กำลังของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลและสารละลายอัลคาไลน์

Strengths of marginal lateritic soil stabilized with biomass ash and alkaline solution

อัครพัชร์ อมรเวชรัตน์[1], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[2] และ วรวิทย์ โพธิ์จันทร์[3,*]

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

[2]รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

[3]อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จ.ขอนแก่น

**Corresponding author; E-mail address: Worawit.pho@neu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวลและสารละลายอัลคาไลน์ เถ้าชีวมวลเป็นผลพลอยได้จากโรงงานไฟฟ้า จ.สงขลา สารอัลคาไลน์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐานต่อเถ้าชีวมวลเท่ากับ 70:30 และปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15, และ 20 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวลและสารอัลคาไลน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดและกำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงสุดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวลและสารอัลคาไลน์มีค่าเท่ากับ 1,350 kPa และ 163 kPa ที่ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20

คำสำคัญ: ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน, เถ้าชีวมวล, สารอัลคาไลน์, กำลังอัดแกนเดียว, ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

Abstract

This research investigated the improvement of marginal lateritic soil stabilized by biomass ash and alkaline solution. Biomass ash was a by-product of a power plant in Songkhla province. The alkaline solution used in this study was sodium hydroxide (NaOH). The marginal lateritic soil/biomass ash ratio of 70:30 and NaOH contents of 0, 5, 10, 15, and 20% by optimum water content were used. Unconfined compressive strength (UCS) and indirect tensile strength (ITS) of specimens at a curing time of 7 days were evaluated. It was found that UCS and ITS of marginal lateritic soil stabilized by biomass ash and alkaline solution increased as NaOH content increased. The maximum UCS and ITS of marginal lateritic soil stabilized by biomass ash and alkaline solution were 1,350 and 163 kPa at NaOH contents of 20% by optimum water content.

Keywords: Marginal lateritic soil, Biomass ash, Alkaline solution, Unconfined compressive strength, Indirect tensile strength

1. บทนำ

ในช่วงที่ผ่านมาประเทศไทยมีโครงสร้างพื้นฐานทางถนนในความดูแลของกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท ทางพิเศษของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นระยะทาง 66,940 47,916 207,90 และ 352,157 กิโลเมตร ตามลำดับ [1] โครงสร้างพื้นฐานทางถนนประกอบไปด้วยผิวทาง ชั้นรองพื้นทาง และวัสดุจากดินเดิม วัสดุรองพื้นทางที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือดินลูกรังที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบทมีจำนวนลดน้อยลง ปัญหาการขาดแคลนดินลูกรังที่ผ่านมาตรฐาน ปัจจุบันกรมทางหลวง และทางหลวงชนบท มีการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังอัดของวัสดุที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เช่น ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน วิธีดังกล่าวเรียกว่า ‘’Soil Cement’’ อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาโลกร้อนตามมา [2-4]

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีเนื้อที่ปลูกยางพารามากเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศอินโดนีเซีย มีเกษตรปลูกยางพารารวมทั้งประเทศประมาณ 6 ล้านคน หรือประมาณร้อยละ 10 ของประชากรทั้งประเทศ (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2558) และนำมายางพารามาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ หรือนำไปแปรรูปใช้เป็นวัสดุในการทำเฟอร์นิเจอร์ เป็นผลทำให้เหลือเศษไม้ยางพาราเหล่านี้ ซึ่งนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบานการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และปัจจุบันยังนำไปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) ส่งผลให้มีเถ้าไม้ยางพาราหลังกระบวนการผลิตเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นปัญหาในการกำจัดทิ้งและใช้พื้นที่ในการกองเก็บ

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น มีส่วนประกอบ

ทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) มีองค์ประกอบของ SIO_3 และ Al_2O_3 เป็นหลัก ซึ่งจะทำหน้าที่ให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลาย Na_2SIO_3 หรือ KOH โดยจะให้ความร้อนเป็นตัวทำเร่งปฏิกิริยา ฉะนั้นจะสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวให้กำลังอัดได้ และความทนทานได้สูง [5-8]

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวลและสารอัลคาไลน์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง และเปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวกับมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (DH-S 206/2532) เพื่อประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือได้แนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้ง (เถ้าชีวมวล) สำหรับงานวัสดุรองพื้นทาง

