สมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

Engineering properties of cement treated lateritic soil reinforced with steel fibers from automotive tires

ขวัญจิรา หมั่นบำรุงศาสน์[1] พานิช วุฒิพฤกษ์[2] อิทธิพล มีผล[3] ศิริพัฒน์ มณีแก้ว[4,*]

[1] นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

[2,3,4] อาจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: khwanchira_m@rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ดินลูกรังมีความหนาแน่นเหมาะสำหรับนำมาบดอัดในงานถนน แต่มีคุณสมบัติไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความชื้นและสภาวะแวดล้อม ทำให้บางครั้งดินลูกรังที่นำมาใช้มีคุณภาพไม่เพียงพอสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุในงานชั้นทาง เนื่องจากไม่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมพื้นฐานของดินลูกรังโดยผสมกับซีเมนต์และเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ใช้แล้ว ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับดินลูกรังที่ควบคุมความหนาแน่นและปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างทั้งแบบไม่ต้องแช่น้ำและแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบสูงกว่าเกณฑ์กำหนด จากนั้นนำเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ใช้แล้วมาผสมในดิน 1% 2% 3% 4% และ 5% ต่อน้ำหนักดินแห้ง เปอร์เซ็นต์เส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ใช้แล้วที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเสริมกำลังคือร้อยละ 3 โดยนำมาทดสอบแรงดึงแบบแยกส่วนซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 4.90 กก./ตร.ซม. จากการทดสอบการดัดงอของคานที่เสริมด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ใช้แล้วได้เพิ่มความต้านทานแรงดึงของดินลูกรังซีเมนต์โดยมีค่าความต้านทานการดัดเพิ่มขึ้น 70%

คำสำคัญ: ดินลูกรัง, ดินซีเมนต์ลูกรัง, การปรับปรุงคุณภาพดิน, เส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

Abstract

The lateritic soil has the proper density for soil compaction in highway construction. However, the soil properties vary based on water content and environmental conditions. Thus, some lateritic soils cannot be used as a material for pavement because its properties does not meet the standards of the Department of Highways. This research aims to study the basic engineering properties of laterite soils by mixing them with cement and reinforcing them with steel fibers from used tires. The optimum amount of cement was determined for laterite soils with controlled density and optimum water content for 28 days of curing. The unconfined compressive strength of samples with a cement content of 3% without water immersion and water immersion for 2 hours before testing exhibited a strength higher than the criteria. Then, steel fibers from used tires were mixed in 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% per dry weight of soil. The optimum percentage for reinforcing steel fibers from used tires was 3%. The split tensile strength test was conducted, and the maximum tensile strength of 4.90 kg/cm^2 was obtained. The flexural test of beams reinforced with steel fibers from used tires enhanced the tensile strength of lateritic cement soil with a significant increase in flexural strength of 70%.

Keywords: lateritic soil, cement lateritic soil, soil improvement, fibers from automotive tires

1. บทนำ

ถนนเป็นเส้นทางการเดินทางคมนาคม การขนส่งจากเมืองหลวงไปยังชนบทที่ห่างไกล เพื่อให้การเดินทางมีความสะดวกสบายและรวดเร็วจึงมีการก่อสร้างถนนเส้นใหม่เพิ่มขึ้น และยังมีการซ่อมบำรุงถนนหรือขยายพื้นที่ช่องจราจรอยู่เป็นประจำ ส่งผลให้มีความต้องการใช้หินคลุกเป็นวัสดุใช้ทำพื้นทางมากขึ้น แต่ในปัจจุบันหินคลุกมีจำนวนลดน้อยลงไม่เพียงพอต่อความต้องการ และมีราคาเพิ่มสูงขึ้น ต้องมีการขนส่งวัสดุมาจากพื้นที่ห่างไกลจากบริเวณก่อสร้างถนน ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งเวลาและราคาค่าก่อสร้าง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีการหาวัสดุใหม่ที่หาง่ายในบริเวณก่อสร้างถนนที่ราคาถูก และมีปริมาณมาก เช่น ดินลูกรังมาใช้แทนหินคลุก

ดินลูกรังมีปริมาณมากกระจายอยู่ทุกพื้นที่ในประเทศไทยเป็นดินที่สามารถนำมาบดอัดได้ดี หลังจากบดอัดดินจะมีความแน่นเหมาะสำหรับงานทำถนน แต่มีคุณสมบัติไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความชื้นและสภาวะแวดล้อม ทำให้บางครั้งดินลูกรังที่นำมาใช้ในงานถนนไม่มี

คุณภาพเพียงพอและไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในงานชั้นทาง เนื่องจากไม่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยการผสมซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ เพื่อให้ดินมีคุณภาพเหมาะสมในงานชั้นทาง

