารละลายเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิด สามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอโพลิเมอร์คุณภาพดีกว่า แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518) ได้แก่

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลว ไม่มีสี

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดของแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ซึ่งสามารถนำสารละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

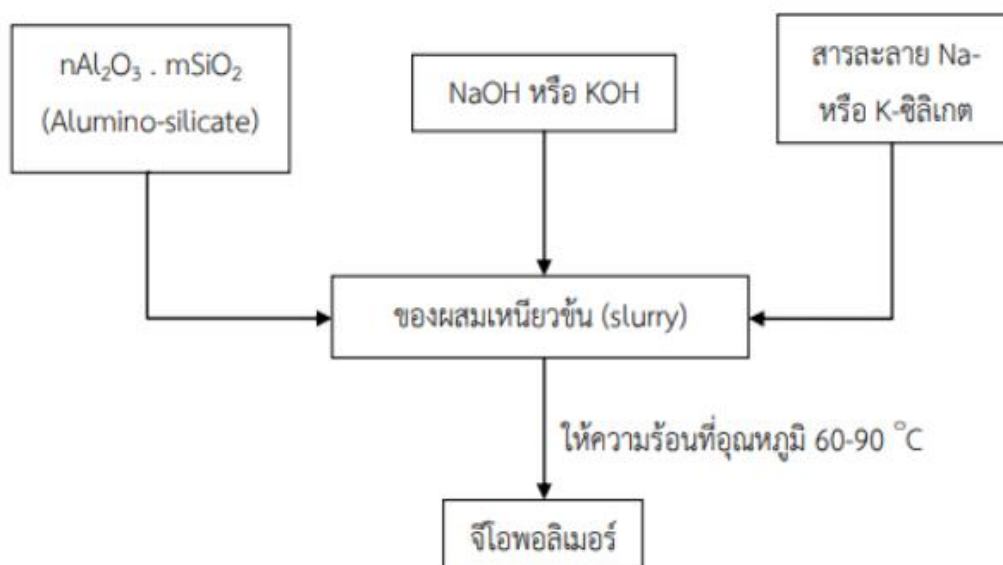
3. สารประกอบซิลิเกต สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นต่าง ลักษณะทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้ม โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปมากออกเป็น 3 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539) ดังแสดงตารางที่ 3

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อ	1:1.97	1:2.34	1:3.18
	ถึง	ถึง	ถึง
ซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	01:02.2	01:02.6	01:03.6
เหล็ก ไม่เกินร้อยละ	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ไม่เกินร้อยละ	0.21	0.21	0.21

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานการผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539

4. น้ำ สารจีโอโพลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง โดยแผนผังการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพ 10 แสดงแผนผังการผลิตจีโอพอลิเมอร์

ที่มา: ปริญา จินดาประเสริฐ, 2549

วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ส่งผลทำให้ลดต้นทุนในงานคอนกรีตและเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสด เพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าแกลบ ดังแสดงในภาพที่ 11 และ 12



ภาพ 11 แสดงเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย

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



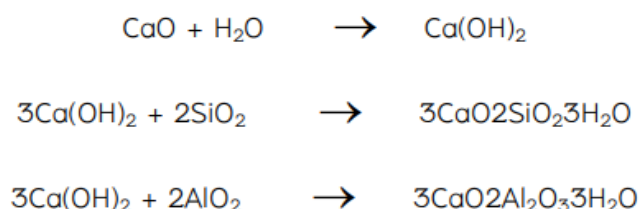
ภาพ 12 แสดงเถ้าแกลบ

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

เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นเถ้าถ่านหินชนิดหนึ่งซึ่งเป็นวัตถุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยในกระบวนการนี้พบเถ้าลอยในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าถ่านหินทั้งหมดเนื่องจากองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) จึงนิยม

นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์หรือวัสดุก่อสร้าง ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย มีอนุภาคที่ละเอียดเป็นผง สีน้ำตาล เนื่องจากมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยปกติมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.5-100 μm โดยอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าลอยจะอยู่รูปแบบของผลึก (Crystal) ผสมอยู่กับแบบไม่เป็นผลึก (Amorphous) เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) คล้ายปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดช้ากว่าจึงทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกช้ากว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์



คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยมีเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบ มีหลายหน่วยงานวิจัยได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงมี 2 แห่งด้วยกัน คือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) โดยคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย ตาม ASTM C-618 และ ASTM C593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียม ออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีดังกล่าวจะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM C618 แยกเถ้าลอยเป็น 3 ชนิด ตามองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตาราง 4 แสดงข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่เกินร้อยละ	701	702	50
SO_3 ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้น ไม่เกินร้อยละ	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ไม่เกินร้อยละ	10	6	6
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบกับ Na_2O ไม่เกิน ร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ: 1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ และ 2. สามารถใช้แก้ล้อยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสู่ถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งาน หรือผลการทดสอบที่เชื่อถือได้

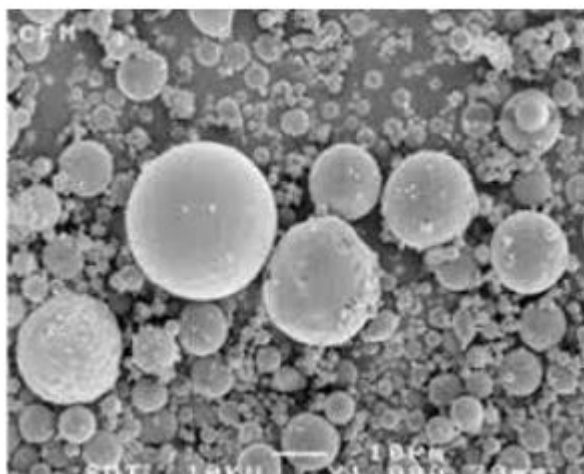
ตาราง 5 แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด			
ปริมาณที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ¹ ร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
1. ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	752	752	752
2. ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	752	752	752
3. ความต้องการน้ำสูงสุดร้อยละของร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
ความคงตัว (Soundness)³			
การขยายตัวหรือหดตัวออโตคลีฟ (autoclave) ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ ⁴			
ข้อกำหนดด้านการสม่ำเสมอ			
1. ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
2. ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ: 1. ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนตะแกรง 2. เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด 3. ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีตชิ้นส่วน ทดสอบของการขยายตัวออโตคลีฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น และ 4. ความหนาแน่นและความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย

ลักษณะของเถ้าลอย

โดยทั่วไปอนุภาคของเถ้าลอยจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหิน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหิน ลิกไนต์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังภาพที่ 13 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุน อาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (Chindaprasirt, et al., 2009)



ภาพ 13 แสดง Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย (1,000 เท่า)

ที่มา: Chindaprasirt, et al., 2009

วัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมหรือวัสดุผสมคือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ยัดเข้าไว้ด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมนี้จะได้จากธรรมชาติเป็นแร่ธาตุเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ หินอ่อน หินกรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทนและแข็งแรง การเลือกใช้วัสดุมวลรวมมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดี

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) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ทั่วไป คือ ทรายหยาบ

2. วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หิน กรวด การเลือกใช้มวลรวมหยาบ อาจกำหนดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ เช่น ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบ อาจเป็น 1 ใน 5 ของความหนาคาน หรือ 1 ใน 3 ของความหนาของแผ่นพื้น

หน้าที่หลักของมวลรวม คือ เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นองค์ประกอบหลักของคอนกรีต ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม จึงมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตโดยตรง คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม มีดังต่อไปนี้

1. กำลัง (Strength)

วัสดุมวลรวมต้องมีความสามารถรับน้ำหนักกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต โดยทั่วไปหินจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมาก กำลังรับแรงอัดของหิน มีค่าประมาณ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasive Resistance)

หินที่นำผสมคอนกรีตในงานต้องทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีได้ โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้ทำพื้นหรือถนน ซึ่งต้องเจอการเสียดสีอยู่ตลอดเวลา

3. ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Resistance)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและหดตัว หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิป้อย ๆ ซ้ำ ๆ ตลอดเวลา จะทำให้เกิดแรงมากพอที่จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ วัสดุผสมจึงควรทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี คือ ไม่ขยายหรือหดตัวมาก และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิป้อย ๆ ซ้ำ ๆ ได้ดี

4. ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

วัสดุมวลรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์

5. รูปร่าง และผิว (Particle Shape and Surface Texture)

มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ และความสามารถเทพได้ของคอนกรีต ดังนั้นวัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นแฉะเหลี่ยมคม และผิวหยาบเพื่อช่วยในการยึดเกาะ และไม่ควรมีรูปทรงเป็นแผ่นแบน ๆ หรือเป็นชิ้นยาว ๆ เพราะจะทำให้เทพได้ยาก ควรมีรูปทรงก้อนกลม หรือลูกบาศก์

6. ความสะอาด (Cleanliness)

วัสดุมวลรวมต้องสะอาดมีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อคอนกรีตน้อยที่สุด สารเหล่านี้ ได้แก่ เปลือกหอย ชานอ้อย ถ่านหิน เศษไม้ เศษกระดาษ ก้อนหิน โคลนเคลน ฝุ่น หรือ ผงละเอียด (Slit) ฝุ่นพลาสติก ไขมัน เป็นต้น สิ่งดังกล่าวนี้ทำให้ความทนทาน และแรงยึดเหนี่ยวลดลง บางครั้งทำให้คอนกรีตร้าว มีกำลังต่ำ และแข็งตัวช้า

7. ความลดหลั่นของขนาด หรืออัตราส่วนขนาดคละ (Gradation)

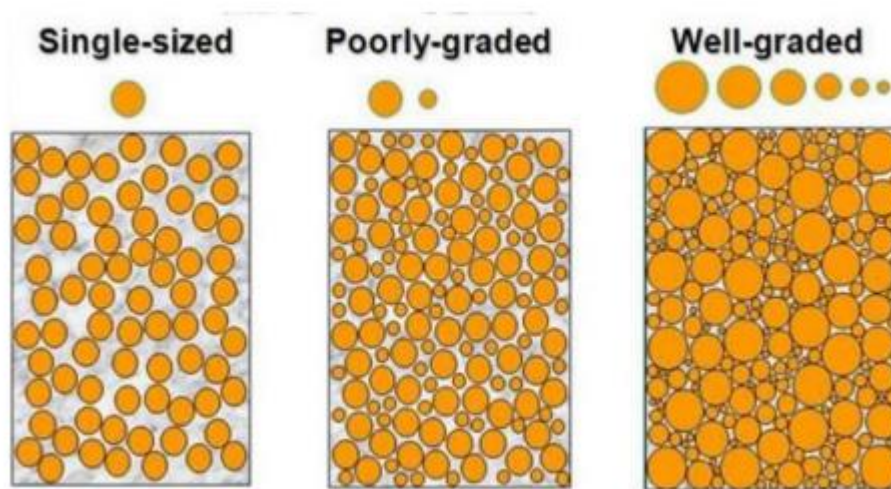
วัสดุมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตจะต้องมีความลดหลั่นของขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้เรียงตัวกันได้แน่น และมีช่องว่างน้อย ทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น ทั้งยังช่วยให้ทำงานได้ง่าย (วินิต ช่อวิเชียร, 2557)

ขนาดคละ คือ การกระจายของขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละอนุภาคของวัสดุมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ไม่ว่าวัสดุมวลรวมนั้นจะเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้ วัสดุมวลรวมจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมกัน เพื่อให้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน และอุดช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม

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) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพ 14 แสดงชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม

ที่มา: Civil Engineer PK, 2016

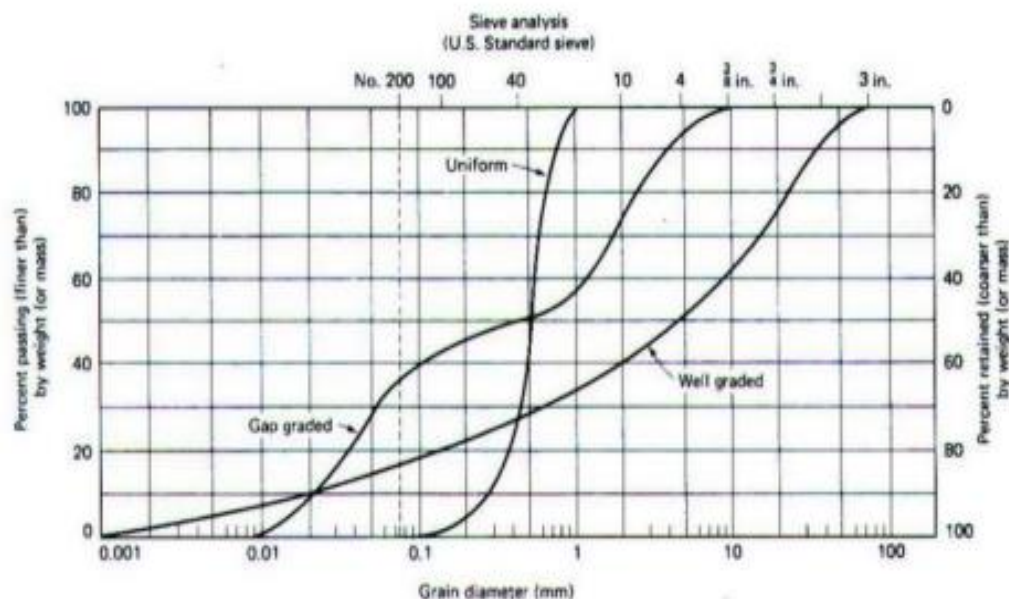
สัมประสิทธิ์บ่งชี้การกระจายขนาด ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์ของโค้งการกระจายขนาดของมวลรวม (Coefficient of Curvature, C_c) ดังสมการที่ (2.2)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (2.2)$$

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของขนาดมวลรวม (Coefficient of Curvature, C_u) ดังสมการที่ (2.3)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.3)$$

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 และรูปแบบของขนาดผลได้จากกราฟดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพ 15 แสดงตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม

ที่มา: Atkins, 1997

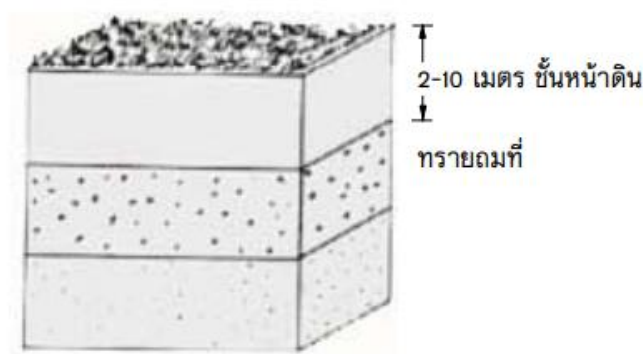
ทฤษฎีธรรมชาติ

กรรมวิธีการผลิตทราย ทรายที่ใช้ผลิตคอนกรีต สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด

1. ทรายแม่น้ำ คือ ทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อย ๆ ตกตะกอน สะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จะตกตะกอนอยู่บริเวณต้นน้ำ ส่วนทรายละเอียดนั้นก็จะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ การนำทรายขึ้นจากท้องน้ำจะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมาตามท่อ แล้วทิ้งทรายลงบนตะแกรงของเรืออีกลำ ตะแกรงจะทำหน้าที่ร่อนแยกกรวดที่มีขนาดใหญ่ออกก่อนที่จะดูดทรายขึ้นบนเรืออีกลำ เมื่อทรายเต็มเรือก็จะใช้เรืออีกลำลากเรือบรรทุกทรายไปยังท่าทราย ทรายที่ได้จะยังไม่สะอาดนัก เนื่องจากมีสารอินทรีย์ เศษตะกอนของดินโคลนปะปนอยู่ โดยทั่วไปจะต้องมีการล้างทรายอีกครั้ง คือเมื่อเรือบรรทุกทรายมาถึงท่าทรายจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณใกล้ท่า โดยการเปิดท้องเรือให้ทรายไหลลงแม่น้ำ แต่ถ้าเรือที่ลำเลียงทรายเปิดท้องเรือไม่ได้ ก็จะใช้สายพานลำเลียงทรายทิ้งลงในแม่น้ำ จากนั้นจะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมาทำวิธีการเดียวกันกับการดูดทรายขึ้นจากท้องน้ำครั้งแรก แตกต่างกันที่ตะแกรงที่ใช้จะสามารถแยกได้ทั้งทรายหยาบและทรายละเอียด ทรายที่ได้จัดเป็นทรายที่สะอาด เพราะผ่านการชะล้างถึง 2 ครั้ง ขั้นตอนต่อไปคือ การลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock โดยใช้สายพานลำเลียงจากเรือไปเก็บไว้ในยุ้งจนเต็ม

เมื่อเต็มก็จะลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock ต่อไป ทรายที่เก็บไว้ในถัง สามารถลำเลียงลงรถบรรทุกได้โดยสะดวก เพียงเปิดปากถัง ให้ทรายไหลลงในรถบรรทุกเอง ส่วนทรายที่กอง Stock อยู่ หากจะนำไปใช้จะใช้รถตักขนทรายใส่รถบรรทุกอีกครั้ง

2. ทรายบก คือ ทรายที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดิน โดยมีซากพืช ซากสัตว์ทับถมที่ผิวหน้า ซึ่งเราเรียกกันว่า หน้าดิน ที่มีความหนาประมาณ 2-10 เมตร การนำทรายมาใช้ เริ่มจากการเปิดหน้าดินก่อนด้วยรถ ตักดิน จากนั้นจะขุดดินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน จนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ แล้วนำเรือดูด ดูดทรายผ่านมาตามท่อ โดยปลายท่อจะมีตะแกรงแยกกรวดออก ขณะเดียวกันก็สามารถติดตั้งตะแกรงเพื่อแยกทรายหยาบและทรายละเอียดได้ ทรายที่ผ่านการร่อนแยกทรายหยาบและทรายละเอียด แยกจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณริมฝั่ง จากนั้นก็จะใช้รถตัก ตักทรายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



ภาพ 16 แสดงภาพตัดชั้นหน้าดิน

ที่มา: https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u3.pdf

เถ้าหนัก

เถ้าหนักเป็นหนึ่งในผลพลอยได้ที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อเดินเครื่องเต็มที่จะใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประมาณวันละ 40,000 ตัน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การเผาถ่านหิน จะใช้อุณหภูมิประมาณ 900-1000° C โดยเถ้าล่อยลิกไนต์ (Lignite Fly Ash) จะมีลักษณะเป็นฝุ่นลอยปนไปกับก๊าซร้อน ซึ่งสามารถดักจับได้ด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic

Precipitator) โดยทำการแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อนก่อนปล่อย จากปล่องควันส่วนเถ้าหนักเกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ ปะทะกันเองหรือปะทะกับผนังเตาแล้วหลอมติดกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่เรียกว่า Slag เมื่อน้ำหนักมากขึ้น Slag จะหล่นลงมาสู่ก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าหนัก



ภาพ 17 แสดงเถ้าหนัก

ที่มา: <https://energyindustryreview.com/construction/ukraines-first-green-road-bottom-ash-as-a-building-material/>

คอนกรีตรีไซเคิล

การรีไซเคิลขยะที่เหลือทิ้งหรือไร้ประโยชน์ให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ หรือแปรรูปจนได้วัตถุดิบขึ้นใหม่นั้นเป็นที่ยอมรับมากในปัจจุบัน เพราะนอกจากจะรีไซเคิลขยะให้เกิดประโยชน์ได้แล้ว ยังทำให้ได้วัตถุดิบขึ้นใหม่อีกด้วย แต่การรีไซเคิลขยะส่วนใหญ่ที่เห็นอยู่บ่อยครั้ง คือ ขยะประเภทพลาสติก แต่ยังมีขยะอีกประเภทหนึ่งที่สามารถนำมารีไซเคิลเพื่อให้ได้วัตถุดิบขึ้นใหม่ได้ นั่นก็คือ “เศษคอนกรีต”

Recycled Concrete Aggregate ตามคำจำกัดความของ (ว.ส.ท. 1014) หมายถึง มวลรวมที่เคยใช้แล้ว ซึ่งประกอบด้วย วัสดุก่อสร้างจากคอนกรีตที่แตกหรือวัสดุเหลือใช้จากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง ซึ่งอาจเป็นมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดเนื่องจากมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมที่สร้างขึ้นจากการย่อยคอนกรีตที่มาจากการรื้อทิ้งหรือย่อยคอนกรีตที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนด (รัฐพล สมนา และคณะ, 2554)

Brito, et, al. (2013) ได้กล่าวถึงมาตรฐานของ The Bulletin of the Chemical Society of Japan (BCSJ) ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไว้ ดังตารางที่ 6

ตาราง 6 แสดงคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลตามมาตรฐาน BCSJ

Properties	Coarse aggregate	Fine aggregate
Fine aggregate	$\geq 2,200$	$\geq 2,000$
Water absorption (%)	≥ 7	≤ 13
Loss of materials in the washing test (%)	≤ 1	≤ 8
Solid volume (%)	≥ 53	-

