

การปรับปรุงวัสดุชั้นรองพื้นทางที่ต่ำกว่ามาตรฐาน โดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอฟจีดี

Improvement of Substandard Subbase Material Using Portland Cement and FGD Gypsum

เบญจรัชต์ บุญธิฟอง*, ชยานนท์ หรรษภิญโญ, ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา และพีรพงศ์ จิตเสงี่ยม
Benjarach Boontifong, Chayanon Hansapinyo, Piyapong Wongmatar and
Peerapong Jitsangiam

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200
E-mail: Benjarach.sine@gmail.com*, Telephone Number: 053-944156

บทคัดย่อ

ในการก่อสร้างทางที่ไม่สามารถหาแหล่งวัสดุที่ได้มาตรฐานในพื้นที่ก่อสร้างได้ในระยะใกล้ นั้น ก่อให้เกิดอุปสรรคทั้งในด้านเวลา และค่าใช้จ่ายในการขนส่ง บทความนี้ นำเสนอการปรับปรุงสมบัติของดินวัสดุชั้นรองพื้นทางที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ โดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอฟจีดีซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน ในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน 3 กลุ่ม คือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ร้อยละ 1, 2 และ 3 ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งแต่ละกลุ่มทำการเพิ่มยิปซัมเอฟจีดี ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ การทดสอบเริ่มจาก การทดสอบหาค่ารับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ของทุกสัดส่วนผสมที่มีความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) จากนั้น ทำการทดสอบหาค่าซี.บี.อาร์. ของอัตราส่วนผสมที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงที่สุดของแต่ละกลุ่ม รวมถึงค่าการบวมตัว และตรวจสอบสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินด้วยวิธีการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และตรวจสอบหาลักษณะประกอบของแร่ (EDS) จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 2 กับยิปซัมเอฟจีดีร้อยละ 5 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดเท่ากับ 41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งกำลังอัดเพิ่มขึ้น 3.36 เท่า เมื่อเทียบกับดินลูกรังก่อนปรับปรุง และมีค่าซี.บี.อาร์. แบบแห้งร้อยละ 107 ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.74 เท่า เมื่อเทียบกับดินลูกรังก่อนปรับปรุง กล่าวคือกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และเปอร์เซ็นต์ ซี.บี.อาร์. ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอฟจีดี เมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดิน (SEM) พบผลึกลักษณะเป็นแท่งเดี่ยวคล้ายเข็มเกาะกลุ่มกันแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างในเม็ดดิน และเมื่อตรวจสอบหาลักษณะประกอบของแร่ (EDS) พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ Ca, Al และ S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสาร ettringite ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าสมบัติของดินทางวิศวกรรม หลังจากการปรับปรุงด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอฟจีดี มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กรมทางหลวงได้กำหนดไว้สำหรับดินชั้นรองพื้นทาง

คำสำคัญ: การปรับปรุง, ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์, ยิปซัมเอฟจีดี

ABSTRACT

A scarcity of standard roadway materials is still an on-going problem for roadway construction in Thailand. This requires the extra time and expenditure in the case of such standard materials far from a construction site. This paper presents an alternative stabilization method using Portland cement and FGD gypsum, a by-product from the electrical production of a coal-fired power plant to improve the sub-standard lateritic soil for being as a subbase material. In this study, the mixtures of a sub-standard lateritic soil with varying cement contents of 1%, 2%, and 3% and FGD gypsum at 1%, 3%, and 5% by dry mass of such sub-standard lateritic soil were investigated through a series of laboratory-based experimental tests. The unconfined compressive strength (UCS) tests at 3, 7 and 28 curing days of each mix proportions under its optimum moisture content condition were performed for all sub-standard lateritic soil-cement-FGD gypsum mixtures. For a given cement content, the mixtures that exhibited maximum UCS values were then selected to a new set of testing on C.B.R laboratory test, Swelling, Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). Based on the test results of this study, it was found that the mixture of 2% of Portland cement with 5% of FGD gypsum showed the maximum UCS of 41 ksc, along with the CBR value of 107%. This is 3.3 and 1.7 times higher than those of the sub-standard lateritic soil respectively. For the SEM and EDS examinations, a set of needle-like structures were noticed in the soil matrix. The chemical components showed mainly Ca, Al and S which indicated the presence of Ettringite, resulting to a higher compressive strength after stabilization. The results of this study showed that the performance of the stabilized lateritic soil is superior to that of the conventional road base. Overall results indicated that stabilized lateritic soil could be improved performance by using Portland cement and FGD Gypsum when it was used as a subbase material in Thailand.

Keywords: Improvement, Portland Cement, FGD Gypsum

1. บทนำ

ถนนเป็นสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานที่สำคัญและจำเป็นอย่างมากต่อเศรษฐกิจ และการพัฒนาประเทศ จึงมีงบประมาณลงทุนเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ในการก่อสร้างถนน ดินลูกรังเป็นวัสดุหลักที่นำมาใช้ทำชั้นรองพื้นทาง โดยมีสมบัติของดินทางวิศวกรรมตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนด การก่อสร้างในพื้นที่ห่างไกลแหล่งลูกรังที่ได้มาตรฐานทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และระยะเวลาก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการออกแบบและปรับปรุงชั้นโครงสร้างทาง รวมไปถึงทำการปรับปรุงสมบัติของดินลูกรังใกล้พื้นที่ก่อสร้างที่มีสมบัติทางวิศวกรรมต่ำกว่ามาตรฐาน ให้มีสมบัติทางวิศวกรรมใกล้เคียงกับดินลูกรังมาตรฐานซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่น และช่วยแก้ปัญหาในการขาดแคลนวัสดุ

การปรับปรุงสมบัติของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารผสมเพิ่มเติม ส่วนมากสารที่ผสมเข้าไปในดินเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินนั้นจะใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม หรือที่เรียกว่า การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยซีเมนต์