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (Marginal Lateritic Soil, MLS)

ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เก็บได้จากบ่อยืม บ้านโป่งแดง อ.ขามทะเลสอ จ.นครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 1 MLS ประกอบด้วยทรายร้อยละ 75.11 และดินเหนียวร้อยละ 28.85 MLS มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.83 ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของ MLS เท่ากับร้อยละ 17 และ 5 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) มีค่าเท่ากับ 36 และ 0.44 ตามลำดับ ขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ของ MLS เท่ากับ 0.25 mm การกระจายขนาดคละของมวลดินลูกรังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งดินชนิดนี้จำแนกเป็น ดินทรายปนดินเหนียว (SC) โดยระบบ (Unified Soil Classification System, USCS) รูปที่ 4 จะพบว่ารูปร่างส่วนใหญ่ของดินลูกรังมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ทล.ม. 206/2532 [10] พบว่าดินลูกรังชนิดนี้ไม่ผ่านมาตรฐานเนื่องจาก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรัง และเถ้าชีวมวล

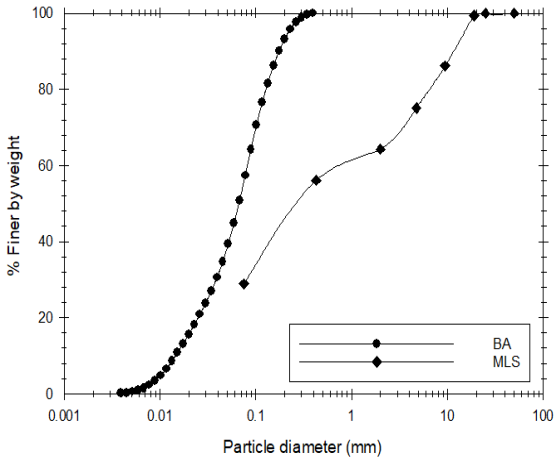
Chermical composition (%)	ดินลูกรัง (MLS)	เถ้าชีวมวล (BA)
MgO	N.D	3.80
SiO_2	76.39	41.6
Al_2O_3	15.87	9.31
Fe_2O_3	5.82	5.81
CaO	0.63	21.93
SO_3	0.074	5.40
K_2O	0.41	7.05
MnO_2	0.02	0.54
TiO_2	0.76	0.86
Ci	N.D	3.38

2.2 เถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA)

เถ้าชีวมวลได้จาก โรงงานไฟฟ้า จ.สงขลา ดังแสดงในรูปที่ 2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.3 ขนาดคละเฉลี่ย (D_{50}) ของ BA มีค่าเท่ากับ 66 ไมครอน มีองค์ประกอบทางเคมี BA แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 98.08 และปริมาณธาตุ CaO เท่ากับ 21.94

รูปที่ 1 ลักษณะของ MLS

รูปที่ 2 ลักษณะของ BA



รูปที่ 4 ขนาดคละของดินลูกรัง (MLS) และเถ้าชีวมวล (BA)

2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซดาไฟ เป็นของแข็งลักษณะผลึกสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 40.01 NaOH ถูกนำมาใช้เป็นสารยึดเกาะของดินเพื่อทำให้วัสดุมีความเสถียรภายใต้แรงอัดที่เรียกว่า “One-part” [9] ซึ่งจะนำมาใช้เป็นแบบเกร็ดผสมแห้ง

