กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength of Crushed Rock-Cement Waste Improved with Hydraulic Cement

ปัญญา สุวรรณกลาง[1,*] สุภัณกฤษ ชาชำนาญ[2] และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
[2] กรมทางหลวง 2/486 ถนนศรีอยุธยา แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: panya.su@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้ปริมาณวัสดุประสานร้อยละ 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง ทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7,14 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่าตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 3 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซึ่งให้ค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง

คำสำคัญ: ชั้นพื้นทาง, ขยะหินคลุกผสมซีเมนต์, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

Abstract

This research investigated the unconfined compressive strength and indirect tensile strength of crushed rock-cement waste improved with Portland cement type I (PC) and hydraulic cement (HC). Binder contents of 1, 3, and 5% by weight of dry soil were used. Unconfined compressive strength (UCS) and indirect tensile strength (ITS) of samples at a curing time of 7 days were evaluated. The test results showed that the UCS and ITS of crushed rock-cement waste improved with PC and HC increasing with binder content. The UCS and ITS of crushed rock-cement waste improved with PC were higher than those of samples with HC. The optimum cement content was 3% for PC and HC, which gave UCS samples that met strength requirements.

Keywords: Base course, Crushed rock-cement waste, Portland cement type I, Hydraulic cement

1. คำนำ

ในปัจจุบันมีการก่อสร้างถนนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีโครงข่ายการคมนาคมที่มีประสิทธิภาพและรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยเหมาะสำหรับการขนส่งทางบก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การขนส่งทางรถยนต์และการขนส่งทางรถไฟ การขนส่งทางรถยนต์จะใช้ถนนเป็นหลัก ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ โครงสร้างชั้นทาง (Pavement Structure) แบ่งออกเป็น 4 ชั้น คือ ชั้นดินเดิม (Subgrade Course), ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course), ชั้นพื้นทาง (Base Course) และชั้นผิวทาง (Surface Course) วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ผ่านมาตรฐาน

ในขณะที่ทรัพยากรทางธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ลดน้อยลงไปมาก ส่งผลให้ในปัจจุบันวัสดุก่อสร้างงานทางมีราคาสูงขึ้น การซ่อมแซมถนน ขยายถนน หรือสร้างใหม่จักต้องดำเนินการต่อไป ในปัจจุบันบางพื้นที่ของประเทศ วัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ใช้ในการก่อสร้างถนนมีจำกัด อีกทั้งพลังงานเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น การขนส่งทางรถบรรทุกส่งผลกระทบทางการจราจรและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการขนส่งส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างถนน สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ และงบประมาณของประเทศ ดังนั้นการก่อสร้างถนนใหม่และการซ่อมแซมถนนโดยที่สามารถนำวัสดุด้อยคุณภาพที่มีอยู่เดิมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวง จะเป็นการประหยัดทรัพยากรทางธรรมชาติที่เหลืออยู่น้อย ลดการใช้พลังงาน ลดปริมาณการจราจร และลดผลกระทบ

ทางสิ่งแวดล้อม ทางกรมทางหลวงจึงเริ่มมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชั้นพื้นทางให้ดีขึ้นโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้เช่นเดิมและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความเหมาะสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง (ทล.-ม.) [1]

ปัจจุบันขยะหินคลุกผสมซีเมนต์จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการปรับระดับถนนในกระบวนการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทางซึ่งมีปริมาณประมาณร้อยละ 15 ของปริมาณวัสดุชั้นพื้นทาง จากปัญหาการขาดแคลนวัสดุหินคลุกและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุชั้นพื้นทางจากแหล่งอื่นโดยใช่เหตุ การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำขยะหินคลุกผสมซีเมนต์กลับมาใช้งานได้เช่นเดิมและช่วยประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง นอกจากนี้การนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ตามมาตรฐานงานทาง กรมทางหลวงมีการจำกัดและควบคุมปริมาณส่วนผ่านตะแกรง ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางในลักษณะวัสดุหมุนเวียนเดิม ทำให้ต้องใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จึงเพิ่มโอกาสเกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Crack) ได้ [2] ปริมาณและประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพมีผลอย่างมากต่อการพัฒนาคุณสมบัติของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ โดยหลักทั่วไปแล้วปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกัน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมผสมซีเมนต์ดีขึ้นด้วย [3] และส่วนผสมของวัสดุหมุนเวียนหรือขยะหินคลุกยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุก่อนปรับปรุงคุณภาพ [4] เพื่อให้เหมาะสมตามชนิดของวัสดุสร้างทาง

การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยการผสมด้วยซีเมนต์เพื่อให้สารเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำเป็นตัวประสานมวลรวมละเอียดให้กลายเป็นมวลรวมที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและมีความคงทนเพียงพอในการนำมาใช้บดอัดเพื่อก่อสร้างเป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางของถนน [8-9] โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมในงาน Soil-Cement กรมทางหลวงมักจะใช้การทดสอบแบบ Unconfined Compression Test [6] ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง (ทล.-ท.) ของกรมทางหลวง [10] และคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุสามารถประมาณค่าได้จากการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุ [7][11] การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจึงเป็นตัวเลือกในการใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากจะช่วยลดมลพิษจากการผลิตปูนซีเมนต์และนอกจากนี้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีคุณสมบัติทนต่อการขัดสี ลดโอกาสการเกิดปัญหาผิวเป็นฝุ่น และลดการหลุดล่อนได้ดีกว่าปูนโครงสร้างทั่วไป ลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตพื้นผิวมีความพรุนน้อย [5]

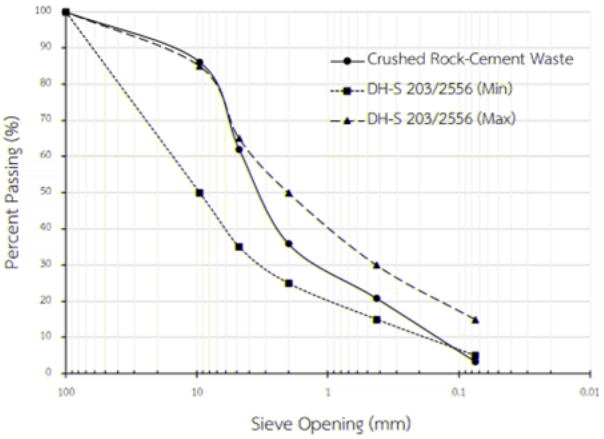
งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมกำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์-ไฮดรอลิก และศึกษาแนวโน้มการพัฒนาทางด้านกำลังของวัสดุที่เกิดจากวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์และน้ำ ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยจะได้มีการนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติวัสดุและเกณฑ์มาตรฐานงานทาง (ทล.-ม.) ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย และมีการเสนอแนะแนวทางการใช้วัสดุทดแทนสำหรับงานทาง

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

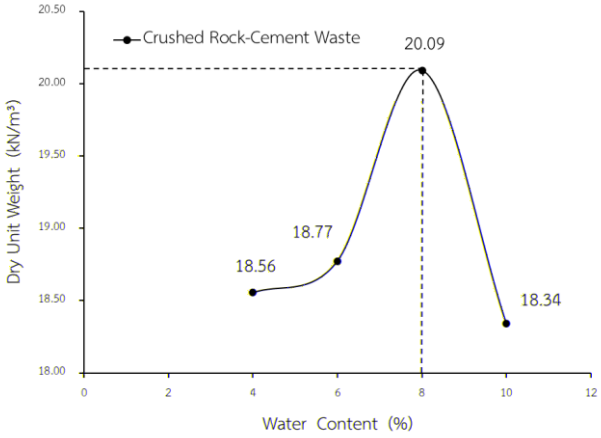
ขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ (Crushed Rock-Cement Waste, CRCW) ได้จากการปรับระดับถนน โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 207 สาย บ.วัด – อ.ประทาย จ.นครราชสีมา ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 CRCW มีค่าความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.71 ค่าขีดจำกัดเหลวและพลาสติกมีค่าเท่ากับ NP ความสึกหรอของ CRCW มีค่าเท่ากับ 1.84 รูปที่ 2 แสดงกราฟการกระจายตัวของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ พบว่าขยะหินคลุกผสมซีเมนต์สามารถจำแนกเป็นดินทรายขนาดคละกันดี (SW) ตามระบบเอกภาพ Unified Soil Classification System (USCS) [14] รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น โดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของขยะหินคลุกมีค่าท่ากับ 20.09 kN/m³ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimal Moisture Content, OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 8



รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์



รูปที่ 3 กราฟการบดอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ (HC) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.94 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC)

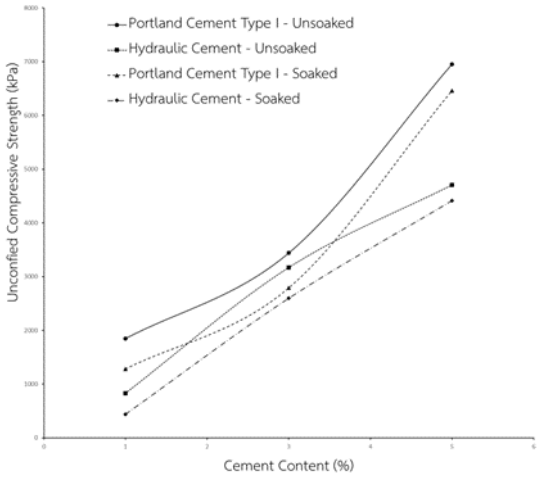
Chemical Composition	PC (%)	HC (%)
แคลเซียมออกไซด์, CaO	61.61	58.55
ซิลิกา, SiO_2	22.30	25.38
อลูมินา, Al_2O_3	4.23	4.68
เฟอร์ริกออกไซด์, Fe_2O_3	3.69	3.66
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	2.21	2.38
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์, SO_3	4.62	4.00
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.19	N.D.
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	0.39	0.34
ไททาเนียม ไดออกไซด์, TiO_2	0.25	0.31
Loss of Ignition	1.45	1.47

N.D. = Non Detective

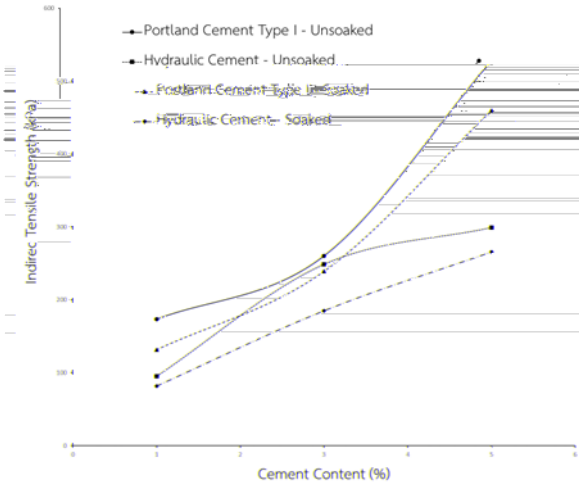
การเตรียมตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) เพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) [12] ตามมาตรฐาน ASTM D5102 และทดสอบกำลังแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) [13] ตามมาตรฐาน ASTM D6931 โดยนำตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ไปอบให้แห้ง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว โดยใช้ตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ปริมาณตามการทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากนั้นเตรียมวัสดุประสาน (PC และ HC) เพื่อทำการผสมในอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 1,3 และ 5 ของน้ำหนักขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ แล้วทำการผสมให้เข้ากันในภาชนะที่เตรียมไว้เมื่อผสมเข้ากันแล้วให้เติมน้ำที่ปริมาณร้อยละ 8 (OMC) (ได้จากการทดลองการทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ผสมวัสดุหมดให้เข้ากันเมื่อผสมเข้ากันแล้ว จากนั้นทำการบดอัดตัวอย่างด้วยแบบหล่อตัวอย่างการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว ตักตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ผสมไว้ใส่แบบหล่อตัวอย่างที่ประกอบไว้โดยประมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆ กัน โดยมีจำนวน 5 ชั้น ใช้ค้อนหนัก 10 ปอนด์ บดอัดตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ในแบบหล่อตัวอย่างแต่ละชั้นให้ทั่วทั้งแบบหล่อตัวอย่างโดยทำการบดอัดชั้นละ 25 ครั้งและควรให้โมลวางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบ เมื่อบดอัดครบจำนวนชั้นแล้วถอดปลอกสวมของแบบหล่อตัวอย่างออกใช้บรรทัดเหล็กปาดส่วนที่สูงเกินปากแบบหล่อตัวอย่างออกและอุดแต่งผิวให้เรียบเสมอปากแบบหล่อตัวอย่าง ดันแท่งตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ออกจากแบบหล่อตัวอย่าง แล้วนำไปบ่มด้วยการห่อหุ้มด้วยถุงพลาสติกเพื่อกันความชื้นเกิดการระเหยออกจากแท่งตัวอย่าง โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำแท่งตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อม การทดสอบจะทดสอบทั้งสภาวะแช่น้ำ (Soaked) และไม่แช่น้ำ (Unsoaked) โดยสภาวะแช่น้ำ (Soaked) จะต้องนำแท่งตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จค่าที่ได้จะต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง ที่กำหนดกำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 2,413 kPa [15]