2. วัสดุที่ใช้และวิธีดำเนินงาน

2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้วัสดุหลักประกอบด้วย ดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

2.1.1 ดินลูกรัง

ดินลูกรัง เกิดจากการผุกร่อนทางเคมีซึ่งทำให้หินต้นกำเนิดเกิดการกัดกร่อนผุพังกลายเป็นดิน และมีแร่ Laterite Constituents (Fe, Al, Ti, Mn) สะสมอยู่ ดินลูกรังพบเจอได้ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ส่วนใหญ่มีสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กสะสมอยู่ ดินลูกรังอาจเป็นดินชนิดผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil) ซึ่งจะเกิดอยู่บนหินต้นกำเนิด แบ่งเป็นชั้น ๆ อย่างเห็นได้ชัด หรือดินที่ผุพังแล้วถูกพัดพา (Transported Soil) ซึ่งจะไปทับถมในพื้นที่ที่ห่างจากหินต้นกำเนิด [1-5] ในทางวิศวกรรมสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุงานทางได้ เมื่อดินลูกรังมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทาง

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย ใช้ในงานก่อสร้างเพื่อทำคอนกรีต หรือใช้ทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ งานคอนกรีตโดยทั่วไปที่มักใช้ อาทิ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, พื้นอาคาร, ถนน, สะพาน, ถังกักเก็บน้ำ, อ่างเก็บน้ำ, ท่อน้ำ, และผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ ยังเหมาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง อาทิ สะพานขนาดใหญ่, สนามกีฬา, และอาคารสูง เป็นต้น [6]

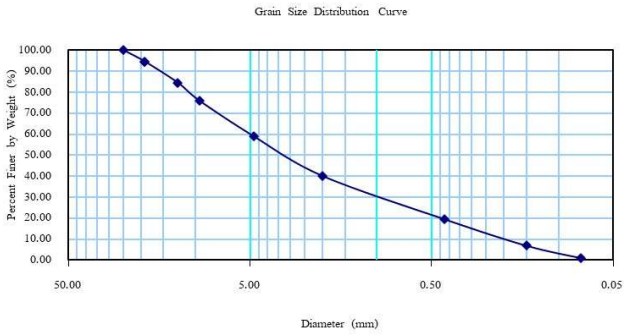
2.1.3 เส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

เส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นวัสดุเหลือใช้จากยางรถยนต์ของเสียประเภทหนึ่งที่สามารถหาได้ทั่วไป ปัจจุบันรถยนต์กลายเป็นปัจจัยที่จำเป็นและมีปริมาณการใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งผลที่ตามมาก็คือยางรถยนต์เก่าที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย [7-8] ขนาดและรูปร่างของเส้นใยเหล็กมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของยาง ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

2.2 การทดสอบหาขนาดคละของดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้เป็นดินบ่อธรรมชาติจากจังหวัดสระบุรี นำมาทดสอบ sieve analysis เพื่อหาขนาดคละของเม็ดดิน ซึ่งจากผลการทดสอบเมื่อนำดินไปจำแนกในระบบ AASHTO classification System [9] พบว่าดินนั้นเป็นดินชนิด A-2-4 Silty or Clayey Gravel Sand วิเคราะห์จำแนกดินมา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบหาขนาดคละของดินลูกรัง

2.3 ผลการทดสอบทางด้านกายภาพ

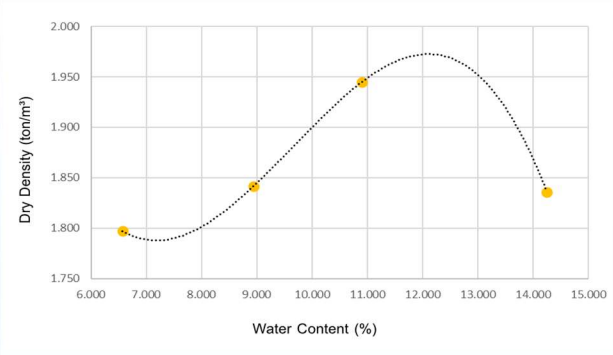
ดินลูกรังมีค่าขีดจำกัดเหลว 33.00 % ขีดจำกัดพลาสติก 22.78 % ดัชนีพลาสติก 10.22 % และค่าขีดจำกัดหดตัว 12.33 % ซึ่งมีลักษณะดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลทดสอบทางกายภาพ

ทดสอบทางด้านกายภาพ	ดินลูกรัง
Liquid Limit	33.00 %
Plastic Limit	22.78 %
Plasticity Index	10.22 %
Shrinkage Limit	12.33 %
Specific Gravity	2.62 %
passing sieve No. 200	22.28 %
maximum dry density	1.954 ton/m^3
OMC	12 %

