

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ในการก่อสร้างถนน

Lateritic Soil Quality Improvement Using Palm Oil Fuel Ash and Cement for Road Construction

พีระวัฒน์ พงษ์พิศกร^{1*} สราวุธ จริตงาม¹ และ โอภาส สมใจนึก²

Peerawat Pongchawitkorn^{1*}, Saravut Jaritngam¹ and Opas Somchainuek²

Received: 24 February 2023, Revised: 1 June 2023, Accepted: 19 June 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา เพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างถนน โดยปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักของดิน และปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 5 ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดต่ำกว่า 45 ไมครอน ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของดิน โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและทางวิศวกรรม วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดินลูกรัง ผลการศึกษาพบว่าดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ มีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO และ K_2O การปรับปรุงดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์ ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 24.8 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และการปรับปรุงโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ทำให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้นจาก 9.7 เป็น 11.2% ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงจาก 1.970 เป็น 1.861 g/cm^3 และทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 31.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น จากค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนผสม และดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านระยะเวลาบ่ม 7 วัน ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงในการนำไปใช้ในการก่อสร้างถนน

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Department of Civil and Environment Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand.

² สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ สำนักงานทางหลวงที่ 18 อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Bureau of Materials Analysis and Inspection, Office of Highway 18, Mueang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): dan.peerawat@hotmail.com

คำสำคัญ: ดินลูกรังนาหม่อม, เถ้าปาล์มน้ำมัน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, งานก่อสร้างถนน, กำลังอัด, กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ABSTRACT

This research studied the possibility of using Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Portland cement Type 1 to improve the quality of lateritic soil from the Ban Khuan Chong, Namom district, Songkhla province for road construction. The soil was improved by incorporating cement at proportions of 2%, 3%, 4%, and 5% by weight, and by incorporating a mixture of POFA with particle sizes less than 45 microns at proportions of 5%, 10%, and 15% by weight, along with 5% cement. The preliminary and engineering properties of the soil were tested, including chemical composition analysis (XRF) and microstructure analysis using a scanning electron microscope (SEM). The study found that the main components of the laterite soil improved with POFA and cement were SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO and K_2O . The soil improved with cement achieved a maximum compressive strength of 24.8 ksc at 5% cement content over a curing period of 28 days. The soil improved with POFA and cement showed an increase in optimum moisture content (OMC) from 9.7% to 11.2%, resulting in a decrease in maximum dry density (MDD) from 1.970 to 1.861 g/cm³. The soil also achieved the maximum compressive strength of 31.1 ksc at a 5% cement mixed with 5% POFA over a curing period of 28 days. The compressive strength decreased with an increase in the amount of POFA. The soil samples improved with cement at all proportions and the soil samples improved with 5% cement and 5% POFA over a curing period of 7 days met the subbase layer requirements for soil-cement subbase according to the Department of Highways standards for road construction. over a curing period of 7 days met the subbase layer requirements for soil-cement subbase according to the Department of Highways standards for road construction.

Key words: Namom lateritic soil, palm oil fuel ash, Portland cement type 1, road construction, compressive strength, scanning electron microscope

บทนำ

ถนนมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการคมนาคมทางภาคพื้นดิน ถนนในประเทศไทยมีความยาวถึง 702,723 กิโลเมตร (Ministry of Transport Operation Center, 2021) คุณภาพของถนนมีความสำคัญ เนื่องจากถ้าไม่ได้มาตรฐานจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้นั่น โดยกรมทางหลวงมีการใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง

แต่อาจจะเป็นปัญหาสำหรับบางพื้นที่ที่ไม่สามารถหาดินลูกรังที่มีคุณสมบัติที่ดีพอสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาวัสดุชั้นรองพื้นทางอย่างดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันที่สำคัญเป็นอย่างมากในภาคใต้