ที่มา: Brito, et, al., 2013

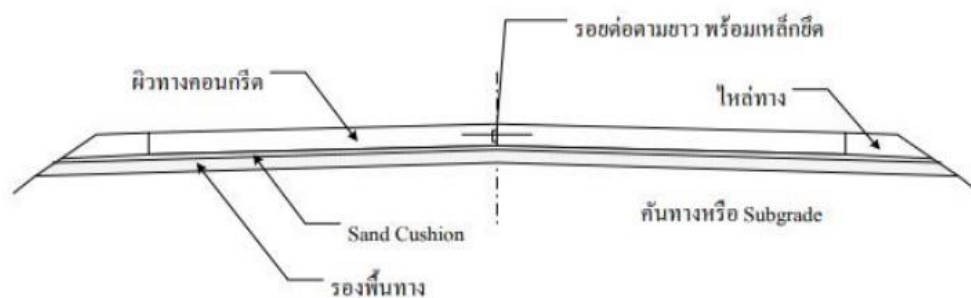
ปัญหาของการใช้มวลรวมรีไซเคิล

มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีลักษณะและคุณภาพที่ต่างจากมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ โดยทั่วไปมักมีคุณภาพที่ด้อยกว่า ไม่ว่าจะเป็นเรื่องขนาดความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ร้อยละการสึกกร่อนจากการขัดสี เป็นต้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดังกล่าวในส่วนผสมมักมีคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ เช่น คุณสมบัติด้านกำลังอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, 2554)

ประเภทและลักษณะโครงสร้างผิวทาง

1. องค์ประกอบพื้นฐานของผิวทางแข็งเกร็งหรือผิวทางคอนกรีต

ถนนคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีรูปตัดขวาง (Typical Cross Section) ดังแสดงในภาพที่ 18 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย



ภาพ 18 แสดงรูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต

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 แฉ่ง ทนทาน และสะอาด ปราศจากดินเหนียวและวัชพืชต่าง ๆ ในระหว่างก่อสร้างจะต้องเกลี่ยและบดอัดให้ได้ระดับ และความแน่นที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ชั้นทรายปรับระดับยังมีหน้าที่ช่วยระบายน้ำใต้ดินอีกด้วย

ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ในการก่อสร้างผิวทางโดยทั่วไปอาจจะมีหรือไม่มีชั้นพื้นทางก็ได้ ผิวทางคอนกรีตทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากยานพาหนะลงสู่ชั้นดินเดิมและจะทำหน้าที่เป็นชั้นพื้นทางไปในตัว เพราะกำลังของคอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังของชั้นพื้นทางมาก กล่าวคือ คอนกรีตสามารถรับความเค้นวิกฤติ (critical stress) ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีชั้นทางอยู่แล้ว ชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีตมีหน้าที่รองรับแผ่นคอนกรีตให้มีความเรียบ และสม่ำเสมอ ช่วยลดการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต และป้องกันการเกิดการอัดทะลัก (pumping and blowing) บริเวณรอยต่อ

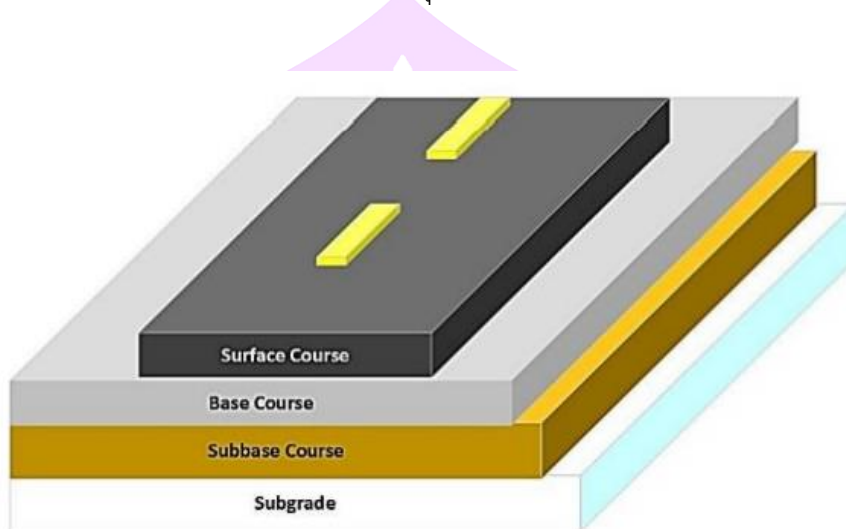
ชั้นดินเดิม (Subgrade) คือ ดินเดิมหรือดินคันทาง (Embankment) ปกติแล้วในการออกแบบถนนคอนกรีต ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินเดิมจะวัดในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า k ซึ่งได้จากการทดสอบ Plate Bearing Test (ASTM) แต่อาจจะเทียบค่า k กับค่า CBR ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันมากกว่าก็ได้

รอยต่อ (Joint) ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีการทำรอยต่อบนผิวคอนกรีตเป็นช่วง ๆ ตามยาวและตามขวางของถนน แบ่งผิวคอนกรีตออกเป็นแผ่น ๆ รอยต่อเหล่านี้จะทำหน้าที่ควบคุม

การเกิดรอยแตก (Crack) เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ป้องกันการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต เมื่อคอนกรีตขยายตัว และเป็นรอยต่อเนื่องจากการหยุดพักงานก่อสร้างแรงกระทำจะถ่ายจากแผ่นคอนกรีตแผ่นหนึ่งไปสู่อีกแผ่นหนึ่ง โดยเหล็กเดือย (Dowel Bar) และเหล็กยึด (Tie Bar)

2. องค์ประกอบพื้นฐานของผิวทางยืดหยุ่นหรือผิวทางแอสฟัลต์

ส่วนประกอบของผิวทางแบบยืดหยุ่นนั้นสามารถแบ่งออกเป็นชั้นดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพ 19 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างผิวทางยืดหยุ่น

ที่มา: Chompoorat, et al., 2018

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

ชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ (binder course or asphalt base course) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างของชั้นผิวทาง มีเหตุผลหลักสองประการที่จำเป็นต้องมีชั้นทางนี้คือ ประการแรก เพื่อเป็นไปตามมาตรฐานชั้นผิวทางที่ก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมร้อน โดยจะถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นมาก ดังนั้น การบดอัดแอสฟัลต์ผสมร้อนให้แน่นภายในครั้งเดียวมักทำได้ยาก ทำให้ต้องแบ่งชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนออกเป็นสองชั้น ประการที่สอง เพื่อความประหยัดในพื้นที่แอสฟัลต์ผสมร้อนนี้อาจใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ด้อยลง เพื่อให้การออกแบบนั้นมีความประหยัดมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ มีความหนามากเกินกว่า 7.5 เซนติเมตร แล้วจำเป็นที่จะต้องแบ่งชั้นพื้นทางแอสฟัลต์นี้

ออกเป็นอีกสองชั้นย่อย ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (base course and subbase course) ชั้นพื้นทาง เป็นชั้นของวัสดุที่อยู่ต่ำกว่าชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ชั้นพื้นทางประกอบไปด้วยหิน หรือกากโลหะ ที่ถูกทำให้แตกละเอียด หรือวัสดุผสมซีเมนต์ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งแรงคงทน ในส่วนของชั้นรองพื้นทางจะอยู่ใต้ชั้นพื้นทาง ซึ่งเหตุผลในการใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดนี้ก็เพื่อความคุ้มค่า แทนที่จะใช้วัสดุที่มีราคาแพงในการทำชั้นพื้นทาง เราสามารถใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าในการทำชั้นรองพื้นทางที่อยู่ด้านบนชั้นดินเดิม

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

3. องค์ประกอบพื้นฐานของโครงสร้างผิวทางผสม

โครงสร้างผิวทางแบบผสมเป็นโครงสร้างผิวทางที่มีรูปแบบการผสมผสานกันระหว่างผิวทางยึดหยุ่นกับผิวทางแข็งเกร็ง โดยทั่วไปโครงสร้างผิวทางประเภทนี้มักนำไปใช้กับงานด้านการบูรณะผิวทางและปรับปรุงถนน เช่น การเสริมผิวทาง แอสฟัลต์บน ผิวทางคอนกรีต นอกจากนี้ในปัจจุบันปริมาณการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะเพิ่มขึ้นอย่างมากจนถนนเดิมรับน้ำหนักจากยานพาหนะมากเกินไปจนขอบเขตที่ออกแบบเอาไว้ ทำให้ถนนเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งถนนก็จะเกิดความเสียหาย ส่งผลให้การขับขี่ยานพาหนะไม่สะดวก จึงจำเป็นต้องบำรุงรักษาถนน ซึ่งการบำรุงรักษาถนนเป็นที่ยอมรับมากในปัจจุบัน คือ การนำเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (pavement recycling) โครงสร้างทางที่ผ่านการบำรุงรักษาด้วยวิธีข้างต้นจะมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้น และมีความแข็งแรงทนทานยิ่งขึ้นเสมือนเป็นโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแข็งเกร็ง

ความสำคัญของกลศาสตร์ในงานวิศวกรรมผิวทาง

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

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus test, AASTO T307)

Hveem and Carmany (1948) และ Hveem (1955) ได้นำเสนอแนวความคิดของพฤติกรรม การคืนตัว (resilient behaviour) ของผิวทางต่อมา Seed, et al. (1955) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม การคืนตัวของวัสดุผิวทางโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำตามแนวทางที่ Hveem

เสนอแนะไว้ หลังจากนั้น Seed, et al. (1962) ได้นิยามโมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, MR) ตามรูปแบบของแรงกระทำกับความเครียดแบบไม่คืนตัว (Irrecoverable strain) ในช่วงเวลาสั้น ๆ ความเค้นแบบพลวัต (dynamic stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกำลังของวัสดุผิวทาง ดังนั้น วัสดุจึงสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้มาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CLSM

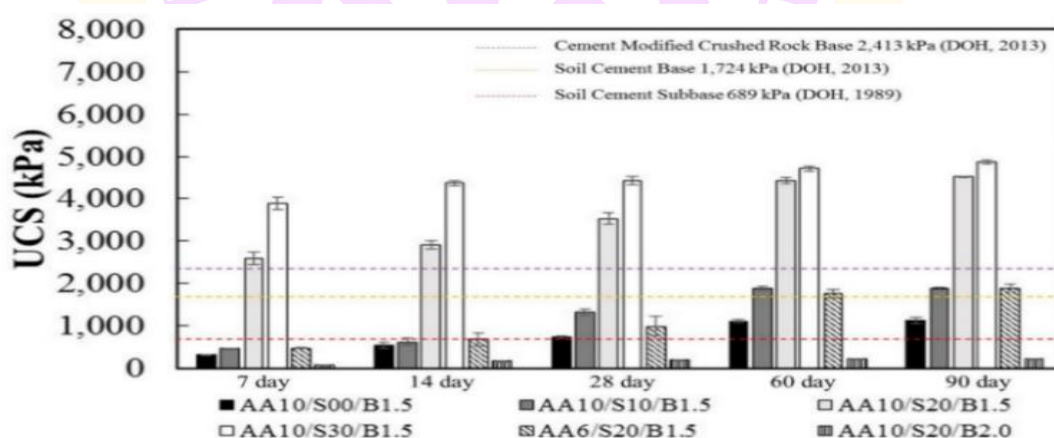
Chompoorat, et al. (2018) นำเสนอ CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการไหลแผ่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 28 60 90 และ 120 วัน และโมดูลัสคืนตัวที่อายุ 7 วัน จากผลการทดสอบพบว่า CLSM ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 650 mm ผ่านมาตรฐาน EFNARC (2002) ที่ระบุไว้ว่า CLSM ต้องมีค่าการไหลแผ่มากกว่า 650 mm และมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามอายุการบ่ม และปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น มีค่าโมดูลัสคืนตัวอยู่ในช่วง 800-850 MPa จากนั้นได้ทำการออกแบบพื้นทางที่ใช้ CLSM พบว่า มีค่าจำนวนของแรงกระทำซ้ำก่อนที่ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจะต่ำกว่าขีดจำกัดที่ยอมให้ของค่าการเสื่อมสภาพ และค่าการเสียหายแบบร่อนล่อ ดังแสดงในตารางที่ 1 อยู่ในช่วง $1.29-1.51 \times 10^6$ รอบ และ $6.92-7.29 \times 10^6$ รอบ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อเทียบกับพื้นทางที่ใช้หินคลุกในการออกแบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.27×10^5 รอบ และ 3.80×10^6 รอบ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อออกแบบอายุการใช้งาน พื้นทางที่ใช้ CLSM มีอายุการใช้งาน 2-3 ปี และพื้นทางที่ใช้หินคลุกมีอายุการใช้งาน 1 ปี จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า CLSM ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน สามารถทนทานต่อความเสียหายการเสื่อมสภาพ การเสียหายแบบร่อนล่อ และมีอายุการใช้งานที่ดีกว่าการใช้พื้นทางหินคลุกได้

ตาราง 7 แสดงการออกแบบน้ำหนักกระทำซ้ำ และอายุการใช้งาน

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

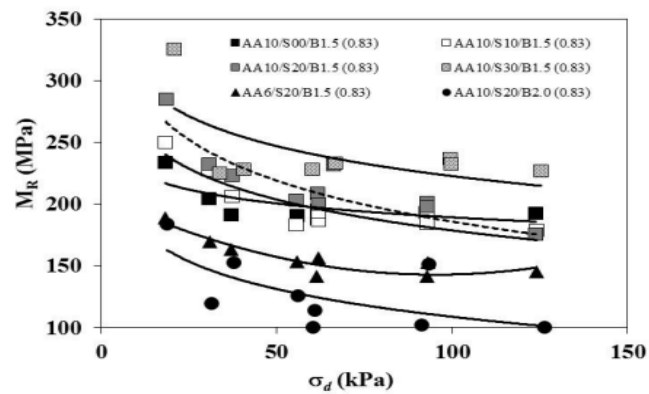
ที่มา: Chompoorat, et al., 2018

Chompoorat, et al. (2021) นำเสนอ CLSM ที่ใช้ตะกรันหลักกับเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย โดยทำการทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6 โมลาร์ และ 10 โมลาร์ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน พบว่า ส่วนผสมที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 20 นอกจากนี้ยังได้ทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ส่วนผสมที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ ส่งผลให้โมดูลัสการคืนตัวสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 21, 22 และ 23 ดังนั้นผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวที่ได้ จึงสอดคล้องกับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



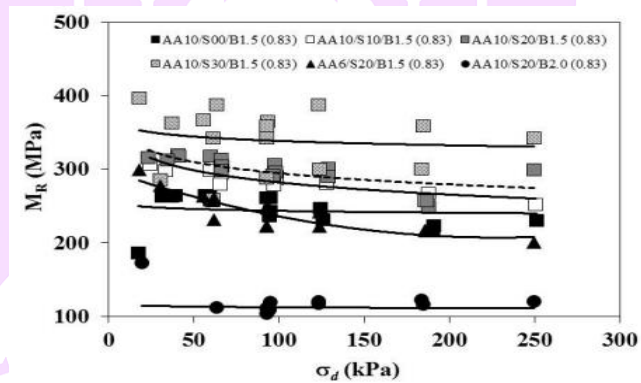
ภาพ 20 แสดงการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน

ที่มา: Chompoorat, et al., 2021



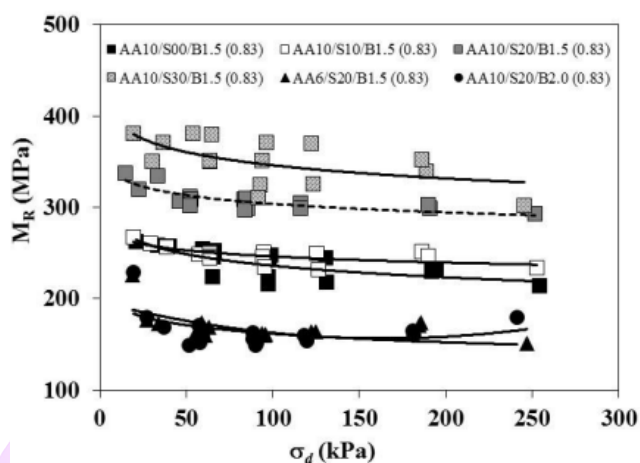
ภาพ 21 แสดงการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวที่ 7 วัน

ที่มา: Chompoorat, et al., 2021



ภาพ 22 การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวที่ 14 วัน

ที่มา: Chompoorat, et al., 2021



ภาพ 23 การทดสอบโมดูลัสการคั้นตัวที่ 28 วัน

ที่มา: Chompoorat, et al., 2021

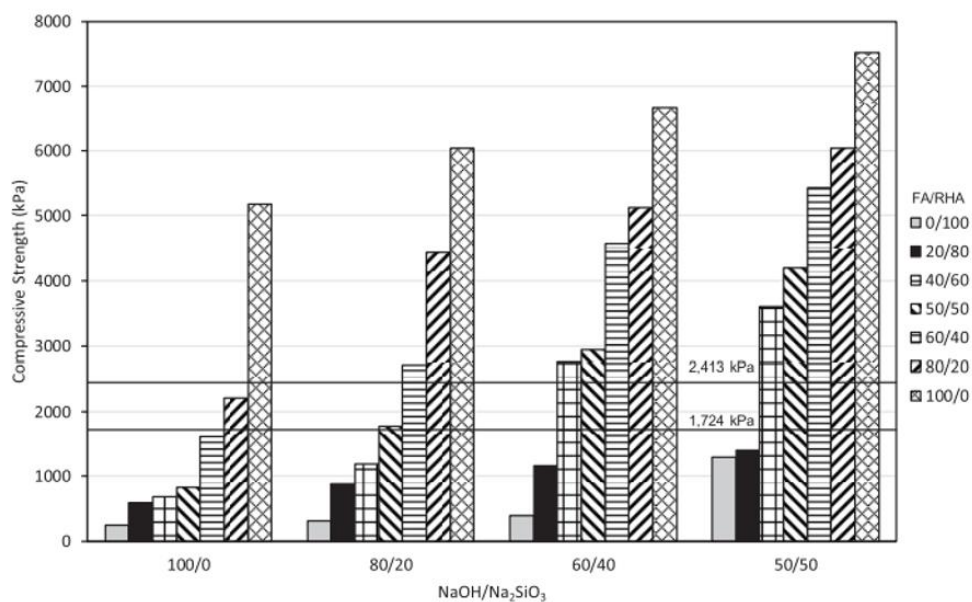
Achtemichuk, et al. (2009) นำเสนอ CLSM โดยปราศจากปูนซีเมนต์ที่ได้มีการนำคอนกรีตรีไซเคิลกลับมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมที่ใช้ตะกรันเหล็ก และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน โดยนำเสนอการเปรียบเทียบการใช้เถ้าลอยและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสาน งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกำลังอัดที่ 3 และ 7 วัน สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานได้กำลังอัด 3 และ 7 วัน 0.36-1.17 MPa และ 0.20-1.77 MPa ตามลำดับ และส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นตัวเชื่อมประสานได้กำลังอัด 3 วัน และ 7 วัน 0.70-5.21 MPa และ 0.55-6.54 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ จากผลการทดสอบ พบว่า CLSM ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า 150 mm ผ่านมาตรฐาน ACI 229R-99 พบว่า มีเพียงอัตราส่วนผสมของตะกรันเหล็กที่ร้อยละ 10 และ 20 ที่มีค่าการไหลผ่านมาตรฐาน

ตาราง 8 แสดงผลการทดสอบการเปรียบเทียบส่วนผสม CLSM โดยใช้ ตะกรันเหล็ก และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน

Slag					Fly ash				
Slag (%)	w/b	Flow (mm)	Strength (MPa)		Fly ash (%)	w/b	Flow (mm)	Strength (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

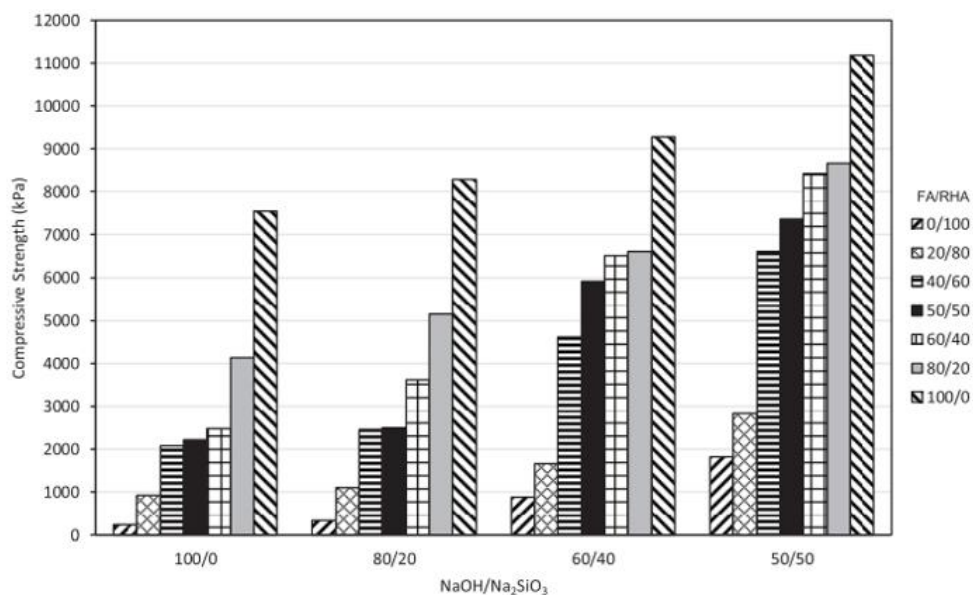
ที่มา: Achtemichuk, et al., 2009

Poltue, et al. (2017) นำเสนอ CLSM โดยการใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และใช้ RCA เป็นวัสดุมวลรวม วัสดุประสงค์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท งานวิจัยนี้ได้กำหนดใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ 50/50, 60/40, 80/20 และ 100/0 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ที่การทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบเทียบกับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน (2413 kPa ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 และ 1724 kPa ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556) สำหรับผิวทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ดังภาพที่ 24, 25 และ 26