2.4 การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction Test)

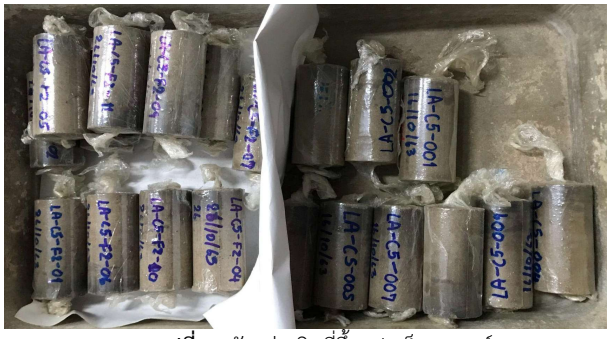
ในการขึ้นรูปตัวอย่างจำเป็นต้องอาศัยความหนาแน่นของตัวอย่างดินและปริมาณน้ำที่เหมาะสมและพลังงานในการบดอัดดินการบดอัดดินในงานครั้งนี้ใช้พลังงานในการบดอัดดินแบบมาตรฐาน ASTM D 698 [10] และจากการนำดินลูกรังมาทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำ 12 % เหมาะสมสำหรับการบดอัดดินที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.954 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้ง

2.5 การขึ้นรูปตัวอย่าง

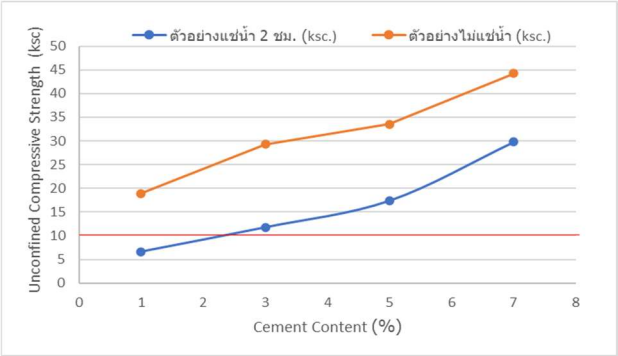
เมื่อทราบปริมาณความชื้นและความหนาแน่นที่เหมาะสมแล้วทางผู้วิจัยได้นำมาคำนวณน้ำหนักดินเพื่อขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ การขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบเพื่อหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจะใช้แม่แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร เนื่องจากแบบหล่อมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ซึ่งมีขนาดโตสุดไม่เกิน 0.425 มิลลิเมตร มาขึ้นตัวอย่างเป็นแท่งทดสอบ



รูปที่ 4 ตัวอย่างดินที่ขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์

2.6 การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยซีเมนต์

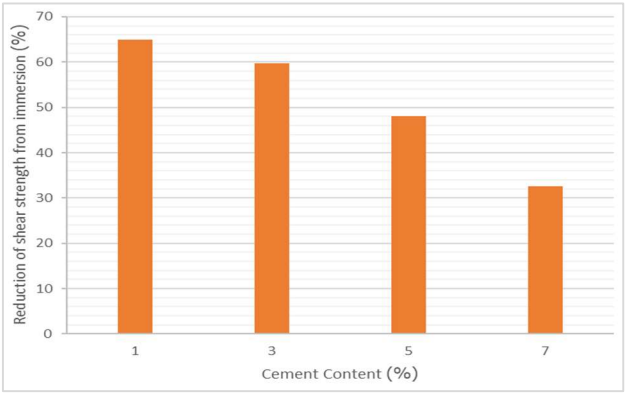
งานวิจัยครั้งนี้ได้นำปูนซีเมนต์มาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง เพื่อให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่ใช้ในงานดินซีเมนต์จึงได้ทำการผสมปูนซีเมนต์กับดินลูกรังในอัตราส่วนผสม 1% 3% 5% และ 7% เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินซีเมนต์ (Unconfined Compressive Strength) มาตรฐาน ASTM D2166-98 [11] ทำการทดสอบเปรียบเทียบทั้งแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ เพื่อดูกำลังที่ลดลงหากเมื่อมีการอิ่มตัวด้วยน้ำ ทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด จากการทดสอบพบว่า ปูนซีเมนต์ 3% ก็เพียงพอต่อการใช้งานทั่วไปของงานดินซีเมนต์ที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การรับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินที่ผสมซีเมนต์แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

2.7 การลดลงของกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดเมื่อแช่น้ำ 2 ชั่วโมง