ดินลูกรังเกิดจากการสลายตัวทางธรรมชาติของหินที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิสูง และมีปริมาณความชื้นสูง หรือเขตร้อนชื้น ในประเทศไทย มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจะมีการเกิดดินลูกรังสูงมาก โดยทั่วไปดินลูกรัง หมายถึงดินที่มีส่วนหยาบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าร้อยละ 35 โดยปริมาณ และมีอนุภาคดินที่สามารถแทรกอยู่ช่องว่างมีขนาดใหญ่มากกว่า 1 มิลลิเมตร (Land Development Department, 2020) ลักษณะของดินลูกรังประกอบไปด้วยออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็ก (Secondary Oxide of Iron) หรือ อะลูมินัม (Aluminum) เกือบจะไม่เป็นค่า ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยซิลิกา (Silica) และอาจจะมีแร่ควอตซ์ (Quartz) และดินขาว (Kaolinite) ประกอบอยู่เป็นจำนวนมากได้ มีลักษณะแข็ง และมีสีน้ำตาลแดง หรือ สีน้ำตาลแดง (Alexander and Cady, 1962)

ในภาคใต้ ปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญเป็นอย่างมาก ปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ขึ้นต้นถึงประมาณ 5 ล้านไร่ และมีผลผลิตถึงประมาณ 14 ล้านตันในปี พ.ศ.2563 (Office of Agricultural Economics, 2020) หลังจากผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้นจะเหลือกากผลปาล์ม เช่น กากใย กะลา และทะลายปาล์ม โดยเป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลให้กับโรงงานอุตสาหกรรม และหม้อกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้าชีวมวลในอุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส แทนที่เชื้อเพลิงถ่านหินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จากข้อมูลทางสถิติของข้อมูลผลผลิตสินค้าเกษตร 5 ปีย้อนหลัง ผลผลิตจากปาล์มน้ำมันในภาคใต้มีปริมาณกว่า 60 ล้านตัน ของเหลือจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันนั้นมีปริมาณสูงถึงประมาณ 32 ล้านตัน และหลังจากการนำวัสดุเหล่านั้นไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจะได้เป็นเถ้าปาล์มน้ำมัน ปริมาณ 1.6 ล้านตัน เหลือเป็น 3.2 แสนตันต่อปี ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก และการกำจัดเถ้า

ชีวมวลที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะต้องนำไปฝังกลบเนื่องจากเถ้าชีวมวลมีขนาดเล็ก และพุ้งกระจายได้ง่าย อาจจะสร้างปัญหาต่อทางเดินหายใจได้ (Jaturapitakkul, 2012) จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในการพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรัง และเพื่อใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันให้ได้มากที่สุด โดยจากหลายงานวิจัยนั้นได้ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน และได้พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นสามารถเทียบเคียงวัสดุพอลิซิลิกาได้ (Rakson *et al.*, 2005) เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นมีสารประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (ASTM, 2019)

การทำวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น Nnochiri *et al.* (2017) ได้นำดินลูกรังจาก 3 แหล่งที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (L1, L2, L3) มาผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-10 และเถ้ากะลาปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักดิน และผลการทดสอบสรุปได้ว่าการเติมเถ้ากะลาปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ลงไปทำให้ค่าพิกัดเหลว (LL) และค่าพิกัดพลาสติก (PI) ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ส่วนผสมที่ให้กำลังอัดที่สูงที่สุดสำหรับตัวอย่าง L1 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 สำหรับตัวอย่าง L2 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 สำหรับตัวอย่าง L3 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 Onyelowe (2019) ได้นำตัวอย่างดินลูกรังประเภท A-2-7 มาปรับปรุงด้วยเถ้าทะลายปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 3, 6, 9, 12 และ 15 โดยน้ำหนักดิน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยเถ้าทะลายปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของเถ้า

ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดลดลงที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 ถึง 6 และเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 6 ถึง 15, ค่า CBR เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมัน โดยค่า CBR ที่สูงที่สุดอยู่ที่ 30% ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 9 และค่ากำลังอัดมากที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 12 Pourakbar *et al.* (2015) ได้นำดินเหนียว มาปรับปรุงด้วย Alkaline activator เช่น KOH และ NaOH และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักดิน โดยทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7, 90 และ 180 วัน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 สำหรับตัวอย่างที่ผสม KOH ที่ระยะเวลาการบ่ม 180 วัน และสำหรับตัวอย่างที่ผสม NaOH มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 180 วัน โดยค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น Otunyo and Chukuigwe (2018) ได้นำดินลูกรังคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานมาทำการปรับปรุงโดยใช้เถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินลูกรัง จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมัน, ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และต่ำสุดในอัตราส่วนทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 25 ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 และ 28 วันตามลำดับ และสำหรับค่า CBR ที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ทั้งแบบผ่านการบ่ม และไม่ผ่านการบ่ม Ahmad *et al.* (2011)

ได้นำดินพรมมาปรับปรุงโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดต่ำกว่า 445 ไมครอน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10, 15 และ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักดิน และทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 14 วัน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ที่ทุกระยะเวลาการบ่ม และสำหรับค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 ที่ทุกระยะเวลาการบ่ม และค่ากำลังอัดของทุกอัตราส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม Oke and Kolawole (2020) ได้นำดินลูกรังมาปรับปรุงโดยใช้เถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่าในอัตราส่วนเถ้าร้อยละ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 โดยน้ำหนักดิน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่าทำให้ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่าที่เพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่าที่เพิ่มขึ้น, ค่า CBR สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่า 8% และค่ากำลังอัดสูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่าที่ร้อยละ 8 สำหรับระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ และค่ากำลังอัดจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าทะเลสาบปาล์มน้ำมันเปล่า Phudphong and Hormdee (2022) ได้นำดินลมหอบมาปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและตะกรันเตาถลุงเหล็ก จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่มร้อนด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน และบ่มในอุณหภูมิห้องปกติอีก 7 วัน มีค่ากำลังอัดผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง และมีค่า

กำลังอัดมากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในพื้นที่บ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคจากภาพถ่ายของดินลูกรังทั้งก่อนและหลังปรับปรุง และนำเสนออัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์ม น้ำมันสำหรับเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนน และการนำวัสดุเหลือทิ้งอย่างเถ้าปาล์ม น้ำมัน ที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญเป็นอย่างมากของภาคใต้

วิธีดำเนินการวิจัย

บทความนี้ทำการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ในห้องปฏิบัติการ ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม น้ำมัน

1. การเตรียมวัสดุในการทดสอบ

1.1 ดินลูกรังจากบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ดังแสดงใน (Figure 1)



Figure 1 Ban Khuan Chong, Namom lateritic soil source

1.2 เถ้าปาล์ม น้ำมันที่ได้จากการเผาในเตาเผาแบบปิดที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียสจากบริษัท นามหงส์น้ำมันปาล์ม จำกัด จังหวัดกระบี่

โดยทำการบดด้วยเครื่อง Gyratory Crusher รอบละ 2 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยทำการปรับความละเอียดสูง และทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 คัดขนาดต่ำกว่า 45 ไมครอน ดังแสดงใน (Figure 2 และ 3)



Figure 2 Gyratory Crusher



Figure 3 POFA after grinded

1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผ่านมาตรฐาน มอก. 15

1.4 น้ำประปาสะอาด

2. ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุดินลูกรังเปล่าตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง DH-S 205/2532 (DOH, 1989) ดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบหาขนาดมวลผลของดิน (Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน DH-T 205/2517 (DOH, 1974a)

2.2 ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion) โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ตามมาตรฐาน DH-T 202/2515 (DOH, 1972a)

2.3 ทดสอบเพื่อประเมินค่าพิกัดสถานะความคงตัวของมวลดิน (Atterberg Limits) ตามมาตรฐาน DH-T 102/2515 และ 103/2515 (DOH, 1972b)

2.4 ทดสอบการบดอัดดิน (Modified Proctor test) ตามมาตรฐาน DH-T 108/2517 (DOH, 1974b)

2.5 ทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (CBR) ตามมาตรฐาน DH-T 109/2517 (DOH, 1974c)

