

การเสริมกำลังวัสดุหินเวียนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยด้วยแถบพลาสติกหินเวียน สำหรับชั้นพื้นทาง และรองพื้นทางถนน

Recycled Materials Reinforced by Geopolymer from Bagasse Ash and Recycled Plastic for Sub-Base and Base Material

กันตพงศ์ จันทะนันท์ (Kantapong Jantanan)^{1*} รัตมนี นันทสาร (Ratamane Nuntasarn)**

(Received: March 23, 2022; Revised: June 22, 2022; Accepted: June 23, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาหมุนเวียนใช้แทนที่วัสดุใหม่จากแหล่งธรรมชาติสำหรับงานก่อสร้างและซ่อมแซมถนนชั้นพื้นทาง (Base) และรองพื้นทาง (Subbase) โดยการนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP) และมวลรวมหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Recycle Crushed Rock, RCR) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยและเสริมแรงด้วยแถบพลาสติกรีไซเคิล (Plastic strip) จากขยะพลาสติก โดยการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR ปริมาณเถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash, BA) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในสารละลายอัลคาไลน์ ปริมาณพลาสติกและขนาดพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง จากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆข้างต้นพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางคือ อัตราส่วนผสมระหว่าง RCR:RAP เท่ากับ 1:1 เถ้าขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และเสริมแรงด้วยแถบพลาสติกในปริมาณ 0.025 ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ขนาดความกว้าง 2 ซม. ยาว 6 ซม. และ ความกว้าง 0.5 ซม. ยาว 3 ซม. ซึ่งเป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและ ลดปริมาณขยะตกค้างจากถุงพลาสติกภายในประเทศ

ABSTRACT

Research investigated the possibility of recycling materials from the pavement instead of the natural aggregate. Two recycled materials as recycled asphaltic pavement (RAP) and recycled crushed rock (RCR) from the pavement, were investigated. These recycled materials were stabilized by using geopolymers from bagasse ash. Moreover, these recycled materials were reinforced by recycled plastic strips from plastic waste. Therefore, this study was to study the effect of the mixture ratios between RAP: RCR, the percentage of bagasse ash, the concentration of NaOH in alkaline solution, size and mass of recycled plastic sheets for the base and sub-base material according to the Department of Highways' standards. It was found that the suitable mix ratio for a base and sub-base material was a 1:1 ratio between RCR and RAP, five percent of bagasse ash, and 7.5 percent of an alkaline solution by weight. Moreover, the suitable amount of the plastic strip is 0.025 to 0.1 percent by weight in the size of 2 centimeters in width, 6 centimeters in length, and 0.5centimeters in width, 3 centimeters in length. This material will help reduce the destruction of natural resources and the amount of residual waste from plastic bags in the country.

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ เถ้าขานอ้อย แถบพลาสติกรีไซเคิล

Keywords: Geopolymers, Bagasse ash, Recycled plastic strips

¹Corresponding author: kantapongence@gmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ในแต่ละวันผู้บริโภคมีการใช้พลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ขยะในชุมชนซึ่งเป็นพลาสติกที่เกิดจากการใช้งานแล้วทิ้งไปมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น การบริโภคพลาสติกในรูปแบบนี้เรียกว่ารูปแบบเชิงเส้น กล่าวคือมีการใช้งานพลาสติกเพียงครั้งเดียวแล้วนำไปกำจัดทิ้ง ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณ 300 ล้านเมตริกตันต่อปี [1] และจากรายงานสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency, EPA) แสดงให้เห็นว่าขยะพลาสติกจำนวนหลายตันที่เกิดขึ้นต่อปีมีเพียง 7% เท่านั้นที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 8% เฝ้า และที่เหลือจะถูกฝังกลบ ถึงแม้จะมีการรณรงค์ให้มีการลดหรือดักจับพลาสติกแต่ถึงกระนั้นก็ยังทำให้เกิดความท้าทายทางด้านการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเช่น การลดพื้นที่ฝังกลบขยะในเขตเมือง ขยะพลาสติกในแม่น้ำและ ในทะเล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาทางเลือกในการใช้ขยะพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของวัสดุพลาสติกและยังช่วยรักษาสภาพแวดล้อมที่เสื่อมโทรม

แนวคิดเรื่องการเสริมกำลังหรือคุณสมบัติของดินหรือวัสดุผสมรวมด้วยแถบพลาสติกอาจเป็นพัฒนาการใหม่ในทางวิศวกรรม การแสวงหาคุณสมบัติของดินและมวลรวมที่ดีขึ้น ความคุ้มค่าในการก่อสร้างและการนำขยะพลาสติกหรือวัสดุต่าง ๆ นำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในปัจจุบันการซ่อมแซมและการก่อสร้างถนนมีอัตราการเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเพื่อรองรับกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและปริมาณประชากรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการก่อสร้างและซ่อมแซมถนนในแบบเก่าจำเป็นต้องใช้วัสดุผสมรวมธรรมชาติใหม่ในปริมาณสูง ในการใช้เป็นวัสดุโครงสร้างของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของถนน แต่ทว่าในความเป็นจริงนั้น วัสดุผสมรวมธรรมชาติเหล่านี้กลับมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ ส่งผลกระทบโดยตรงกับธรรมชาติสิ่งแวดล้อมและเกิดปัญหาการขาดแคลนวัสดุ ในขณะที่ปริมาณขยะพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้งจากงานก่อสร้างนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้น การนำขยะพลาสติกและวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อทดแทนวัสดุผสมรวมจากธรรมชาติสำหรับการก่อสร้างหรือซ่อมแซมถนนในชั้นพื้นทาง (Base) และรองพื้นทาง (Subbase) โดยเป็นการนำขยะพลาสติกและวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างนำกลับมาพัฒนาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมให้ได้ตามมาตรฐานตามที่กำหนด