ในสภาพความเป็นจริงในงานก่อสร้างงานถนน งานคันกั้นน้ำ งานโครงสร้างอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ดินเป็นโครงสร้างรับกำลัง แต่ทว่าดินนั้นเมื่อมีปริมาณความชื้นที่สูงอาจจะส่งผลให้การรับกำลังลดลง ในการออกแบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงกำลังที่ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะเปียก ผู้วิจัยจึงได้มีการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่แช่น้ำและไม่แช่น้ำพบว่า เมื่อทำการแช่น้ำ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งให้ผิวแห้งพบว่าการรับกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินลดลงในปริมาณปูนซีเมนต์ 1% นั้นมีการลดลงของกำลังรับอัดแบบไม่จำกัดถึง 67.4% ปริมาณปูนซีเมนต์ 3% ลดลง 51.9% ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ลดลง 40.2% และ ปริมาณปูนซีเมนต์ 7% ลดลง 35% ดังรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่าการทดสอบแบบแช่น้ำนั้นจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการนำมาพิจารณากำลังของดินซีเมนต์



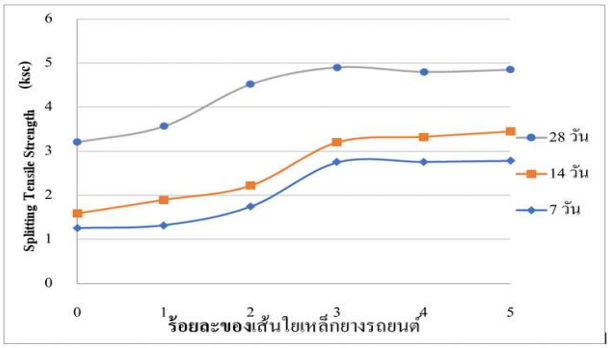
รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงการลดลงของกำลังของดินซีเมนต์เมื่อผ่านการแช่น้ำ 2 ชั่วโมง

รูปที่ 7 การทดสอบกำลังรังแรงอัดแบบไม่จำกัด

2.8 การเสริมกำลังรับแรงดึงดินซีเมนต์ลูกรังด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์

การบดดินถนนส่วนหนึ่งจะเกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงดึงในแนวราบ (Horizontal strain) ที่เกิดขึ้นแต่ดินโดยทั่วไปสามารถรับกำลังแรงดึงต่ำมากจนถึงไม่สามารถรับกำลังแรงดึงได้เลย และหากต้องนำไปใช้ในโครงสร้างที่มีการรับกำลังแรงดึงมาเกี่ยวข้องนั้นจึงเป็นสิ่งที่ยากหากนำไปใช้แล้วอาจจะเกิดการแตกร้าวได้ง่าย และหากจะนำคอนกรีตเสริมเหล็กไปใช้ก็ไม่เกิดความคุ้มค่าเพราะไม่ต้องการแรงดึงสูงสำหรับงานดิน

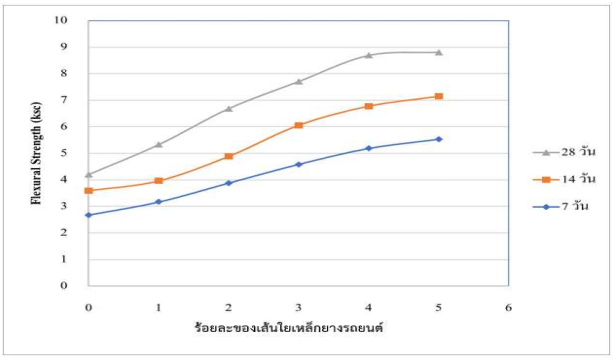
ในปัจจุบันเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์นั้นถือว่าเป็นขยะที่กำจัดได้ยากและไม่สามารถนำไปใช้ต่อได้เพราะว่ามีการปนเปื้อนของยางสูงถ้าจะนำไปใช้จะต้องผ่านกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการ ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์มาทำการเสริมกำลังให้ดินลูกรัง โดยเส้นใยเหล็กในยางรถยนต์นั้นมีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นขยะมีรูปทรงหงิกงอ และยังมีเศษยางหุ้มอยู่บ้าง ทางผู้วิจัยจึงได้นำมาผสมกับดินลูกรัง เพื่อเสริมกำลังการรับแรงดึงของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ทางผู้วิจัยขอเรียกว่า ดินซีเมนต์ลูกรัง ซึ่งได้ทำการทดสอบการรับกำลังแรงดึงแบบแยก (Splitting Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [12] และได้ผสมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ในปริมาณ 1% 2% 3% 4% และ 5% ต่อน้ำหนักของตัวอย่างดิน บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน พบว่าเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์นั้นสามารถเพิ่มกำลังการรับแรงดึงของตัวอย่างดินซีเมนต์ลูกรังได้เป็นอย่างดี เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมสำหรับการเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์คือ 3% ในปริมาณปูนซีเมนต์ที่เลือกมาแล้ว 3% เช่นเดียวกัน