2.6 ทดสอบกำลังอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน DH-T 105/2515 (DOH, 1972c)

3. ทำการทดสอบกำลังอัด (UCS) ของวัสดุดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักของดินลูกรัง และวัสดุดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และเถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของดิน ดังแสดงใน (Table 1) โดยมีระยะเวลาการบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 7 และ 28 วันในถุงพลาสติก และแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ โดยทำการทดสอบโดยใช้จำนวนตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง ดังแสดงใน (Figure 4, 5 และ 6)



Figure 4 Lateritic soil improved with cement curing in closed plastic bag



Figure 5 Lateritic soil improved with cement and POFA curing in closed plastic bag



Figure 6 UCS testing of Lateritic soil improved with cement

4. ทำการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุ (XRF) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน และถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดินลูกรังทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Table 1 Ratio Between Lateritic Soil, Portland Cement Type 1 and POFA

Ratio No.	Lateritic Soil (LS)	Portland Cement		POFA (P)	Symbol
		Type 1 (C)			
1	100	0	0	LS100	
2	98	2	0	LS98C2	
3	97	3	0	LS97C3	
4	96	4	0	LS96C4	
5	95	5	0	LS95C5	
6	90	5	5	LS90C5P5	
7	85	5	10	LS85C5P10	
8	80	5	15	LS80C5P15	

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง

จากผลการทดสอบคุณสมบัติดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง (Table 2) แสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 33.1%, ค่าพิกัดพลาสติกเท่ากับ 22.2% และ ค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 10.9% ซึ่งผ่านเกณฑ์วัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง DH-S 205/2532 (DOH, 1989) ทั้งหมด ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 9.7% และค่าความหนาแน่นแห้ง

สูงสุดอยู่ที่ 1.970 g/cm^3 ค่าความต้านทานการสึกกร่อนเท่ากับ 63.1% สูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ที่ไม่เกิน 60% อยู่ไม่มาก ค่า CBR เท่ากับ 8.1% ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 25% และค่ากำลังอัดโดยไม่ผ่านการบ่มเท่ากับ 4.8 ksc ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 7 ksc และจากผลการทดสอบจำแนกได้ว่าดินลูกรังอยู่ในประเภท A-2-4 โดยจำแนกด้วยวิธีการของ AASHTO โดยลักษณะดินลูกรังมีเม็ดละเอียดมากและมีความเหนียวสูง

Table 2 Properties of Lateritic Soil

Property	Result	Sieve No.	% Passed
Liquid Limit (%)	33.1	2"	100
Plastic Limit (%)	22.2	1"	100
Plastic Index (%)	10.9	3/4"	91.8
OMC (%)	9.7	3/8"	69.7
MDD (g/cm^3)	1.969	4	50
Abrasion (%)	63.1	10	46.4
C.B.R. (Soaked) (%)	8.1	40	41.0
UCS (ksc)	4.8	200	33.1

2. ผลการทดสอบหาลองค์ประกอบทางเคมี (XRF)

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน, ดินลูกรัง, ดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ และดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงใน (Table 3)

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างดินลูกรังเปล่ามี

SiO₂ อยู่ที่ 59.96% ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ อยู่ที่ 63.80%, 1.43% และ 1.64% ตามลำดับ รวมกันได้ 66.86% เมื่อเทียบกับวัสดุปอชโซลานเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (ASTM, 2019) จัดอยู่ในคลาส N โดยมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มากกว่า 50%

Table 3 Chemical composition of Lateritic Soil, POFA and Improved Lateritic Soil

Chemical Composition	Concentration (%)			
	POFA	LS100	LS95C5	LS90C5P5
SiO ₂	63.795	59.961	58.188	55.768
Al ₂ O ₃	1.430	22.921	20.552	19.467
Fe ₂ O ₃	1.635	8.807	8.218	8.205
CaO	5.955	0.020	3.364	5.082
K ₂ O	4.499	1.994	1.937	2.138
TiO ₂	0.168	0.956	1.040	0.908
MgO	2.792	0.208	0.300	0.527
P ₂ O ₅	3.170	0.238	0.190	0.358