จากการศึกษาและการทดลองของงานวิจัยในอดีต การนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP) และมวลรวมหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Recycle Crushed Rock, RCR) มาใช้เป็นโครงสร้างถนนนั้น หากไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มวลรวมที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ โดย [2] พบว่าการใช้ RAP ผสมดินลูกรังส่งผลให้ความหนาแน่นและคุณสมบัติด้านกำลังลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] และ [4] ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยการใช้วัสดุพอโซลานมาเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ งานวิจัยของ [5], [6] และ [7] ให้ผลการศึกษาในทางเดียวกัน คือ คุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้นและสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทางได้ ในปี 2011 ได้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุโพลิเอเธอร์มอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อย โดยทำการศึกษาคูสมบัติของซีเมนต์ (Cement) และเถ้าขานอ้อยโดยวิเคราะห์เถ้าขานอ้อยด้วย X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าขานอ้อยมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก จากนั้นนำส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมกับเถ้าขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์และ 15 โมลาร์ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับโพลิเอเธอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยคือ 10 โมลาร์ และจากการศึกษานี้ทำให้สามารถนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุโพลิเอเธอร์มอร์ตาร์สำหรับการพัฒนาวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง [8] มีการศึกษาอีกว่าการนำปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบและพลาสติกจากถุงกระสอบประเภท (Polypropylene, PP) เป็นวิธีการปรับปรุงดินที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งช่วยเพิ่มกำลังอัดความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงเฉือนของดิน ดังนั้นการปรับปรุงนี้จึงช่วยเพิ่มเสถียรภาพและความทนทานของโครงสร้างพื้นฐานเช่นฐานรากและพื้นถนน [9] และยังมีมีการนำพลาสติกจากขวดนมขวดพลาสติก PET ไปใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นสูง

(High Density Polyethylene, HDPE) มาผสมกับ ทราย Dry Portage เป็นทรายขนาดกลางที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในสัดส่วนต่าง ๆ แล้วทำการทดสอบเพื่อหาค่าซีบีอาร์ (CBR) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าแถบพลาสติกที่ตัดจากขวดนมขาวขุนชนิด พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง [10] พิสูจน์ได้ว่ามีประโยชน์ในฐานะการเสริมแรงของดินในงานทางหลวงและ งานทางธรณีวิทยาที่มีน้ำหนักเบา สอดคล้องกับงานวิจัยของ [11] อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อปรับขนาดและ รูปร่างของแถบพลาสติกให้เหมาะสม ประเมินความทนทาน อายุของแถบพลาสติกและกำหนดผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่จะได้รับการใช้งาน ควรทำการทดสอบในระดับที่ใหญ่ขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าผลกระทบจากขอบเขตมีผลต่อผลการทดสอบ

จากงานวิจัยข้างต้นจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำขยะพลาสติกและวัสดุที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างต่าง ๆ มาพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวมให้ได้มาตรฐานข้อกำหนด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและซ่อมแซมโครงสร้างในชั้นพื้นทาง (Base) และรองพื้นทาง (Subbase) ของถนนและยังเป็นการนำวัสดุที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและปัญหาขยะและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแถบพลาสติกกับมวลรวมและวัสดุเหลือทิ้งในการเพิ่มคุณสมบัติให้ได้ตามมาตรฐาน
2. เพื่อช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้งจากงานก่อสร้างให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยนำมาใช้เป็นโครงสร้างของชั้นทางถนน

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาปริมาณแถบพลาสติกที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการงานก่อสร้างชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง โดยตัวอย่างตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นตัวอย่างจากงานวิจัยวัสดุหมุนเวียนที่ปรับปรุงคุณสมบัติโดยจีโอพอลิเมอร์จากเถาขานอ้อย ที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐาน การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength Test , UCS) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 203/2556 ได้แก่ตัวอย่าง มวลรวมหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Recycled Crushed Rock) ผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement) ที่อัตราส่วน 1:1 ทำการบดอัดที่การผสมสารอัลคาไลน์ในวัสดุตัวอย่างใช้ในปริมาณน้อยกว่าค่าปริมาณสารละลายที่ผสมกับวัสดุมวลรวมแล้วทำให้วัสดุมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Alkaline Liquid Content, OLC) อยู่ 3 เปอร์เซ็นต์ หรือ -3 เปอร์เซ็นต์ OLC โดยใช้จีโอพอลิเมอร์จากเถาขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ และสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 8 โมลาร์ ที่กำลังอัด 1937.17 kPa ประโยชน์จากการศึกษานี้คือการช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้งจากงานก่อสร้างถนน

จากนั้นได้ทำการออกแบบอัตราส่วนผสมในการศึกษาของงานวิจัยนี้โดยใช้ตัวอย่างดังที่กล่าวมาข้างต้นมาเสริมคุณสมบัติด้วยพลาสติกสามประเภทคือ ถุงร้อนขุน ถุงร้อนใส ถุงหิ้วแบบบาง โดยมีปริมาณและสัดส่วนความกว้างความยาว ดังตารางที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมงานทาง และวิธีการทดสอบวัสดุในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบถึงความเหมาะสมของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในโครงสร้างชั้นพื้นทางถนนซึ่งในการศึกษาได้อ้างอิงถึงข้อกำหนดทางด้านคุณสมบัติวัสดุและวิธีการทดสอบวัสดุตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีรายละเอียดดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมที่ใช้การศึกษา

วัสดุหมุนเวียนที่ใช้ในการเสริมแรงด้วยแผ่นพลาสติก	ชนิดพลาสติก	ปริมาณพลาสติก (%)	สัดส่วนของพลาสติก		
			อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว (ซม.)
วัสดุที่คัดเลือกจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว Unconfined Compressive Strength Test (UCS)	ถุงร้อนขุน (HDPE)	0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 และ 1.2	1:2		4
			1:3	2	6
	ถุงหิ้วบาง (LDPE)		1:4		8
			1:4		2
	ถุงร้อนใส (PP)		1:6	0.5	3
			1:8		4