(Cement Stabilization) จากการศึกษาของเกษม [1] ได้ศึกษาผลของการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินเหนียวอ่อนเพื่อใช้ทำเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 21.9, 26.3 และ 30.7 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น และ ทรงพล [2] ได้ทดลองนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ ไปทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) กับ ค่าซี.บี.อาร์. (California Bearing Ratio) โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, 5, 7 เวลาการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งสรุปผลได้ว่าปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 3 ขึ้นไป มีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดและเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นปฏิกิริยาเคมีกับอนุภาคดินจะมีผลต่อกำลังอัดสูงด้วย แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์มีราคาแพง ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และอาจทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) หลังการปรับปรุงปรับปรุง ต่อมา สุวัฒน์ และ ดนุพล [4] ได้ศึกษาอิทธิพล

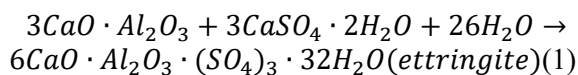
ของการเติมดินขาวแทนที่ปริมาณยิปซัมเอฟจีดี ในคอนกรีตยิปซัม ซึ่งคอนกรีตยิปซัมที่ศึกษาเป็นคอนกรีตที่ใช้ยิปซัมเอฟจีดีเป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ทั้งหมด ในการทดสอบแทนที่ดินขาวร้อยละ 0, 10 และ 20 ของน้ำหนักยิปซัมเอฟจีดี โดยเตรียมก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเอฟจีดี 0.4 ถึง 0.66 และผึ่งอากาศเป็นเวลา 7 และ 28 วันพบว่าสมบัติของคอนกรีตยิปซัมที่ไม่ผสมปูนขาวจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณน้ำกับยิปซัมเอฟจีดี เท่ากับ 0.41 ซึ่งให้ ค่าการดูดซึมน้ำและการหดตัวแห้งที่ต่ำ อีกทั้งค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อยิปซัมเอฟจีดี ที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 0.41 และเมื่อทำการแทนที่ที่ยิปซัมเอฟจีดีด้วยดินขาวจะทำให้คอนกรีตยิปซัม มีความพรุน และอัตราน้ำต่อของผสมมากขึ้น มีกำลังอัดลดลง แต่จะทำให้การหดตัวแห้งลดลง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าน้ำที่ใช้ผสม อาจเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ผลจากปฏิกิริยาเคมีในแต่ละสูตรต่างกันส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดต่างกัน

เชื้อเพลิงที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้าคือ ถ่านหิน ผลกระทบเมื่อเผาถ่านหินทำให้เกิดมลพิษต่างๆออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งมาตรการกำจัด SO_2 ทำได้โดยการติดตั้งเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization Plant, FGD) ในกระบวนการกำจัด SO_2 นี้จะได้ผลพลอยได้ที่เรียกว่า ยิปซัมเอฟจีดี (Flue Gas Desulphurization Gypsum) หากสามารถนำยิปซัมเอฟจีดี มาใช้ประโยชน์ได้ก็จะเป็นวิธีในการลดการทิ้งยิปซัมเอฟจีดี ได้อีกวิธีหนึ่ง จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยิปซัมเอฟจีดีเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงเสถียรภาพของดิน Kolay and Aminur [4] ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของดินอินทรีย์ (Peat Soil) โดยใช้ยิปซัม และเถ้าลอย ในการปรับปรุงซึ่งทำการผสมเพิ่มยิปซัมในอัตราร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก และผสมเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก และบ่มแห้งเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน

หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว พบว่า กำลังอัดสูงสุดเมื่อผสมดินอินทรีย์กับยิปซัมร้อยละ 6 และผสมดินอินทรีย์กับเถ้าลอยร้อยละ 20

อนิรุทธ์ และสงกรานต์ [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้กากยิปซัมเป็นสารผสมเพิ่มต่อค่ากำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยทำการผสมยิปซัมเอฟจีดีในอัตราส่วนต่าง ๆ กับดินซีเมนต์ที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 45 และปูนขาวร้อยละ 10 โดยน้ำหนักดินแห้ง ใช้เครื่องกวนผสมโดยเพิ่มกากยิปซัมที่อัตราร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักดินแห้ง แล้วนำส่วนผสมไปหล่อแบบเป็นแท่งตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วันจากการศึกษาพบว่าการผสมกากยิปซัมจะส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนดินซีเมนต์เดิมที่ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 45 กับปูนขาวร้อยละ 10 ซึ่งการเพิ่มกากยิปซัมในส่วนผสมไม่ควรเกินร้อยละ 6 เพราะจะส่งผลต่อการบวมตัวของดินซีเมนต์ซึ่งเป็นแนวทางในการเลือกใช้ยิปซัมมาเป็นสารผสมเพิ่มควรมีอัตราส่วนผสมของยิปซัมไม่เกินร้อยละที่กำหนดนี้ ต่อมาอนิรุทธ์ และเกสรินทร์ [6] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงอัดของดินเหนียวปนทรายเมื่อผสมเถ้าลอยร้อยละ 9 กับซีเมนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักดินแห้ง และมีการผสมเพิ่มโดยยิปซัมเอฟจีดี ที่อัตราร้อยละ 0, 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักดินแห้ง และบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อผสมยิปซัมเอฟจีดีที่อัตราร้อยละ 1.53 และเมื่อผสมยิปซัมเอฟจีดีที่อัตราร้อยละ 7 กำลังอัดจะลดลงต่ำกว่ากรณีไม่มีการผสมเพิ่มของยิปซัมเอฟจีดี จักรพันธ์ [7] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการผสมยิปซัมเอฟจีดี เป็นสารผสมเพิ่มต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ โดยใช้ดินที่มีสมบัติความเหนียว (Plasticity Index, PI) แตกต่างกันสองค่า ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 ของน้ำหนักดินแห้ง ส่วนดินที่มีการผสมเพิ่มของยิปซัมเอฟจีดี แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยิปซัมเอฟจีดี ที่อัตราร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ของน้ำหนักดินแห้ง พบว่า ที่อัตราผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 กับ ยิปซัมเอฟจีดี ร้อยละ 3 มีกำลังอัดสูงสุดของ