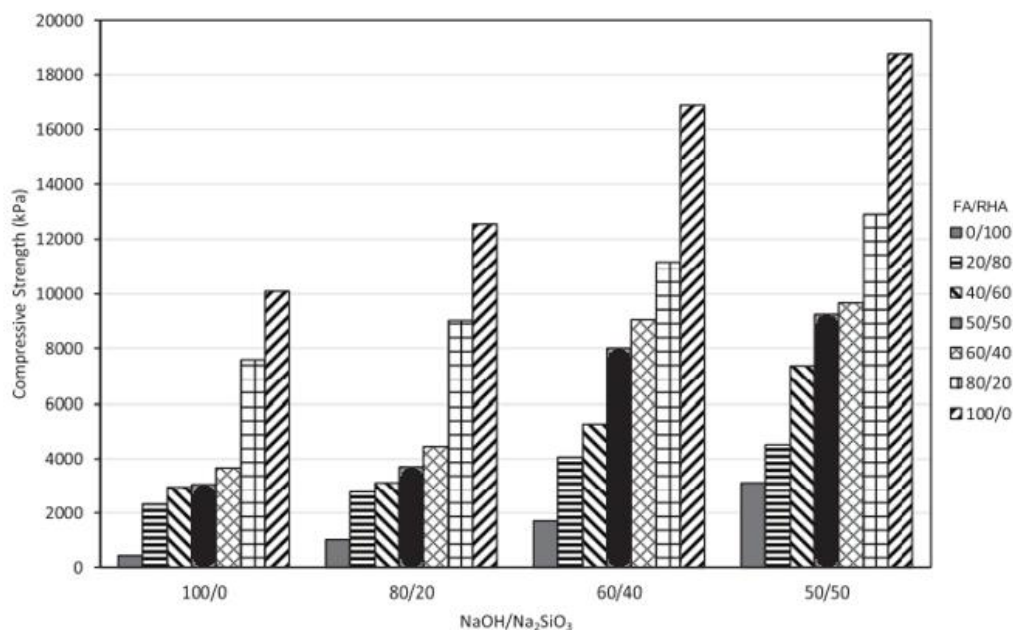
ภาพ 24 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไร้เซลที่เชื่อมประสานด้วย
 จีโอฟอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ที่มา: Poltue, et al., 2017



ภาพ 25 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไร้เซลที่เชื่อมประสานด้วย
 จีโอฟอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

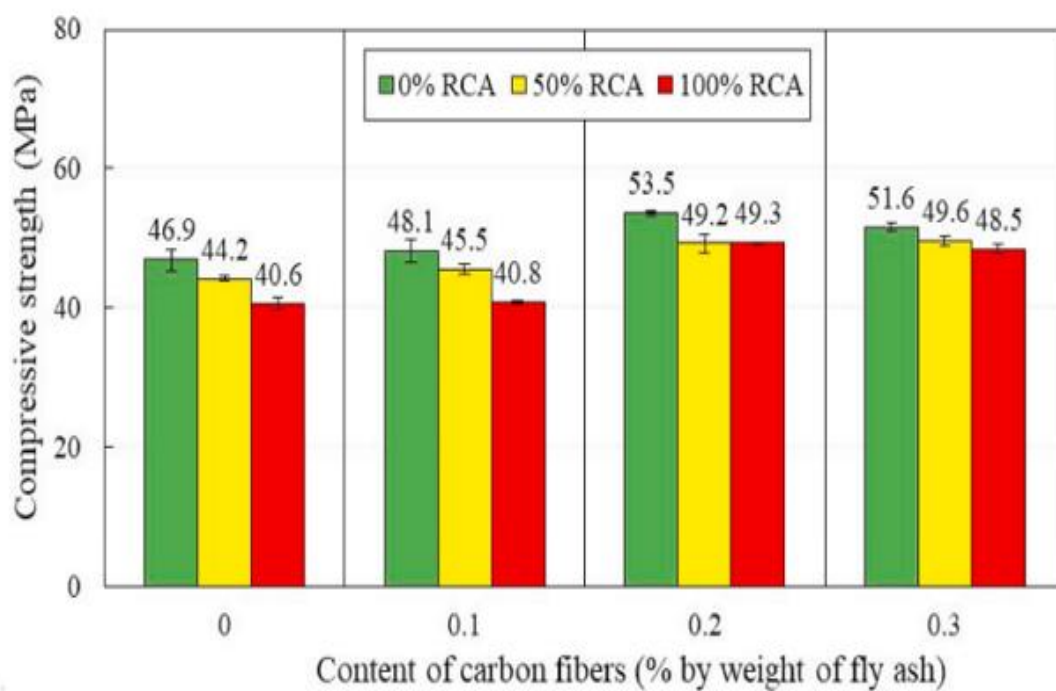
ที่มา: Poltue, et al., 2017



ภาพ 26 แสดงการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วย จีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน

ที่มา: Poltue, et al., 2019

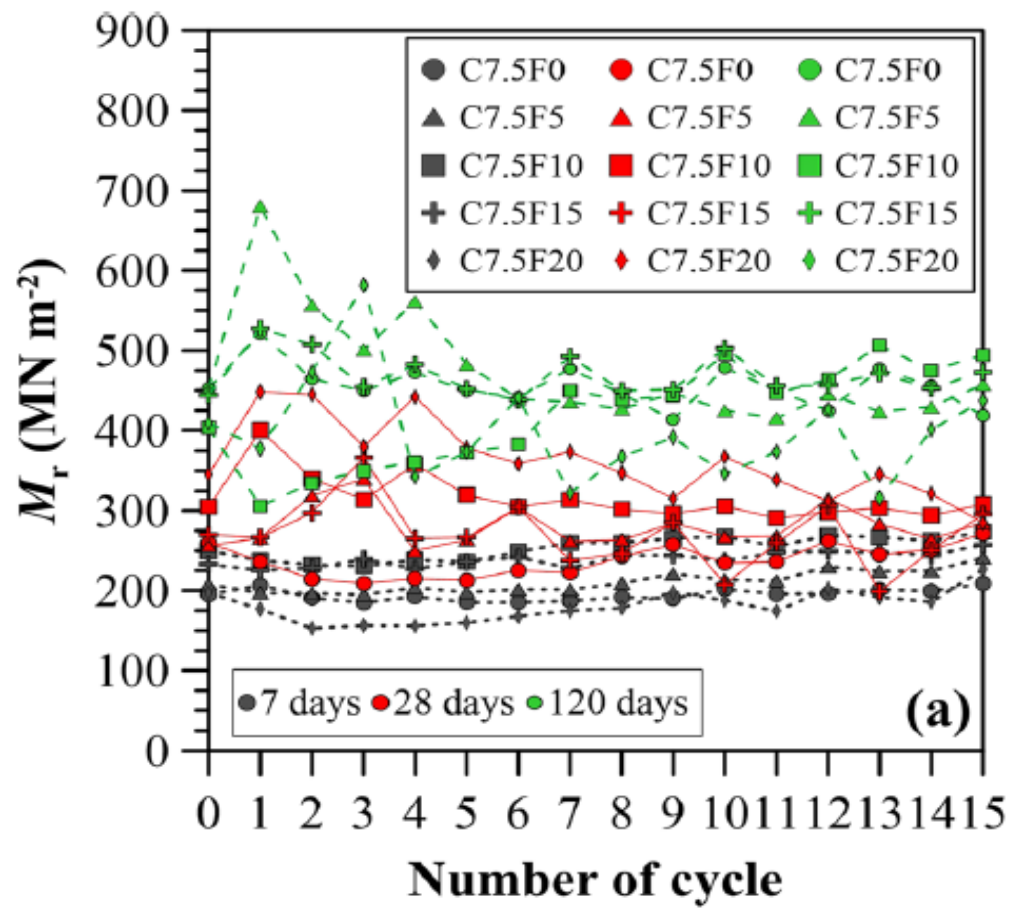
Nuaklong, et al. (2021) นำเสนอ CLSM โดยทำการศึกษาไมโครไฟเบอร์และเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานใช้ทรัพยากรธรรมชาติและคอนกรีตรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวม งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกำลังรับแรงอัด โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของไมโครไฟเบอร์ 0 0.1 0.2 และ 0.3 และเปรียบเทียบส่วนผสมมวลรวมทรัพยากรชาติต่อคอนกรีตรีไซเคิลที่ร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่าการเพิ่มไมโครไฟเบอร์และการลดลงของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพ 27 แสดงกำลังรับแรงอัดของ CLSM

ที่มา: Nuaklong, et al., 2021

Yoobanpot, et al. (2020) นำเสนอ CLSM โดยทำการทดสอบตะกอนที่ขุดลอกซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ 7, 28 และ 120 วัน พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ 7.5 % และเถ้าลอย 10 % ส่งผลให้โมดูลัสการคั้นตัวสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพ 28 การทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัว ที่ 7, 28 และ 120 วัน ของ CLSM

ที่มา: Yoobanpot, et al., 2020

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและสารเคมี การเตรียมสารเคมี และการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขั้นตอนการจัดเตรียมตัวอย่าง และขั้นตอนการทดสอบ ตัวอย่างตามมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และทดสอบคุณสมบัติด้านงานทางของ CLSM ตามมาตรฐาน American society for testing and material (ASTM) และ American association of state highway and transportation officials (AASHTO)

วัสดุและสารเคมี

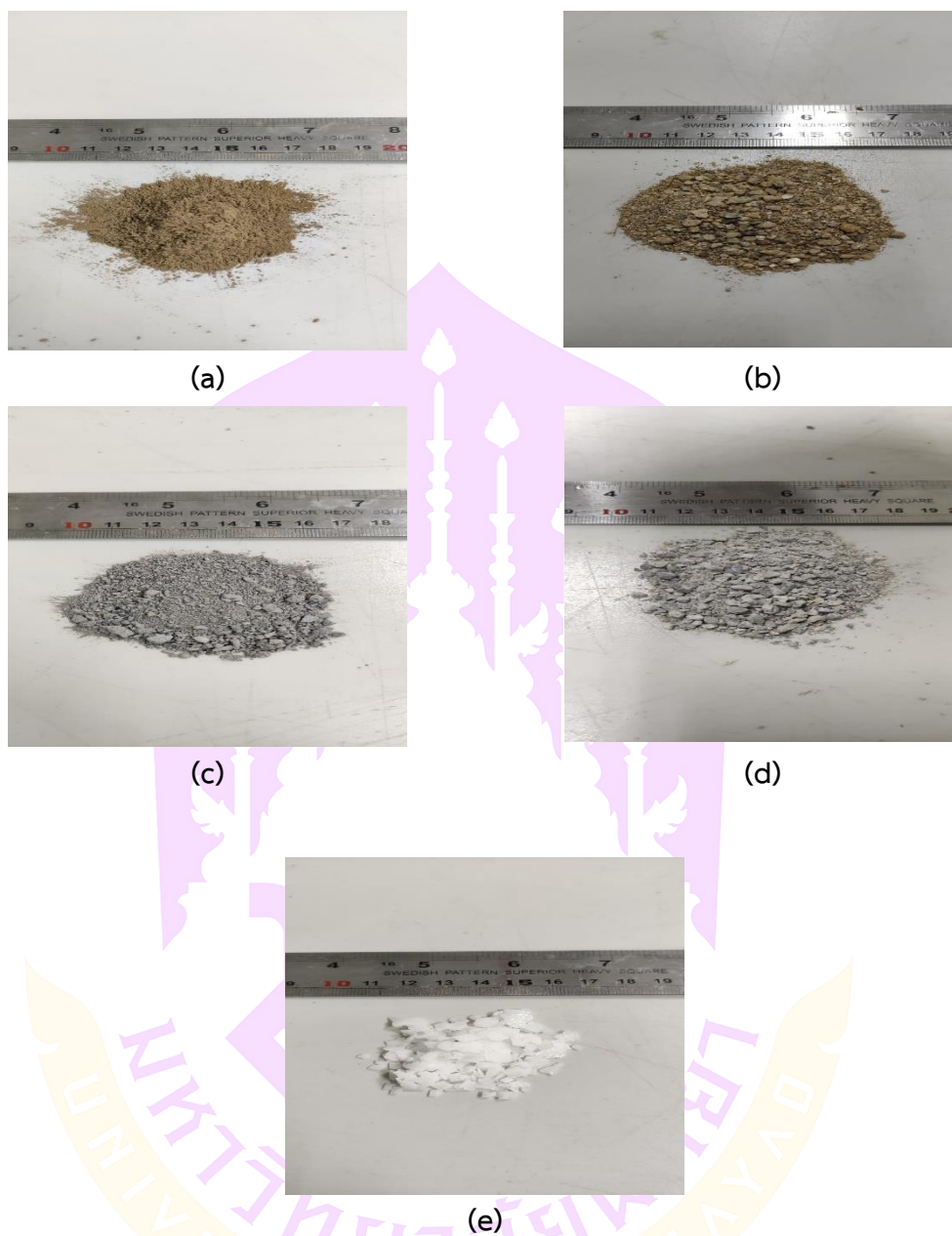
วัสดุและสารเคมีที่นำมาใช้ในการทดสอบสำหรับศึกษาวิจัยประกอบด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) เถ้าหนัก (bottom ash, BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ดังแสดงในภาพที่ 29 (a) และ (b) ทรายธรรมชาติ (river sand, S) ดังแสดงในภาพที่ 29 (c) และคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate, RCA) จากการรื้อถอนอาคารสิ่งก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 29 (d) โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน และใช้ทราย เถ้าหนัก และเศษคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงในภาพที่ 29 (e) เป็นตัวชะละลาย

การเตรียมสารเคมี

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ขายกันตามท้องตลาดจะอยู่ในรูปแบบเกล็ด จึงต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายและให้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ (Molar, M) อ้างอิงการเลือกความเข้มข้นจากงานวิจัย Chompoorat, et al. (2021) โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการที่ 3.1

$$g = \frac{CMV}{1000} \quad 3.1$$

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



ภาพ 29 แสดงวัสดุและสารเคมี (a) ใถ้าลอย (b) ใถ้าหนัก (c) ทรายธรรมชาติ (d) เศษคอนกรีต รีไซเคิล (e) โซเดียมไฮดรอกไซด์

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. คำนวณน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบเกล็ดหน่วยเป็นกรัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ ตามสมการที่ 3.1

2. เทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดตามที่คำนวณไว้ โดยให้ปริมาตรที่เทอยู่ต่ำกว่าขีดปริมาตรที่ต้องการเล็กน้อย

3. ใช้แท่งแก้วคนโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเกล็ดให้ละลายอยู่ในรูปแบบของสารละลายของเหลว และเป็นเนื้อเดียวกัน

4. เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ให้ถึงปริมาณที่ต้องการ

5. นำแผ่นฟิล์มพลาสติกใสคลุมปิดปากบีกเกอร์แล้วเจาะรูเพื่อระบายความร้อนแล้วปล่อยให้เย็น จึงจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่ต้องการ

ขั้นตอนการเตรียมคอนกรีตไร้เซล

1. คัดเลือกชิ้นส่วนวัสดุเสา และคานจากโครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ใช้งานจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา แสดงดังภาพที่ 30



ภาพ 30 แสดงชิ้นส่วนเสาและคานคอนกรีต

2. นำคอนกรีตที่ได้มาทำการย่อยให้ได้ขนาดมวลรวมหยาบหรือเทียบเท่าขนาดของหินธรรมชาติค้ำบนตะแกรงเบอร์ 1/2 (ขนาดตะแกรง 12 mm) โดยการใช้ค้อนป้อนทุบคอนกรีตให้ละเอียด แสดงดังภาพที่ 31



ภาพ 31 แสดงชิ้นส่วนเสา และคานคอนกรีต ย่อยโดยใช้ค้อนปอน

3. หลังจากนั้นนำไปย่อยอีกครั้งให้ได้ขนาดเทียบเท่ามวลรวมละเอียดหรือให้ใกล้เคียงกับขนาดของทรายธรรมชาติ โดยครกหิน แสดงดังภาพที่ 32



ภาพ 32 แสดงชิ้นส่วนเสา และคานคอนกรีต ย่อยโดยใช้ครกหิน

4. นำมวลรวมละเอียดที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดตะแกรง 4.75 mm) แสดงดังภาพที่ 33



ภาพ 33 แสดงคอนกรีตไรโซเคิลที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

5. หลังจากนั้นเก็บไว้ในภาชนะปิด เพื่อเตรียมใช้เป็นวัสดุผสมรวมต่อไป แสดงดังภาพที่ 34



ภาพ 34 แสดงภาชนะเก็บมวลรวมคอนกรีตไรโซเคิล

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบประกอบด้วย ขั้นตอน โดยแสดงรายละเอียด อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 9

ตาราง 9 แสดงอัตราส่วนผสม CLSM ต่อปริมาตรส่วนผสม 1 ลบ.ม.

Mix	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วน	เถ้าลอย	น้ำ	NaOH (10M)	ทราย ธรรมชาติ	คอนกรีต รีไซเคิล	เถ้าหนัก
		น้ำต่อ						
		วัสดุ	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
		ประสาน (W/B)						
1	AA10/S100/RCA00	0.54	535	290	20	802	-	-
2	AA10/S75/RCA25	0.54	535	290	20	601.5	200.5	-
3	AA10/S50/RCA50	0.54	535	290	20	401	401	-
4	AA10/S25/RCA75	0.54	535	290	20	200.5	601.5	-
5	AA10/S00/RCA100	0.54	535	290	20	-	802	-
6	AA10/BA100/RCA00	0.54	535	290	20	-	-	802
7	AA10/BA75/RCA25	0.54	535	290	20	-	200.5	601.5
8	AA10/BA50/RCA50	0.54	535	290	20	-	401	401
9	AA10/BA25/RCA75	0.54	535	290	20	-	601.5	200.5

หมายเหตุ: W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (เถ้าลอย)

งานวิจัยนี้มีวัสดุประสานเป็นเถ้าลอยได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอัตรา ส่วนผสมของ CLSM ดังนี้ $AAX_1/SX_2/BAX_3$ หรือ $AAX_1/SX_2/RCAX_4$ โดยที่

AA	หมายถึง	การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย (alkali activated)
X_1	หมายถึง	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีหน่วยเป็นโมลาร์
S	หมายถึง	ทรายธรรมชาติ
X_2	หมายถึง	ร้อยละทรายธรรมชาติต่อคอนกรีตรีไซเคิล
BA	หมายถึง	เถ้าหนัก
X_3	หมายถึง	ร้อยละเถ้าหนักต่อคอนกรีตรีไซเคิล
RCA	หมายถึง	คอนกรีตรีไซเคิล
X_4	หมายถึง	ร้อยละคอนกรีตรีไซเคิลต่อวัสดุผสมรวม

ยกตัวอย่างการเรียกชื่ออัตราส่วนผสม AA10/BA50/RCA50 หมายถึง ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ เถ้าหนักต่อคอนกรีตรีไซเคิล ร้อยละ 50 และคอนกรีตรีไซเคิล ต่อวัสดุมวลรวม ร้อยละ 50

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบประกอบด้วย 10 ขั้นตอน

1. เริ่มต้นด้วยการปรับอัตราส่วนผสมตัวอย่าง CLSM โดยปรับอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ จากต่อปริมาตร 1 ลบ.ม. เป็นต่อปริมาตร 0.011 ลบ.ม. ตามปริมาตรของโมลที่ใช้ สำหรับการทดสอบ
2. นำเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และเศษคอนกรีตรีไซเคิลเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 27 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำวัสดุ ออกมาพักเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุเย็นตัวลงและไม่ดูดซึมน้ำเกินกว่าปกติ เนื่องจาก ความร้อนในวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพ 35 แสดงการนำ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิลเข้าเตาอบ

3. เตรียม เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และเศษคอนกรีตรีไซเคิลตามอัตราสัดส่วนที่ได้ คำนวณไว้ ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพ 36 แสดงเถ้าลอย เถ้าหนัก ทราย และคอนกรีตรีไซเคิล

4. เตรียมเถ้าลอยเทโสในหม้อผสม เพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน

5. นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เตรียมไว้เทโสในหม้อผสมรวมกับวัสดุประสาน แล้วทำการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน และใส่ทรายธรรมชาติหรือเถ้าหนัก และเศษคอนกรีตรีไซเคิล ลงในหม้อผสม ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพ 37 แสดงการผสมส่วนผสมของ CLSM

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

7. นำส่วนผสมใส่ในโม่ไค้สูง 40 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 70 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของ CLSM และ ในแบบท่อ PVC ผ่าครึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 cm สูง 7.5 cm เพื่อทำตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

8. ทำการทดสอบค่าการยุบตัวและการยุบตัวแบบไหลแผ่ หลังจากผสมที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพ 38 แสดงการทดสอบการไหลแผ่

9. นำส่วนผสมใส่ลงในโม่ทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ cm และเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีหลังจากใส่ลงในโม่ ทำการดูน้ำบริเวณที่ผิวของ CLSM ดังแสดงในภาพที่ 39 เพื่อนำไปคำนวณการเยิ้ม