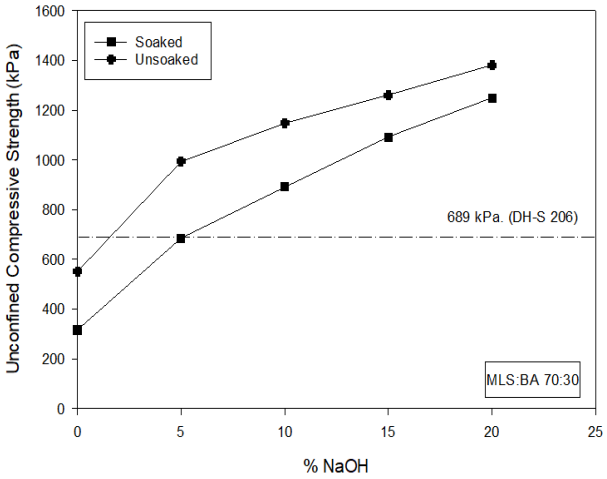
รูปที่ 3 ลักษณะของ NaOH

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (MLS) มาผสมกับเถ้าชีวมวล (BA) ในอัตราส่วนผสม MLS:BA เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนักแล้วนำมาผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ คือสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 0, 5, 10, 15, และ 20 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม หลังจากผสมดินลูกรัง, เถ้าชีวมวล และสารละลายอัลคาไลน์เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) [10] โดยจะเพิ่มปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ตามลำดับ อัตราส่วนผสม 70:30 ที่ปริมาณความชื้น 1.00WC (OWC คือปริมาณความชื้นที่เหมาะสม) จะถูกนำมาเตรียมตัวอย่างทดสอบหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด ในโมลขนาด 4 นิ้ว ตัวอย่างการทดสอบจะถูกนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิ (ประมาณ 28 °C) ในห้องปฏิบัติการ จนได้อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งจะทำการทดสอบแบบ ไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และทดสอบแบบ แช่น้ำ (Soaked) โดยนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ตามมาตรฐาน ASTM D1633 และ ตามมาตรฐาน AASHTO T166 [11-12]

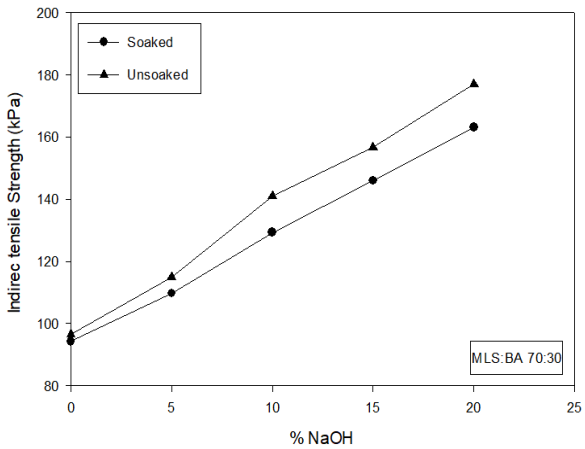
3. ผลการทดสอบ

รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดแกนเดียว ที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน และเถ้าชีวมวล ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.0OWC และที่ปริมาณสายละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละที่ 0, 5, 10, 15, และ 20 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงของกำลังอัดแบบไม่แช่น้ำมีกำลังที่ 316, 684, 892, 1091, และ 1,350 kPa ตามลำดับ และแบบแช่น้ำมีกำลังที่ 551, 994, 1,147, 1,260, และ 1,380 kPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังอัดแกนเดียวระหว่างตัวอย่างดินที่แช่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ และตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินที่แช่น้ำลดลง ที่เป็นเช่นนี้เกิดจากน้ำบางส่วนซึมเข้าไปภายในตัวอย่างดิน โดยเข้าไปทำลายโครงสร้างระหว่างเม็ดดิน จึงทำให้กำลังอัดลดลง [14] เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) ของกรมทางหลวงซึ่งกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 689 kPa [11] พบว่าอัตราส่วนผสมของวัสดุดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลที่ปริมาณสารละลายร้อยละ 10, 15, และ 20 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์



รูปที่ 6 กำลังอัดแกนเดียว (UCS) ที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวล และปริมาณสายละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 7 แสดงกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) ที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน และเถ้าชีวมวล ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.0OWC และที่ปริมาณสายละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15, และ 20 ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีกำลังแรงดึงทางอ้อมแบบไม่แช่น้ำมีกำลังที่ 96, 114, 140, 156, และ 176 kPa ตามลำดับ และผลทดสอบแบบแช่น้ำมีกำลังที่ 94, 109, 129, 145, และ 163 kPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ระหว่างตัวอย่างดินที่แช่เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ และตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำพบว่าค่าตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะแช่น้ำ จะมีกำลังค่าความต้านทานแรงดึงได้น้อยกว่าตัวอย่างในสภาพแห้ง ซึ่งเกิดจากน้ำมีส่วนซึมเข้าไปภายในตัวอย่างดิน ซึ่งเกิดการบวม และทำลายกำลังยึดหน่วงระหว่างเม็ดดิน จึงส่งผลให้กำลังต้านทานลดลง [16]