หมายเหตุ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ซึ่งได้แก่ ถุงหิ้วบาง ถุงร้อนขุน พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ซึ่งได้แก่ ถุงพลาสติกร้อนใส ทุกตัวอย่างการทดสอบจะทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (25 °C)

ตารางที่ 2 วิธีการทดสอบ ตัวแปร และมาตรฐานที่ใช้

วิธีการทดสอบ	มาตรฐาน	การวิเคราะห์ข้อมูล	สัญลักษณ์
Compaction Test	ทล -ท 108/2517	- Optimum Moisture Content - Maximum Dry Density	OMC
Unconfined Compression Test	ทล -ท 105/2515	- Unconfined Compressive Strength - Elastic Modulus - Energy Absorption	UCS หรือ q_u E
California Bearing Ratio Test (Soak Condition)	ทล -ท 109/2517	- California Bearing Ratio Index - Swelling	CBR

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดคุณสมบัติชั้นพื้นทาง

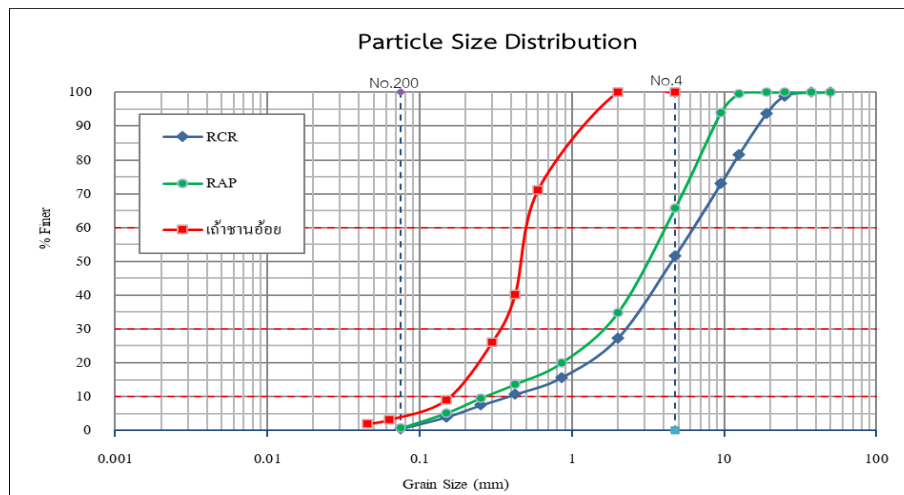
คุณสมบัติชั้นพื้นทาง	มาตรฐาน	มาตรฐาน ค่ากำลังอัดแกนเดียว (ไม่น้อยกว่า)
มาตรฐานงานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	ทล.-ม. 203/2556	2413 kPa
มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์	ทล.-ม. 204/2556	1724 kPa
มาตรฐานงานรองพื้นทางดินผสมซีเมนต์	ทล.-ม. 206/2532	689 kPa

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ (Basic Properties)

1.1 ผลการทดสอบขนาดคละ (Sieve Analysis)

ในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของหินคลุกชั้นทางเดิมรีไซเคิล (Recycled Crushed Rock) แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement) และเถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม มีผลการทดสอบตามมาตรฐานของกรมทางหลวงดังกล่าวมีค่าการกระจายของเม็ดดิน (Sieve Analysis) ซึ่งไม่สามารถแยกเป็นชนิดขนาดคละของวัสดุรวมรวมได้ โดยมีการกระจายตัวดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของขนาดมวลรวมจากการทดสอบขนาดคละ (Sieve Analysis)

1.2 ผลการทดสอบความคงทนของวัสดุ (Los Angeles Abrasion Test) ผลการทดสอบหาพิคัดเหลว

(Atterberg Limit) ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific Gravity and Absorption)

จากการทดสอบพบว่า ค่าความสึกหรอของวัสดุรวมรวมด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion test ของหินคลุกชั้นทางเดิมรีไซเคิล (Recycled Crushed Rock) และแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement) เท่ากับ 29.39 เปอร์เซ็นต์ และ 21.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556 ไม่เกินร้อยละ 40) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.48 และ 2.45 ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.29 และ 0.82 ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่าดังตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และ หินคลุกชั้นทางเดิมรีไซเคิล (RCR)

วัสดุ	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง		Percentage		Specific Gravity	Absorption (%)
	เบอร์ 4 (%)	เบอร์ 200 (%)	ค่า C_u	ค่า C_c		
RAP	65.8	0.7	14.81	2.37	2.45	0.82
RCR	51.6	0.5	17.43	2.27	2.48	2.29

1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีแสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ได้จากการเผาไหม้ของขานอ้อยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลมีปริมาณ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 88.65 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีและมีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ คือร้อยละ 92.48 หินคลุกชั้นทางเดิมรีไซเคิล (Recycled Crush Rock) มีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 36.29 มีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ คือร้อยละ 46.03 และแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement) มีปริมาณ CO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 62.29 มีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ คือร้อยละ 5.44

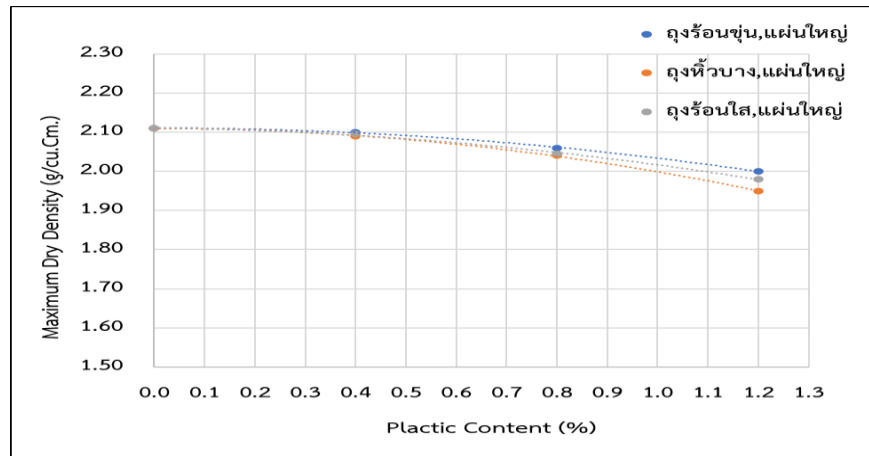
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของหินคลุกชั้นทางเดิมรีไซเคิล (Recycled Crushed Rock) , แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement) และ เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash)