ภาพ 39 แสดงการทดสอบการเยิ้มน้ำ

10. หลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ทำการบ่มด้วยการแรปพลาสติกเป็นเวลา 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านกำลัง

1. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และเศษคอนกรีตรีไซเคิล ก่อนทำการผสมวัสดุ CLSM เราจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยมีการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 10

ตาราง 10 แสดงการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
การหาขนาดคละ	ขนาดคละของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM D 422, ASTM C136, ASTM C 33
หน่วยน้ำหนัก	หน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล	ASTM C 29
ความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และเศษคอนกรีต รีไซเคิล	ASTM C 128
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีต รีไซเคิล	ASTM C 128

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

1.2 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weight) ทดสอบโดยการนำวัสดุที่อยู่ในสภาพน้ำหนักแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ใส่ในแบบทรงกระบอกจนมีระดับหนึ่งในสามของความสูงแบบ จากนั้นกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กกระทุ้งให้ทั่วผิวหน้าจำนวน 25 ครั้ง ทำแบบเดียวกันจนเต็มความสูงแบบแล้วจึงนำไปชั่งทำอย่างน้อย 2 ครั้ง ผลการทดสอบที่ได้ไม่ควรต่างกันมากกว่า 1%

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

1.4 เพอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (absorption) หมายถึงการที่วัสดุมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากดูดน้ำเข้าสู่ช่องว่างในวัสดุแต่ไม่รวมถึงปริมาณน้ำที่ติดอยู่ที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาการดูดซึมน้ำของวัสดุ จำเป็นต้องหาสภาพอิมมัวแห่งของวัสดุก่อน

2. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม คุณสมบัติทางเคมีของ CLSM หลังจากผสมและเตรียมตัวอย่าง CLSM เรียบร้อย จึงทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM ดังในตารางที่ 11

ตาราง 11 แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้างทางจุลภาคของ CLSM

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน	จำนวนตัวอย่าง
ค่าการยุบตัว	การยุบตัวของ CLSM ที่ 0 30 60 และ 90 นาทีหลังจากผสม CLSM	ASTM C 1611	27
ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่	การไหลแผ่ของ CLSM ที่ 0 30 60 และ 90 นาทีหลังจากผสม CLSM	ASTM C 1611	27
ระยะเวลาการก่อตัว	การหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM	ASTM C 191	27
การเยิ้ม	การเยิ้มน้ำในผิวหน้าของ CLSM หลังจากผสม 30 นาที	ASTM C 232	27
หน่วยน้ำหนัก	หน่วยน้ำหนักของ CLSM	ASTM C 138	27
กำลังรับแรงอัดแกนเดียว	กำลังอัดที่ 7 14 28 60 และ 90 วัน หลังจากผสม CLSM	ASTM D 2166	135
โมดูลัสคืบตัว	โมดูลัสคืบตัวของ CLSM ที่ 7 14 และ 28 วัน	AASHTO T 307	135
การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือเรโซแนนซ์อิสระ	ทดสอบหาความเร็วเฉือนของ CLSM ที่ 7 14 และ 28 วัน	มาตรฐาน/งานวิจัย (Chompoorat et al., 2019)	135
Energy dispersive x - ray spectroscopy (EDS)	วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี		2
Scanning electron microscope (SEM)	ลักษณะสัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง		5
X - ray fluorescence (XDF)	องค์ประกอบธาตุทางเคมีของวัสดุ		5

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

2.2 การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow test) ใช้เพื่อทดสอบหาความสามารถในการไหลของ CLSM เนื่องจาก CLSM จำเป็นต้องมีคุณสมบัติการไหลการไหลที่ดีและมากกว่า 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 ทำการนำเข็มตวัดแสดงในภาพที่ 30 เพื่อหาระยะเวลาก่อตัวโดยกดให้หัวกดจมในเนื้อคอนกรีตแล้วทำการจดบันทึกค่าที่อ่านได้ ทำซ้ำจนกว่าหัวกดไม่จมในเนื้อคอนกรีต โดยหัวกดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm

2.4 การเยิ้ม (bleeding test) คือการคายน้ำจากส่วนผสม CLSM ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยปรากฏการณ์นี้มีลักษณะสำคัญ คือ น้ำบางส่วนจะถูกดันให้ลอยตัวขึ้นมาบนผิวของ CLSM เนื่องจากการจมลงของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ หรือคอนกรีตไรโซเคล ซึ่งการเยิ้มเป็นรูปแบบหนึ่งของการแยกตัว จึงมีการทดสอบหลังจากที่ CLSM สัมผัสกับน้ำจากนั้นทำการ ดูดน้ำจากผิวหน้าของ 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 3.75 cm (1 1/2 in) สูง 7.5 cm (3 in) ที่อายุการบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน ขณะที่ทำการทดสอบ จะกดตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วคงที่ ที่ 1.0 mm/min

2.7 โมดูลัสคืนตัว (resilient modulus test) เมื่อตัวอย่าง CLSM ครบอายุบ่มตัวที่ 7 14 และ 28 วัน วางบนแท่นรองที่มีความขรุขระประกบทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นทำการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยเยื่อห่อหุ้ม แล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องวัดระยะ (linear variable differential transformer, LVDT) จำนวน 2 ตัว ซึ่งเครื่อง LVDT จะติดตั้งเป็นเส้นทแยงมุมระหว่างกัน

เพื่อตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้มีลักษณะคงที่ หลังจากติดตั้งเสร็จจึงเริ่มการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ การประมวลผลเริ่มจากลำดับการให้แรงกระทำที่ 1 ถึงลำดับที่ 15 โดยแต่ละลำดับการให้แรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า คือ ความเค้นโอบรัด (confining stress) ความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) และความเค้นสัมผัส (contact stress) การเปลี่ยนแปลงของการให้แรงแต่ละลำดับของเครื่องนั้นจะให้แรงและถอนแรง จำนวน 100 รอบ ใน 1 ลำดับการทดสอบ จนถึงลำดับที่ 15 หรือตัวอย่างที่ทำการทดสอบเกิดการพังทลายจึงหยุดการทดสอบ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวนิยามจากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, σ_d) กับความเครียดคืนตัว (resilient strain, ϵ_r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad 3.2$$

2.8 การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant frequency method) นำตัวอย่าง CLSM ครบอายุบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน แขนงกับโครงเหล็ก โดยให้ตัวอย่างลอยขึ้นจากพื้น และทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นกับตัวอย่าง CLSM แล้วทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วโดยสามารถค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนจากสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$E_o = \rho v_p^2 = \rho(2Lf_L)^2 \quad 3.3$$

$$G_o = \rho v_s^2 = \rho(2Lf_r)^2 \quad 3.4$$

เมื่อ E_o คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น G_o คือ ค่าโมดูลัสเฉือน L คือ ความยาวของตัวอย่าง f_L คือ ความถี่ตามแนวยาว และ f_r คือ ความถี่ตามแนวขวาง

2.9 การทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างด้วยสเปกโตรเมตรีหรือรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

2.10 การทดสอบ scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค

บทที่ 4

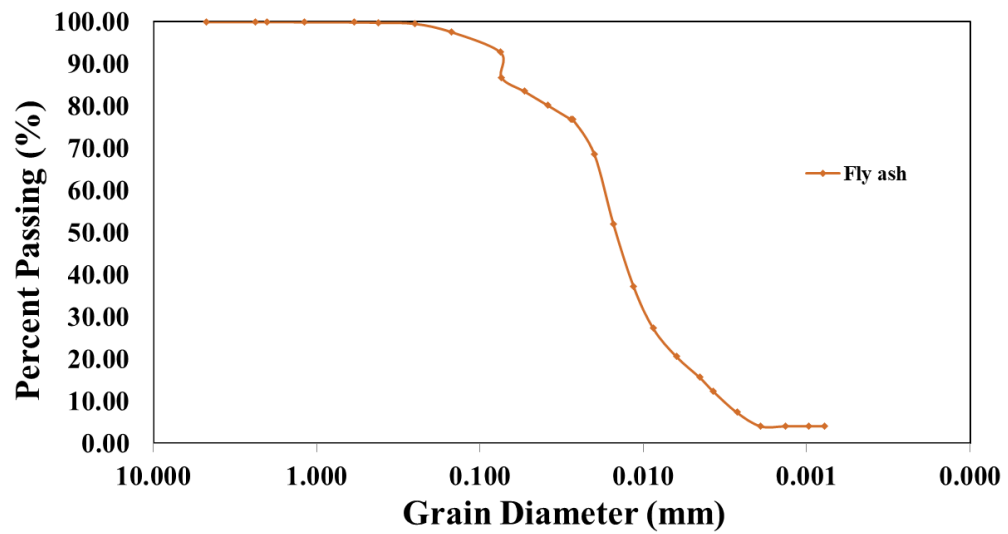
ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมของ CLSM (controlled low-strength material) จากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างผิวทางโดยมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และการศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังประกอบไปด้วย กำลังรับแรงอัด โมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) และเรโซแนนซ์อิสระ (free-free resonant, FFR) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักสำหรับการใช้ในการออกแบบผิวทาง

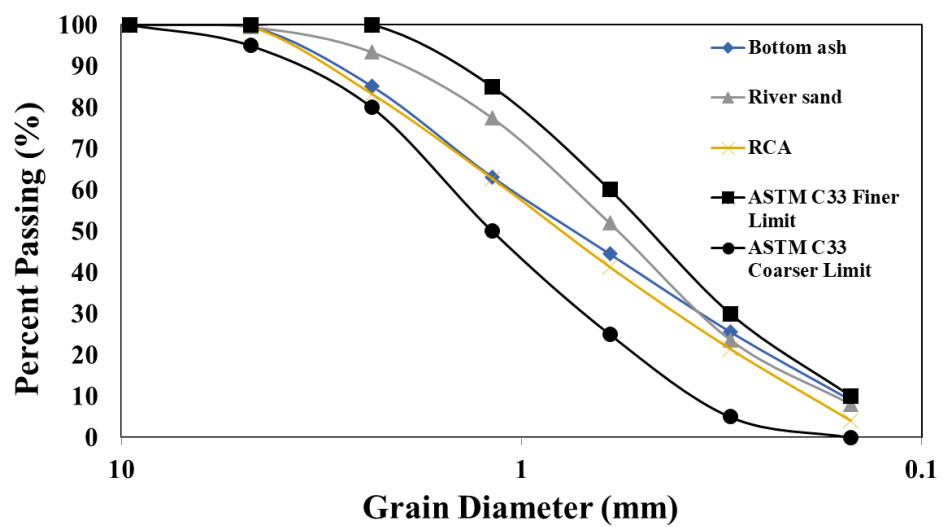
คุณสมบัติเบื้องต้นของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล

1. คุณสมบัติทางกายภาพของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบหาคูณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นเป็นไปตามมาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American society for testing and materials, ASTM) โดยมีการทดสอบหาขนาดผลของวัสดุ การทดสอบความถ่วงจำเพาะ การทดสอบหาความหนาแน่น และการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ ในการทดสอบหาขนาดของวัสดุ แสดงดังภาพที่ 40(a) และ 40(b) พบว่า เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก และร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงในตารางที่ 12 โดยเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ 2.69 เถ้าหนักมีความถ่วงจำเพาะ 2.48 ทรายธรรมชาติ 2.62 และคอนกรีตรีไซเคิล 2.51 เถ้าลอยมีหน่วยน้ำหนัก 1343 kg/m^3 เถ้าหนักมีหน่วยน้ำหนัก 1395 kg/m^3 ทรายธรรมชาติมีหน่วยน้ำหนัก 1695 kg/m^3 และคอนกรีตรีไซเคิลมีหน่วยน้ำหนัก 1645 kg/m^3 นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอยมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.33 เถ้าหนักมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.29 ทรายธรรมชาติ มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.32 และคอนกรีตรีไซเคิลมีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.91



(a)



(b)

ภาพ 40 แสดงการทดสอบหาขนาดของ (a) เถ้าลอย (b) เถ้าหนัก ทราบธรรมชาติ และคอนกรีตไร้เซลล์

ตาราง 12 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล

การทดสอบ	ผลการทดสอบ			
	เถ้าลอย	เถ้าหนัก	ทรายธรรมชาติ	คอนกรีตรีไซเคิล
ความถ่วงจำเพาะ	2.69	2.48	2.62	2.51
หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	1343	1395.00	1695	1645
การดูดซึมน้ำ (%)	0.33	5.29	0.32	3.91

2. คุณสมบัติทางเคมีของ เถ้าลอย เถ้าหนัก ทรายธรรมชาติ และคอนกรีตรีไซเคิล

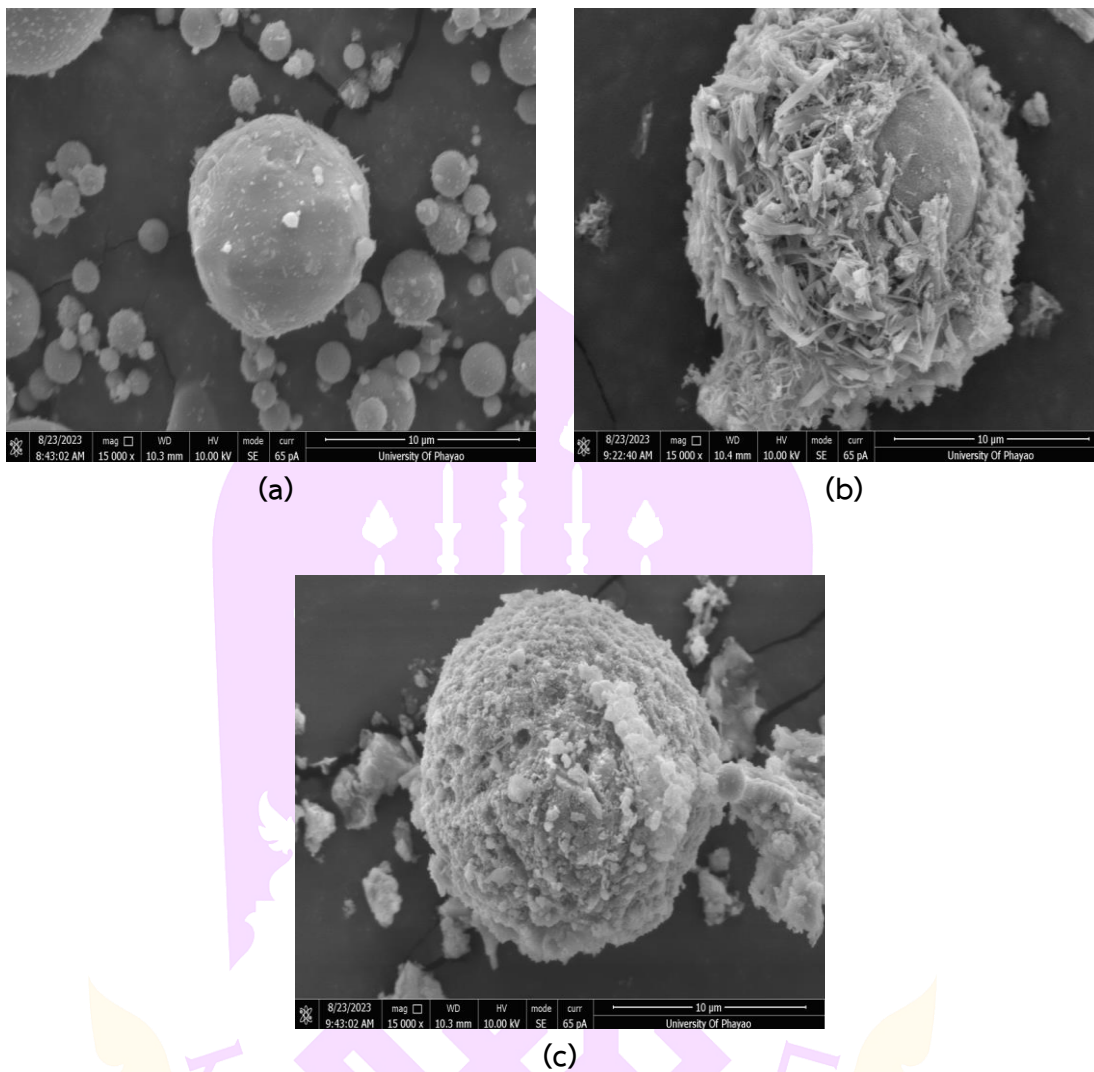
การวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) เพื่อศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุที่มีอยู่ใน เถ้าลอย เถ้าหนัก และคอนกรีตรีไซเคิล โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 13

จากตาราง 13 พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 17.50 12.18 1.14 และ 47.03 ตามลำดับ จึงพบว่า เถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเถ้าลอยประเภท Class C ในส่วนของเถ้าหนักมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 7.08 1.31 0.00 และ 47.54 ตามลำดับ และคอนกรีตรีไซเคิลที่มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 28.92 10.42 7.93 และ 4.92 ตามลำดับ การวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ธาตุด้วยวิธี XRF ทำให้พบว่า เถ้าหนักมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงที่สุด

ตาราง 13 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย แก้วหนัก และคอนกรีตรีไซเคิล

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล		
	แก้วลอย	แก้วหนัก	คอนกรีตรีไซเคิล
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2)	17.50	7.08	28.98
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, Al_2O_3)	12.18	1.31	10.42
เฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3)	1.14	0.00	7.93
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO)	47.03	47.54	4.90
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO)	0.45	0.75	0.68
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide, Na_2O)	1.61	0.00	1.79
โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide, K_2O)	2.65	5.50	0.00
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorous oxide, P_2O_5)	0.00	4.47	2.46

การวิเคราะห์อนุภาพของแก้วลอย แก้วหนัก และคอนกรีตรีไซเคิลจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) พบว่า อนุภาคของแก้วลอยที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะค่อนข้างกลม และผิวเรียบ ดังแสดงที่ภาพ 41 (a) อนุภาคของแก้วหนักที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะกลมผสมกับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผืนกดังแสดงที่ภาพ 41 (b) อนุภาคของคอนกรีตรีไซเคิลที่กำลังขยาย $\times 15,000$ เท่า มีลักษณะค่อนข้างกลม ผิวค่อนข้างขรุขระดังแสดงที่ภาพ 41 (c)



ภาพ 41 แสดงภาพถ่าย SEM (a) แก้วลอย (b) แก้วหนัก (c) คอนกรีตรีไซเคิล

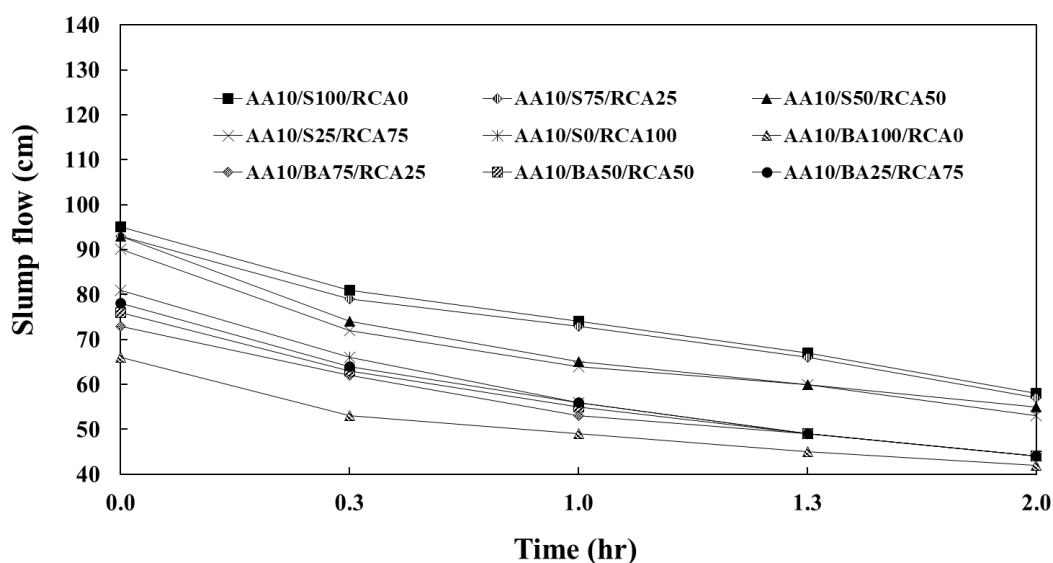
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม CLSM

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม CLSM เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM และสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (American association of state highway and transportation, AASHTO) ประกอบไปด้วยการทดสอบ การยุบตัว (ASTM C1611, 2021) ระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C191, 2021) หน่วยน้ำหนัก (ASTM C138, 2023) การเติมน้ำ (ASTM C232, 2021) การยุบตัวแบบไหลแผ่ (ASTM C1611, 2021)

1. การยู่ตัวแบบไหลแผ่

การทดสอบค่าการยู่ตัวแบบไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2021) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.54 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ และใช้ส่วนผสมวัสดุมวลรวมที่แตกต่างกันคือ ทราย แก้วหนัก และคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้อัตราส่วนผสม 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ

ผลการทดสอบโดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิล ดังแสดงในภาพที่ 42 และตารางที่ 14 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.54 พบว่า ตัวอย่าง CLSM มีค่าการไหลแผ่ช่วงเวลาหลังจากผสมเสร็จทันทีอยู่ในช่วง 66-95 cm จากมาตรฐาน EFNARC (2002) ระบุว่า การยู่ตัวแบบไหลแผ่ของคอนกรีตอัดตัวด้วยตัวเอง ต้องมีค่าการไหลแผ่หลังผสมเสร็จมากกว่า 65 cm จากการทดลอง พบว่า ตัวอย่างที่ 1 (S100/RCA00) มีค่าการยู่ตัวแบบไหลแผ่มากที่สุด หลังจากปรับอัตราส่วนผสม โดยการแทนที่มวลรวมทรายธรรมชาติด้วยคอนกรีตรีไซเคิลเข้าไปอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ พบว่า ค่าการยู่ตัวแบบไหลแผ่มีค่าลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าทรายธรรมชาติ ส่งผลให้การยู่ตัวแบบไหลแผ่ลดลง (Li et, al., 2024) ตัวอย่างที่ 6 (BA100/RCA00) มีค่าการยู่ตัวแบบไหลแผ่น้อยที่สุด หลังจากแทนที่มวลรวมแก้วหนักด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ พบว่า ค่าการยู่ตัวแบบไหลแผ่ มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าแก้วหนัก ส่งผลให้การยู่ตัวแบบไหลแผ่เพิ่มขึ้น



ภาพ 42 แสดงการยู่ตัวแบบไหลแผ่ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

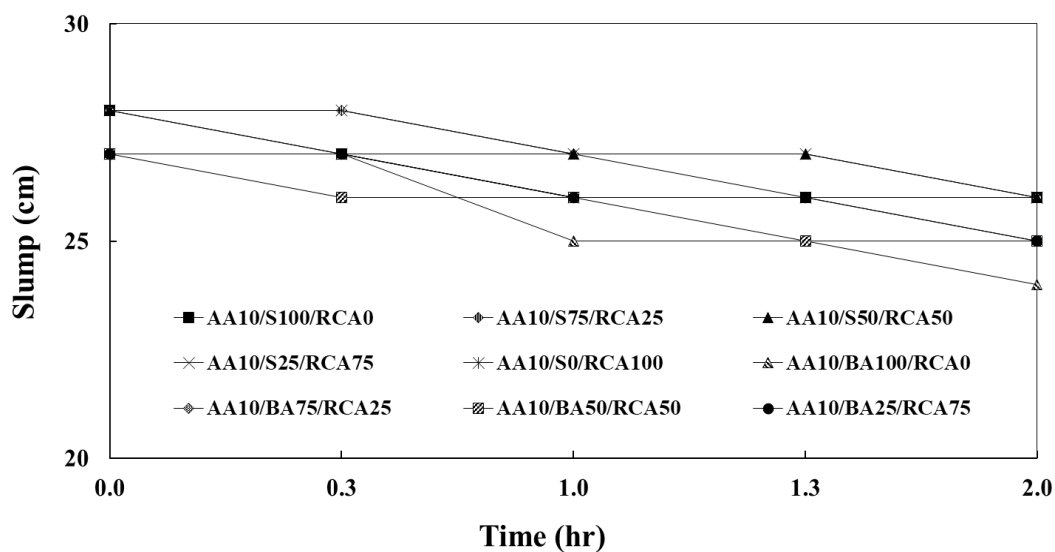
ตาราง 14 แสดงการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM

Mix	Symbol	Slump flow (cm)				
	(water/binder)	0.0	0.3	1.0	1.3	2.0
1	AA10/S100/RCA0	95	81	74	67	58
2	AA10/S75/RCA25	93	79	73	66	57
3	AA10/S50/RCA50	93	74	65	60	55
4	AA10/S25/RCA75	90	72	64	60	53
5	AA10/S0/RCA100	81	66	56	49	44
6	AA10/BA100/RCA0	66	53	49	45	42
7	AA10/BA75/RCA25	73	62	53	49	44
8	AA10/BA50/RCA50	76	63	55	49	44
9	AA10/BA25/RCA75	78	64	56	49	44

2. การยุบตัว

การทดสอบค่าการยุบตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2021) โดยการทดสอบนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.54 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ และการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตไรโซเคลในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ

ผลการทดสอบโดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตไรโซเคล ดังแสดงในภาพที่ 43 และตารางที่ 15 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.54 พบว่า ตัวอย่าง CLSM มีค่าการยุบตัวช่วงเวลาหลังจากผสมเสร็จทันทีอยู่ในช่วง 27-28 cm หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทั้ง 9 ตัวอย่างมีค่าการยุบตัวลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) ที่เกิดขึ้นจึงทำให้ปริมาณน้ำใน CLSM ลดลงส่งผลต่อการยุบตัว (Chompoorat, et al., 2021)



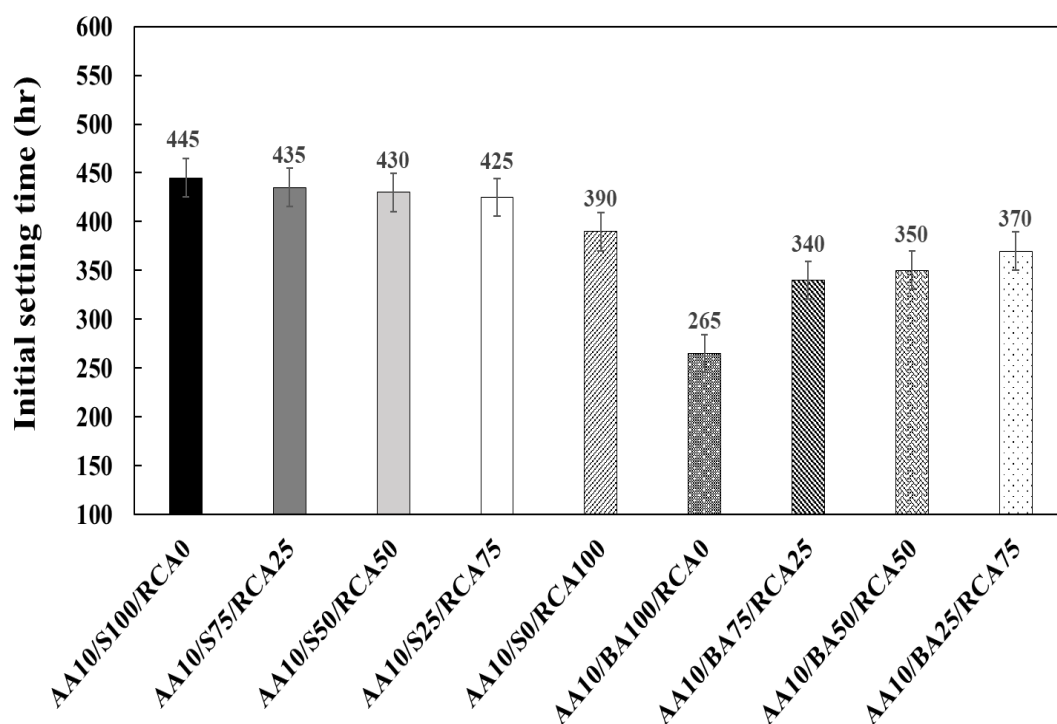
ภาพ 43 แสดงการยุบตัว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

ตาราง 15 แสดงการยุบตัว CLSM

Mix	Symbol	Slump test (cm)				
	(water/binder)	0.0	0.3	1.0	1.3	2.0
1	AA10/S100/RCA0	28	27	26	26	26
2	AA10/S75/RCA25	28	28	27	26	26
3	AA10/S50/RCA50	28	27	27	27	26
4	AA10/S25/RCA75	28	28	27	27	26
5	AA10/S0/RCA100	27	27	26	26	26
6	AA10/BA100/RCA0	27	27	25	25	24
7	AA10/BA75/RCA25	27	27	26	26	25
8	AA10/BA50/RCA50	27	26	26	25	25
9	AA10/BA25/RCA75	27	27	26	26	25

3. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

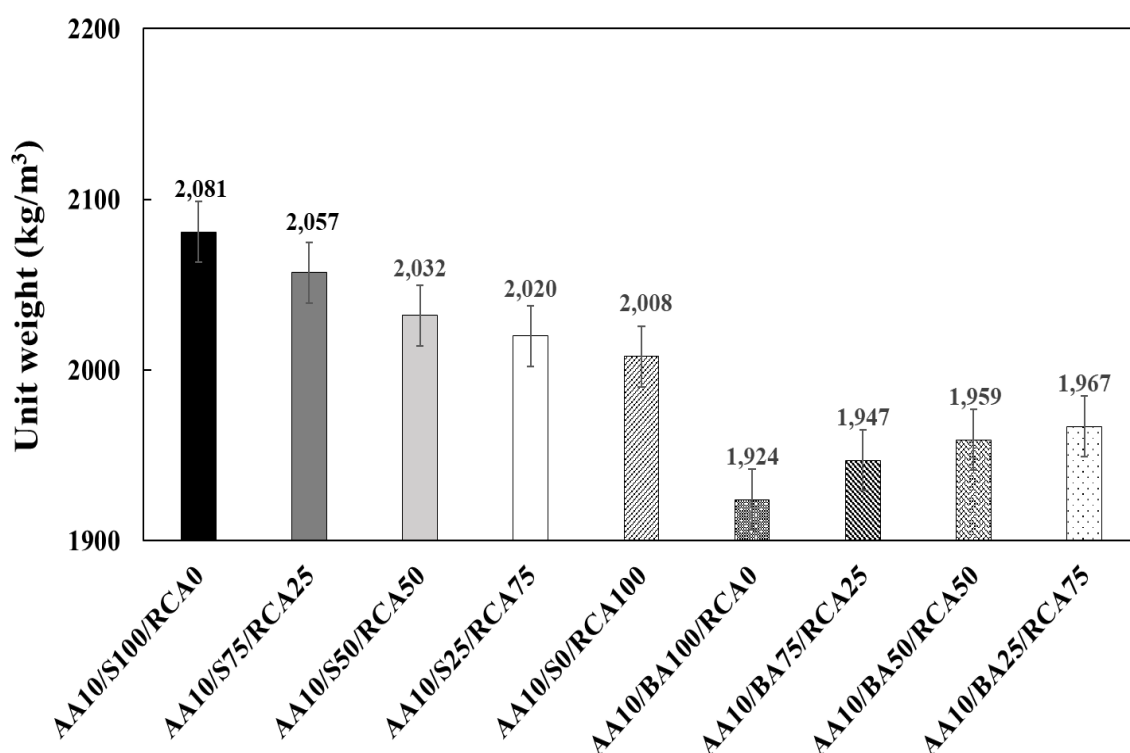
การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C191 (2021) โดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 44 โดยตัวอย่างที่ 1 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 445 นาที่ ตัวอย่างที่ 2 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 435 นาที่ ตัวอย่างที่ 3 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 430 นาที่ ตัวอย่างที่ 4 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 425 นาที่ ตัวอย่างที่ 5 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 390 นาที่ ตัวอย่างที่ 6 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 265 นาที่ ตัวอย่างที่ 7 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 340 นาที่ ตัวอย่างที่ 8 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 350 นาที่ และ ตัวอย่างที่ 9 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นหลังจากเริ่มผสมอยู่ที่ 370 นาที่ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 พบว่า การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ (Li, et al., 2024) และตัวอย่างที่ 6 7 8 และ 9 พบว่า การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่า แก้วหนัก และคอนกรีตรีไซเคิลมีปริมาณ (Ca) ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) น้อยกว่าแก้วหนัก ซึ่งจำเป็นต่อการทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (calcium aluminosilicate, C-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, CSH) ในโครงสร้างของ CLSM (Fernandez-Jimenez and Puertas, 2001)



ภาพ 44 แสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

4. หน่วยน้ำหนัก

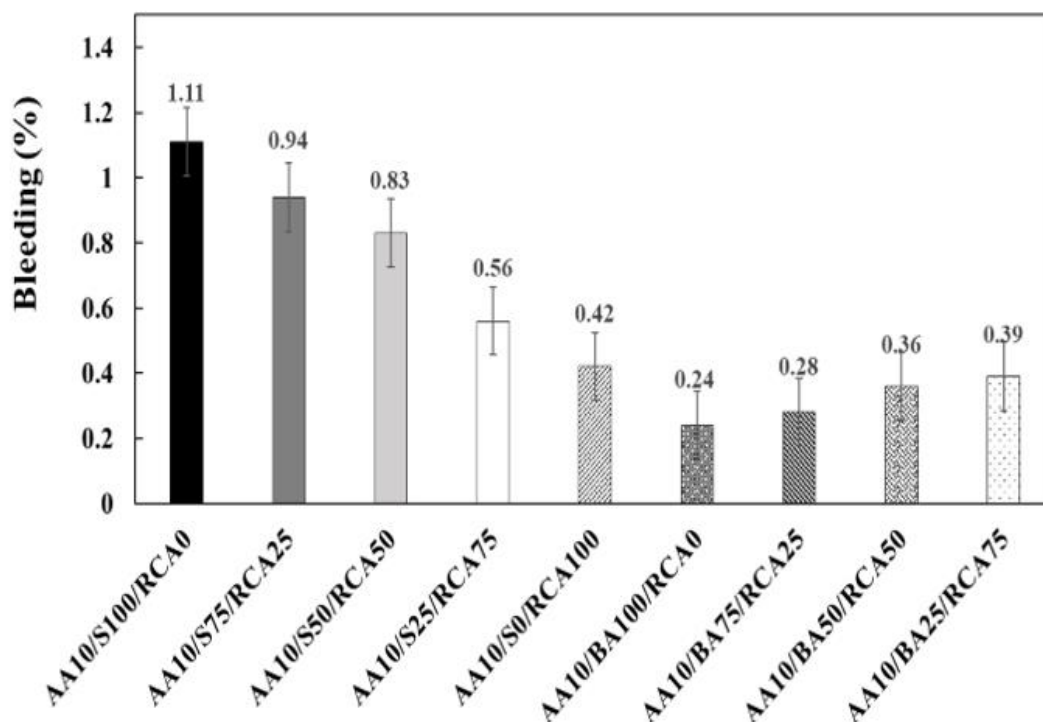
การทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C138 (2023) ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM เป็นไปตามภาพ 45 มีค่าอยู่ในช่วง 1,924-2,081 kg/m³ โดยหน่วยน้ำหนักของ CLSM ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 เท่ากับ 2,081 2,057 2,032 2,020 2,008 1,924 1,947 1,959 และ 1,967 kg/m³ ตามลำดับ จากตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 หน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าลดลงเมื่อแทนที่มวลรวมทรายด้วยคอนกรีตรีไซเคิล เพราะหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่าทราย ตัวอย่างที่ 1 (S100/RCA0) มีหน่วยน้ำหนักมากที่สุด และตัวอย่างที่ 6 7 8 และ 9 หน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละคอนกรีตรีไซเคิล เพราะหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตรีไซเคิลมีค่ามากกว่าเถ้าหนัก ตัวอย่างที่ 6 มีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด



ภาพ 45 แสดงหน่วยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

5. การเยื่อน้ำ

การทดสอบการเยื่อน้ำของ CLSM เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C232 (2021) ผลการทดสอบการเยื่อน้ำของ CLSM ดังแสดงในภาพที่ 46 ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ใช้โดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ มีค่าร้อยละการเยื่อน้ำเท่ากับ 1.11 0.94 0.83 0.56 0.42 0.24 0.28 0.36 และ 0.39 จากตัวอย่างที่ 1 2 3 4 และ 5 การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้มีค่าร้อยละการเยื่อน้ำลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าทราย ตัวอย่างที่ 6 7 8 และ 9 การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้มีค่าร้อยละการเยื่อน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีการค่าดูดซึมนำน้อยกว่าเถ้าหนัก และในเถ้าหนักมีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) สูงกว่าคอนกรีตรีไซเคิล



ภาพ 46 แสดงการเย็บน้ำ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

ตารางที่ 16 แสดงสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM โดยจากตารางดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่ 1 2 3 และ 4 การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ CLSM มีคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมดีขึ้น และตัวอย่างที่ 5 6 7 8 และ 9 การเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ CLSM มีคุณสมบัติพื้นฐานที่ลดลง

ตาราง 16 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM

Mix	Symbol	Setting time					Unit
		Slump flow	(min.)		Bleeding		weight
			(cm.)	Initial	Final	Min.	
1	AA10/S100/RCA0	95	445	720	30	1.11	2081
2	AA10/S75/RCA25	93	435	675	30	0.94	2057
3	AA10/S50/RCA50	93	430	615	30	0.83	2032
4	AA10/S25/RCA75	90	425	585	30	0.56	2020
5	AA10/S0/RCA100	81	390	570	30	0.42	2008
6	AA10/BA100/RCA0	66	265	420	30	0.24	1924
7	AA10/BA75/RCA25	73	340	510	30	0.28	1947
8	AA10/BA50/RCA50	76	350	540	30	0.36	1959
9	AA10/BA25/RCA75	78	370	555	30	0.39	1967

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังสำหรับนำไปใช้ในวิศวกรรมผิวทาง (pavement engineering) ของ CLSM ประกอบไปด้วยการทดสอบ กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ASTM D2166, 2016) โมดูลัสคั้นตัว (AASHTO T307, 2007) และโรโซเนนซ์อิสระ (Chompoorat, et al., 2019)

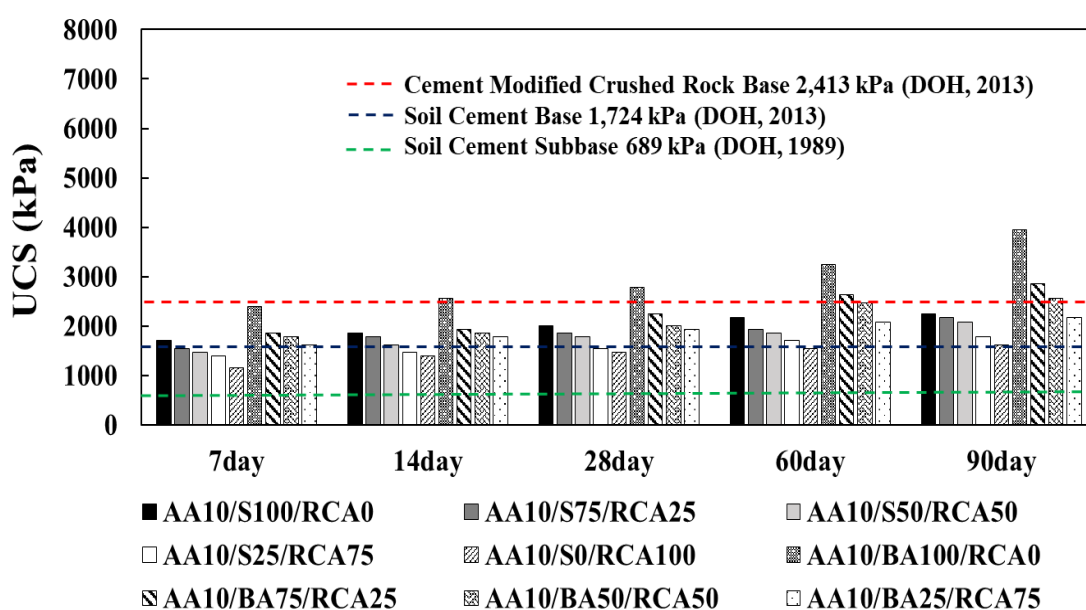
1. กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D2166 (2016) โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 47 และตารางที่ 17 กำลังรับแรงอัดของ CLSM ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 6 7 8 และ 9 โดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิลปริมาณร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 14 28 60 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 1,702 1,547 1,470 1,393 2,399 1,857 1,779 และ 1,625 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 1,857 1,779 1,625 1,470 1,139. 2,553 1,934 1,857 และ 1,779 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2,012 1,857 1,779 1,547 1,470 2,785 2,244 2,012 และ 1,934 kPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 2,166 1,934 1,857 1,702 1,547 3,250 2,631 2,476 และ 2,089 kPa ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 2,244 2,166 2,089 1,779 1,625 3,946 2,863 2,553 และ 2,166 kPa ตามลำดับ

จากตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 มีกำลังรับแรงอัดของ CLSM ลดลงตามปริมาณร้อยละของคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น และมีกำลังอัดพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของคอนกรีตรีไซเคิล ส่งผลให้ปริมาณช่องว่างที่ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นและความแข็งแรงลดลง (Achtemichuk, et al., 2009) นอกจากนี้ความต้านทานการสึกกร่อนของคอมโพสิตจีโอโพลิเมอร์ยังลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิล (Nuaklong, et al., 2021)

กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7 วันเดียวกันของ CLSM ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ตัวอย่างที่ 6 (BA100/RCA00) 7 (BA75/RCA25) และ 8 (BA50/RCA50) มีค่าผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 689 และ 1,724 kPa ดังแสดงในภาพที่ 47