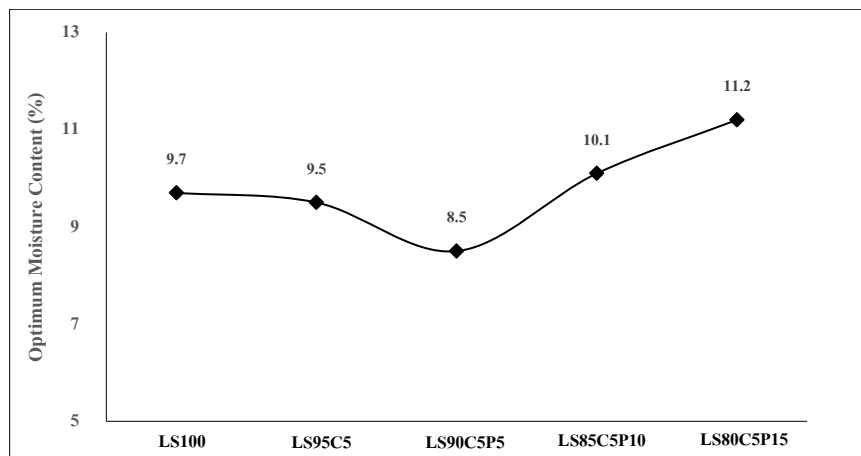
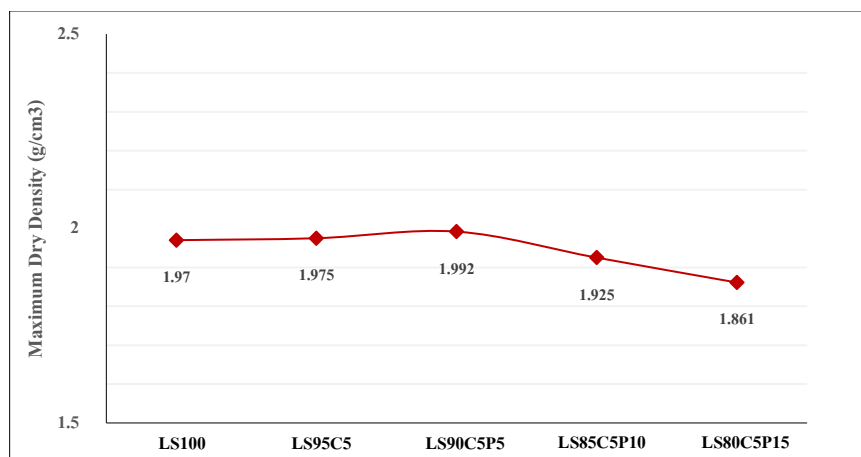
3. ผลการทดสอบปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD)

จากผลการทดสอบดังแสดงใน (Table 4) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยจากดินลูกรังเปล่ามีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 9.7% แต่เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปจะทำให้ค่าขึ้นไปถึง 11.2% ดังแสดงใน (Figure 7) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018); Onyelow (2019) โดยการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เกิดจากที่ตัวปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำที่ดี จึงทำให้ดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันใช้ปริมาณของน้ำมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันมี

ผลกระทบต่อค่าปริมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังเท่ากับ 1.970 g/cm³ เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปแล้วทำให้ค่าลดลงเท่ากับ 1.861 g/cm³ ดังแสดงใน (Figure 8) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018); Onyelow (2019) เมื่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง โดยการลดลงของค่าปริมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดเกิดจากที่ตัวปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันได้เข้าไปแทนที่ของดินลูกรังในอัตราส่วนที่มาก จึงทำให้ตัวดินลูกรังมีความแน่นที่ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่แห้ง

Table 4 Optimum Moisture Content and Maximum Dry Density of Lateritic soil and Improved Lateritic soil

Ratio	OMC (%)	MDD (g/cm ³)
LS100	9.7	1.969
LS95C5	9.5	1.975
LS90C5P5	8.4	1.992
LS85C5P10	10.1	1.926
LS80C5P15	11.2	1.861