Qxides (%)	Bagasse ash	RAP	RCR
Al_2O_3	2.46	1.07	7.46
SiO_2	88.65	4.09	36.29
Fe_2O_3	1.37	0.28	2.28
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	92.48	5.44	46.03

2. ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

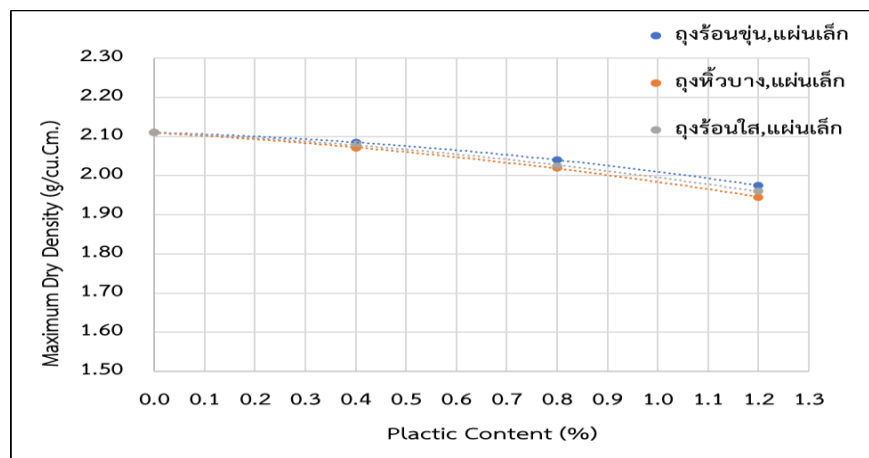
การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ของตัวอย่าง RCR ผสม RAP ที่อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เท่ากับ 1:1 ปริมาณสารละลาย -3 เปอร์เซ็นต์ OLC ปริมาณเถ้าขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ ที่เสริมแถบพลาสติกถุงร้อนชนิด HDPE

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ของการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 2 ซม. ความยาว 6 ซม. และสัดส่วนความกว้าง 0.5 ซม. ความยาว 3 ซม. จากกราฟการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 2 ซม. ความยาว 6 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการเสริมพลาสติกส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณพลาสติกและยังแสดงให้เห็นอีกว่าชนิดของพลาสติกมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นแห้งโดยถุงร้อนชนิดความหนาแน่นแห้งสูงสุดและถุงหิ้วบางมีความหนาแน่นแห้งต่ำที่สุด



ภาพที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 2 ซม. ความยาว 6 ซม.

จากกราฟการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 0.5 ซม. ความยาว 3 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเสริมพลาสติกส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกับความกว้าง 2 ซม. และยังแสดงให้เห็นอีกว่าชนิดของพลาสติกมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นแห้งโดยดุงร้อนชุ่มมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดและดุงห้วยบางมีความหนาแน่นแห้งต่ำที่สุด



ภาพที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 0.5 ซม. ความยาว 3 ซม.

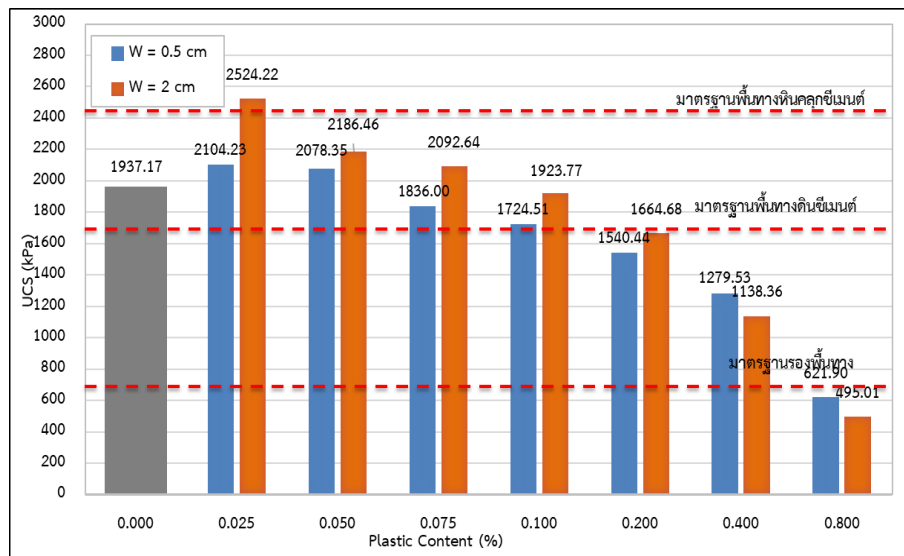
3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

3.1 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และ ค่า Elastic Modulus (E)