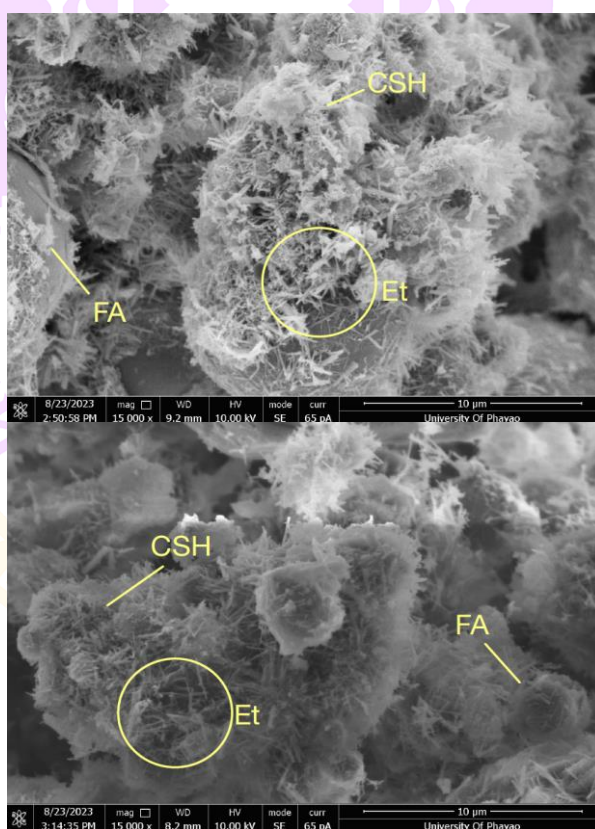
ภาพที่ 48 (a) แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ของตัวอย่างที่ 6 (AA10/BA100/RCA00) ที่อายุ 28 วัน สังเกตเห็นว่าบริเวณผิวของ CLSM มี CSH และ เอพทริงไคต์ (Ettringite, Et) มีลักษณะคล้ายเข็มเล็ก ๆ ก่อตัวขึ้นทำให้โครงสร้างของ CLSM อัดตัวแน่นขึ้น มีค่า Ca/Si 7.11 และ Si/Al 1.23 ภาพ 48 (b) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 15,000 เท่า ของตัวอย่างที่ 7 (AA10/BA75/RCA25) ที่อายุ 28 วัน มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาพมีความแน่นตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่ 6 (AA10/BA100/RCA00) ที่อายุ 28 วัน อย่างชัดเจน จากภาพที่ 49(a) และ 49(b) และตารางที่ 18 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่ 6 (BA100/RCA00) มีค่า Ca/Si 7.11 และ Si/Al 1.23 และตัวอย่างที่ 7 (BA75/RCA25) มีค่า Ca/Si 5.90 และ Si/Al 1.77



ภาพ 47 แสดงกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

ตาราง 17 แสดงตารางรับกำลังอัดแกนเดียวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

Mix	Symbol	Max UCS (kPa)				
	(water/binder)	7day	14day	28day	60day	90day
1	AA10/S100/RCA0	1,702	1,857	2,012	2,166	2,244
2	AA10/S75/RCA25	1,547	1,779	1,857	1,934	2,166
3	AA10/S50/RCA50	1,470	1,625	1,779	1,857	2,089
4	AA10/S25/RCA75	1,393	1,470	1,547	1,702	1,779
5	AA10/S0/RCA100	1,161	1,393	1,470	1,547	1,625
6	AA10/BA100/RCA0	2,399	2,553	2,785	3,250	3,946
7	AA10/BA75/RCA25	1,857	1,934	2,244	2,631	2,863
8	AA10/BA50/RCA50	1,779	1,857	2,012	2,476	2,553
9	AA10/BA25/RCA75	1,625	1,779	1,934	2,089	2,166

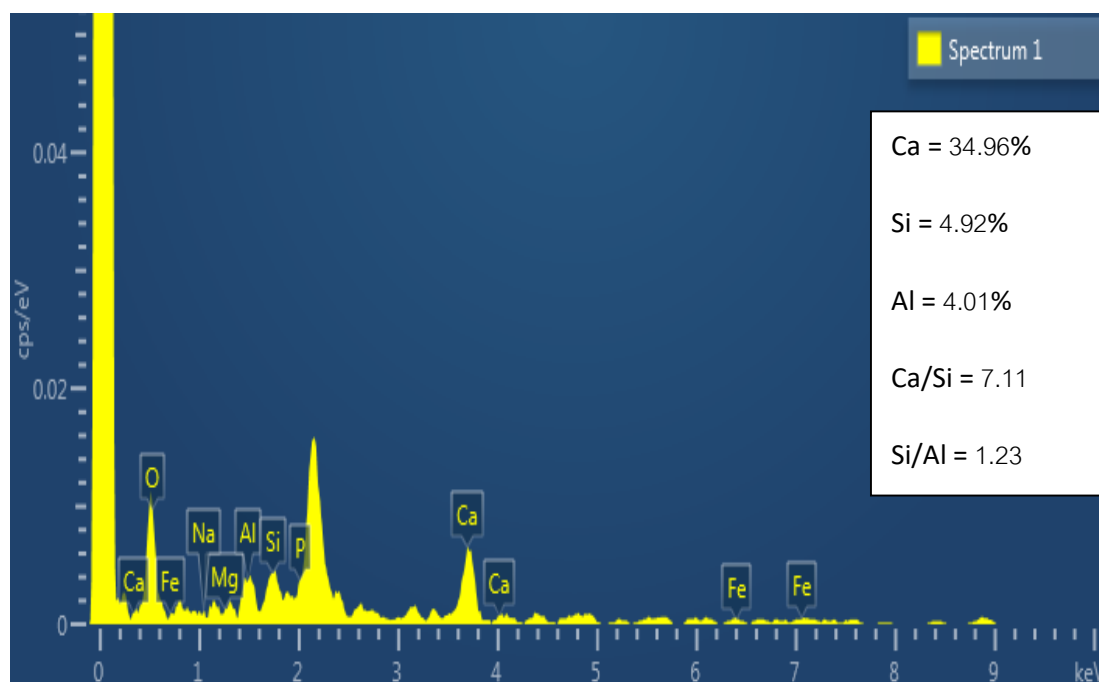


(a)

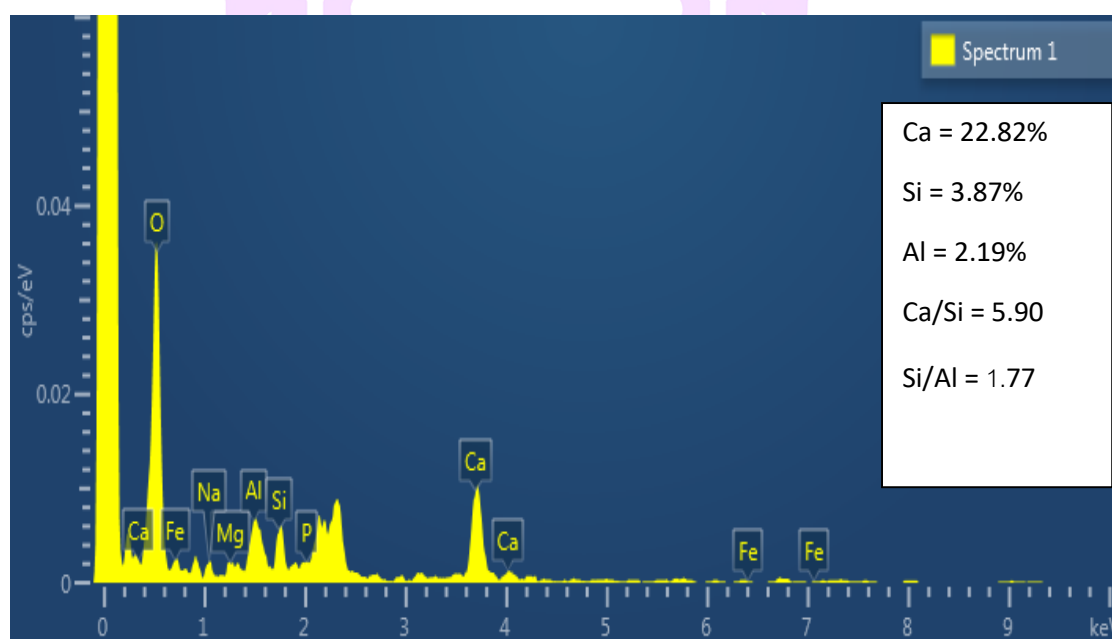
(b)

ภาพ 48 แสดงภาพถ่าย SEM (a) BA100/RCA00 28 วัน x15,000

(b) BA75/RCA25 28 วัน x15,000



(a)



(b)

ภาพ 49 แสดงผลการทดสอบ EDS (a) BA100/RCA00 28 วัน (b) BA75/RCA25 28 วัน

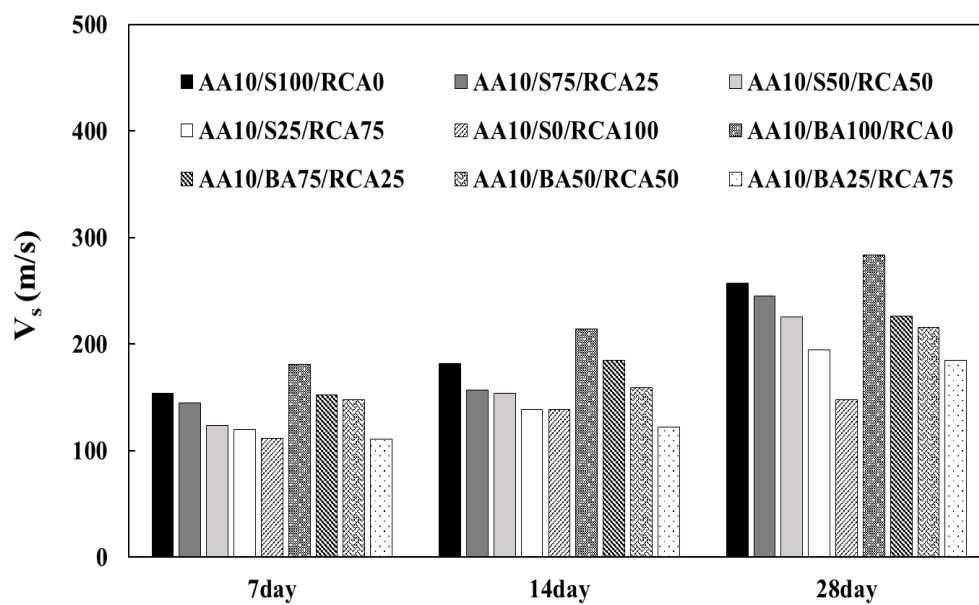
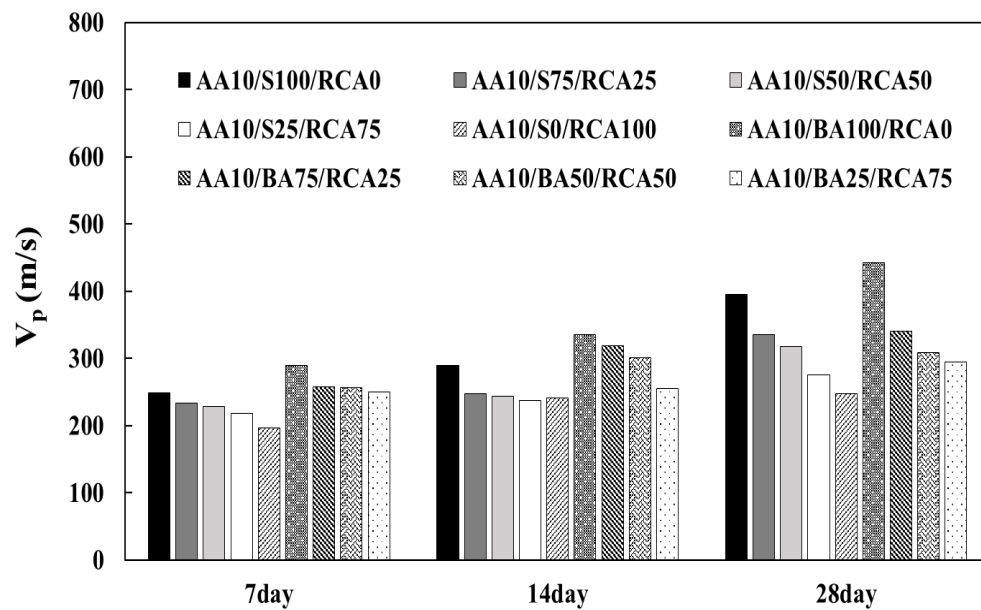
ตาราง 18 แสดงผลการทดสอบ EDS

Mix	CaO	Si	Al	Ca/Si	Si/Al
AA10/BA100/RCA00 (28 day)	34.96	4.92	4.01	7.11	1.23
AA10/BA75/RCA25 (28 day)	22.82	3.87	2.19	5.90	1.77

2. การทดสอบโรโซแนนซ์อิสระ

การทดสอบโรโซแนนซ์อิสระเป็นการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นของ CLSM โดยใช้คลื่นสั้นโพ่งอิสระเพื่อประเมินคุณสมบัติทางด้านกำลังในรูปแบบพลศาสตร์ (dynamic) โดยผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (compression wave velocity, V_p) ดังภาพที่ 50 (a) ค่าความเร็วคลื่น V_p ของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 โดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตไร้เซลล์ปริมาณร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน พบว่า ค่าความเร็วคลื่นที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 249 233 228 218 196 289 257 256 และ 250 m/s ตามลำดับ ค่าความเร็วคลื่นที่อายุ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 289 248 244 237 241 336 318 301 และ 255 m/s ตามลำดับ และค่าความเร็วคลื่นที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 395 335 317 275 247 442 340 308 และ 295 m/s ตามลำดับ พบว่า ค่าความเร็วคลื่น V_p มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละคอนกรีตไร้เซลล์ที่เพิ่มขึ้น และความเร็วคลื่น V_p มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (chompoorat, et al., 2021)

ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (shear wave velocity, V_s) ดังภาพที่ 50 (b) พบว่า ค่าความเร็วคลื่น V_s ของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 154 145 123 120 112 181 152 148 และ 111 m/s ที่อายุการบ่ม 14 วัน มีค่าเท่ากับ 182 157 154 139 138 214 185 159 และ 122 m/s และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 257 245 225 195 148 284 226 216 และ 185 m/s ตามลำดับ พบว่าค่าความเร็วคลื่น V_s มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละคอนกรีตไร้เซลล์ที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความเร็วคลื่น V_s มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (chompoorat, et al., 2021)

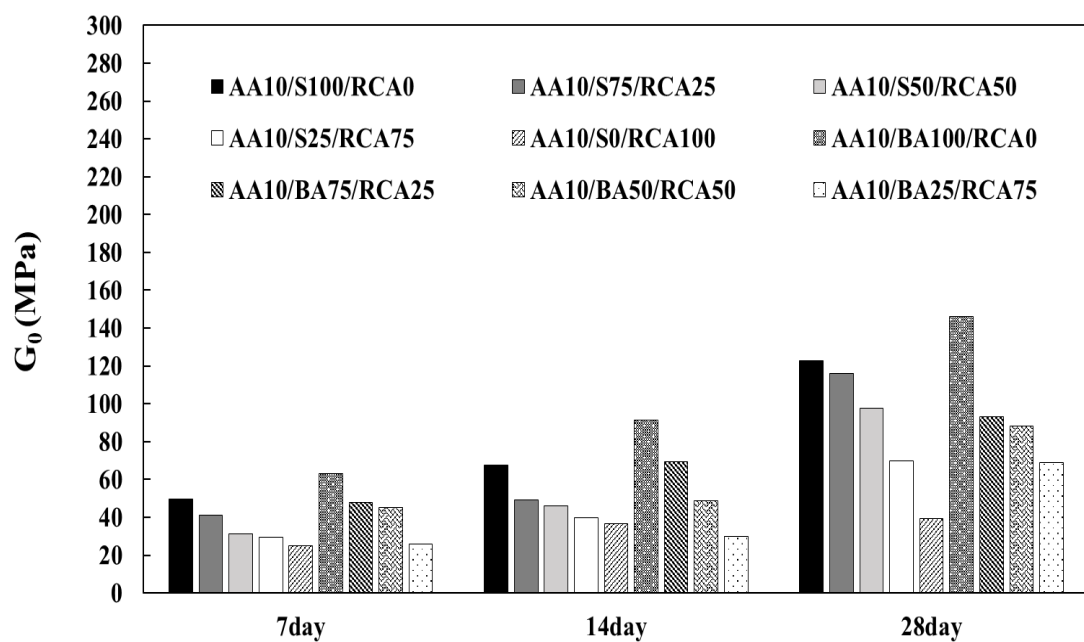
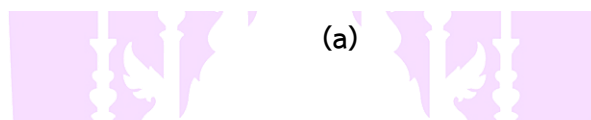
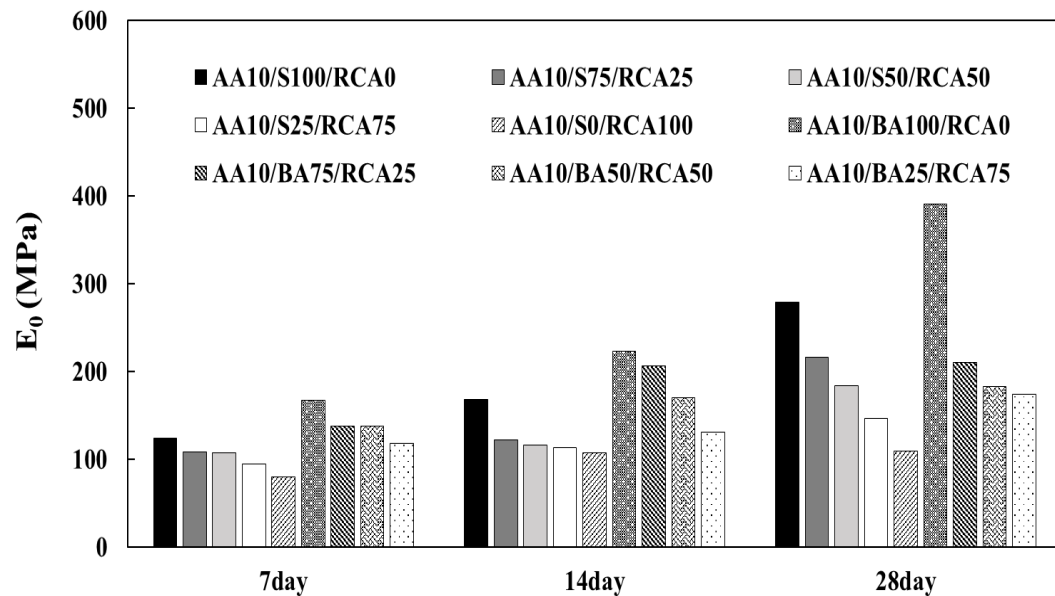


(b)

ภาพ 50 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่น กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

การทดสอบความเร็วคลื่น V_p ของ CLSM ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน สามารถนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (initial young's modulus, E_0) แสดงดังภาพที่ 51 (a) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น E_0 ของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 โดยการแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตไร้ไซเคิลปริมาณร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 124 108 107 95 80 167 138 126 และ 118 MPa ตามลำดับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่อายุ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 168 122 116 113 107 223 206 170 และ 131 MPa ตามลำดับ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 279 216 184 146 110 394 211 183 และ 174 MPa ตามลำดับ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น E_0 มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละคอนกรีตไร้ไซเคิลที่เพิ่มขึ้น และโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับค่า V_p (chompoorat et al., 2021)

การทดสอบความเร็วคลื่น V_s ของ CLSM ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน สามารถนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (initial shear modulus, G_0) แสดงดังภาพที่ 51 (b) ค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น G_0 ของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 อัตราส่วนผสมวัสดุมวลรวมที่แตกต่างกันคือ ทราย เถ้าหิน และคอนกรีตไร้ไซเคิล โดยใช้อัตราส่วนผสม 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน พบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 50 41 31 29 25 63 48 45 และ 26 MPa ตามลำดับ ค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นที่อายุ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 68 49 46 40 36 91 69 49 และ 30 MPa ตามลำดับ และค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 123 116 98 70 39 146 93 88 และ 69 MPa ตามลำดับ พบว่า ค่าโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น G_0 มีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละคอนกรีตไร้ไซเคิลที่เพิ่มขึ้น และโมดูลัสเฉือนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับค่า V_s (chompoorat, et al., 2021)

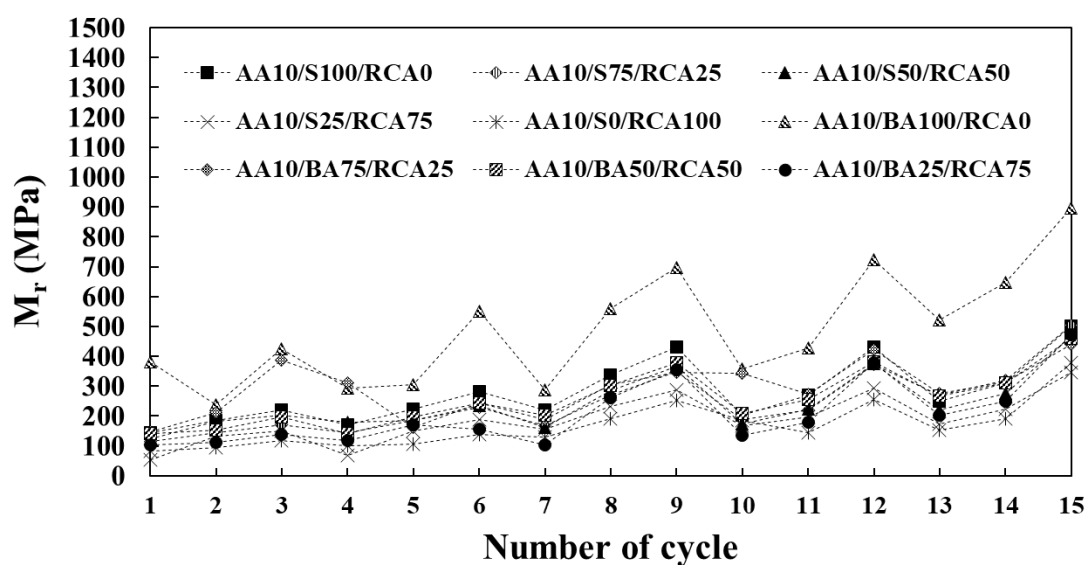


(b)