**Figure 7** Optimum Moisture Content (OMC) of Lateritic soil and Improved Lateritic soil**Figure 8** Maximum Dry Density (MDD) of Lateritic soil and Improved Lateritic soil

4. ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัด (UCS)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุดินลูกรัง และดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปลาล่มน้ำมันในอัตราส่วนที่กำหนด โดยบ่มในถุงพลาสติกและแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทำ

การทดสอบ ดังแสดงใน (Table 5) พบว่าค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 17.5 และ 24.8 ksc ในอัตราส่วน LS95C5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7

และ 28 วันตามลำดับเช่นกัน ดังแสดงใน (Figure 9) ซึ่งมีความมากขึ้นกว่าดินลูกรังที่ไม่ปรับปรุงที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.8 ksc และดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 7.1 และ 31 ksc ในอัตราส่วน LS90C5P5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์อย่างเดียว ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เพราะเมื่อเพิ่มเถ้าปาล์ม น้ำมันที่เป็นวัสดุปอชโซลานที่คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานยิ่งขึ้นไป แต่ในระยะเวลาการบ่ม 7 วันค่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าน้อยกว่าดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์อย่างเดียว แสดงให้เห็นถึงว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานนั้นใช้เวลาอย่างน้อย 28 วัน และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์ม น้ำมันขึ้น ไม่ได้ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นไปด้วย

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ดินลูกรังน้อยลง และทำให้แรงยึดระหว่างดินลูกรังและวัสดุปอชโซลานลดลงเช่นกัน ดังแสดงใน (Figure 10) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018), Onyelowe (2019); Oke and Kolawole (2020) ที่ได้ค่าจากการทดสอบกำลังอัดน้อยลงเมื่อมีอัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันมากเกินไป เมื่อเทียบค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงแล้วกับมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ DH-S 206/2564 (DOH, 2021) พบว่าดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนผสมและดินลูกรังผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วน LS90C5P5 ที่ผ่านระยะเวลาบ่ม 7 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งตั้งไว้ที่ 7 ksc ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

Table 5 Unconfined Compressive Strength of Improved Lateritic soil

Ratio	UCS (ksc)		
	0 days cured	7 days cured	28 days cured
LS100	4.8	-	-
LS98C2	-	7.7	8.0
LS97C3	-	12.2	13.8
LS96C4	-	12.6	15.9
LS95C5	-	17.5	24.8
LS90C5P5	-	7.1	31.1
LS85C5P10	-	6.9	19.2
LS80C5P15	-	6.7	11.7