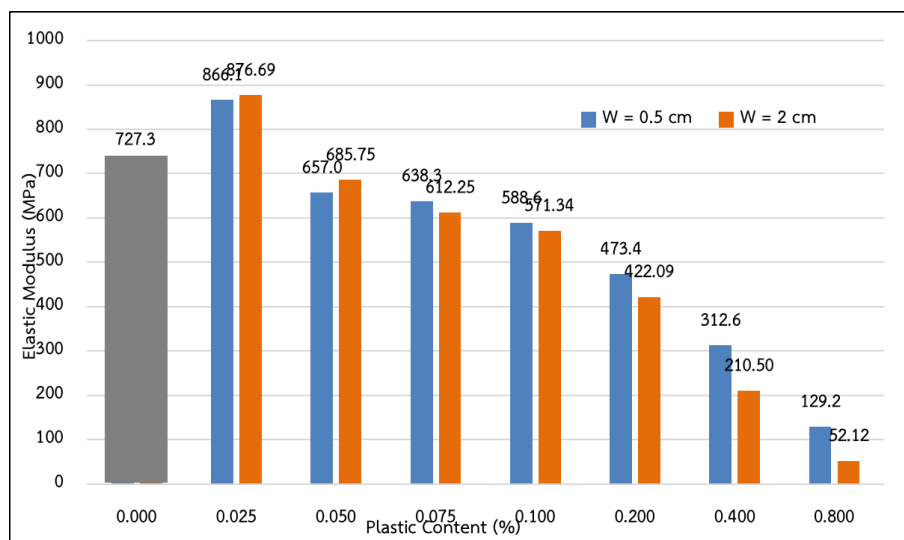
โดยพิจารณาตัวอย่าง RCR ผสม RAP ผสมเถ้าขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ ใช้ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ -3 เปอร์เซ็นต์ OLC ซึ่งประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายซิลิกาเกต (Na₂SiO₃) ที่อัตราส่วน 1:1 โดยความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และเสริมแรงด้วยแถบพลาสติกชนิด ปริมาณ และขนาด ต่างๆ

จากภาพที่ 4 – 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของปริมาณพลาสติกต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่า Elastic Modulus (E) ซึ่งพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด ที่ปริมาณพลาสติก 0.025 เปอร์เซ็นต์ ที่สัดส่วนความ

กว้าง 2 ซม. ความยาว 6 ซม. มีค่าสูงกว่าวัสดุตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยแถบพลาสติก ซึ่งกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล-ม. 203/2556 กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 2413 kPa) แต่เมื่อผสมด้วยปริมาณพลาสติกมากกว่า 0.025 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัด จะมีแนวโน้มลดลง แต่ยังคงผ่านมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล-ม. 204-2556 กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 1724 kPa) ในบางอัตราส่วน ได้แก่ พลาสติกขนาด 2 ซม. ในปริมาณพลาสติก 0.05 เปอร์เซ็นต์ 0.075 เปอร์เซ็นต์ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ พลาสติกขนาด 0.5 ซม. ในปริมาณพลาสติก 0.025 เปอร์เซ็นต์ 0.05 เปอร์เซ็นต์ 0.75 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนผสมที่ปริมาณพลาสติกไม่เกิน 0.4 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดเกินกว่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล-ม. 203/2556 กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 689 kPa.) ส่วนค่า Elastic Modulus แสดงผลในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังรับแรงอัด

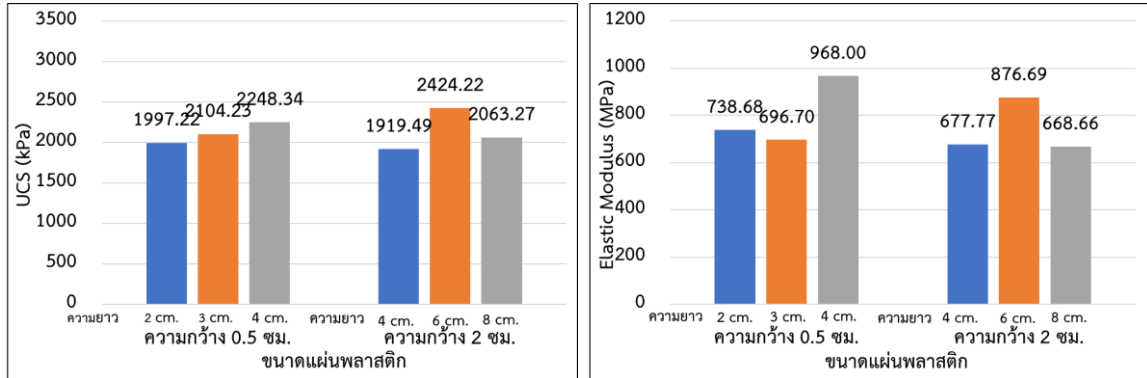


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) และปริมาณของแถบพลาสติกจากถุงร้อนขุนชนิด HDPE



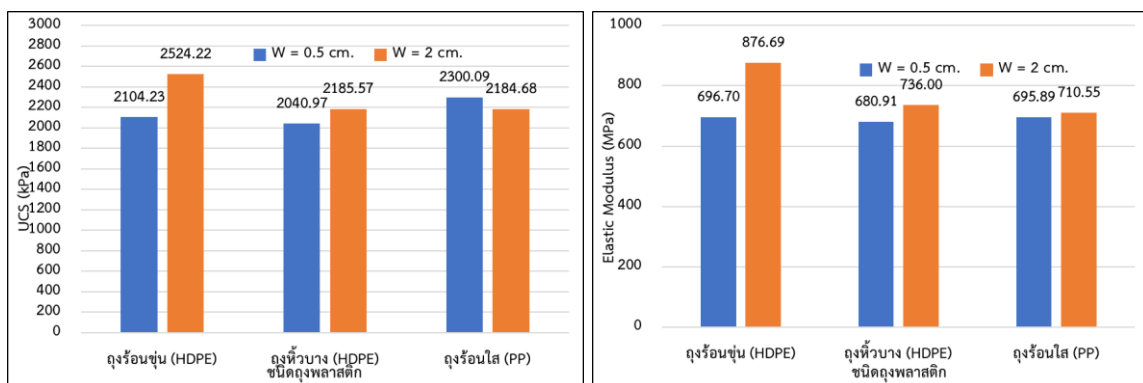
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Elastic Modulus (E) และปริมาณของแถบพลาสติกจากถุงร้อนขุนชนิด HDPE