3. ผลการทดสอบ

ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และทดสอบกำลังแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีค่ากำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุประสาน (PC และ HC) ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 6 และ 7 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่ากำลังแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากปริมาณวัสดุประสาน (PC และ HC) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ดีขึ้น [16] แนวโน้มของการพัฒนากำลังของค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่ากำลังแรงดึงทางอ้อมจะแปรผันตรงกับปริมาณวัสดุประสาน (PC และ HC) และอายุการบ่ม ปริมาณวัสดุประสาน (PC และ HC) ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์และแนวโน้มการพัฒนากำลังอยู่ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน และความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่ากำลังแรงดึงทางอ้อมทั้งสภาวะแช่น้ำ (Soaked) และไม่แช่น้ำ (Unsoaked) มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น



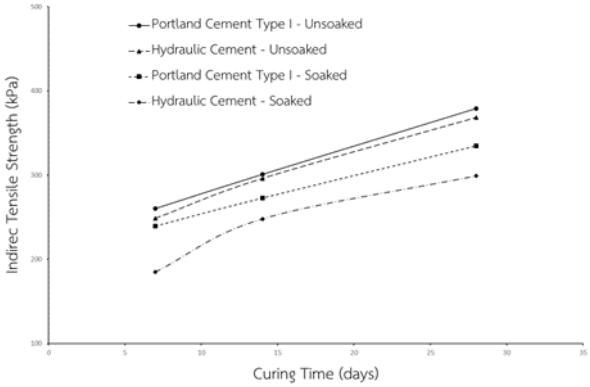
รูปที่ 4 กราฟกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในอัตราส่วนวัสดุประสานร้อยละ 1,3 และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 5 กราฟกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในอัตราส่วนวัสดุประสานร้อยละ 1,3 และ 5 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 6 กราฟกำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในอัตราส่วนประสานร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7,14 และ 28 วัน



รูปที่ 7 กราฟกำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในอัตราส่วนประสานร้อยละ 3 ปริมาณความชื้นร้อยละ 8 ที่อายุบ่ม 7,14 และ 28 วัน

เปรียบเทียบกำลังอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานซึ่งนำมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จึงทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์มีค่าที่ต่ำในช่วงแรก [17] ค่ากำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีค่าเท่ากับ 2,790 kPa และ 2,596 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556 มาตรพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์) ซึ่งกำหนดกำลังรับแรงอัดต้องไม่น้อยกว่า 2,413 kPa โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า ปริมาณวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก) ปริมาณที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์

4. บทสรุป

จากการศึกษากำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขยะหินคลุกผสมซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.71, ค่าขีดจำกัดเหลวและพลาสติกมีค่าเท่ากับ NP, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 20.09 kN/m^3, ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 8 และสามารถจำแนกเป็นดินทรายขนาดคละกันดี (SW) ตามระบบเอกภาพ Unified Soil Classification System (USCS)

2. กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2,790 kPa, 3,501 kPa และ 4,584 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 2,596 kPa, 2,781 kPa และ 3,079 kPa ตามลำดับ

3. กำลังแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 239 kPa, 273 kPa และ 335 kPa ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 185 kPa, 248 kPa และ 299 kPa ตามลำดับ

4. เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานทางกรมทางหลวง พบว่าปริมาณวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์-ไฮดรอลิก) ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 3 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางกรมทางหลวง ซึ่งกำหนดกำลังรับแรงอัดต้องไม่น้อยกว่า 2,413 kPa

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ส่วนสำรวจและออกแบบ สำนักงานทางหลวงที่ 10 (นครราชสีมา) ที่สนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้, บริษัท สินสนมเจริญ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ใช้ในการทำวิจัย (โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 207 สาย บ.วัด – อ.ประทาย จ.นครราชสีมา) และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและใช้สถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวง (2543). การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ มาตรฐานวัสดุงานทาง (ทล.ม.-213)กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[2] วสันต์ ปั้นสังข์, บารเมศ วรรธนะภูติ, กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์ และจิรโรจน์ ศุกลรัตน์ (2553). คุณสมบัติด้านความคงทนและความแข็งแรงของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์. วารสารวิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 23 ฉบับที่ 74 หน้า 75-86.

[3] สุภัณกฤษ ชาชำนาญ (2562). กำลังอัดและความคงทนของหินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[4] อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ (2559). ข้อควรคำนึงถึงปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุสร้างทาง. งานแสดงเทคโนโลยี และการประชุมวิศวกรรมปฐพีแห่งชาติ ครั้งที่ 3. โรงแรมเอส 31, กรุงเทพฯ. หน้า 98-111.

[5] สาโรจน์ พระวงศ์ (2557). ไฮดรอลิกซีเมนต์ ทางเลือกของอนาคตคอนกรีต, scgbuildingmaterials : http:// scgbuildingmaterials .com/th/Livingldea/NewBuild/ไฮดรอลิกซีเมนต์. aspx

[6] ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และอนันต์ ทวีวรรณสดใส (2543). คุณสมบัติความเค้นความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกาลังรับแรงอัดแนวดิ่ง รายงานฉบับที่ วพ. 179 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[7] ชยธันว์ พรหมศร, เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศิรารมย์ และ วรภัทร เกตุนุติ (2546). คุณสมบัติความความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย รายงานฉบับที่ วพ. 204 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[8] กัมปนาท บุญทัน (2542). การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของหินคลุกด้วยซีเมนต์ปอร์จแลนด์ ประเภทที่ 1 วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยรังสิต.

[9] ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงษ์สุข (2556). การปรับปรุงหินคลุกด้อยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 24 ฉบับที่ 3

[10] กรมทางหลวง (2560). มาตรฐานวิธีการทดลอง (ทล.-ท.) กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[11] ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และอนันต์ ทวีวรรณสดใส (2543). การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี DIRECT INTENSILE TEST เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ รายงานฉบับที่ วพ. 167 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[12] American Society for Testing and Materials (2018). ASTM D5102 Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures. ASTM INTERNATIONAL.

[13] American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D56931-17 Standard Test Methods for Indirect Tensile Strength of Asphalt Mixtures. ASTM INTERNATIONAL.

[14] American Society for Testing and Materials (2011). ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM INTERNATIONAL.

[15] กรมทางหลวง (2560). มาตรฐานงานทาง (ทล.-ม.) ทล.-ม.203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

[16] สุดนิรันดร์ เพชรัตน์ (2550). การศึกษากำลังในการรับแรงเฉือนของหินฝุ่นผสมซีเมนต์โดยการทดสอบ CBR. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. พิษณุโลก.

[17] สุภิชาติ เจนจิระปัญญา, ปิติศานต์ กร้ำมาตร (2559). การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้กากวัสดุอุตสาหกรรม วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,ปีที่ 7, ฉบับที่ 2