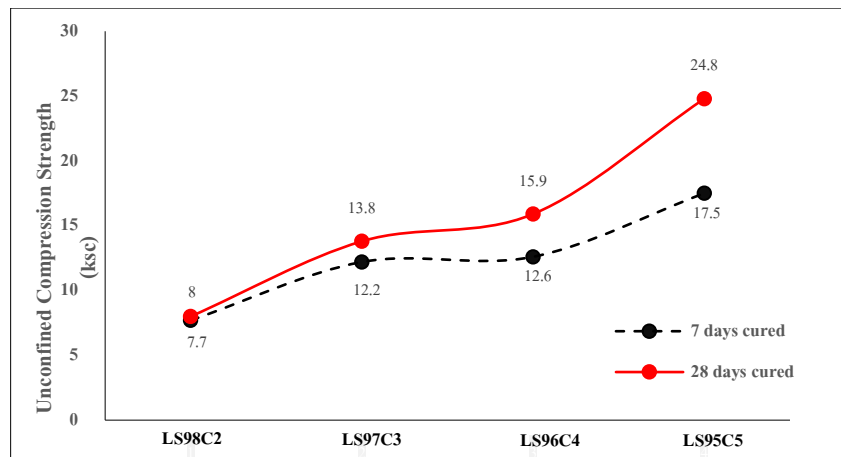


Figure 9 Unconfined Compressive Strength of Lateritic soil improved with Cement

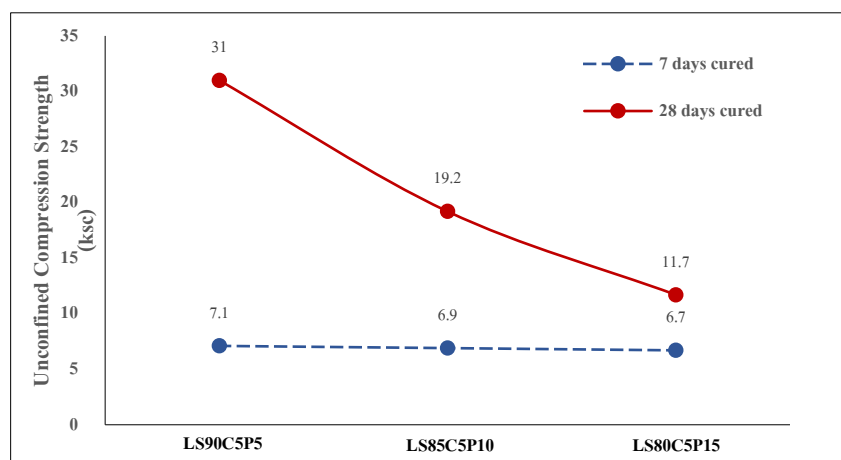


Figure 10 Unconfined Compressive Strength of Lateritic soil improved with Cement and POFA

5. ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดินลูกรังด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า (Figure 11) แสดงให้เห็นถึงผลึกดินขาว (Kaolinite) (Ivanic *et al.*, 2015) เรียงตัวซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังพบว่ามี Silicon Dioxide ถึง 59.96% จากภาพถ่ายของ LS95C5 (Figure 12(A)) ด้วยกำลังขยาย

10,000 เท่า และจากภาพถ่ายของ LS90C5P5 ด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า (Figure 12(B)) และเมื่อเทียบกับ Figure 5 ซึ่งเป็นภาพดินลูกรัง จะแสดงให้เห็นถึงผลึกเอตทริงไต์ (Ettringite) แทรกขึ้นมาระหว่างเม็ดดิน และช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลงจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากวัสดุประสานอย่างปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล่มน้ำมัน ทำให้ดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล่มน้ำมันมีกำลังอัดที่สูง



Figure 11 LS100 at the magnification of 10,000x



(A)



(B)

Figure 12 28 days cured LS95C5 (A) and LS90C5P5 (B) at the magnification of 10,000x

สรุป

ผลจากการทดสอบการปรับปรุงดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าปลาล้มน้ำมันสามารถทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่ากำลังอัดของดินลูกรังเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยสูงสุดอยู่ที่ 17.5 และ 24.8 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่ม 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านการปรับปรุงที่มีค่า

กำลังอัดอยู่ที่ 4.8 ksc ถึง 265% และ 417% ตามลำดับ และการปรับปรุงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าปลาล้มน้ำมันทำให้ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 9.7% เป็น 11.2% และทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงจาก 1.970 g/cm³ เป็น 1.861 g/cm³ และทำให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 31.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปลาล้มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน โดยเพิ่มขึ้นจากดินลูกรังที่ไม่ผ่านการปรับปรุงที่มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 4.8 ksc และที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 24.8 ksc

ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ถึง 546% และ 25% ตามลำดับ แต่ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 7.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ซึ่งน้อยกว่าดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในทุกอัตราส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างดินลูกรังปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นใช้เวลาอย่างน้อย 28 วัน และเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดลดลงอย่างมากเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ดินลูกรังน้อยลง และทำให้แรงยึดระหว่างดินลูกรังและวัสดุปอซโซลานลดลงเช่นกัน โดยอัตราส่วนผสมที่แนะนำในการนำไปใช้งานก่อสร้างถนน คือ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 ถึง 5 และอัตราส่วนดินลูกรังร้อยละ 90 ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ซึ่งมีค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง และจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำของเสียจากอุตสาหกรรมชีวมวลอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ เพื่อที่จะได้ลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากเถ้าปาล์มน้ำมัน และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ฝังกลบได้ อย่างไรก็ตามควรทดสอบแคลิฟอร์เนียเบร็งเรโซของดินลูกรังในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 ถึง 5 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 เพื่อนำมาพิจารณาในการนำไปใช้เป็นวัสดุในชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนบัณฑิตศึกษา พ.ศ.2562