ดินทั้งสองกลุ่ม เมื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดจึงสรุปได้ว่าดินที่มีสมบัติความเหนียวเมื่อนำมาเมื่อถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์และยิปซัมเอฟจีดีทำให้กำลังอัดสูงขึ้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และปฏิกิริยาเคมีของยิปซัมเอฟจีดี ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เมื่อผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยากับ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) ก่อให้เกิดชั้น ettringite บนผิวของอนุภาคของไตรแคลเซียมอลูมินเนต ซึ่งการเกิด ettringite ส่งผลทำให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากรูปทรงของ ettringite มีลักษณะเป็นผลึกต่างๆ ที่มีความแข็งแรงแทรกตัวระหว่างช่องว่างของเม็ดดินส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น [8] ดังสมการที่ (1)



1.1 องค์ประกอบของวัสดุ

- องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [9]

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
C_3S	49
C_2S	25
C_3A	12
C_4AF	8
อื่นๆ	6

การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากเป็นปูนซีเมนต์ที่สามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก องค์ประกอบสำคัญที่จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมเอฟจีดี คือ C_3A ซึ่งในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้มีการใส่ยิปซัมอยู่แล้วในอัตราส่วนร้อยละ 5-6 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น ettringite แต่เกิดในปริมาณที่ไม่มากเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จากการทดสอบการทางเคมีพบว่าอัตราการเกิด ettringite มากจากการทำปฏิกิริยา C_3A กับ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีอัตราส่วนโดย

โมลเป็น 1:1 ทำให้มีองค์ประกอบของ C_3A เหลืออยู่เมื่อเติมยิปซัมเข้าไปในส่วนผสมจะทำให้เกิด ettringite มากขึ้น

- ยิปซัมเอฟจีดี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของยิปซัมเอฟจีดี [9]

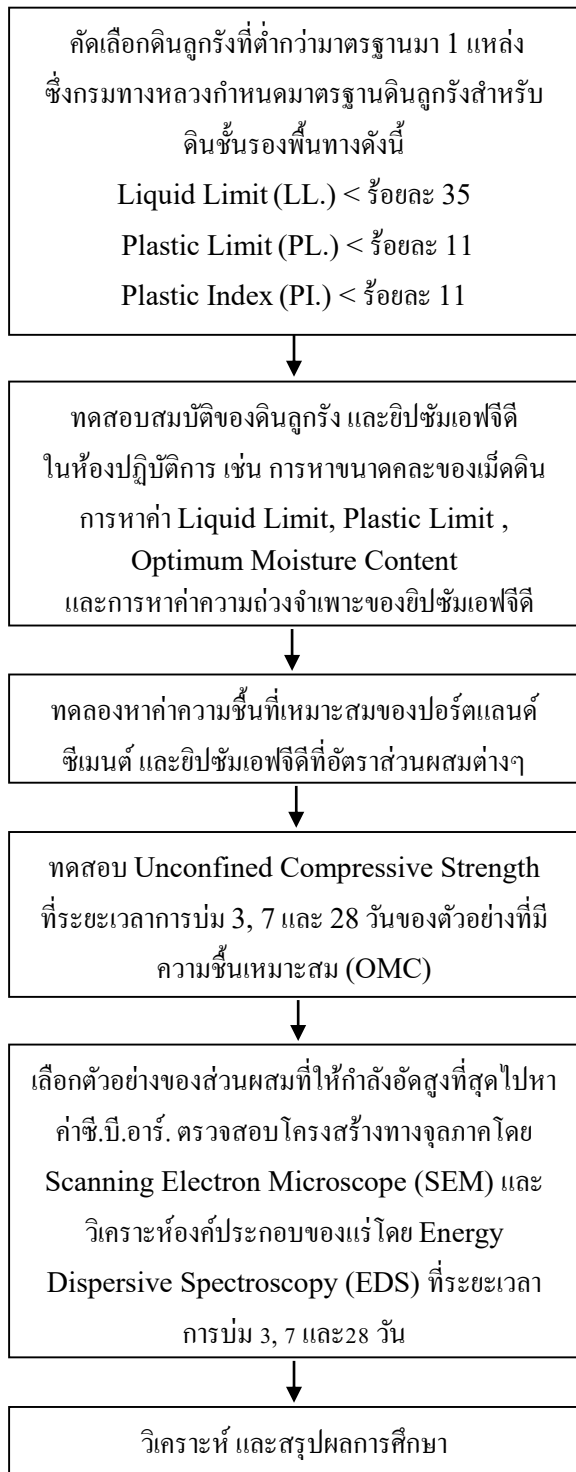
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	84
อื่นๆ	16

องค์ประกอบสำคัญคือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น ettringite ส่งผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ อีกทั้งความละเอียดของยิปซัมเอฟจีดีมีผลต่อความไวในการทำปฏิกิริยาดำมีความละเอียดสูงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น แต่ก็ส่งผลต่ออัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อการทำปฏิกิริยาเช่นกัน เนื่องจากยิปซัมเอฟจีดีมีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นส่งผลให้ต้องการโมเลกุลน้ำที่จะไปทำปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตาม

จากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องพบว่ายิปซัมเอฟจีดี และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น คาดว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ ettringite ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดที่ว่าถ้าปรับปรุงดินลูกรังที่ต่ำกว่ามาตรฐานโดยการลดปริมาณซีเมนต์ให้น้อยลง แต่เพิ่มปริมาณยิปซัมเอฟจีดีให้มากขึ้น โดยที่สมบัติของดินทางวิศวกรรมดีขึ้นตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ จะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ลง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่าย และการหดตัวได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการทิ้งยิปซัมเอฟจีดีได้อีกวิธีหนึ่ง