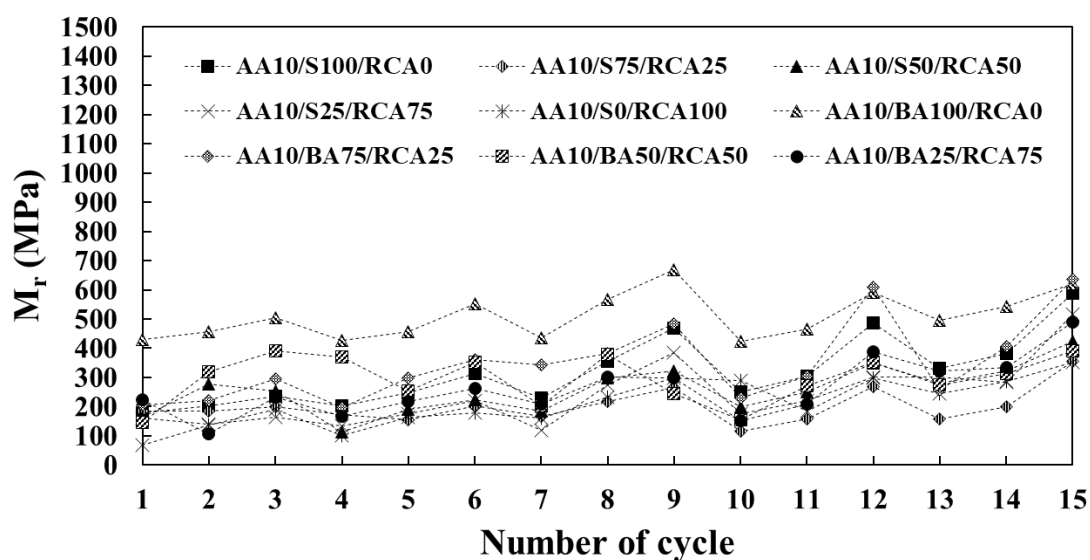
ภาพ 51 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัส กับระยะเวลาบ่มของตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

3. การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

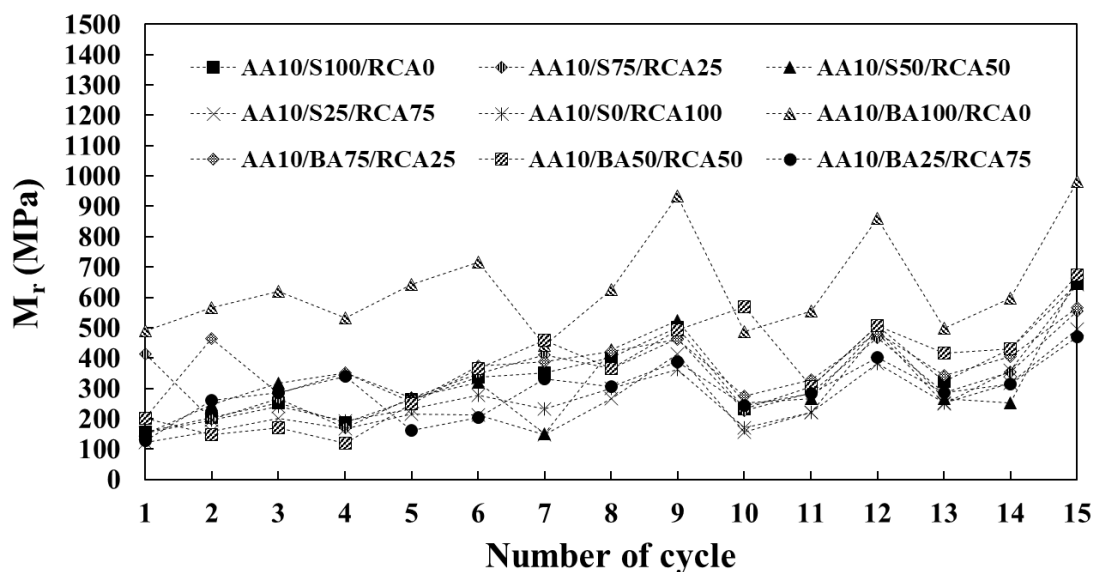
การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของ CLSM ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ที่ระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกันที่ 7 14 และ 28 วัน ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM มีการประมวลผลที่ 1-15 ลำดับ โดยลำดับที่ 1-15 ทำการทดสอบลำดับละ 100 รอบ แสดงดังภาพที่ 52 (a) 52 (b) 52 (c) โดยผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่า UCS (Yoobanpot, et al., 2020)



(a)



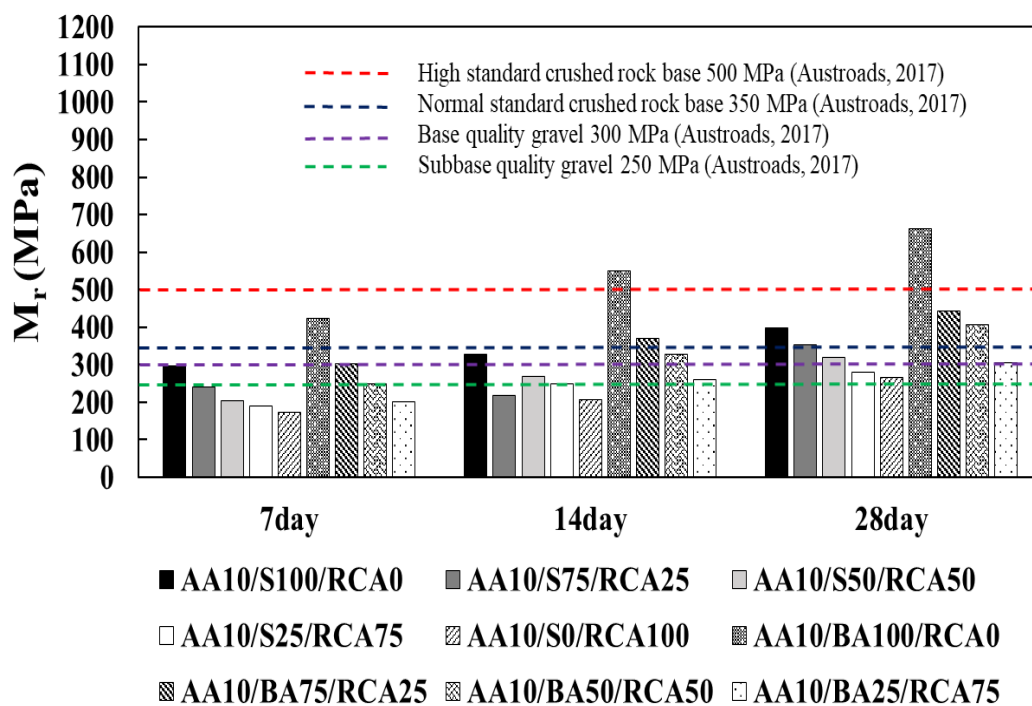
(b)



(c)

ภาพ 52 แสดงการทดสอบค่าโมดูลัสคั่นตัว ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 (a) 7 วัน
(b) 14 วัน (c) 28 วัน

ค่าโมดูลัสคั่นตัวของ CLSM เป็นไปตามมาตรฐาน Austroad (2017) เป็นมาตรฐานสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทางแสดงดังภาพ 53 และตาราง 19 พบว่า ค่าโมดูลัสคั่นตัวของตัวอย่างที่ 6 มีค่าผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (subbase quality gravel) ชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (base quality gravel) พื้นทางหินคลุกแบบปกติ (normal standard crushed rock base) และพื้นทางหินคลุกคุณภาพสูง (high standard crushed rock base) มีค่าโมดูลัสคั่นตัวไม่น้อยกว่า 250 300 350 และ 500 MPa และตัวอย่างที่ 7 มีค่าผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (subbase quality gravel) ชั้นพื้นทางประเภทกรวดคุณภาพ (base quality gravel) และพื้นทางหินคลุกแบบปกติ (normal standard crushed rock base) มีค่าโมดูลัสคั่นตัวไม่น้อยกว่า 250 300 และ 350 MPa



ภาพ 53 แสดงโมดูลัสคั้นตัวตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

ตาราง 19 แสดงผลการทดสอบโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM

Mix	Symbol (water/binder)	M_R (MPa)		
		7day	14day	28day
1	AA10/S100/RCA0	297	327	399
2	AA10/S75/RCA25	240	219	354
3	AA10/S50/RCA50	205	269	320
4	AA10/S25/RCA75	189	250	281
5	AA10/S0/RCA100	172	206	265
6	AA10/BA100/RCA0	424	549	664
7	AA10/BA75/RCA25	301	371	443
8	AA10/BA50/RCA50	249	327	407
9	AA10/BA25/RCA75	202	261	306

ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM

1. ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืบตัว และความเร็วคลื่น

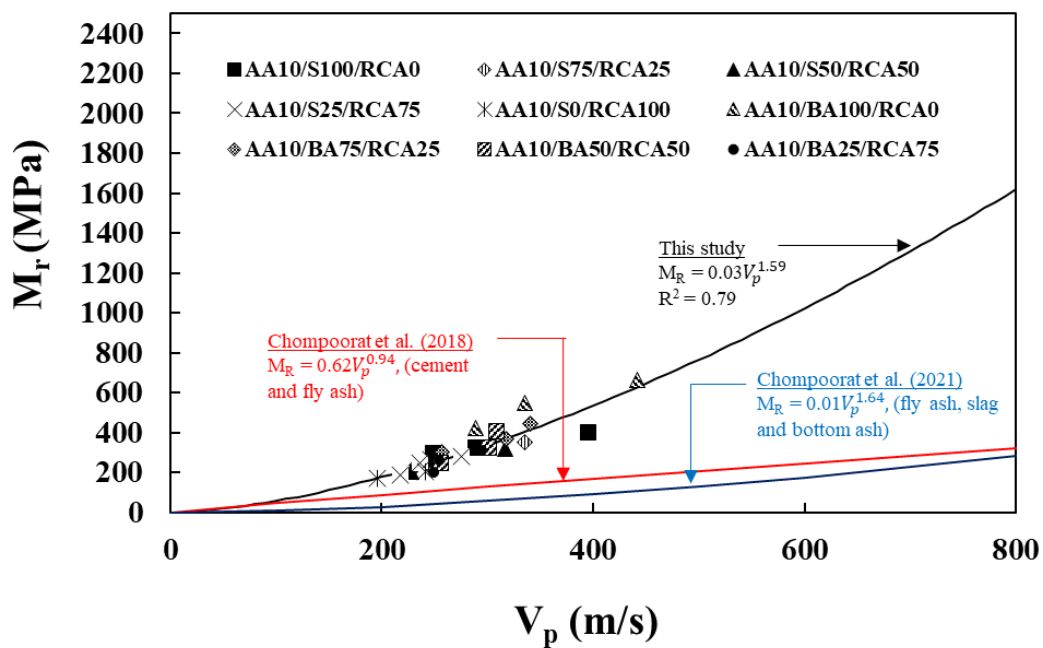
ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืบตัว M_R กับความเร็วคลื่น V_p แสดงในภาพที่ 54 (a) พบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคืบตัวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย กล่าวคือ ในช่วงแรกค่าโมดูลัสคืบตัวมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าจากนั้นค่าโมดูลัสคืบตัวเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วคลื่น V_p ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.1 ร่วมกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวกับความเร็วคลื่น V_p ของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM และ Chompoorat et al. (2021) ใช้เถ้าลอยและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนัก เป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวกับค่าความเร็วคลื่น V_s แสดงในภาพที่ 54 (b) พบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคืบตัวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย กล่าวคือ ในช่วงแรกค่าโมดูลัสคืบตัวมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าจากนั้นค่าโมดูลัสคืบตัวเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วคลื่น V_s ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.2 ร่วมกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืบตัวกับความเร็วคลื่น V_p ของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM และ Chompoorat, et al. (2021) ใช้เถ้าลอยและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนัก เป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

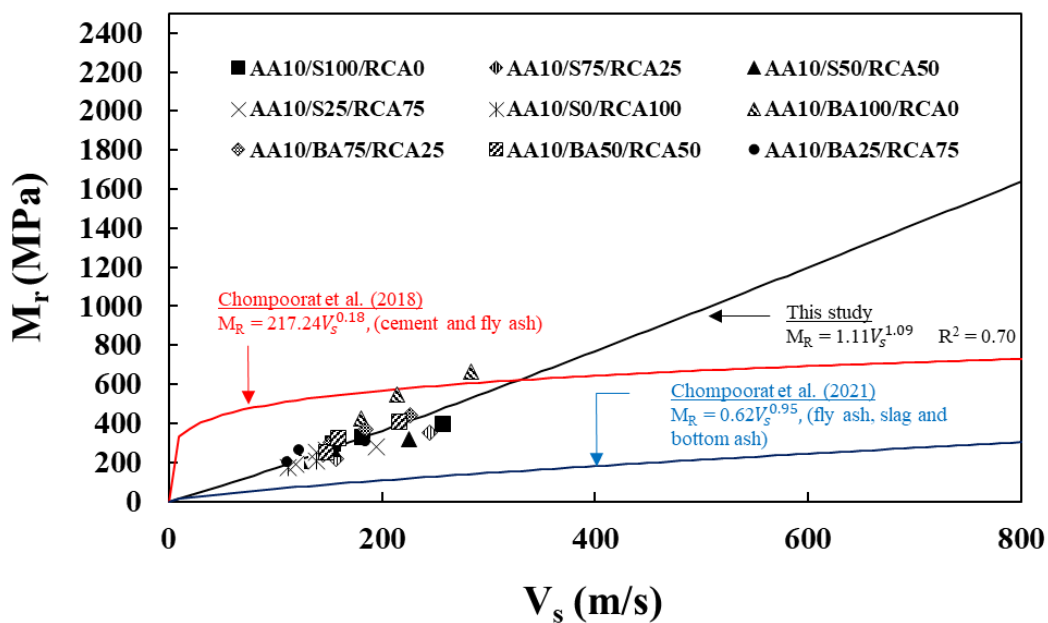
ค่า R^2 จากสมการที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 0.79 และสมการที่ 4.2 มีค่าเท่ากับ 0.70 ค่าโมดูลัสคืบตัวของ CLSM มีความสัมพันธ์ต่อ ค่าความเร็วคลื่น V_p ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (P-wave) มากกว่าค่าความเร็วคลื่น V_s ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะตั้งฉากไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (S-wave)

$$M_R = 0.03V_p^{1.59} \quad R^2 = 0.79 \quad 4.1$$

$$M_R = 1.11V_s^{1.09} \quad R^2 = 0.70 \quad 4.2$$



(a)



(b)

ภาพ 54 แสดงความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคั้นตัว และความเร็วคลื่น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8

และ 9

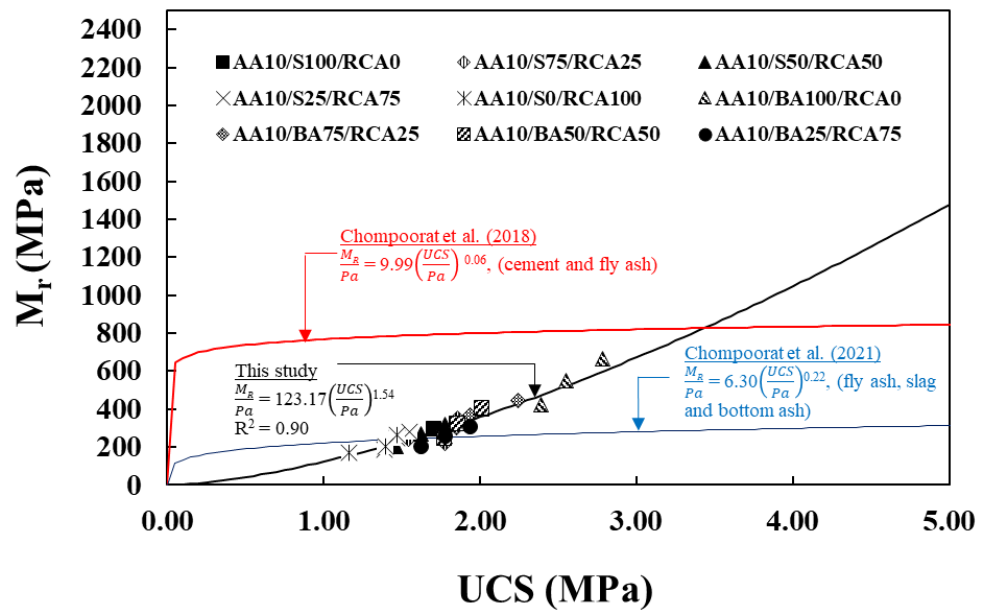
2. ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสคืบตัว กับค่ากำลังแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสของแรงเฉือน

ค่าโมดูลัสคืบตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ 14 kN Dynamic UTM ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (E_0) และค่าโมดูลัสแรงเฉือนเริ่มต้น (G_0) ดังแสดงในภาพที่ 55 56 และ 57 และค่าโมดูลัสคืบตัวกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสของแรงเฉือนของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานใน CLSM และ Chompoorat et al. (2021) ใช้เถ้าลอย และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

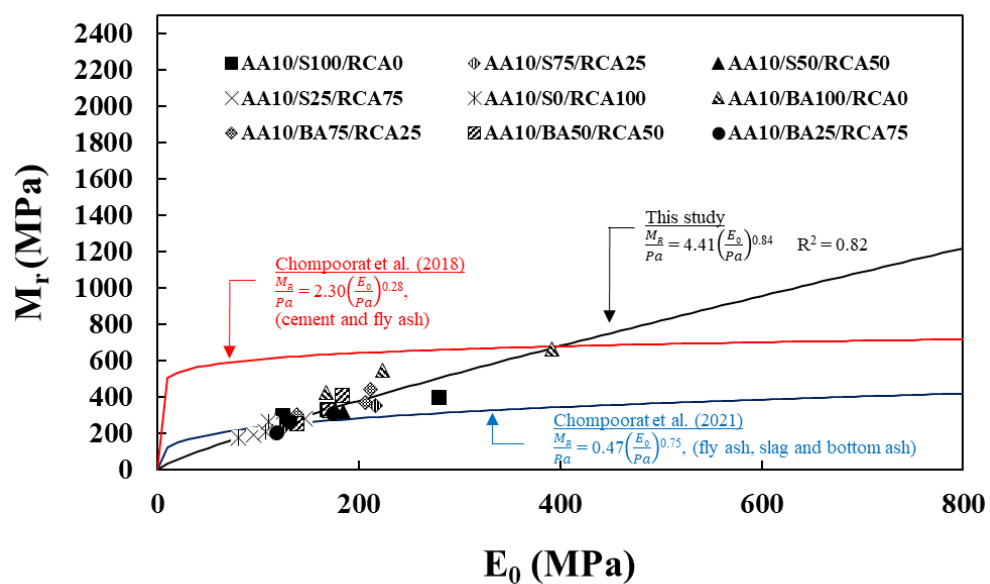
จากผลการทดสอบในภาพ 55 พบว่า ค่าโมดูลัสคืบตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า UCS มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ภาพที่ 56 และ 57 พบว่า ค่าโมดูลัสคืบตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า E_0 และ G_0 โดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5

ค่า R^2 จากสมการที่ 4.3 มีค่าเท่ากับ 0.90 สมการที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 0.82 และสมการที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.70 ค่าโมดูลัสคืบตัวของ CLSM มีความสัมพันธ์ต่อ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_0 มากกว่าค่าโมดูลัสแรงเฉือน G_0