และทุนอุดหนุนวิจัย พ.ศ. 2564 บริษัท นามหงส์น้ำมันปาล์ม จำกัด สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน และเจ้าหน้าที่ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำนักงานทางหลวงที่ 18 ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, J., Rahman, A.S.A., Ali, M.R.M. and Rahman, K.F.A. 2011. Peat soil treatment using POFA, pp. 66-70. *In IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research*. Penang, Malaysia.
- Alexander, L.T. and Cady, J.G. 1962. Genesis and hardening of laterite in soils. *Soil Science* 96(1): 7-8.
- ASTM. 2019. **ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in concrete**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- DOH. 1972a. **Abrasion test Standard (DH-T 202/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1972b. **Atterberg limits test standard (DH-T 102/2515 and 103/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1972c. **Unconfined compressive strength test standard (DH-T 105/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)

- DOH. 1974a. **Sieve analysis test standard (DH-T 205/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1974b. **Modified proctor test standard (DH-T 108/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1974c. **California bearing ratio test standard (DH-T 109/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1989. **Soil aggregate subbase standard for road construction (DH-S 205/2532)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 2021. **Soil - cement subbase standard for road construction (DH-S 206/2564)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- Ivanic, M., Vdovic, N., Barreto, S.D.B., Bermanec, V. and Sonidi, I. 2015. Mineralogy, surface properties and electrokinetic behavior of kaolin clays from the naturally occurring pegmatite deposits. **Geologia Croatica** 68(2): 139-145.
- Jaturapitakkul, C. 2012. Biomass ash from industry: Problems, Limitations and Applications. **Concrete Journal TCA e-magazine** 17: 14-23. (in Thai)
- Land Development Department. 2020. **Management of laterite soil**. LDD E-library. Available Source: <http://library. ldd.go.th>, February 16, 2020. (in Thai)
- Ministry of Transport Operation Center. 2021. **Road infrastructure**. Road infrastructure. Available Source: <https://motoc.mot.go.th/infras>, March 6, 2023. (in Thai)
- Nnochiri, E.S., Ogundipe, O.M. and Oluwatuyi, O.E. 2017. Effects of palm kernel shell ash on lime-stabilized lateritic soil. **Slovak Journal of Civil Engineering** 25(3): 1-7.
- Office of Agricultural Economics. 2020. **Information on the production of agricultural products**. Palm oil product details. Available Source: <https://www. oae.go.th>, March 6, 2023. (in Thai)
- Oke, J. and Kolawole, O. 2020. Effects of Compactive Effort on Laterite -Oil Palm Empty Fruit Bunch Ash Mixture. **Covenant Journal of Engineering Technology** 4(1): 30-48.
- Onyelowe, K.C. 2019. Nanosized palm bunch ash (NPBA) stabilization of lateritic soil for construction purposes. **International Journal of Geotechnical Engineering** 13(1): 83-91.
- Otunyo, A.W. and Chukuigwe, C.C. 2018. Investigation of the impact of palm bunch ash on the stabilization of poor lateritic soil. **Nigerian Journal of Technology** 37(3): 600-604.
- Phudphong, W. and Hormdee, D. 2022. Utilization of geopolymer on improvement of loess soil using palm oil fuel ash and granulated blast furnace slag. **Engineering Journal of Research and Development** 33(1): 49-59.
- Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B.B.K. and Fasihnikoutalab, M.H. 2015. Soil stabilization with alkali-activated agro-waste. **ICE Environmental Geotechnics** 2(6): 359-370.

Rakson, S., Chaturapitakkul, C., Chucheeepsakul, S.
and Chindaprasert, P. 2005. Use of palm
oil fuel ash in concrete. **Engineering
Research and development Journal**
16(2): 38-43. (in Thai)