2. รูปแบบของบทความ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติดินลูกรังที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอฟจีดี โดยงานวิจัยนี้ใช้ดินลูกรังต่ำกว่ามาตรฐาน โดยมีแผนดำเนินงานตาม รูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การทดสอบสมบัติดิน
2. การทดสอบการผสมที่อัตราส่วนต่างๆ
3. โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และองค์ประกอบของแร่ (EDS)

3.1 ทดสอบสมบัติดิน

เก็บตัวอย่างดินลูกรังจากแหล่งต่างๆ มา 3 แหล่งคือ แหล่งดิน ก. (อ.จอมทอง) แหล่งดิน ข. (อ.ดอยหล่อ) และ แหล่งดิน ค. (อ.สันทราย) แล้วทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรัง เพื่อหาดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบดังต่อไปนี้

- ค่า Liquid Limit (LL) ของดิน ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515 ($LL < \text{ร้อยละ } 35$)
- ค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515 ($PL < \text{ร้อยละ } 11$ และ $PI < \text{ร้อยละ } 11$)
- ขนาดผลของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง ทล.-ท. 204/2516
- ขนาดผลของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ทล.-ท. 205/2517

จากการทดสอบพบว่า แหล่งดิน ค. เป็นดินที่มีสมบัติทางวิศวกรรมต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ จึงเลือกใช้ ดินลูกรังจาก แหล่งดิน ค. (อ.สันทราย) มาเป็นดินที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้

3.2 การทดสอบการผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

ในการทดสอบอัตราส่วนผสมได้แปรผันค่า ดังนี้

1. ปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 ของน้ำหนักดินแห้ง
 2. ปริมาณยิปซัมเอฟจีดี ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง
 3. อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน
- รวมตัวอย่างทั้งหมด 37 ชุดทดสอบ ในแต่ละชุดทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง

สัญลักษณ์ตัวอย่างทดสอบของแต่ละชุด คือ
CaGb หรือ CaGb-d

เมื่อ C คือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

G คือ ยิปซัมเอฟจีดี

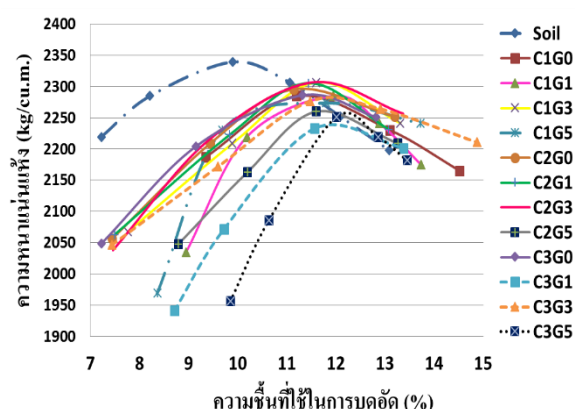
a คือ % ซีเมนต์ต่อน้ำหนักดินแห้ง

b คือ % ยิปซัมเอฟจีดีต่อน้ำหนักดินแห้ง

d คือ อายุการบ่ม (วัน)

3.2.1 การทดสอบ Compaction Test

ทดสอบเพื่อหาค่า Optimum Moisture Content (OMC) ของดิน โดยวิธี Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517 โดยผลการทดสอบในทุก ๆ อัตราส่วนผสมให้ค่า OMC อยู่ระหว่างร้อยละ 11.20 ถึงร้อยละ 12.19 ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่า OMC ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 2 ได้เลือกใช้ค่า OMC เท่ากับร้อยละ 12 สำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบทุกๆ ส่วนผสมต่อไป รวมตัวอย่างทั้งหมด 13 ชุดทดสอบ

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

เตรียมตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 11.64 เซนติเมตร ที่ OMC ร้อยละ 12 นำตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมาบ่มแห้งที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน การทดสอบหาการรับแรงอัดแกนเดียว และโมดูลัสยืดหยุ่น (Tangent Modulus) ของดินลูกรัง และ ดินซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ทล.ท 105/2515

รวมตัวอย่างทั้งหมด 37 ชุดทดสอบ ในแต่ละชุดทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง

4. ผลการทดลอง

จากการทดสอบได้ค่าการทดสอบของกำลังอัดแกนเดียว, ซี.บี.อาร์., การบ่มตัว และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ

ชุดที่	ตัวอย่างทดสอบ	% ซีเมนต์	% ยิปซัม เอพิจี	อายุ (วัน)	ผลการทดสอบ					
					OMC (%)*	UCS (ksc.)	CBR (%)		Swelling (%)	SEM and EDS (ตัวอย่าง)
							Unsoak	Soak		
1	Soil	0	0	0	9.96	9.43	40	17	0.31	1
2	C1G0-3	1	0	3	11.20	9.56				
3	C1G1-3	1	1	3	11.42	18.54			3.31	1
4	C1G3-3	1	3	3	11.60	15.54				
5	C1G5-3	1	5	3	11.80	11.29				
6	C2G0-3	2	0	3	11.14	20.16				
7	C2G1-3	2	1	3	11.44	21.01				
8	C2G3-3	2	3	3	11.51	24.21				
9	C2G5-3	2	5	3	11.60	28.26			2.81	1
10	C3G0-3	3	0	3	11.32	24.82				
11	C3G1-3	3	1	3	11.47	26.04				
12	C3G3-3	3	3	3	12.17	30.36			1.88	1
13	C3G5-3	3	5	3	12.19	18.88				
14	C1G0-7	1	0	7	11.20	14.18				
15	C1G1-7	1	1	7	11.42	19.54			3.73	1
16	C1G3-7	1	3	7	11.60	17.46				
17	C1G5-7	1	5	7	11.80	15.63				
18	C2G0-7	2	0	7	11.14	20.74				
19	C2G1-7	2	1	7	11.44	24.47				
20	C2G3-7	2	3	7	11.51	28.30				
21	C2G5-7	2	5	7	11.60	28.54			5.49	1
22	C3G0-7	3	0	7	11.32	26.65				
23	C3G1-7	3	1	7	11.47	28.52				
24	C3G3-7	3	3	7	12.17	31.97			3.78	1
25	C3G5-7	3	5	7	12.19	31.95				
26	C1G0-28	1	0	28	11.20	17.94				
27	C1G1-28	1	1	28	11.42	23.16	50	25	3.92	1
28	C1G3-28	1	3	28	11.60	21.27				
29	C1G5-28	1	5	28	11.80	20.42				
30	C2G0-28	2	0	28	11.14	29.92				
31	C2G1-28	2	1	28	11.44	30.01				
32	C2G3-28	2	3	28	11.51	37.67				
33	C2G5-28	2	5	28	11.60	41.17	107	33	8.03	1
34	C3G0-28	3	0	28	11.32	30.17				
35	C3G1-28	3	1	28	11.47	31.73				
36	C3G3-28	3	3	28	12.17	37.12	78	31	8.79	1
37	C3G5-28	3	5	28	12.19	34.92				
รวมจำนวนการทดสอบ (ชุด)					13	37	4	4	10	10