รูปที่ 8 กำลังรับแรงดึงแบบแยกของดินซีเมนต์ลูกรังเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กยางรถยนต์

รูปที่ 9 การทดสอบการรับกำลังแรงดึงแบบแยก

และต่อมาทางผู้วิจัยได้นำไปขึ้นตัวอย่างคาน เพื่อนำไปทดสอบแรงดัดของคาน (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C 1609 โดยมีการผสมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ลงไปในอัตราส่วน 1% 2% 3% 4% และ 5% โดยน้ำหนัก บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน ซึ่งก็พบเช่นเดียวกับผลข้างต้นว่าเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์มีผลสามารถพัฒนารับกำลังแรงดึงของดินซีเมนต์ลูกรังได้ โดยมีค่าความต้านทานการดัดเพิ่มขึ้น 70%



รูปที่ 10 ทดสอบแรงดัดของคาน (Flexural Strength)

รูปที่ 11 การทดสอบการรับกำลังแรงดัดของคาน

ผลการทดสอบแรงดัดของคานดินซีเมนต์ลูกรังที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ จากรูปที่ 12 พบว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 0% วัดความยาวรอยร้าวได้ 8 ซม. ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 1% วัดความยาวรอยร้าวได้ 7 ซม. ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 2% วัดความยาวรอยร้าวได้ 6.5 ซม. ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 3% วัดความยาวรอยร้าวได้ 6 ซม. ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 4% วัดความยาวรอยร้าวได้ 4.5 ซม. และตัวอย่างที่ผสมเส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 5% วัดความยาวรอยร้าวได้ 4 ซม. จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความยาวของรอยร้าว

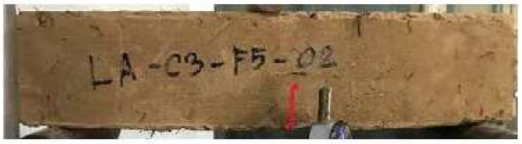
เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 0% ความยาวรอยร้าว 8 ซม.

เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 1% ความยาวรอยร้าว 7 ซม.

เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 2% ความยาวรอยร้าว 6.5 ซม.

เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 3% ความยาวรอยร้าว 6 ซม.

เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 4% ความยาวรอยร้าว 4.5 ซม.



เส้นใยเหล็กยางรถยนต์ 5% ความยาวรอยร้าว 4 ซม.

รูปที่ 12 ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างดินซีเมนต์ลูกรังจะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดมีค่ามากขึ้น โดยมีปริมาณเหมาะที่สุด 3%
2. ปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ที่เหมาะสมคือ 3% สำหรับกำลังรับแรงดึงแบบแยกของดินซีเมนต์ลูกรัง
3. ปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดของคานเพิ่มขึ้น
4. ปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความยาวของรอยร้าวลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยและอาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ขอบคุณอาจารย์สาขาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] สุภาพร แจ่มเจริญ. (2533). ดินลูกรัง. วิศวกรรมสาร มก. 9. 25-32.
[2] Ghafoori, N. and Bucholc, J. (1997). Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete.ACI Materials Journal, 94(2). 90-101.

[3] Onprom, P., Chaimoon, K., and Cheerarot, R. (2015). Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam

[4] Contents. Advances in Materials Science and Engineering. 2015.381704.

[5] Cheriaf, M., Roch, J. C. and Pera, J. (1999). Pozzolanic Properties of Pulverized Coal

[6] อุมาพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล และประทีป ดวงเดือน. (2553). การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15.

[7] Combustion Bottom Ash, Cement and Concrete Research. 28(9). 1387-1391.ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2537) คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology), คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

[8] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา ปรีดา จันทวงษ์ และ โยธิน อึ่งกูล (2554). การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 หน้า 266 – 271

[9] วงกต วงศ์อภัย (2550). มูลค่าเพิ่มของยางรถยนต์เก่า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[10] AASHTO (2017). Standard Specification for Transportation Materials and Method of Sampling and Test Twenty-Eighth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.

[11] ASTM D 698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil.

[12] ASTM (1994) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil - D2166-98. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6 pp

[13] ASTM Standard C496, 2002 ASTM Standard C496Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A (2002)

[14] ASTM C 1609 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standards (2005)

[15] ไพวรรณ์ เขียวอ่อน, กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสารผสมเพิ่ม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.