รูปที่ 7 กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) ที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยเถ้าชีวมวล และปริมาณสายละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลและสารละลายอัลคาไลน์ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เถ้าชีวมวลและสารละลายโซเดียมไอดรอกไซด์สามารถปรับปรุงดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน
2. กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลและสารละลายอัลคาไลน์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถชะซิลิก้า และอลูมิน่าจากเถ้าชีวมวล เพื่อทำปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังเพิ่มขึ้น
3. อัตราส่วนผสมของวัสดุดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลที่ปริมาณสารละลายร้อยละ 10, 15, และ 20 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subase)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับทุนสนับสนุน เครื่องมือการทดสอบ และสิ่งอำนวยความ สะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) กระทรวงคมนาคม 29 กรกฎาคม 2557

[2] Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, Samingthing W, Chinkulkijniwat A, Rachan R, Arulrajah A. Durability against wet-dry cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015;94: 807-816

[3] Suksiripattanapong c, Horpibulsuk ร, Boongrasan ร. Udomchai A, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge-fly ash lightweight cellular geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2015; 58: 254-257.

[4] Suksiripattanapong c, Horpibulsuk s, Chanprasert p. Sukmak p, Arulrajah A. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonsy units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials.* 2015; 82: 20-30.

[5] เชาวรินทร์ เขียรพิมาย, เสริมศักดิ์ ติยะแสงทอง, เชิดศักดิ์ สุขคิริพัฒนพงศ์, วิศิษฏ์ศักดิ์ ทับยัง, นันทชัย ชูศิลป์, จุฑามาศ ลักษณะกิจ. อิทธิพลของเถ้าขยะต่อกำลังอัดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานผสมปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า GTE25-1 – GTE25-4

[6] Suksiripattanapong c, Srijumpa s, Horpibulsuk ร, Sukmak p, Arulrajah A, Du JY. Compressive strength of water treatment sludge-fly ash geopolymer at various compression energies. *Lowland Technology International Journal.* 2015; 17(2).

[7] Sukmak p, Horpibulsuk , Shen SL. strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2013; 40: 566-574

[8] Sukmak p, Horpibulsuk S, Shen SL, Chindaprasirt p, Suksiri pattanpong c. Factors influencing strength development in day-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2013; 47: 1125-1135.

[9] โซเดียมไฮดรอกไฮดรอกไซด์(NaOH) https://ihealz.com/sodiumhydroxide/

[10] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ (2556). การทดลองที่ ทล. –ท. 108/2517 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test). กรมทางหลวง.

[11] กรมทางหลวง, มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil cement subbase), มาตรฐานที่ ทล.-ม. 206/2532

[12] ดร.ชยธันว์ พรหมศร, เศกชัย อนุเวชศิริเกรียรติ, พรชัย ศิลารมย์, วรภัทร เกตุนุติ. คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength). รายงานฉบับที่ วพ. 204 สำนักงานวิจัยและพัฒนางานทาง. หน้า 15 – 17

[13] Jun Wu, Yifan Min, Bo Li, Xiyao Zheng. Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading 971-988

[14] ภักดี บัวจัน, พิพัฒน์ ทองฉิม, ดนุพล ต้นนโยภาส. วิธีการใหม่ปรับปรุงดินทรายแป้งด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าปาล์มน้ำมัน 47-58

[15] ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีกำลังแรงดึงทางอ้อมแบบไม่แช่น้ำมีกำลังที่ 96.57, 114.87, 140.98, 156.65, และ 176.98 ตามลำดับ และผลทดสอบแบบแช่น้ำมีกำลังที่ 94.24, 109.74 129.37, 145.98, และ 163.14 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบ ITS ต่ำกว่าการทดสอบ UCS อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีความต้านทานการแตกการแตกร้าวน้อยกว่า [16]

[16] อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์, ศุภสิทธิ์ ศิริศักดิ์, โชติ สรณาคมน์. การศึกษาออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามระบบซูเปอร์ในประเทศไทย. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 6 ฉบับที่ 1. หน้า 134-156