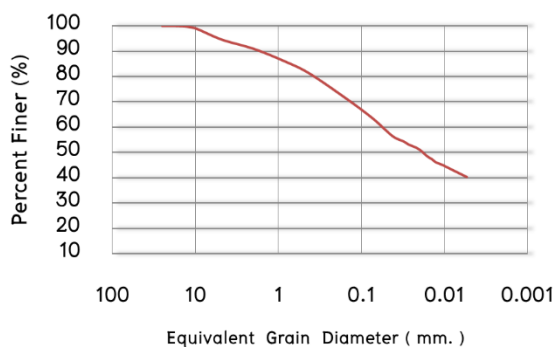
4.1 สมบัติพื้นฐานของดิน

ค่ามาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ [9] กับสมบัติพื้นฐานของดินที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติพื้นฐานของดิน [10]

การทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ
Liquid Limit (LL)	<ร้อยละ 35	ร้อยละ 41
Plastic Limit (PL)	<ร้อยละ 11	ร้อยละ 19
Plasticity Index (PI)	<ร้อยละ 11	ร้อยละ 21
ค่าความถ่วงจำเพาะ	-	2.86

จากสมบัติพื้นฐานของดินที่นำมาทดสอบ สามารถจำแนกประเภทดินในระบบ Unified Soil Classification [11] เป็นดินจำพวกเม็ดละเอียดซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 50 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีสัญลักษณ์กลุ่มคือ CL และเมื่อจำแนกในระบบ ASSHTO พบว่าเป็นดินกลุ่ม A-7-6 (11) เห็นว่า ค่า GI (Group Index) ของดินมีค่าเท่ากับ 11 หมายถึงดินด้อยคุณภาพไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ในงานโครงสร้างชั้นทางแต่ดินที่มีค่า PI สูงจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์และยิปซัมเอพิจิตีเนื่องจากกักเก็บความชื้นได้ดีซึ่งการกระจายตัวของเม็ดดินแสดงในรูปที่ 3

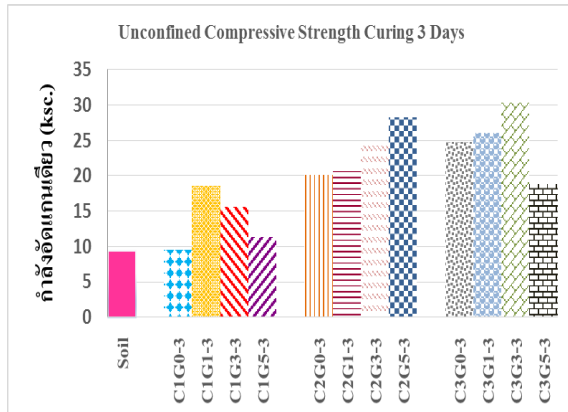


รูปที่ 3 การกระจายตัวของเม็ดดิน

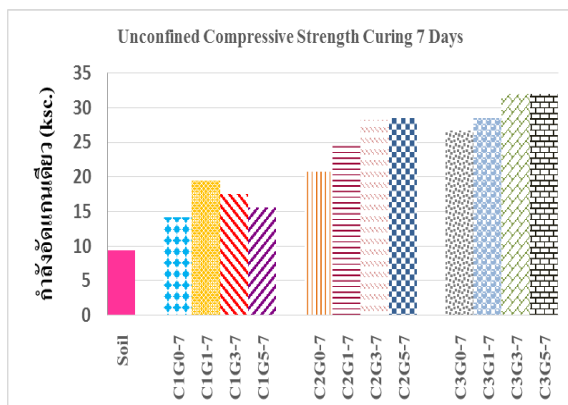
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากการทดลองผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับยิปซัมในอัตราส่วนร้อยละที่กำหนดผสมกับดินพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วันนั้นเมื่อปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยิปซัมเอพิจิตีเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาเคมีของยิปซัมเอพิจิตีที่ก่อให้เกิด ettringite ส่งผลทำให้กำลังแรงอัดสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมเอพิจิตีถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง กำลังรับแรงอัดจะลดลงเป็นผลเนื่องจากผลของการเกิด ettringite ในอัตราส่วนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 1 กับยิปซัมเอพิจิตีร้อยละ 3 จะเห็นได้ว่ากำลังของอัตราส่วนผสมนี้ลดลงเพราะการเกิด ettringite จะให้เกิดการขยายตัวของเม็ดดินถ้าเกิดในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเสริมความแข็งแรงแต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างในเม็ดดินเมื่อรับแรงจะเกิดการแตกร้าวและทำให้ดินซีเมนต์พังทลายไปในที่สุด เมื่อเทียบอัตราส่วนผสมดินซีเมนต์ที่มีปริมาณของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 1 กับยิปซัมร้อยละ 3 และ 5 กับกำลังอัดอัตราส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 1 กับดินพบว่าอัตราส่วนผสมที่เพิ่มยิปซัมเอพิจิตียังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 1 กับดินนั้นแสดงให้เห็นว่าการเกิด ettringite จะช่วยเพิ่มกำลังของดินซีเมนต์ได้จริง ในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 2 กับยิปซัมเอพิจิตีร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน (C2G5-28) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งกำลังอัดเพิ่มขึ้น 3.3 เท่า เมื่อเทียบกับดินลูกรังก่อนปรับปรุงเสถียรภาพ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังสูงที่สุดกล่าวคือเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สมบูรณ์และมีอัตราส่วนของ ettringite ที่เหมาะสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และในตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 3 กับยิปซัมเอพิจิตีร้อยละ 5 มีกำลังอัดลดลงเป็นผลเนื่องจากความชื้นในตัวอย่างเพราะในการทำปฏิกิริยาเคมีเมื่อปริมาณสารตั้งต้นมากขึ้นความต้องการน้ำจะยิ่งมากขึ้นตามซึ่งในการทดลอง