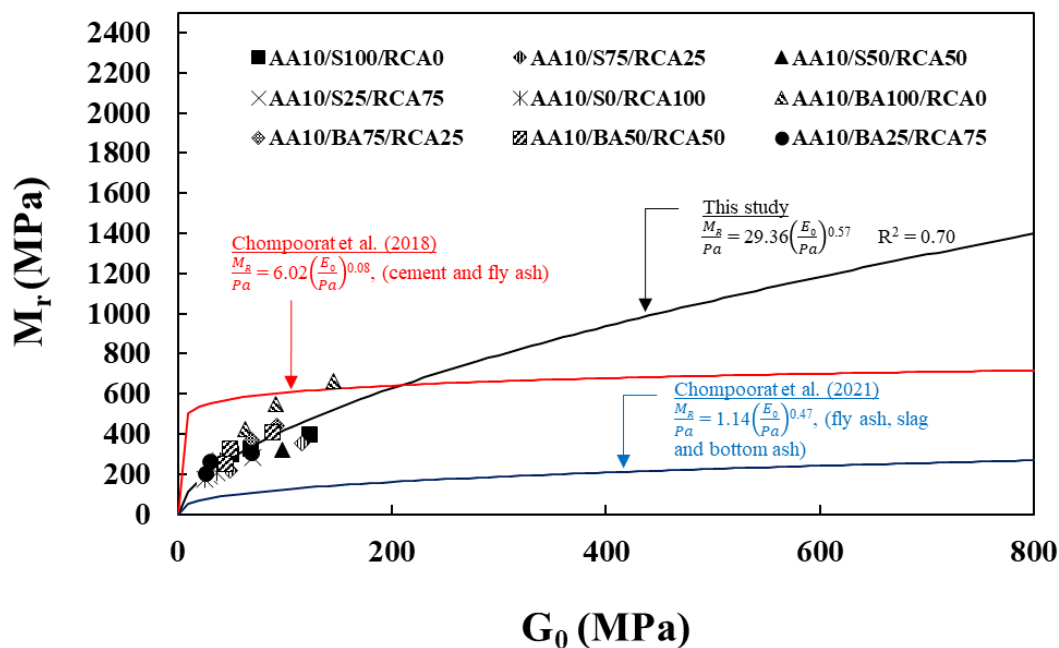
$$\begin{aligned} \frac{MR}{Pa} &= 123.17 \left(\frac{UCS}{Pa} \right)^{1.54} & R^2 &= 0.90 & 4.3 \\ \frac{MR}{Pa} &= 4.41 \left(\frac{E_0}{Pa} \right)^{0.84} & R^2 &= 0.82 & 4.4 \\ \frac{MR}{Pa} &= 29.36 \left(\frac{E_0}{Pa} \right)^{0.57} & R^2 &= 0.70 & 4.5 \end{aligned}$$



ภาพ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวและกำลังรับแรงอัดแกนเดียว
ตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9



ภาพ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น
ตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9



ภาพ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคินตัวและค่าโมดูลัสของแรงเฉือนตัวอย่าง 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

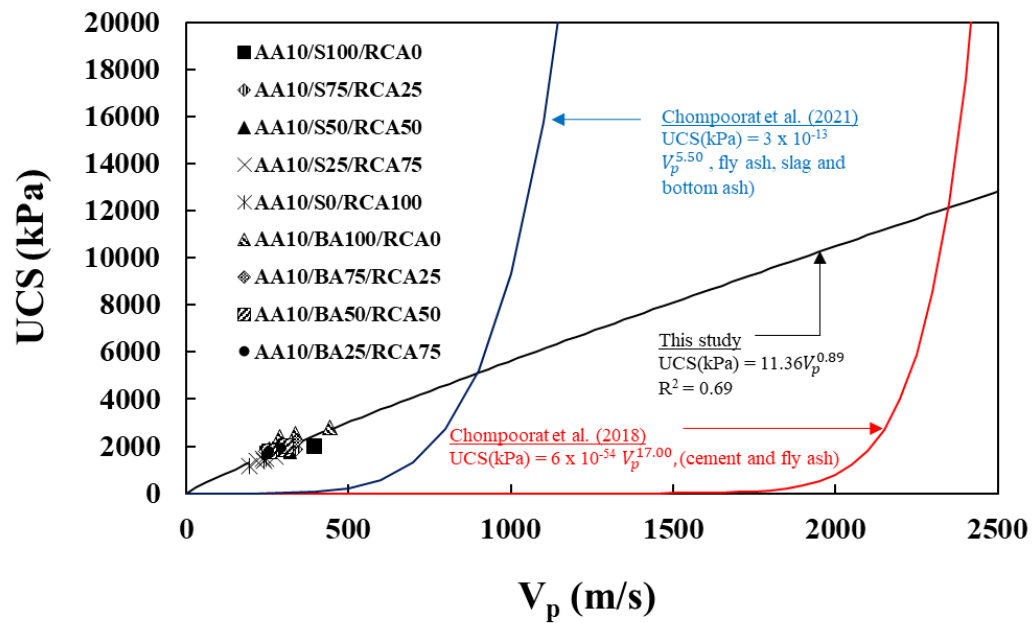
3. ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับความเร็วคลื่น V_p และ V_s ภาพที่ 58 (a) และ 58 (b) พบว่า ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ เมื่อพิจารณาค่าความเร็วคลื่น V_p และ V_s กล่าวคือเมื่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้น V_p และ V_s มีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยช่วงแรกกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการยกกำลังอย่างง่ายดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 ร่วมกับความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่นของ Chompoorat, et al. (2018) ที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน และ Chompoorat, et al. (2021) ใช้เถ้าลอย และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าหนัก เป็นวัสดุมวลรวมใน CLSM

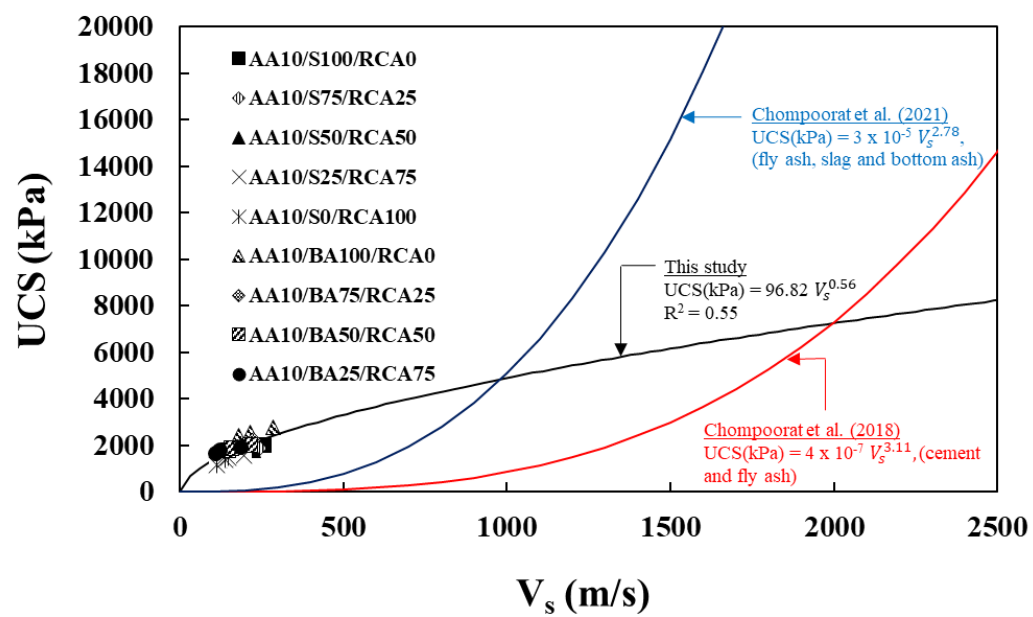
ค่า R^2 จากสมการที่ 4.6 มีค่าเท่ากับ 0.69 และ สมการที่ 4.7 มีค่าเท่ากับ 0.55 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM มีความสัมพันธ์ต่อ ค่าความเร็วคลื่น V_p ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะขนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (P-wave) มากกว่าค่าความเร็วคลื่น V_s ที่มีการวัดความเร็วคลื่นในลักษณะตั้งฉากไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ (S-wave)

$$UCS(kPa) = 11.36V_p^{0.89} \quad R^2 = 0.69 \quad 4.6$$

$$UCS(kPa) = 96.82V_p^{0.56} \quad R^2 = 0.55 \quad 4.7$$



a)



(b)

ภาพ 58 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความเร็วคลื่น ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9

การคำนวณปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM

ข้อได้เปรียบของ CLSM คือการนำวัสดุเหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นการช่วยลดกระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดพลังงานที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นข้อมูลเสนอแนะนี้จึงได้ทำการคำนวณปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของ CLSM แสดงดังตารางที่ 20 ค่า EEV ของ CLSM พิจารณาปริมาณการใช้พลังงานที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผลิต (embodied energy value spent during production, EEV_p) คูณกับ วัสดุที่ใช้ในการผลิต CLSM จะสังเกตว่าเถ้าลอย เถ้าหนัก มีค่า EEV_p เท่ากับ 0 เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่ทำการคำนวณพลังงานที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผลิต ค่า EEV_p จึงมีสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.5 MJ/kg อ้างอิงจาก Tempest, et al., 2009 และคอนกรีต รีไซเคิล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.016 MJ/kg อ้างอิงจาก Ittyeipe, et al., 2020 ทำให้ CLSM มีค่า EEV เท่ากับ 167 MJ/m³

การเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM

CLSM นี้สามารถนำมาขยายผลต่อเรื่องการเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้าง โดยไม่คิดค่าขนส่ง ดังแสดงในตาราง 21 ซึ่งได้คำนวณราคาของวัสดุ และสารเคมีของพื้นทาง CLSM ดังตัวอย่างที่ 7 จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ซึ่งได้ทำการอ้างอิงข้อมูลจากกรมบัญชีกลาง ดังแสดงในตาราง 22 พบว่า ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ มีราคาสูงกว่าพื้นทาง CLSM ร้อยละ 117 และร้อยละ 141

ตาราง 20 แสดงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CLSM

Embodied energy value of CLSM			
Material	Weight (kg/m ³)	EEV_p (MJ/kg)	EEV (MJ/m ³)
Fly ash	535	0	0
Bottom ash	601.5	0	0
Recycled concrete	200.5	0.016	3.21
Sodium hydroxide	8	20.5	164
sum			167

ตาราง 21 แสดงราคาของ CLSM

Material	Volume (kg/m ³)	Material cost per unit volume (baht/kg)	Total material cost (baht)
Fly ash	535	0.12	64.2
Bottom ash	601.5	0.04	24.06
Recycled concrete	200.5	0	0
Water	290	0.02	5.8
Sodium hydroxide	8	40	320
sum (baht/m ³)			414.06

ตาราง 22 แสดงการเปรียบเทียบราคากับชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์

Material	Material cost per unit volume (kg/m ³)	Volume (m ³)	Machine rental (baht/day)	Total (baht/day)
CLSM base	414.06	100	-	41,406
Soil cement subbase	700	100	20,000	90,000
Soil cement base	800	100	20,000	100,000

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการทดลองของ วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (CLSM) ที่มีเถ้าลอย เป็นวัสดุประสาน และทรายธรรมชาติ เถ้าหนัก และคอนกรีตรีไซเคิลใช้ทดแทนมวลรวมโดยมีสารละลายไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย มีผลสรุปดังนี้

คุณสมบัติเบื้องต้นของ เถ้าลอย เถ้าหนัก และตะกอนเหล็ก

1. คุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า เถ้าลอย มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.69 ทรายธรรมชาติ มีความถ่วงจำเพาะ 2.62 เถ้าหนัก มีความถ่วงจำเพาะ 2.48 และคอนกรีตรีไซเคิล มีความถ่วงจำเพาะ 2.51 เถ้าลอย มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1343 kg/m^3 ทรายธรรมชาติ มีหน่วยน้ำหนัก 1695 kg/m^3 เถ้าหนัก มีหน่วยน้ำหนัก 1395 kg/m^3 และคอนกรีตรีไซเคิล มีหน่วยน้ำหนัก 1645 kg/m^3 นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอย มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.33 ทรายธรรมชาติ มีร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.32 เถ้าหนัก มีร้อยละการดูดซึมน้ำ 5.29 kg/m^3 และคอนกรีตรีไซเคิล มีร้อยละการดูดซึมน้ำ 3.91 kg/m^3

2. คุณสมบัติทางเคมี พบว่า จากการทดสอบด้วยสเปกโทรเมตริรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) เถ้าลอยมีสารประกอบแคลเซียม (Ca) 47.03 cps ซิลิกอน (Si) 17.50 cps และอลูมิเนียม (Al) 12.18 cps เถ้าหนักมีสารประกอบแคลเซียม (Ca) 47.54 cps ซิลิกอน (Si) 7.08 cps และอลูมิเนียม (Al) 1.31 cps และคอนกรีตรีไซเคิลมีสารประกอบแคลเซียม (Ca) 10.38 cps ซิลิกอน (Si) 9.72 cps และอลูมิเนียม (Al) 6.12 cps พบว่า สารประกอบแคลเซียมค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ เถ้าลอย และเถ้าหนัก

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของ CLSM

1. การยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM โดยแทนที่มวลรวมทรายธรรมชาติด้วยคอนกรีตรีไซเคิล ในอัตราส่วนผสม 0 25 50 75 และ 100 ส่งผลกระทบต่อการไหลแผ่เพิ่มขึ้น และการแทนที่มวลรวมเถ้าหนักด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนผสม 0 25 50 75 และ 100 ส่งผลกระทบต่อการไหลแผ่ลดลง เป็นผลมาจากการดูดซึมน้ำของคอนกรีตรีไซเคิล

2. การแทนที่มวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วนผสม 0 25 50 75 และ 100 ไม่มีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของ CLSM

3. หน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าอยู่ในช่วง 1924-2057 kg/m^3 โดยการแทนที่มวลรวมทรายด้วยคอนกรีตรีไซเคิล 0 25 50 75 100 ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลง เนื่องจากคอนกรีตรีไซเคิลมีหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่าทรายธรรมชาติ และยังมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่า ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดรูพรุน

4. การเอี๊ยมน้ำของ CLSM การแทนที่มวลรวมเข้าหนักด้วยคอนกรีตไร้ซีเมนต์ส่งผลทำให้ค่าการเอี๊ยมน้ำลดลง เนื่องจากคอนกรีตไร้ซีเมนต์มีการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าเข้าหนัก และในเข้าหนักมีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันสูงกว่าคอนกรีตไร้ซีเมนต์

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของ CLSM

1. กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ CLSM ลดลงตามปริมาณร้อยละของคอนกรีตไร้ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และมีกำลังอัดพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของคอนกรีตไร้ซีเมนต์ในส่วนผสมส่งผลให้ปริมาณช่องว่างที่ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นและความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ความต้านทานการสึกกร่อนของคอมโพสิตอีโพอลิเมอร์ยังลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแทนที่ด้วยคอนกรีตไร้ซีเมนต์ ตัวอย่างที่ 6 (AA10/BA100/RCA00) และตัวอย่างที่ 7 (AA10/BA75/RCA25) มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 2.8-8.3 MPa ผ่านมาตรฐาน ACI 229R-99 และสำหรับมาตรฐานกรมทางหลวง สำหรับรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์ ต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 689 และ 1,724 kPa ซึ่งมีค่าผ่านมาตรฐาน

2. การทดสอบโรโซแนซฮิสเทรีของ CLSM ด้วยวิธีการสั่นพ้องอิสระ พบว่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (p-wave) และความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (s-wave) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับกำลังรับแรงอัดของ CLSM

3. การทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของ CLSM มาตรฐานสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทางอ้างอิงตามมาตรฐาน Austroad (2017) พบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ 28 วันของตัวอย่างที่ 6 (AA10/BA100/RCA00) มีค่าเท่ากับ 664 ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทเกรดคุณภาพ ชั้นพื้นทางประเภทเกรดคุณภาพ ชั้นพื้นทางหินคลุกแบบปกติ และพื้นทางหินคลุกคุณภาพสูง ที่มีค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่น้อยกว่า 250 300 350 และ 500 MPa ตามลำดับ และตัวอย่างที่ 7 (AA10/BA75/RCA25) มีค่าเท่ากับ 443 ซึ่งผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางประเภทเกรดคุณภาพ ชั้นพื้นทางประเภทเกรดคุณภาพ ชั้นพื้นทางหินคลุกแบบปกติ และพื้นทางหินคลุกคุณภาพสูง ที่มีค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่น้อยกว่า 250 300 และ 350 MPa ตามลำดับ

4. ความสัมพันธ์ด้านกำลังของ CLSM จากความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับความเร็วคลื่น V_p และ V_s พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับ V_p และความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับ V_s มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.79 และ 0.70 ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง M_R กับ E_0 และ G_0 มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำทั้งสอง และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.82 และ 0.70 และความสัมพันธ์ระหว่าง UCS ต่อ V_p และ V_s ที่มีลักษณะเส้นโค้งคว่ำทั้งสอง และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.69 และ 0.55 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 ที่มีการวัดความเร็วคลื่น

ในลักษณะดังกล่าวไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ และความสัมพันธ์ UCS ต่อ M_R มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.90

ปริมาณพลังงานสะสมรวม และต้นทุนการก่อสร้างของ CLSM

1. ปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value, EEV) ของตัวอย่างที่ 7 AA10/BA75/RCA25 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ $167 \text{ MJ/m}^3 \text{ m}$
2. ต้นทุนการก่อสร้างโดยไม่คิดค่าขนส่งของตัวอย่างที่ 7 AA10/BA75/RCA25 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีที่สุด พบว่ามีต้นทุนการก่อสร้างน้อยกว่าชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ และพื้นทางดินซีเมนต์

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของ CLSM จากทรายธรรมชาติ วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม และคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับนำไปใช้ในการก่อสร้างพื้นทาง (base course) โดยมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม กำลังรับแรงอัด (Unconfined compression test, UC) ของ CLSM และ โมดูลัสคืนตัว (resilient modulus, M_R) ผลการศึกษานี้สามารถนำมาขยายผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเสียหายในชั้นทางที่ใช้ CLSM นี้เป็นพื้นทางได้ โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ KENPAVE เพื่อหา เกณฑ์ความเสียหายแบบแตกร้าวเนื่องจากความล้า และเกณฑ์ความเสียหายแบบการเสียวรูปอย่างถาวรได้

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง ทล.-ม. 206. (2532). **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์**. กรุงเทพฯ:
กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง ทล.-ม. 203. (2556). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์**. กรุงเทพฯ:
กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง ทล.-ม. 204. (2556). **มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์**. กรุงเทพฯ:
กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). **3Rs**. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม
กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). **ถั่วลอยในงานคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือจุฬา.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ:
ศูนย์หนังสือจุฬา.
- รัฐพล สมนา, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). **การใช้ถั่วจากโรงงานอุตสาหกรรม
เพื่อพัฒนาคุณภาพคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2557). **คอนกรีตเทคโนโลยี** (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ: นิเวศมิตรการพิมพ์ (1996).
- สถาพร โภคา. (2555). **การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (วิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง)**.
อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2539). **ยกเลิกมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับงานอุตสาหกรรมและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 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.
- Achtemichuk, S., Hubbard, J., Sluce, R., Shehata, M., (2009). The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low-Strength materials without using Portland cement. **Cement and Concrete Composites**. 31, 564-569.

- ACI Committee 229 (1999). **Controlled low strength materials (ACI 229R)**, American Concrete Institute. USA: Farmington Hill. Michigan.
- ASTM Designation D 422 (2014). **Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils**. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/D0422-63R07
- 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 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 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 D 2166 (2024). **Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil**. Philadelphia. USA. DOI: 10.1520/D2166_D2166M-16.
- Austroad (2017). **Guide to pavement technology part 2: pavement structural design**. Sydney. Australia.
- Chen, Z., Li, H., Wong, C. (2002). An application of bar-code system for reducing construction wastes. **Automation in Construction**, 11. 521-533.

- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste Management**, 539-543. doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.023
- 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., 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
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems terminology. **International conference**. France
- EFNARC. (2002). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Surrey. UK.
- Etxeberria, M., Ainchil, J., Perez, M. E., and Gonzalez, A. (2013). Use of recycled fine aggregates for control low strength materials (CLSM) production. **Construction and building materials**. 44, 142-148, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.059.
- Fernandez-Jimenez, A., and Puertas, F. (2001). Setting of alkali-activated slag cement Influence of activator nature. **Advances in cement research**, 13(3), 115-121. DOI: 10.1680/adcr.2001.13.3.115
- Huang, Y. H. (2004). **Pavement Analysis and Design**. Kentucky: PEARSON, Prentice Hall.
- Ittayeipe, 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
- Li, T., Nogueira, R., Brito, J., Liu, J. (2024). **A simple method to address the high water absorption of recycled aggregates in cementitious mixes**. Construction and building materials. 136083. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136083.

- 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., Wongs, A., Boonserm, K., Ngohpk, C., Jongvivatsakul, P., Sata, V. Sukontasukkul, P., and Chindaprasirt, P., (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: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering>
- 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).
- Tempest, B., Sanusi, O., Gergely, J., Ogunro, O., and Weggel, D. (2009). **Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer concrete**. Lexington. USA.: Word of coal ash (WOCA) conference.
- Tikalsky, P., Gaffney, M., Regan, R., (2000). Properties of controlled low-strength material containing foundry sand. **ACI Structural Journal**, 97(6), 698-702.
- 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.
- Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Simarat, P., Jongpradist, P., Likitlersuang, S. (2020). Sustainable reuse of dredged sediments as pavement materials by cement and fly ash stabilization. **Journal of Soil and Sediments**, 20, 3807-3823. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-2020-02635-x>.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	กิตติภพ ขวัญตน
วัน เดือน ปี เกิด	12 กันยายน 2540
สถานที่เกิด	จังหวัดพะเยา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 วศ.บ.(วิศวกรรมศาสตร์), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	499 ถ.พหลโยธิน ตำบลแม่ต๋ำ อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000
ผลงานตีพิมพ์	กิตติภพ ขวัญตน, อนุพงศ์ คำปลอด, ธนกฤต เทพอุโมงค์ และธนกร ชมภูรัตน์ (ผู้บรรยาย). (24-26 สิงหาคม 2565). การพัฒนาการควบคุมกำลังต่ำจากคอนกรีตรีไซเคิลโดยใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์สำหรับประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมผิวทาง. ใน งานการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 (หน้า 1-6). เชียงราย: โรงแรมเดอะเฮอริเทจ.
รางวัลที่ได้รับ	-