อิทธิพลของตัวแปรด้านขนาดแถบพลาสติกต่อกำลังค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและ Elastic Modulus (E) จากการทดสอบวัสดุที่มีอัตราส่วนผสมของแถบพลาสติกรีไซเคิลจากถุงร้อนชนิด HDPE ในปริมาณ 0.025% เพื่อศึกษาความยาวของแผ่นพลาสติกที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ที่ส่วนผสมที่ใช้พลาสติกกว้าง 0.5 ซม. จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามความยาวของแผ่นพลาสติก ส่วนพลาสติกที่กว้าง 2 ซม. จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นที่ความยาว 6 ซม. และมีค่าลดลงที่ความยาว 8 ซม. ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความยาวพลาสติกที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความยาว 4 – 6 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 6



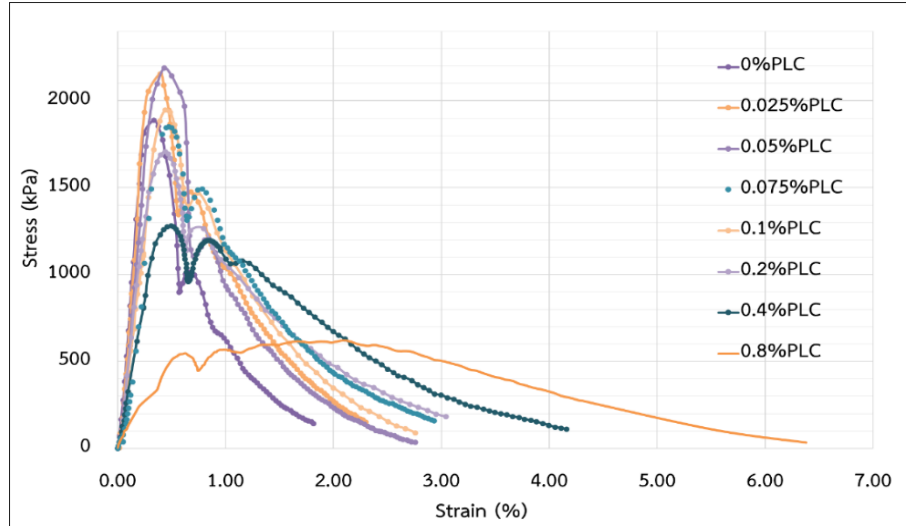
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของขนาดแถบพลาสติกรีไซเคิลต่อค่า UCS (ซ้าย) และ E (ขวา)

อิทธิพลของตัวแปรด้านชนิดของแถบพลาสติกรีไซเคิลต่อกำลังค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและ Elastic Modulus (E) โดยพลาสติกที่เลือกใช้ทดสอบ พลาสติกขนาด 2 ซม. ยาว 6 ซม. และ พลาสติกขนาด 0.5 ซม. ยาว 3 ซม. ในปริมาณ 0.025 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบพบว่า ที่พลาสติกขนาด 2 ซม. ถุงร้อนชนิด HDPE มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดรองลงมาคือถุงร้อนใสและถุงหิ้วบางตามลำดับ ส่วนการทดสอบที่พลาสติกขนาด 0.5 ซม. ถุงร้อนใสมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด รองลงมาคือถุงร้อนชนิด HDPE และถุงหิ้วบาง ตามลำดับ ซึ่งพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ถือว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งทางผู้วิจัยจึงได้คัดเลือก ถุงหิ้วแบบบาง ชนิด HDPE ไปทำการศึกษาต่อการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ต่อไป เนื่องจากถุงหิ้วแบบบางมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดของทั้งสองขนาดที่ได้ศึกษา

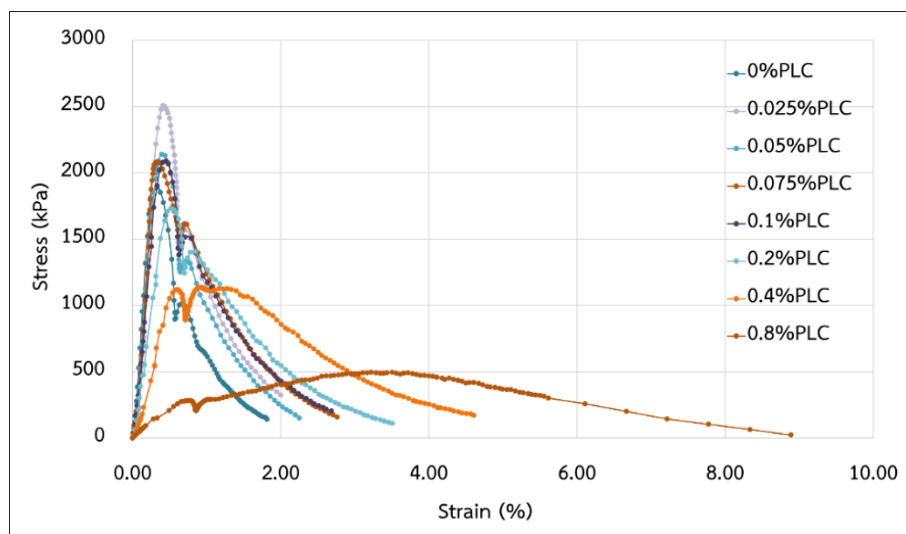


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของชนิดพลาสติกรีไซเคิลต่อค่า UCS (ซ้าย) และ E (ขวา)

จากภาพที่ 8 - 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของปริมาณพลาสติกพบว่า ค่า Strain ที่จุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติก ซึ่งมีนัยสำคัญที่ว่า การเสริมแรงด้วยแถบพลาสติกส่งผลให้วัสดุตัวอย่างมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยแถบพลาสติก



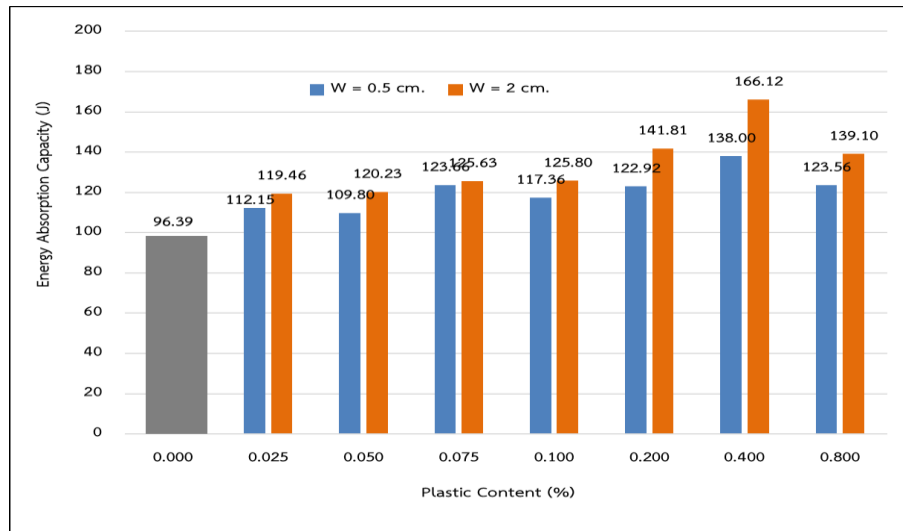
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 0.5 ซม. ยาว 3 ซม.



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของปริมาณพลาสติกที่สัดส่วนความกว้าง 2 ซม. ยาว 6 ซม.

3.2 ค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption Capacity)

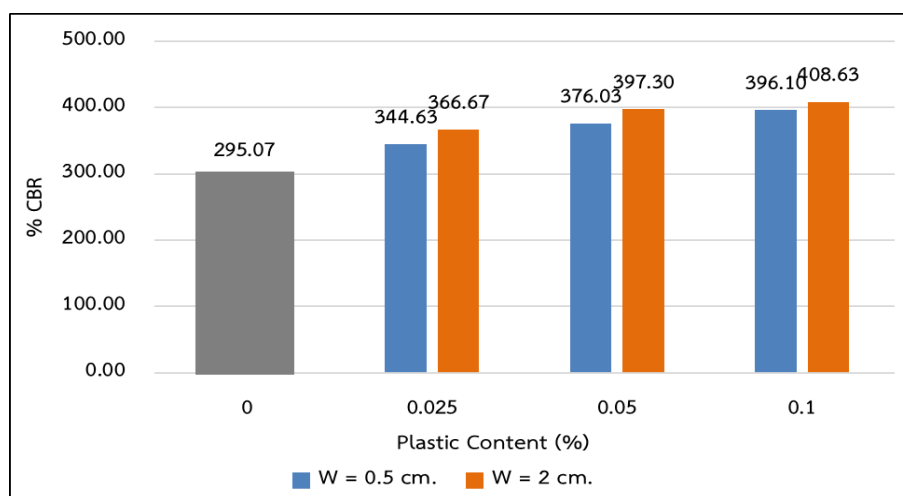
จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานและปริมาณพลาสติกของถุงร้อนขุนชนิด HDPE ที่พลาสติกขนาด 2 ซม. ยาว 6 ซม. และ พลาสติกขนาด 0.5 ซม. ยาว 3 ซม. ดังภาพที่ 10 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกซึ่งค่าการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแถบพลาสติกโดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณพลาสติกเท่ากับ 0.4 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงและยังพบอีกว่าตัวอย่างพลาสติกขนาด 2 ซม. ค่าการดูดซับพลังงานมากกว่าตัวอย่างพลาสติกขนาด 0.5 ซม.



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของปริมาณแถบพลาสติกที่ใช้เคลือบต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ

4. ค่า CBR (California Bearing Ratio Test)

จากการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Value) ของวัสดุที่บดอัดแน่นโดยใช้การทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak Condition) ด้วยวิธีบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุ 7 แล้วนำไปแช่น้ำในระยะเวลา 4 วันพร้อมกับวัดการบวมตัวของตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตัวอย่างโดยคัดเลือกพิจารณาตัวแปรของตัวอย่างทดสอบซึ่งได้เลือกตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดของพลาสติกทั้งสามชนิดคือ ถุงหิ้วแบบบางชนิด HDPE ที่พลาสติกขนาด 2 ซม. ยาว 6 ซม. และ พลาสติกขนาด 0.5 ซม. ยาว 3 ซม. ที่ปริมาณพลาสติก 0.025 เปอร์เซ็นต์ 0.05 เปอร์เซ็นต์ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมแถบพลาสติกเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบแนวโน้ม หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 11 พบว่าการเสริมแถบพลาสติกส่งผลให้ ค่าซีบีอาร์ มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกและที่พลาสติกขนาด 2 ซม. มีค่ามากกว่าพลาสติกขนาด 0.5 ซม. โดยทุกอัตราส่วนผสมมีค่าเกินมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล-ม. 203/2556 ค่าซีบีอาร์ ไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ของ % CBR และ ปริมาณพลาสติกโดยสัดส่วนความกว้าง 2 ซม. ความยาว 6 ซม. และความกว้าง 0.5 ซม. ความยาว 3 ซม. ถุงหิ้วบางชนิด HDPE

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเสริมกำลังวัสดุหินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยด้วยแถบพลาสติกหินเหนียว สำหรับชั้นพื้นทาง และรองพื้นทางถนน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) พบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุจะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอัตราส่วนสอดคล้องกับ [12] และยังพบอีกว่าชนิดของพลาสติก มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุด้วยเช่นกัน โดยวัสดุที่เสริมแรงด้วยแถบพลาสติกชนิดร้อนชั้นส่งผลให้วัสดุมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด ส่วนหญ้าหิวบางมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด

2. ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS), ค่า Elastic Modulus (E) และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (E_D)

จากผลการทดสอบการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) สามารถหาความสัมพันธ์ของชนิด ขนาด และปริมาณของพลาสติก ที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ค่า Elastic Modulus (E) และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (E_D) เมื่อพิจารณาถึงตัวแปรด้านปริมาณของแถบพลาสติกพบว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุที่เสริมแรงด้วยแถบพลาสติกสีเขียวที่พลาสติกขนาด 2 ซม. ยาว 6 ซม. ในปริมาณ 0.025 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าวัสดุตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยแถบพลาสติก ซึ่งค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล-ม. 203/2556, กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 2413 kPa) แต่เมื่อผสมด้วยปริมาณพลาสติกมากกว่า 0.025 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลง แต่ยังคงผ่านมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นดินซีเมนต์ (ทล-ม. 204/2556, กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 1724 kPa) ในบางอัตราส่วน ได้แก่ ปริมาณพลาสติกที่ 0.05 เปอร์เซ็นต์, 0.075 เปอร์เซ็นต์, 0.1 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนผสมที่ปริมาณพลาสติกไม่เกิน 0.4 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดเกินกว่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล-ม. 203/2556, กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 689 kPa.) ซึ่งค่า Elastic Modulus มีแนวโน้มเดียวกับกับค่ากำลังรับแรงอัดและ จากค่า Strain ที่จุดสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงด้วยแถบพลาสติก ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกจนถึง 0.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแถบพลาสติกสามารถไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของมวลรวมจึงส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น [13] และหลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณพลาสติกที่มากเกินไปส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง ประกอบกับไปขัดขวางการเชื่อมประสานของจีโอโพลิเมอร์ และจากการพิจารณาตัวแปรด้านขนาดของแถบพลาสติกต่อกำลังค่ากำลังรับแรงอัด และ Elastic Modulus (E) พบว่า ความยาวพลาสติกที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความยาว 4 ถึง 6 ซม. ส่วนตัวแปรด้านชนิดพลาสติกที่พบว่า พลาสติก ทั้ง 3 ชนิด ไม่มีนัยสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่า Elastic Modulus และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน จากที่กล่าวมาการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกจึงช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ซึ่งสอดคล้องกับ [14-15]

3. ค่า ซี.บี.อาร์ (CBR)

จากการทดสอบพบว่า ค่า ซี.บี.อาร์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกตั้งแต่ 0.025 ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กับค่าการดูดซับพลังงาน โดยอัตราส่วนผสมที่มีการเสริมแรงด้วยแถบพลาสติกจะมีค่าซีบีอาร์สูงกว่าวัสดุที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยแถบพลาสติก และยังพบอีกว่าค่าซีบีอาร์ของวัสดุในทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษามีค่าสูงกว่ามาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกของกรมทางหลวง (ทล-ม.201/2544 CBR มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) อยู่ประมาณ 4-5 เท่าตัว ซึ่งสอดคล้องกับ [16-17]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.รัตมณี นันทสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.พงศกร พรหมรัตนศิลป์ และ ดร.ศุภากร ตีระพัฒน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยอบรมสั่งสอน ดูแล และห่วงใย รวมถึงทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ และเป็นแรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถประสบความสำเร็จได้

เอกสารอ้างอิง

1. Singh P, Sharma VP. Integrated plastic waste management: environmental and improved health approaches. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35: 692-700.
2. Akinwumi II. Plasticity strength and permeability of reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2014; 5(6): 631-636.
3. Poon CS, Chan D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*. 2006; 20(8): 578-585.
4. Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM. Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: Laboratory and field evaluation. *J. Mater. Civ. Eng.* 2014; 26(2): 349-357.
5. Taha R, Al-Harthy A, Al-Shamsi K, Al-Zubeidi M. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of materials in civil engineering*. 2002; 14(3): 239-245.
6. Mohammadinia A, Arulrajah A, Sanjayan J, Disfani MM, Bo MW, Darmawan S. Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition materials in pavement base and subbase applications. *Journal of materials in civil engineering*. 2014; 27(6): 04014186.
7. Saha DC, Mandal JN. Laboratory investigations on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for using it as base course of flexible pavement. *Procedia engineering*. 2017; 189: 434-439.
8. Rukzon S, Ngenprom N. The development of rice husk ash and bagasse ash based geopolymeric materials. 2011.
9. Muntohar AS, Widiarti A, Hartono E, Diana W. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. *Journal of materials in civil engineering*. 2013; 25(9): 1260-1270.
10. Benson CH, Khire MV. Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1994; 120(5): 838-855.
11. Mallikarjuna V, Mani TB. Soil stabilization using plastic waste. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2016; 5(5): 391-394.



12. Arulrajah A, Yaghoubi E, Wong YC, Horpibulsuk S. Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: Resilient moduli and strength characteristics. *Construction and building materials*. 2017; 147: 639-647.
13. Choudhary AK, Jha JN, Gill KS. A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates journal for engineering research*. 2010; 15(1): 51-57.
14. Mohseni E, Khotbehsara M, Naseri F, Monazami M, Sarker P. Polypropylene fibre reinforced cement mortars containing rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials*. 2016; 111: 429-439.
15. Consoli NC, Montardo JP, Prietto PDM, Pasa GS. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2002; 128(6): 462-472.
16. Tejeswini K. Engineering behavior of soil reinforced with plastic strips. *Research and Development*. 2013; 3(2): 83-88.
17. Neopanay M, Ugyen KW, Tenzin S, Chamberlin KS. Stabilization of soil by using plastic wastes. *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*. 2012; 2(2): 461-466.
18. Department of Highways. Modified Crushed Rock Base. Standard No. DH-S 203/2556.
19. Department of Highways. Soil Cement Base. Standard No. DH-S 204/2556.
20. Department of Highways. Soil Cement Subbase. Standard No. DH-S 206/2532.
21. Department of Highways. Modified Proctor. Standard No. DH-S 108/2517.
22. Department of Highways. Unconfined Compression Test. Standard No. DH-S 105/2515.
23. Department of Highways. California Bearing Ratio Test. Standard No. DH-S 109/2517.