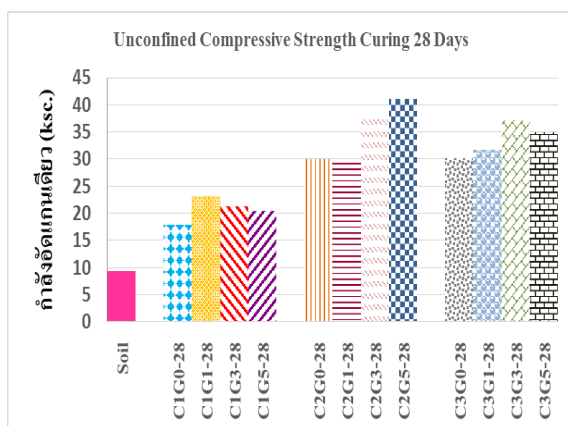
ได้ควบคุมปริมาณความชื้นในดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในส่วนผสมนี้ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4, 5 และ 6



รูปที่ 4 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3 วัน
ของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ



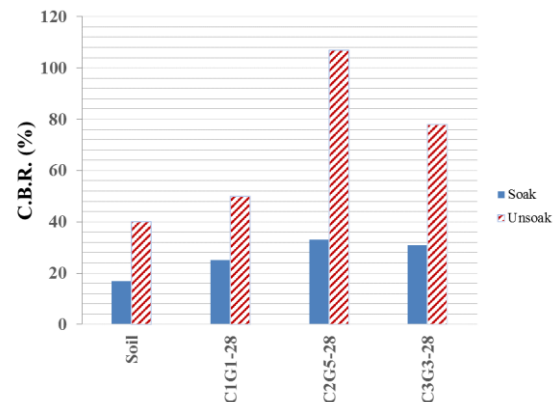
รูปที่ 5 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 วัน
ของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ



รูปที่ 6 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน
ของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

4.3 ผลทดสอบ CBR จากการทดสอบ

ในทดลองหาค่า ซี.บี.อาร์. ได้เลือกตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในแต่ละกลุ่มของดินซีเมนต์มาทำการทดสอบซึ่งได้ความสัมพันธ์ของ Stress กับการยุบตัวของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ผลของเปอร์เซ็นต์ซี.บี.อาร์. เมื่อบ่มแบบเปียกและแห้งที่ตัวอย่างอายุ 28 วัน พบว่าปริมาณชิปซัมเอฟเจดีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ซี.บี.อาร์. เพิ่มขึ้น โดย C2G5-28 เท่ากับร้อยละ 31 เมื่อบ่มตัวอย่างแบบเปียก และร้อยละ 107 สอดคล้องกับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างเหมาะสมของดินปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และชิปซัมเอฟเจดี ถ้าเกิดในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้กำลังสูงขึ้นในการทดสอบพบว่าเมื่อทำการทดสอบแบบ Soak จะทำให้ค่า ซี.บี.อาร์. ลดลงเนื่องจากการแช่น้ำทำให้ดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานมีค่ากำลังลดลงเพราะแรงเชื่อมแน่นดินลดลงแต่อย่างไรก็ตามดินที่ปรับปรุงยังมีซี.บี.อาร์. ค่าเกินมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ คือร้อยละ 25 ดังแสดงในรูปที่ 7

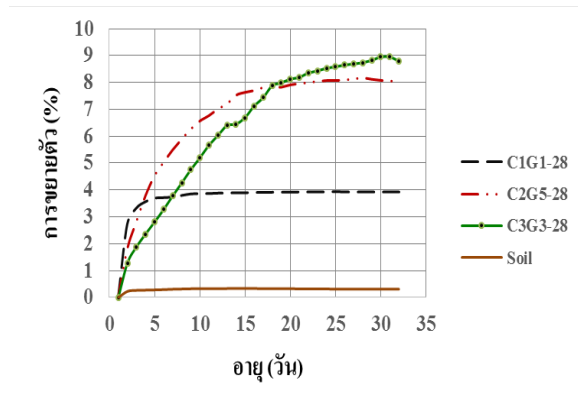


รูปที่ 7 ค่า CBR จากการทดสอบ

4.4 ค่าการบวมตัว

จากการทดลองหาค่าการบวมตัว (Swelling) ของดินลูกรังที่ใส่สารผสมเพิ่ม 4 สูตร คือ C1G1-28, C2G5-28, C3G3-28 และ Soil จะได้ความสัมพันธ์ของค่าการบวมตัว (%) กับเวลาที่เปลี่ยนแปลง (วัน) ซึ่งค่าการบวมตัว (%) คือ $\left[\frac{\Delta L}{L_0} \right] \times 100$ เมื่อ ΔL คือความยาวที่

เปลี่ยนไป และ L_0 คือความยาวเดิมของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 8



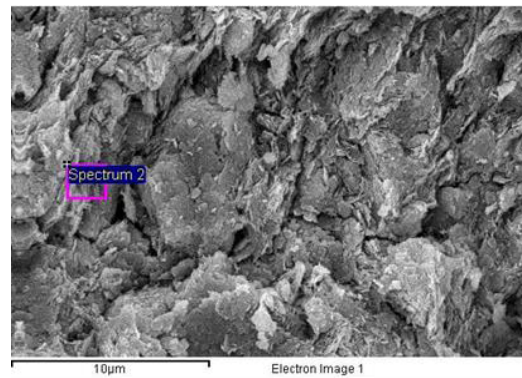
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของการบวมตัว (%) กับเวลาที่เปลี่ยนแปลง (วัน)

จากผลการทดสอบค่าการบวมตัวของตัวอย่าง 4 กลุ่มคือ Soil และอัตราส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ C1G1-28, C2G5-28 และ C3G3-28 เห็นได้ว่า Soil มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเท่ากับ 0.31, C1G1-28 มีการบวมตัว เท่ากับร้อยละ 3.92, C2G5-28 มีการบวมตัว เท่ากับร้อยละ 8.03 และ C3G3-28 มีการบวมตัว เท่ากับร้อยละ 8.79 ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมซีเมนต์ในดินซีเมนต์ทำให้เกิดการบวมตัวขึ้นซึ่งจะช่วยลดการหดตัวของ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับซีเมนต์ฟอสเฟต และยังมีปฏิกิริยาของดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานเนื่องจากมีองค์ประกอบ C_3A กับซีเมนต์ฟอสเฟตทำให้เกิด ettringite ($C_6A_3S_3H_{32}$) [8] เมื่อเกิด ettringite จะเกิดแรงดันที่มากจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็งซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ดินเกิดการบวมตัว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว กล่าวคือกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ettringite เพิ่มขึ้นเช่นกำลังรับแรงอัดของดิน C2G5-28 มากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณ ettringite ที่เหมาะสม แต่ถ้าหากมีปริมาณ ettringite มากเกินไปจะเกิดการขยายตัวมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เม็ดดินแตกร้าวซึ่งเป็นผลเสียทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เช่นกำลังรับแรงอัดของดิน

C3G3-28 ลดลงน้อยกว่าดิน C2G5-28 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ จักรพันธ์ [8]

4.5 โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบของแร่

จากการศึกษาตรวจสอบสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินด้วยวิธีการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Scanning Electron Microscope: SEM) และตรวจสอบหาองค์ประกอบของแร่ (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) ณ ตำแหน่งที่ 2 (Spectrum 2) ของดินที่มีสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานดังรูปที่ 9 สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของดินได้ตามตารางที่ 5

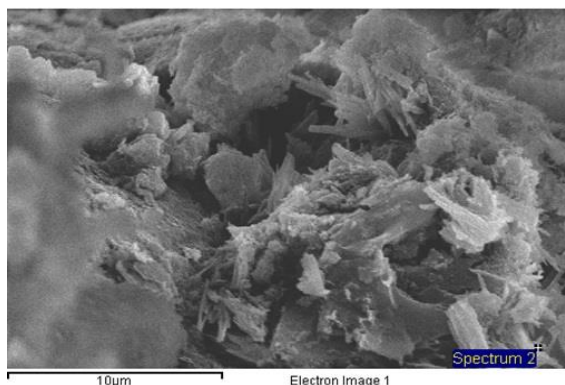


รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของดินที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของธาตุต่างๆในดินที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

Element	Weight (%)	Atomic (%)
O K	29.20	46.60
Al K	15.24	14.42
Si K	28.65	26.06
S K	3.12	2.04
Ca K	23.79	10.88
Totals	100.00	

จากการตรวจสอบสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินด้วยวิธีการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และตรวจสอบหาองค์ประกอบของแร่ ณ ตำแหน่งที่ 2 (Spectrum 2) ของดิน (C2G5-28) ดังรูปที่ 10 สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของดินได้ตามตารางที่ 6

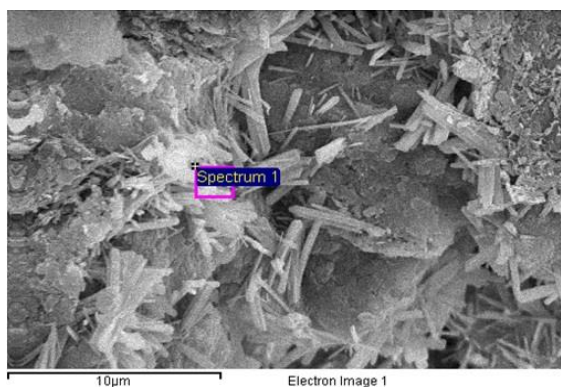


รูปที่ 10 โครงสร้างทางจุลภาคของดิน C2G5-28

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของธาตุต่างๆในดิน C2G5-28

Element	Weight (%)	Atomic (%)
O K	44.52	62.90
Al K	8.36	7.00
Si K	9.94	8.00
S K	7.99	5.64
Ca K	29.19	16.46
Totals	100.00	

จากการตรวจสอบสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินด้วยวิธีการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และตรวจสอบหาองค์ประกอบของแร่ ณ ตำแหน่งที่ 2 (Spectrum 2) ของดิน (C3G3-28) ดังรูปที่ 11 สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของดินได้ตามตารางที่ 7



รูปที่ 11 ตำแหน่งที่ 1 ในการตรวจสอบหาองค์ประกอบของแร่ของดิน C3G3-28

ตารางที่ 7 องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในดิน C3G3-28

Element	Weight (%)	Atomic (%)
O K	57.46	71.47
Al K	10.66	7.86
Si K	22.58	16
S K	0.41	0.25
Ca K	8.89	4.42
Totals	100.00	

การวิเคราะห์ผลการศึกษาด้วยวิธีการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (SEM) พบว่าตัวอย่างดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Ca Al และ Si ในอัตราส่วนร้อยละ 23.79 15.24 และ 28.65 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานนี้ เมื่อผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเนื่องจากองค์ประกอบ Si Al อีกทั้งถ้าดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานนี้ไปผสมกับยิปซัมเอฟจีดีจะทาปฏิกิริยากับยิปซัมเอฟจีดีเกิดเป็น ettringite เนื่องจากดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานนี้มีองค์ประกอบของ C_3A ที่เป็นสารตั้งต้นของการเกิด ettringite ซึ่งหมายความว่าดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานชนิดสามารถทาปฏิกิริยากับยิปซัมเอฟจีดีได้ด้วยตัวเอง ส่วนดินที่ปรับปรุงโดยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และยิปซัมเอฟจีดีมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเมื่อมีการผสมยิปซัมเอฟจีดีที่ส่วนผสมต่างๆ และอายุการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของดินที่ถูกปรับปรุงโดยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และยิปซัมเอฟจีดีพบผลลักษณะเป็นแท่งเดี่ยวคล้ายเข็มคริสตัลเกาะกลุ่มกันแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างในเม็ดดิน เมื่อทาการยิง EDS ในดิน C2G5-28 พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ Ca, Al และ S โดยมีอะตอมเท่ากับร้อยละ 7, 5.64 และ 16.46ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบที่เรียกว่า ettringite ($6CaO \cdot Al_2O_3(SO_4)_3 \cdot 32H_2O$) ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดของดิน C2G5-28 เพิ่มขึ้น [9] กล่าวคือเมื่อเพิ่มยิปซัมเอฟจีดีลงในดินซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง C_3A และยิปซัมเอฟจีดี และเมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบของแร่ธาตุในดิน C3G3-28 เมื่อทาการยิง

EDS ในดิน C3G3-28 พบว่ามีองค์ประกอบหลัก Ca, Al และ S โดยมีอะตอมเท่ากับร้อยละ 7.86, 0.25 และ 4.42 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 จากผลการศึกษาจะพบว่าร้อยละอะตอมของ Ca, Al และ S ในดิน C3G3-28 มีค่าน้อยกว่าร้อยละอะตอมของ Ca, Al และ S ในดิน C2G5-28 เป็นผลมาจากปริมาณความชื้นในการทำปฏิกิริยาอาจไม่เพียงพอเพราะในการบดอัดได้กำหนดปริมาณน้ำในการบดอัดทุกส่วนผสมเท่ากันดังนั้นเมื่อปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับยิปซัมเอฟจีดีมากขึ้นจะส่งผลให้ดินซีเมนต์มีความต้องการน้ำมากขึ้นซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับยิปซัมเอฟจีดี จะสมบูรณ์ได้ต้องมีปริมาณน้ำอย่างเพียงพอส่งผลทำให้กำลังอัดในดิน C3G3-28 ลดลง

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของดินที่ต่ำกว่ามาตรฐานมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

และทำปฏิกิริยากับยิปซัมเอฟจีดีด้วยตัวเองเนื่องจากมีองค์ประกอบที่บ่งบอกถึงสารตั้งต้นของการทำปฏิกิริยานั้นคือ Ca, O, Al และ Si ดังนั้นเมื่อเติมปริมาณของยิปซัมเอฟจีดีเพิ่มจะส่งผลให้เกิด ettringite เพิ่ม นอกจากนี้เมื่อผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะส่งผลให้เกิด ettringite เพิ่มเช่นกัน

การทดสอบกำลังอัดและค่า ซี.บี.อาร์.สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับยิปซัมเอฟจีดีในดินต่ำกว่ามาตรฐานชนิดนี้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมในแง่การเพิ่มกำลังแรงอัดที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ต่อยิปซัมเอฟจีดี 1:1 ถึง 2:5

ผลของการบวมตัวของตัวอย่างพบว่า การเพิ่มขึ้นของ ettringite ส่งผลทำให้เกิดการบวมตัวของดินซีเมนต์ ดังนั้นในการพิจารณานำยิปซัมไปปรับปรุงสมบัติของดินทางวิศวกรรมควรคำนึงถึงค่าการบวมของดินซีเมนต์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษม เพชรเกตุ. เทคนิคการใช้ Deep Soil Stabilization สำหรับดินอ่อนในประเทศไทย. การสัมมนาทางวิชาการ เรื่องการปรับปรุงคุณภาพดิน '41, คณะอนุกรรมการวิศวกรรมปฐพี วสท, 2541; 236-267.
- [2] ทรงพล บุญมาดี. ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529.
- [3] สุวัฒนา นิกม และคุณพล ตันนโยภาส. อิทธิพลของสารเติมดินขาวแปรที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตยิปซัมเทียม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, 21-22 พฤษภาคม 2547.
- [4] Kolay P. K. and Aminur M. R. Physical and Geotechnical Characteristics of Stabilized and Unstabilized Tropical Peat Soil. *World Journal of Engineering*, 2011; 8(3): 223-230.
- [5] อนิรุทธิ์ ธงไชย และสงกรานต์ ดันศิริ. กำลังอัดของดินปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ และกาบยิปซัมผสมเพิ่ม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, 2551.
- [6] อนิรุทธิ์ ธงไชย และเกศรินทร์ พิมรักษา. การใช้กากของเหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินของโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะเป็นสารผสมเพิ่มในงานปรับปรุงคุณสมบัติดินโดยวิธีผสมลึก. รายงานการวิจัย, สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549.
- [7] จักรพันธ์ ธงทอง. การปรับปรุงคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของดินลูกรังโดยการใช้ซีเมนต์และกาบยิปซัม. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.
- [8] Mehta, K.P. Concrete Structure: Properties and Materials. Prentice-Hall Inc, USA, 1986.

- [9] พงนิษฐ์ ไพบูลย์ตันติวงศ์. แร่ใยหินและใยหินสังเคราะห์สำหรับงานอุตสาหกรรม. รายงานวิชาการฉบับที่ กวท 14/2546, กรุงเทพฯ: กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี, กรมทรัพยากรธรณี, 2546.
- [10] กรมทางหลวง. มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม. ทล.-ท. 205/2532, กองวิเคราะห์และวิจัย, 2517.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). D 2487-83 Classification of Soils for Engineering (1985). 1985; 395–408.